基于能量路由的多微网系统稳定控制和优化研究

（申请清华大学工程硕士专业学位论文）

培 养 单 位 ： 自动化系

工 程 领 域 ： 控制工程

申 请 人 ： 李 宇 童

指 导 教 师 ： 曹 军 威 研究员

联合指导教师： 袁 仲 达 高级工程师

二〇二二年五月

基于能量路由的多微网系统稳定控制和优化研究

李宇童

Research on Stability Control and Optimization of Multi Microgrids System based on Energy Routing

Thesis Submitted to

Tsinghua University

in partial fulfillment of the requirement

for the professional degree of

Master of Engineering

by

Li Yutong

(Control Engineering)

Thesis Supervisor: Researcher Cao Junwei

Associate Supervisor: Senior Engineer Yuan Zhongda

May, 2022

学位论文公开评阅人和答辩委员会名单

公开评阅人名单

刘 XX	教授	清华大学
陈 XX	副教授	XXXX 大学
杨 XX	研究员	中国 XXXX 科学院 XXXXXXX 研究所

答辩委员会名单

主席	赵 XX	教授	清华大学
委员	刘 XX	教授	清华大学
	杨 XX	研究员	中国 XXXX 科学院 XXXXXXX 研究所
	黄 XX	教授	XXXX 大学
	周 XX	副教授	XXXX 大学
秘书	吴 XX	助理研究员	清华大学

关于学位论文使用授权的说明

本人完全了解清华大学有关保留、使用学位论文的规定，即：

清华大学拥有在著作权法规定范围内学位论文的使用权，其中包括：（1）已获学位的研究生必须按学校规定提交学位论文，学校可以采用影印、缩印或其他复制手段保存研究生上交的学位论文；（2）为教学和科研目的，学校可以将公开的学位论文作为资料在图书馆、资料室等场所供校内师生阅读，或在校园网上供校内师生浏览部分内容；（3）按照上级教育主管部门督导、抽查等要求，报送相应的学位论文。

本人保证遵守上述规定。

作者签名：_____　　导师签名：_____

日　　期：_____　　日　　期：_____

摘 要

随着边缘计算的发展以及用户任务需求的上升，边缘侧计算设备的电力消耗也在日益增长。多微网系统作为一种能够充分利用可再生能源的能源互联网典型场景，在边缘侧任务计算供能以及提高可再生能源渗透率等问题上提供了可靠的解决方案。然而，越来越多的边缘计算任务不但给多微网系统的电力供需平衡带来了新的压力，同时其具有的随机性和可能受到的外部干扰也为多微网系统的母线频率、电压稳定带来了新的挑战。因此，本文针对多微电网场景设计了基于能量路由的控制策略，通过综合考虑信息、能量层中的多种要素从而有效应对上述任务计算边缘化带来的对多微网系统能量管理的挑战。为提升建模实际性，本文采用了多种具有复杂形式的微分方程对系统进行建模，并通过应用一系列随机控制理论技术，针对频率、电压稳定控制以及性能优化等问题开展研究，在提高多微网系统的能量调控能力、稳定性和性能上取得了进展。

本文主要内容以及贡献如下：

1）将任务计算能耗视为一种可控的地理可转移负荷，提出一种新的能量路由概念，并且通过常微分方程和随机微分方程对能量路由在内的多种动态过程进行时域动态建模。本研究通过对能量路由以及发电机的合理控制，从而实现该多微网系统中各个微电网的电力供需平衡以及母线频率稳定控制。相较于现有方法进一步提高多微网的电力调节能力和控制效果。此外，本研究通过优化控制信号强度上界从而防止过度控制。

2）带有马尔可夫参数跳变的微分方程被应用于包括能量路由在内的多微网系统中各类动态过程的建模中, 从而进一步提高建模的真实性。但该建模方法增加了问题求解的难度，因此本研究以母线电压稳定控制为例，通过应用鲁棒 H_∞ 控制理论对该问题进行求解。此外，通过优化 γ 的取值进一步提高了该方法的控制效果。

3）通过随机控制理论和纳什均衡理论的综合应用，本研究针对所研究多微网系统内部的一些重要性能进行了优化：提高可再生能源的渗透率、提高就地处理的任务计算量以及防止由于过度控制导致的设备故障。并利用纳什均衡不等式解决了优化传统能源消耗等性能指标和系统抗干扰能力之间的平衡问题。

关键词：多微网系统；边缘计算；能量路由器；鲁棒 H_∞ 控制；H_2/H_∞ 混合控制

Abstract

With the development of edge computing, its power consumption is also increasing. As a power system that can make full use of renewable energy, multi-microgrids system provides a reliable solution to the problem of energy supply for edge task processing. However, more and more edge computing tasks not only bring new pressure to the power supply and demand balance of multi-microgrids system, but also bring new challenges to the stability of multi-microgrids system due to its stochastic and possible external interference. Therefore, the control strategy based on energy routing is designed to effectively meet the above challenges. In order to improve the rationality of modeling, this paper uses a variety of complex differential equations to model the system, and makes progress in improving the energy regulation ability, stability and performance of multi-microgrids system by applying a series of stochastic control theory and technology.

The main contributions of this paper are as follows:

1) Considering the energy consumption of task computing as a controllable geographically transferable load, a new concept of energy routing is proposed, and various dynamic processes including energy routing are modeled by differential equations. Through the reasonable control of energy routing and generator, this study realizes the power supply and demand balance and bus frequency stability control of each microgrid.

2)The stochastic differential equation with Markov jump is used to model the studied system, which further improves the modeling accuracy of system dynamics and stochastic. A robust control method is applied to improve the robust performance of the system. In addition, the control effect of this method is further improved by optimizing the value of γ.

