分类号_____ 密级_____

U D C_____ 编号_____

清 华 大 学

博 士 后 研 究 工 作 报 告

电力电子装置的互联网化与智能化研究

杨 洁

清华大学 （北京）

2017 年 12 月

电力电子装置的互联网化与智能化研究

博　士　后　姓　名：杨洁

流动站（一级学科）名称：控制科学与工程

专　业（二级学科）名称：控制理论与控制工程

合　作　导　师：李军（研究员）

研究工作起止日期 2016 年 1 月-2017 年 12 月

摘 要

智能化的电力电子装置是建设智能电网与能源互联网的重要基础，对电力电子装置的智能化研究具有重要的现实意义。为了推进电力电子装置智能化理论研究和实用化研制，本报告首先对目前电力电子装置智能化研究现状进行了综述。按功能不同对电力电子装置进行了分类，针对不同类别，分析了电力电子装置智能化的主要技术如传感、通信、控制等方面的应用进展。在分析电力电子装置智能化智能监控、故障诊断、状态评估等研究方向的基础上，总结了电力电子装置智能化研究多方面的应用情况。

针对电力电子装置智能监控技术展开了研究，提出了一种电力电子装置智能监控系统结构框架，通过对有效值计算方法的本质分析，设计了全新的算法完成原始信号到有效值的直接映射，避免了累加求和以及求平方根的计算。该算法可以通过软件实现降低控制器的计算压力，也可以通过 FPGA 硬件实现将计算压力完全转移到 DSP 之外。提出一种多台 STATCOM 独立运行的基于互联网通信系统的无功补偿方法，能够实现各 STATCOM 设备协调输出，大大减少资源浪费。并且当某一台 STATCOM 发生故障时，可通过通信协调使得其它 STATCOM 发出无功补偿，保证电网安全。

综合考虑了高压、大容量 STATCOM 的状态评估问题，建立了 STATCOM 两级多模块状态评估模型。首先构建了 STATCOM 系统的指标体系，将指标体系按变压器组、开关组、功率模块等分为 5 个模块，确定了每一模块的评估指标。其次建立了 STATCOM 两级状态评估模型，一级评估模型选用对 STATCOM 各设备状态最重要的指标，同时也是容易取得数据的指标。为进一步保证评估的正确性，二级评估模型综合考虑了环境等因素的影响。最后给出了两级评估模型的评估流程。

为提高静止同步补偿器(STATCOM)控制系统动态性能和鲁棒性，提出一种基于高阶滑模控制的 STATCOM 有限时间鲁棒控制方法。该方法首先对强耦合、非线性的 STATCOM 系统采用逆系统的方法进行线性化解耦，根据解耦后的系统状态特性，对无功补偿电流与直流侧电容电压分别采用超螺旋与螺旋算法进行控制器设计，这两种控制方法不仅在有限时间内，分别快速稳定无功补偿电流与直流侧电压，还对系统不确定性具有一定的鲁棒性。

针对具有未知上界不确定性的全桥逆变器的稳定性控制，提出了基于参数自适应的二阶滑模螺旋改进控制算法，解决了二阶滑模控制方法应用中因系统不确定性的上界未知而导致的控制器参数难以选择的问题。通过对螺旋算法的控制器参数设计自适应参数控制器，不仅实现了参数根据系统状态的自动调节，而且同时实现了对具有未知上界不确定性的完全补偿。将改进

后的方法应用于全桥逆变器的输出控制中。

对传统的超螺旋算法，增加了补偿控制器和自适应参数控制器，一方面使得系统存在具有未知上界不确定性时，实现系统有限时间稳定性控制，另一方面方便了控制器参数的选择，避免参数过大造成的系统不稳定情况。将改进的超螺旋算法与螺旋算法分别应用与微电网并网控制与孤岛控制中。

关键词：电力电子装置；智能化；智能监控；滑模控制；高阶滑模

Abstract

Intelligent power electronics device is the important foundation for smart grid and energy Internet. It is vitally important and has practical significance to carry out research on intelligent power electronics device. In order to promote the theoretical research and practical development of intelligent power electronics devices, in this paper, current progress of intelligent power electronics device is surveyed. Power electronics devices are classified according to their major functionalities. For each class, supporting techniques are discussed such as sensing, communication, automatic control and so on. Based on the analysis of research directions of intelligent monitoring, fault diagnosis and condition assessment, the application situation of intelligent power electronics devices is summarized. In the end, the upcoming trend of research is estimated, and suggestions on some urgent problems are provided.

针对电力电子装置智能监控技术展开了研究，提出了一种电力电子装置智能监控系统结构框架，通过对有效值计算方法的本质分析，设计了全新的算法完成原始信号到有效值的直接映射，避免了累加求和以及求平方根的计算。该算法可以通过软件实现降低控制器的计算压力，也可以通过 FPGA 硬件实现将计算压力完全转移到 DSP 之外。提出一种多台 STATCOM 独立运行的基于互联网通信系统的无功补偿方法，能够实现各 STATCOM 设备协调输出，大大减少资源浪费。并且当某一台 STATCOM 发生故障时，可通过通信协调使得其它 STATCOM 发出无功补偿，保证电网安全。

综合考虑了高压、大容量 STATCOM 的状态评估问题，建立了 STATCOM 两级多模块状态评估模型。首先构建了 STATCOM 系统的指标体系，将指标体系按变压器组、开关组、功率模块等分为 5 个模块，确定了每一模块的评估指标。其次建立了 STATCOM 两级状态评估模型，一级评估模型选用对 STATCOM 各设备状态最重要的指标，同时也是容易取得数据的指标。为进一步保证评估的正确性，二级评估模型综合考虑了环境等因素的影响。最后给出了两级评估模型的评估流程。

In order to improve the dynamic performance and robustness of the static synchronous compensator (STATCOM) control system, a STATCOM finite time robust control method based on higher order sliding mode control is proposed. Firstly, the strong coupling, nonlinear STATCOM system was linear

decoupled by inverse system method. Then, twisting algorithm and super-twisting algorithm were adopted in reactive power compensation current and DC side capacitor voltage respectively. The two control methods not only compensate reactive power current and DC side capacitor voltage rapidly in limited time but also have some robustness to the system uncertainties. Simulation results show the effectiveness of the proposed method.

There is a difficult problem about setting the parameters for the controller in the stability control of a Full-Bridge Inverter due to its unknown upper bound. To solve this issue, an Improved Second-order Sliding Mode Twisting Algorithm based on Adaptive Parameter has been proposed and simulated. By adding the Adaptive Parameter method into the traditional Second-order Sliding Mode Twisting Controller, this new designed controller not only automatically regulates its parameters according to the states of system but also fully compensates the uncertainty owning to the un-known upper bound. Applying and simulating the improved controller in the output control of Full-Bridge Inverter illustrates that the system can export the target value of voltage and current in finite time. Compared with traditional Second-order Sliding Mode Twisting Algorithm, this improved algorithm, though under the existence of uncertainty of unknown upper bound, can effetely guarantee the system's finite-time stability.

对传统的超螺旋算法，增加了补偿控制器和自适应参数控制器，一方面使得系统存在具有未知上界不确定性时，实现系统有限时间稳定性控制，另一方面方便了控制器参数的选择，避免参数过大造成的系统不稳定情况。将改进的超螺旋算法与螺旋算法分别应用与微电网并网控制与孤岛控制中。

Keywords:

目录

第 1 章　绪论 1

1.1 研究的目的和意义 1
1.2　电力电子装置功能分类 2
1.2.1　FACTS 技术 2
1.2.2　HVDC 技术 3
1.2.3　电能质量技术 3
1.2.4　固态开关技术 4
1.2.5　能量路由器 4
1.2.6　储能技术 5
1.2.7　变频器 5
1.3　智能化基础技术 5
1.3.1　传感器技术 5
1.3.2　通信技术 6
1.3.3　分布式计算 6
1.3.4　控制 6
1.3.5　数据流技术 7
1.3.6　数据挖掘 7
1.3.7　物联网技术 7
1.4　电力电子装置智能化研究方向 8
1.4.1　智能监控 8
1.4.2　故障诊断 8
1.4.3　状态评估 9
1.4.4　预测与预警 10
1.4.5　可视化技术 10
1.5　电力电子装置智能化应用 11
1.5.1　设备维护运维 11
1.5.2　储能能量管理 11
1.5.3　网络化电能质量治理 12
1.5.4　风光互补监控 12
1.5.5　需求侧管理 13
1.5.6　家庭能源管理 13
1.5.7　智能充电系统 13
1.6　电力电子智能化研究发展方向 14
1.7 本报告内容安排 15

第 2 章　研究的基础理论 17

2.1 传统及高阶滑模控制定义 17
2.1.1 滑模变结构控制定义 17
2.1.2 高阶滑模控制定义 18
2.2 传统与高阶滑模控制发展历程及问题 20

2.2.1 传统滑模控制发展历程及所遇到的问题 20
2.2.2 高阶滑模控制发展历程及所遇到的问题 20
2.2.3 高阶滑模与自适应控制方法 21
2.3 高阶滑模控制相关定理与算法 21
2.3.1 相关稳定性定义和定理 21
2.3.2 几种高阶滑模控制方法 23
2.3.3 自适应方法 27

第 3 章 电力电子装置智能监控技术研究 29

3.1 电力电子装置智能监控技术及方案设计 29
3.1.1 电力电子装置监控系统结构--分层分布式结构 29
3.1.2 监控软件系统主要功能 32
3.2 基于 FPGA 的电力信号有效值大规模并行计算 33
3.2.1 电力信号有效值计算方法问题 35
3.2.2 利用 FPGA 实现大规模并行计算电力信号有效值 36
3.2.3 实验结果和结果分析 38
3.3 基于互联网通信的多 STATCOM 系统 41
3.3.1 基于互联网通信的无功补偿方案 42
3.3.2 具体实施方式 44

第 4 章 电力电子装置状态检修技术研究及方案设计 46

4.1 国内外状态检修研究与应用情况 46
4.1.1 国外电力设备状态检修开展情况 46
4.1.2 国内电力设备状态检修开展情况 46
4.2 电力设备状态检修的关键技术 47
4.2.1 在线监测技术 47
4.2.2 状态评价技术 49
4.2.3 电力设备状态检修的相关策略 50
4.3 电力电子装置状态综合评估指标体系的研究 51
4.3.1 电力电子装置状态评估体系建立的原则 51
4.3.2 超大容量 STATCOM 状态评估体系的建立 53
4.3.3 STATCOM 设备安全状态评估指标分析 54
4.4 STATCOM 评估模型的建立 57
4.4.1 STATCOM 一级评估模型的建立 58
4.4.2 STATCOM 二级评估模型的建立 58
4.4.3 评估流程 59

第五章 基于高阶滑模的 STATCOM 系统有限时间鲁棒控制 61

5.1 引言 61
5.2 STATCOM 系统数学模型 62
5.3 STATCOM 模型处理 63
5.4 STATCOM 高阶滑模控制器设计 65

5.5 稳定性分析 **65**
5.6 仿真验证 **66**
5.6.1 与传统滑模方法对比 66
5.6.2 与积分滑模控制方法对比 66
5.7 结论 **71**

第六章 基于改进型高阶滑模的全桥逆变器鲁棒控制研究 **73**

6.1 引言 **73**
6.2 全桥逆变器模型 **75**
6.3 改进的螺旋算法 **76**
6.4 稳定性分析 **77**
6.5 仿真验证 **78**
6.6 结论 **82**

第七章 基于改进的高阶滑模控制的微电网稳定控制研究 **83**

7.1 引言 **83**
7.1.1 微电网的基本结构 83
7.1.2 微电网的研究现状 84
7.1.3 微电网控制方法研究现状 86
7.2 微电网模型 **89**
7.3 运行状态 **90**
7.3.1 并网运行 90
7.3.2 孤岛运行 91
7.4 改进的高阶滑模控制算法 **92**
7.4.1 改进的高阶滑模超螺旋算法 92
7.4.2 改进的高阶滑模螺旋算法 96
7.5 控制器设计 **96**
7.5.1 并网运行控制 96
7.5.2 孤岛运行控制 96
7.6 仿真分析 **96**
7.6.1 并网运行 97
7.6.2 孤岛运行 99
7.7 小结 **102**

第八章 总结与展望 **103**

参考文献 **106**

第 1 章　绪论

1.1 研究的目的和意义

随着智能电网与能源互联网的迅速发展，电力电子技术越来越得到普遍采用。先进的电力电子技术是建设智能电网与能源互联网的重要基础和手段，用于解决其中关键问题，如输电环节的高压直流输电和灵活交流输电、配电环节电能质量治理技术、储能技术和固态开关技术、以及新兴的能源路由技术等，所涉及到的电力电子装置种类众多。

智能电网与能源互联网均是互动系统，均要求对其中变更做出迅速响应并保证系统安全。因而在电力电子装置普遍采用的同时，对其智能化要求也提高了许多。需要将先进的计算技术、通信技术、传感技术、可视化技术等与电力电子装置有机结合，实现装置运行状态的感知、分析、预警、状态评估、信息分享等功能，增强智能电网与能源互联网的自适应能力与稳定性，提升装置自身的可靠性和利用率。电力电子装置智能化是实现智能电网与能源互联网的重要技术基础。

事实上，随着电力电子在能源电力系统中的广泛应用，电力电子装置的功能从以往的单一化向未来的集成化方向发展，将发挥越来越重要的作用。如目前比较成熟的无功补偿、有源滤波等电能质量方面的装置主要在单点针对特定问题发挥作用。而随着未来能源互联网的发展，能量交换与路由装置的大量应用，电力电子装置的功能更加综合，对系统级智能化支撑的需求将越来越迫切。

目前，已有的电力电子装置的研制重点在于其基本功能的实现与性能提高，很少考虑其智能化和对上层支撑。而智能电网与能源互联网系统的智能化又很少与电力电子装置功能相结合，真正针对电力电子装置的智能化研究较少，对这一问题的研究具有重要的现实意义。

为了推进电力电子装置智能化理论研究和实用化研制，本文从已有电力电子装置各类技术现状、电力电子装置智能化研究已使用的基础技术、装置智能化研究方向、智能化应用等四个方面对目前电力电子装置智能化研究与应用现状进行了综述与分析，并指出未来电力电子装置智能化研究发展方向与需要解决的问题。本章节主要结构如图 1-1 所示。

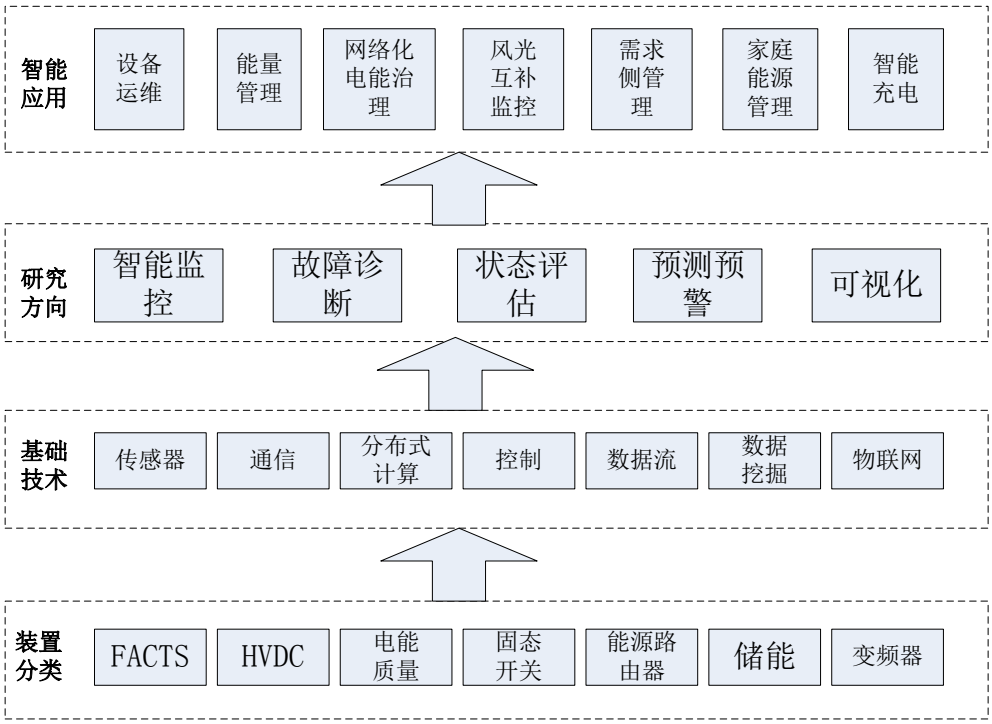

图 1-1　本章节结构图

1.2　电力电子装置功能分类

不同的电力电子装置在电网中的职责也不同，已有相对成熟的电力电子技术包括灵活交流输电 (flexible AC transmission system，FACTS)技术、高压直流输电(high-voltage direct current，HVDC)技术，能够充分提高传输容量和稳定性。用户电力技术中的电能质量技术、开关技术、储能技术也有了一定的发展规模，另外还有近几年提出的能量交换与路由技术。

1.2.1　FACTS 技术

FACTS 技术用于提高交流输电系统快速灵活性和稳定性的技术。FACTS 技术包括静止无功补偿器(static var compensator，SVC)、可控串补(thyristor controlled series compensator，TCSC)技术，这两种技术已经发展成熟。伴随电力电子元器件技术与功能的不断进步，近些年静止同步补偿器(static synchronous compensator，STATCOM)、统一潮流控制器(unified power flow controller，UPFC)等也得到了关注与发展[1]。其中 SVC 是目前基于 FACTS 技术应用最广泛的无功补偿装置，通过控制可控器件晶闸管的导通角来改变阻抗特性，从而实现对无功功率的调节[2]。而 STATCOM 采用门极可关断晶闸管(gate-turn-off Thyristor，GTO)、绝缘栅双极晶体管(insulated gate bipolar transistor，IGBT)等全控开关器件组成桥式电路通过电抗器或者直接并联在电网上，生成与系统电压具有一定相位差的信号并控制注入电力系统或直接控制其交流测电

流，实现无功补偿的目的。SVC 与 STATCOM 因核心电力电子器件的不同而导致了装置应用领域与特点的不同。SVC 价格较低，适用于对谐波与平衡性要求高的线路，STATCOM 适用于对响应时间和运行效果、输电稳定性要求高的线路[3]。TCSC 通过可控硅的触发作用快速连续地控制输电线路的等值电抗，灵活调节系统潮流，增强系统阻尼，抑制低频振荡，提高电力系统的运行稳定性[4]。UPFC 则综合了以上各种 FACTS 设备的功能，同时具有无功补偿、调节电压等作用，并且可以实现各功能之间良好的切换[5]。

1.2.2 HVDC 技术

高压直流输电技术的电能损耗低于传统交流输电技术的损耗，能有效提高电能质量并确保电网安全稳定运行，在我国具有广阔的应用前景[6]。基于电压源换流器（voltage source converter，VSC）的电压源换流器型高压直流输电 VSC-HVDC 技术是其中代表技术之一，世界首个 VSC-HVDC 工程在 1997 年投运成功，自此之后此项技术展开了广泛应用[7]。常见的多电平换流器有中性点箝位型、级联型和模块化多电平型，但当输出电平较多时，以上类型均不占优势，有学者提出了一种新型的模块化多电平换流器（modular multilevel converter，MMC）的概念[8]。与传统模块化电平的 VSC-HVDC 相比，基于 MMC 的 HVDC（MMC-HVDC）系统在安全性和节能方面具有明显的优势。世界首个 MMC-HVDC 工程在 2010 美国旧金山市北部投入运行，我国首个 MMC-HVDC 工程于 2011 年在上海投入运行，该技术仍需进一步研究与实践。另外还有轻型 HVDC 是 20 世纪 90 年代发展起来的一种新型 HVDC 技术，它克服了传统 HVDC 受端必须是有源网络的缺陷，另外还有多端 HVDV 也将得到广泛应用。

特高压直流输电(ultra high-voltage direct current，UHVDC)是指电压等级超过 800kV 的 HVDC 技术。其拓扑结构主要有多端直流和公用接地级 2 种，其技术主要以两端线换相(line commutated converter，LCC 为主。UHVDC 技术的研究以 HVDC 技术为基础，2010 年，国家电网向家坝—上海±800 kV 等级复奉 UHVDC 输电工程投运，是国内首个 UHVDC 试点工程。2014 年，正负 800 千伏复奉、锦苏、宾金三大特高压直流首次同时满功率运行，为上海、江苏地区迎峰度夏提供了充足电能[9]。

1.2.3 电能质量技术

目前国际上广泛采用的提高电能质量的电力电子装置主要有有源电力滤波器(active power filter，APF)，动态电压恢复器(dynamic voltage restorer，DVR)以及统一电能质量调节器(unified power quality conditioner，UPQC)等。

DVR 主要是针对电压暂降等动态电能质量问题的补偿装置。DVR 串联于电网和负载之间，

当电网电压出现瞬时下降时，装置在几个毫秒内迅速动作，输出电网侧同相位下降的电压值，与原本输出电压相叠加，保证负载侧电压不受影响，保证用户用电安全[10]。其关键技术在于如何提升补偿容量，提高装置冬天响应时间。APF 为无功补偿抑制谐波的装置，当负载中谐波过大时，装置迅速动作，输出负载侧大小相同方向相反的电流，使其相互抵消，从而消除谐波影响，其结构可以分为串联型和并联型[11]。统一电能质量控制器 UPQC 近年来的新兴装置，将串联电压补偿原理和并联电流补偿原理结合在一个装置中，统一实现多重电能质量调节功能[12]。对 UPQC 的研究重点不仅在于补偿效果，还要有各种功能之间的迅速平滑切换[13]。

1.2.4 固态开关技术

电网中非线性负荷的增多以及对短路容量的需求不断增大，对其中开关设备的要求也不断增加，传统开关设备如接触器、继电器等在开端容量方面很难有大幅度提升，因而固态开关这一概念被提出来，主要用于隔离故障、保证设备及人身安全[14]。固态开关种类主要有固态转换开关和固态断路器，两者不同之处在于：故障发生时，固态转换开关将负载切换至备用电源，而固态断路器则将负载断开。

1.2.5 能量路由器

随着能源互联网的发展，能量路由器这一概念被提出，便引起了研究者的广泛关注，能量路由器是能源互联网架构的核心部件，实现不同特征能源流融合是能量路由器必须具备的功能。借鉴能源互联网的理念、技术、方法和架构，能量路由器效仿信息网络路由器，以实现能量交换像信息分享一样便捷。能量路由器能实现分布式微网等能量自治单元间的能量分享，能量路由器集电子电子控制、储能缓存、数据中心智能处理、信息通信等功能于一体，是能源互联网信息能量融合特征的典型体现，是能源互联网的核心装备[15]。

国外对能量路由器的研究已进入应用阶段，而国内对能量路由器的研究刚处于起步阶段，其定义尚未明确，但对其功能的研究较多。文献[16]分析了能源路由起的关键技术，指出了该领域需要突破的研究方向。文献[17]提出多端口能量路由器，使其适用于家庭中，其优势在于能量密度高、转换快、电压等级多。文献[18]提出一种能量路由器的拓扑结构，运用多代理系统技术实现了能量路由器的自主控制和网络的协调控制。文献[19]利用能量路由器实现了线路中潮流的优化分布，并利用智能算法对其主公能和容量进行了优化配置，该线路大幅度上会受到风能影响。文献[20]同样是为家庭设计了一种能量路由器的拓扑结构，重点考虑了新能源中光能的运用。

1.2.6 储能技术

储能是建设智能电网与能源互联网的关键技术，在电力系统的各个环节都可以得到利用，可以起到保证电网稳定运行、改善电能质量、提高新能源利用率等重要作用，具有重要的研究意义。按照存储具体方式可分为机械、电化学、电磁、和热力储能四大类型[21]。4 种类型中都包含不同的储能元件，单一的技术均存在着一定的缺陷，对不同性能的储能进行有机结合，发展复合储能技术，可发挥各种储能的优点。目前，蓄电池在储能设备中应用广泛，其能量密度大，但功率密度小，而超级电容功率密度非常高，并且充放电过程具有良好的可逆性，故而常将这 2 种储能元件通过一定的方式连接构成混和储能系统。充分发挥两者优点使系统获得更好的性能。复合储能在经济上有着比单一储能无法比拟的优势，已成为重要的发展方向[22]。储能在电力系统中可以发挥削峰填谷的作用，在接入电网时需要采用电力电子双向逆变的支持。

1.2.7 变频器

以上方面均为电力电子在电网中的应用装置，从电力系统的整体角度电力电子技术还有许多应用。变频器（variable-frequency drive，VFD）是应用变频技术与微电子技术，通过改变电机工作电源频率方式来控制交流电动机的电力控制设备。变频器有多种拓扑结构，分类方法也多种多样[23]。受功率器件耐压水平及技术成本的影响，高压变频器不像低压变频器具有成熟一致的拓扑结构，功率器件的耐压问题可用多个器件串联方式来解决，但会给驱动电路带来压力，另外也会导致受压不均等问题[24]。目前随着高压变频器等装置的广泛应用，在远程运维等领域也出现了智能化需求。

1.3 智能化基础技术

1.3.1 传感器技术

传感器是将非电信号转换为电信号的装置，是信息系统的源头。不同传感器在装置中起到的作用不同。电力电子装置中常用的有互感器、温度传感器、光纤传感器、无线传感器网络等[25]。互感器又称为仪用变压器，是电流互感器和电压互感器的统称，用于测量或保护系统。温度传感器是指能感受温度并转换成可用输出信号的传感器。近年来，光纤传感器因具有敏感度高、抗干扰能力强、结构简便、环境适应性强等优点而得到了广泛应用。无线传感器网络是指布置大量低成本、低功耗的传感器节点，节点之间以无线通信方式连接，节点与网络完成感知、数据采集、传输、接受等工作。无线传感器网络是一种全新的信息获取和信息处理模式[26]。

在智能电网发展阶段，电网侧量测传感装置得到广泛应用，未来能源互联网对需求侧低成本的量测传感装置需求迫切。

1.3.2 通信技术

通信技术的发展为电力电子装置智能化建设奠定了基础，装置智能化所主要体现的方面都需要通信技术的支撑，使装置的运作更加高效、经济和安全。

常用的通信传输方式有电力线通信、光纤通信和无线通信等。各种通信方式并存，相互补充。电力线通信频谱资源有限，信道时变衰减大、噪声干扰严重。而光纤通信是利用光波作为载波，以光纤作为传输媒质的通信方式。光纤通信的传输频带宽、抗干扰性高、信号衰减小，已成为通信中主要传输方式。重要的光纤通信网络有光纤以太网、串行异步光纤网等。智能电网时代无线通信得到了广泛应用和飞速发展。电力电子通信领域用到的无线通信技术主要由微波通信和移动通信。无线通信具有成本低廉、建设周期短、适应性和扩展性好等特点，但存在通信环境和距离受限制等影响的缺点[27]。

随着 5G 等无线移动通信的发展，泛在的通信支撑将以更低的成本、更高的带宽和更好的性能唾手可得，将给大规模智能化系统的实现提供有力的支撑。

1.3.3 分布式计算

随着智能电网与能源互联网的发展，电力电子装置在线监测各种数据的数量呈几何级增长，海量数据需要进行采集、分析和存储，单台计算机的能力明显不足。分布式计算是指利用网络将多台计算机连接，组成虚拟超级计算机，完成单台计算机所无法解决的海量数据处理问题。典型的分布式计算技术有中间件技术、网格技术、移动 Agent 技术、P2P 技术和 Web Service 技术。通过引入分布式计算技术，可以增强电力电子装置在线监测时计算分析能力，快速提供操作依据，增强系统可靠性。

1.3.4 控制

电力电子装置主电路拓扑和参数确定后，其性能主要由控制器决定。因此提高系统动静态性能及鲁棒性的控制算法研究是其关键技术。目前，很多控制技术都应用到电力电子控制器的设计中，大致可分为线性控制和非线性控制，线性控制理论把高压开关频率 PWM 调制下的电压源逆变器等效为线性比例环节进行控制器设计，非线性方法考虑了逆变器的非线性本质进行控制器的设计。线性控制方法主要有基于经典控制理论的前馈开环控制，反馈控制，复合控制，以及基于现代控制理论的最优控制、状态反馈控制等。非线性控制方法主要有 Lyapunov 直接

法、反馈线性化法、鲁棒控制、滑模、模糊等智能控制方法[28-29]。

1.3.5 数据流技术

电力电子装置一次系统能量流分析方法构成了装置分析的基本框架[30]，装置潮流计算、稳定计算、短路计算均需要能量流。信息流对于二次系统非常重要，一般说来，电力电子装置二次系统是由继电保护、监控、故障录波、保护等多个子系统相互连接而成[31]。通过信息流，可以对系统进行稳态分析、动态分析及对系统的优化控制[32]。。

流计算是指一种高效地利用并行和定位，使用流计算处理器，流计算编程语言等多种技术手段处理流数据的新型计算模式[33]。不同于大数据中的面向非实时数据的批处理计算框架（例如 Hadoop），流计算面向的数据规模庞大且实时持续不断地到达，数据次序独立且时效性强，同时流数据的价值会随着时间的流逝而降低，要求数据在产生后必须立即对其进行处理。面对这种“大数据流”，传统的分布式计算模型不再能满足需求，而批处理计算框架在实时性、容错性等方面都有所欠缺。能够实时处理流动数据并做出合适决策的流计算技术应具备、实时处理并丢弃、兼容静态数据与流数据、节点拓展、多线程应用等能力。目前，流计算的模型和框架成为研究的焦点，并已经形成了一系列分布式流计算框架[34]。

1.3.6 数据挖掘

电力电子装置所产生数据具有格式多样化、种类繁多、来源广泛、时变、不完整、含噪声等特点，而近年来在国内外受到极大重视的数据挖掘技术就是从海量复杂数据中，提取隐含在其中但有效的信息的过程。数据挖掘在电力系统中的应用主要集中在以下几个方面：电力系统安全稳定性分析、负荷预测模型构建、故障诊断、仿真模型性能评估、用户行为分析和异常监测等。根据目标模式的不同，数据挖掘任务主要可以分为：概念/类描述、频繁模式挖掘、分类与预测、聚类分析、离群点分析和演变分析等几类。国际权威的学术组织 the IEEE International Conference on Data Mining (ICDM) 2006 年 12 月评选出了数据挖掘领域的十大经典算法：C4.5，k-Means，SVM， Apriori，EM，PageRank， AdaBoost， kNN，Naive Bayes 和 CART。而随着机器学习、深度学习等人工智能算法的性能提升，以及大规模计算能力的提高，大数据分析和数据挖掘将成为智能化的核心。

1.3.7 物联网技术

电力电子装置运行状态、电气量、故障诊断等信息的网络化共享是实现智能电网与能源互联网中各装置之间的信息交互、调度优化的必然要求。物联网利用智能传感器、RFID 技术、

无线传感网络、GPS 等技术实现物体之间的信息交互，作为“智能信息感知末梢”，将推动电力电子装置智能化的发展[35]。物联网技术已在电网初步应用，但尚未在电网设施运行安全监控等方面得到应用。文献[36]提出以物联网技术为基础的智能监控体系，为实现电力电子装置的智能监测与控制提供了理论指导和技术支撑。文献[37]首次提出电力物联网的概念，应用该技术可提高系统安全稳定性，提高电力设备状态评估和智能诊断水平，并可满足可持续发展要求。

1.4 电力电子装置智能化研究方向

1.4.1 智能监控

变电站智能监控系统的发展要早于各电力电子装置监控系统的发展，因而电力电子装置智能监控可以借鉴变电站，变电站监控系统的发展经历了三个阶段：早期传统的监控系统配备值班人员；第二个阶段是利用远动装置来采集各装置电压电流等实时数据；而第三阶段是伴随通信技术和计算机技术等发展起来的，用分层分布式机构取代了传统的集中模式，将变电站监控系统。已有的研究中，针对电力电子装置的监控系统的研究较少，忽略了对其性能稳定性的考虑。电力电子装置智能化监控系统的设计要点主要包括以下几个方面：实时数据采集与处理、在线监视、运行控制、历史数据记录与查询、状态评估、与上级调度通信、曲线报表打印等功能。

文献[38]提出了基于分层分布式体系结构的 SVC 监控系统，将监控系统分为上中下三层，其中，上层由后台工作站组成，中层由就地工作站、监控单元和调节单元组成。底层由水冷系统监控等组成。文献[39]结合 500 kV 东莞变电站 200 Mvar 链式 STATCOM 工程应用实践，将其监控系统分为 5 个相对独立的单元：基于 CAN 总线的主控单元、可编程控制器 PLC 水冷控制单元、脉冲触发单元、二次继保单元和就地控制单元，监控系统分为 5 层：远程控制、就地控制、上层控制、中层控制和下层控制。这种分层控制模式可供同类大功率电力电子装置工程化应用借鉴。文献[40]在以.NET 为体系架构的基础上，对锂电池储能监控系统进行了设计，该系统主要由信息采集系统和各级服务器监控系统 2 部分组成。该系统通过了实践验证，在一定程度上满足了用户的要求。文献[41]提出一种模块化、智能化的 MW 级钠硫电池储能监控系统，研究并设计其总体架构、逻辑架构和功能模块，以及安全防护方案，在此基础上开展软硬件平台设计。

1.4.2 故障诊断

电力电子装置中，故障诊断的目的是为了快速定位故障位置、缩短故障处理时间，以提高

故障处理的效率。智能监控系统及数据库在电力电子装置中的应用为其故障诊断提供了数据基础，使自动故障分析有可能实现。故障诊断面临的问题在于故障征兆与真实故障之间关系复杂，需反复探索，所涉及故障诊断方法众多。

对于电力电子装置的故障诊断，目前仅仅针对其中某一设备的方法，大型电力电子装置中均含有变压器，随着计算机、信息技术以及人工智能的发展，采用 DGA 与粗糙集技术[42]、人工神经网络[43]以及支持向量机(support vector machine，SVM)[44]等方法可以对变压器故障进行有效诊断，为电力变压器故障诊断技术的发展提供了新思路。文献[45]为了提高故障诊断的准确率，提出了一种多分类最小二乘支持向量机(least squares support vector maohine，LSSVM)和改进粒子群优化(particle swarm optimization，PSO)相结合的电力变压器故障诊断方法，可以准确、有效地对变压器进行故障诊断

电力电子装置中，高压断路器是其必不可少的设备，目前对其诊断方法主要有模糊理论[46]、专家系统[47]、BP 神经网络[48]、概率神经网络[49]等。

电力电子装置中对逆变电路的诊断方法主要分为电流检测方法和电压检测方法，增加电压或电流传感器的方法均不能检测出故障位置，其它电流检测方法如在对比直流侧电流或分析其波形频谱、电流矢量轨迹诊断法、电流瞬时功率法、三相平均电流帕克变换法等，以上方法可以判断功率器件故障位置，但缺点在于诊断过程中需要采集电流并分析，时间长。

文献[50]针对电力有源滤波器(active power filter，APF)中 IGBT 容易损坏的特点，提出一种低成本的基于硬件电路的开路故障诊断与容错控制方案。文献[51]针对电池储能系统换流桥器件 IGBT 发生故障时，会导致电压电流的畸变，影响电能质量，严重时会对储能系统的安全运行造成威胁这一问，提出了一种开路故障诊断方法。

1.4.3 状态评估

电力电子装置的安全运行是十分重要的，所有设备均无故障才能保证整个系统的安全运行。设备有无故障与安全运行需要通过检修的方式，对于高压、大容量的电力电子装置来说，其设备数量庞大造成检修工作量也非常大，以往所提倡的故障检修和定期检修限制了系统自动化程度的发展。采用科学的状态检修模式才可适应其发展要求，状态检修在降低系统运维成本、缩短停电时间、延长设备寿命等发面表现出极大的优势。状态检修第一步便是对装置进行状态评估。

电力电子装置中需要进行评估的设备普遍有变压器、电抗器、电流电压互感器、断路器、真空接触器、负荷开关、功率单元（IGBT）、空冷或水冷系统、线路等。为分析电力电子装置系统是否安全运行，则需要考虑每个设备的多种因素，绝大多数设备都可以从预防性试验、运

行数据、历史数据等几个方面来综合分析自身运行安全状态。

变压器的状态评估工作已经引起了学者的广泛重视，文献[52]综合考虑了其模型中存在的不确定性问题，建立了多层次的状态评估模型。文献[53]为提高这一类设备状态评估的准确性，对 220 kV 高压等级油浸式变压器进行了状态评估。文献[54]针对高压断路器提出了两级模糊评估模型。文献[55]讨论了电容器工作中的缺陷，并利用红外技术解决运行中的问题。文献[56]针对绝缘栅双极型晶体管的在线评估，提出一种监控压降变化的有效方法。以上均是对电力电子装置中的某一设备进行评估，对于整个装置来说，需要从宏观上对其安全运行状态进行整体评估。

评估指标体系是整个状态评估工作的重点内容，文献[57]与文献[58]分别将智能电网评估体系划分为不同的 2 个层次。文献[59]建立了变电站状态检修决策模型，根据所提出设备状态转移的马尔科夫过程求解设备状态概率。文献[60]建立了电力设备安全状态模糊综合评估模型，构建了较为完整的电力设备安全状态评估体系，并提出了 3 层架构的评估系统设计方案。

1.4.4 预测与预警

随着电力电子装置的规模越来越大，智能化程度越来越高、运行方式越来越复杂，装置的安全稳定控制、运行难度也比以往复杂琐碎，这就需要对装置设计具有自动监控、自动预测与报警的平台。自动的预警报警系统可以帮助维修人员在第一时间发现故障。系统设计的目标是利用目前先进的软硬件和通信技术共同完成一套预警和报警系统。

对电力电子装置的预测与预警还没有开展大规模研究，目前的研究集中于电力系统和变电站。对电力电子装置预测与预警可以起到借鉴作用。文献[61]为合理应对电力系统大规模停电事故，研究了电网灾变预测预警系统的功能和架构，并进行了仿真验证。文献[62]指出，研究在线预警系统对于风电并网的电力系统的安全稳定具有重大意义，完成了预警系统的研制，并通过实际运行证明了该系统的功能。文献[63]给出了电力设备载流故障预测的各种实现方法。

1.4.5 可视化技术

随着电力电子装置不断往高压、大容量方向的发展，数据激增，运行更趋于极限。原有监控系统中的数据显示方式已不能满足实际要求。装置运行时，大量复杂的信息需要有效、直观的方式来将其各种信息以告警、图形、分析结果等方式提供给管理人员，方便管理人员采取有效措施，为装置监控、分析、安全等提供有力保证[64]。这就要用到可视化技术，可视化技术是指利用计算机图形学和图像处理技术，将数据转换成图形或图像显示出来，并进行交互处理的理论、方法和技术。可视化技术主要关注的数据类型包括电器元件信息、电气量信息、预测预

警信息等。

文献[65]对变压器通过可视化诊断后，可以迅速、准确地掌握变压器绝缘故障全面的故障信息，具有很强的实用价值。文献[66]对变电站继电保护故障，利用可视化技术，可以对内部工作及潜在问题进行分析。文献[67]对电网的实时监控可视化技术进行了研究分析，提出一套较为完整的解决方案，并在实际系统中实现了稳定利用。

1.5 电力电子装置智能化应用

1.5.1 设备维护运维

传统运维方案为保证装置状态良好，会对其中设备进行定检、全检等几种运维模式，在设备数量大量增加、设备电压等级升高、新技术大量引入的情况下，有限时间内完成大量的运维检修任务会有巨大困难，也会带来许多问题如：维修不足、维修过剩、提前维修、维修滞后等。

智能电网与能源互联网的发展，对电力电子装置的管理、运行、维护、检修人员也提出了更高的要求，传统的运维模式已经不能适应智能电网与能源互联网运维需求。为适应智能电网与能源互联网的发展，智能化的运维模式需要得到快速应用。智能电力电子装置的设备自检和通信能力都比传统装置要强，可提供详细全面的状态信息，使得运维人员能够更准确的掌握装置运行情况。随着精细化管理要求的不断提升，文献[68]指出实现电力设备运维的可视化技术可以提高电网信息运维人员对信息设备的管控能力。文献[69]提出了智能运维系统的整体系统架构和功能部署方案，有效解决了目前智能变电站二次设备在实际运维过程中出现的一系列问题。文献[70]提出了一种综合考虑基于风险的检修和基于全寿命周期成本的电网主设备运行维护策略辅助决策方法，采用定量的方法评估设备运行风险，并在深圳供电局各变电站的变压器上得到了实际应用。以上方法均可为电力电子装置智能化的运维提供了借鉴。

1.5.2 储能能量管理

储能能量管理分为两块研究内容：一是储能装置本身的能量管理，二是微电网监控和能量管理。目前适用于分布式发电系统及微电网中的储能方式主要为蓄电池储能，主要原因为其能量密度高、技术成熟，但其缺点为功率密度低，使用寿命短。超级电容与蓄电池具有较强的互补性，其功率密度大，工作寿命长，但是能量密度较低，不适用于大规模的电力储能。如果将二者结合起来，组成混合储能系统，充分发挥各自的优点，则可以扬长避短，即可以实现高功率密度的要求，也可以实现高能量密度的要求，同时可以减少蓄电池的额定容量并延长其寿命，这也成为目前储能研究的热点。

对储能系统能量管理国外研究起步较早，文献[71]对于混合储能系统的能量管理进行了研究并提出了一种基于多项式控制方式来控制储能单元的充放电。文献[72]采用模糊控制的方式对混合储能系统的功率进行分配。文献[73]采用了滑模控制来进行蓄电池和超级电容之间的功率分配。文献[74]提出了基于多模式模糊控制的能量管理方法，将工作状态分为多种模式切换工作。文献[75]中将蓄电池作为主要储能元件，超级电容仅起到补充辅助作用。、

国内学者在国外研究基础上，也取得了一定的成就，文献[76]提出了一种动态能量优化(dynamic energy optimization based on energy predietion，DEOEP)算法。文献[77]提出了基于平滑控制的混合储能系统的能量管理方法。文献[78]为满足对微电网进行监控和能量管理的需要，借鉴智能变电站分层体系结构，提出多层微电网监控与能量管理一体化系统。

1.5.3 网络化电能质量治理

目前对电能质量问题的治理，技术上主要各种电能质量治理装置的介入，并建立电能质量监测体系，完善用户电能质量投诉流程管理等。这些手段仅仅取得了一定程度的应用，由于目前电力电子装置智能化的普及水平不足，中低压侧还主要依靠人工监测、定期巡视和用户投诉等途径来掌握电能质量情况，无法保证对电能质量存在问题掌控与处理的正确性与及时性[79]。

电能质量监测与治理是一个系统性工程，网络化的电能质量监测系统已经成为电能质量监测系统的主流趋势，而网络化的电能质量治理还未得到应用。已建设的各监测装置多处于孤立运行状态，缺乏统一平台对已有监测采集系统中电能质量相关数据统一分析，制定优化的协同处理策略，无法达到对区域配电网电能质量网络化监控与决策治理的目的。

互联网通信技术的发展为网络化的电能质量治理提供了可能。网络化的电能质量治理装置可由多个电力电子装置和其通信系统位于电网同一或不同线路上，各电力电子装置通过通信系统与后台计算中心相连，用于采集其所位于的电网线路的实时信息后通过互联网上传，并接收后台计算中心的指令，输出补偿电流或电压进行补偿；后台计算中心用于计算补偿总量及每一电力电子装置的补偿分量，且将每一补偿分量均转换成具有一定下发顺序的指令，并待所有指令转换完毕后，将指令分别下发给相应补偿单元中的电力电子装置。这种方式能够实现多个电力电子装置动态协调输出，提高电能质量治理效果，并可采用相同的低容量电力电子装置，从而节约运行成本和维护成本。