3)By applying stochastic control theory and Nash game theory, this study optimizes some important performance in multi-microgrids system. The balance between performance optimization and system robustness is solved by Nash game.

Keywords: multi-microgrids system; edge computing; energy router; robust H_∞ control; H_2/H_∞ control

目 录

摘 要.....I
Abstract.....II
目 录.....III
插图和附表清单.....VI
符号和缩略语说明.....VIII
第 1 章 引言 1
1.1 研究背景和意义 1
1.2 国内外研究现状 4
1.3 本文研究内容 7
1.3.1 研究场景 7
1.3.2 基于软件定义的多微网系统典型控制架构 8
1.3.3 研究问题 10
1.4 本文主要工作和贡献 12
1.5 本文章节安排 13
第 2 章 基于能量路由的多微网母线频率偏差随机 H_∞ 控制研究 15
2.1 研究背景及贡献 15
2.2 系统构建 17
2.2.1 系统架构描述 17
2.2.2 光伏设备和用户负荷建模 18
2.2.3 微型燃气轮机建模 19
2.2.4 任务调度建模 19
2.2.5 本地任务计算建模 20
2.2.6 能量传输建模 20
2.2.7 储能电池和频率偏差建模 20
2.2.8 系统建模 21
2.3 问题提出与解决 22
2.4 数值仿真 25
2.5 本章结论 27

第 3 章 考虑马尔可夫参数跳变的多微网电压鲁棒控制研究 29
3.1 研究背景和贡献 29
3.2 系统建模 30
3.2.1 系统描述 31
3.2.2 负载和光伏建模 32
3.2.3 微型燃气轮机建模 32
3.2.4 任务计算与调度建模 33
3.2.5 功率交换建模 34
3.2.6 储能设备和电压偏差的建模 34
3.2.7 所研究的多微网系统建模 35
3.3 问题的提出与解决 36
3.3.1 针对带有马尔可夫参数跳变系统的母线电压鲁棒控制问题 37
3.3.2 优化 γ 取值 38
3.4 数值算例 39
3.5 本章总结 43

第 4 章 基于纳什均衡的多微网系统随机 H_2/H_∞ 混合控制方法 45
4.1 研究背景及贡献 45
4.2 系统建模 47
4.2.1 系统架构 47
4.2.2 微网组件功率的动态建模 47
4.2.3 能量路由器功率的动态建模 50
4.2.4 所讨论的多微网系统动态建模 50
4.2.5 随机 H_2/H_∞ 问题的描述和求解 51
4.2.6 使用纳什均衡理论求解 52
4.3 数值算例 53
4.3.1 与无控制相比较 54
4.3.2 与非纳什均衡策略相比较 55
4.3.3 不同程度因子下控制效果 56
4.4 本章结论 58

第 5 章 总结与展望 59
5.1 主要研究内容总结 59
5.2 未来研究展望 60

参考文献.....61
附录 A　补充内容.....66
致　谢.....73
声　明.....74
个人简历、在学期间完成的相关学术成果.....75
指导教师学术评语.....76
联合指导教师学术评语.....77
答辩委员会决议书.....78

插图和附表清单

图 1.1　能源互联网典型场景图 2
图 1.2　基于能量路由的多微网系统场景示意图 7
图 1.3　多微网系统构成示意图 8
图 1.4　基于软件定义的多微网系统控制架构示意图 10
图 1.5　本文研究内容说明图 13
图 2.1　基于能量路由的多微网系统架构图 17
图 2.2　时延 $\tau(t)$ 25
图 2.3　两种外部扰动 25
图 2.4　脉冲扰动下的频率偏差 26
图 2.5　连续扰动下的频率偏差 26
图 2.6　与传统方法对比图 27
图 2.7　母线频率偏差对比图 27
图 2.8　微型燃气轮机功率变化对比图 28
图 3.1　多微电网系统架构图 31
图 3.2　一种用于数值算例的典型多微网系统图 39
图 3.3　系统参数的状态转换。 40
图 3.4　无控制下的直流电压偏差 40
图 3.5　有控制下的直流电压偏差 41
图 3.6　在控制信号作用下的任务传输功率变化 41
图 3.7　在控制信号作用下的能量传输功率变化 42
图 3.8　在控制信号作用下的微型涡轮发电机功率变化 42
图 3.9　传统方法与所提出方法的比较 43
图 3.10　算例 1 和算例 3 中方法的比较.....44
图 4.1　本章所研究的多微网系统架构图 48
图 4.2　微电网 2 中的光伏和负载功率 54
图 4.3　频率偏差（本文控制策略对比无控制） 54
图 4.4　微电网的能量传输功率 55
图 4.5　微型燃气轮机发电功率（纳什均衡对比非纳什均衡） 55
图 4.6　能量路由器任务计算功率（u^* 偏离纳什均衡点） 56
图 4.7　不同程度因子下的边缘任务计算功率 56

图 4.8　不同程度因子下的微型燃气轮机的工作功率 ……57
图 4.9　不同程度因子下的频率偏差 ……57

表 2.1　仿真参数表 ……24
表 3.1　系统参数表 ……39
表 4.1　仿真参数表 ……53

符号和缩略语说明

EI	能源互联网
MG	微电网
ER	能量路由器
EC	边缘计算
MT	微型燃气轮机
BES	电池储能设备
PV	光伏发电设备
P_{ED}	任务计算消耗功率
P_L	负荷功率
P_{MT}	微型燃气轮机输出功率
P_{BES}	电池储能设备充放电功率
P_{PV}	光伏发电设备输出功率
P_{ER}	能量路由器能量传输功率
f	微电网系统的母线频率
v	微电网系统的母线电压
HZ	赫兹
pu	标幺值
ΔP_{MT}	微型燃气轮机输出功率的变化量（偏差值）
ΔP_{BES}	电池储能设备充放电功率的变化量（偏差值）
ΔP_{PV}	光伏发电设备输出功率的变化量（偏差值）
ΔS_{TS}	任务调度量的变化量（偏差值）
ΔS_{TC}	本地任务计算量的变化量（偏差值）
ΔS_{EE}	能量传输功率的变化量（偏差值）
ΔP_{BES}	电池储能设备充放电功率的变化量（偏差值）
ΔP_{PV}	光伏发电设备输出功率的变化量（偏差值）
Δf	微电网系统母线频率的变化量（偏差值）
ΔV	微电网系统母线电压的变化量（偏差值）
$\mathbb{E}$	数学期望
E	任务量与电力消耗之间的比例关系
u	总控制向量
v	总外部干扰向量