1.5.4 风光互补监控

可再生能源的合理开发与利用是当今世界的热点话题，目前绝大多数发达国家都将发电形式从火力发电向可再生能源发电转变。风光互补发电机由风力发电机、太阳能光伏板、风光互

补控制器和逆变器等许多部分组成，在各部分之间都存在大量的数据传输，系统并网时必须保证其电能质量，为了便于工作人员能够实时监测和控制风光互补发电系统的运行状况，需要对其进行实时监测，并针对实时监测的数据对风光互补发电系统接入电网后对电网电能质量的影响加以评估，观察电能质量指标是否存在超出规定限值的情况[80]。文献[81]开发了风光互补智能控制系统。文献[82]考虑了风电场、光伏电站出力的随机性，并且设计两者出力的相关性，提出应用 Couple 理论建立风电场、光伏电站出力联合概率分布模型的方法。并对风光互补发电系统进行了可靠性评估。

1.5.5 需求侧管理

电力需求侧管理（power demand side management，PDSM）是为合理利用资源，提高用电效率和减少环境污染而进行的用电管理活动。需求侧管理是智能电网与能源互联网重要的组成部分之一[83]。传统的 PDSM 还处于政策性管理阶段，智能化的电力电子装置中先进的监控、计算、通信和控制手段对于需求侧管理技术的推进起到了促进作用。与传统的 PDSM 相比，智能电网与能源互联网下的 PDSM 可具有更强的能力，高水平的监控、智能控制及通讯技术，可实现终端用户的及时响应，并且支持分布式能源自由接入。

1.5.6 家庭能源管理

居民侧用电量占全社会的 36.3%，但存在用电效率低、浪费严重的情况。为提高这一用电效率，避免环境资源浪费，国外在上世纪已开展了家庭能源管理系统（home energy management system，HEMS）的研究[84]。该项领域利用传感器与无线传感器网络，采集与传输室内温湿度、空气质量、人员活动数量和用电设备等信息，将数据综合处理后，对用电设备进行控制，满足用户舒适度的同时实现节能减排。

家庭能源管理系统是智能电网与能源互联网在居民侧的延伸，在这样的大环境下，家庭能源管理也有了新的需求，如考虑大量用户协同工作、能量流的双向流动、支持需求响应在居民侧的实施、支持新能源接入电网等。对电力电子装置智能化的研究有助于家庭能源管理系统的健康发展。

1.5.7 智能充电系统

如何高效、快速、无损地对蓄电池进行科学充电，一直是蓄电池界关心的问题。充电技术从传统的恒流充电、恒压充电、恒压限流充电，发展到了现在的智能充电。目前国内对大容量智能充电技术的研究还处于初始阶段，电动汽车智能充电桩不仅能够解决电动汽车需要随时随

地充电的问题，还能够对其电池进行维护，并且具有人性化的人机交互界面和完善的通讯能力。文献[85]将电力电子技术、智能监控技术、物联网以及通信中 CAN 总线技术应用到电动汽车智能充电桩的设计与研究中，保证了电动汽车的续航能力与运行安全。文献[86]在风光互补发电的基础上，通过总线与监控等技术实现了风光互补发电向电动汽车充电的智能控制。

1.6 电力电子智能化研究发展方向

已有的电力电子装置的研制重点在于其基本功能的实现与性能提高，很少考虑其智能化和对上层支撑。智能电网与能源互联网系统大环境对电力电子装置的智能化提出了高要求，对这一问题的研究具有重要的现实意义。而电力电子装置本身一般已经有相应的装置级控制系统、上位机监控系统甚至互联网数据接入系统，这些都为电力电子装置的智能化研究提供了基础。未来电力电子智能化研究可以考虑以下方向。

（1）大多智能化的技术或手段，已在变电站或电力系统中得以实现，对于电力电子装置智能化的是一个很好的借鉴：智能传感装置工作中容易受到电磁干扰甚至损坏，提高此类装置的抗干扰能力及精度是一项重要工作；智能化技术的深度使用，必须要有相应的管理制度与评估标准；智能监控系统应根据装置特性，多考虑分层分布式的体系结构；对智能装置的能量流与信息流分别进行分析，以保证装置稳定与运行优化；应用最新的大数据存储、分析和深度学习方法，结合电力电子装置的特点，有助于从数据分析层面解决其所面临的问题，从海量数据中提炼更多有价值的信息，但在实时性、数据一致性和安全性等方面仍面临挑战。

（2）已有的电力电子装置侧重于对其拓扑结构的研究，对其性能的控制则多数还停留在理论阶段，已在实际装置中应用的控制方法仍是以传统方法居多，研究先进的控制算法，有利于充分发挥装置的性能，在保证装置安全稳定的前提下，提高电能质量和经济性能。电力电子装置是庞大的信息数据系统，具有很强的非线性与不确定性，考虑其鲁棒性控制与多种运行方式如何并存与协调是关键技术问题。

（3）已有的故障诊断与状态评估方法，仅限于电力电子装置中某一单一设备如变压器、断路器等，没有考虑各器件之间的联系，缺乏所有设备系统地评估与诊断方法，电力电子装置智能化研究中可以考虑健全整个装置的故障诊断与状态评估体系。对于超大容量、高压的电力电子装置来说，因其组成复杂，状态评估时面临诸多困难和挑战，不仅要考虑装置性能变化，还要考虑到运行环境的变化，每个装置构成特点迥异，评价标准无法统一，需要监测的信息量也非常庞大，正确、有效地评估其安全状态是状态检修成功的关键，对系统运行的安全性与稳定性起着至关重要的作用。同时评估指标的选取应遵守状态评估科学性、全面性等原则，可考

虑对装置进行分级评估，避免资源浪费。

（4）发展网络化智能应用于智能电网和能源互联网，如网络化的电能质量治理，是电能质量治理技术中电力电子装置智能化的重要发展方向。首先要建立完善的电能质量评估方法与等级划分体系，并基于供用电接口的经济性分析，分别建立内部技术等级评估体系与用户经济性评估体系，建立与健全相关政策、法规，实现智能电网与能源互联网的“优质经济”运行。

（5）通过物联网技术，可实现电力电子装置信息安全共享，提高预测预警水平，尤其是在未来能源互联网延伸到需求侧，实现源网荷协同等场景。其中，电力电子装置信息模型、网络架构、感知体系、通讯模型与接口规范、网络与信息安全、设备间的信息共享与交互策略等问题都是需要深入研究。

1.7 本报告内容安排

本报告内容安排如图 1-2 所示。

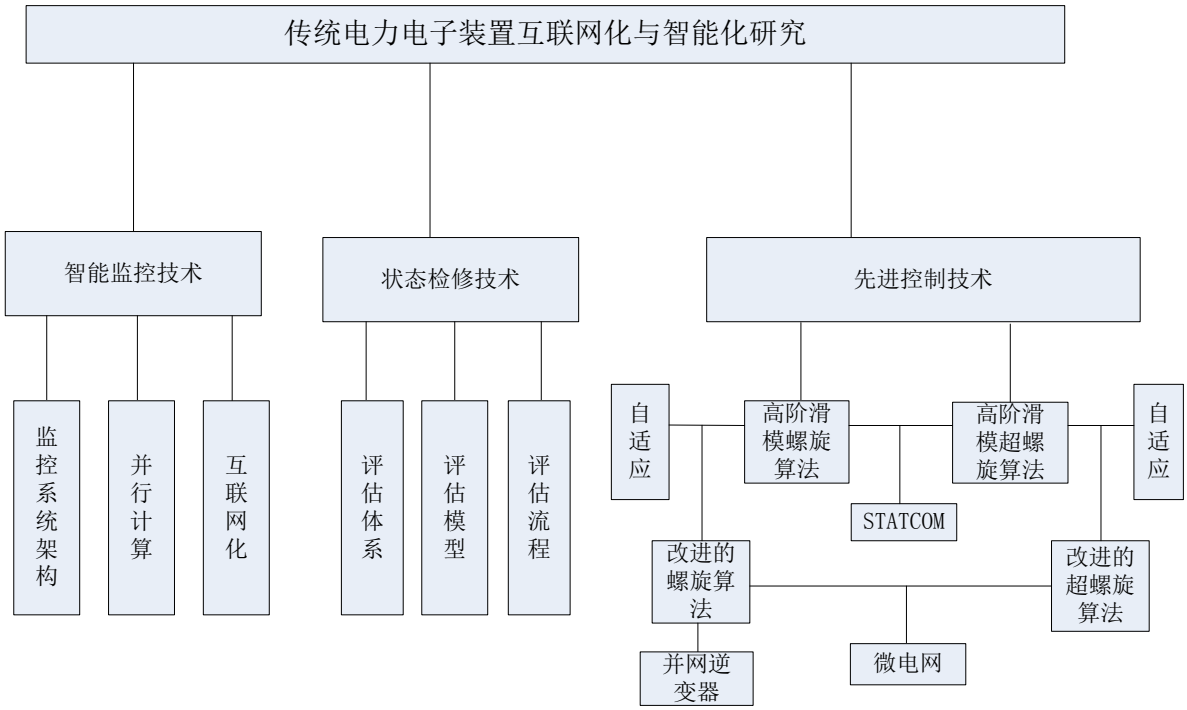

图 1-2 本文主要内容安排

为了推进电力电子装置智能化理论研究和实用化研制，本报告首先对目前电力电子装置智能化研究现状进行了综述。按功能不同对电力电子装置进行了分类，针对不同类别，分析了电力电子装置智能化的主要技术如传感、通信、控制等方面的应用进展。在分析电力电子装置智能化智能监控、故障诊断、状态评估等研究方向的基础上，总结了电力电子装置智能化研究多方面的应用情况。

本报告第二部分列举了研究的理论基础如滑模控制发展历程，滑模控制、高阶滑模控制和自适应方法的的概念。

第三部分针对电力电子装置智能监控技术展开了研究，提出了一种监控系统结构框架。设计了全新的算法完成原始信号到有效值的直接映射，避免了累加求和以及求平方根的计算。提出一种多台 STATCOM 独立运行的基于互联网通信系统的无功补偿方法，能够实现各 STATCOM 设备协调输出，大大减少资源浪费。

第四部分综合考虑了高压、大容量 STATCOM 的状态评估问题，建立了 STATCOM 两级多模块状态评估模型。其次建立了 STATCOM 两级状态评估模型。最后给出了两级评估模型的评估流程。

第五部分为提高静止同步补偿器(STATCOM)控制系统动态性能和鲁棒性，提出一种基于高阶滑模控制的 STATCOM 有限时间鲁棒控制方法。

第六部分针对具有未知上界不确定性的全桥逆变器的稳定性控制，提出了基于参数自适应的二阶滑模螺旋改进控制算法，解决了二阶滑模控制方法应用中因系统不确定性的上界未知而导致的控制器参数难以选择的问题。

第七部分对传统的 STA，增加了补偿控制器和自适应参数控制器，一方面使得系统存在具有未知上界不确定性时，实现系统有限时间稳定性控制，另一方面方便了控制器参数的选择，避免参数过大造成的系统不稳定情况。将改进的 STA 与螺旋算法分别应用与微电网并网控制与孤岛控制中。

最后给出了结论与发展展望。

第 2 章　研究的基础理论

2.1 传统及高阶滑模控制定义

2.1.1 滑模变结构控制定义

滑模控制系统，又叫滑模变结构控制系统，是由变结构控制系统发展而来的，首先来看一下变结构系统的定义：

定义 2-1（变结构系统）[87]：如果存在一个切换函数或者开关函数，当系统的状态满足这一切换函数的一个状态时，系统是一个确定结构，当系统状态到达切换函数或开关函数的另一个状态时，系统可以从之前的结构自动转换成另外一个确定的结构，那么这种系统可以称之为变结构系统。

滑模变结构控制方法的设计可以分为两个步骤：首先设计适当的滑模面，其次是求取控制律。目前已被公认的滑模变结构控制的定义如下[88]：

对于一个非线性系统：

$$\dot{x} = f(x, u, t) \tag{2-1}$$

其中 $x \in R^n$， $u \in R^m$ 分别是系统的状态和输入，首先确定滑模面：$s_i(t,x)$ ，$s \in R^m$。

并寻求控制律：

$$u_i = \begin{cases} u_i^+(t,x)， 当 s_i(t,x) > 0 \\ u_i^-(t,x)， 当 s_i(t,x) < 0 \end{cases} \tag{2-2}$$

其中 $u_i^+(t,x) \neq u_i^-(t,x)$，且$u_i^+(t,x)$、$u_i^-(t,x)$、$s_i(t,x)$是适当的光滑函数，使得滑模面以外的相轨迹将于有限时间内到达滑模面，到达滑模面后系统渐近稳定到平衡点，并且过程快速平稳。

在滑模控制过程中，系统的运动可分为两个阶段：

（1）到达运动阶段，系统状态在控制律的作用下从任意初始位置到达滑模面。

（2）滑模运动阶段，系统沿滑模面滑动，渐近到达期望的平衡点。

这两个阶段如图 2-1 所示：

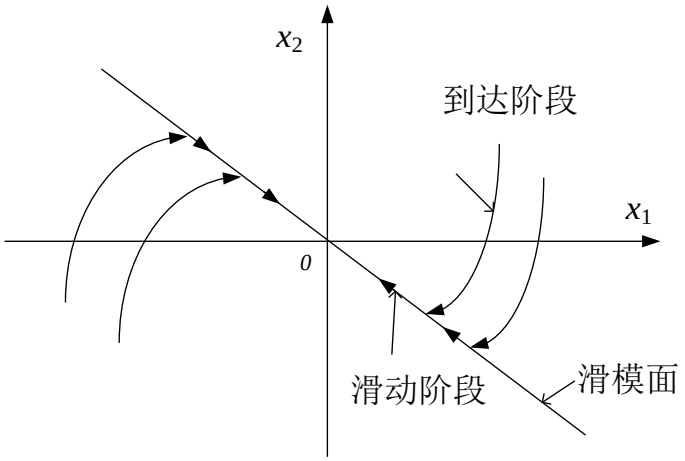

图 2-1 滑模控制运动示意图

2.1.2 高阶滑模控制定义

高阶滑模控制是对传统滑模控制的扩展。

定义 2-2(高阶滑模概念)[89]：

滑动阶 r 是指滑模变量 s 及其所有连续导数在滑模面 $s=0$ 上等于 0 的个数。

关于滑模面 $s(t,x)=0$ 的 r 阶滑动集由等式（2-3）描述：

$$s = \dot{s} = \ddot{s} = \cdots = s^{(r-1)} = 0 \tag{2-3}$$

式（2-3）构成了动态系统状态的 r 维约束条件。

如果 r 阶滑动集(2-3)是非空的，并且假设它是 Filippov 意义下局部积分集（也就是说，它由不连续动态系统的 Filippov 轨迹组成），那么，满足式(2-3)的相关运动便称被称为关于滑模面 $s(t,x)=0$ 的“r 阶滑模”。

二阶滑模因为控制器结构简单且所需要的信息不多，成为目前应用最广泛的高阶滑模控制

算法。在二阶滑模控制中方法，控制输入显式地出现在滑模面的二阶导数 $\ddot{s}$ 中，控制律的形式是基于 s 和 $\dot{s}$ 或它们的符号函数的切换规律，保证系统的状态在有限时间内稳定于滑模面 $s=\dot{s}=0$ 上。并且二阶滑模控制问题可以转化为非线性系统的有限时间镇定问题[90]，其运动示意图如图 2-2 所示：

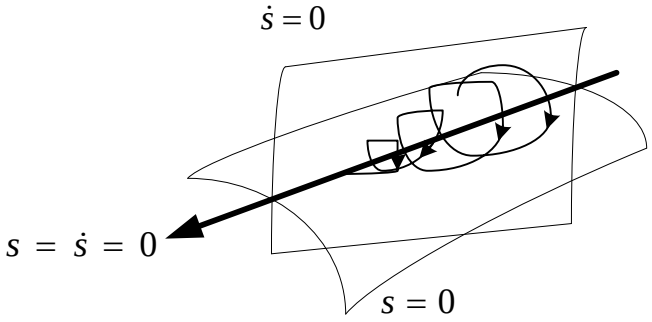

图 2-2 二阶滑模运动示意图

考虑下列形式的单输入动态系统：

$$\dot{x}=a(t,x)+b(t,x)u \qquad s=s(t,x) \tag{2-4}$$

其中 $x\in R^n$为系统状态量，$u\in R$为控制输入，$a(t,x)$ 和 $b(t,x)$ 为光滑的未知向量场，定义滑模面 $s(t,x)=0$。二阶滑模控制的思想是使系统的状态在有限时间内到达滑模面及其导数：

$$s(t,x)=\dot{s}(t,x)=0 \tag{2-5}$$

根据相对阶的定义，对滑模变量 s 考虑以下两种不同情形：

（1）系统对滑模面相对阶为 1 时，即 $\frac{\partial \dot{s}}{\partial u}\neq 0$。传统滑模控制的方法可以解决系统相对阶为 1 时的稳定性控制问题，但控制的效果是系统状态渐近稳定而不是有限时间稳定的。如果想得到系统的有限时间稳定特性，那么此时可以对滑模面再次求导，控制输入的导数便显含在滑模面二阶导数上，作为新的控制输入，直接用二阶滑模方法来进行控制。这时，虽然控制输入的导数是非连续的，但输入量作为其导数的积分，是连续的，因而可以起到对抖振的抑制作用。

（2）系统对滑模面相对阶为 2 时，即 $\frac{\partial \dot{s}}{\partial u}=0$，$\frac{\partial \ddot{s}}{\partial u}\neq 0$。对于这一类系统，可以直接应用二阶滑模控制方法，得到滑模面及其导数的有限时间稳定。而此时传统的一阶滑模控制方法是无法应用的。

以上两种情况可以统一起来，都将系统看作是相对阶为 2 的情况，只不过对于第一种情况来说，控制输入是它自身的导数。二阶滑模控制问题可以转化为 (2-6) 中非线性系统的有限时间镇定问题。

$$\begin{cases} \dot{y}_1(t)=y_2(t) \\ \dot{y}_2(t)=\varphi(t,x)+\gamma(t,x)v(t) \\ s(t,x)=y_1(t) \end{cases} \tag{2-6}$$

注：对于上式中的 $\varphi(t,x)$、$\gamma(t,x)$ 和 $\nu(t)$，它们在系统具有不同相对阶时意义和结构是不一样的。

2.2 传统与高阶滑模控制发展历程及问题

2.2.1 传统滑模控制发展历程及所遇到的问题

滑模控制又被称为滑模变结构控制，是在变结构控制方法的基础上发展起来的。上世纪五十年代，变结构控制的概念被提出来，它的提出者 Utkin[91]同样给出了滑模变结构控制的概念。同时给出了滑动模态存在的充分条件，提出按闭环系统的稳定性和快速性来选择滑模面，并将滑模控制方法进行深入研究并推广到高阶系统。80 年代以来，变结构控制理论开始进入我国。滑模变结构控制经过六七十年的发展，已经有了大量的研究方向和研究成果。其应用范围也十分广泛[92][93]。

传统滑模控制主要有两大缺点：一是抖振现象，另一个是对系统对滑模面相对阶的限制。

（1）抖振现象

滑模控制方法在运行中，当状态轨迹到达滑模面后，不是立刻沿着滑模面运动到平衡点，而是由于惯性等作用在滑模面两侧不断穿梭，从而产生抖振[20]。已有抗抖振的方法有趋近律设计法、准滑动模态法和模糊控制方法等

（2）相对阶的限制

在传统滑模控制中，要求控制输入显式地出现在滑模变量的一阶导数中，即要求系统对滑模面的相对阶为 1，然后根据滑模控制方法的步骤来分别设计滑模等效控制器和切换控制器。高阶滑模控制方法的出现，不但保持了系统对匹配不确定性的鲁棒性，还同时解决了传统滑模控制对系统相对阶限制的问题。当对一个高阶链式系统使用传统的一阶滑模控制方法时，通过设计高阶滑模面，比如 Hurwitz 的多项式滑模面也可以实现对高阶系统的控制。但所实现的只是渐近稳定而不是有限时间稳定，并且参数难以选择。

2.2.2 高阶滑模控制发展历程及所遇到的问题

高阶滑模控制不仅保留了传统滑模控制的优点，并可以解决它所存在的问题，这一思想产生后便得到了广泛关注。高阶滑模控制理论的提出，是对传统滑模控制理论的进一步推广，使得滑模控制这一经典的方法又焕发出了新的生机。

高阶滑模控制发展时间较短，理论上还存在着未解决的问题：

（1）控制对象不确定性界的问题以及控制参数选择

实际系统中存在着各种各样的不确定性，已有的二阶滑模控制方法可以处理系统不确定性

的问题，但前提是要事先得到系统各种形式不确定性上界的估计值，才能进行参数的选择。然而在现实工程设计中，知道系统各种不确定性的界是很不现实的，由此而带来参数选择困难的问题。因此，如何对高阶滑模控制方法进行改进，使其在具有未知上界不确定性的影响下依然可以实现有限时间稳定，同时又实现参数的自我调整，是高阶滑模控制面临的重要问题。。

（2）稳定性证明和收敛时间的估计

对于传统的滑模控制方法，利用 Lyapunov 定理便可以得到其渐近稳定的证明，证明方式并不困难。但对于高阶滑模控制方法来说，找到一个 Lyapunov 函数来证明高阶滑模控制方法的渐近稳定性并不是不可能，但高阶滑模控制方法的特点在于系统的有限时间稳定特性。仅仅证明出来渐近稳定性便抹杀了高阶滑模控制的优点。有限时间稳定性的证明不像渐近稳定性的证明那么容易，对 Lyapunov 函数求导后，渐近稳定性只要求导数负定，而有限时间稳定性则需要满足一定的条件，这就给证明增加了难度。

（3）二阶滑模相对阶限制

高阶滑模控制中的二阶滑模已得到了相对广泛的应用，与之相比，三阶以及三阶以上高阶滑模控制算法的应用则比较少，现有的二阶滑模控制算法在往高阶系统推广时，存在着有限时间稳定性难以证明的问题。

2.2.3 高阶滑模与自适应控制方法

不确定性在被控系统中是普遍存在的，自适应方法的思想便是在线实时估计不确定性或者控制参数的界限，以保持稳定的系统性能，因而这种方法有很大的现实意义。传统滑模控制方法对匹配不确定性具有鲁棒性，换句话说，控制器设计需要事先知道系统不确定性的界，从实际情况出发，这是很难满足的。对于具有未知上界的非匹配不确定性，滑模控制需要有其他方法与之相结合来补偿不确定性的影响。将滑模控制与自适应机制有机结合起来的滑模自适应控制方法，是解决参数不确定或时变参数控制问题的一种常用的控制策略

自适应方法不仅与传统滑模方法相结合，取得了诸多成就。在高阶滑模控制方法中同样有施展空间。已有的高阶滑模控制方法，必须要事先知道系统不确定性的界，然后根据不确定性的界来选择控制器参数。为解决这一问题，已有很多文献将自适应方法与高阶滑模控制方法相结合，但各有利弊。

2.3 高阶滑模控制相关定理与算法

2.3.1 相关稳定性定义和定理

一个控制系统最重要的性质便是它是否稳定，不稳定的系统一般是不能用的，而且也存

在危险性。Lyapunov 直接法作为最经典的非线性系统稳定性分析判据，是非线性系统分析和设计最重要的工具。这一方法的优点是有目共睹的，只需要对系统构造相关的正定能量函数，对这一函数求导，根据导数的信息便可以得到系统是稳定、指数稳定还是全局渐近稳定的。这一方法清晰直观地展现了稳定的概念。并且无需对系统进行线性化和各种变换，并且也可以直接将这一方法用作控制器的设计。

引理2-1[94]（全局稳定的 Lyapunov 定理）：

假定存在状态 x 的标量函数 V，它具有一阶连续偏导数并且

（1）$V(x)$ 正定；

（2）$\dot{V}(x)$ 负定；

（3）当$\|x\| \to \infty$时，$V(x) \to \infty$；

那么原点作为平衡点是全局渐近稳定的。

以往控制分析和综合的方法都属于无限时间稳定的控制问题，从控制时间优化的角度来讲，使闭环系统有限时间稳定的控制方法才是时间最优的，具有重要的理论与实际研究意义。

考虑如下系统：

$$\dot{x} = f(x) \quad f(0) = 0 \tag{2-7}$$

其中 $x \in R^n$，$x(0) = x_0$，$D \to R$ 在包含原点 $x = 0$ 的一个开邻域 D 内关于 x 是连续的。

定义 2-1[94]：对于系统（2-7），如果存在一个包含原点 $x = 0$ 的开邻域 $U \subseteq D$ 和函数 $T_x: U\backslash\{0\} \to (0, \infty)$，使得对于存在 $x_0 \in U$，当 $t \in [0, T(x_0))$时，$x(t, x_0)$ 有定义且在前向时间上是唯一的并满足 $\lim\limits_{t \to T_x(x_0)} x(t, t_0) = 0$，那么系统的平衡点 $x = 0$ 是有限时间稳定的；当 $t > T(x_0)$ 时，有 $x(t, x_0) = 0$。平衡点 $x = 0$ 是有限时间稳定的当且仅当它是 Lyapunov 稳定的，如果 $U = D = R^n$，则平衡点 $x = 0$ 是全局有限时间稳定的。

引理2-2（有限时间稳定性定理）：

对于系统

$$\dot{x} = f(x),\ f(0) = 0,\ x \in R^n \tag{2-8}$$

假设存在连续可微函数 $V: U \to R$，满足下列条件：

（1）V为正定函数。

（2）存在正实数 $c > 0$ 和 $\alpha \in (0,1)$，以及一个包含原点的开邻域 $U_0 \subset U$，使得下列条件成立：

$$\dot{V}(z) + cV^{\alpha}(z) \leq 0,\ z \in U_0\backslash\{0\} \tag{2-9}$$

那么系统（2-8）为有限时间稳定的；若 $U = U_0 = R^n$，则系统（2-8）为全局有限时间

稳定的。

高阶滑模理论的提出和证明，首先是基于齐次性理论的，齐次性理论及齐次系统的有限时间稳定定理如下：

定义 2-2：若存在扩张 $(r_1,\cdots,r_n)\in R^n$，其中 $r_i>0$，$i=1,\cdots,n$，令 $V(x):R^n\to R$ 为一连续函数，如果对任意给定的 $\varepsilon>0$，均有 $V(\varepsilon^{r_1}x_1,\cdots,\varepsilon^{r_n}x_n)=\varepsilon^{r_i+d}V(x)$，其中 $x\in R^n$，称 $V(x)$ 关于扩张 $(r_1,\cdots,r_n)$ 具有齐次度 $d\in R$。若 $f(x)$ 是齐次的，则系统 $\dot{x}=f(x)$ 为齐次系统。

引理 2-3(齐次系统的有限时间稳定性定理)[95]：如果一个系统是全局渐近稳定的且具有负的齐次度即 $d<0$，那么这个系统是全局有限时间稳定系统。

齐次系统的有限时间稳定性证明定理不如 Lyapunov 稳定性定理清晰明了。关于它的有限时间稳定性的证明会在下一节举例说明。

2.3.2 几种高阶滑模控制方法

（1）基于齐次性理论的二阶滑模

考虑如下一类二阶非线性系统：

$$\begin{cases}\dot{x}_1=x_2^m\\ \dot{x}_2=u\end{cases}\tag{2-10}$$

其中 x_1 和 x_2 为系统状态，m 为正奇数，控制目标是通过控制输入 u 使得系统在有限时间内收敛到原点。

这里采用如下基于齐次性理论的二阶滑模控制输入：

$$u=-l_1\mathrm{sgn}(x_1)|x_1|^{\alpha_1}-l_2\mathrm{sgn}(x_2)|x_2|^{\alpha_2}\tag{2-11}$$

其中 $l_1>0$，$l_2>0$，$0<\alpha<1/m$，$\alpha_2=\frac{(m+1)\alpha_1}{1+\alpha_1}$。

定理 2-1 对于一类二阶非线性系统 (2-10)，当其控制输入满足式 (2-11) 时，系统 (2-10) 在有限时间内收敛到原点。

证明： 定理 2-1 的证明分两步走，首先证明系统的渐近稳定性。

将控制律 (2-11) 代入系统 (2-10)，得到如下闭环系统方程：

$$\begin{cases}\dot{x}_1=x_2^m\\ \dot{x}_2=-l_1\mathrm{sgn}(x_1)|x_1|^{\alpha_1}-l_2\mathrm{sgn}(x_2)|x_2|^{\alpha_2}\end{cases}\tag{2-12}$$

取 Lyapunov 函数为：

$$V(x_1,x_2)=\frac{l_1|x_1|^{\alpha_1+1}}{\alpha_1+1}+\frac{|x_2|^{m+1}}{m+1}\tag{2-13}$$

对 (2-13) 求导数得：

$$\dot{V} = -l_2|x_2|^{m+\alpha_2} \leq 0 \tag{2-14}$$

显然，$\dot{V}$ 负半定，V 非增且存在有限极限。

那么状态 x_1 和 x_2 是有界的。此时对 $\dot{V}$ 求导，可得

$$\ddot{V} = -l_2(m+\alpha_2)|x_2|^{m+\alpha_2-1}\text{sgn}(x_2) \tag{2-15}$$

因为 $m+\alpha_2-1>0$，x_2 有界，因而 $\ddot{V}$ 有界。

那么 $\dot{V}$ 一致连续，由 Barbalat 引理可知 $\dot{V}\to 0$，那么 $x_2\to 0$。

那么 $\dot{x}_1$ 和 $\dot{x}_2$ 是有界的，因而 x_1 和 x_2 一致连续。

选择函数 $g=x_1x_2$，因 x_1 有界，$x_2\to 0$，则 g 存在有限极限 0。

$$\dot{g} = -l_1|x_1|^{\alpha_1+1} - l_2x_1|x_2|^{\alpha_2}\text{sgn}(x_2) + x_2^2 = g_1 + g_2 \tag{2-16}$$

其中 $g_1=-l_1|x_1|^{\alpha_1+1}$，$g_2=-l_2x_1|x_2|^{\alpha_2}\text{sgn}(x_2)+x_2^2$，$\dot{g}_1=-l_1(a_1+1)|x_1|^{\alpha_1}$，$\dot{g}_1$ 有界，因而 g_1 连续，则 $\dot{g}$ 连续，因而根据 Barbalat 引理 $\dot{g}\to 0$。又因为 $x_2\to 0$，所以 $g_2\to 0$，进而 $g_1\to 0$，$x_1\to 0$。

可见闭环系统是渐近稳定的。

接下来验证系统具有负的齐次度。

定义矢量场：

$$f = [f_1(x_1,x_2), f_2(x_1,x_2)]^T \tag{2-17}$$

其中 $f_1(x_1,x_2)=x_2^m$，$f_2(x_1,x_2)=-l_1\text{sgn}(x_1)|x_1|^{\alpha_1}-l_2\text{sgn}(x_2)|x_2|^{\alpha_2}$

取齐次扩张：

$$\Delta_k:(x_1,x_2)\to(kx_1, k^{\frac{\alpha_1+1}{m+1}}x_2) \tag{2-18}$$

则

$$f_1\left(kx_1, k^{\frac{\alpha_1+1}{m+1}}x_2\right) = k^{\frac{m(\alpha_1+1)}{m+1}}x_2^m = k^{1+\frac{m\alpha_1-1}{m+1}}x_2^m = k^{1+\frac{m\alpha_1-1}{m+1}}f_1(x_1,x_2) \tag{2-19}$$

$$\begin{aligned} f_2\left(kx_1, k^{\frac{\alpha_1+1}{m+1}}x_2\right) &= -l_1\text{sgn}(kx_1)|kx_1|^{\alpha_1} - l_2\text{sgn}\left(k^{\frac{\alpha_1+1}{m+1}}x_2\right)\left|k^{\frac{\alpha_1+1}{m+1}}x_2\right|^{\alpha_2} \\ &= k^{\frac{\alpha_1+1}{m+1}+\frac{m\alpha_1-1}{m+1}}f_2(x_1,x_2) \end{aligned} \tag{2-20}$$

因为 $0<\alpha<1/m$，所以 $k=(m\alpha_1-1)/(m+1)<0$。

可以验证，取 $r_1=1$，$r_2=(\alpha_1+1)/(m+1)$ 以及参数取值满足 $0<\alpha_1<1/m$，$\alpha_2=(m+1)\alpha_1/(1+\alpha_1)$ 时，系统的齐次度为 $k=(m\alpha_1-1)/(m+1)<0$，系统全局渐近稳定且具有负齐次度，由引理 2-3，系统是全局有限时间稳定的。

取 $m=1$，算法参数 $l_1=1$，$l_2=1$，$\alpha_1=1/2$，$\alpha_2=1/3$，初值 $x_1(0)=1$，$x_2(0)=0$。算法相轨迹如图 2-1 所示：

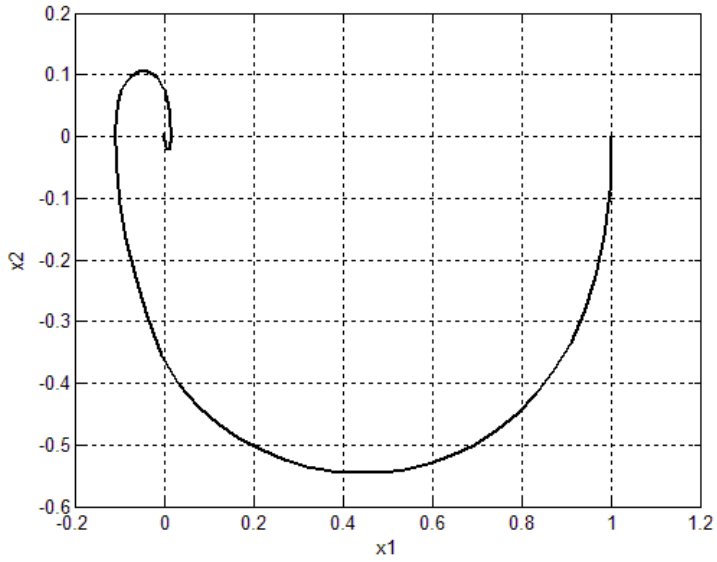

图 2-3 基于齐次性理论二阶滑模控制相平面图

（2）螺旋 (Twisting) 算法

考虑一类系统：

$$\begin{cases} \dot{x}_1(t) = x_2(t) \\ \dot{x}_2(t) = \varphi(t,x) + \gamma(t,x)u(t) \\ s(t,x) = x_1(t) \end{cases} \tag{2-21}$$

其中 $x(t)$ 表示状态变量，$\varphi(t,x)$ 和 $\gamma(t,x)$ 表示光滑的不确定项，$u(t)$ 为控制输入，$s(t,x)$ 为所定义的滑模面。

在现有的二阶滑模控制方法中，均对不确定性做出了全局有界的假设，即：

$$|\varphi| \le C$$

$$0 < K_m \le \gamma \le K_M$$

其中 C、K_m、K_M 均为正常数。

螺旋算法形式如下[50]：

$$u = -r_1 \mathrm{sgn}(s) - r_2 \mathrm{sgn}(\dot{s}) \tag{2-22}$$

其有限时间稳定的充分条件是：

$(r_1 + r_2)K_m - C > (r_1 - r_2)K_M - C$，$(r_1 - r_2)K_m > C$。

取参数 $r_1 = 5$，$r_2 = 1$，初始值 $x_1(0) = 1$，$x_2(0) = 0$。算法相轨迹如图 2-4 所示：

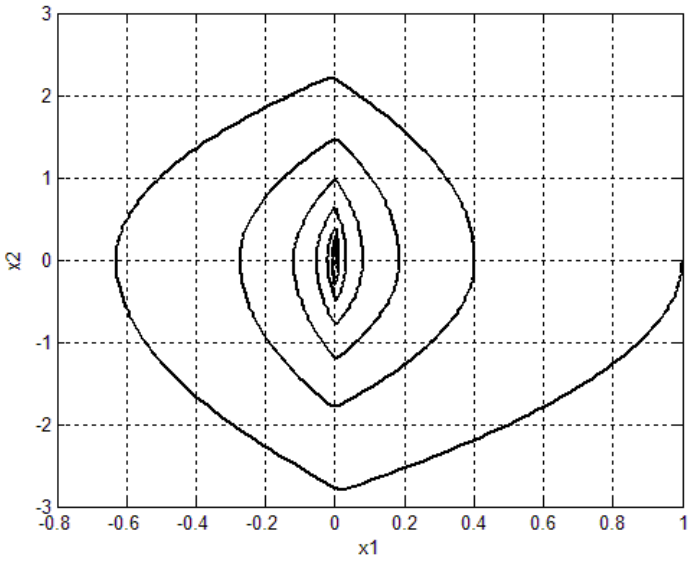

图 2-4 螺旋算法相轨迹

（3）超螺旋（Super-Twisting）算法

考虑单输入不确定非线性系统：

$$\dot{x}(t) = f(x,t) + h(x,t)u(t) \tag{2-23}$$

其中 $x \in R^n$ 为状态变量，u 为控制输入，$f(t,x)$ 和 $h(t,x)$ 为光滑的向量场。

定义滑模面 $s = s(t,x) \in R$，控制的目标是使滑模面及其导数有限时间内到零。

滑模面的一阶导数为：

$$\dot{s}(t,x) = \frac{\partial s}{\partial t} + \frac{\partial s}{\partial x} f(x,t) + \frac{\partial s}{\partial x} h(x,t)u = \varphi(x,t) + \gamma(x,t)u \tag{2-24}$$

其中 $\varphi(x,t)$ 和 $\gamma(x,t)$ 均为不确定的有界函数，令：

$$|\varphi| \le C$$

$$0 < K_m \le \gamma \le K_M$$

其中，C、K_m、K_M 均为正常数。

Super-Twisting 算法[52]是二阶滑模控制方法中唯一连续和唯一适用于系统对滑模面相对阶为 1 的系统的方法，控制过程中只需要滑模面的信息，却可以实现滑模面及其导数同时到达零点，其定义如下：

$$\begin{cases} u = -\lambda |s|^{\frac{1}{2}} \mathrm{sgn}(s) + u_1 \\ \dot{u}_1 = -\alpha \mathrm{sgn}(s) \end{cases} \tag{2-25}$$

其有限时间稳定的充分条件为：

$$\begin{cases} \alpha > \frac{C}{K_m} \\ \lambda^2 > 2\frac{\alpha K_M + C}{K_m} \end{cases}$$

可见，控制器参数同样要根据不确定性的界来选取，才可实现有限时间稳定。

取控制参数 $\lambda = 1$，$\alpha = 1$，初始值 $s(0) = 2$，算法相轨迹如图 2-5 所示：

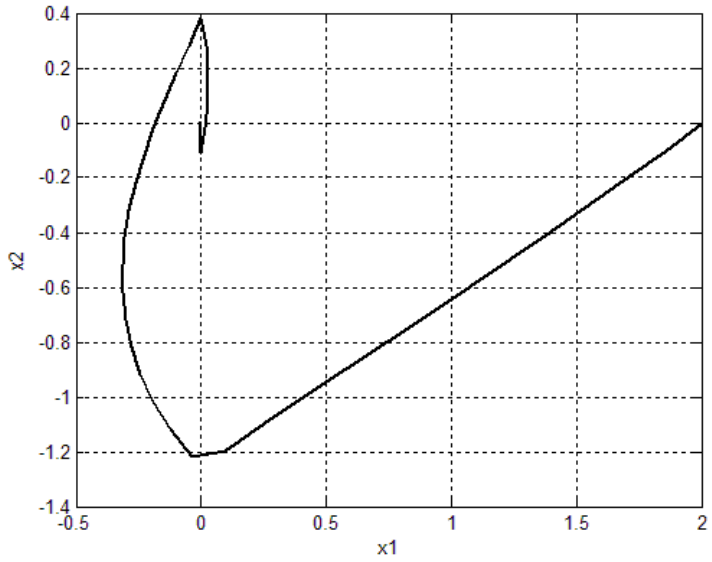

图 2-5 超螺旋算法相轨迹

螺旋算法和超螺旋算法是二阶滑模中应用非常广泛的两种方法。它们都可以保证，在系统不确定性上界已知的情况下系统的有限时间稳定。但实际系统中，不确定性的上界往往是难以获得的，为了得到系统的稳定性控制，往往将参数选的尽可能的大，但结果却容易给系统带来剧烈抖振和系统损坏。

2.3.3 自适应方法

自适应控制器的特点在于自适应控制器的参数是变化的，并且有一个根据系统中状态自动在线校正这些参数的机制。构造自适应控制器的方法有两种：一种是模型参考自适应控制方法，另一种是自校正方法[27]。

一般来说，模型参考自适应控制系统如图 2-6 所示：

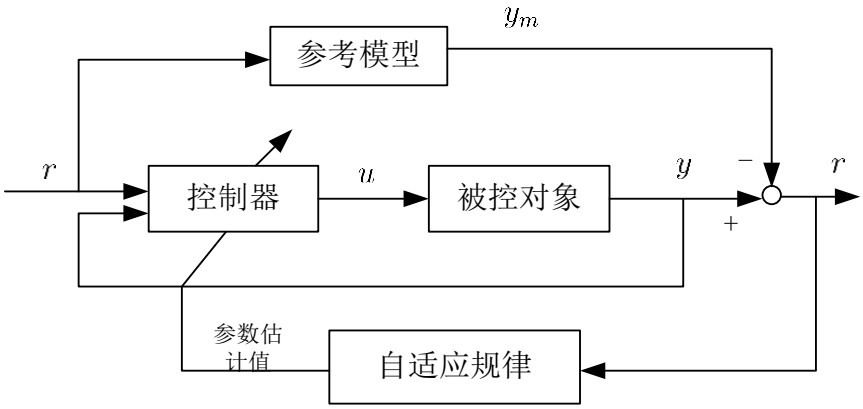

图 2-6 模型参考自适应系统

参考模型用来指明自适应参数对外部指令的理想响应，也属于控制器的一部分。控制器通常是带有一些可校正参数，自适应规律用来校正控制器中的参数，减小模型输出 y_m 与实际输出 y 的误差。

自校正控制器结构如图 2-7 所示，估计器根据以前的输入 u 和输出 y 算出一组系统参数的估计值，然后根据得到的估计器和测量信号算出一个控制输入 u；这个控制输入 u 导致新的系统输出，并且整个循环和输入的更新过程不断重复。

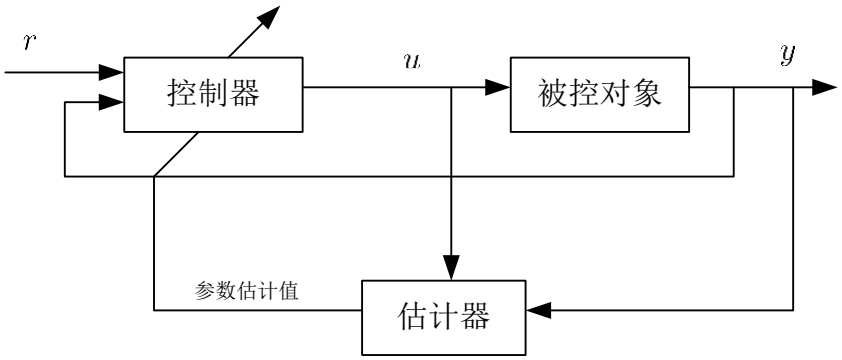

图 2-7 自校正系统

第 3 章 电力电子装置智能监控技术研究

3.1 电力电子装置智能监控技术及方案设计

3.1.1 电力电子装置监控系统结构--分层分布式结构

已有的研究中，针对电力电子装置的监控装置研究较少，现有技术的电力电子装置一般都致力于对其本身性能的提高，忽略了对其性能稳定性的考虑。已有的监控系统大多包涵基本的数据采集、在线监视、运行控制、显示和通信等内容，未曾涉及监控系统对整个装置进行数据挖掘及状态评估等问题，因此会带来系统运行不稳定、故障不能早发现早排除等问题

针对现有技术存在的不足和缺陷，这里提出一种电力电子装置监控系统结构框架如图 3-1 所示：

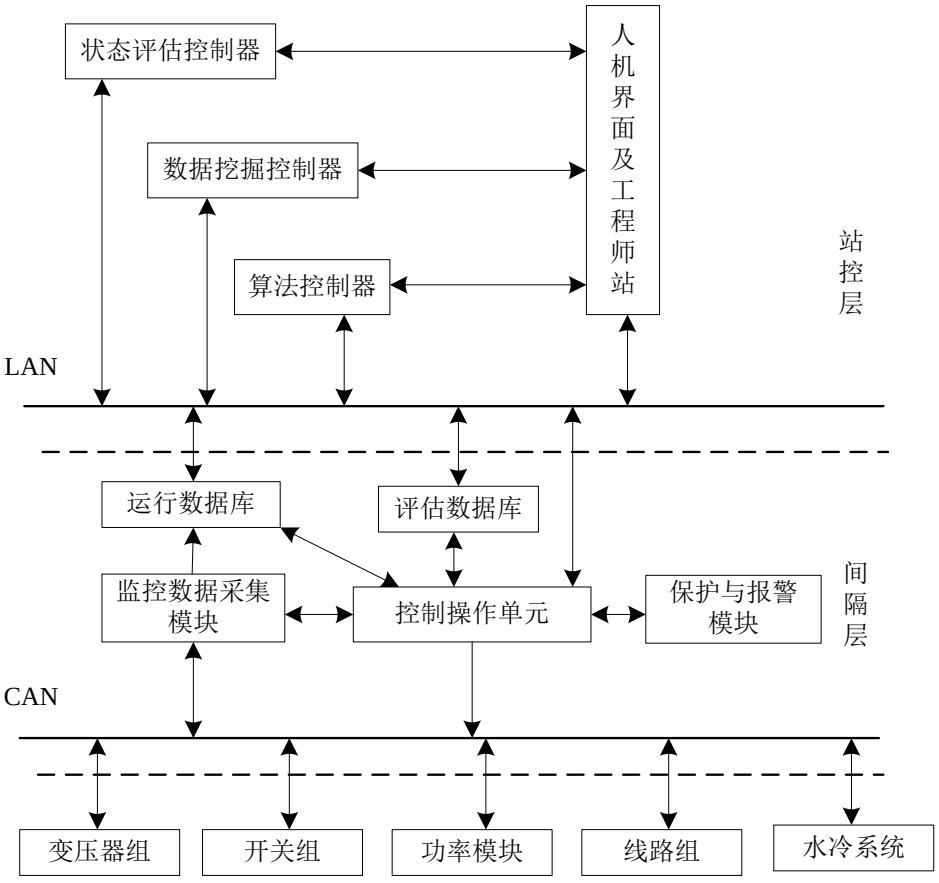

图 3-1 电力电子装置监控系统

该监控系统除包括电力电子装置最基本的实时数据采集与处理、在线监视、运行控制、通

讯、数据记录与查询等基本功能外，所提出的架构中包括站控层和间隔层，其中间隔层连接电力电子装置和站控层，用于实时采集所述电力电子装置的运行状态数据，并进行存储；站控层，用于获取所述运行状态数据，根据所述运行状态数据对所述电力电子装置进行基本控制操作、安全稳定性分析、异常挖掘与预测、运行优化，并对所述电力电子装置的各个电气设备进行状态评估，根据状态评估结果确定是否需要检修。

这一架构优越性体现在利用间隔层实时采集电力电子装置的运行状态数据，并利用站控层根据所述运行状态数据对所述电力电子装置进行安全稳定性分析、异常挖掘与预测、运行优化和状态评估，功能更为全面，能使电力电子装置较为稳定地运行，且使各个电气设备的故障能够早发现。

站控层和间隔层通过 LAN 相连接，间隔层通过串行通讯总线 CAN 相互连接，间隔层与电力电子装置各电气设备之间通过 CAN 连接。

间隔层包括保护与报警模块、监控数据采集模块、控制操作单元、运行数据库和评估数据库，站控层包括人机界面及工程师站、算法控制器、数据挖掘控制器与状态评估控制器。采用这种分层分布式结构系统构架清晰，同时将高级控制策略分为三个模块，数据库文件分为两个模块，便于运行状态分析与设备状态评估。该监控系统功能全面，包括：实时采集并显示电力电子装置的运行状态，在线判断电力电子装置故障状态，运行信息记录与分析、电力电子装置运行优化、各设备状态评估以判断是否需要检修等。

监控数据采集模块，用于实时采集所述电力电子装置及其电气设备的运行状态数据，并将运行状态数据存入所述运行数据库和评估数据库，其中，评估数据库中还存储有所述电气设备的预防性试验数据和历史数据。运行状态数据包括： 电力电子装置处电网实时电压电流与谐波、电力电子装置输出电压电流与谐波、各个电气设备基本运行数据（如变压器原副边电压电流、开关设备状态及噪音、功率单元电压电流、水冷系统的水压水质水位、各设备运行及环境温湿度等）、以及电力电子装置各个保护测量单元模拟量、开关量、电度量、保护动作信息等。预防性试验是在设备投入使用前，对应不同指标，通过不同试验方法提前判断设备安全性的行为。历史数据指标包括设备投运前的基础数据(如技术参数、已使用时间等)、设备自身的质量等级、厂家规定的设备使用年限、用户对该设备的评价等。除此之外，还可以包括设备的外观检查与运行环境。

监控数据采集模块，还可以用于根据电气设备的类别对所述运行状态数据进行分类，并将分类后的运行状态数据存入所述运行数据库和评估数据库，其中，电气设备分为变压器组、开关组、线路组、功率组和水冷系统五个类别。变压器组包含所有的绕组类设备如：变压器、电

抗器、互感器等，开关组包含高压断路器、高压接触器、高压隔离开关等，水冷系统适用于高压大容量的电力设备。每个设备的不同的数据统一存放，以备状态评估时使用。通过运行数据库可以对历史运行数据进行存储，对各分类建立索引，并提供对运行数据的管理、查询、备份和恢复功能。

控制操作单元，用于获取所述运行状态数据，根据运行状态数据对所述电气设备进行初始运行控制，并负责整个工作流程的命令发出与接收。其中，初始运行控制，具体指的是判断某些运行参数是否在预先设置的阈值范围内，根据判断的结果生成相应的控制指令下发至相应的电气设备，以保证电气设备运行安全。此外，在运行参数不在安全范围内时，可以通过保护与报警模块进行报警。

人机界面及工程师站提供人机交互界面，用于获取并显示运行状态数据，并通过控制操作单元向电气设备下发控制命令，对电气设备进行控制，包括用于显示所电力电子装置的电气原理图的电气结构界面、用于对电气设备进行控制的操控界面、用于对电气设备进行调试的设备调试界面（可手动更改各开关状态）和报警界面。当 STATCOM 装置发生事故、故障和越限事件时，保护与报警模块通过报警界面推出相应画面进行报警（当然也可以启动声音报警等）。

需要说明的是，人机界面可以为具有触摸屏的工控机，方便人员操作，比如下达命令、查阅信息等，提供友好的控制界面，使运行人员可通过键盘或鼠标对设备各保护测量单元进行校时、下发保护定值、分合断路器、调节变压器分接头等操作。工程师站为报表及维护工作站，用于完成报表的绘制、查看和打印以及系统数据库的建立与修改，画面建立与修改，整个系统运行参数的定义与修改。除此之外，还可以设置相关的用户信息管理功能，以及各种曲线、日报和月报的生成、打印等功能。

具体地，电气结构界面，显示的是整个电力电子装置的电气原理图。图中，各电气开关和各组成部件的背景颜色可跟随实际操作或运行动作变化，即可以实时反映当前状态。在报警时，还可以使发生动作的相应装置闪烁告警。操控界面由上至下可分为三个主要部分：系统操作按钮，系统电气简图和装置动作按钮，以对整个系统以及电气设备进行控制。对于不同的操控人员，操作权限不同，这可通过“切换权限”选择按钮来进行选择。此外，电力电子装置的各种记录信息可以存储在运行数据库中，如运行人员的操作记录信息、保护动作事件记录等，并提供查询工具，以供查询。

另外界面还可以包括系统信息页面、电压电表页面、录波界面、告警界面等。

算法控制器包含使电力电子装置实现其基本功能的算法（主要包括稳态调压策略、恒无功输出策略、阻尼控制），用于获取运行状态数据，根据运行状态数据对电气设备进行基本功能

的运行控制，数据挖掘控制器用于获取运行状态数据，根据运行状态数据对电气设备进行安全稳定性分析、异常挖掘与预测、运行优化，状态评估控制器，用于获取评估数据库存储的数据，根据评估数据库存储的数据对各个电气设备进行状态评估，根据状态评估结果确定是否需要检修。

状态评估控制器用于建立评估模型，并基于评估模型利用预设的评估算法对电力电子装置每一模块的各评估指标进行计算，根据评估指标计算结果生成各模块的状态评估结果，得出是否需要状态检修的结论。

评估过程主要包括两部分：评估模型建立与评估算法的应用。评估模型是将电力电子装置各设备按组成特点科学地进行模块化分类，确立评估指标并最终形成的层次清晰的评估体系。评估算法是应用已有的模糊、权重分析等方法进行每一模块各指标的计算，从而得出不同的结论，进而生成电力电子装置各模块的状态评估结果，得出是否需要状态检修的结论。

3.1.2 监控软件系统主要功能

1 实时数据采集与处理

（1）采集电力电子装置内各个保护测量单元模拟量、开关量、电度量、保护动作等信息，以及其他一些附属的电子多功能仪表的信息#并保证不断地得到快速更新，使系统对各种事件进行快速响应。

（2）对数据信息进行一些必要的预处理，如对通信协议的解析、数据信息分类、更新数据库等。

2 在线监视

系统运行状态下的在线监视主要是对站内各种电气设备的运行状态进行实时的监视，在系统一次主接线图上实时显示各电气设备的电压、电流、频率和开关状态等状态数据"即将采集的数据信息以友好的界面提供给运行人员。当电力电子装置发生事故、故障和越限等事件时，监控系统将自动完成一系列的处理工作，如启动声音报警、推出相应画面、发生动作的相应装置闪烁告警等。

3 运行控制

提供友好的控制界面，使运行人员可通过键盘或鼠标对站内各保护及测量单元进行校时、下发保护定值、分合断路器、调节变压器分接头等操作。

4 历史数据记录与查询

对采集到的各个保护测量单元的模拟量、 开关量、电度量、保护动作等信息，以及其他一些附属的电子多功能仪表的信息定期保存到历史数据库中，并对其分类索引。提供查询工

具"查阅系统的各种记录信息，如保护动作事件记录、运行人员的操作记录、站内保护装置模拟数据的曲线图、饼图或棒图等。

5 与上级调度通信

将站内各种装置所提供的数据信息归纳整理成CDT规约的通信格式，在上级调度需要时上传；对上级调度下发的命令接收、解析。

6 曲线报表及其他功能

一个完整的监控软件系统还需要相关的用户信息管理功能，以及各种曲线、日报和月报的生成、打印等功能。

7 数据挖掘

数据挖掘是解决电力电子装置运行安全稳定问题的一种有效途径，作为当今智能系统领域的重要研究内容，数据挖掘近年来在国内外受到极大重视，如何开发适合电力电子装置系统自身特点的后续分析工具,有效的利用仿真与实测动态数据,填平数据和信息之间的鸿沟,将淹没在海量数据中的有效信息提取出来，供电力电子装置系统运行和研究使用，使数据坟墓转换为知识“金块”，具有十分重要的现实意义，也日益成为摆在各国科研人员面前的重要课题。

8 状态检修

随着技术的发展和社会的进步，状态检修作为一种较定期检修方式更能降低维修成本、缩短检修停电时间、延长设备寿命的检修方式，已越来越受到我国电力企业的欢迎。但状态检修是一种比较新的检修体制，成功的实例并不多，鉴于此，作为状态检修依据的设备健康状态评估系统的研究也处于摸索阶段。 以在线监测数据为基础的设备健康状态评估，既要按照设备巡视检测、定期检测和带电（在线）检测的结果进行故障诊断，还要结合运用传感技术、光电子技术及计算机技术等先进的手段，适时反映设备状态。对不同的电力设备，表示设备整体状态的参数可能是不同的，需根据具体情况确定。而以预防性试验数据为基础的设备状态评估，则是根据设备的历次试验数据（交接性、预防性），运行电压下的各种参数变化，承受负荷及经受短路的情况，并与同类设备比较，综合分析设备的健康状况，作为判断设备是否需要检修的依据。

3.2 基于 FPGA 的电力信号有效值大规模并行计算

随着能源互联网的研究发展，相关的电力控制装置中的智能化程度越来越高，与此同时对电力信号进行计算处理的压力越来越大[96][97][98]。例如，电力信号的有效值计算就是一个典型

的信号处理需求。在电力系统状态监测中，电压与电流等交流信号的精确测量起到关键的作用，这一过程面临两个难点问题：一是在电力系统交流采样中，采样周期与信号周期的不同步，导致交流信号真有效值测量误差难以消除；二是常见的应用场景中，需要对多路的电力信号同时完成数字化计算处理，这会给控制器的核心计算器件，一般为嵌入式的 DSP 等计算能力较为薄弱的运算器件，带来巨大的设计压力。

为了解决处理周期与信号周期的匹配问题，一般的做法是采用软件方法使得采样周期与信号周期完成同步，根据真有效值的定义推导出测量交流信号真有效值的计算公式。对过零点的检测和采样周期进行估计，使得周期之间的匹配尽量精准。文献[99]中将目标定位到采样周期的同步上，利用了硬件方法完成采样周期的同步判断和计算。文献[100]为了克服离散系统中交流信号和采样系统的频率匹配问题，通过自适应的调整分析窗口，使得每一个分析窗口都尽可能的接近一个交流信号周期，进而减少系统误差。许多文献采取了回避策略的方法：文献[101]通过分析 RMS 计算的过程认为利用快速傅里叶变换的方法可以完成真有效值的计算，而不必关心采样周期不匹配带来的负面影响。文献[102]通过对样本数据逐点平方以后依据信号的最低频率分量和计算精度要求设计一个数字式低通滤波器对平方以后的样本进行滤波处理，等价的进行平均计算，然后一次开方计算获得信号的真有效值。该方法巧妙的回避了测量周期与实际信号的周期不匹配的问题，提升了算法的使用空间。还有一类不采用算法解决的方案，文献[103]利用了已经成熟的电平转换芯片设计了扩展频谱能力的有效值采样系统，能够处理直流到 2k
Hz 交流的信号有效值。

利用 FPGA 器件的可重构能力，将计算任务从传统的冯氏结构计算部件迁移到 FPGA 器件，以硬联逻辑方式并行执行以获得性能改善，是可重构计算研究领域里面已经公认的事实。文献[104]中，Russell 总结了当时可以观察到的可重构计算技术对于数字信号处理带来的平衡优势，在设计难度和运行速率上可以寻求更加合理的平衡点，因为可重构计算在当时就在多个方面例如功耗造价生命周期以及可维护性上体现出了足够的竞争优势。文献[105]实现的系统中对 FPGA 的应用停留在单片机与 AD 采样期间的接口水平上，没有充分利用 FPGA 能够提供的并行计算能力。文献[106]认为传统的冯氏结构计算机在处理大规模数据时效率低，原因在于运算过程和计算机里决定了性能优化的上限。利用可重构计算技术将此类计算进行时间并行化和空间并行化，是解决这一问题的极具前景的研究方向。并以 FFT 为例提出了一种粗粒度的可重构计算设计平台 CTaiji 来成功验证这一想法。文献[107]利用可重构器件以并行方式完成前束范式计算，通过高效率的数据流模型实现了并行度和可扩展性。文献[108]利用 FPGA 器

件中的可重构框架实现了多种数字滤波器的运算核心：FIR、FFT、IFFT、2D-DCT 以及 2D-IDCT。针对未来 SOC 多媒体应用环境，文献[109]提出了新兴的离散小波分析处理结构，满足了多样化的计算任务需求。文献[110]中使用 FPGA 实现了稀疏矩阵的运算，用于电力传输系统智能控制中的运算效率提升。文献[111]采用了中间件的方法，完成模型设计到真实电路实现的自动化转换，有效地降低了设计成本。文献[112]提出系统设计方法，完成分布式正常控制逻辑的设计，引入了基因算法对正常控制逻辑的改进和优化。把正常控制逻辑与故障处理逻辑分立出来，以单独的不同模块进行实现功能，提高系统的鲁棒性。

由于嵌入式系统核心计算期间的能力受到体积、造价以及能源供给等限制，对外置式可重构的辅助计算技术提出了更加明确的要求。嵌入式计算体系与可重构器件相配合完成高性能计算的设计也已经充分证明了技术路线的可行性。文献[113]中设计了可重构运算的单元，可以作为协处理单元或者并行数学运算单元与通用的 DSP 处理器相配合使用。可重构的单元可以支持 3 种数据类型，22 种数学或者逻辑运算，测试结果表现出了优秀的加速比。文献[114]认为向量相似性矩阵求解过程是数据挖掘技术中一项常见的数学运算内容，该文通过移植的方法将运算迁移到可重构硬件中执行，适应了嵌入式系统中软硬件资源的局限性。在辅助设计相关的技术研究中，文献[115]指出程序语言到执行指令序列之间的编译转换过程，需要针对性地为了嵌入式系统中可重构资源进行优化。

综上所述，可重构器件对于提升嵌入式系统计算性能及计算效率具有可信可行的优势，但是相关的针对性算法中还缺乏对有效值快速计算方法采用专用的数字式滤波器对信号进行处理的研究。本文通过对有效值计算方法的本质分析，设计了全新的算法完成原始信号到有效值的直接映射，避免了累加求和以及求平方根的计算。该算法可以通过软件实现降低控制器的计算压力，也可以通过 FPGA 硬件实现将计算压力完全转移到 DSP 之外。

3.2.1 电力信号有效值计算方法问题

交流有效值的定义为一段时间内被测量信号的均方根，原始计算公式为：

$$U_{RMS}=\sqrt{\frac{1}{T}\int_0^T v^2(t)dt} \tag{3-1}$$

公式(3-1)中，$v(t)$为带测量的交流信号，T是交流信号的周期。通常这种有效值被称为真实有效值，有时也被称为均方根值。

对于离散的数字化控制系统来说，这一计算一般表示为：

$$U_{RMS}=\sqrt{\frac{1}{n}\sum_{k=1}^{\mathrm{n}} v^2(k)} \tag{3-2}$$

公式(3-2)中，n是每一个信号周期中完成的采样点数，$v(k)$是位于第k个位置的采样值。当控制系统的采样频率为 6.4KHz 的时候，每一个正常的公平信号周期 20ms 中采样点的个数是 128。那么对于任意一路信号，每次一个完整的有效值计算需要 128 次乘法，127 次加法，以及 1 次除法和 1 次开平方运算。当需要处理的信号路数随着系统复杂程度的提升而增长的时候，这种计算方的方法很快就会遇到计算能力的瓶颈约束而失去可用性。

3.2.2 利用 FPGA 实现大规模并行计算电力信号有效值

针对原始算法计算量大的缺点，借鉴文献[92][93]中对信号进行数学分析，以间接方式获得有效值的方法。本文提出了取绝对值然后进行低通滤波，最后通过映射关系获得有效值的方法，并且设计了适合于在 FPGA 硬件上实现的计算方法。

对信号取绝对值然后进行低通滤波

由于正常的电力信号是标准工频 50Hz 的正弦波，那么取绝对值然后进行低通滤波处理以后，结果数值与信号的峰值之间存在确定的换算关系。公式(3)表明信号取绝对值以后在经过低通滤波算法得到的结果：

$$LPF(|v|) = \frac{1}{T}\int_0^T |v(t)|dt \tag{3-3}$$

公式（3）中T是电力信号的周期，$v(t)$是 *t* 时刻的采样值。

由于

$$\frac{1}{T}\int_0^T |x(t)|dt = \frac{1}{\pi}\int_0^\pi x(\theta)d\theta = \frac{1}{\pi}\int_0^\pi U_M \sin(\theta)d\theta \tag{3-4}$$

并且

$$\frac{1}{\pi}\int_0^\pi U_M \sin(\theta)d\theta = \frac{2}{\pi}U_M \tag{3-5}$$

所以

$$LPF(|x|) = \frac{2}{\pi}U_M \tag{3-6}$$

上面公式中U_M为信号的峰值，$x(\theta)$为以相角为参数的时候，相位角θ处所对应的采样值。公式(3-6)表明了电力信号取绝对值进行低通滤波处理后，结果数值与信号的峰值之间存在确定的换算关系。

与此同时，正弦信号的有效值U_E与信号峰值U_M之间的关系如公式(3-7)所示：

$$U_E = \frac{\sqrt{2}}{2}U_M \tag{3-7}$$

组合公式(3-3)和公式(3-7)可以得到有效值U_E与低通滤波结果$LPF(x)$的关系如公式(8)所示

$$U_E = \frac{\sqrt{2}}{2}\frac{\pi}{2}LPF(x) \tag{3-8}$$

有效值快速计算方法的迭代公式

由于公式(3-8)的计算公式涉及到浮点数计算，不适合在 FPGA 硬件上直接部署，所以需要进行转换，使用定点小数计算的形式完成在 FPGA 上的实现。

首先，改写公式(3-8)为迭代形式的数字滤波公式。

$$U_E^{(\mathrm{n})} = (1-\alpha)U_E^{(\mathrm{n}-1)} + \frac{\sqrt{24}}{2}\frac{\pi}{2}\alpha x^{(n)} \tag{3-9}$$

上式中，上标(n)表示当前迭代步骤，α为低通滤波器的滤波系数，当目标低通滤波器的截止频率为f的时候，α可以由下式决定。

$$\alpha = 2\pi f \Delta t \tag{3-10}$$

其中Δt为控制采样系统的控制周期。

令

$$\begin{cases} K_1 = 1-\alpha \\ K_2 = \frac{\sqrt{2}}{2}\frac{\pi}{2}\alpha \end{cases} \tag{311}$$

则信号处理公式可简化为:

$$U_E^{(\mathrm{n})} = K_1 U_E^{(\mathrm{n}-1)} + K_2 x^{(n)} \tag{3-12}$$

有效值快速计算方法在 PFGA 上的实现

在 PFGA 器件上实现的计算过程需要归结为整数的运算，所以公式(3-12)中的系数需要根据实际情况转换为分数形式表示的运算，并且将乘法运算按照 FPGA 的语法规范设计成移位和加法。

以某型号电力智能控制装置为例，系统采样频率为 20KHz，采样周期是 50us。当设定低通滤波截止频率为 0.5Hz 的时候，公式(3-10)中计算得到的α应该为：

$$\alpha = 2\pi \cdot 0.5 \cdot 0.00005 = 0.00015707963 \tag{3-13}$$

而公式(3-14)中K_1和K_2的数值应该为：

$$\begin{cases} K_1 = 1-\alpha = 0.999842 \\ K_2 = \frac{\sqrt{2}}{2}\frac{\pi}{2}\alpha = 0.000174472 \end{cases} \tag{3-14}$$

寻找适合于硬件计算的分数形式表示的近似值可以得到：

$$\begin{cases} K_1 = \frac{8191}{8192} \\ K_2 = \frac{3}{16384} \end{cases} \tag{3-15}$$

那么 FPGA 上就可以采用移位相加的方法完成迭代计算。VHDL(Very-High-Speed Integrated Circuit Hardware Description Language)语言形式表示的计算模块设计将如下算法表示：

1 effectReg≤effect// 32 bits

2 –{{13{effectReg[31]}},effectReg[31:13]}

3 +{{13{absample[15]}},absample,3,b0}

4+{{14{absample[15]}},absample,2,b0};

算法中，变量 effectReg 是 32 位带符号的整数寄存器，用于寄存定点小数形式存储的有效值历史值。在每一个采样时钟周期来临的时候，通过上述的算法生成新的有效值计算结果并锁存至寄存器。absample 是 16 位宽的信号采样绝对值，是有效值计算模块的整数型输入信号。

输出的时候，

1 assige effect= effectReg [31:16];

通过移位的方法获取 32 位的 effectReg 寄存器除以 9182 的结果，变量 effect 是 FPGA 模块的输出信号，其数据范围为 16 位整数。

3.2.3 实验结果和结果分析

为了验证基于 FPGA 实现电力信号有效值计算的可行性，在某型号电力控制器上组织了单纯软件实现来与 FPGA 实现的运行效率比对，下面分别介绍实验环境、测量参数、测量结果以及对比结果的分析。

实验环境和器材

验证试验的电力控制器的系统构架如图 3-2 所示，主要硬件组成部分可以分为 5 个模块：中心控制器(CPU)，数字量输入模块(DI)，数字量输出模块(DO)，模拟量采集模块(ADC)和模拟量调制输出模块(PWM)。各个模块为单独插卡形式的电路板卡，统一连接在一个机箱的背板总线上，另外还配有自制电源模块。模块之间通过背板总线完成控制信号和数据信号的传递。

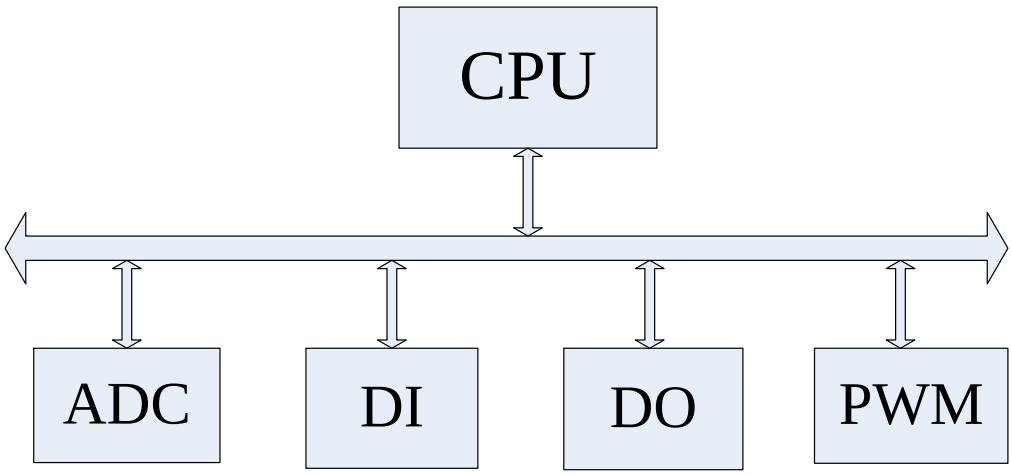

图 3-2 电力控制器系统架构

电力控制器实物如图 3-3 所示，除底部背板外，图片中由左至右分别为电源板、模拟量采集板、数字量输入板和数字量输出板、两块模拟量调制输出板，以及中心控制器板。

图 3-3 电力控制器实物图

验证试验的电力控制器的中心控制模块中，核心运算器件选用 TI 公司的 TMS F28335，该 DSP 运行时主频为 150MHz。DSP 上运行的软件程序实现整个装置的各种信号采集和逻辑控制，中心控制模块如图 3-4 所示：

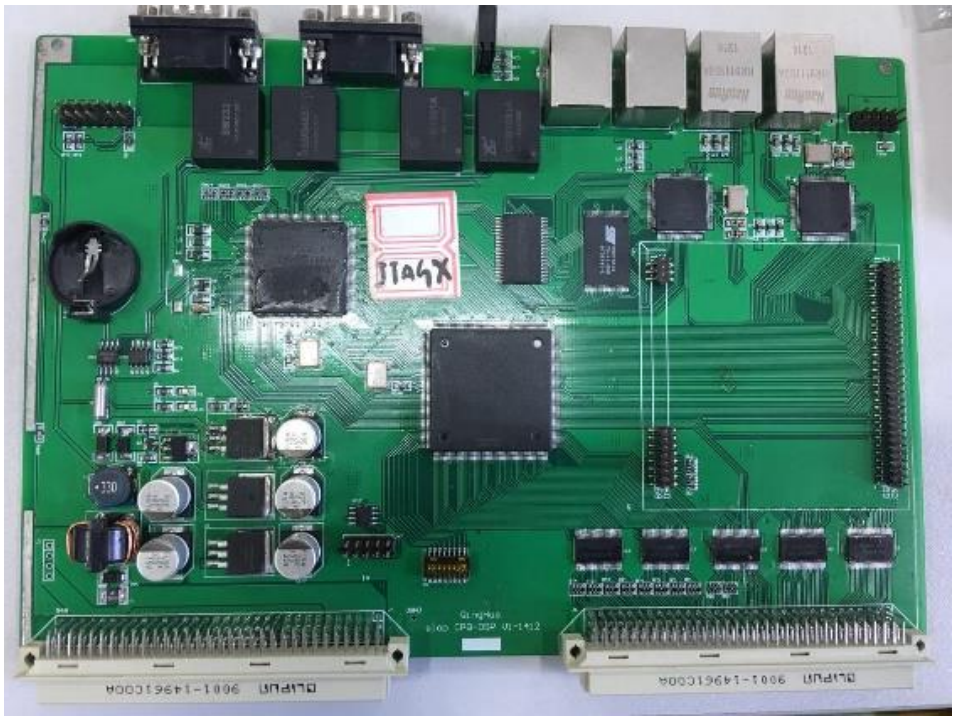

图 3-4 中心控制器模块

模拟量采集模块的数字化采样子系统选用了 AD7606，这是一款 8 通道双极性输入数模转换器件。模拟量采集模块上部署了 FPGA 作为控制核心，用以完成数字化信号采集芯片的运行控制、通过背板总线完成与中心控制模块的数据交换、以及前端的数据缓冲和信号处理。模拟量采集模块如图 3-5 所示：

图 3-5 模拟量采集模块

模拟量采集模块中的 FPGA 芯片选用了 Altera 公司的 I 代 Cyclone 工业级芯片 EPIC12Q24017，该芯片具有 12,060 个可编程逻辑单元，52 个 M4K 嵌入式内存单元可以存储 239,616 个二进制位的数据，用户可以使用的可编程管脚数量 249 个。

采样系统需要对 24 路工频信号同时进行采样监控和处理，DSP 运行时主频为 150MHz，FPGA 运行主频 60MHz，采样频率在软件方式处理时设定为 5KHz，通过 FPGA 硬件辅助完成计算时采样频率可以提升为 20KHz。

测量参数和测量手段

对比试验中，软件方法利用传统的求取平方和的平均值，然后开平方的方法完成 24 路电力信号有效值的计算。硬件方法中，将 24 路信号的有效值计算算法逻辑部署到 FPGA 芯片上，AD 采样结果经过分析以后暂存在 FPGA 芯片上的寄存器里面。DSP 只需要通过访问 FPGA 上结果寄存器组映射到的地址空间，即可得到目标信号的分析结果。

两种算法的起始和结束点都通过硬件逻辑在专门设置的芯片管脚上标志为电平的切换，然后就可以利用示波器精确测量两种算法所占用的时间。

测量结果

对比试验的测量典型记录结果如下图所示：

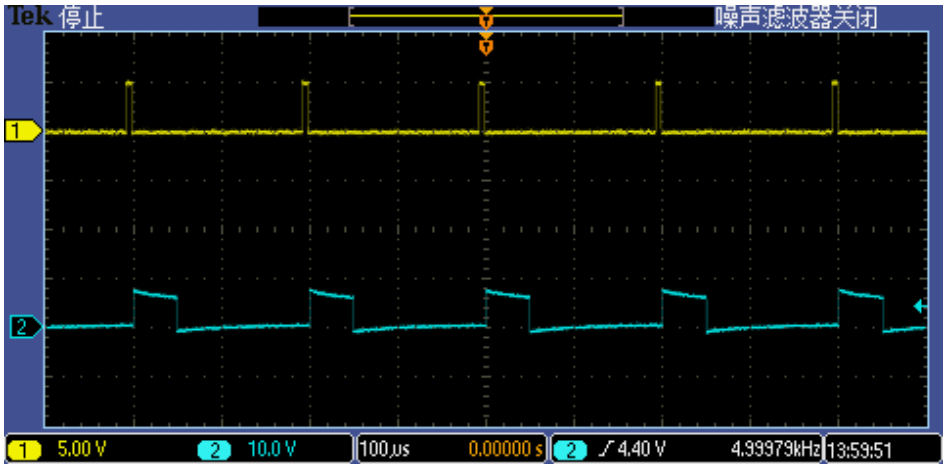

图 3-6 对比试验测量典型记录

图中，上部分黄色线为 PFGA 计算时间，下部绿色线为软件计算时间，可以看出，本文所提出 FPGA 计算时间明显少于软件计算时间。

多次试验的测量记录结果如下表所示：

表 3-1 对比试验测量结果

次数	软件计算时间（μs）	FPGA 计算时间（μs）	加速倍数
1	250	25	10
1	270	30	9
1	250	26	9.62
1	300	27	11.11
1	290	30	9.47
Avr	272	27.6	9.86

实验结果分析

由上述的测量结果可以看出，利用 FPGA 器件进行并行化处理以后，对电力信号的处理效率有着接近 10 倍的速度提升。这种效率的改进充分说明了本文中所提出的有效值计算方法的有效性。

仿真和实验结果表明，由于利用了 FPGA 器件的计算能力完成大规模并行处理，信号处理的效率得以明显提升，对应的控制核心的性能需求明显降低。本节中的算法改进和移植的思维，也可以用于其他类型的信号分析算法。

3.3 基于互联网通信的多 STATCOM 系统

电力系统中大量无功功率的存在，会造成电压跌落，影响电能质量，产生不必要的电能损

耗的同时影响电网安全性。无功功率补偿是维持现代电力系统稳定、安全与经济运行所必需的。无功补偿技术代表了一个国家电力水平的高低。静止同步补偿器(Static Synchronous Compensator，STATCOM)的出现成为了现代静止无功补偿装置的一次新的变革，以其具有响应速度快、控制精度高、可动态连续补偿、有效抑制电压波动和闪变等优越性能，已成为柔性交流输电系统装置中的重要成员之一。

互联网在提供信息、电子邮件、IP 电话以及电子商务等方面迅速和广泛地发展, 深刻影响到人们的生活、工作, 乃至思维方式。电力系统应密切关注互联网技术，并将其应用于各重要领域。先进的互联网通信技术与信息技术的使用将有望提高电网的安全性、可靠性和运行效率。

无功补偿的原则是分区补偿，就地补偿，减少无功功率在线路上的传输。一般情况下，电网正常运行，负载吸收的无功，单独补偿就可以，这种情况不会造成安全稳定问题，更多考虑用便宜的电容器和 STATCOM 补偿。但是，当电网发生故障时，需要补偿大量无功功率，而且要求补偿速度快，这时候的动态无功需求要用 STATCOM 补偿，紧急情况下无功大量传输是可以接受的；STATCOM 设备受其本身电力电子器件的耐压水平、载流能力、开关频率等技术水平的限制，单机容量有限，当系统需补偿的电流超过单台 STATCOM 设备的额定补偿能力时，通常将 N 台设备分别接入母线，独立运行，分散控制，补偿效果较差，使其应用场合存在较大局限性；另外，STATCOM 容量不同，造价也不同，出于经济方面考虑，低容量的 STATCOM 可大大节约运行成本。

3.3.1 基于互联网通信的无功补偿方案

鉴于此，本节提供一种多台 STATCOM 独立运行的基于互联网通信系统的无功补偿方法，如图 3-7 所示，能够实现各 STATCOM 设备协调输出，大大减少资源浪费。并且当某一台 STATCOM 发生故障时，可通过通信协调使得其它 STATCOM 发出无功补偿，保证电网安全。

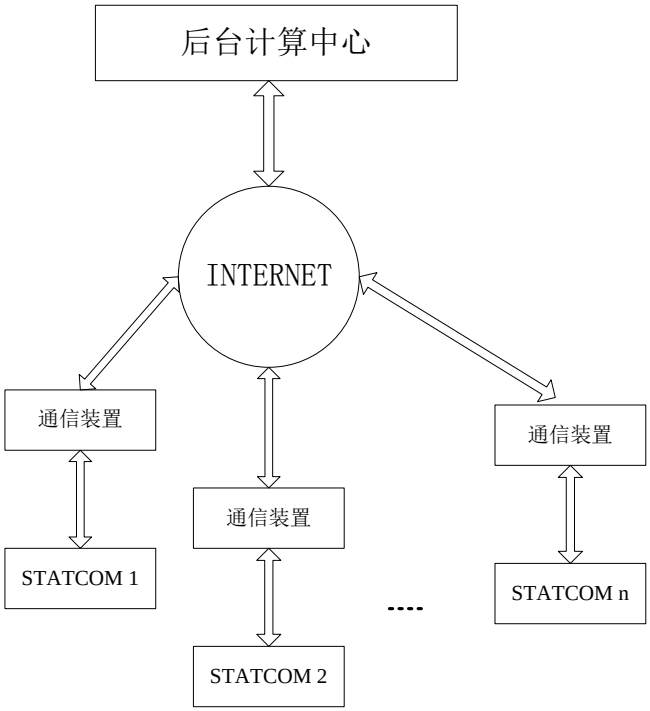

图 3-7 多 STATCOM 无功补偿方法

基于互联网通信的多 STATCOM 系统，包括 n（n>=3）台安装在电网中同线路不同位置或不同线路中独立运行的静止无功发生设备、基于互联网通信并与每台 STATCOM 相连的互联网连通信装置和互联网后台计算中心。

其中基于互联网通信的多 STATCOM 系统包括：电网数据采集处理模块、互联网通信模块、互感电路、控制电路、驱动电路、主电路和保护电路；互感电路包括电压互感器与电流互感器；控制电路与互联网通信模块和驱动电路相连；电网数据采集处理模块与所述互联网通信模块相连；主电路、驱动电路和保护电路依次通过电缆与电网相连接。互联网通信装置指光纤交换机或无线路由器。后台计算中心指 ARM 或能够承担通信和计算任务的其它计算机设备。

基于互联网通信的多 STATCOM 系统通信方法包括：每台 STATCOM 的数据采集模块采集其安装位置的电网实时信息，通过通信网络传输到互联网后台。互联网后台计算中心根据每台 STATCOM 发送的信息综合处理，得到总体需要补充的无功功率，并且计算每台 STATCOM 最大有无功功率发出量。后台计算中心根据计算结果，向每台 STATCOM 的控制器输出需要补偿的电流指令；每台静止无功发生设备中的驱动电路、主电路和保护电路根据控制器输出的需要补偿的电流指令输出补偿电流。

后台计算中心判断需补偿位置与各 STATCOM 的位置关系，按远近排序，按近距离 STATCOM 的优先补偿的原则对各 SVG 下发指令。

与现有技术相比，这一方案优先之处在于：1，实现区域内多个低容量 STATCOM 系统取

代单个大容量 STATCOM，降低了造价。2，基于互联网通信使得系统灵活性与安全性大大增加，当某台 STATCOM 发生故障时，附近的 STATCOM 能够及时补偿线路，以确保供电安全性。

3.3.2 具体实施方式

若电网中位置 a 提示需要无功补偿，算法开始；

首先，算法获取节点 a 的位置，根据已知的其它 STATCOM 位置，逐个计算 a 到每个 STATCOM 的输电距离，得到向量 D[N]，并且，列出对应的每个 STATCOM 的最大输电能力向量 E[N]；为了优先使用离 a 点最近的 SVG 为 a 补充供电，需要对 D[N]排序，并同步修改 E[N]的顺序。

按照冒泡排序法。设定将最小值下沉。从 D[0]开始，每两个临近的 D[i]与 D[i+1]，作比较，小者下沉，并参与下一次比较。注意，这个过程中要同步修改 E 向量的对应元素位置。直到第一次计算到 D[N]位置，就得到了向量 D 中的最小值，存于 D[N]位置。得到最小值 D[N]后，查看 E{N}的输出能力数值能否满足 a 点的需求，如果能够满足需求，则将结果存入指令集合 R，等算法结束后执行 R。如果不能满足，则将“D{N}对应的节点满输出”指令暂存于 R，计算出输出能力差值 detQ=Q-E[N]。并继续冒泡排序，寻找次最小值 D[N-1],找到后再次判断能否满足ΔQ。以此类推直到得到满足 Q 的指令集合 R，算法结束，启动硬件执行 R 中指令。然而，如果冒泡排序已经结束，仍不能满足 Q，则告警本电网不能满足 a 点需求，并且清空指令结合 R，请求人为干预。