x	总系统状态向量
z	总系统输出向量
K	反馈增益

第 1 章　引言

1.1　研究背景和意义

随全球工业化、信息化程度日益加深，人们的生活水平不断提升的同时，全球能源资源的生产也过度依赖着煤炭、天然气和石油等化石能源，这会导致两大问题——传统能源的快速枯竭导致的能源短缺以及温室气体排放增加导致的全球变暖[1-2]。面对这些问题，联合国于 2016 年 11 月签署《巴黎协定》，标志着由可再生能源，如太阳能、风能、生物质能、海洋和地热等能源开始逐渐替代煤炭、石油等传统化石能源，从而形成高效可靠的能源利用制度。可再生能源有利于减少二氧化碳等温室气体排放、减少环境污染，2021 年中国政府发布的《中国应对气候变化的政策与行动》中明确指出要控制传统化石能源的利用，将用 30 多年逐步实现碳达峰和碳中和。但是可再生能源的高渗透率也会带来一系列风险和问题，比如光伏具有明显的随机性、间歇性和不可控性，这使得大量的光伏电能设备的并网会导致电网稳定性变差[3-4]。

可再生能源如光伏、风能除上述提到的不可控和随机性之外，也具有地理分散分布的特点，为实现对可再生能源高效和安全的利用，有效地将可再生能源接入至电力供需系统之中，微电网（Microgrid）这一概念被提出并得到了学术、产业界的广泛关注[5]。微电网作为一种小型电力系统，内部可以包括传统以及分布式可再生能源发电设备、储能设备等，外部可以根据是否连接大电网分为并网型和离网型微电网（又称孤岛微网），从而面对区域内部的供能需求时，具有一定的自给自足能力，可以提高本地可再生能源利用效率。在微电网这一架构下利用可再生能源满足电力需求的研究越来越受到关注[6]。

通过利用现代信息技术，智能电网（Smart Grid）一词最先被学者提出，其旨在借助海量传感器、大数据分析、智能算法等方法为电网提供一套更加稳定、安全和高效的运行模式，从而能够以更有效的方式提供电力，并对各种情况和事件做出响应[7]。广义地说，智能电网可以响应电网中任何地方发生的事件，如发电、输电、配电和用电，并采取相应的策略。目前，智能电表的传感器设备的高密度部署以及人工智能算法的发展已经为智能电网的建设提供了强大的支撑。但是，随着电力系统对于多能（电能、化学能、热能等）融合、多系统（电力系统、交通系统等）融合以及高度信息化的需求，智能电网这一概念得到了进一步的深化和发展，并形成了能源互联网[8]。

2004 年，能源互联网（Energy Internet）这一概念在《经济学人》中被首次提

出，而后由美国学者杰里米·里夫金在《第三次工业革命》一书中被再次提及后逐渐得到了广泛的关注，其借鉴互联网的思维并将能源系统和信息系统进行深度融合，实现对基于传统化石燃料的传统电力系统的终结，改善急需解决的能源危机和环境污染等问题[1]。能源互联网相较于传统电网以及智能电网的特点是其深度借鉴了信息互联网的思维，从而形成了类似于局域网-主干网的自底向上的运行模式。其中，能源互联网以微网、智能社区、分布式电力设备等作为“局域网”，传统大电网作为“主干网”，并且以“局域消纳在先，广域消纳在后”为核心原则。此外，能源互联网具有三流融合的特点，既能量流、信息流以及控制流，分别对应能源互联网典型架构的能量层、信息层和应用层[9-10]。其中，能量层包括能源互联网的基础设备，如冷热电供能设备、储能设备、可再生能源发电设备等电力基础设备以及智能仪表在内的信息技术设备，从而为整个能源互联网提供能源和数据；信息层包括数据传输在内的网络通讯以及具备综合管理能力的软件平台，为应用层和能量层之间的交互提供便捷的通道；应用层是指通过使用先进的数据处理能量、人工智能算法等解决整个能源互联网运行面对的问题和需求，包括负荷预测、能量管理等[10]。