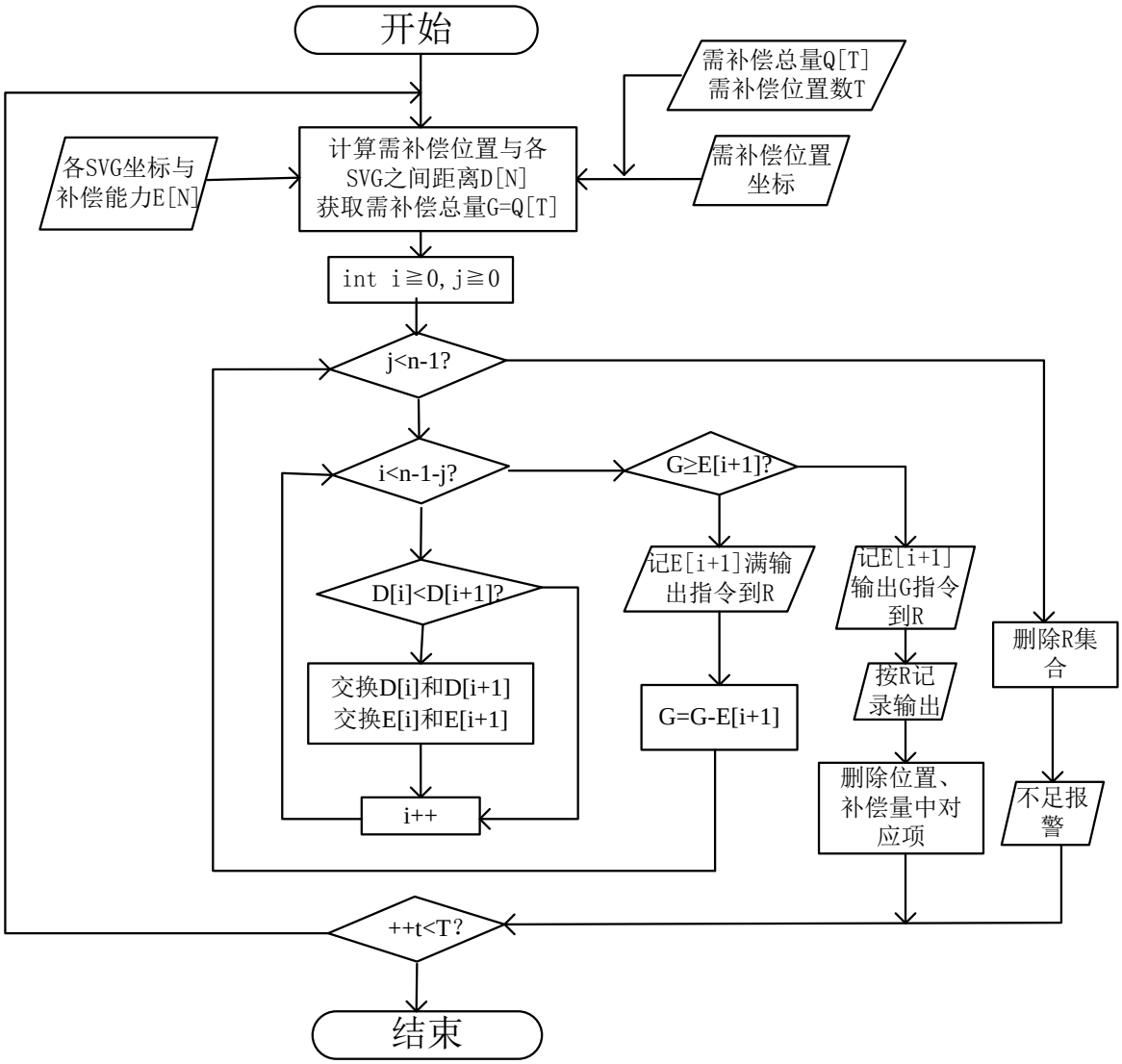

图 3-8 基于互联网通信的无功补偿方案流程图

第 4 章 电力电子装置状态检修技术研究及方案设计

4.1 国内外状态检修研究与应用情况

4.1.1 国外电力设备状态检修开展情况

国外的设备状态检修发展较早。七十年代末，美国电力科学院就对电力设备的状态检修开始研究，八十年代中期进入实用性阶段。日本从八十年代开始对电力设备实施以状态分析和在线监测为基础的状态检修。日本的诊断技术在钢铁、化工、铁路等领域发展较快，它在努力发展自己的诊断技术的同时，特别注重分析诊断仪器的开发研制，处于国际领先水平。而欧洲大多数国家也正在进行检修体制的改革，近年来在状态检修的基础上，提出基于可靠性的检修策略，更明确了必须兼顾两方面，不仅要通过各种检测手段及时掌握设备的真实情况，而且要考虑该设备在系统中的重要性、该设备的故障对照电网可靠性的影响程度。到目前为止，基于计算机网络技术的设备管理、事故分析和预警系统在上述国家已普遍应用，且已发展了几个版本。这些软件系统应用 Internet 及 GIS(地理信息系统)等最新的计算机技术，将状态管理、事故预警和事故处理进行有机的集成，大大改善了其设备监督管理环境，提高监督管理水平。

随着设备状态检修发展，国外也出现了一批从事状态检修技术研究应用的科研机构和技术服务公司，如美国 CSI 公司、德国申克公司等。到目前为止，CSI 已经成功地为美国国内外六十多家大型电力公司提供了优化检修的服务，并已进入国内市场。

4.1.2 国内电力设备状态检修开展情况

在我国，电力设备状态检修方面的工作开展还处于初步阶段。开展较早的有大连电业局、山东电力公司，大连电业局在 66kV 及以下配电网上、山东电力公司在 220kV 主网上都开展了不少试点工作，通过立足加强设备基础资料分析及对设备失效性模型的长期跟踪研究，并适当采用在线监测等新兴技术，取得了一定的成绩和经验。1997 年 11 月国家电力公司安运部在上海组织召开了全国发、供电企业电力设备实施状态检修研讨会，这对电力设备状态检修起到了

巨大的推动作用。近两年多来的实践表明，国内电力设备的状态检修正在积极稳步推进，许多电力公司与发电厂迈出了大胆尝试的步伐。

浙江省电力公司也于近年开始进行输变电设备状态检修的应用研究，并在绍兴、衢州等地区进行试点探索，取得了较为显著的经济效益和社会效益。

4.2 电力设备状态检修的关键技术

电力检修是供电部门生产管理工作的重要组成部分，它对提高设备健康水平，保证电网安全、可靠运行具有重要意义。近年来，随着我国电力系统不断向超(特)高压、大容量方向发展，电力系统的安全稳定运行对国计民生的影响越来越大。通过对近年来国内比较严重的电气事故调查，我们发现大多数电气设备的损坏是突发性的，并且对这些电气设备的检修是按照试验规程规定进行的。这表明，对于传统的基于周期的设备检修模式已经不能适应电网目前的发展要求。因此，迫切需要在充分考虑电网安全、环境、效益等多方面因素情况下，研究、探索提高设备运行可靠性和检修针对性的新检修管理模式。实践表明，状态检修正是解决当前检修工作面临问题的重要手段。

4.2.1 在线监测技术

借助于微机型保护、故障录波器等二次设备的通信、自查性能，传统的变电站可监控逆变电源、选取数据的科学性、电流电压回路、保护数据的通讯流程、定值的完整性与输出入环节等。然而，此种传统方式有其缺点，一是无法在线监测二次回路，二是连接片(压板)状态的监控工作存在一定的难度，三是铜缆的广泛应用，让监控回路绝缘状态的工作任务变得非常艰巨，可靠程度和经济价值较低。光缆取代了电缆，被智能变电站广泛应用，保护监控设备的输出入都是数字讯号，开关状态与实际的抽样信息构建了规范性的模型，实现了资源信息的共享，这为二次网络的实时监控工作奠定了坚实的技术基础。

对于二次设备的监控与维修体系而言，微机化、数字化的自检与通信技术在其中得到了大量应用，为它的状态监控奠定了坚实的技术基础。传感器是一次设备的基础，继电保护等二次设备借助于诸如直流回路绝缘监控、TA 与 TV 断线检验等自查功能来进行状态监控，二次设备需要借助于红外设备，测定通电热量的温度，除此而外，别的传感器在它的状态监控系统中使用得不多 PUW。在线监测方法有校验法和"看口狗"法。常用的校验方法有 CRC 校验法、奇偶校验法、海明威校验法等等。依据码元的排序规则，数字电路中的信息就此构成。按照编码理论，NXM 个信息是由 M 个 N 进制的码元所构成的。借助于检验算法，这些信息中引入了具有检验性

能的码元，如此原码元与校验码之间便存在着紧密的联系，管控与识别原码元便成为了可能。定时监测法是看门口狗法的别称，可对特定的版块与花片的运行周期进行实时监测，为判定其是否处于正常的工作状态中。该法的可操作性较强，既可实现硬件与软件中的一者,也可使二者共同实现。举个例子，在微机保护有序开展之时，如果受到强电磁的影响，微处理器处于非正常的运行状态之中，抑或是运行至一些死循环中，此时的看门口狗无法迅速做出反应，但它可强制使微处理器复位,这就能对其运作状态进行实肿监控。

通过高科技的广泛应用，继电保护设备的自检性能得到大大增强，这将在很大程度上促进状态维修系统的发展。光纤以太网传导的数字取样值报文的输入模式,即为该设备的二次电流与电皮的输入机制；光纤以太网传导的 GOOSE 开关量数据是保护系统的出口，而非跳闸与重合间的联结部位。当收到 SMV 采样值报文时，该设备能监控它的状态，如果发生了接收异常、信息遗失与数据顿 CRC 不对等问题，其便会迅速做出反应，此类非正常信息可在 SMV 中显示出来;保护投退用软压板管控，使监巧常规变电站压板状况的工作变得相对简单；从光纤代替电缆之后，除了直流回路而外，其余的回路绝缘状态监控就变得没有必要了。凡此种种，均让二次设备的状况监控系统表现出可靠而全面的发展特点。监控智能变电站的继电保护设备，具体的表现为：

(1)电容曲线、运行周期、开关的频率、负荷状况、电源运转的温度与湿度等均在逆变电源监控的范围之内；

(2)通过 SNMP 协议，以太网通讯端的后台系统对诸多交换机端口的运行状况予为监控，比如通信是否正常、误码率分析、SMV 报文、GOOSE 报文的传送速度及其与 SV 报文序号的连续性等；

(3)设备通电与重启的频率、RAM 有无差错、看口狗是否处于工作状态等均处于微机系统自查的范围之中。在二次设备的状态维修体系中，监控中也将实时显示出诸多继电保护设备的监控数据，较为完备、科学的维修体系由此建成。同时，相关的工作人员可时刻查看到各种监控信息，从而获知相应设备的工作状态，且基于对多种信息的整理与分析，对设备的运行状态进行评定。如果设备发生弄常状况，智能警报系统便会通过声光电等各种形式向工作人员发出警告，以便他们及时规划出维修策略

当前我国电力系统正逐渐向高电压、智能化方向发展，电网设备数量激增，检修工作量增大，检修人员紧张问题日益突出，早期制定的定期检修模式已经不能适应设备诊断和管理水平的进步，为此必须采用一套科学的检修模式以适应当前以及今后的电网的发展要求。而这种科学的检修模式就是状态检修，它是基于对在线监测数据、离线试验数据、以及各种状态量等进

行综合分析后，对运行的电气设备采收的检修策略。状态检修可以避免定期检修模式中“一刀切”、“小病大治”、“无病也治”等不合理现象。实施状态检修后能够有效降低电力系统的运行维护成本，使经济效益最大化。由于目前我国状态检修技术刚刚推广使用，其中的关键技术还处于探索阶段,

今后在线监测系统的发展趋势应该是：

(1)具有多功能多参数综合监测和诊断特点，可同时监测能反映某电气设备绝缘状态的多个特征参数系统；

(2)能对厂站的整个电气设备实行集中监测和诊断,具有一套完整的分布式在线监测功能系统；

(3)监测系统具有较高的可靠性和灵敏度；

(4)采用人工智能技术,建立人工神经网络和专家系统,具有自动的绝缘诊断功能。

4.2.2 状态评价技术

专家系统、模糊评估理论均为状态维修的评价技术。对于人工智能技术体系而言，专家系统是它的构成要素，属于应用范围最广、发展潜力最大的分支。该系统对现实中专家的知识进行仿造，属于智能化程度较高的程序系统，它能依据计算机特有的辨别机制，对一些不具象的逻辑问题进行转换，以便于计算机进行解读。在特定的专业层面中，此种智能程序拥有着较为专业的经验与知识结构，并能进行规范、正确地整理与分析，如同实际生活里的专家一般权威而专业，此即为"专家"的内涵。对于专家系统而言，解释器、推理机、事实准则库、人机互通接点等是其中的组成要素。专家系统的知识库的重要构件即为事实准则，在这个知识库的基础上，该系统才能对各种信息进行分析与整理，因而专家系统的优劣受到它的直接影响。该知识库由 2 个层面构成：与现存的问题相关的已知数据、可用于分析的专业与普通知识，它们通常通过网络、进程与准则的模式体现出来。在状态维修中，以模糊神经网络、模糊理论与神经网络为基础的专家系统最为常见。依据知识构建法的差别，专家系统可分为规则、结构、语义网络为基础的专家系统。

在二次设备的状态评估体系中，针对输入的非状态量与状态量，专家系统可在相关准则的指导下，对这些信息进行科学的整理与分析，并基于所得出的　结果而开展状态评定，最终制定出合理的维修方案。关于二次设备运行现场的优劣评定是非定量的，所以表述不太清晰，此时就要借助模糊理论技术来进行演算。

4.2.3 电力设备状态检修的相关策略

1）电力设备数据管理检修。

电力设备数据管理就是应用完善的检修管理系统建立高效的数据管理系统，这个数据管理系统主要包括动态数据和静态数据两种。其中，电子设备动态数据主要记载的是电力设备实际运行的情况，例如：电子设备实时运转的情况、各个线路出现故障的细节、超负荷电压、色谱抽样等；电子设备静态数据主要描述的是电力设备自身的特征和属性，例如：电力设备各个时间段的试验数据、检修记录情况、设备自身存在的缺点、品牌配置、出厂试验数据等。电力设备数据管理系统是工作人员开展工作的重要根据，全面利用数据系统中的数据分析电力设备可能存在的故障，从而有效提高电力设备检修的工作质量。

2）电力设备预防性检修。

在电力行业不断发展的过程中，电力系统检修模式也发生了相应的变化，主要根据电力设备检修的目的、检修技术采用以下几种检修方式：一是状态检修。

电力设备状态检修主要通过设备定期检查和试验，以及应用科学合理的评判标准展开一系列的检测工作。换句话说是在一定的检修情况下通过在线检测和带电检测而获得丰富数据量的状态，然后工作人员再根据设备实际检测指标进行全面计划，以获得设备检测的最佳效果；二是定期检修。当电力企业运行设备数量较少且质量一般时，就需要工作人员每隔一段时间或者操作时间较长时开展一次全面的检修工作，从而确保电力设备检修取得良好的效果。但是，随着电力企业发展规模不断扩大，如果仍然只是按照原来的检修计划、人力和财力的不足也就逐渐表面出来；三是基于可靠性的检修。电力设备状态检修需要考虑各个设备的运行情况，但是基于可靠性的检修则需要全面考虑整个电力行业的运行状况，如：电力设备运行的风险、检修的成本等。

3）电力设备故障诊断。

在电力设备状态检修中，设备故障诊断主要包括以下几种方式：在线监测和离线监测。通过应用在线监测和离线监测对电力设备运转情况进行综合分析，并且根据电力设备的实际情况提出未来的发展情况。通过对电力设备运行产生故障的原因进行分析，然后提出科学有效的处理措施。同时，电力检修工作人员还应该根据电力设备的实际运行状态提出准确合理的检修时间。一般情况下，电力设备传统的状态检修模式是事后检修，这样在一定程度上影响了电力企业的正常供电，减少了电力设备的使用时间，严重影响了电力企业的发展。因此，对电力设备状态检修可以采取定期诊断的方式，及时发现设备运行过程中存在的问题。由事后检修转成事前检修，有效防止电力设备运行中出现的问题。通常情况下，电力设备故障诊断主要包括人

工诊断和计算机诊断。其中人工诊断主要是检修人员应用自身掌握的检修经验和技术知识对电力设备运行情况进行综合分析，而计算机诊断则主要是应用现代自动化技术对电力设备运行信息进行分析。一旦发现电力设备运转过程中存在故障时，坚持将计算机诊断和人工诊断有效结合起来，大大提高电力设备检修工作的质量，确保电力系统安全可靠的运行。

4）电力设备运行可行性诊断。

电力设备状态检修的可行性分析主要是指电力设备运行产生的经济效益和可靠性判断。其中电力设备产生的经济效益涉及到收益、敏感和概率分析三方面的内容。收益分析主要根据电力设备检修过程中产生的经济收益来确定最佳检修的工作时间；敏感性分析是对电力设备某个局部环节进行检修，判断其是否能够正常运行。如果设备存在的问题明显，则充分说明电力设备的敏感度较高。因此，工作人员在实施状态检修时应该全面掌握电力设备的敏感度参数，有效提高电力企业的经营效益；状态检修的概率分析主要是对电力设备运行指标发生变动的现象进行综合分析，有效避免电力设备运行过程中存在的风险，从而提高电力设备状态检修工作产生的经济效益。

4.3 电力电子装置状态综合评估指标体系的研究

对于电力电子装置状态综合评估这样一个多对象多指标综合评价问题，需要对各种评估指标进行信息综合，评价结果是否客观、准确，首先依赖于被综合的对象——各种评估指标信息是否准确、全面。因此，正确、合理地选择评估指标来反映评价对象，是多指标综合评价的首要问题。所选参数指标应能有效反应电力电子装置某一方面的物理量，不确定性的影响因素也能根据经验和合适的数学模型予以定量或定性表示，使指标体系能真实、全面地反映电力电子装置的运行状态。

4.3.1 电力电子装置状态评估体系建立的原则

建立科学、客观的评估指标体系，是建立正确、合理的评价模型的前提，也是建立评价模型的必要步骤。然而，影响电力电子装置运行状态的因素多而复杂，这就要求对电力电子装置的影响因素及其相互关系进行分析。从理论的角度出发考虑，凡是对电力电子装置运行状态有影响的因素都应作为评估标准。但是，由于超大容量电力电子装置本身的复杂性，很难把所有的因素都全部考虑，实际上也没有必要全部考虑。为了使评价指标能全面、真实地反映设备的运行状态，其选取应遵循如下原则：

科学性原则

科学能揭示事物发展的客观规律，作为人们行动的指南。建立电力电子装置运行状态评估指标体系，也必须要有科学依据，能反映客观实际，即反映出影响变压器状态的主要因素。指标应目的明确、定义准确，不能模棱两可、含糊不清，因为许多指标体系中的高层次指标值都是通过对大量基层指标值进行加工、运算得来的，如果选取的那些基层指标的含义模糊不清，那么它们的计算公式或运算方法就很难得到统一。同时所运用的计算方法和模型也必须科学规范，这样才能保证评价结果的真实、客观。只有坚持科学性的原则，获取的信息才具有可靠性和客观性，评价的结果才具有可信性。

全面性原则

电力电子装置状态评估指标体系必须能够全面地反映电力电子装置运行状态的各个方面和层次，整个评估指标体系应按评估因素的重要性有序联系起来，形成一个层次分明的有机整体。应能从本体、附件、外观、环境等多方面来反映电力电子装置运行的特征和状况，并具备结构清晰、层次分明、指标定义清楚等特点。同时，所建立的指标还必须要反映电力电子装置运行状态的动态变化情况，并能够体现出电力电子装置状态的发展趋势。

可比性原则

指标体系中同一层次的指标，应该满足可比性的原则。即各指标具有相同的计量范围、计量口径和计量方法，指标取值宜采用相对值，尽可能不采用绝对值。这样使得指标既能反映实际情况，又便于比较优劣。

主导性原则

在电力电子装置的状态评估中，预防性试验是反映变压器状态的最有效因素之一。但是由于所处情况不同，起主导作用的试验项目也不同。如在变压器出口短路后，绕组频率响应、空载电流和空载损耗等试验对判断变压器的状态起主导作用；在变压器绝缘老化时，油中糠醛含量、绝缘纸（板）聚合度等试验对判断变压器的状态起主导作用。因此，对于变压器预防性试验评估指标的选取，应该针对不同的实际情况，采用在该情况下起主导作用的试验项目作为评估指标。

可操作性原则

指标的设计要求概念明确、定义清楚，能方便地采集数据与收集资料，要考虑现行的检修制度与技术水平，并且有利于现场评估工作的实施。评估指标体系要避免指标间内容的相互交叉和重复。同时，指标的选取要力求简洁、适用，太烦太细过于庞杂和冗长都会影响状态评估工作的顺利进行。只有具有可操作性，评价的实施方案才能为供电局变电检修部门所接受。

定性与定量相结合的原则

指标体系的设计应当满足定性与定量相结合的原则。在指标的选取中，为了便于比较，应尽量选取能够量化的评估指标。因为只有通过量化，才能较为准确地揭示事物的本来面目。然而，电力电子装置状态评估所收集的资料中具有大量的经验性分析和定性结论，且某些难以定量表示的定性因素甚至对变压器状态的评估起着主导作用。因此，对于难以量化的重要指标也必须予以考虑，将其作为定性描述指标，采用评分法，利用专家意见近似实现其量化。

系统性与层次性相结合的原则

影响变压器运行状态的因素很多，由不同层次、不同要素组成。因此，确定指标时必须运用系统论的观点，将总体目标层层分解再进行综合，以便从各个侧面全面、完整地反映出评价对象的各个主要影响因素。同时，要体现出系统的层次性和各子系统的独立性与相关性，分别确定各层次指标的权重，做到系统性与层次性相结合。

4.3.2 超大容量 STATCOM 状态评估体系的建立

静止同步补偿器(Static Synchronous Compensator, STATCOM) 作为先进的无功补偿装置，可同时解决电能质量中无功、谐波及三相不平衡问题。超大容量 STATCOM 中包含的主要设备有高压大容量变压器、电抗器、高压开关、IGBT 功率单元、水冷系统等，所有设备均无故障才能保证整个系统的安全运行。设备有无故障与安全运行需要通过检修的方式，对于高压、大容量的 STATCOM 来说，其设备数量庞大造成检修工作量也非常大，以往所提倡的故障检修和定期检修限制了系统自动化程度的发展。采用科学的状态检修模式才可适应其发展要求，状态检修在降低系统运维成本、缩短停电时间、延长设备寿命等发面表现出极大的优势。已有的方法均是对电力系统某一设备来进行的评估，需要从宏观上对 STATCOM 的安全运行状态进行整体评估。

对于超大容量、高压 STATCOM 来说，因其组成复杂，状态评估时面临诸多困难和挑战，STATCOM 包含多种智能装置，不仅考虑装置性能变化，还要考虑到运行环境的变化，每个装置构成特点迥异，评价标准无法统一，需要监测的信息量也非常庞大，正确、有效地评估其安全状态是状态检修成功的关键，对系统运行的安全性与稳定性起着至关重要的作用。STATCOM 需要检测的信息量也十分庞大，表征各设备状态的特征量众多，每个设备的状态评估均有不同，故而对其状态评估应详细解决。同时评估指标的选取应遵守状态评估科学性、全面性等原则。

综合考虑已有的评估方法与评估体系，为便于处理超大容量 STATCOM 庞大的状态评估数据，这里将其状态评估体系分为五大模块，每一块分别建立相应的评估指标体系。为简化评估过程，避免资源浪费，建立了两级评估模型，每级评估模型选取每模块中部分指标。

在对系统进行状态评估之前，要通过监测系统来汇总各设备实时与历史信息，因而良好的监测系统是将来状态评估工作的基础。

状态评估模型通过科学的评估体系和评估方法对状态检测系统收集到的特征参量进行综合分析、处理，对系统安全稳定性做出判断，为后续的检修决策工作提供数据支持。

STATCOM 运行安全状态评估体系如图 4-1 所示：首先通过对 STATCOM 系统现有的状态监测系统收集的各模块状态信息进行归类整理，信息包括在线监测的，还有数据库中的历史数据；将从监控系统中采集到的需要的信息进行状态评估的过程，评估过程主要包括两部分：评估模型建立与评估算法的应用。评估模型是将 STATCOM 各设备按特点科学地进行模块化分类确立评估指标并最终形成层次清晰的评估体系。评估算法是应用已有的模糊、权重分析等方法进行每一模块各指标的计算，从而得出不同的结论，进而生成 STATCOM 各模块的状态评估结果。

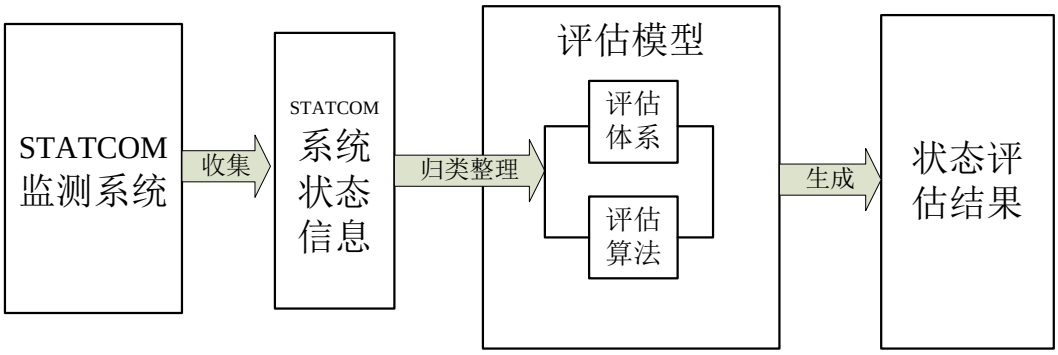

图 4-1 STATCOM 运行安全状态评估体系

4.3.3 STATCOM 设备安全状态评估指标分析

评估指标体系的建立是状态评估的必要步骤，必须遵循全面、科学、客观的原则。但实际情况中，影响 STATCOM 运行状态的因素多而复杂，若从全面性角度出发，应把各电力设备所有影响因素都考虑到评估体系当中，并考虑指标之间的影响。但实际中又很不科学，如果考虑所有因素，又会使得整个状态评估体系变得十分复杂而影响使用。

大容量高压 STATCOM 中需要进行评估的设备有高压大容量变压器、高压电抗器、高压电流电压互感器、高压断路器、高压真空接触器、高压负荷开关、功率单元（IGBT）、水冷系统、线路等。为分析 STATCOM 系统是否安全运行，则需要考虑每个设备的多种因素，绝大多数设备都可以从预防性试验、运行数据、历史数据等几个方面来综合分析自身运行安全状态。

预防性试验是在设备投入使用前，对应不同指标，通过不同试验方法提前判断设备安全性的行为。运行数据则是设备运行状态的记录，如负载情况、设备运行温度等，这些因素直接关系设备寿命及老化状态。历史数据指标包括设备投运前的基础数据(如技术参数、已使用时间

等)、设备自身的质量等级、厂家规定的设备使用年限、用户对该设备的评价等。除此之外，还应该考虑设备的外观检查与运行环境。

因高压大容量 STATCOM 系统涉及多个设备，设备电压等级高，数据量十分庞大，为便于将数据进行处理，这里将 STATCOM 需要评估的对象分成五个模块：

模块 1—变压器（电抗器、互感器）组：这一类设备在结构上看来都是有线圈的设备，故而分为一类。高压配电网一般采用油浸式变压器，价格低且适用范围广，国标 DL/T596-1996《电力设备预防性试验规程》中有专门对各项设备规定的多项预防性试验。状态评估时可根据实际需要从中选择试验种类；变压器、电抗器、互感器等油浸类设备运行数据主要包括：设备带载情况、油体温度、设备密封完整性、异常噪音等；历史数据包括该类设备的厂家所提供的出场数据，该类设备的维修记录，用户反馈等。

油色谱分析

变压器油中溶解气体分析(Dissolved Gases Analysis，简称 DGA)技术，包括从变压器中取出油样，再从油中取出溶解气体，用气相色谱分析该气体的组分和含量，判定设备有无内部故障，诊断其故障类型等。它可以在变压器运行中随时取样分析，也可以采用在线监测的油色谱装置全面分析，是目前电力系统中对充油电力设备常规使用的重要监测手段。油中溶解气体分析能够及时发现变压器内部存在的早期故障，据统计，我国电网中有 50%以上的故障变压器是通过该试验结果检出的。油中溶解气体色谱分析以其无须停电、操作简单、灵敏度和准确性高，不受外界电场和磁场因素影响等优点，在变压器故障监测和诊断中获得广泛应用，并被国家电力设备预防性试验标准列为第一常规试验项目。

目前，对于大型电力变压器，几乎都是浸油式，用变压器油来绝缘和散热。在正常运行情况下，变压器油中溶解气体的组成主要是氧气和氮气。但是，由于某些故障或非故障原因，使油中含有一定量的故障特征气体。变压器油中溶解气体主要产生原因为：一是外来引入；二是绝缘材料自然老化、分解；三是变压器在故障时绝缘材料裂解产生。其中，内部故障是变压器油中气体含量突然增长的主要原因。如当变压器出现局部过热、局部放电现象或者油、纸老化等内部绝缘故障时，会引起变压器油和固体绝缘分解产生气体。故障不太严重时，产气量较少，产生气体形成的气泡在油里经对流、扩散，不断地溶解于绝缘油中；当变压器内部存在潜伏性过热或放电故障时，就会加快这些气体的产生速度。当产气速率大于溶解速率时，在变压器内部会有一部分气体进入气体继电器。一般说来，对于不同性质的故障，所产生的气体种类、油中溶解气体含量、各种气体的比例关系也不相同，而对于同一性质的故障，由于程度不同，所产生气体的数量也不相同。因此，油中溶解气体的组分和含量在一定程度上反映出变压器绝缘

老化和故障的程度，可以作为判断电力变压器状态异常的特征量。根据油中气体的组分和含量，可以判断变压器故障的性质及严重程度，从而评估变压器的运行状态。

围绕如何确定这些特征气体的含量与变压器内部故障的定量关系，国内外的 DGA 技术工作者都做了大量的研究。在根据全国范围内统计结果的基础上，DL/T722-2000《变压器油中溶解气体分析和判断导则》给出了变压器油中气体含量的推荐极限值。但是，DL/T722-2000 所推荐的注意值是指导性的，它不是划分设备是否正常的唯一判据，不应当作“标准”死扣。最终判定还应根据追踪分析，其间隔一般为 1-3 个月。大量事实表明，仅仅依靠特征气体的含量是很难对故障的严重程度作出正确判断的，必须根据产气速率的考察来判断故障的发展趋势。DL/T722-2000 也给出了变压器绝对产气速率的注意值。因此，产气速率比特征气体含量更能反映变压器的真实状态。但在具体操作中，如果色谱分析的试验周期较长，则会导致产气速率失准的情况。 综上所述，最好的方法是将特征气体含量与产气速率结合起来考虑。对于特征气体含量，本文选取特征气体中相对重要的两项指标。通常正常的变压器油中是不含的，因此，油色谱分析中一旦出现，应引起高度重视；

当变压器存在电晕放电、水电解或铁锈，严重过载，高温过热，火花放电等，都会有氢气产生，因此氢气也是一种极为重要的特征气体。同时，根据现有资料的统计，固体绝缘材料正常劣化与故障情况下劣化分解，表现在 CO 和 CO_2 的含量上，但国内还没有统一确定其正常极限含量。因此，选取 CO 的绝对产气速率来作为反映固体绝缘状况的指标。除了对单一气体的考察外，还选取国内外普遍采用的总烃相对产气速率、总烃绝对产气速率作为评估指标。

模块 2—高压开关设备（断路器、真空接触器、负荷开关）：这一类设备均属于起到开关作用的数据， DL/T596-1996《电力设备预防性试验规程》规定了各高压开关设备的预防性试验；开关设备运行数据主要有运行中噪音；历史数据则与变压器类设备数据相同。

模块 3—IGBT 功率单元：功率单元在整个系统中有着举足轻重的作用。 IGBT 是功率单元的主要部件，因其驱动功率小饱和压降低而得到了广泛应用。IGBT 的寿命与可靠性将会影响到整个系统的安全与运行。随着系统电压等级和容量的不断增长，由功率模块引发的故障也越来越多，因而高压大容量 STATCOM 系统的状态评估中要重视 IGBT 的失效检查。

IGBT 主要有两种失效，一种是外部环境引起的电气失效，当工作环境产生过压、过流和过温等，会造成 IGBT 失效，但只要电器设计和使用不超标则不会造成 IGBT 损坏。另一种情况是发生了物理失效，IGBT 模块内部接线故障导致 IGBT 过热。这两种情况的失效均会影响 IGBT 的寿命。其历史数据则包括 IGBT 的出厂检验数据、产品信誉等。

模块 4—水冷系统：高压设备普遍采用水冷系统对系统进行冷却。水冷系统主要设备包括

水箱、水泵、过滤器、节流阀、止回阀、溢流阀、电磁阀、系统管路和接口。在水冷系统进行压力调节过程中易发生泄露故障，如果不能及时检测故障加以控制，将导致水冷系统无法正常工作，降低冷却效果，从而影响 STATCOM 的稳定运行。水冷系统需要评估的指标主要有，水压大小、水流量开关等状态、水温状态、水位状态、电机绕组电阻值分析，声音、水质分析。这些状态量的获取需要较多的传感器手段来实现。通过这些指标分析，便可知道水冷系统是否有故障。

模块 5—线路检查：国标 DL/T596-1996《电力设备预防性试验规程》规定了电路电缆的 11 项预防性试验。运行数据为线路运行温度及线路表面变化情况。历史数据则包括电路电缆信誉度等。

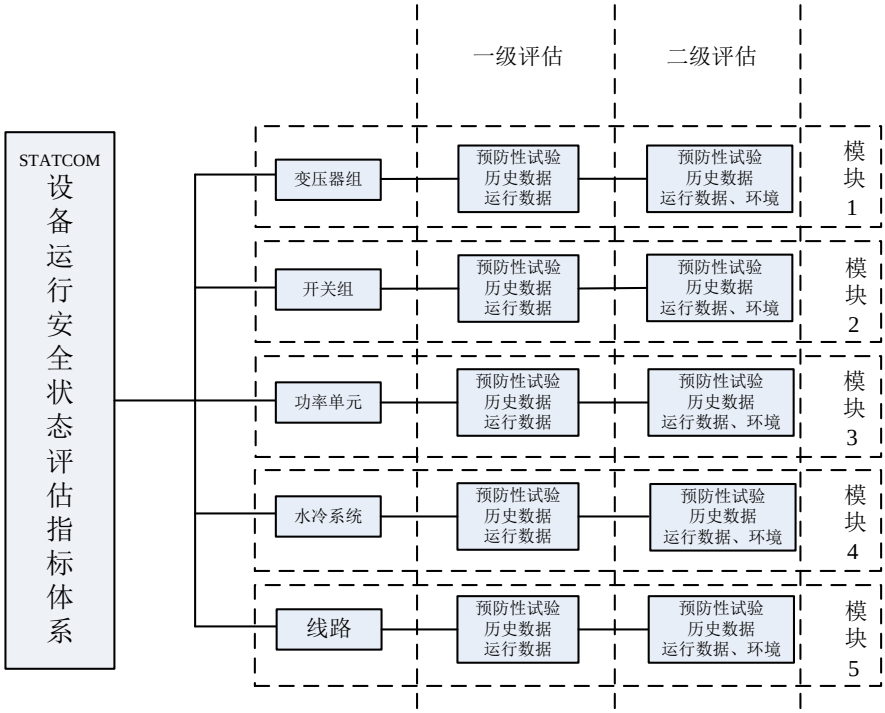

图 4-2　STATCOM 多模块状态评估体系图

4.4 STATCOM 评估模型的建立

STATCOM 中设备种类多，信息类型繁多，这些信息可以从不同侧面与不同层次上反映 STATCOM 运行情况的好坏，若一次性评估时全面考虑所有信息，会产生巨大的计算量，对监控系统要求比较高。若减少评估信息量又会造成结果不准确，令人难以信服。因而，这里采用分级模型对 STATCOM 状态进行评估，既保证设备评估结果的有效性，又降低了计算量。

本文建立的 STATCOM 状态评估模型分为两级。一级评估模型选用对 STATCOM 各设备状态最重要的指标，同时也是容易取得数据的指标，为了包含更多、更全面的 STATCOM 设

备状态信息，二级评估模型综合考虑了各设备外观、运行年限、运行环境等因素的影响。

4.4.1 STATCOM 一级评估模型的建立

第一级模型选用对 STATCOM 中各设备起着最重要的指标， 对于第一级评估模型的结果，即各设备的运行状态，本文将其划分为“设备正常”、“需进一步评估”和“设备需检修”三个等级。

一级模型中评价指标分别有：

变压器类：油色谱分析（包括乙炔含量、氢气含量、总烃相对产气速率等）、电气试验（绕组直流电阻、吸收比、绕组介损等）、运行历史及检修记录、附件运行情况（套管、冷却系统、保护装置等）。

高压开关设备：分合闸时间、断口间并联电容器的绝缘电阻、介损和电容量、

IGBT 功率单元：一级评估指标为对 IGBT 最重要的温升试验和可靠性试验。

水冷系统：水冷系统中重要指标有水压、水位、水温和电机运行情况等

线路一级评估指标有主绝缘的绝缘电阻，外护套绝缘电阻、带电测试外护层接地电流、外护套直流耐压试验、主绝缘交流耐压试验、 局部放电测试。

4.4.2 STATCOM 二级评估模型的建立

对所建立的一级评估模型中所有指标进行评估后，如果评估结果表明所有模块的设备显示不需要进一步评估或有故障，需要检修，则根据结果做出相应决定。

如果一级模型评估结果表明“需进一步评估”，则表示无法根据一级评估结果给出结论。需要进入二级评估来进一步判断系统状态。

二级评估模型中指标有：

变压器类：油化试验（油中含水量、油介损、油击穿电压、油中糠醛含量、）、电气试验（极化指数、绕组泄露电流）、维修状况、该变压器/电抗器/互感器的运行环境、产品运行年限

高压开关设备：导电回路电阻、气体泄漏和微水含量，累计开断次数与额定次数的百分比和已经使用年数、该类设备维修情况、操动机构润滑程度、结构有无损坏与污秽，运行环境，产品信誉度等。

IGBT 功率单元：该 IGBT 维修情况、外观情况、运行环境、IGBT 的出厂检验数据、产品信誉度等

水冷系统：阀门状况、电机绕组绝缘特性、电机温度、电机老化情况、维修情况、外观情

况、产品信誉度等。

线路：护层保护器的绝缘电阻或直流伏安特性、接地箱保、护箱连接接触电阻和连接位置的检查、红外检测、维修情况、外观情况、运行环境、产品信誉度等。

通过进一步的评估与分析，可对一级评估结果给出进一步的保证，以便安排不同的检修策略。

4.4.3 评估流程

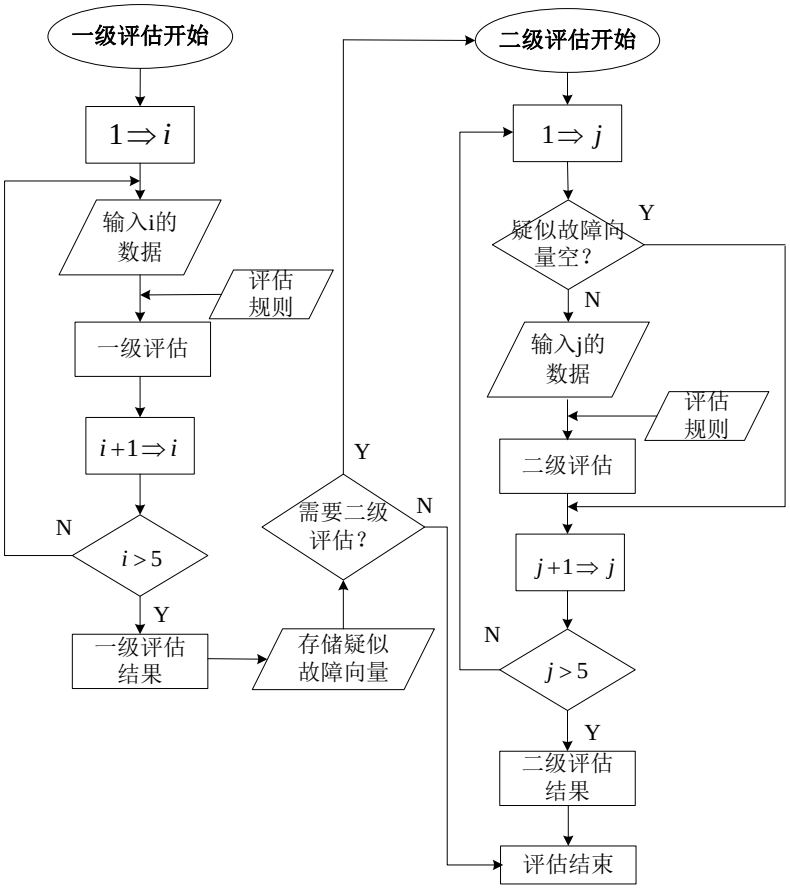

图 4-3　STATCOM 两级状态评估流程

所建立的分级评估模型的具体评估过程为：将所有 5 个模块定义为模块 1-5，输入第一个模块的数据，按照所给定的评估算法进行一级评估，一级评估开始后，对第一个模块的指标开始进行评估，评估结束后，再进行下一模块的评估工作，所有设备模块的评估都结束后，返回一级评估结果，将评估结果存储并进行判断，如果所有模块的结果表明“良好”，则表明 STATCOM 工作性能是稳定的，可继续保持正常运行。若一级评估结果反馈有“较坏”状态，则表明 STATCOM 存在故障隐患，应根据结果查明是哪一模块出了问题并立即停运检修，以上两种情况均无需进行二次评估，若有任一模块的一级评估结果表明“一般”，则表示 STATCOM

系统内部有存在故障的可能性，但一时无法判断具体问题所在，需要进行二次评估进行进一步的判断。将疑似故障向量进行存储。二次评估开始后，判断第一个模块中是否返回有“一般”状态，若有，则输入第一个模块二级评估所需要的数据，按照二级评估规则进行二级评估，5 个模块循环结束后，返回二级评估结果，给出三种具体检修方案，评估过程结束。

高压大容量 STATCOM 系统包含设备种类和数量多，对其检测需要的信息量十分庞大，为详细评估的同时简化评估流程，使其状态评估科学全面，建立了 STATCOM 两级多模块状态评估模型。将 STATCOM 中各设备按其结构或功能分为不同的体系模块，每一模块确定相似的评估指标，其次建立了 STATCOM 两级状态评估模型，一级评估模型选用对 STATCOM 各设备状态最重要的指标，同时也是容易取得数据的指标。一级评估所反馈的结果可决定是否进行二次评估来确认系统检修状况。若一级评估结果表明评估数据不足以说明问题，则进行二级评估以确定是否进行检修。这样的方法使得 STATCOM 系统状态评估科学全面，并且流程得到了简化。

第五章　基于高阶滑模的 STATCOM 系统有限时间鲁棒控制

5.1 引言

静止同步补偿器(Static Synchronous Compensator，STATCOM) 是一种以电力电子变流器为装置核心的新型并联无功补偿装置，可同时解决电能质量中无功、谐波及三相不平衡问题，是灵活交流输电系统(FACTS)的一个重要基础部件[116]。与基于可控电抗器和投切电容器的传统静止无功补偿器(SVC)相比，工作原理有本质的不同，性能上也具极大的优越性。随着高压大功率的门级可关断晶闸管 GTO 以及更先进的集成门极换流晶闸管 IGCT 等可控器件的出现，STATCOM 的开发和应用得到了长足的发展，受到了各国电力工作者和决策者的广泛关注。STATCOM 已经成为了新一代的动态无功补偿装置的方展方向。

STATCOM 是一个强耦合的非线性系统，文献[117]采用传统 PI 控制，但控制参数难以整定，对不确定性过于敏感。文献[118]通过对传统比例积分(PI) 算法的深入研究，引入非线性 PI 算法，即在原有 PI 算法上添加过渡过程，并对该过渡过程进行详细设计。该方法克服了传统 PI 算法的快速性与超调的矛盾，从而缓解了 STATCOM 启动时的初始冲击， 降低设备成本。文献[119]基于配电网静止同步补偿器控制系统的结构组成和无功补偿原理，采用一种用于模糊 PI 控制策略。该控制策略以传统 PI 控制调整参数，再通过模糊控制对参数进行模糊化，该方法可提高 STATCOM 控制非线性系统时的响应精度和抗干扰性。

在对抗系统不确定性的鲁棒控制方法中，传统滑模控制以其显著优点（如对匹配不确定性的不变性，控制器实现简单等）而得到了广泛应用，文献[120]首先采用逆系统方法将原系统进行线性化解耦，构造出其伪线性模型，运用传统滑模变结构控制理论对伪线性模型进行控制律设计，验证了滑模控制在响应速度及稳定性方面比 PI 控制的优越性。文献[121]采用滑模控制理论实现其控制，但将直流侧电压作为常量处理，仅考虑控制 STATCOM 注入电流情况。文献[122]提出一种输入-输出反馈线性化与积分滑模控制相结合的 STATCOM 控制方法，利用积分滑模增强对其参数摄动的鲁棒性，并采用指数趋近率加饱和函数的方法来削弱抖振现象。以上