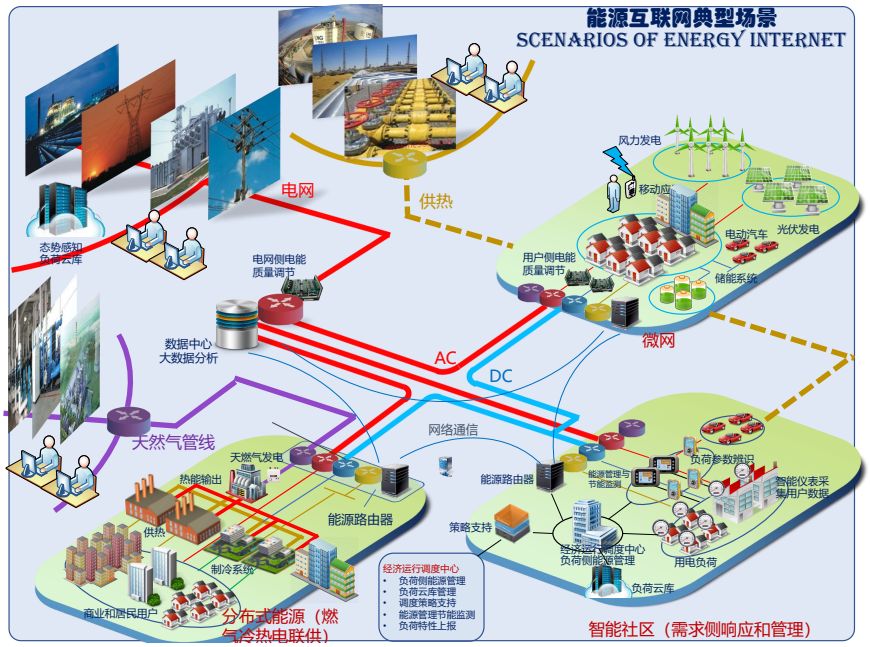


图 1.1　能源互联网典型场景图

图1.1为能源互联网的典型场景。在该示意图中，多个微电网之间通过直流、交流能量线路相连接，同时与大电网间存在能源调度。在自底向上的结构下，各个微网优先通过自身或附近发电设备满足自身内部的功率平衡，其中能源互联网的信息层在微电网内部的运行控制、微电网以及大电网间的能量调度等方面起到了至关重要的作用。为实现上述自底向上以及“局域消纳在先，广域互联在后”的

模式，借鉴互联网中的路由器概念，一种应用在能源互联网中，名为能量路由器的概念被学术界提出，并在近几年受到产业界的关注[11]。能量路由器通过能量路由协议，实现了微电网间的能量传输功能，从而维持能源互联网整体的能量稳定。此外，作为能源互联网内部信息-能量交融的核心设备，能量路由器具有一定的处理、收发收集到的微电网内部的电力相关数据的信息处理以及通讯功能，从而保证微网的稳定、高效运行[12]。

为实现能源互联网内部能量层和信息层的高度融合，先进的智能电表等传感器需要被大量部署从而获取足以支持能源互联网高效运行的数据，并且为应用层的能量管理提供信息保障[13-14]。值得注意的是，从数据处理到结果反馈都需要足够的算力和网络通讯进行支撑，根据图1.1所示，一种解决方案是在云侧架设数据中心，通过网络传输技术为应用提供算力。但是由于网络带宽的限制、网络传输的延迟等因素，仅仅靠云端数据中心并不能满足所有的能量互联网的需求。因此，将一定数据处理和通信能量下放至更靠近微电网或者微电网内部的网络边缘侧有助于解决上述问题。能量路由器作为信息-能量层交融的核心装置[12]，在信息层原本具备一些数据处理和通信能力，因此本文进一步提出一种新型能量路由器的概念，兼并边缘节点的功能，从而满足微电网对实时数据处理和通讯的需求以及附近用户任务计算需求。此概念将在后文详细说明。

多微网系统是一类典型的能源互联网场景，其由一定区域内多个邻近的微电网系统组成，每个微电网内部均有一系列分布式发电设备组成，比如光伏、风机、燃料电池、微型涡轮机、电池储能等等。作为能源互联网的核心组件，尽管这些小型能源设备具有许多环境和经济效益，但它们也有缺点，例如低惯性、不确定性、动态复杂性、随机性和间歇性[15-16]，所有这些都为能源互联网的能量管理带来了挑战。例如，风能和太阳能辐射通常无法精确预测，它们实际上随机变化[17]。另一方面，大数据、物联网、边缘计算等新兴信息技术的发展带来的大量本地计算任务所引起的负荷压力一样为能源互联网带来了随机性和不确定性。

因此，能源互联网仍处在发展阶段，目前许多文章针对多微网系统的稳定控制上开展了一定的研究，但多微网系统的信息-能量交融以及提升系统的调控能力等问题仍需要进一步研究和讨论。能量路由器作为能源互联网中信息-能量交融的关键装置，尤其需要得到更多充分的研究。本文将采用一系列鲁棒、最优控制技术，应用到能源互联网的多微网系统场景之中，通过综合控制多微网系统内部的信息和能量流，从而解决能源互联网中多微网系统所面临的一些问题，保证离网状态下的多微网系统能够稳定、高效运行。

1.2　国内外研究现状

能源危机和碳排放已成为全球普遍关注的两大问题。能源互联网作为一种可行的解决方案，一经提出就引起了全球的关注[3]。除能源技术外，通信基础设施在内的信息技术也同样是能源互联网的重要组成部分[18]。目前比较典型的能源互联网进展有：曹军威研究员[12]等人在研究中阐述了能源互联网的基本概念、特征以及架构，并提出了以信息和能量为基础一系列解决方案。孙宏斌教授[19]等人提出了能源互联网的发展目标和发展理念，提出和展望了一系列未来需要解决的问题以及需要应对的挑战。在文献 [20] 中，Zhou K 等人具体从商业角度对能源互联网进行了系统研究，主要讨论了围绕商业角度的能源系统演化的四个阶段。在文献 [21] 中，Hui H 等人研究了电力系统、无线充电技术和交通系统的在能源互联网中的集成问题以及关键技术。

在传统大电网架构向能源互联网这种自底向上的电力系统的转型中，能量路由器作为能源网络的端口与控制核心受到了广泛研究。例如，郭慧等人[11]在现有技术下设计了一种基于 3 层树形架构的由能量路由器控制的微电网架构，并从用户侧和微电网等不同角度对该架构进行了特征分析。此外，能量路由器也是实现多种能源之间耦合的接口设备。因此，关于能源互联网的多能源协同管理问题的研究至关重要，盛万兴[22]针对上述问题提出了基于 Lyapunov 的优化方法，将能量路由器系统的能量管理问题中储能约束转化为队列稳定性问题，从而实现实时地调控各种可控能源的同时降低运行成本的目标。为提高多能源调度的效率和灵活性，在考虑了两种热能存储设备的情况下，耿琪等人[23]提出了基于纳什博弈的能量路由器控制策略，从而有效地降低二氧化碳排放以及降低系统的运行成本。能源互联网的发展使得通过能源路由器主导控制的电力共享功能更好地利用分布式可再生能源成为可能。