文献均没有考虑 STATCOM 系统控制的有限时间稳定问题。

滑模控制方法虽响应迅速，在仍存在抖振问题和相对阶的限制等不足之处。高阶滑模控制方法的提出，不仅保留了传统滑模控制的优点，还可以解决其存在的问题，并且高阶滑模控制方法可以实现系统有限时间稳定，对于控制系统来说，有限时间稳定无疑更加有利。高阶滑模控制方法中有多种不同的算法，各算法均有其不同的特点。其中超螺旋算法（Super-Twisting Algorithm）二阶滑模控制方法中唯一连续和唯一适用于系统对滑模面相对阶为 1 的系统的方法，控制过程中只需要滑模面的信息，却可以实现滑模面及其导数同时到达零点。螺旋算法(Twisting Algorithm)则是针对二阶系统的。

为提高 STATCOM 控制系统动态性能，提出一种基于高阶滑模有限时间稳定控制的 STATCOM 鲁棒控制方法。将 STATCOM 动态模型经过变换，得到 dq 坐标系下的表达式，经过变量定义与求导，得到 STATCOM 经过输入-输出反馈线性化后数学模型的矩阵表达式，采用逆系统的方法进行线性化解耦，根据解耦后的系统状态特性，对无功补偿电流与直流侧电容电压分别采用超螺旋与螺旋算法进行控制器设计。

5.2 STATCOM 系统数学模型

如图 5-1 所示为输电线路中 STATCOM 的电路结构示意图：

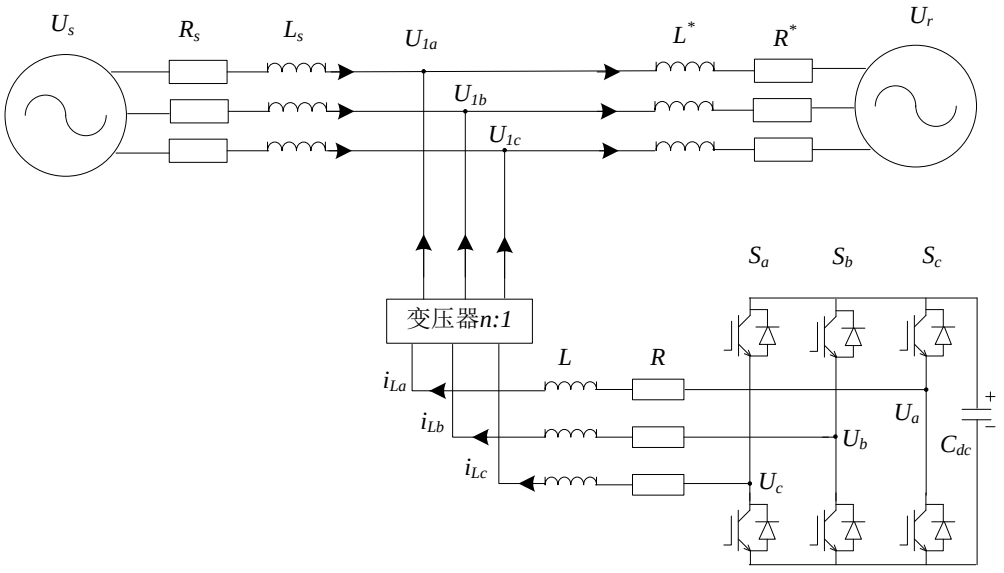

图 5-1 STATCOM 电路结构图

电路中，6 个 IGBT 组成一个三相逆变器，直流侧C_{dc}为储能电容，逆变器逆变出来的无功电流经过滤波，通过变压器向输入线路注入，从而调节线路传输的电能，S_a，S_b，S_c是开关函数，i_{La}，i_{Lb}，i_{Lc}是三相无功补偿电流，U_a，U_b，U_C是逆变交流电压，U_{1a}，U_{1b}，U_{1C}是

STATCOM 注入点电压，L与R分别为连接电抗器与连接电阻值。由此电路结构可得到 ABC 坐标系下的动态时域数学模型式：

$$\begin{cases} \frac{di_{La}}{dt}=\frac{U_a}{L}-\frac{Ri_{La}}{L}-\frac{U_{1a}}{L} \\ \frac{di_{Lb}}{dt}=\frac{U_b}{L}-\frac{Ri_{Lb}}{L}-\frac{U_{1b}}{L} \\ \frac{di_{Lc}}{dt}=\frac{U_c}{L}-\frac{Ri_{Lc}}{L}-\frac{U_{1c}}{L} \\ C_{dc}\frac{dU_{dc}}{dt}=S_a i_{La}+S_b i_{Lb}+S_c i_{Lc} \end{cases} \tag{5-1}$$

为便于分析与控制器设计，对公式(5-1)进行派克变换，变换矩阵为[123]：

$$\frac{2}{3}\begin{bmatrix} \cos\omega t & \cos\left(\omega t-\frac{2\pi}{3}\right) & \cos(\omega t+\frac{2\pi}{3}) \\ sin\omega t & sin\left(\omega t-\frac{2\pi}{3}\right) & sin(\omega t+\frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \tag{5-2}$$

其中， ω 表示转子角速度。

将其代入公式(5-1)，得到 dq 坐标系下数学表达式为：

$$\begin{cases} \frac{di_{Ld}}{dt}=\frac{S_d U_{dc}}{L}-\frac{Ri_{Ld}}{L}-\frac{U_{1d}}{L}+\omega i_{Lq} \\ \frac{di_{Lq}}{dt}=\frac{S_q U_{dc}}{L}-\frac{Ri_{Lq}}{L}-\frac{U_{1q}}{L}+\omega i_{Ld} \\ C\frac{dU_{dc}}{dt}=\frac{3}{2}(S_d i_{Ld}+S_q i_{Lq}) \end{cases} \tag{5-3}$$

其中，下标 d、q 表示为 dq 坐标下的值。忽略 STATCOM 和连接阻抗的损耗，由能量守恒定律可知，直流侧有功功率等于配电网注入点处流入的有功功率，即：

$$\frac{3}{2}\left(u_d i_d+u_q i_q\right)=u_{dc}i_{dc}=Cu_{dc}\frac{du_{dc}}{dt} \tag{5-4}$$

为方便计算，重新选取参考坐标，使$u_q=0$，可以得到直流侧电压 u_{dc} 关于 d 轴电流 i_d 的非线性方程：

$$\dot{u}_{dc}=\frac{3u_d i_d}{2Cu_{dc}} \tag{5-5}$$

5.3 STATCOM 模型处理

定义 STATCOM 系统状态变量为 $\mathbf{X}=[x_1\ \ x_2\ \ x_2]^T=\left[i_d\ \ i_q\ \ u_{dc}\right]^T$，控制输入 $\mathbf{U}=[u_1\ \ u_2]^T=\left[s_d\ \ s_q\right]^T$，输出 $\mathbf{Y}=[y_1\ \ y_2]^T=\left[i_q\ \ u_{dc}\right]^T$。控制器设计的目的是通过控制注入的无功电流$i_q$来控制输电线路的无功传输，并保证直流侧电压$u_{dc}$稳定。

根据公式(5-3)与公式(5-5)，矩阵表达的 STATCOM 数学模型为：

$$\begin{bmatrix}\dot{x}_1\\ \dot{x}_2\\ \dot{x}_3\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}-\frac{R}{L}x_1-\frac{u_d}{L}+\omega x_2\\ -\frac{R}{L}x_2-\frac{u_q}{L}+\omega x_1\\ \frac{3u_dx_1}{2Cx_3}\end{bmatrix}+\begin{bmatrix}\frac{x_3}{L} & 0 & 0\\ 0 & \frac{x_3}{L} & 0\\ 0 & 0 & 0\end{bmatrix}\begin{bmatrix}u_1\\ u_2\\ 0\end{bmatrix} \tag{5-6}$$

对输出变量分别求导数：

$$\dot{y}_1=\dot{x}_2=-\frac{R}{L}x_1-\frac{u_d}{L}+\omega x_2+\frac{x_3}{L}u_2 \tag{5-7}$$

$$\dot{y}_2=\dot{x}_3=\frac{3u_dx_1}{2Cx_3} \tag{5-8}$$

通过求导结果可发现，y_1的导数已显含控制输入u_2，此公式相对阶为 1，y_2的导数不显含控制输入，无法对其进行控制器设计，故需要对其继续求导：

$$\begin{aligned}\ddot{y}_2&=\frac{3u_d}{2C\mathrm{x}_3^2}\left\{x_3\left[\left(-\frac{R}{L}x_1-\frac{u_d}{L}+\omega x_2\right)+\frac{x_3}{L}u_1\right]\right\}-\frac{3u_d}{2C\mathrm{x}_3^2}x_1\frac{3u_dx_1}{2Cx_3}\\&=\frac{3u_d}{2Cx_3}\left(-\frac{R}{L}x_1-\frac{u_d}{L}+\omega x_2\right)-\frac{9u_d^2x_1^2}{8C^2x_3^3}+\frac{3u_d}{4CL}u_1\end{aligned} \tag{5-9}$$

通过对y_2的再次求导，已经显含控制输入，相对阶为 2，无需再求导便可进行控制器设计。

可以得到 STATCOM 经过输入-输出反馈线性化后数学模型的矩阵表达式为：

$$\begin{bmatrix}\dot{y}_1\\ \ddot{y}_2\end{bmatrix}=A+E\begin{bmatrix}u_1\\ u_2\end{bmatrix} \tag{5-10}$$

其中

$$A=\begin{bmatrix}-\frac{R}{L}x_1-\frac{u_d}{L}+\omega x_2\\ \frac{3u_d}{2Cx_3}\left(-\frac{R}{L}x_1-\frac{u_d}{L}+\omega x_2\right)-\frac{9u_d^2x_1^2}{8C^2x_3^3}\end{bmatrix}$$

$$E=\begin{bmatrix}0 & \frac{1}{L}\\ \frac{3u_d}{4CL} & 0\end{bmatrix}。$$

公式(5-10)中的系统仍然具有强耦合性，逆系统的方法能够对其进行解耦和强制线性化，在原控制输入前人为构造新的控制输入，使其输出为原控制的输入。这样原来的二阶系统变化解为两个独立的系统，简化了设计步骤。

引入新的状态变量v_1 与 v_2，使之满足：

$$\begin{bmatrix}u_1\\ u_2\end{bmatrix}=E^{-1}\left(-A+\begin{bmatrix}v_1\\ v_2\end{bmatrix}\right) \tag{5-11}$$

代入公式 (5-10)，可以得到新的系统：

$$\begin{cases}\dot{y}_1=v_1\\ \ddot{y}_2=v_2\end{cases} \tag{5-12}$$

由公式(5-12)可知，输入输出满足积分关系，原系统已解耦为两个互相对立的子系统，不

仅实现了有功电流与无功电流的解耦，而且消除了直流侧电压的非线性。

5.4 STATCOM 高阶滑模控制器设计

对公式(5-12)包含两个子系统，考虑实际系统中的不确定性和扰动，将系统写作如下形式：

$$\begin{cases}\dot{y}_1 = \varphi_1 + \gamma_1 v_1 \\ \dot{y}_2 = \varphi_2 + \gamma_2 v_2\end{cases} \tag{5-13}$$

其中，φ 和 γ 表示光滑的不确定项，对不确定性做出了全局有界的假设，即：

$$\begin{cases}|\varphi| \le C \\ 0 < K_m \le \gamma \le K_M\end{cases} \tag{5-14}$$

其中 C、K_m、K_M 均为正常数。

对两个子系统分别设计高阶滑模控制器，定义滑模面：

$$s_1 = e_1 = y_1 - y_1^* = i_q - i_q^* \tag{5-15}$$

$$s_2 = e_2 = u_{dc} - u_{dc}^* \tag{5-16}$$

其中$y_1^* = i_q^*$ 表示所需要无功电流的期望值，u_{dc}^* 表示直流电压的期望值，e_1 与 e_2 表示期望值与实际值的误差。对公式(5-12)中子系统 1 采用超螺旋算法，这种算法适用于相对阶为 1 的系统，能够保证系统有限时间稳定。该算法定义如下：

$$\begin{cases}\dot{v}_1 = -\lambda |s_1|^{\frac{1}{2}} \mathrm{sgn}(s_1) + v_{11} \\ \dot{v}_{11} = -\alpha \mathrm{sgn}(s_{11})\end{cases} \tag{5-15}$$

其中λ与α为控制器参数，均为正实数。当系统存在有界的不确定性时，控制器参数满足一定条件即可保证系统的有限时间稳定。其有限时间稳定的充分条件为：

$$\begin{cases}\alpha > \frac{C}{K_m} \\ \lambda^2 > 2\frac{\alpha K_M + C}{K_m}\end{cases} \tag{5-16}$$

对公式(5-12)中子系统2采用螺旋算法，这种方法可同时保证滑模面及其导数同时有限时间内到达零点：

$$v_2 = -r_1 \mathrm{sgn}(s_2) - r_2 \mathrm{sgn}(\dot{s}_2) \tag{5-17}$$

其有限时间稳定的充分条件是：

$$(r_1 + r_2)K_m - C > (r_1 - r_2)K_M - C，\ (r_1 - r_2)K_m > C。$$

5.5 稳定性分析

与以往无限时间收敛的渐近稳定控制方法相比，有限时间稳定的控制方法是时间最优且

具有更好的鲁棒性能。超螺旋算法可实现滑模面s_1在有限时间到零，此时$s_1 = e_1 = 0$，$y_1 = y_1^*$，$i_q = i_q^*$，$x_2 = x_2^*$。螺旋算法可实现滑模面 s_2 及其导数 $\dot{s}_2$ 在有限时间内到零点。此时$s_2 = \dot{s}_2 = e_2 = \dot{e}_2 = \dot{x}_3 = 0$， $u_{dc} = u_{dc}^*$，$y_2 = y_2^*$，$x_3 = x_3^*$。根据公式(5-8)可知，到达稳定点时，方程左右两侧均为零，故$x_1 = i_d = 0$，整个系统均是有限时间稳定的。

5.6 仿真验证

为验证所提出高阶滑模控制算法的正确性和有效性，对数学模型进行仿真验证，选择电源电压为380V，直流侧电压初始值为400V ，频率为50Hz 连接电抗器为8mH， 连接电阻为0.1Ω， 直流侧电容为10 000μF，高阶滑模控制算法控制参数λ=200， $\alpha = 100$ $r_1 = 2000$，$r_2 = 100$。控制目标是稳定输出无功电流20A，直流侧电压保持在800V。

仿真中，采用传统滑模控制方法与积分滑模控制方法与所提出高阶滑模控制方法进行比较。

5.6.1 与传统滑模方法对比

将传统滑模控制方法应用其中，传统滑模控制因其本质上的不连续开关特性导致系统存在抖振现象。根据传统滑模控制定义，选取滑模面：

$$\begin{cases} s_1 = e_1 \\ s_2 = e_2 + k\dot{e}_2 \end{cases} \tag{5-18}$$

取滑模控制律得到：

$$\begin{cases} \dot{s}_1 = -\varepsilon_1 \mathrm{sgn}(s_1) - k_1 s_1 \\ \dot{s}_2 = -\varepsilon_2 \mathrm{sgn}(s_2) - k_2 s_2 \end{cases} \tag{5-19}$$

子系统控制律为：

$$\begin{cases} v_1 = -\varepsilon_1 \mathrm{sgn}(s_1) - k_1 s_1 \\ v_2 = -\varepsilon_2 \mathrm{sgn}(s_2) - k_2 s_2 \end{cases} \tag{5-20}$$

仿真中取控制参数，$k = 1$，$\varepsilon_1 = 500$，$k_1 = 1000$，$\varepsilon_2 = 500$，$k_2 = 1000$。

5.6.2 与积分滑模控制方法对比

积分滑模在系统中引入了状态的积分，系统的阶数增加，从而保证滑动模态下的系统与原始标称系统的一致性。积分项的引入一方面可以补偿模型的不确定性，提高控制精度，另一方面，在大的初始误差条件下，会导致大的超调和长的调节时间从而使暂态性能恶化[9]。

定义积分滑模面：

$$\begin{cases} s_1 = k_{11}e_1 + k_{12}\int e_1 \\ s_2 = k_{21}e_2 + \beta\dot{e}_2 + k_{22}\int e_2 \end{cases} \tag{5-21}$$

滑模控制律采用指数趋近律：

$$\begin{cases} \dot{s}_1 = -\varepsilon_1 \mathrm{sgn}(s_1) - k_1 s_1 \\ \dot{s}_2 = -\varepsilon_2 \mathrm{sgn}(s_2) - k_2 s_2 \end{cases} \tag{5-22}$$

控制量为：

$$\begin{cases} v_1 = \frac{1}{k_{11}}(k_{11}\dot{y}_1^* - k_{12}e_1 - \varepsilon_1 \mathrm{sat}(s_1) - k_1 s_1) \\ v_2 = \frac{1}{\beta}(\beta\dot{u}_{dc}^* - k_{22}e_2 - k_{21}\dot{e}_2 - \varepsilon_2 \mathrm{sat}(s_2) - k_2 s_2) \end{cases} \tag{5-23}$$

积分滑模需要选择参数太多，参数选择时需要利用极点配置方法，极点配置在复平面的左侧，以满足系统稳定的条件，给控制器设计带来不便。仿真过程中，取$k_{11}=50$，$k_{12}=50$，$k_{21}=50$，$\beta=20$，$k_{22}=50$，$\varepsilon_1=1$，$k_1=0.1$，$\varepsilon_2=1$，$k_2=0.1$。

系统输入无功电流与直流侧电压稳定值如图5-2与图5-3所示。

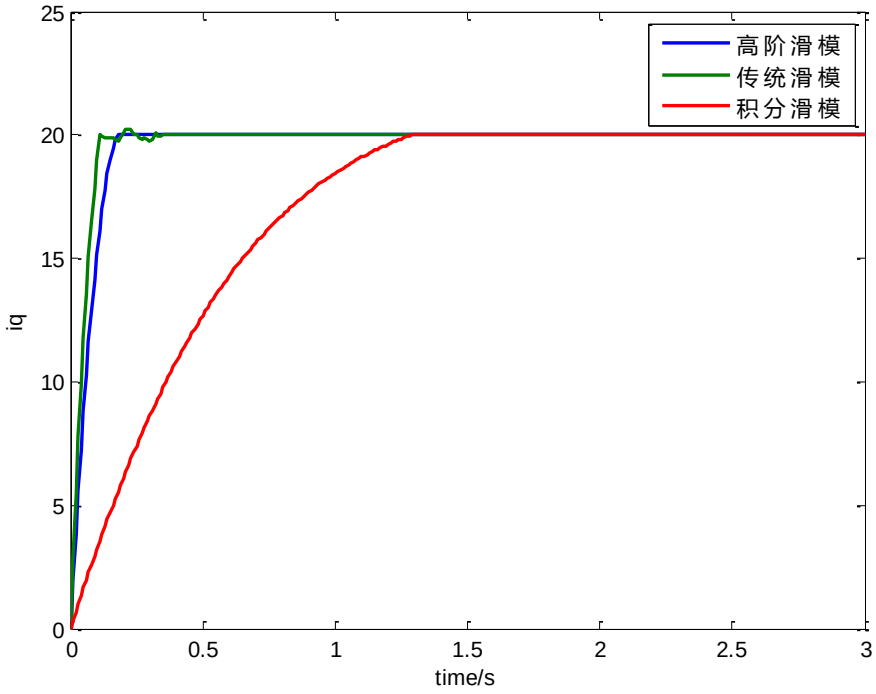

图5-2 系统输出无功电流

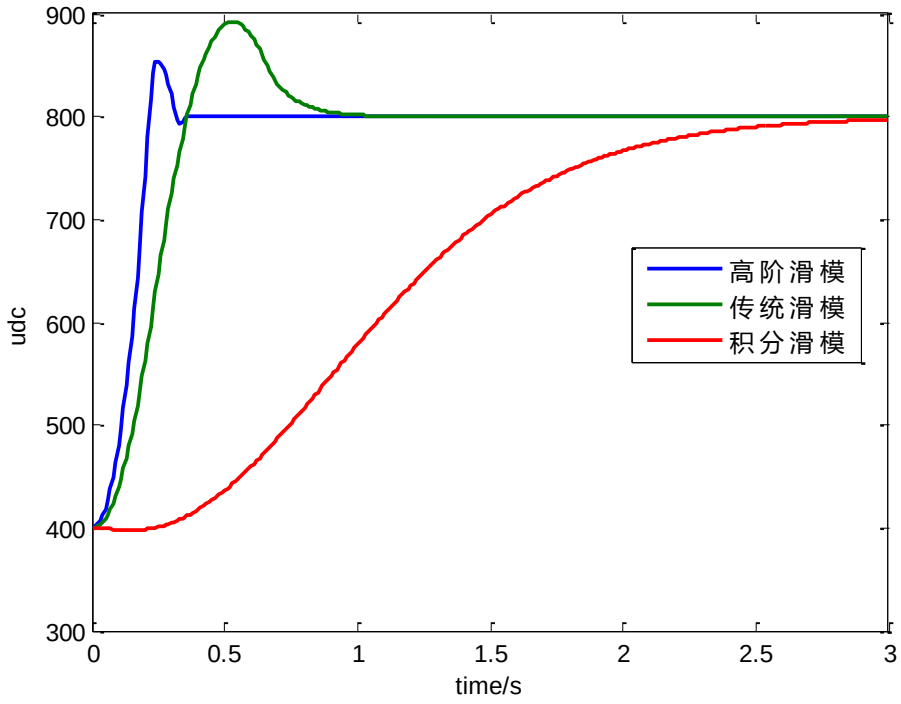

图5-3 直流侧电压稳定值

由仿真结果可以看出，几种方法系统注入到电网的无功电流与直流侧电压均在有限时间内达到稳定值。但传统滑模控制存在明显抖振现象，而积分滑模控制方法则存在调节时间过长的问题。

系统中存在各种各样的内部不确定性和外部扰动，所采用的两种高阶滑模控制对不确定均具有一定的抗干扰性，初始时刻便对系统加入不确定性进行仿真，令系统（13）中$\varphi_1 = sin(t)$，$\varphi_2 = cos(t)$，原有控制器参数不动，仿真结果如图 5-4 和图 5-5 所示：

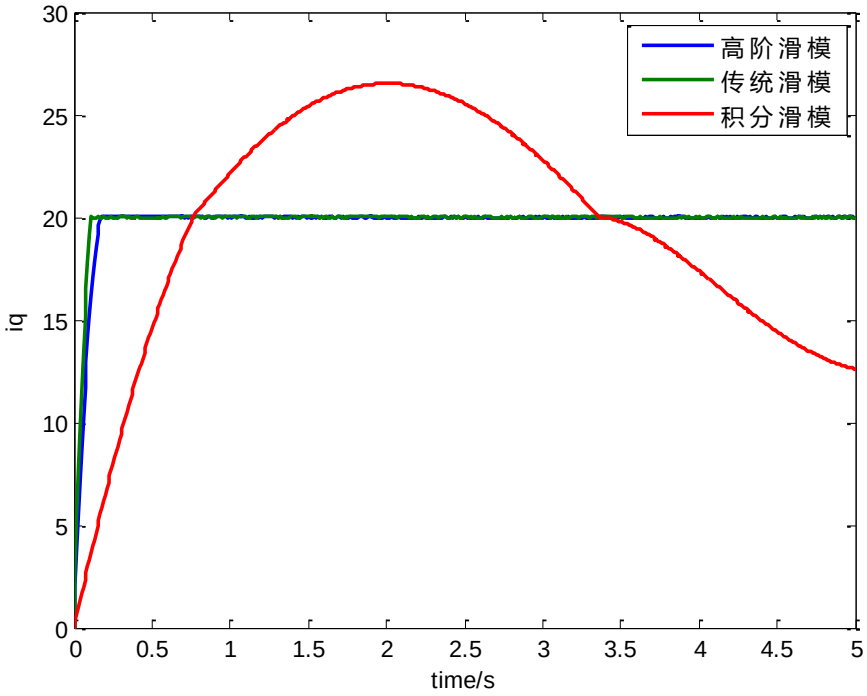

图 5-4 增加扰动后系统输出无功电流

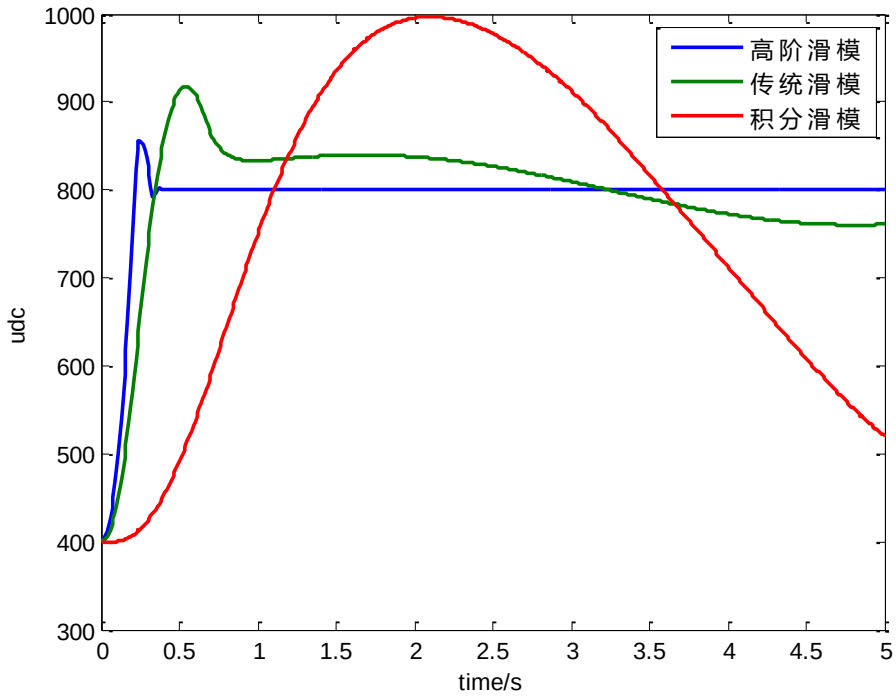

图 5-5 增加扰动后系统直流侧电压稳定值

与图 5-2 和图 5-3 相比，虽然无功电流与直流侧电压值的收敛时间变长，超调也有增大，但仍能够保证状态在有限时间到达期望值。表明所提出的高阶滑模控制算法具有一定程度的鲁棒性。但同样参数情况下，传统滑模与积分滑模算法已经不能保持系统稳定。

在系统运行两秒钟后，加入扰动，控制器参数不变，仿真结果如图 5-6 和图 5-7 所示。

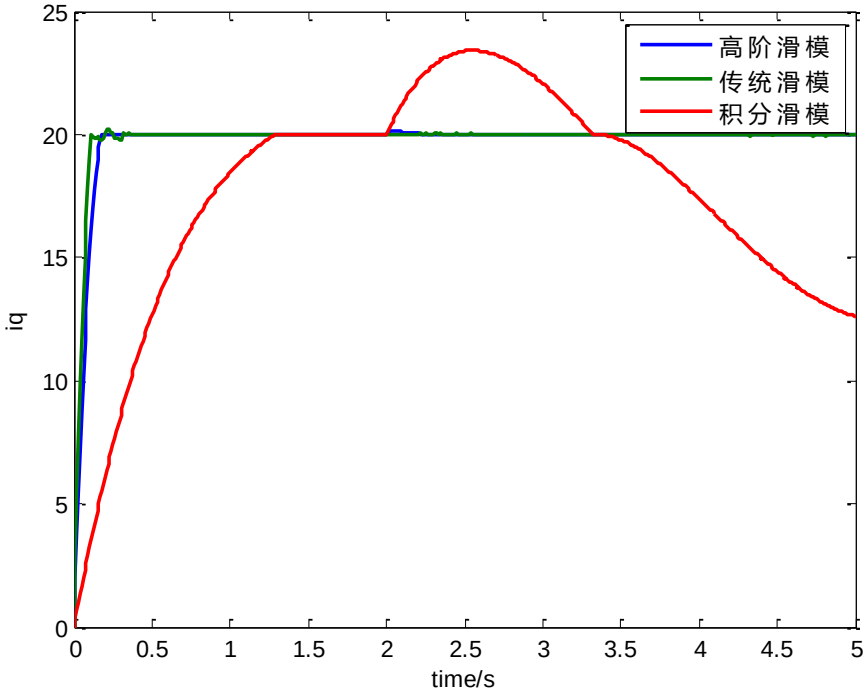

图 5-6 运行中增加扰动后系统输出无功电流

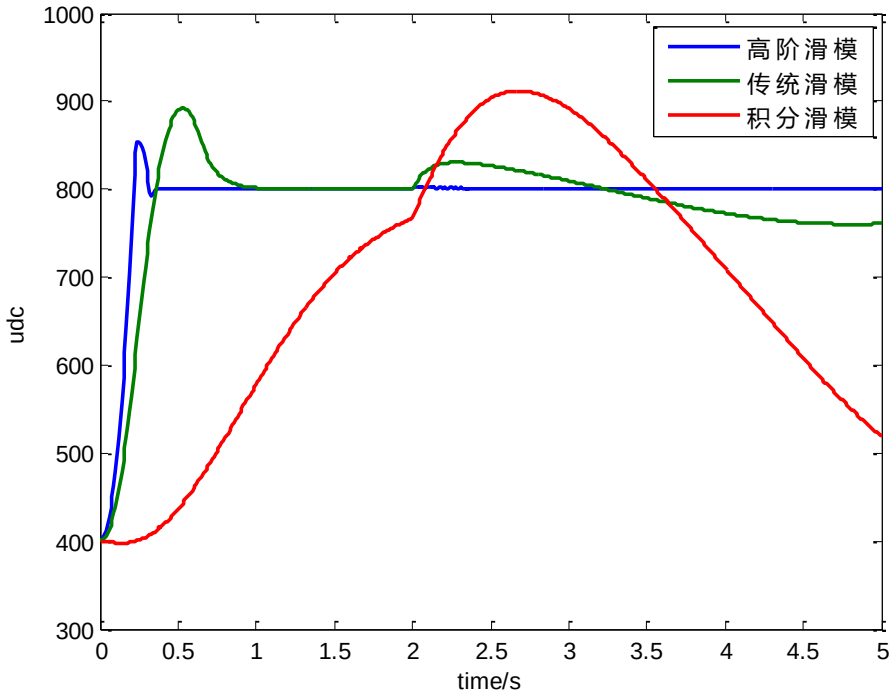

图 5-7 运行中增加扰动后系统直流侧电压稳定值

由图 5-6 和图 5-7 可以看到，在突然增加扰动的情况下，高阶滑模控制方法仍能够保持系统稳定，而传统滑模控制和积分滑模控制方法已经不能保证系统稳定。

5.7 结论

为提高静止同步补偿器(STATCOM)控制系统动态性能和鲁棒性，提出一种基于高阶滑模控制的 STATCOM 有限时间鲁棒控制方法。该方法对无功补偿电流与直流侧电容电压分别采用超螺旋与螺旋算法进行控制器设计，这两种控制方法不仅在有限时间内，快速稳定无功补偿电流与直流侧电压，还对系统不确定性具有一定的鲁棒性。仿真结果验证了所提出方法的有效性，通过与传统滑模控制和积分滑模控制方法的对比，展现出高阶滑模控制方法在对抗不确定性方面优势更加明显。

第六章 基于改进型高阶滑模的全桥逆变器鲁棒控制研究

6.1 引言

逆变器作为一种典型的电力电子装置，已被广泛应用于交流传动、有源滤波、光伏发电和风力发电等国民经济中的各行各业，成为生产生活中不可缺少的关键设备。随着社会发展与科技进步，对逆变器的性能要求也越来越高，同时要考虑在输入电压不稳定和负载变化频繁情况下，逆变电源的输出具有快速动态性能和稳定的鲁棒性。传统的方法将难以满足其要求。滑模控制策略是对逆变器具有强适用性的控制方式，因此越来越多地被用于逆变器的控制。

文献[124]针对带有时变延迟对象，利用LMI方法设计了积分滑模面和控制器。文献[125]将一种积分滑模变结构电流控制方法用于交流感应电动机矢量控制系统，减小了电流控制的稳态误差。文献[126]则是在三相逆变器的dq模型基础上设计了积分滑模变结构的双环控制器。文献[127]利用高阶滑模super-twisting算法对全桥逆变器进行了控制器设计，将离散控制律转移至更高阶的滑模面，从本质上消除传统滑模抖振的影响。文献[128]为改善光伏并网逆变器控制系统的冬天性能，提出利用指数滑模变结构空置律和平方根滑模控制律，设计基于改进滑模变结构的单相电流环光伏并网逆变器控制系统。文献[129]提出一种Z源逆变器直流链电压的滑模控制方法，设计了以电感电流误差、电容电压误差和电容电压误差的积分为状态变量的直流链电压滑模控制器。文献[130]为提高不平衡及谐波电网下并网逆变器的运行性能，通过建立不平衡及谐波电网下并网逆变器的数学模型，以输出电流正弦或输出有功/无功功率平稳为控制目标，提出不平衡及谐波电网下并网逆变器基于谐振滑模的直接功率控制策略。

在对抗系统不确定性的鲁棒控制方法中，传统滑模控制以其显著优点（如对匹配不确定性的不变性，控制器实现简单、响应迅速等）而得到了广泛应用，但仍存在抖振问题和相对阶的限制等不足之处。高阶滑模控制方法的提出，不仅保留了传统滑模控制的优点，还可以解决其存在的问题，并且高阶滑模控制方法可以实现系统有限时间稳定，对于控制系统来说，有限时

间稳定无疑更加有利。

不确定性在被控系统中是普遍存在的，自适应方法的思想便是在线实时估计不确定性或者控制参数的界限，以保持稳定的系统性能，因而这种方法有很大的现实意义。已有滑模控制方法对匹配不确定性具有一定鲁棒性，但控制器设计需要事先知道系统不确定性的界。对于具有未知上界的非匹配不确定性，滑模控制需要有其他方法与之相结合来补偿不确定性的影响。将滑模控制与自适应机制有机结合起来的滑模自适应控制方法，是解决参数不确定或时变参数控制问题的一种常用的控制策略[131]。

文献[132]提出的滑模自适应方法可以根据不确定性的幅值，校正控制增益。该方法不会过度估计切换增益，降低了抖振，但需要事先知道不确定性的界，且降低了控制精度。文献[133]所提出的滑模自适应方法中，不需要事先知道不确定性的界，但控制增益有可能过大，会导致抖振现象的发生。文献[134]结合了以上两种方法的优点，用文献[8]的方法建立滑模面，用文献[9]的方法去降低控制增益，可以在不确定性的界未知的情况下降低抖振。文献[135]提出一种自适应滑模控制器，其中的滑模面是比例积分形式的。模型参考自适应状态反馈用来处理不确定性情况下的跟踪问题。文献[136]采用自适应方法，拓宽了滑模观测器的使用范围，降低了系统对不确定性的要求。文献[137]对单输入单输出的非线性非匹配不确定系统，提出一种基于自适应多滑模面的控制器，用多个滑模面的概念来解决非匹配不确定性的问题，自适应控制器可实现输出误差收敛性的设计和所有信号的有界性估计。

自适应方法不仅与传统滑模方法相结合，取得了诸多成就。在高阶滑模控制方法中同样有施展空间。已有的高阶滑模控制方法，必须要事先知道系统不确定性的界，然后根据不确定性的界来选择控制器参数。为解决这一问题，已有很多文献将自适应方法与高阶滑模控制方法相结合，但各有利弊。文献[138]将自适应方法与二阶滑模控制方法相结合来抵消具有未知上界不确定性的影响，但没有给出有限时间稳定性的证明。文献[139]给出了改进的控制器作用下系统有限时间收敛的证明，但没有考虑有限时间稳定性定理中需要的参数为实数这一问题。文献[140]针对一类非线性不确定系统，为减少系统抖振和处理不确定边界未知的问题，利用自适应控制与高阶滑模相结合，引入可在线调整参数的双极 sigmoid 函数和控制器增益，但有限时间稳定性的验证仅体现在了仿真中而不是理论推导中。文献[141]要求不确定性要满足一定的假设条件，才能给出有限时间稳定性的证明。综上所述，自适应高阶滑模控制方法需要克服不确定性项的形式问题，以及给出更有效的有限时间稳定性证明。文献[142]提出参数自适应的螺旋算法，实现了未知上界不确定性存在的情况下的参数自我调整及不确定性的补偿，他的做法是对一个参数设计自适应控制器，另一个参数是以它的倍数出现，提

出的自适应律是离散的，并将这一方法应用于气动执行器的控制中。

本章节提出了基于参数自适应的二阶滑模螺旋改进算法。通过对螺旋算法的控制器参数设计自适应参数控制器，不但实现了参数根据系统状态的自动调节，而且同时实现了对具有未知上界不确定性的完全补偿。将改进后的方法应用于全桥逆变器的控制中，通过与原有的螺旋算法进行对比，结果表明所提出算法能够在具有未知上界的不确定性存在情况下，实现参数的自我调节，保证了系统的有限时间稳定性。

6.2 全桥逆变器模型

全桥逆变器是一种把直流变交流的开关电源拓扑结构，其拓扑结构图如图 6-1 所示。

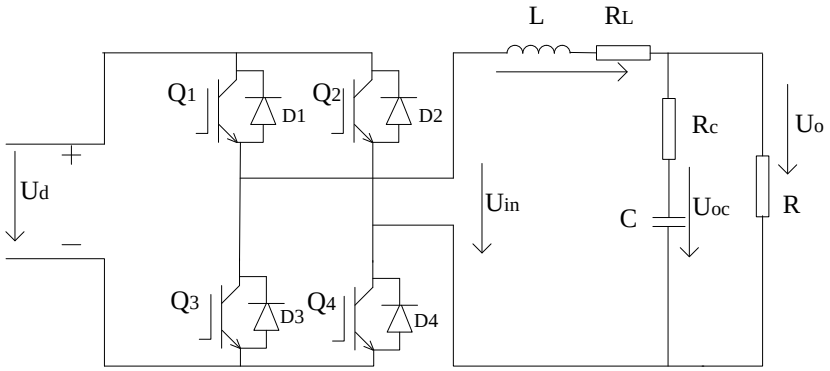

图6-1 全桥逆变器拓扑结构图

全桥逆变桥由 4 个 IGBT 组成，分为 2 组，其中 Q1 和 Q4 为 1 组，Q2 和 Q3 为 1 组，2 组交替通/ 断，D1 -D4 是续流二极管。U_{in} 表示电压源，电感L、电容C 以及等效负载R。R_L 与 R_C 分别为电感与电容的寄生电阻。分别为输出交流方波电压经 LC 低通滤波器后得到交流正弦输出电压。由于全桥型逆变器的输出滤波电容电压及其导数是连续可测的，可以取电容电压及电感上的电流作为系统的相变量来描述系统。忽略开关的死区时间以及电感和电容的寄生电阻。依据基尔霍夫电压、电流定律，系统的状态方程为：

$$\begin{bmatrix} \frac{di_L}{dt} \\ \frac{dv_c}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{1}{L} \\ \frac{1}{C} & -\frac{1}{RC} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_L \\ v_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{U_{\text{in}}}{L} \\ 0 \end{bmatrix} u \tag{6-1}$$

式中，$u \in \{-1\ \ 1\}$ 分别代表 2 组开关的开通/ 关断状态。当$u = 1$时，代表 Q1 和 Q4 导通；当$u = -1$时，代表 Q2 和 Q3 导通。

将状态方程单独写出来：

$$i_L = -\frac{1}{L} v_c + \frac{E}{L} u \tag{6-2}$$

$$\dot{v}_c = \frac{1}{C} i_L - \frac{1}{RC} v_c \tag{6-3}$$

对公式(6-3)进行求导得到：

$$\ddot{v}_c = \frac{1}{C}i_L - \frac{1}{RC}\dot{v}_c \tag{6-4}$$

将公式(6-4)代入公式(6-2)中，得到：

$$\mathrm{C}\ddot{v}_c + \frac{1}{R}\dot{v}_c + \frac{1}{L}v_c = \frac{E}{L}u \tag{6-5}$$

定义系统状态变量 $x_1 = v_c$，$x_2 = \dot{v}_c$，重写系统状态方程为：

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = -\frac{1}{R}x_2 - \frac{1}{L}x_1 + \frac{E}{L}u \end{cases} \tag{6-6}$$

(6-7)

6.3 改进的螺旋算法

考虑系统(6-7)中不确定性：

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = -\frac{1}{R}x_2 - \frac{1}{L}x_1 + \frac{E}{L}u + \sigma \end{cases} \tag{6-8}$$

其中，σ 为有界的外界干扰，但其界是未知的。

定义滑模面$s = x_1 - x_{1d}$，其中x_{1d} 为x_1的期望值。

对滑模面分别求一阶与二阶导数，得到：

$$\dot{s} = \dot{x}_1 - \dot{x}_{1d} \tag{6-9}$$

$$\ddot{s} = \ddot{x}_1 - \ddot{x}_{1d} = \dot{x}_2 - \ddot{x}_{1d} = -\frac{1}{R}x_2 - \frac{1}{L}x_1 + \frac{E}{L}u + \sigma - \ddot{x}_{1d} \tag{6-10}$$

假设σ具有未知上界 $\bar{G} \geq 0$，$\bar{G}$ 的估计值为 $\hat{G}$。

采用逆系统方法，引入新的控制输入$v = -\frac{1}{R}x_2 - \frac{1}{L}x_1 + \frac{E}{L}u - \ddot{x}_{1d}$，得到新的系统：

$$\begin{cases} \dot{s} = \dot{x}_1 - \dot{x}_{1d} \\ \ddot{s} = v + \sigma \end{cases} \tag{6-11}$$

对系统(6-11)所设计的控制器包括两部分，一部分为理想控制器 v_{ideal}，这部分是连续的，并且可以保证系统不确定性不存在时的有限时间稳定。另外一部分是补偿控制器 v_{com}，可完全补偿系统不确定性，并和理想控制器同时保证系统目标的实现。

$$v = v_{ideal} + v_{com} \tag{6-12}$$

理想控制器v_{ideal}采用 Twisting 算法：

$$v_{ideal} = -r_1\mathrm{sgn}(s) - r_2\mathrm{sgn}(\dot{s}) \tag{6-13}$$

自适应补偿控制器v_{com}：

$$v_{com} = -\hat{G}\mathrm{sgn}(\dot{s}) \tag{6-14}$$

自适应律满足：

$$\dot{\hat{G}} = \beta|\dot{s}| \tag{6-15}$$

其中估计误差 $\tilde{G} = \bar{G} - \hat{G}$，$\beta$ 为正常数。

令控制器：

$$v = -\hat{r}_1 \mathrm{sgn}(s) - \hat{r}_2 \mathrm{sgn}(\dot{s}) - \hat{G}\mathrm{sgn}(\dot{s}) \tag{6-16}$$

其中 $\hat{r}_1$ 和 $\hat{r}_2$ 分别表示自适应参数，它们的上界分别为 r_1和 r_2。$\hat{G}\mathrm{sgn}(\dot{s})$ 为补偿控制器，自适应律满足：

$$\dot{\hat{r}}_1 = k_1 \dot{s}\mathrm{sgn}(s)，\ \dot{\hat{r}}_2 = \dot{\hat{G}} = k_2 \dot{s}\mathrm{sgn}(\dot{s}) = k_2|\dot{s}| \tag{6-17}$$

其中 k_1 与 k_2 为正常数。

6.4 稳定性分析

证明所提出改进的螺旋算法 (6-16) 能够保证系统(6-8)有限时间稳定，自适应律满足(6-17)。

证明：选择 Lyapunov 函数：

$$V_1 = r_1|s| + \frac{1}{2}\dot{s}^2 + \frac{1}{2k_1}\tilde{r}_1{}^2 + \frac{1}{2k_2}\tilde{r}_2{}^2 + \frac{1}{2k_2}\tilde{G}^2 \tag{6-18}$$

对式 (6-18) 求导得到:

$$\begin{aligned}
\dot{V}_1 &= r_1\dot{s}\mathrm{sgn(s)} + \dot{s}(u+\sigma) + \frac{1}{k_1}\tilde{r}_1\dot{\tilde{r}}_1 + \frac{1}{k_2}\tilde{r}_2\dot{\tilde{r}}_2 + \frac{1}{k_2}\tilde{G}\dot{\tilde{G}} \\
&= r_1\dot{s}\mathrm{sgn(s)} + \dot{s}\left[-\hat{r}_1\mathrm{sgn(s)} - \hat{r}_2\mathrm{sgn}(\dot{s}) - \hat{G}\mathrm{sgn}(\dot{s}) + \sigma\right] - \frac{1}{k_1}\tilde{r}_1\dot{\hat{r}}_1 - \frac{1}{k_2}\tilde{r}_2\dot{\hat{r}}_2 - \frac{1}{k_2}\tilde{G}\dot{\hat{G}} \\
&= r_1\dot{s}\mathrm{sgn(s)} - \hat{r}_1\dot{s}\mathrm{sgn(s)} - \hat{r}_2\dot{s}\mathrm{sgn}(\dot{s}) + r_2\dot{s}\mathrm{sgn}(\dot{s}) - r_2\dot{s}\mathrm{sgn}(\dot{s}) - \dot{s}\hat{G}\mathrm{sgn}(\dot{s}) + \dot{s}\sigma \\
&\quad - \frac{1}{k_1}\tilde{r}_1\dot{\hat{r}}_1 - \frac{1}{k_2}\tilde{r}_2\dot{\hat{r}}_2 - \frac{1}{k_2}\tilde{G}\dot{\hat{G}} \\
&\le \tilde{r}_1\dot{s}\mathrm{sgn(s)} - r_2|\dot{s}| + \tilde{r}_2|\dot{s}| + \bar{G}|\dot{s}| - \hat{G}|\dot{s}| - \frac{1}{k_1}\tilde{r}_1\dot{\hat{r}}_1 - \frac{1}{k_2}\tilde{r}_2\dot{\hat{r}}_2 - \frac{1}{k_2}\tilde{G}\dot{\hat{G}} \\
&= -r_2|\dot{s}| + \tilde{r}_1[\dot{s}\mathrm{sgn(s)} - \frac{1}{k_1}\dot{\hat{r}}_1] + \tilde{r}_2\left(|\dot{s}| - \frac{1}{k_2}\dot{\hat{r}}_2\right) + \tilde{G}\left(|\dot{s}| - \frac{1}{k_2}\dot{\hat{G}}\right)
\end{aligned} \tag{6-19}$$

因此，当 $\dot{\hat{r}}_1 = k_1\dot{s}\mathrm{sgn(s)}$，$\dot{\hat{r}}_2 = k_2|\dot{s}|$，$\dot{\hat{G}} = k_2|\dot{s}|$ 时，$\dot{V}_3 \le -r_2|\dot{s}|$，因为 $V_3 \ge 0$，$\dot{V}_3 \le 0$，因而 V_1 是有界的，那么 s、$\dot{s}$ 及 $\tilde{G}$ 均为有界的。从而可知控制输入 u 有界，从而 $\ddot{s}$ 有界。因而 s、$\dot{s}$ 一致连续，故它们都是平方可积的。因 s、$\dot{s}$ 平方可积和 s、$\dot{s}$ 及 $\ddot{s}$ 的有界性，根据扩展的 Barbalat 引理，可以得出 $s \to 0$、$\dot{s} \to 0$。因而系统是渐近稳定的。并且可以看出 $\dot{\hat{r}}_2$ 和 $\dot{\hat{G}}$ 可被当做一项。同时实现了补偿控制和自适应的参数调整。

在系统到达零点之前的一个小范围内，选择另一个 Lyapunov 函数：

$$V_2 = \frac{1}{2}(|s| + |\dot{s}|)^2 \tag{6-20}$$

对式 (6-20) 求导得：

$$\begin{aligned}
\dot{V}_2 &= \left(|s| + |\dot{s}|\right)[\dot{s}\mathrm{sgn(s)} - \ddot{s}\mathrm{sgn}(\dot{s})] \\
&= \left(|s| + |\dot{s}|\right)\left\{\dot{s}\mathrm{sgn(s)} - \left[-\hat{r}_1\mathrm{sgn}(s) - \hat{r}_2\mathrm{sgn}(\dot{s}) - \hat{G}\mathrm{sgn}(\dot{s}) + \sigma\right]\mathrm{sgn}(\dot{s})\right\} \\
&\le \left(|s| + |\dot{s}|\right)\left[\dot{s}\mathrm{sgn(s)} + \hat{r}_1\mathrm{sgn}(s)\mathrm{sgn}(\dot{s}) - \hat{r}_2 - \hat{G} + \bar{G}\right] \\
&= \left(|s| + |\dot{s}|\right)\left[\dot{s}\mathrm{sgn(s)} + \hat{r}_1\mathrm{sgn}(s)\mathrm{sgn}(\dot{s}) - \hat{r}_2 + \tilde{G}\right]
\end{aligned} \tag{6-21}$$

因系统渐近稳定的，所以 $\dot{s}\mathrm{sgn(s)} + \hat{r}_1\mathrm{sgn}(s)\mathrm{sgn}(\dot{s}) + \tilde{G}$ 有界，因而存在常数

$$d = \dot{s}\mathrm{sgn}(s) + \hat{r}_1\mathrm{sgn}(s)\mathrm{sgn}(\dot{s}) - \hat{r}_2 + \tilde{G} < 0 \tag{6-22}$$

因此 $\dot{V}_2 \le -dV^{\eta}$，$\eta = \frac{1}{2}$。

当系统到达原点时，等式成立。根据有限时间稳定性定理，系统 (6-11) 在具有未知上界不确定性存在情况下，是有限时间稳定的，同时参数可实现自我调整。

当$s = x_1 - x_{1d} = 0$的同时$\dot{s} = \dot{x}_1 - \dot{x}_{1d} = 0$，此时$v_c = x_{1d}$，$\dot{v}_c = \dot{x}_{1d}$。观察方程(6-3)，$\dot{v}_c = \frac{1}{C}i_L - \frac{1}{RC}v_c$，此时$i_L$同样也是稳定的，整个系统都是有限时间稳定的。

6.5 仿真验证

仿真过程中，取系统参数[143] $L = 6.4\mathrm{mH}$，$R = 44\Omega$，$E = 450\mathrm{V}$，$C = 25\mu\mathrm{F}$。状态初始值：控制器参数$k_1 = 1$，$k_2 = 0.5$。输出电压参考值选为 220sin(t)，各状态初始值为零，参数初始值$\hat{r}_1(0) = 120$，$\hat{r}_2(0) = 90$。将改进算法与已有的螺旋算法进行对比，即令$v = -r_1\mathrm{sgn}(s) - r_2\mathrm{sgn}(\dot{s})$，控制器参数取$r_1 = 120$，$r_2 = 90$，状态初始值为零。仿真结果如图 6-2 所示。

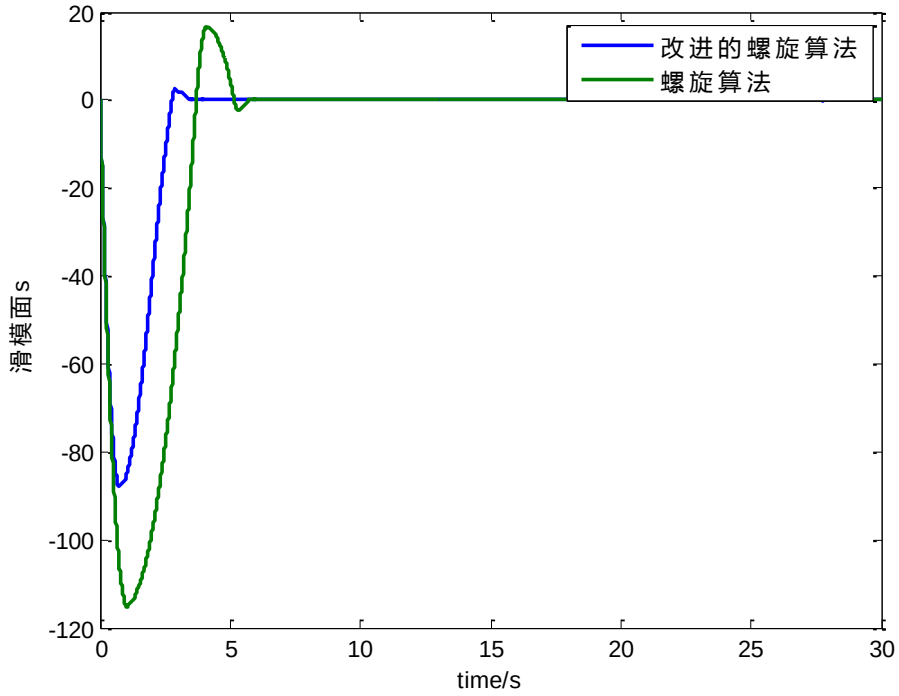

图 6-2 电压误差曲线

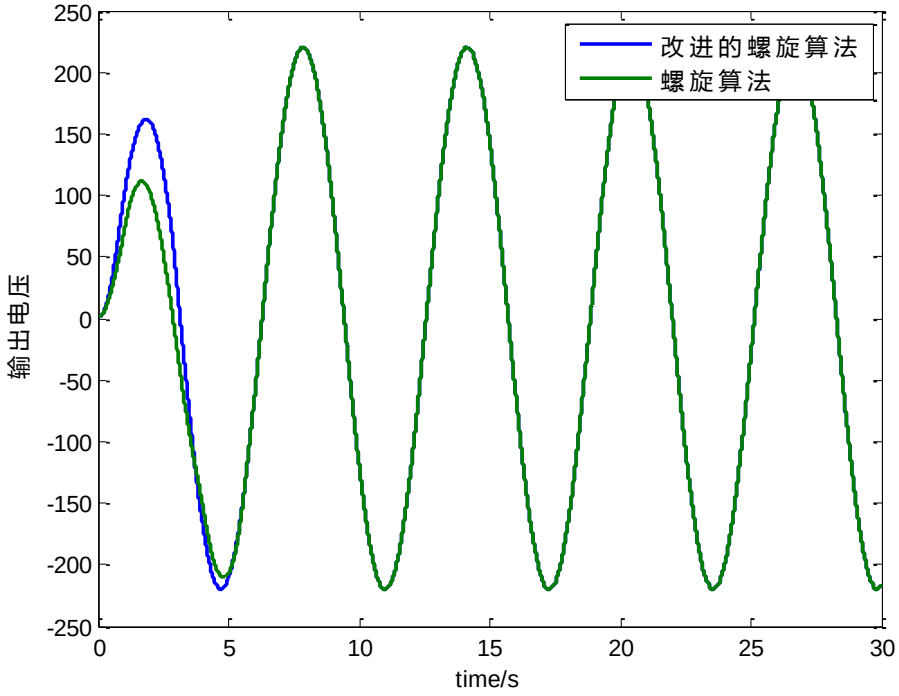

图 6-3 输出电压值

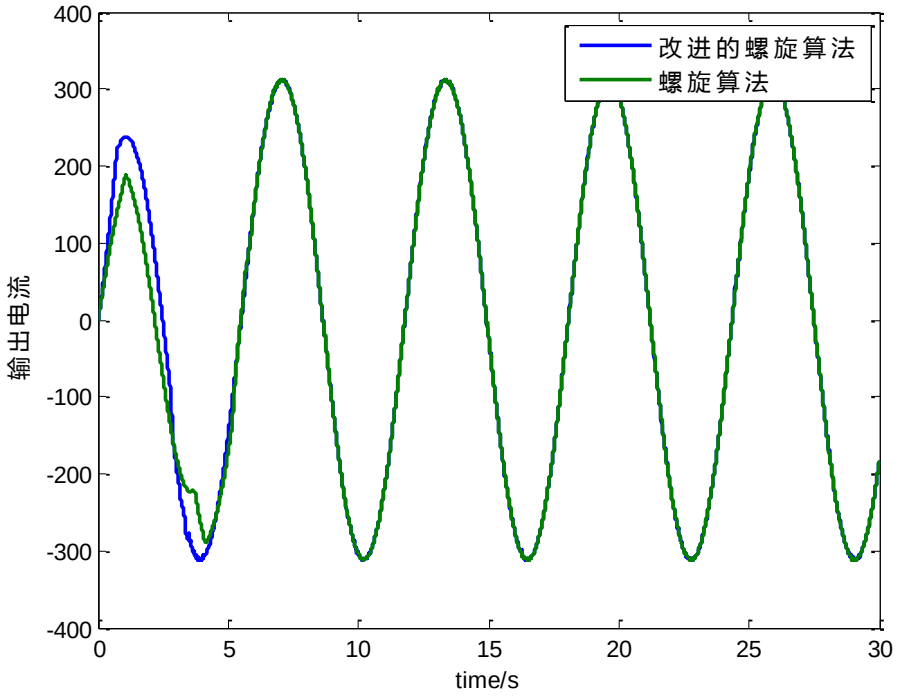

图 6-4 输出电流值

根据图 6-4 可知，系统电压与电流均在有限时间内到达期望值，所提出改进方法在响应时间与超调方面性能要优于原方法。

对系统加入扰动$\sigma = 8\sin(t)$，螺旋算法本身具有一定的鲁棒性，但扰动超过其承受范围，系统便会发散，而改进的方法则可以根据系统状态调节控制器参数，补偿干扰所带来的误差。重新对系统进行仿真，仿真结果如图 6-5 所示。

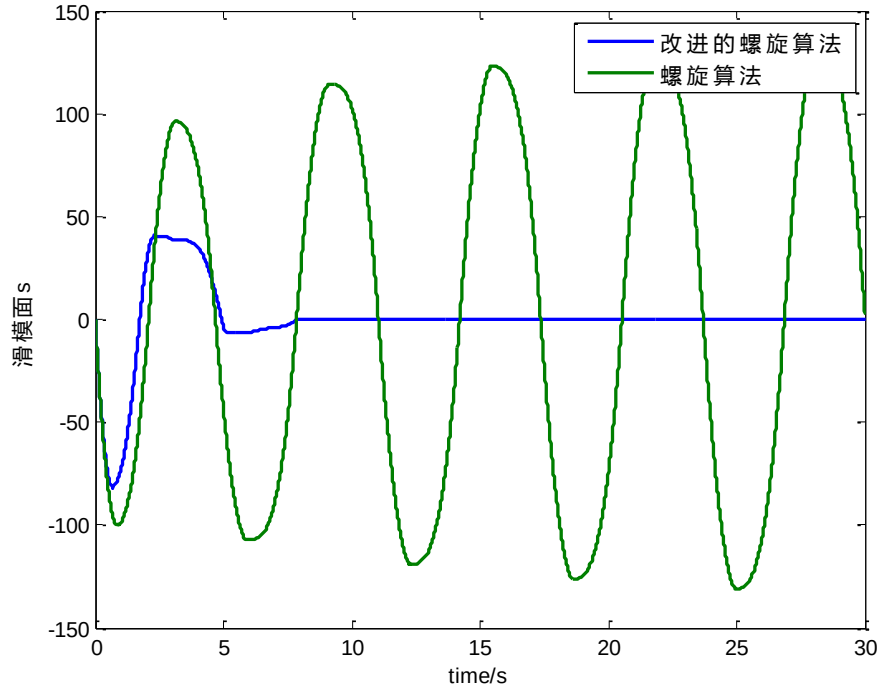

图 6-5 增加扰动后电压误差曲线

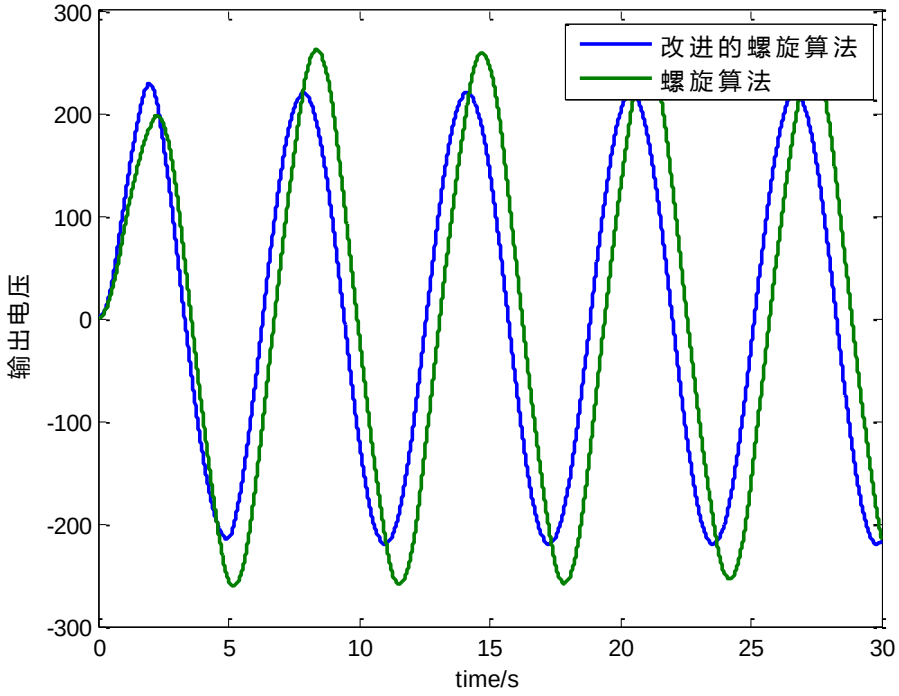

图 6-6 增加扰动后输出电压值

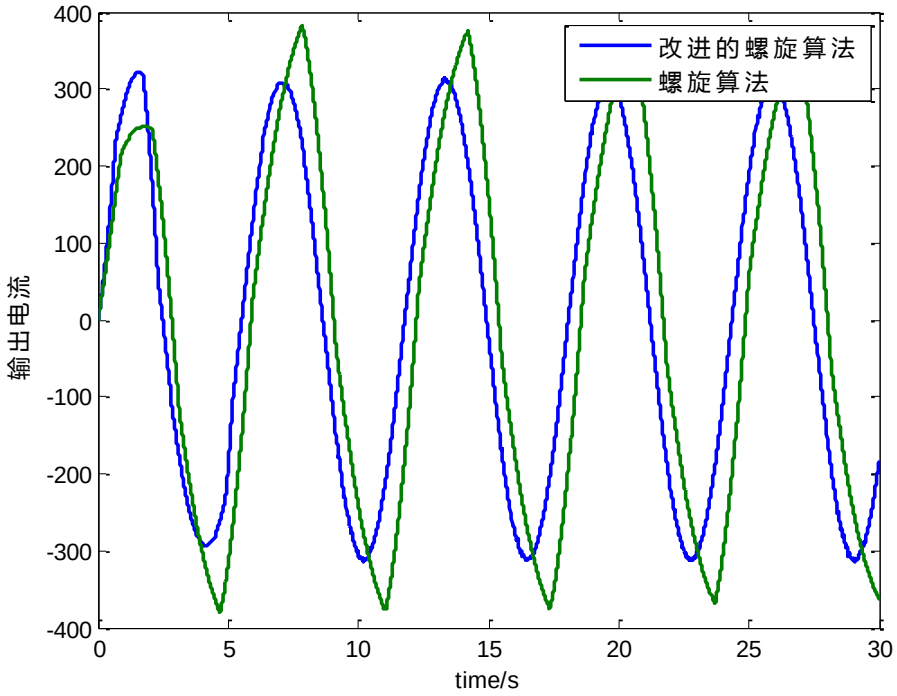

图 6-7 增加扰动后输出电流值

由图 6-7 可知，当系统扰动增加到一定程度后，原有螺旋算法下系统已经发散，而改进的算法仍能够保持系统的稳定。

6.6 结论

为克服全桥逆变器在具有未知上界不确定性存在情况下对控制性能的影响，提出一种改进型高阶滑模螺旋算法控制策略。将自适应算法与螺旋算法相结合。通过对螺旋算法的控制器参数设计自适应参数控制器，不但实现了参数根据系统状态的自动调节，而且同时实现了对具有未知上界不确定性的完全补偿。系统不确定性不存在时，所提出改进方法与原有螺旋算法对系统性能影响无差别。当不确定性的界超出螺旋算法所能承受范围时，原有方法下系统发散。而所提出改进算法仍能保证系统的有限时间稳定。

第七章 基于改进的高阶滑模控制的微电网稳定控制研究

7.1 引言

7.1.1 微电网的基本结构

随着能源问题的日益严峻，新能源开发与可再生能源利用率的提高已成为我国能源战略中的重要内容之一，其中分布式发电技术是大电网对可再生型能源的接纳所依赖的重要技术。

分布式发电(distributed generation，DG)与传统电网相比，具有投资小、清洁环保、供电可靠性高和发电配置方式灵活等优点。但分布式电源并网发电具有可靠性弱、对电网安全稳定有影响的缺点，为解决其负面影响，将 DG 和负荷连接构成微电网，并以这种形式接入大电网与大电网互为支撑，是发挥 DG 系统效能的最有效方式。微电网能够有效提高大电网的安全稳定运行，若主电网发生故障，配电网迅速与主网解列，运行于孤岛模式，保证重要负荷供电。主电网恢复正常后微电网可再次联网，重新进入并网运行模式。

典型微电网包含多个微电源发电系统、电力电子变换装置及储能装置以及控制单元。对系统而言，微电网相当于一个可控负荷，其接入和退出不会对大电网的运行控制造成影响，这就是其特有的“即插即用”的功能；而对用户而言，微电网被看作一个可以按需定制的电源，能满足不同电力用户对电能质量和供电安全的多元化需求。微电网可分为交流微电网、直流微电网、混合微电网三类

(1)交流微电网

交流微电网这三类微电网中是最常见的一种，其特征是微电网中的能量交换必须经由交流母线来完成，各个微电源、储能装置、负荷等通过电力电子变换装置进行整流或逆变后连接至交流母线，也可直接连接至交流母线。

(2)直流微电网

直流微电网与交流微电网相比结构简单，能量交换经由直流母线完成，各个微电源、储

能装置、负荷等必须通过电力电子变换装置连接至直流母线，由此形成的直流网络再经逆变器装置连接至不同电压等级的外部交流电网。与交流微电网不同的是，直流微电网除可以向直流负荷供能外，还可以向不同电压等级的交流负荷供能，直流母线上配置储能装置，负责调节微电源和负荷的波动。

(3)交直流混合微电网

交直流混合微电网中同时包含交流母线与直流母线，但从整体结构来看混合微电网实质上属于交流微电网的一种，只需要将其中的直流微电网模块看作交流微电网的一部分，此时的直流微电网相当于一个通过 DC/AC 逆变器接入交流母线的独立电源。

7.1.2 微电网的研究现状

目前北美、欧盟、日本等发达国家和地区都在积极开展对微电网技术的研究，在理论研究的基础上，建立了诸多微电网实验平台和示范工程，初步规划了小规模的商业推广。

美国电力可靠性技术解决方案协会(Consortium for Electric Reliability Technology Solutions，CERTS)在 2002 年首次完整性的提出了微电网的概念。CERTS 作为是世界微电网领域研究的先行者，对微电网进行了开创性的研究，其研究方向主要侧重于满足多种电能质量要求、提高供电可靠性、降低微电网成本以及加强智能化等方面。美国先后建立了 Mad River 微电网示范工程、Wisconsin 微电网实验室和 CERTS 微电网示范平台|，Mad River 微电网工程作为美国首个微电网示范工程，实现了对微电网建模、保护与控制等的验证，为微电网相关法律法规的制定奠定基础；Wisconsin 微电网实验室主要致力于研究下垂控制在遭受大扰动后暂态电压、频率调整、运行模式间无缝切换中的应用，CERTS 微电网示范平台则主要致力于研究网内微电源的并联运行可能会对大电网造成的影响方面。

欧洲各国对微电网的研究起步较早，发展程度也处于世界前列，其研究方向主要在于考虑微电网是否满足能源用户对电能质量的各种要求、能否满足欧洲电网的稳定性与环保要求等。欧盟第七研究框架计划中，在建立微电网为主导的供电可靠性强、环境污染少、经济效益高的智能电网等方面取得了一定的研究成果。希腊 Kythnos 岛 10kW 光伏微电网工程，系统除了光伏发电系统以外还包括蓄电池和柴油发电机，在孤岛运行模式下能够对本地负载安全稳定地供电；荷兰的 Continuon 微电网示范工程，为容量 335kW 的中低压并网型光伏微电网，同时具备黑启动能力；另外还有德国的 Mannheim．Wallstadt 居民区示范工程，丹麦的 Bomholm 微电网，意大利的 CESI 项目等。

日本在福岛核电站事故发生后将新能源发展重心由原来的核电转向可再生型能源发电，但是可再生能源输出功率随外界环境因素随机波动的特点会对大电网的供电可靠性与电能质

量带来了一定的影响。这就需要在微电网中配置储能环节，微电网中的储能装置可以有效平衡可再生型能源非连续的、波动的功率输出。从大电网的视角来看，微电网可以等效为一个恒定负荷的理念使得微电网控制和储能领域的研究在日本得到了极大的重视，因而大大加快了日本微电网的发展速度。日本学者利用柔性交流输电技术快速灵活的控制性能，提出一种灵活高效、可靠性高、电量智能化的能源供给系统，日本政府还成立了专门的新能源综合开发机构——新能源与工业技术发展组织(Geothermal Energy Development Department，NEDO)，用于统一协调各大高校、能源企业与国家重点实验室对新能源、微电网的研究，以此推动微电网示范性平台的建设。

我国微电网的研究与发达国家相比，目前仍然处于探索阶段。微电网技术研究的主要机构是国家电网公司，我国第一次提出的微电网技术体系研究项目于 2011 年 8 月完成验收，体系中针对微电网的核心技术框架、大电网应对微电网的控制策略、微电网技术标准和政策等各个方面进行了研究，对我国微电网的发展线路和技术路线进行了规划，对我国不同阶段的微电网发展计划提出积极而有效的建议。

我国研究微电网技术的核心人员是由各大高校、电力科研机构与电力企业组成的科研团队。通过“973”、“863”等国家重大科研计划对微电网研究领域的支持，我国微电网技术的理论研究、实验室与示范工程的建设已初见成效。2007 年 9 月，由国家发改委、浙江省发改委与日本 NEDO 合作，在杭州电子科技大学建立我国首个高校微电网实验室，240kW 的先进稳定并网型光伏发电微电网系统，该系统的光伏发电比例高达 50％，现已开始投入运行，成功向两幢教学楼提供持续的电力供应，具备显著的工程示范效果。2009 年底，在国家 863 计划的支持下，南方电网与天津大学合作建设了热电冷三联供的微电网系统，该系统由三台 200kW 微型燃气轮机与一台制冷机组构成，该微电网系统主要致力于冷热电联供微电网的优化设计、稳定运行以及对大电网影响等问题的研究，是我国冷热电联供微电网技术的示范平台。2011 年 9 月，国家电网公司建设的中新天津生态城智能电网综合示范工程微电网系统，该系统首次实现了微电网系统和配电自动化系统之间的互通互联、微电网系统和智能楼宇之间的数据交换。2013 年 1 月，海西厦门岛光储联合微电网示范工程建成，该工程使用了中国电力科学研究院自主研发的微电网控制器与能量管理系统。我国已经建成的微电网示范项目还有国家金太阳水光互补微电网发电示范工程、张北的国家风光储示范工程等。

虽然国内微电网技术的发展已初见规模，但是与发达国家已建成的诸多微电网实验室与示范工程相比，仍然存在不小的差距。因此必须加快微电网相关技术的研究工作，以此推动微电网在我国的发展进程，缓解我国的化石能源消耗过度问题。

7.1.3 微电网控制方法研究现状

微电源按照其并网方式的不同，可以分为同步发电机型电源、逆变器型电源和异步发电机型电源。同步发电机型微电源的控制和并网技术已较为成熟，微电网中大部分微电源属于逆变器型微电源，微电源并网逆变器的基本控制方法有：恒压恒频控制(V／f 控制)、恒功率控制(PQ 控制)、下垂控制(Droop 控制)。下面分别具体介绍这三种控制方法的原理与特性。考虑到分布式电源与储能装置在控制方法与控制策略上具备很强的相似性，故此后阐述的逆变器控制方法同样适用于储能装置。

恒功率控制

恒功率控制的控制目标：微电源输出的有功功率和无功功率跟踪相应的有功功率和无功功率参考值|。恒功率控制的使用前提是系统中必须有维持微电网频率、电压稳定的微电源，因此在微电网处于并网运行模式时，在大电网的支撑下，微电源逆变器交流侧母线电压、频率与大电网同步，都是稳定的，所有微电源均可采用恒功率控制；微电网处于孤岛运行模式时，系统中必须至少有一个采取恒压恒频控制的微电源，其他微电源仍可以采用恒功率控制。

恒压恒频控制

恒压恒频控制的控制目标是微电源逆变器交流侧输出电压幅值和频率跟踪相应的参考值保持恒定不变。采用这种控制方式的微电源，可以独立带负荷运行，而且输出电压和频率不会受到负荷变化的影响。微电网孤岛运行时，采用此种控制方法的微电源可作为有效支撑系统电压和频率的主电源，维持微电网的电压和频率在合适的范围内，对于微电网中其他微电源与负荷而言，采用恒压恒频控制的微电源实质上是一个输出功率和电流由系统中的负荷和其余微电源输出的功率决定的电压源。恒压恒频控制通常适用配备大容量储能装置的微电源，当微电源输出功率较本地负荷需求大时，采用恒压恒频控制的微电源减少输出功率；当微电源输出功率较本地负荷需求量小时，采用恒压恒频控制的微电源增加输出功率，等效于无穷大母线，能有效地支撑孤岛模式下微电网内恶劣的电源出力或本地负荷变化情况

微电网的综合控制

在不同运行模式下，微电网的控制功能和实现目标会有所区别。微电网中存在并网和孤岛两种稳态运行模式，以及两种运行模式间互相转换的暂态过程。在并网运行模式下，微电网同低压配电网并联以实现并网运行，可以实现能量的双向流动。当大电网发生严重故障或者计划孤岛时，微电网断开与大电网的连接，转变为孤岛运行模式继续为网内负载供电，提高重要负荷的供电可靠性，因此孤岛运行模式下各微电源逆变器控制和储能装置的优化控制

是至关重要的。采取合理的控制手段与控制策略不仅能够保证大电网的安全稳定，还能够实现微电网两种运行状态间的无缝切换。

微电网的动态特性相对于单个分布式电源而言要复杂得多，因为其中存在多种能源输入、多种能量转换单元、多种能源输出以及多种运行状态。根据孤岛运行模式下电源的职能与作用的差异，微电网的综合控制模式目前分为主从控制、对等控制和分层控制三种模式。

主从控制模式

主从控制模式是指孤岛运行模式时，微电网中的多个微电源之间有主次之分的，根据微电源的容量与类型赋予不同的地位，选取微电网中某一个或多个微电源或储能装置采用恒压恒频控制，为其他微电源提供有效的电压和频率支撑，称之为主微电源，而其他微电源则采用恒功率控制，称之为从微电源。由于孤岛模式下从微电源采用恒功率控制，微电网内负荷的波动需要由主微电源负责跟随，这就要求主微电源的控制系统能够保证其输出功率在一定范围内是可控的，同时能够快速跟踪负荷变化。应用主从控制模式的微电网要求主控制器可以在两种不同控制模式间进行快速切换。常见的主控制单元包括：①储能装置②分布式电源③分布式电源加储能装置。

对等控制模式

对等控制模式，区别于主从控制，微电网中微电源的各控制器不存在主从关系，而是具备同等的地位，目前实现对等控制模式的主要方法是采用下垂控制，每个微电源都采用下垂控制去参与微电网孤岛模式下电压、频率的调节。在负荷变化的情况下，微电源根据下垂系数承担分担负荷的变化量，即系统功率动态的被分配给各个微电源承担。下垂控制其实是一种有差控制，因为系统电压和频率指标不能完全跟踪参考值。采用对等控制的微电网比主从控制下的微电网更易于实现分布式电源的即插即用，更易于实现运行模式间的无缝切换。目前的对等结构的微电网大多还停留在实验室阶段，应用于实际工程的比较少见，其中如何提高对等控制微电网的稳定性水平、加强通用性和鲁棒性是学者们正在致力解决的问题。

分层控制模式

分层控制模式必须向微电网中的微电源发出控制信息，因此需设有中央控制器以建立通讯，其实质是传统电力电子系统中的多代理技术 M2J 在微电网中的应用。分层控制中一种典型的三级控制结构，一级结构包括微电源和负载控制，负责微电网的暂态功率平衡和负载管理，是保证微电网可靠运行的重要基础；二级结构中的中心控制器(MGCC)负责优化电能质量，同时减少微电网内的电压、频率波动；三级结构是最上层的系统，配电网络操作管理系统负责根据市场与调度需求来协调控制系统的多个微电网。

在对抗系统不确定性的鲁棒控制方法中，传统滑模控制以其显著优点（如对匹配不确定性的不变性，控制器实现简单、响应迅速等）而得到了广泛应用，但仍存在抖振问题和相对阶的限制等不足之处。高阶滑模控制方法的提出，不仅保留了传统滑模控制的优点，还可以解决其存在的问题，并且高阶滑模控制方法可以实现系统有限时间稳定，对于控制系统来说，有限时间稳定无疑更加有利。

不确定性在被控系统中是普遍存在的，自适应方法的思想便是在线实时估计不确定性或者控制参数的界限，以保持稳定的系统性能，因而这种方法有很大的现实意义。已有滑模控制方法对匹配不确定性具有一定鲁棒性，但控制器设计需要事先知道系统不确定性的界。对于具有未知上界的非匹配不确定性，滑模控制需要有其他方法与之相结合来补偿不确定性的影响。将滑模控制与自适应机制有机结合起来的滑模自适应控制方法，是解决参数不确定或时变参数控制问题的一种常用的控制策略。

高阶滑模控制中有典型的螺旋算法(Twisting Algorithm)与超螺旋算法 (Super-Twisting Algorithm, STA) ，两种算法均需要根据系统不确定性的上界来选择控制参数的大小，才能实现系统的有限时间稳定性控制。在实际系统中，获得不确定性的界是很不现实的。针对这一问题，已有不少学者开展对两种算法的改进研究，其中以自适应方法的引入为研究主流。文献[144]提出参数自适应的螺旋算法，实现了未知上界不确定性存在的情况下的参数自我调整及不确定性的补偿，他的做法是对一个参数设计自适应控制器，另一个参数是以它的倍数出现，提出的自适应律是离散的，并将这一方法应用于气动执行器的控制中。文献[145][146]提出变增益的高阶滑模算法，利用时变和状态变化的控制增益来改进了传统的方法，比传统高阶滑模控制方法抗干扰范围广，降低了抖振，提高了系统性能，但控制过程中仍需要知道系统不确定性的上界，且不确定项的形式要满足一定的条件。文献[147]用自适应方法来改进传统高阶滑模控制算法，但其中不确定项都要满足特定条件，才能证明出系统的有限时间稳定特性，并且缺乏系统有限时间稳定性的证明。文献[148]将自适应级联高阶滑模的方法用于欠驱动系统，但系统是渐近稳定而不是有限时间稳定的，而且自适应方法的引入没有解决不确定性上界未知的问题。文献[149]给出了改进的自适应 STA 控制器作用下系统有限时间收敛的证明，但没有考虑有限时间定理中需要的参数为实数这一问题。文献[150]为高阶滑模控制方法增加了辅助的自适应控制器，用以补偿系统不确定性，但辅助控制器增益仍要根据不确定性的界来选择。

二阶滑模控制算法的稳定性证明比传统滑模算法要复杂的多，对二阶滑模控制方法来说，使用与传统滑模控制类似的证明方法只能给出渐近稳定性的证明。文献[151]给出了新的 Lyapunov 方程来证明 Twisting 算法的有限时间稳定性，给出了收敛时间的表达式，并将此

方法用于轮摆系统中。但所提出的方法需要大量的数学知识，并且未考虑系统中不确定性的问题。文献[152]基于相轨迹的几何特征分析了 STA 观测器的有限时间收敛性。文献[153]采用齐次性理论证明了 STA 的有限时间稳定性。以上方法计算量大，均不能得到收敛时间的估计，并且不能证明添加了自适应补偿控制器后系统仍是有限时间收敛的。文献[154]通过求解一阶微分方程，创造性给出了新的 Lyapunov 函数来证明 STA 的有限时间收敛特性，并给出了收敛时间的估计，但这种方法需要大量的数学知识和繁琐的计算过程。文献[155]提出了二次型的 Lyapunov 函数来证明 STA 算法的有限时间稳定性。这一方法较之前的方法来说，计算量相对较小，简单易懂，并且可以估计收敛时间。

本章对传统的 STA，增加了补偿控制器和自适应参数控制器，一方面使得系统存在具有未知上界不确定性时，实现系统有限时间稳定性控制，另一方面方便了控制器参数的选择，避免参数过大造成的系统不稳定情况。利用类二次型 Lyapunov 函数，实现有限时间稳定性的证明，给出收敛时间与控制器参数的关系式。将改进的STA与上一章节改进的螺旋算法分别应用与微电网并网控制与孤岛控制中。

7.2 微电网模型

微电网电路结构如图 7-1 所示，微电网稳定控制器与光伏分布式电源以及重要负荷通过 1 条公共母线并联后形成微电网。微电网由公共连接点断路器QF 接入主电网。微电网稳定控制器主要包括储能设备、基于全控器件的换流器、滤波器以及控制检测电路。断路器QF 闭合，微电网并网运行，微电网内电压、频率与主电网保持一致。为充分利用DG 设备，微电网内的DG 运行于其最大功率点。然而以风能、太阳能等作为一次能源的分布式电源受外界自然环境、气候等因素的影响，输出功率均存在一定的波动。因此，可以利用微电网稳定控制器补偿DG 出力波动，避免由功率波动引起的电压偏差、电压波动等问题。公共连接点断路器断开，微电网孤岛运行。由稳定控制器提供电压和频率支撑，平衡微电网内的功率。保证DG 稳定运行以及重要负荷的供电。若DG 的总出力大于负荷和微电网内的损耗，由稳定控制器存储部分电能；反之，可输出功率，补偿功率差额。

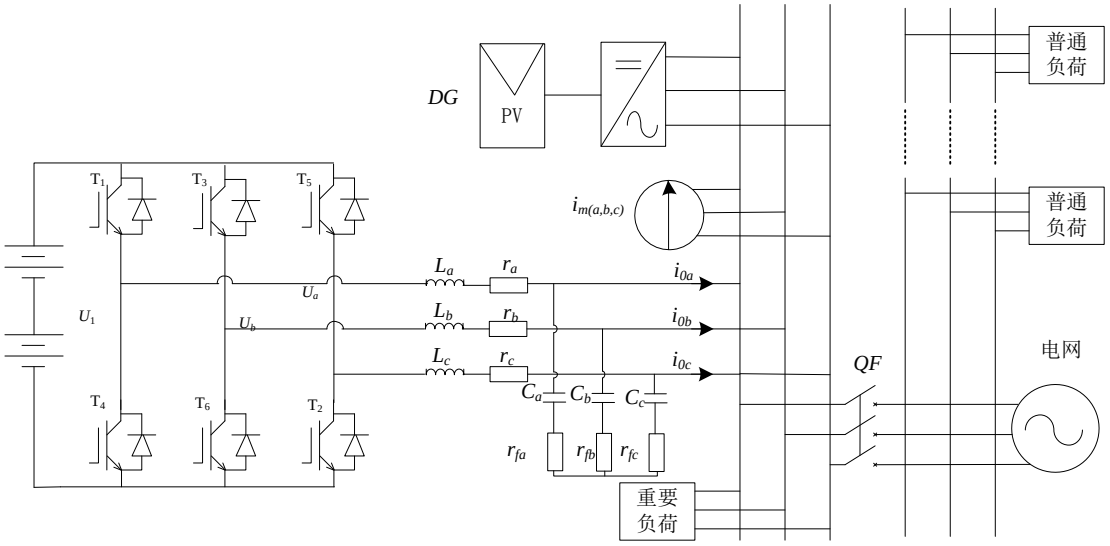

图 7-1 微电网主电路

假设储能系统的电压保持不变，因此可以用直流电源代替储能系统。u_{0a}、u_{0b}、u_{0c}与i_{0a}、i_{0b}、i_{0c}分别表示交流侧相电压与电流。L_a、L_b、L_c 和C_a、C_b、C_c 为滤波电感、电容。r_a、r_b、r_c 为换流桥、电感及线路等效串联电阻。r_{fa}、r_{fb}、r_{fc}为滤波电容等效串联电阻。i_{ma}、i_{mb}、i_{mc}表征微电网中的瞬态变化、系统参数变化造成的扰动量。

7.3 运行状态

7.3.1 并网运行

断路器 QF 闭合，微电网内电压、频率与主电网保持一致。利用微电网稳定控制器补偿 DG 处理波动，避免电压偏差、电压波动。

通过控制微电网稳定控制交流器交流输出侧输出电流来控制其输出功率，系统状态方程可表示为：

$$\boldsymbol{L}_{\mathrm{g}}\dot{\boldsymbol{i}}_0=\boldsymbol{k}_{\mathrm{PWM}}\boldsymbol{u}_{\mathrm{con2}}-\boldsymbol{R}_{\mathrm{g}}\boldsymbol{i}_0-\boldsymbol{u}_0-\boldsymbol{u}_{\mathrm{m}} \tag{7-1}$$

式中，$\boldsymbol{L}_{\mathrm{g}}=\mathrm{diag}(L_{\mathrm{ga}},L_{\mathrm{gb}},L_{\mathrm{gc}})$; $\boldsymbol{k}_{\mathrm{PWM}}=\mathrm{diag}(k_{\mathrm{PWM}},k_{\mathrm{PWM}},k_{PWM})$; $\boldsymbol{i}_0=\mathrm{diag}(i_{0\mathrm{a}},i_{0\mathrm{b}},i_{0\mathrm{c}})$; $\boldsymbol{R}_{\mathrm{g}}=\mathrm{diag}(R_{\mathrm{ga}},R_{\mathrm{gb}},R_{\mathrm{gc}})$; $\dot{i}_0=\mathrm{diag}(\dot{i}_{0\mathrm{a}},\dot{i}_{0\mathrm{b}},\dot{i}_{0\mathrm{c}})$; $\boldsymbol{u}_0=\mathrm{diag}(u_{0\mathrm{a}},u_{0\mathrm{b}},u_{0\mathrm{c}})$; $\boldsymbol{u}_{\mathrm{m}}=\mathrm{diag}(u_{\mathrm{ma}},u_{\mathrm{mb}},u_{\mathrm{mc}})$; 三相正弦调制波$\boldsymbol{u}_{\mathrm{con2}}=\mathrm{diag}(u_{\mathrm{con2a}},u_{\mathrm{con2b}},u_{\mathrm{con2c}})$; $R_{\mathrm{ga}},R_{\mathrm{gb}},R_{\mathrm{gc}}$与$L_{\mathrm{ga}},L_{\mathrm{gb}},L_{\mathrm{gc}}$为等效串联电阻、电感；$u_{0\mathrm{a}},u_{0\mathrm{b}},u_{0\mathrm{c}}$与$i_{0\mathrm{a}},i_{0\mathrm{b}},i_{0\mathrm{c}}$分别表示微电网稳定控制器交流侧相电压、电流；$u_{\mathrm{ma}},u_{\mathrm{mb}},u_{\mathrm{mc}}$ 表征微电网中瞬态变化、系统参数变化造成的扰动量。