将人工智能、5G、物联网等新技术应用于能源互联网中并建立强大的且智能化的信息层、应用层吸引了工业界和学术界的广泛研究[24]。伴随着大量、多种类型的传感器，如湿度传感器，温度传感器、浸入式传感器，被部署到能源互联网之中，所产生的海量数据为负荷预测、故障诊断、智能控制等应用提供了可能性。需要注意的是，面对上述场景，传统的云计算并不能完全适应一些应用的需求，例如故障诊断和智能控制对时延非常敏感，这对云计算的网络传输速度以及稳定性等能提出了极高的要求，遗憾的是云计算很难满足这些需求。为了应对这一挑战，边缘计算作为一种将原本在云端的计算资源下放到更靠近应用层的网络边缘侧的计算范式，能够就地进行数据分析、处理计算任务，从而实现能源互联网对于实时控制和优化的需求，基于这一思路的研究有[25-28]。

边缘计算能为能源互联网的运行提供更加高效、强大的响应速度，但于此同时，边缘计算作为一种热门的云计算的替代范式，其供能问题受到了产业、学术界的广泛关注。多微网系统作为能源互联网的一种典型系统，因其可以有效、充分地利用可再生能源的优势[29]，因此一些研究者开始将目光转向通过多微网系统对未来边缘任务计算供能这一应用场景进行研究[30-32]。

一方面，边缘计算设备的分布具有地理分散的特点，因此其工作负载会随着地理位置和时间的不同而动态变化，这使得每个边缘设备的能耗难以预测且不均匀。为了应对边缘计算的巨大的能源需求及其异构性，一些研究者开始将多微网系统与边缘计算进行结合，利用能源互联网的自底向上的特点为边缘计算提供电能[30]。多微网系统可以通过充分利用可再生能源实现当地能源自给自足[31]。这一特点非常适合向边缘计算设备提供电能，从而减少非可再生能源的消耗。由于可再生能源是无限的，减少不可再生能源消耗也相当于减少能源消耗。Li W 等人[13]提出了一个统一的能源管理框架，以支持分布式可再生能源的可持续边缘计算模式。该框架支持能源供应系统和边缘计算系统之间的合作，以便充分利用可再生能源，同时为时间有限的物联网应用提供更好的服务质量。为了追求高能效以及最大限度地利用绿色能源。

另一方面，面对可再生能源生产的不确定性[33]，Munir S 与 Conti S 等人[30,34]尝试通过设计控制策略从而维持电能的供需平衡。Munir S 等人[30]将微网为边缘系统供能的问题转化为了一种混合整数非线性优化问题，并针对这一优化问题研究了微电网使能的边缘计算网络的能源供应策略，目标是最小化该网络的能源消耗。Conti S 等人[34]研究了通过优化电能储存管理策略从而维持由可再生能源供能的边缘计算系统的稳定，使系统即使是在低发电时段也能够有效应对高工作量抵达峰值。Gu L 等人[35]设计了一种新型任务分配和能源调度方法，以满足边缘计算设备的能源供应和需求。随着越来越多的边缘计算设备部署到网络边缘侧，其带来的大量能耗使得多微网系统中的能源管理也将变得更加复杂[36]。

由上述文献分析可得，伴随着边缘计算的发展和普及，采用可以充分利用本地可再生能源的多微网系统为边缘任务计算供能是十分有必要研究的领域。

能源互联网作为能量-信息高度融合的跨多学科的复杂能量系统，基于信息层的研究和讨论，其实最终的落脚点仍然是优化能量层的各种指标、实现能量层中的能源高效管理。多微网系统作为一种典型的能源互联网场景，保持其能量层稳定也受到的了广泛关注。

近年来，国内外专家针对微电网系统的能量管理问题进行了大量的研究。Dong W 等人[25]提出了一种基于云边协同的能量管理架构。该架构在保持长期参数不变

的情况下，将经过训练过的模型部署在边缘计算设备上，实现微电网的实时能量调度，从而有效地避免了对多个随机变量的预测，以及为实时调度设计复杂的调节策略或奖励政策函数。Yang T 等人[37]基于跳变系统理论，建立了具有不同传输时延的频率控制系统的状态空间模型，并且为了减少功率失配引起的频率偏差的峰值、峰值时间和设定时间，提出了一种迭代优化算法来获得最佳反馈控制矩阵。仲志强等[26]针对家庭微电网提出一种云边协同架构，并在此架构中设计出一种基于实时外部电价以及用户需求的优化调度控制策略。为了解决这一目标，Hua H 等人[38]提出了一种基于自底向上能源互联网结构，并且提出了一种新的数据驱动的动态控制策略。在底层，每个微电网的运行都由深度强化学习算法构成的智能控制器控制。

微网内部的母线频率、电压稳定、电池寿命等是多微网能量层中的重要指标。但是，随着可再生能源的大量接入，其具有的间歇性以及随机性会对能源互联网系统中的频率、电压控制造成一定的负面影响。针对这一问题，杨欢红等人[39]提出一种考虑双层等效输入扰动的微电网交流母线频率控制方法；姚建华等人[40]使用强化学习实现微电网内部多能源协调控制，从而保持母线频率的稳定。此外，随机控制理论被许多研究者应用到解决此类问题之中，Hua H[41]采用连续随机系统对能源互联网系统进行动力学建模，同时考虑相关的时变时滞和范数有界建模不确定性。最后通过线性矩阵不等式方法将电压稳定问题转化为鲁棒 $\boldsymbol{H}_{\infty}$ 控制问题。[42]也采用了随机微分方程对微电网系统进行建模，进而通过方程的随机项对系统所具有的随机波动进行准确的描述，并提出一种二次负载频率控制器从而有效的补偿系统在随机性和外部干扰影响下的频率偏差。

然而，随着未来越来越多的计算任务下放至边缘侧进行处理，其带来的巨大的计算能耗将显著增加微电网系统的供能压力。此外，计算任务量随机性波动和可能受到的外部扰动也同可再生能源大量渗透一样，会对多微网系统的能量管理造成新的挑战。但是，目前很少有文章针对这一问题进行研究。

为更加准确地描述可再生能源渗透对多微网系统的影响，随机微分方程被用于对多微网系统内部的包括可再生能源发电功率在内的动态过程进行建模。基于微分方程建模的研究有[37,41,43]。近年来也有一些研究者使用微分方程对信息层中的任务计算等过程进行建模，如 Hui H 等人[44]使用了一系列常微分方程和随机微分方程对边缘计算中的资源分配进行了建模。基于此思路，通过微分方程对多微网系统和边缘任务计算过程进行统一建模，便可以将一些先进的控制方法应用到解决大量计算任务对多微网系统的影响，如母线频率、电压稳定以及优化系统性能等。

1.3　本文研究内容

1.3.1　研究场景

基于一些已有文献的观点[30-31,35]可得，利用多微网系统对边缘任务计算进行供能是一个重要且有意义的研究领域。根据上述内容，有理由相信在未来之中，多微网系统和边缘计算会紧密地结合在一起，甚至可能会形成一种统一的控制系统。能量-信息交融本身就是能源互联网的核心概念，而能量路由器是信息-能量融合的关键设备。本研究认为，能量路由器在负责微电网间能量传输的同时，也能够通过自身硬件扩展从而具有为边缘任务计算提供充足计算算力和电力供给的能力，并且也可以具有处理、调度计算任务等属于边缘节点的功能以使任务得到顺利执行。因此，本文扩展了能量路由的概念，并提出基于能量路由的新型多微网场景，如图1.2所示。

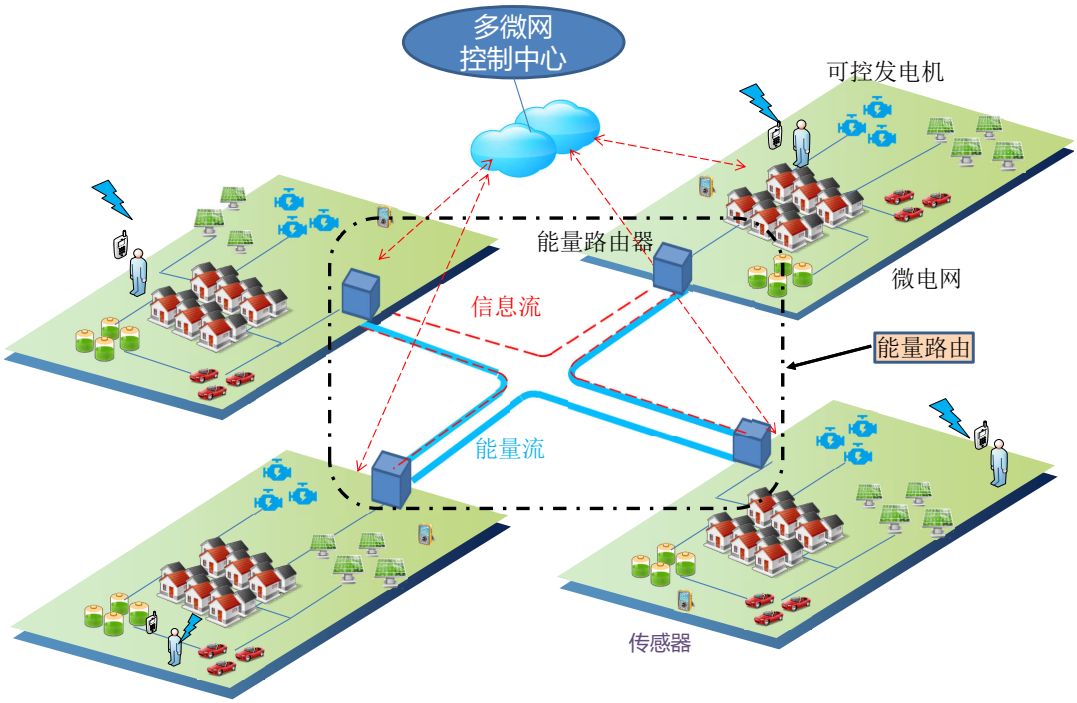


图 1.2　基于能量路由的多微网系统场景示意图

该场景具备以下特征：

1）多微网系统是能源互联网的一种典型场景，其由多个互相连接的邻近微电网系统组成且并不与大电网连接，是一种离网状态的自给自足的区域电力系统。每个微电网内部设有发电设备、储能设备、能量路由器，用于满足用户负荷和任务计算的能耗供应。

2）能量路由器通过硬件的扩展，具有一定的计算能力和存储容量，可以承担云服务器的部分计算任务，以实现边缘节点的计算功能，满足包括附近用户以及能量管理等在内的本地计算需求。

3）该多微网系统中各个微电网之间的连接通过能量路由器实现。能量路由器具有能量路由功能，使得多个微电网之间能够在能量管理上实现协同互补。

4）在该场景中，能量路由具有更广义的内涵:（1）微电网间的能量传输。不同微电网间可以通过能量路由器的能量传输通道实现彼此之间的能量传输；（2）基于任务调度的负载转移。多个不同的能量路由器能够通过通信协议互相调度任务，从而将计算任务作为一种可转移的负载，并且能量路由器也同样可以调节本地的边缘计算任务量从而改变本地负载。