设微电网稳定控制器交流侧输出电流参考值为$\boldsymbol{i}_{\mathrm{ref}}=\mathrm{diag}(i_{\mathrm{refa}},i_{\mathrm{refb}},i_{\mathrm{refc}})$，取参考信号与

状态变量之差作为新的状态变量，系统的状态方程变为：

$$\boldsymbol{L}_{\mathrm{g}}\dot{\boldsymbol{e}}_i = -\boldsymbol{R}_{\mathrm{g}}\boldsymbol{e}_i + \boldsymbol{k}_{\mathrm{PWM}}\boldsymbol{u}_{\mathrm{con2}} - \boldsymbol{R}_{\mathrm{g}}\boldsymbol{i}_{\mathrm{ref}} - \boldsymbol{u}_0 - \boldsymbol{u}_{\mathrm{m}} - \boldsymbol{L}_{\mathrm{g}}\dot{\boldsymbol{i}}_{\mathrm{ref}} \tag{7-2}$$

式中 $\boldsymbol{e}_i = \mathrm{diag}(i_{0\mathrm{a}} - i_{\mathrm{refa}}, i_{0\mathrm{b}} - i_{\mathrm{refb}}, i_{0\mathrm{c}} - i_{\mathrm{refc}})$

上式可改写为：

$$\dot{\boldsymbol{e}}_i = \boldsymbol{a}(\boldsymbol{e}_i + \boldsymbol{i}_{\mathrm{ref}}) + \boldsymbol{b}\boldsymbol{u}_{\mathrm{con2}} + \boldsymbol{c}(\boldsymbol{u}_0^{\mathrm{T}} + \boldsymbol{u}_{\mathrm{m}}^{\mathrm{T}}) - \dot{\boldsymbol{i}}_{\mathrm{ref}} \tag{7-3}$$

式中$\boldsymbol{a} = \mathrm{diag}(-R_{\mathrm{ga}}/L_{\mathrm{ga}}, -R_{\mathrm{gb}}/L_{\mathrm{gb}}, -R_{\mathrm{gc}}/L_{\mathrm{gc}})$; $\boldsymbol{b} = \mathrm{diag}(k_{\mathrm{PWM}}/L_{\mathrm{ga}}, k_{\mathrm{PWM}}/L_{\mathrm{gb}}, k_{\mathrm{PWM}}/L_{\mathrm{gc}})$; $\boldsymbol{c} = \mathrm{diag}(-1/L_{\mathrm{ga}}, -1/L_{\mathrm{gb}}, -1/L_{\mathrm{gc}})$。考虑到系统参数变化以及不确定性扰动，式可进一步改写为：

$$\dot{\boldsymbol{e}}_i = (\boldsymbol{a} + \Delta\boldsymbol{a})(\boldsymbol{e}_i + \boldsymbol{i}_{\mathrm{ref}}) + (\boldsymbol{b} + \Delta\boldsymbol{b})\boldsymbol{u}_{\mathrm{con2}} + (\boldsymbol{c} + \Delta\boldsymbol{c})(\boldsymbol{u}_0^{\mathrm{T}} + \boldsymbol{u}_{\mathrm{m}}^{\mathrm{T}}) - \dot{\boldsymbol{i}}_{\mathrm{ref}} \tag{7-4}$$

$$\dot{\boldsymbol{e}}_i = \boldsymbol{a}(\boldsymbol{e}_i + \boldsymbol{i}_{\mathrm{ref}}) + \boldsymbol{b}\boldsymbol{u}_{\mathrm{con2}} + \boldsymbol{c}\boldsymbol{u}_0 - \dot{\boldsymbol{i}}_{\mathrm{ref}} + \boldsymbol{w} \tag{7-5}$$

式中，$\Delta\boldsymbol{a}$、$\Delta\boldsymbol{b}$、$\Delta\boldsymbol{c}$表征系统的不确定性。

假设系统的不确定性为$\boldsymbol{w}$，且有：

$$\boldsymbol{w} = \Delta\boldsymbol{a}(\boldsymbol{e}_i + \boldsymbol{i}_{\mathrm{ref}}) + \Delta\boldsymbol{b}\boldsymbol{u}_{\mathrm{con2}} + \Delta\boldsymbol{c}\boldsymbol{u}_0 + \boldsymbol{u}_{\mathrm{m}} \tag{7-6}$$

7.3.2 孤岛运行

断路器断开，由稳定控制器提供电压和频率支撑，平衡微电网内的功率，保证 DG 稳定运行及其重要负荷的供电。若 DG 的总出力大于负荷和微电网内的损耗，由稳定控制器存储部分电能；反之，可输出功率，补偿功率差额。在 SPWM 中，载波频率远高于换流器交流侧基波频率时，换流桥部分可以看成是 1 个比例环节，比例系数设为 kPWM。微电网孤岛运行时，微电网稳定控制器的控制目标是输出电压为幅值、频率一定的正弦波。因此系统的状态方程可表示为：

$$\dot{\boldsymbol{X}}_k = \boldsymbol{A}_k\boldsymbol{X}_k + \boldsymbol{B}_k\boldsymbol{U}_k + \boldsymbol{D}_k\boldsymbol{I}_{0k} + \boldsymbol{F}_k\boldsymbol{I}_{\mathrm{m}k} \tag{7-7}$$

式中，$\dot{\boldsymbol{X}}_k = [\dot{u}_{0k}\ \ \ddot{u}_{0k}]^{\mathrm{T}}$；$\boldsymbol{A}_k = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -\frac{1}{L_k C_{\mathrm{fk}}} & -r_k/L_k \end{bmatrix}$；$\boldsymbol{X}_k = [u_{0k}\ \ \dot{u}_{0k}]^{\mathrm{T}}$；$\boldsymbol{B}_k = [0\ \ k_{\mathrm{PWM}}/(L_k C_{\mathrm{fk}})]^{\mathrm{T}}$；$\boldsymbol{U}_k = [u_{\mathrm{con}1k}]$; $\boldsymbol{D}_k = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ -\frac{r_k}{L_k C_{\mathrm{fk}}} & -1/C_{\mathrm{fk}} \end{bmatrix}$；$\boldsymbol{I}_{0k} = [i_{0k}\ \ \dot{i}_{0k}]^{\mathrm{T}}$；$\boldsymbol{F}_k = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ \frac{r_k}{L_k C_{\mathrm{fk}}} & 1/C_{\mathrm{fk}} \end{bmatrix}$；$\boldsymbol{I}_{\mathrm{m}k} = [i_{\mathrm{m}k}\ \ \dot{i}_{\mathrm{m}k}]^{\mathrm{T}}$；$k = a, b, c$。$u_{\mathrm{con}1k}$为三相正弦调制波。

考虑到微电网中的瞬态变化、系统参数变化造成的扰动量，式(7-1)可进一步改写为：

$$\dot{\boldsymbol{X}}_k = (\boldsymbol{A}_k + \Delta\boldsymbol{A}_k)\boldsymbol{X}_k + (\boldsymbol{B}_k + \Delta\boldsymbol{B}_k)\boldsymbol{U}_k + (\boldsymbol{D}_k + \Delta\boldsymbol{D}_k)\boldsymbol{I}_{0k} + \boldsymbol{F}_k\boldsymbol{I}_{\mathrm{m}k} \tag{7-8}$$

式中，$\Delta\boldsymbol{A}_k$、$\Delta\boldsymbol{B}_k$、$\Delta\boldsymbol{D}_k$表征系统的不确定性且是有上界的，为便于分析，定义：

$$\boldsymbol{W}_k = \Delta\boldsymbol{A}_k\boldsymbol{X}_k + \Delta\boldsymbol{B}_k\boldsymbol{U}_k + \Delta\boldsymbol{D}_k\boldsymbol{I}_{0k} + \boldsymbol{F}_k\boldsymbol{I}_{\mathrm{m}k} \tag{7-9}$$

且$\boldsymbol{W}_k$有上界，但值未知。则式子简化为：

$$\dot{\boldsymbol{X}}_k = \boldsymbol{A}_k\boldsymbol{X}_k + \boldsymbol{B}_k\boldsymbol{U}_k + \boldsymbol{D}_k\boldsymbol{I}_{0k} + \boldsymbol{W}_k \tag{7-10}$$

7.4 改进的高阶滑模控制算法

7.4.1 改进的高阶滑模超螺旋算法

考虑如下一阶系统：

$$\dot{x} = u + E \tag{7-11}$$

其中 $x \in R$，$u \in R$ 和 $E \in R$ 分别为系统状态、控制输入和不确定项。STA 作为控制器可表示为：

$$\begin{cases} u = -\lambda|x|^{\frac{1}{2}}\mathrm{sgn}(x) + v \\ \dot{v} = -\alpha\mathrm{sgn}(x) \end{cases} \tag{7-12}$$

提出改进的 STA，对传统的 STA，增加了补偿控制器和自适应参数控制器，一方面使得系统存在具有未知上界不确定性时，实现系统有限时间稳定性控制，另一方面方便了控制器参数的选择，避免参数过大造成的系统不稳定情况。改进后的控制器如下所示：

$$\begin{cases} u = -\hat{\lambda}|x|^{\frac{1}{2}}\mathrm{sgn}(x) + v - \hat{G}\mathrm{sgn}(x) \\ \dot{v} = -\hat{\alpha}\mathrm{sgn}(x) \end{cases} \tag{7-13}$$

其中 $-\hat{G}\mathrm{sgn}(x)$ 为补偿控制器，定义 $|E| \le \bar{G}$，$\hat{G}$ 为 $\bar{G}$ 的估计值。

自适应参数控制器形式为：

$$\begin{cases} \dot{\hat{\lambda}} = k_1\left[\frac{\omega_1}{\sqrt{2k_1}} + a|x|^{\frac{1}{2}} + c\mathrm{sgn}(x)v\right]\mathrm{sat}(|x\epsilon|) \\ \dot{\hat{\alpha}} = k_2\left[\frac{\omega_2}{\sqrt{2k_2}} + 2b\mathrm{sgn}(x)v + c|x|^{\frac{1}{2}}\right]\mathrm{sat}(|x\epsilon|) \\ \dot{\hat{G}} = k_3(\frac{\omega_3}{\sqrt{2k_3}} + 2a + \frac{2|cv|}{|x|^{\frac{1}{2}}})\mathrm{sat}(|x\epsilon|) \end{cases} \tag{7-14}$$

其中 a，b，c，k_1，k_2，k_3，ω_1，ω_2，ω_3 均为正常数，$\mathrm{sat}(|x\epsilon|)$ 为饱和函数，ϵ 为足够小的正常数。

稳定性证明

定理 考虑含有未知上界不确定项的系统(7-11)，当控制律满足(7-13)，参数满足自适应律(7-14)时，系统在有限时间内稳定至原点。

证明：定义矩阵 $\widehat{\boldsymbol{A}} = \begin{bmatrix} -\frac{\hat{\lambda}}{2} & \frac{1}{2} \\ -\hat{\alpha} & 0 \end{bmatrix}$，$\boldsymbol{A} = \begin{bmatrix} -\frac{\lambda}{2} & \frac{1}{2} \\ -\alpha & 0 \end{bmatrix}$，其中 λ 和 α 分别取作 $\hat{\lambda}$ 和 $\hat{\alpha}$ 的上界。

定义误差 $\tilde{\lambda}=\lambda-\hat{\lambda}$，$\tilde{\alpha}=\alpha-\hat{\alpha}$。$\widetilde{\boldsymbol{A}}=\begin{bmatrix}-\frac{\tilde{\lambda}}{2} & 0\\ -\tilde{\alpha} & 0\end{bmatrix}$，令 $\bar{G}>|E|$ 表示总的不确定性的上界。取向量：$\boldsymbol{\xi}=\begin{bmatrix}\mathrm{sgn}(x)|x|^{\frac{1}{2}}\\ v\end{bmatrix}$，$\boldsymbol{\xi}^T=\begin{bmatrix}\mathrm{sgn}(x)|x|^{\frac{1}{2}} & v\end{bmatrix}$，$\boldsymbol{B}=[1\ \ 0]^T=\begin{bmatrix}1\\0\end{bmatrix}$。

那么

$$\dot{\boldsymbol{\xi}}=\begin{bmatrix}\frac{1}{2|x|^{\frac{1}{2}}}\left[-\hat{\lambda}|x|^{\frac{1}{2}}\mathrm{sgn}(x)+v+E-\hat{G}\mathrm{sgn}(x)\right]\\ -\hat{\alpha}\mathrm{sgn}(x)\end{bmatrix}$$

$$=\frac{1}{|x|^{\frac{1}{2}}}\left[\widehat{\boldsymbol{A}}\boldsymbol{\xi}+\boldsymbol{B}\left[E-\hat{G}\mathrm{sgn}(x)\right]\right]$$

$$\dot{\boldsymbol{\xi}}^T=\begin{bmatrix}\frac{1}{2|x|^{\frac{1}{2}}}\left[-\hat{\lambda}|x|^{\frac{1}{2}}\mathrm{sgn}(x)+v+E-\hat{G}\mathrm{sgn}(x)\right] & -\hat{\alpha}\mathrm{sgn}(x)\end{bmatrix}$$

$$=\frac{1}{|x|^{\frac{1}{2}}}\left[\boldsymbol{\xi}^T\widehat{\boldsymbol{A}}^T+\left[E-\hat{G}\mathrm{sgn}(x)\right]\boldsymbol{B}^T\right]$$

当 $\boldsymbol{A}$ 为 Hurwitz 矩阵时，对于一个矩阵 $\boldsymbol{Q}=\begin{bmatrix}\lambda a+2\alpha c & \alpha b-\frac{a}{2}+\frac{\lambda c}{2}\\ \alpha b-\frac{a}{2}+\frac{\lambda c}{2} & -c\end{bmatrix}$，可通过参数的选择使其为正定对称矩阵，存在矩阵 $\boldsymbol{P}$，满足 $\boldsymbol{A^TP+PA=-Q}$，其中 $\boldsymbol{P}=\begin{bmatrix}a & c\\ c & b\end{bmatrix}$ 为正定对称矩阵。

定义 Lyapunov 函数：

$$V_1(\boldsymbol{\xi})=\boldsymbol{\xi}^T\boldsymbol{P}\boldsymbol{\xi} \tag{7-15}$$

对式(7-15)求导：

$$\dot{V}_1(\boldsymbol{\xi})=\dot{\boldsymbol{\xi}}^T\boldsymbol{P}\boldsymbol{\xi}+\boldsymbol{\xi}^T\boldsymbol{P}\dot{\boldsymbol{\xi}}$$

$$=\frac{1}{|x|^{\frac{1}{2}}}\left[\boldsymbol{\xi}^T\widehat{\boldsymbol{A}}^T+\left[E-\hat{G}\mathrm{sgn}(x)\right]\boldsymbol{B}^T\right]\boldsymbol{P}\boldsymbol{\xi}+\boldsymbol{\xi}^T\boldsymbol{P}\frac{1}{|x|^{\frac{1}{2}}}\left[\widehat{\boldsymbol{A}}\boldsymbol{\xi}+\boldsymbol{B}\left[E-\hat{G}\mathrm{sgn}(x)\right]\right]$$

$$=\frac{1}{|x|^{\frac{1}{2}}}\left\{\boldsymbol{\xi}^T\widehat{\boldsymbol{A}}^T\boldsymbol{P}\boldsymbol{\xi}+\boldsymbol{\xi}^T\boldsymbol{P}\widehat{\boldsymbol{A}}\boldsymbol{\xi}\right\}$$

$$+\frac{1}{|x|^{\frac{1}{2}}}\left\{\left[E-\hat{G}\mathrm{sgn}(x)\right]\boldsymbol{B}^T\boldsymbol{P}\boldsymbol{\xi}+\boldsymbol{\xi}^T\boldsymbol{P}\boldsymbol{B}\left[E-\hat{G}\mathrm{sgn}(x)\right]\right\}$$

$$=\frac{1}{|x|^{\frac{1}{2}}}\{\boldsymbol{\xi}^T\boldsymbol{A}^T\boldsymbol{P}\boldsymbol{\xi}+\boldsymbol{\xi}^T\boldsymbol{P}\boldsymbol{A}\boldsymbol{\xi}\}-\frac{1}{|x|^{\frac{1}{2}}}\left\{\boldsymbol{\xi}^T\widetilde{\boldsymbol{A}}^T\boldsymbol{P}\boldsymbol{\xi}+\boldsymbol{\xi}^T\boldsymbol{P}\widetilde{\boldsymbol{A}}\boldsymbol{\xi}\right\}$$

$$+\frac{1}{|x|^{\frac{1}{2}}}\left\{\left[E-\hat{G}\mathrm{sgn}(x)\right]\boldsymbol{B}^T\boldsymbol{P}\boldsymbol{\xi}+\boldsymbol{\xi}^T\boldsymbol{P}\boldsymbol{B}\left[E-\hat{G}\mathrm{sgn}(x)\right]\right\} \tag{7-16}$$

其中，

$$\frac{1}{|x|^{\frac{1}{2}}}\left\{\boldsymbol{\xi}^T\widetilde{\boldsymbol{A}}^T\boldsymbol{P}\boldsymbol{\xi}+\boldsymbol{\xi}^T\boldsymbol{P}\widetilde{\boldsymbol{A}}\boldsymbol{\xi}\right\}$$

$$= \frac{1}{|x|^{\frac{1}{2}}}\boldsymbol{\xi}^T\left(\widetilde{\boldsymbol{A}}^T\boldsymbol{P}+\boldsymbol{P}\widetilde{\boldsymbol{A}}\right)\boldsymbol{\xi}$$

$$= \frac{1}{|x|^{\frac{1}{2}}}\begin{bmatrix}\operatorname{sgn}(x)|x|^{\frac{1}{2}} & v\end{bmatrix}\left(\begin{bmatrix}-\frac{\tilde{\lambda}}{2} & -\tilde{\alpha}\\ 0 & 0\end{bmatrix}\begin{bmatrix}a & c\\ c & b\end{bmatrix}+\begin{bmatrix}a & c\\ c & b\end{bmatrix}\begin{bmatrix}-\frac{\tilde{\lambda}}{2} & 0\\ -\tilde{\alpha} & 0\end{bmatrix}\right)\begin{bmatrix}\operatorname{sgn}(x)|x|^{\frac{1}{2}}\\ v\end{bmatrix}$$

$$= \frac{1}{|x|^{\frac{1}{2}}}\begin{bmatrix}\operatorname{sgn}(x)|x|^{\frac{1}{2}} & v\end{bmatrix}\begin{bmatrix}-\tilde{\lambda}a-2\tilde{\alpha}c & -\frac{\tilde{\lambda}}{2}c-\tilde{\alpha}b\\ -\frac{\tilde{\lambda}}{2}c-\tilde{\alpha}b & 0\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\operatorname{sgn}(x)|x|^{\frac{1}{2}}\\ v\end{bmatrix}$$

$$= \frac{1}{|x|^{\frac{1}{2}}}\left[-\tilde{\lambda}a\operatorname{sgn}(x)|x|^{\frac{1}{2}}-2\tilde{\alpha}c\operatorname{sgn}(x)|x|^{\frac{1}{2}}-\frac{\tilde{\lambda}}{2}cv-\tilde{\alpha}bv \quad -(\frac{\tilde{\lambda}}{2}c+\tilde{\alpha}b)\operatorname{sgn}(x)|x|^{\frac{1}{2}}\right]\times$$

$$\begin{bmatrix}\operatorname{sgn}(x)|x|^{\frac{1}{2}}\\ v\end{bmatrix}$$

$$= \frac{1}{|x|^{\frac{1}{2}}}\left[-\tilde{\lambda}a|x|-2\tilde{\alpha}c|x|-2(\frac{\tilde{\lambda}}{2}c+\tilde{\alpha}b)\operatorname{sgn}(x)|x|^{\frac{1}{2}}v\right]$$

$$= -\tilde{\lambda}a|x|^{\frac{1}{2}}-2\tilde{\alpha}c|x|^{\frac{1}{2}}-\ 2\left(\frac{\tilde{\lambda}}{2}c+\tilde{\alpha}b\right)\operatorname{sgn}(x)v$$

$$= -\tilde{\lambda}\left[a|x|^{\frac{1}{2}}+c\operatorname{sgn}(x)v\right]-2\tilde{\alpha}[c|x|^{\frac{1}{2}}+b\operatorname{sgn}(x)v] \tag{7-17}$$

其中，

$$\frac{1}{|x|^{\frac{1}{2}}}\left\{\left[E-\hat{G}\operatorname{sgn}(x)\right]\boldsymbol{B}^T\boldsymbol{P}\boldsymbol{\xi}+\boldsymbol{\xi}^T\boldsymbol{P}\boldsymbol{B}\left[E-\hat{G}\operatorname{sgn}(x)\right]\right\}$$

$$= \frac{1}{|x|^{\frac{1}{2}}}\left\{\left[E-\hat{G}\operatorname{sgn}(x)\right][1\ \ 0]\begin{bmatrix}a & c\\ c & b\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\operatorname{sgn}(x)|x|^{\frac{1}{2}}\\ v\end{bmatrix}\right\}$$

$$+\frac{1}{|x|^{\frac{1}{2}}}\left\{\begin{bmatrix}\operatorname{sgn}(x)|x|^{\frac{1}{2}} & v\end{bmatrix}\begin{bmatrix}a & c\\ c & b\end{bmatrix}\begin{bmatrix}1\\ 0\end{bmatrix}\left[E-\hat{G}\operatorname{sgn}(x)\right]\right\}$$

$$= \frac{2}{|x|^{\frac{1}{2}}}\left\{\left[E-\hat{G}\operatorname{sgn}(x)\right]a\operatorname{sgn}(x)|x|^{\frac{1}{2}}+\left[E-\hat{G}\operatorname{sgn}(x)\right]cv\right\}$$

$$= 2a\left[E-\hat{G}\operatorname{sgn}(x)\right]+\frac{2cv}{|x|^{\frac{1}{2}}}\left[E-\hat{G}\operatorname{sgn}(x)\right]$$

$$= 2a\left[\operatorname{Esgn}(x)-\widehat{\mathrm{G}}\right]+\frac{2c|v|\operatorname{sgn}(xv)}{|x|^{\frac{1}{2}}}\left[\operatorname{Esgn}(x)-\widehat{\mathrm{G}}\right]$$

$$\leq 2a\widetilde{\mathrm{G}}+\frac{2|c||v|}{|x|^{\frac{1}{2}}}\widetilde{\mathrm{G}} \tag{7-18}$$

那么

$$\dot{V}_1=\frac{1}{|x|^{\frac{1}{2}}}\{\boldsymbol{\xi}^T\boldsymbol{A}^T\boldsymbol{P}\boldsymbol{\xi}+\boldsymbol{\xi}^T\boldsymbol{P}\boldsymbol{A}\boldsymbol{\xi}\}+\tilde{\lambda}a|x|^{\frac{1}{2}}+2\tilde{\alpha}b\operatorname{sgn}(x)v+2a\tilde{G} \tag{7-19}$$

取整体的 Lyapunov 函数

$$V_2=V_0+\frac{1}{2k_1}\tilde{\lambda}^2+\frac{1}{2k_2}\tilde{\alpha}^2+\frac{1}{2k_3}\tilde{G}^2 \tag{7-20}$$

对式 (7-20) 求导：

$$\dot{V}_2 = \dot{V}_0 + \frac{1}{k_1}\tilde{\lambda}\dot{\tilde{\lambda}} + \frac{1}{k_2}\tilde{\alpha}\dot{\tilde{\alpha}} + \frac{1}{k_3}\tilde{G}\dot{\tilde{G}} = \dot{V}_0 - \frac{1}{k_1}\tilde{\lambda}\dot{\hat{\lambda}} - \frac{1}{k_2}\tilde{\alpha}\dot{\hat{\alpha}} - \frac{1}{k_3}\tilde{G}\dot{\hat{G}}$$

$$\leq \frac{1}{|x|^{\frac{1}{2}}}\{\boldsymbol{\xi}^T\boldsymbol{A}^T\boldsymbol{P}\boldsymbol{\xi} + \boldsymbol{\xi}^T\boldsymbol{P}\boldsymbol{A}\boldsymbol{\xi}\} + \tilde{\lambda}\left[a|x|^{\frac{1}{2}} + c\mathrm{sgn}(x)v\right]$$

$$+2\tilde{\alpha}\left[c|x|^{\frac{1}{2}} + b\mathrm{sgn}(x)v\right] + 2a\widetilde{G} + \frac{2cv}{|x|^{\frac{1}{2}}}\widetilde{G} - \frac{1}{k_1}\tilde{\lambda}\dot{\hat{\lambda}} - \frac{1}{k_2}\tilde{\alpha}\dot{\hat{\alpha}} - \frac{1}{k_3}\tilde{G}\dot{\hat{G}}$$

$$= -rV_0^{\frac{1}{2}}(\boldsymbol{\xi}) - \frac{\omega_1}{\sqrt{2k_1}}|\tilde{\lambda}| - \frac{\omega_2}{\sqrt{2k_2}}|\tilde{\alpha}| - \frac{\omega_3}{\sqrt{2k_3}}|\tilde{G}| + \frac{\omega_1}{\sqrt{2k_1}}|\tilde{\lambda}| + \frac{\omega_2}{\sqrt{2k_2}}|\tilde{\alpha}| + \frac{\omega_3}{\sqrt{2k_3}}|\tilde{G}|$$

$$+\tilde{\lambda}\left[a|x|^{\frac{1}{2}} + c\mathrm{sgn}(x)v\right] + 2\tilde{\alpha}\left[c|x|^{\frac{1}{2}} + b\mathrm{sgn}(x)v\right] + 2a\widetilde{G} + \frac{2|cv|}{|x|^{\frac{1}{2}}}\widetilde{G}$$

$$-\frac{1}{k_1}\tilde{\lambda}\dot{\hat{\lambda}} - \frac{1}{k_2}\tilde{\alpha}\dot{\hat{\alpha}} - \frac{1}{k_3}\tilde{G}\dot{\hat{G}}$$

$$= -rV_0^{\frac{1}{2}}(\boldsymbol{\xi}) - \frac{\omega_1}{\sqrt{2k_1}}|\tilde{\lambda}| - \frac{\omega_2}{\sqrt{2k_2}}|\tilde{\alpha}| - \frac{\omega_3}{\sqrt{2k_3}}|\tilde{G}| + \frac{\omega_1}{\sqrt{2k_1}}|\tilde{\lambda}| + \frac{\omega_2}{\sqrt{2k_2}}|\tilde{\alpha}| + \frac{\omega_3}{\sqrt{2k_3}}|\tilde{G}|$$

$$+|\tilde{\lambda}|\left[a|x|^{\frac{1}{2}} + c\mathrm{sgn}(x)v\right] + 2|\tilde{\alpha}|\left[c|x|^{\frac{1}{2}} + b\mathrm{sgn}(x)v\right] + 2a|\widetilde{G}|$$

$$+\frac{2|cv|}{|x|^{\frac{1}{2}}}|\widetilde{G}| - \frac{1}{k_1}\tilde{\lambda}\dot{\hat{\lambda}} - \frac{1}{k_2}\tilde{\alpha}\dot{\hat{\alpha}} - \frac{1}{k_3}\tilde{G}\dot{\hat{G}}$$

$$= -rV_0^{\frac{1}{2}}(\boldsymbol{\xi}) - \frac{\omega_1}{\sqrt{2k_1}}|\tilde{\lambda}| - \frac{\omega_2}{\sqrt{2k_2}}|\tilde{\alpha}| - \frac{\omega_3}{\sqrt{2k_3}}|\tilde{G}| + |\tilde{\lambda}|\left[\frac{\omega_1}{\sqrt{2k_1}} + a|x|^{\frac{1}{2}} + c\mathrm{sgn}(x)v - \frac{1}{k_1}\dot{\hat{\lambda}}\right]$$

$$+|\tilde{\alpha}|\left[\frac{\omega_2}{\sqrt{2k_2}} + c|x|^{\frac{1}{2}} + 2b\mathrm{sgn}(x)v - \frac{1}{k_2}\dot{\hat{\alpha}}\right] + |\tilde{G}|(\frac{\omega_3}{\sqrt{2k_3}} + 2a + \frac{2|cv|}{|x|^{\frac{1}{2}}} - \frac{1}{k_3}\dot{\hat{G}}) \tag{7-21}$$

其中 r 与式 (7-13) 中相同，当

$\frac{\omega_1}{\sqrt{2k_1}} + a|x|^{\frac{1}{2}} + c\mathrm{sgn}(x)v - \frac{1}{k_1}\dot{\hat{\lambda}} = 0$，$\frac{\omega_2}{\sqrt{2k_2}} + 2b\mathrm{sgn}(x)v + c|x|^{\frac{1}{2}} - \frac{1}{k_2}\dot{\hat{\alpha}} = 0$，$\frac{\omega_3}{\sqrt{2k_3}} + 2a + \frac{2|cv|}{|x|^{\frac{1}{2}}} - \frac{1}{k_3}\dot{\hat{G}} = 0$。

时，得出自适应律：

$$\begin{cases} \dot{\hat{\lambda}} = k_1\left[\frac{\omega_1}{\sqrt{2k_1}} + a|x|^{\frac{1}{2}} + c\mathrm{sgn}(x)v\right] \\ \dot{\hat{\alpha}} = k_2\left[\frac{\omega_2}{\sqrt{2k_2}} + 2b\mathrm{sgn}(x)v + c|x|^{\frac{1}{2}}\right] \\ \dot{\hat{G}} = k_3(\frac{\omega_3}{\sqrt{2k_3}} + 2a + \frac{2|cv|}{|x|^{\frac{1}{2}}}) \end{cases} \tag{7-22}$$

观察以上几个自适应律我们可以看出，方程右侧均为正，随着时间的增长，自适应律会增加，太大的参数会为系统带来不稳定的后果，自适应律就变得没有意义了。这里采用饱和函数 $\mathrm{sat}(|x\epsilon|)$，使得自适应律与 (7-22) 是相同的，其中 ϵ 为比 1 小的正常数。当系统状态远离原点时，自适应律保证系统快速收敛至原点，当状态接近原点时，停止自适应参数的增长，保证了有限时间稳定的性质，并且避免了过大的参数造成的系统不稳定情况。

从而：

$$\dot{V}_2 \le -rV_0^{\frac{1}{2}}(\xi) - \frac{\omega_1}{\sqrt{2k_1}}\left|\tilde{\lambda}\right| - \frac{\omega_2}{\sqrt{2k_2}}|\tilde{\alpha}| - \frac{\omega_3}{\sqrt{2k_3}}\left|\tilde{G}\right| \tag{7-23}$$

可以写成：

$$\dot{V}_2 \le -\min(r,\omega_1,\omega_2,\omega_3)V^{\frac{1}{2}} \tag{7-24}$$

由证明结果可知添加了补偿控制器和自适应参数控制器的情况下，系统仍是有限时间稳定的。

收敛时间：

$$t = \frac{2}{\min(r,\omega_1,\omega_2,\omega_3)}V^{\frac{1}{2}}(0) \tag{7-25}$$

因此可以根据自适应律参数的选择来调节收敛时间。

7.4.2 改进的高阶滑模螺旋算法

7.5 控制器设计

7.5.1 并网运行控制

考虑公式(7-2)，引入逆系统理论，将公式 7-2 写作：

$$\dot{\boldsymbol{e}}_i = -\frac{\boldsymbol{R}_{\mathrm{g}}\boldsymbol{e}_i}{\boldsymbol{L}_{\mathrm{g}}} + \frac{\boldsymbol{k}_{\mathrm{PWM}}\boldsymbol{u}_{\mathrm{con2}}}{\boldsymbol{L}_{\mathrm{g}}} - \frac{\boldsymbol{R}_{\mathrm{g}}\boldsymbol{i}_{\mathrm{ref}}}{\boldsymbol{L}_{\mathrm{g}}} - \frac{\boldsymbol{u}_0}{\boldsymbol{L}_{\mathrm{g}}} - \frac{\boldsymbol{u}_{\mathrm{m}}}{\boldsymbol{L}_{\mathrm{g}}} - \dot{\boldsymbol{i}}_{\mathrm{ref}} \tag{7-26}$$

控制器为：

$$\boldsymbol{u}_{\mathrm{con2}} = \frac{1}{\boldsymbol{k}_{\mathrm{PWM}}}(\boldsymbol{L}_{\mathrm{g}}\boldsymbol{u}_{\boldsymbol{1}} + \boldsymbol{R}_{\mathrm{g}}\boldsymbol{e}_i + \boldsymbol{R}_{\mathrm{g}}\boldsymbol{i}_{\mathrm{ref}} + \boldsymbol{u}_0 + \boldsymbol{u}_{\mathrm{m}} + \boldsymbol{L}_{\mathrm{g}}\dot{\boldsymbol{i}}_{\mathrm{ref}}) \tag{7-27}$$

此时$\boldsymbol{u}_{\boldsymbol{1}} = \mathrm{diag}(u_{\mathrm{a}}, u_{\mathrm{b}}, u_{\mathrm{c}})$

7.5.2 孤岛运行控制

$$\dot{\boldsymbol{X}}_k = \boldsymbol{A}_k\boldsymbol{X}_k + \boldsymbol{B}_k\boldsymbol{U}_k + \boldsymbol{D}_k\boldsymbol{I}_{0k} + \boldsymbol{F}_k\boldsymbol{I}_{\mathrm{m}k} \tag{7-28}$$

控制器为：

$$\boldsymbol{U}_k = \frac{\boldsymbol{1}}{\boldsymbol{B}_k}(\boldsymbol{u}_{\boldsymbol{2}} - \boldsymbol{A}_k\boldsymbol{X}_k - \boldsymbol{D}_k\boldsymbol{I}_{0k} - \boldsymbol{F}_k\boldsymbol{I}_{\mathrm{m}k}) \tag{7-29}$$

孤岛运行状态模型相对阶为 2，此时采用改进的高阶滑模螺旋算法。

7.6 仿真分析

为验证所改进的高阶滑模控制方法对微电网稳定控制的鲁棒性与有效性，对其进行仿真

验证，仿真中，取大电网电压 380V 线电压，频率 50Hz，直流侧电压 800V，输出滤波电感 $L_{\mathrm{a}}=L_{\mathrm{b}}=L_{\mathrm{c}}=5\mathrm{mH}$， ，输出滤波电容$C_{\mathrm{a}}=C_{\mathrm{b}}=C_{\mathrm{c}}=470\mu\mathrm{F}$，PWM 开关频率$k_{\mathrm{PWM}}=10\mathrm{kHz}$。

7.6.1 并网运行

仿真中不考虑稳定控制器吸收与释放无功功率的情况，即无功功率参考值恒为 0Var。仿真过程如下：0-1s 为微电网启动并网阶段，暂不输出功率，在 t=1s 时，给直流侧蓄电池充电，在 t=2s 时，有功功率指令变为 3kW，微电网控制器释放有功功率。

按照表 7-1 的功率参考值对稳定控制器的恒功率控制进行设置。

表 7-1 功率参考值

时间	参考值	
	有功功率	无功功率
0-1s	0kW	0kvar
1-2s	-5kW	0kvar
2-3s	3kW	0kvar

采用改进的 STA 算法的微点网稳定控制器，其实际并网功率跟踪波形如图所示

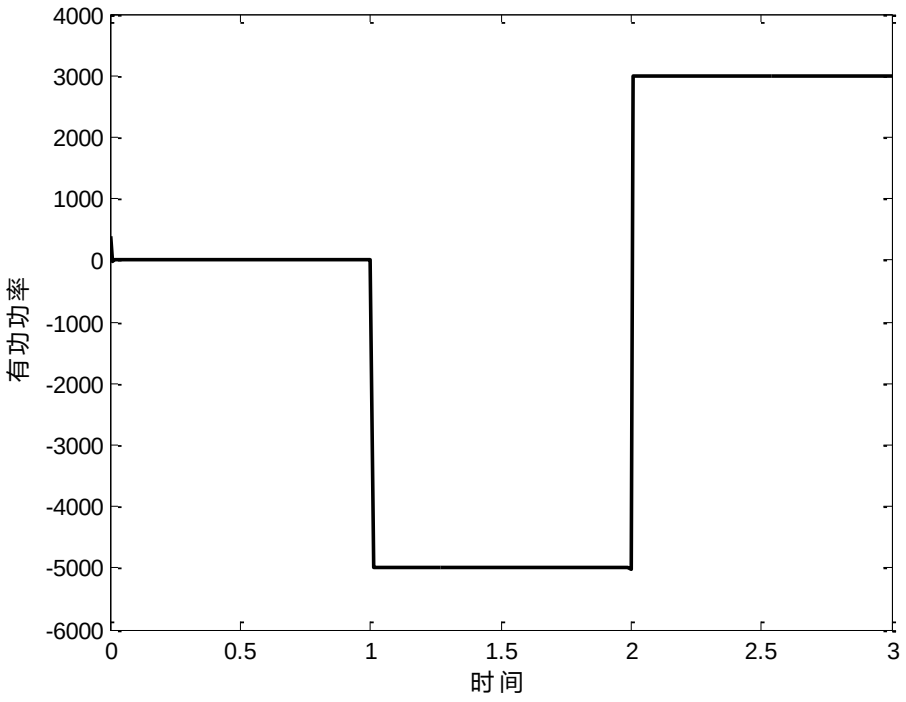

图 7-2 有功功率波形

由有功功率波形图中可以看出，并网有功功率在 0-1s 稳定在 0kW，在 1s 时刻快速由

0kW 跳变为-5kW，在 1-2s 稳定在-5kW，稳定控制器吸收有功功率，蓄电池充电；在 2s 时刻快速由-5 kW 变为 3kW，在 2-3s 稳定在 3kW，稳定控制器输出有功功率，蓄电池放电。由以上分析可得在有功功率指令变化时，在自适应滑模稳定控制器的并网有功功率能够准确有效的跟踪功率参考值。

自适应高阶滑模控制的优越性就在于它的自适应功能，也就是说当实际电路参数与设计控制系统时存在偏差时，自适应算法会自动调整控制律中的控制参数，亦保持控制的有效性。为验证所改进方法的优越性，针对额定参数设计下的控制式，在 LC 参数摄动的情况下，将改进的高阶滑模 STA 算法与普通 STA 算法在相同条件下的仿真结果进行对比分析。

仿真中不考虑稳定控制器吸收与释放无功功率的情况，即无功功率参考值恒为 0Var。仿真过程如下：在 0-2s，有功功率参考值为 5kW，在 2-4s，有功功率参考值为 0 kW，在 4-6s，有功功率参考值为-5kW；在 6-10s，有功功率参考值为 3 kW。

按照表 7-2 的功率参考值对稳定控制器的恒功率控制进行设置

表 7-2 功率参考值

时间	参考值	
	有功功率	无功功率
0-2s	5kW	0kvar
2-4s	0kW	0kvar
4-6s	-5kW	0kvar
6-10s	3kW	0kvar

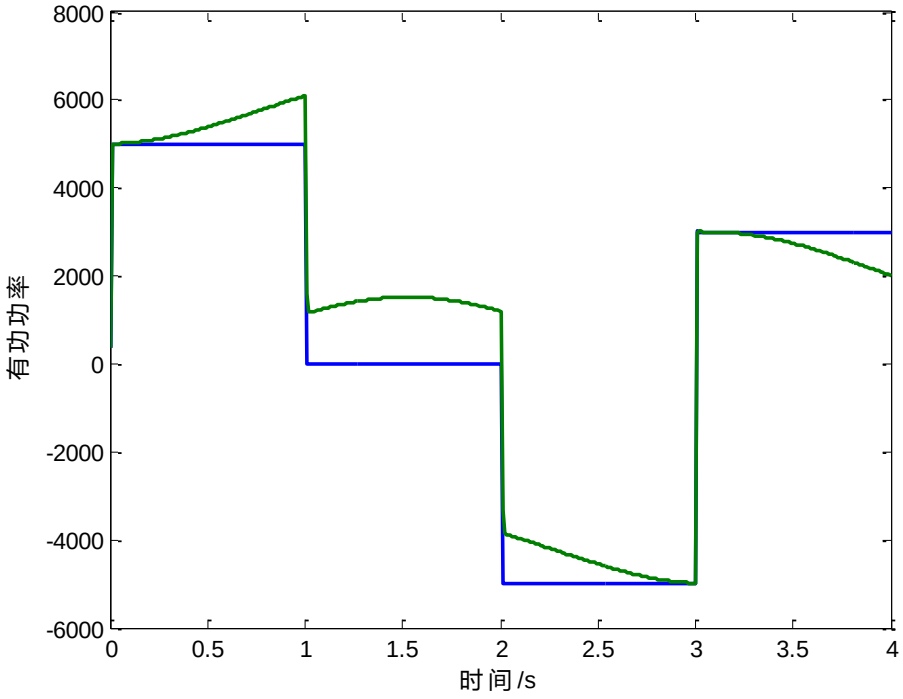

图 7-3 有功功率对比

在相同仿真环境下，系统中存在不确定性时，改进的高阶滑模控制方法可以自适应地调整，而原来的高阶滑模 STA 算法的控制效果则有些偏差。

由以上分析可得在系统存在不确定性的情况下，自适应滑模控制能够及时调整控制式中的误差，使得并网有功功率能够有效准确的跟踪功率参考值，说明将自适应和滑模控制方法相结合用于微电网稳定控制器以实现恒功率控制，有效克服了滤波参数不确定性的影响，提高了系统的鲁棒性。

7.6.2 孤岛运行

对改进的螺旋算法进行仿真。微电网稳定控制逆变器交流侧电压参考值为线电压幅值 380V，频率 50Hz。首先在系统不存在不确定性的情况下，观察输出电压误差与实际值。如图 7-4 与 7-5 所示。