基于上述特征，多个微电网通过能量路由器在信息、能量上相互连接，从而形成一种基于能量路由的多微网场景，如图1.2所示。虚线框内的能量流和信息流均由能量路由器进行收发，相较于已有文章[17,41]，本研究所讨论的能量路由器的能量路由概念具有更广义的含义，既包括原有的微网间能量传输，同时也包括计算任务的调度。将任务调度看作是一种可控的地理可转移的负载能够进一步提升多微网系统的能量调控能力和上限，此外，各个微电网内部的可控发电机也同样在能力调控上发挥着重要的作用。

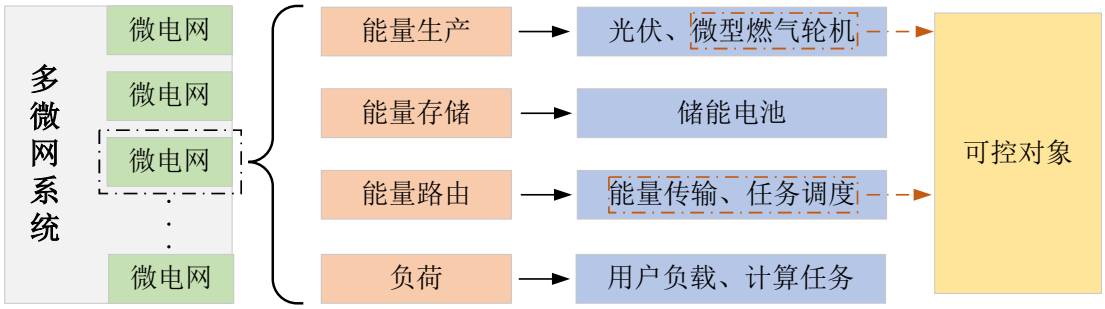


图 1.3　多微网系统构成示意图

为更直观地说明该多微网场景中各微电网系统的构成，图1.3展示了各微电网中的四类关键要素，包括能量生产、能量存储、能量路由以及负荷。其中能量生产中的微型燃气轮机和能量路由中的能量传输以及任务调度在本研究中是被控对象，通过对其合理控制可以实现多微网场景的系统鲁棒稳定和一些性能优化。

1.3.2　基于软件定义的多微网系统典型控制架构

针对所研究的多微网系统（图1.3），本文采用的是基于软件定义的控制架构从而对各微电网内的可控发电设备以及微电网间的能量路由进行高效地控制和管理。在下文中，本研究对软件定义控制架构的概念、应用到多微网系统的合理性以及

优势进行介绍和讨论。

软件定义概念最初是在计算机网络中提出的，其特征主要为控制平面和运行平面（数据传输）分离以及控制平面采用集中控制逻辑[45-47]，从而可以极大提升计算机网络的控制水平和扩展灵活性[48]。能源互联网的核心理念是将信息技术与能源电力系统深度结合，利用信息技术理念和思想对能源电力系统结构进行改造[12,49]。软件定义这一信息技术概念与能源互联网系统尤其是多微网系统的结合同样得到了一些研究者[18,50-51]的研究和讨论。

对于电力系统来说，传统电网中配电网的电能分配逻辑是首先从发电厂或者输电网集中接收电能，再为所负责区域内的各类用电负荷进行电力供给，这是一种典型的集中式控制架构，在控制平面中采用的是中心控制的方式，在运行平面也是将能量集中起来进行统一分配。但是，对于有大量分布式发电设备接入的多微网系统来说，将电能集中后统一分配调度显然会在运行上带来极大的经济成本和运输成本[50]。此外，在控制平面中，由于多微网系统的定义是一定区域范围内的多个邻近微电网互联的小规模电力系统，其所包括的微电网数量是有限的，因此在控制平面上采用集中的控制逻辑相较于分布式控制逻辑能够具有更好的控制水平[52]，而且不需要考虑由于微电网数量大规模增加导致的集中式控制效率变低、响应速度变慢等问题[18,52]。

根据上文的分析，一方面，本文所讨论的多微网系统由于自身规模有限且地理集中，在控制平面采用集中控制逻辑具有一定优势；另一方面，在运行平面上，由于大量的分布式发电设备和储能设备接入，能量生产、路由不适合采用集中统一管控的方式。因此，本研究采用了基于软件定义的控制架构，其特点是将控制平面和运行平面分离，在控制平面上采用集中控制逻辑，但是在运行平面上，借助分布式储能设备和能量路由器能够在各个微电网中分散存储和调度能量。基于软件定义的控制架构十分适合被应用到多微网这类系统中，这一观点也已经得到许多研究[18,51]的讨论和认可。实际上，由于多微网系统各微电网内部均会部署储能设备，因此具备将电能分散存储和管理的条件。

针对场景1.2，本研究采用了基于软件定义的控制架构，从而借助中心控制器实现对这个多微网系统运行的高效控制[51]。本研究控制架构如图1.4所示，运行平面即为所讨论的多微网系统，各微电网内部由能量路由器、储能设备、发电设备和负荷组成；控制平面是一种中心控制器。在该场景中，中心控制器负责制定控制策略并且下发控制策略至各微电网中，而发电、能量路由 (能量传输、任务调度) 等过程由各个可控发电机和能量路由器根据接收到的控制信号进行执行。

本研究采用的控制器根据由多微网系统典型参数[2,53]建立的微分方程模型进

行控制决策，之后控制器将决策下发至各个微电网的能量路由器以及可控发电设备（如微型燃气轮机）中，从而通过对能量路由（包括微电网间的能量传输、任务调度等）和可控发电设备的控制实现各微电网内部的电力供需平衡、母线电压稳定、母线频率稳定以及各微电网的运行性能优化。