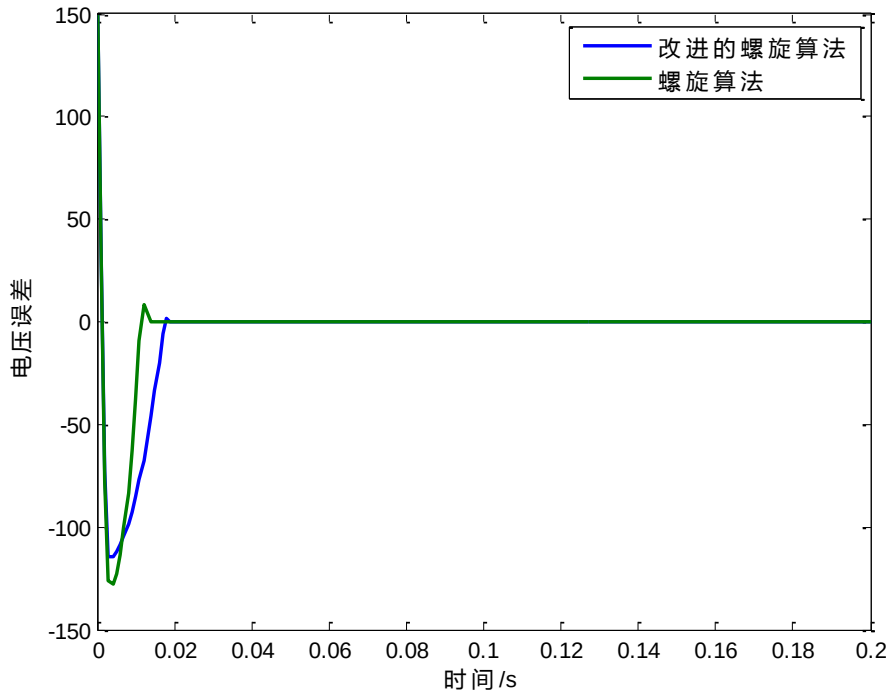

图 7-4 输出电压误差

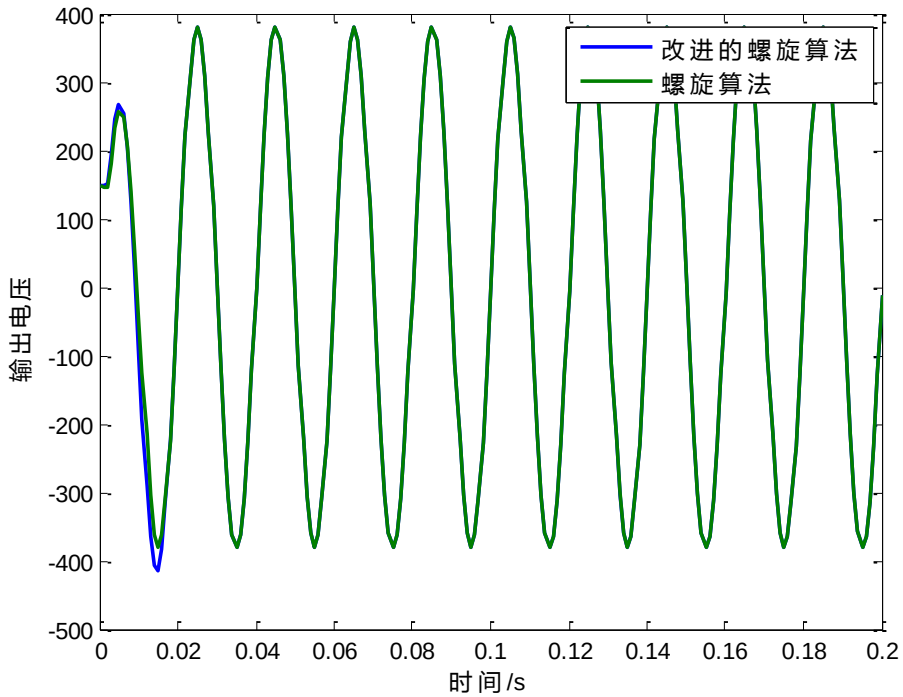

图 7-5 输出电压曲线

可看出两种方法均能实现系统稳定，对系统增加不确定性并重新进行仿真，仿真结果如图 7-6 和 7-7 所示。

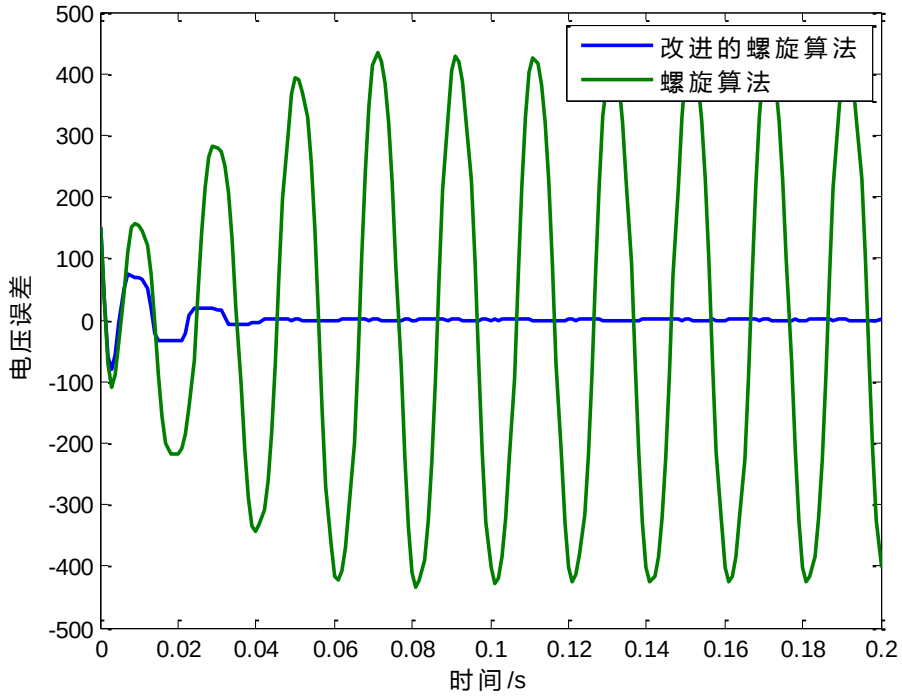

图 7-6 存在不确定情况下输出电压误差

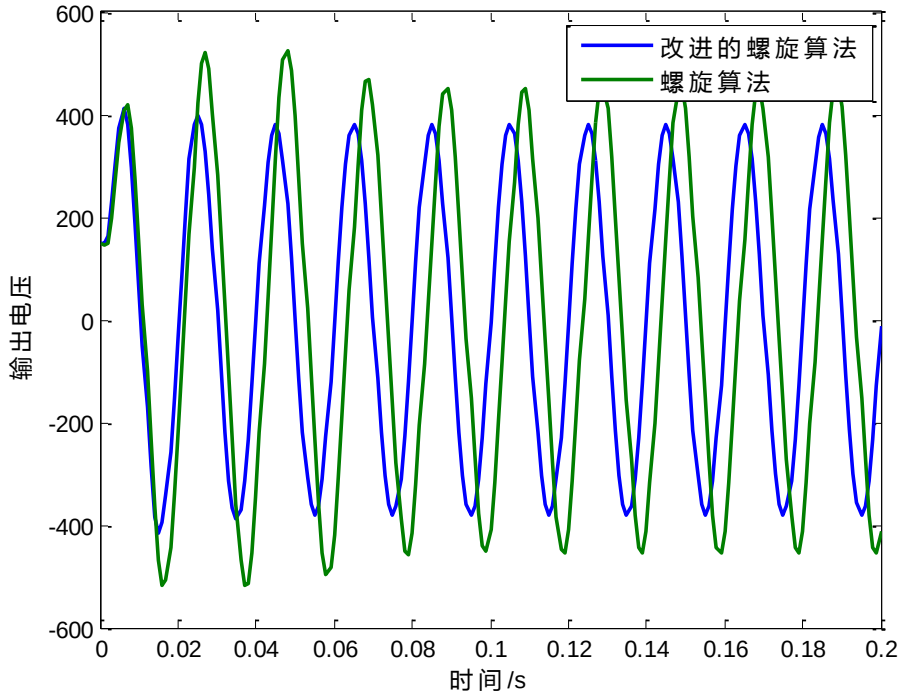

图 7-7 存在不确定性情况下输出电压

当系统扰动增加到一定程度后，原有螺旋算法下系统已经发散，而改进的算法仍能够保持系统的稳定。

7.7 小结

本章对传统的 STA，增加了补偿控制器和自适应参数控制器，一方面使得系统存在具有未知上界不确定性时，实现系统有限时间稳定性控制，另一方面方便了控制器参数的选择，避免参数过大造成的系统不稳定情况。利用类二次型 Lyapunov 函数，实现有限时间稳定性的证明，给出收敛时间与控制器参数的关系式。将改进的 STA 与上一章节改进的螺旋算法分别应用与微电网并网控制与孤岛控制中。系统不确定性不存在时，所提出改进方法与原有算法对系统性能影响无差别。当不确定性的界超出螺旋算法所能承受范围时，原有方法下系统发散。而所提出改进算法仍能保证系统的有限时间稳定。

第八章 总结与展望

智能化的电力电子装置是建设智能电网与能源互联网的重要基础，对电力电子装置的智能化研究具有重要的现实意义。已有的电力电子装置的研制重点在于其基本功能的实现与性能提高，很少考虑其智能化和对上层支撑。智能电网与能源互联网系统大环境对电力电子装置的智能化提出了高要求，对这一问题的研究具有重要的现实意义。而电力电子装置本身一般已经有相应的装置级控制系统、上位机监控系统甚至互联网数据接入系统，这些都为电力电子装置的智能化研究提供了基础。未来电力电子智能化研究可以考虑以下方向：

（1）大多智能化的技术或手段，已在变电站或电力系统中得以实现，对于电力电子装置智能化的是一个很好的借鉴；智能化技术的深度使用，必须要有相应的管理制度与评估标准；智能监控系统应根据装置特性，多考虑分层分布式的体系结构；对智能装置的能量流与信息流分别进行分析，以保证装置稳定与运行优化；应用最新的大数据存储、分析和深度学习方法，结合电力电子装置的特点，有助于从数据分析层面解决其所面临的问题，从海量数据中提炼更多有价值的信息，但在实时性、数据一致性和安全性等方面仍面临挑战。

（2）已有的电力电子装置侧重于对其拓扑结构的研究，对其性能的控制则多数还停留在理论阶段，已在实际装置中应用的控制方法仍是以传统方法居多，研究先进的控制算法，有利于充分发挥装置的性能，在保证装置安全稳定的前提下，提高电能质量和经济性能。电力电子装置是庞大的信息数据系统，具有很强的非线性与不确定性，考虑其鲁棒性控制与多种运行方式如何并存与协调是关键技术问题。

（3）已有的故障诊断与状态评估方法，仅限于电力电子装置中某一单一设备如变压器、断路器等，没有考虑各器件之间的联系，缺乏所有设备系统地评估与诊断方法，电力电子装置智能化研究中可以考虑健全整个装置的故障诊断与状态评估体系。对于超大容量、高压的电力电子装置来说，因其组成复杂，状态评估时面临诸多困难和挑战，不仅要考虑装置性能变化，还要考虑到运行环境的变化，每个装置构成特点迥异，评价标准无法统一，需要监测的信息量也非常庞大，正确、有效地评估其安全状态是状态检修成功的关键，对系统运行的安全性与稳定性起着至关重要的作用。同时评估指标的选取应遵守状态评估科学性、全面性等原则，可考虑对装置进行分级评估，避免资源浪费。

（4）发展网络化智能应用于智能电网和能源互联网，如网络化的电能质量治理，是电能

质量治理技术中电力电子装置智能化的重要发展方向。首先要建立完善的电能质量评估方法与等级划分体系，并基于供用电接口的经济性分析，分别建立内部技术等级评估体系与用户经济性评估体系，建立与健全相关政策、法规，实现智能电网与能源互联网的“优质经济”运行。

（5）通过物联网技术，可实现电力电子装置信息安全共享，提高预测预警水平，尤其是在未来能源互联网延伸到需求侧，实现源网荷协同等场景。其中，电力电子装置信息模型、网络架构、感知体系、通讯模型与接口规范、网络与信息安全、设备间的信息共享与交互策略等问题都是需要深入研究。

针对电力电子装置智能监控技术展开了研究，提出了一种电力电子装置监控系统结构框架，通过对有效值计算方法的本质分析，设计了全新的算法完成原始信号到有效值的直接映射，避免了累加求和以及求平方根的计算。该算法可以通过软件实现降低控制器的计算压力，也可以通过 FPGA 硬件实现将计算压力完全转移到 DSP 之外。提出一种多台 STATCOM 独立运行的基于互联网通信系统的无功补偿方法，能够实现各 STATCOM 设备协调输出，大大减少资源浪费。并且当某一台 STATCOM 发生故障时，可通过通信协调使得其它 STATCOM 发出无功补偿，保证电网安全。

综合考虑了高压、大容量 STATCOM 的状态评估问题，建立了 STATCOM 两级多模块状态评估模型。首先构建了 STATCOM 系统的指标体系，将指标体系按变压器组、开关组、功率模块等分为 5 个模块，确定了每一模块的评估指标。其次建立了 STATCOM 两级状态评估模型，一级评估模型选用对 STATCOM 各设备状态最重要的指标，同时也是容易取得数据的指标。为进一步保证评估的正确性，二级评估模型综合考虑了环境等因素的影响。最后给出了两级评估模型的评估流程。

为提高静止同步补偿器(STATCOM)控制系统动态性能和鲁棒性，提出一种基于高阶滑模控制的 STATCOM 有限时间鲁棒控制方法。该方法对无功补偿电流与直流侧电容电压分别采用超螺旋与螺旋算法进行控制器设计，这两种控制方法不仅在有限时间内，快速稳定无功补偿电流与直流侧电压，还对系统不确定性具有一定的鲁棒性。仿真结果验证了所提出方法的有效性，通过与传统滑模控制和积分滑模控制方法的对比，展现出高阶滑模控制方法在对抗不确定性方面优势更加明显。

为克服全桥逆变器在具有未知上界不确定性存在情况下对控制性能的影响，提出一种改进型高阶滑模螺旋算法控制策略。将自适应算法与螺旋算法相结合。通过对螺旋算法的控制器参数设计自适应参数控制器，不但实现了参数根据系统状态的自动调节，而且同时实现了对具有未知上界不确定性的完全补偿。系统不确定性不存在时，所提出改进方法与原有螺旋算法对系

统性能影响无差别。当不确定性的界超出螺旋算法所能承受范围时，原有方法下系统发散。而所提出改进算法仍能保证系统的有限时间稳定。

对传统的 STA，增加了补偿控制器和自适应参数控制器，一方面使得系统存在具有未知上界不确定性时，实现系统有限时间稳定性控制，另一方面方便了控制器参数的选择，避免参数过大造成的系统不稳定情况。利用类二次型 Lyapunov 函数，实现有限时间稳定性的证明，给出收敛时间与控制器参数的关系式。将改进的 STA 与上一章节改进的螺旋算法分别应用与微电网并网控制与孤岛控制中。系统不确定性不存在时，所提出改进方法与原有算法对系统性能影响无差别。当不确定性的界超出螺旋算法所能承受范围时，原有方法下系统发散。而所提出改进算法仍能保证系统的有限时间稳定。

参考文献

[1]张文亮，汤广福，查鲲鹏，等. 先进电力电子技术在智能电网中的应用[J]. 中国电机工程学报，2010，30(4)：1-7.

[2]金立军，安世超，廖黎明，等. 国内外无功补偿研发现状与发展趋势[J]. 高压电器，2008，44(5)：463-465.

[3]周建丰，顾亚琴，韦寿祺. SVC 与 STATCOM 的综合比较分析[J]. 电力自动化设备，2007，27(12)：57-60.

[4]张健，冀瑞芳，李国庆.TCSC 优化配置提高可用输电能力的研究[J].电力系统保护与控制，2012，40(1)：23-28.

[5]王建, 吴捷. 统一潮流控制器的建模与控制研究综述[J]. 电力自动化设备，2000，20(6)：41-45.

[6]赵国梁，吴涛. HVDC 技术的发展应用情况综述[J]. 华北电力技术，2006，8：28-34.

[7]FLOURENTZOU N, AGELIDIS V G, DEMETRIADES G D. VSC based HVDC power transmission systems: an overview[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2009, 24(3): 592-602.

[8]丁冠军，汤广福，丁明，等. 新型多电平电压源换流器模块的拓扑机制与调制策略[J].中国电机工程学报，2009，29(36)：1-8.

[9]郑晓冬，郎能灵，杨光亮，等. 特高压直流输电系统的建模与仿真[J]. 电力自动化设备，2012，32：10-15.

[10]杨潮，韩英铎，黄瀚，等. 动态电压调节器串联补偿电压研究[J].电力自动化设备，2001，21(5)：1-8.

[11]侯桂兵，涂春鸣，罗安，等. 微电网中 APF 接入位置与容量优化配置方案[J]. 电力自动化设备，2012，32(5)：29-34.

[12]冯兴田，张丽霞，康忠健. 基于超级电容器储能的 UPQC 工作条件及控制策略[J]. 电力自动化设备，2014，34(4)：84-89.

[13]吴峰，郑建勇，梅军. 多换流器式统一电能质量控制器的多目标控制策略[J]. 电力自动化设备，2012，32(10)：88-93.

[14]POKRYVAILO A, WOLF M,YANKELEVIEH Y. Investigation of operational regimes of a high-power pulsed corona soure with an all-solid stare pulser[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2007, 14(4): 846-857.

[15]曹军威，杨明博，张德华，等. 能源互联网——信息与能源的基础设施一体化[J]. 南方电网技术，2014，8(4)：1-10.

[16]曹军威，孟坤，王继业，等. 能源互联网与能源路由器[J].中国科学，2014，44(6)：714-727.

[17]刘显茁，郑泽东，李永东. 采用电力电子变压器的多端口能源路由器电气传动[J]. 电气传动，2016，46(4)：80-83.

[18]NGUYEN P H,KLING W L,RIBEIROI P F. Smart power router: A flexible agent-based converter interface in active distribution networks [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2011,2(3) :

487-495．
[19]DENG Y, VENAYAGAMOORTHY G K, HARLEY R G. Optimal allocation of power routers in a STATCOM-installed electric grid with high penetration of wind energy [C]//Power Systems Conference(PSC)．IEEE：Clemson，2015：1-6．
[20]ZHANG Y, UMUHOZA J, LIU Y, et al. Optimized control of isolated residential power router for photovoltaic applications[C]//IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)．IEEE：Pittsburgh, Pennsylvania, USA, 2014: 53-59．
[21]修晓青，李建林，惠东. 用于电网削峰填谷的储能系统容量配置及经济性评估[J]. 电力建设，2013，34(2)：35-39.
[22]张峰，董晓明，梁军，等. 考虑目标分解及其互补平抑的风电场负荷储能容量优化[J].电力系统自动化，2015，38(7)：9-15.
[23]华明，胡海兵，邢岩，等.一种变频器并联运行的分布式控制方法[J]. 中国电机工程学报，2010，30(24)：48-53.
[24]徐甫荣.中高压变频器主电路拓扑结构的分析比较[J].电气传动自动化，2003，25(4)：5-12.
[25]司海飞，杨忠，王珺. 无线传感器网络研究现状与应用[J].机电工程，2011，28(1)：16-21.
[26]王翔. 无线通信技术发展分析[J]. 通信技术，2007，40（6）：60-62.
[27]苏斌. 智能电网时代电力信息通信技术的应用和研究[D].北京：华北电力大学，2015.
[28]王晶，徐爱亲，翁国庆，等. 动态电压恢复器控制策略研究综述[J]. 电力系统保护与控制，2010，38(1)：145-151.
[29]李春华，黄伟雄，袁志昌，等. 南方电网±200Mvar 链式 STATCOM 系统控制策略[J]. 电力系统自动化，2013，37(3)：116-121.
[30]何磊，郝晓光. 数字化变电站通信网络的性能测试技术[J]. 电力系统保护与控制，2010，(10)：75-78.
[31]张小建，吴军民. 智能变电站网络交换机信息模型及映射实现[J]. 电力系统保护与控制，2013，41(10)：134-139.
[32]付国新，戴超金. 智能变电站网络分析与故障录波一体化设计与实现[J]. 电力自动化设备，2013，33(5)：163-167.
[33] KUO K, RABBAH R. A productive programming environment for stream computing[J]. Computer Science and Artificial intelligence Laboratory,2005, 6(10): 198-201.
[34]王钦，蒋怀光，文福拴，等. 智能电网中大数据的概念、技术与挑战[J].电力建设，2016，37(12)：1-10.
[35]郭创新，高振兴，张金江，等. 基于物联网技术的输变电设备状态监测与检修资产管理[J]. 电力科学与技术学报，2010，25(4)：36-41.
[36]黄小庆，张军永，朱玉生，等. 基于物联网的输变电设备监控体系研究[J]. 电力系统保护与控制，2013，41(9)：137-141.
[37]李勋，龚庆武，乔卉. 物联网在电力系统的应用展望[J]. 电力系统保护与控制，2010，38(22)：232-236.
[38]史英. SVC 监控系统的研究及其应用[D]. 北京：华北电力大学，2010.
[39]刘洋. 大容量链式 STATCOM 监控系统的设计与应用[J]. 广西电力，2016，39(1)：49-53.
[40]鲍慧，乔立贤.基于 CAN 总线的锂电池储能监控系统设计与实现[J]. 电力系统通信，2012，33(237)：40-43.

[41]陈光，刘娟，邹丹平，等. MW 级钠硫电池储能监控系统设计与开发[J].电气应用，2015（S2）：760-764.
[42]王永强，律方成，李和明. 基于粗糙集理论和贝叶斯网络的电力变压器故障诊断方法[J]. 中国电机工程学报，2006，26(8)：137-141.
[43] MENG K, DONG Z Y, WANG D H, et al. A self-adaptive RBF neural network classifier for transformer fault analysis[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2010, 25(3): 1350-1360.
[44] FEI S W, SUN Y. Forecasting dissolved gases content in power transformer oil based on support vector machine with genetic algorithm[J].Electrical Power Systems Research, 2008, 78(3):507-514
[45]郑含博，王伟，李晓纲，等. 基于多分类最小二乘支持向量机和改进粒子群优化算法的电力变压器故障诊断方法[J]. 高电压技术，2014，40(11)：3424-3429.
[46]黄凌洁，王玮，吴振升，等. 基于模糊理论的高压断路器故障诊断模型的研究[J]. 高压电器，2008，44(3)：246-249.
[47]黄建, 胡晓光, 巩玉楠，等. 高压断路器机械故障诊断专家系统设计[J]. 电机与控制学报，2011，15(10)：43-49.
[48]QI Bensheng. Research on fault diagnosis of high-voltage circuit breaker based on the improved BP neural network[C]//2010 2nd International Conference on Information Science and Engineering(ICISE). IEEE, 2010: 1460-1463.
[49]杨凌霄，朱亚丽. 基于概率神经网络的高压断路器故障诊断[J]. 电力系统保护与控制，2015，43(10)：62-67.
[50]董伟杰，白晓民，朱宁辉，等. 电力有源滤波器故障诊断与容错控制研究[J]. 中国电机工程学报，2013，33(18)：65-73.
[51]钱德周，徐习东. 电池储能系统换流桥 IGBT 开路故障诊断方法[J]. 能源工程，2015(2)：45-50.
[52]梁永亮，李可军，牛林，等. 变压器状态评估多层次不确定模型[J]. 电力系统自动化，2013，37(22)：73-78.
[53]廖瑞金，黄飞龙，杨丽君，等. 多信息量融合的电力变压器状态评估模型[J]. 高电压技术，2010，36(6)：1455-1460.
[54]韩富春，张海龙. 高压断路器运行状态的多级模糊综合评估[J]. 电力系统保护与控制，2009，37(17)：60-64.
[55]徐青龙，曹永源，侍海军，等. 红外检测在无功补偿电容器组状态检修中的运动[J]. 电力电容器与无功补偿，2013，34(3)：39-42.
[56]唐勇，汪波，陈明，等. 高温下的 IGBT 可靠性与在线评估[J]. 电工技术学报，2014，29(6)：17-23.
[57]王彬，何光宇，梅生伟，等. 智能电网评估指标体系的构建方法[J]. 电力系统自动化，2011，35(23)：1-5.
[58]张心洁，葛少云，刘洪，等. 智能配电网综合评估体系与方法[J]. 电网技术，2014，38(1)：40-46.
[59]李明，韩学山，王勇，等. 变电站状态检修决策模型与求解[J]. 中国电机工程学报，2012，32(25)：196-203.
[60]姚建刚，肖辉耀，章建，等. 电力设备运行安全状态评估系统的方案设计[J]. 电力系统及其自动化学报，2009，21(1)：52-58.
[61]田超，沈沉，孙英云. 电力应急管理中的综合预测预警技术[J]. 清华大学学报(自然科学

版)，2009，49(4)：481-484.
[62]付超，朱凌，王慧，等.风电场并网在线预警系统研究[J].电力系统保护与控制，2011，39(17)：64-69.
[63]张慧源.电力设备载流故障预警与预测的若干关键技术研究[D]. 杭州：浙江大学，2014.
[64]沈国辉，佘东香，孙湃，等. 电力系统可视化技术研究及应用[J]. 电网技术，2009，33(17)：31-36.
[65]周媛媛，刘功能，周力行，等. 基于 DGA 的变压器故障可视化诊断[J]. 电力科学与技术学报，2010，25(3)：87-91.
[66]李宝伟，倪传坤，李宝潭，等. 新一代智能变电站继电保护故障可视化分析方案[J].电力系统自动化，2014，38(5)：73-77.
[67]赵林，王丽丽，刘艳，等.电网实时监控可视化技术研究与分析[J].电网技术，2014，38(2)：538-543.
[68]肖家锴，刘年国，吴克良，等. 电力系统运维可视化平台的研究与设计[J]. 电力信息与通信技术，2012，10(11)：69-74.
[69]秦红霞，武芳瑛，彭世宽，等. 智能电网二次设备运维新技术研讨[J]. 电力系统保护与控制，2015，43(22)：35-40.
[70]黄炜昭，皇甫学真，陈建福，等. 电网主设备运行维护策略辅助决策方法[J]. 电力系统自动化，2013，37(10)：119-124.
[71]TANI A, CAMARA A B, DAKYO B. Energy management in the decentralized generation systems based on renewable energy-ultra capacitors and battery to compensate the wind/load power fluctuations[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2015, 51(2): 1817-1825.
[72]ISE T, KITA M, TAGUCHI A. A hybrid energy storage with a smes and secondary battery[J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2005, 15(2): 1915-1918.
[73]LIU C F, ZHANG B, ZHANG H D, et al. Energy management of hybrid energy storage system (HESS) based on sliding mode control[C]//2012 7th International Power Electronics and Motion Control Conference(IPEMC). IEEE,2012: 406-410.
[74]FENG X, GOOI H B, CHEN S X. Hybrid energy storage with multimode fuzzy power allocator for PV systems[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2014, 5(2): 389-396.
[75] WANG G S, CIOBOTARU M, AGELIDIS V G. Power smoothing of large solar pv plant using hybrid energy storage[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2014, 5(3): 834-842.
[76]王虹富，曹军，邱家驹，等. 一种用于分布式发电系统的有功功率补偿模型[J]. 电力系统自动化，2009，33(8)：94-98.
[77]张野，郭力，贾宏杰，等. 基于平滑控制的混合储能系统能量管理方法[J]. 电力系统自动化，2012，36(16)：36-41.
[78]查申森，窦晓波，王李东，等. 微电网监控与能量管理装置的设计与研发[J]. 电力系统自动化，2014，38(9)：232-239.
[79]王金丽，盛万兴，宋祺鹏，等. 配电网电能质量智能监控与治理仿真[J]. 电网技术，2014，38(2)：515-519.
[80] SHI Shengyao, WANG Yingnan, JIN Peng. Study of maximum power point tracking methods for photovoltaic power generation system[C]//Chinese Automation Congress, 2013: 835-840.
[81]程军. 风光互补智能控制系统的设计与实现[D]. 合肥：中国科学技术大学，2009.
[82]赵继超，袁越，傅质馨，等. 基于 Copula 理论的风光互补发电系统可靠性评估[J]. 电力

自动化设备，2013，33(1)：124-129.
[83]王蓓蓓，李扬，高赐威. 智能电网框架下的需求侧管理展望与思考[J].电力系统自动化，2009，33(20)：17-22.
[84]张延宇，曾鹏，臧传治. 智能电网环境下家庭能源管理系统研究综述[J]. 电力系统保护与控制， 2014，42(18)：144-154.
[85]王旭，齐向东. 电动汽车智能充电桩的设计与研究[J]. 机电工程，2014，31(3)：393-396.
[86]杨金相.风光互补电动汽车充电智能控制系统[D]. 唐山：河北联合大学，2013.
[87]胡跃明. 变结构控制理论与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2003.
[88]李琳. 滑模变结构控制系统抖振抑制方法的研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2006.
[89]李鹏. 传统和高阶滑模控制研究及其应用[D]. 武汉: 国防科学技术大学, 2011.
[90]Levant A. Quasi-Continuous High-Order Sliding-Mode Controllers[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2005, 41(5): 823–830.
[91]Utkin V I. Variable Structure Systems with Sliding Modes [J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 1977, (22): 212-222.
[92]李世岩. 基于滑模变结构的感应电机伺服系统研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2012.
[93]刘金琨, 孙富春. 滑模变结构控制理论及其算法研究与进展[J]. 控制理论与应用, 2007, 24(3): 407-415.
[94]丁世宏, 李世华. 有限时间控制问题综述[J]. 控制与决策，2011，26(2)：161-169.
[95] Bhat S P, Bernstein D S. Finite-Time Stability of Continuous Autonomous Systems[J]. SIAM Journal on Control and Optimization, 2000, 38(3): 751–766.
[96]赵文恺，房鑫炎，严正. 电力系统并行计算的嵌套分块对角加边形式划分算法[J]. 中国电机工程学报，2010，30(25)：66-73.
[97]刘科研，盛万兴，李运华. 基于分布式最优潮流算法的跨区输电阻塞管理研究[J]. 中国电机工程学报，2007，27(19)：56-61.
[98]齐林海，艾明浩. 一种基于云计算的电压暂降并行计算方法[J]. 中国电机工程学报，2014，34(31)：5493-5499.
[99]方路平，张浩，项新建，等.一种电网电压信号的快速测量方法[J]. 工业控制计算机，2015，28(6)：163-167.
[100]徐昱.交流信号真有效值数字测量方法[J]. 华中科技大学学报（自然科学版），2006，34(2)：51-53.
[101]宁建行，迟长春，苏邯林，等.基于快速傅里叶变换的剩余电流真有效值算法研究[J].电气与能效管理技术，2015，17(1)：13-16 .
[102]庞吉耀. 一种获得交流信号真有效值方法[J]. 现代电子技术，2015，38(13)：53-55.
[103]许明国，曹达，周乾，等. 一款 0~2000Hz 交直流通用的真有效值变送器设计[J].电气技术，2015，2(1)：73-75.
[104]R.Tessier, W.Burleson. Reconfigurable computing for digital signal processing：A survey[J]. Journal of VLSI signal processing, 2001,28(1):1244-1245.
[105]白炳良，王灵芝. 基于 PIC 及 FPGA 的简易信号分析仪设计[J].大学物理实验，2015，

28(1)：14-18.
[106]Song L G, Jiang Y X. Fast Parallel FFT on CTaiJi: A Coarse-Grained Reconfigurable Computation Platform[C]. In Paraller and Distributed Processing and Applications, Third International Sympoisum ISPA 2005:188-195.
[107]Park J H, Dai H S. Reconfigurable hardware solution to parallel prefix computation[J]. Journal of Supercomputer, 2008, 43:43-58.
[108]Hong S J, Chin S S. Domain specific reconfigurable processing core architecture for digital filtering applications[J]. Journal of VLSL signal processing, 2005,40:239-259.
[109]Tseng P, Huang C, Chen L. Reconfigurable discrete wavelet transform processor for heterogeneous reconfigurable multimedia systems[J]. Journal of VLSI signal processing 2005,41:35-47.
[110]Nagvajura P, Nwankpa C, Johnson J. Reconfigurable hardware accelerators for power transmission system conputation[J]. HPC in power and energy systems 2013:211-228.
[111]Krichen F, Hamid B, Zalila B, et al. Development of reconfigurable distributed embedded systems with a model driven approach[J]. Concurrency and computation: practice and experience, 2015, 27: 1391-1411.
[112]Luppi P, Outbib R, Basualdo M. Nominal controller design based on decentralized integral controllability in the framework of reconfigurable fault tolerant structures[J]. Industrial and Engineering Chemistry research 2015,54:1301-1312.
[113]Jou J M, Lee Y L, Lin C Y. A novel reconfigurable computation unit for dsp applications[C]. In IEEE Computer Socitey Annual Symposium on VLSI: Emerging VLSI Technologies and Architectures, Porto Alegre. Brazil Mar, 2007.
[114]Perera D, Fun L K. Similarity computation using reconfigurable embedded hardware[C]. In Proceedings of the 2009 international conference on dependable, autonomic and secure computing,2009: 323-329.
[115]Diniz P C, Cardoso J M. Cond transformations for embedded reconfigurable computing architectures[J]. lecture Notes in Computer Science, 2011,6491:322-344.
[116]夏正龙，史丽萍，杨晓冬，等. 一种改进的电网电压不平衡环境下链式 STATCOM 控制策略[J]. 电网技术，2014，38(5)：1310-1316.
[117]舒泽亮，丁娜，郭育华，等. 基于 SVPWM 的 STATCOM 电压电流双闭环控制[J]. 电力自动化设备，2008，28(9)：27-30.
[118]衡凤平，陈传清，崔鑫，等. 基于非线性 PI 算法 STATCOM 控制系统研究[J]. 电力电子技术，2017，51(3)：51-53.
[110]丁可，王博宇，莫树猛. 基于 D-STATCOM 原理的控制策略研究[J]. 电工技术，2017 ,1：27-29.
[120]单翀皞，王奔，陈丹，等. 基于滑模控制理论的 STATCOM 无功补偿控制策略研究[J]. 电力系统保护与控制，2010，38(18)：150-154.
[121]邹超. 基于滑模变结构的 STATCOM 控制策略仿真研究[J]. 贵州电力技术，2015，11(18)：80-83.
[122]龚鸿，王渝红，李媛，等. D-STATCOM 的输入-输出反馈线性化滑模变结构控制[J]. 电力系统自动化，2016，40(5)：102-108.
[123]王丽，刘会金，王陈. 瞬时无功功率理论的研究综述[J]. 高电压技术，2006，32(2)：98-101.
[9]李鹏，郑志强. 非线性积分滑模控制方法.控制理论与应用. 2011,28(3):421-426.

[124] Niu Y G，Ho D W C，Lam J．Robust integral sliding mode control for uncertain stochastic systems with time-varying delay[J]．Automatic，2005，41(5)：873-880．
[125]杨文强，蔡旭，姜建国．矢量控制系统的积分型滑模变结构电流控制[J]．上海交通大学学报，2004，38(8)：1265-1268．
[126]郑雪生，李春文，汤洪海，等．三相 PWM 电压型逆变器的积分滑模控制[J]．电工技术学报，2007，22(12)：105-109．
[127]皇甫宜耿，王毅，赵冬冬，梁波.一种鲁棒高阶滑模 super-twisting 算法的全桥逆变器[J].西北工业大学学报.2015，3(2)：315-319.
[128]霍群海，孔力，韦统振.2 种改进的滑模并网逆变器控制策略[J].电力自动化设备，2009，29(4)：32-35.
[129]王晓刚，肖立业. Z 源逆变器直流链电压滑模控制研究[J]. 电机与控制学报，2015，19(2)：1-6.
[130]全宇，年珩. 不平衡及谐波电网下并网逆变器的谐振滑模控制技术[J]. 中国电机工程学报，2014，34(9)：1345-1352.
[131]Kochalummoottil J O. Adaptive Second Order Sliding Modes[D]. Huntsville: The School of Graduate Studies of The University of Alabama in Huntsville, 2012.
[132]Lee H, Utkin V. Chattering Suppression Methods in Sliding Mode Control Systems[J]. Annual Reviews in Control, 2007, 31: 179-188.
[133]Huang A C, Chen Y H. Adaptive Multiple-Surface Sliding Control for Nonautonomous Systems with Mismatched Uncertainties[J]. Automatica, 2004, 40(l): 1939-1945.
[134]Plestan F, Shtessel Y, Bregeault V, Poznyak A. New Methodologies for Adaptive Sliding Mode Control[J]. International Journal of Control, 2010, 83(9): 1907-1919.
[135]Fei J T. A Class of Adaptive Sliding Mode Controller with Integral Sliding Surface[C]. International Conference on Mechatronics and Automation, 2009: 1156-1161.
[136]蒲明，吴庆宪，姜长生，等. 自适应二阶动态 Terminal 滑模在近空间飞行器控制中的应用[J]. 航空动力学报， 2010，25(5)：1169-1176.
[137]Chang Y T, Cheng C C. Adaptive Sliding Mode Control for Plants with Mismatched Perturbations to Achieve Asymptotical Stability[J]. International Journal of Robust and Nonlinear Control，2006，17(9)：880-896.
[138]赵占山，张静，孙连坤，等. 有限时间收敛的滑模自适应控制器设计[J]. 山东大学学报， 2012，42(4)：74-78.
[139] Li P, Zheng Z Q. Robust Adaptive Second-Order Sliding-Mode Control with Fast Transient Performance[J]. IET Control Theory and Applications, 2012, 6(2): 305–312.
[140]赵占山，张静，孙连坤.一类非线性不确定系统高阶滑模自适应控制设计[J]. 控制与决策，2011，26(8)：1277-1280.
[141]Shtessel Y, Edwards C, Spurgeon S K, Kochalummoottil J. Adaptive Continuous Finite Reaching Time Control and Second Order Sliding Modes[C]. International Workshop on Variable Structure Systems, 2010: 5126-5131.
[142]Taleb M, Levant A, Plestan F. Pneumatic Actuator Control: Solution Based on Adaptive Twisting and Experimentation[J]. Control Engineering Practice, 2013, 21: 727-736.
[143]候波，穆安乐，董锋斌，等. 单相电压型全桥逆变器的反步滑模控制策略[J]. 电工技术学报，2015，30(20)：93-99.
[144]Taleb M, Levant A, Plestan F. Pneumatic Actuator Control: Solution Based on Adaptive

Twisting and Experimentation[J]. Control Engineering Practice, 2013, 21: 727-736.
[145]Alejandro D, Jaime A, Fridman L M. Variable Gains Super-Twisting Algorithm: a Lyapunov Based Design[C]. 2010 American Control Conference, 2010: 968-973.
[146]Gonzalez T, Jaime A. Fridman L M. Variable Gain Super-Twisting Sliding Mode Control[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2012, 57(8): 2100-2105.
[147]Shtessel Y, Edwards C, Spurgeon S K, Kochalummoottil J. Adaptive Continuous Finite Reaching Time Control and Second Order Sliding Modes[C]. International Workshop on Variable Structure Systems, 2010: 5126-5131
[148]Yan M X, Jing Y W, He Y G, Sun P. Adaptive Sliding Mode Controller for a Class of Second-order Underactuated Systems[C]. Proceeding of Control and Decision Conference, 2009: 2782-2786.
[149] Li P, Zheng Z Q. Robust Adaptive Second-Order Sliding-Mode Control with Fast Transient Performance[J]. IET Control Theory and Applications, 2012, 6(2): 305–312.
[150] Defoort M, Nollet F, Floquet T, Perruquetti W. A Third-Order Sliding-Mode Controller for a Stepper Motor[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2009, 56(9): 3337-3346.
[151]Estrada A, Lorıa A, Santiesteban R, Fridman L. Lyapunov Stability Analysis of a Twisting Based Control Algorithm for Systems with Unmatched Perturbations[C]. IEEE Conference on Decision and Control and European Control Conference, 2011: 4586-4591.
[152]Davila J, Fridman L, Levant A. Second-Order Sliding-Mode Observer for Mechanical Systems[J]. IEEE Transctions on Automatica Control, 2005, 50(11): 1785-1789.
[153]Levant A. Homogeneity Approach to Higher-Order Sliding Mode Design[J]. Automatica, 2005, 41(5): 823-830.
[154]Polyakov A, Poznyak A. Reaching Time Eestimation for "Super-Twisting" Second Order Sliding Mode Controller via Lyapunov Function Designing[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2009, 54(8): 1951-1955.
[155]Jaime A M, Marisol O. A Lyapunov Approach to Second Order Sliding Mode Controllers and Oberservers[C]. International Conference on Decision and Control, 2008: 2856-2861.

致谢

衷心感谢导师曹军威研究员和李军研究员对本人的精心指导，他们的言传身教将使我终生受益。值此报告完成之际，向两位恩师致以最诚挚的谢意。在科研上，曹老师知识渊博、治学严谨、思维敏捷，不但给予我悉心指导，还给了我充分的发展空间，锻炼了我解决问题的能力，并时常缓解我的压力。在生活中，曹老师心胸宽广、平易近人、睿智幽默，曾给予我许多帮助，这一切都使我受益匪浅。这里向曹老师致以衷心的感谢和最崇高的敬意！

感谢清华大学给予的机会，在美丽校园里的工作和生活让我见识到了中国最著名高等学府的大家风范。感谢我所有的同事们这两年给予的关怀与帮助。

值此报告撰写完成之际，深深感谢我的家人！

最后，真诚地感谢各位专家在百忙之中对我出站报告的审阅和指正。

个人简历、发表的学术论文与科研成果

个人简历

杨洁（1985-），女，汉族，山东聊城人，2003年9月-2007年6月就读于济南大学控制科学与工程学院，电气工程及其自动化专业，获工学学士学位。2007年9月-2010年6月就于济南大学控制科学与工程学院，控制理论与控制应用专业，获工学硕士学位，师从王中华教授，主要从事非线性理论控制研究。2010年9月-2015年6月于北京理工大学控制科学与工程专业攻读博士学位。师从王庆林教授，主要研究方向为非线性系统控制、滑模变结构控制。

2016年1月7日开始至今，在清华大学信息技术学院能源互联网技术研究中心任职博士后，合作导师是曹军威研究员与李军研究员，主要从事能源互联网基础理论研究和电力装置的智能控制研究。

博士后期间发表的学术论文

[1]杨洁，曹军威，袁仲达，张少杰，谢晔源，段军，李立.电力电子装置监控系统中基于PFGA的电力信号有效值大规模并行计算[J]. 中国电机工程学报，2016，36：126-131.

[2]曹军威，杨洁，袁仲达，吴扣林，方太勋，杨飞.电力电子装置智能化研究综述[J].电力建设，2017，38(5)：18-30.

[3]胡军，曹军威，张少杰，杨洁，袁仲达，电压不平衡跌落时动态电压恢复器的快速PLL策略[J].南方电网技术，2016，10(5)：87-93.

[4]MING Yangang，YANG Jie，CAO Junwei. Distributed Energy Sharing in Energy Internet through Distributed Averaging[J]. Tsinghua Science and Technology.已录用

博士后期间完成的研究成果

[1]张华赢，姚森敬，曹军威，袁仲达，杨洁，张少杰，胡俊峰. 一种电压跌落发生装置，申请号：201620020465.8。

[2]张华赢，姚森敬，曹军威，袁仲达，杨洁. 一种自适应校准采样直流偏置的FPGA及智能控制装置，申请号：2015110069686。

[3]张华赢，胡子珩，姚森敬，杨洁，曹军威，王淼. 一种基于互联网通信的多SVG系统及其通信，申请号：201510686279.8。

[4]曹军威，杨洁，袁仲达，邱金辉，杨飞，路明，李丽群，刘君，张朝龙. 静止同步补偿器的智能监控系统，申请号：2016108496057。

[5]曹军威，杨洁，袁仲达. 一种高压大容量STATCOM状态评估方法和系统，申请号：201710081700.1。
[6]曹军威，袁仲达，杨洁，张少杰. 一种DSP控制系统软件升级方法及装置，申请号：201610086159.9。
[7]曹军威，袁仲达，张少杰，杨洁. 一种用于程序死锁的保护电路，申请号：2016102110147。
[8] 曹军威，袁仲达，杨洁，张少杰. 一种远程调试系统、方法及装置，申请号：2016100745738。