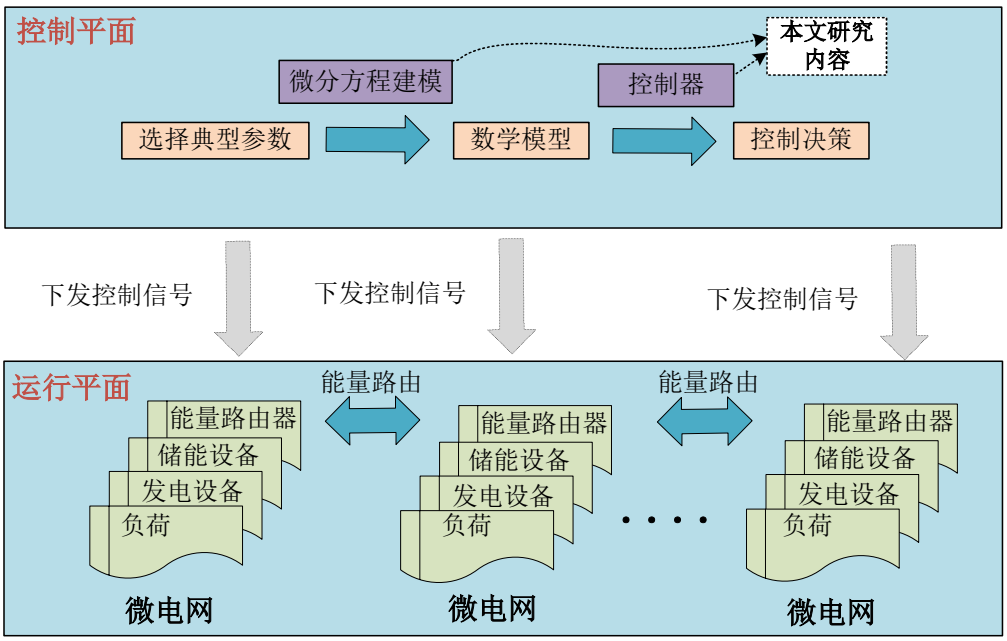


图 1.4　基于软件定义的多微网系统控制架构示意图

本文的研究重点是该典型控制架构中的微分方程建模和控制策略设计上，参数选择不是本文的研究重点。本研究的工作是基于已有文献[2,53-54]得出或使用的典型参数，采用一系列常微分方程、随机微分方程以及带有马尔可夫参数跳变的微分方程对运行层进行数学建模，并设计多种控制方法，从而能够实现多微网系统内部的稳定正常运行，解决下一小节提出的一系列研究问题。

1.3.3　研究问题

由于未来大量的数据处理等计算任务会下放至更靠近用户侧的边缘侧进行执行，其耗能对多微网系统内部的电力供需平衡产生的影响是无法忽略不计的。因此，离网状态下的多微网系统所面临的供能压力必然会相应增大，并且计算任务、可再生能源、用户负载等具有的随机性、外部扰动也势必会要求多微网系统需要用于更加强大的调节能力。已有的研究所采用的主要调控手段是可控发电机、储能设备以及微电网间的能量传输。但是正如上文所讨论的，未来任务计算的边缘化、本地化会使得微电网内部的供能压力增加、并且控制变得更为复杂，因此需要提出新的控制要素从而提高多微网的能量调控能力和上限。

在本研究中，为应对上述提到的多微网的能量管理需求，能量路由器中的任

务计算能耗在多微网系统的能量管理中也将被视为一种不可忽视的可控负载，进而任务调度作为一种重要的控制手段也可以参与调节微电网内部的电力供需平衡中。比如，在多微电网的区域能量互联网场景下，当某个任务计算负担较重的能量路由器所在的微电网的发电量无法满足自身负荷消耗时，可以通过能量路由器将该微电网中的部分任务调度到其它微电网的能量路由器中执行，从而有效地提升离网状态下的多微网系统在面临大规模本地计算任务负载时的能量调节能力。

综上所述，伴随着能量路由器的部署和可再生能源的大量接入，光伏强度、本地计算任务等所具有的随机性和外部扰动为所研究的多微网系统 (图1.2) 的正常稳定运行带来了严峻挑战。未来应对这一挑战，本研究设计了一系列基于能量路由的控制策略，从而在受到信息层和能量层的不确定性、随机性以及外部扰动的干扰下，通过控制微电网内部的发电设备、微电网间的能量传输和任务调度，从而保证各个微电网内部的功率平衡以及母线频率、电压稳定。除减少随机性和外部扰动带来的影响外，该场景中的一些性能指标也同样需要得到优化，从而响应低碳目标、减少设备损耗。

能量路由器作为信息-能量层的核心装置，可以在中心控制策略的控制下，实现对能量路由合理管控，从而提升多微网系统的能量管理调节能力。在本文所讨论的场景下，控制策略的控制对象主要包括两个，一是各个微电网内部的可控发电机，二是各个微电网内部能量路由器的能量路由过程。

值得注意的是，能源互联网中信息和能量都被视为系统正常运作所需的重要要素并被同时考虑，但是能源互联网本质上是一种新型能量系统，最终研究的落脚点应该是落在能量层上，如本文所主要研究的频率、电压稳定问题。因此，本文的研究工作重点是针对能基于能量路由的多微电网系统这一典型场景中的一些关键控制、优化问题提供相应解决方案，从而实现多微网系统的电压、频率稳定控制和性能优化。

上述研究问题可以总结为以下几点：

1）随着计算任务越来越多的下放至本地进行处理，其带来的计算能耗将显著地增加多微网系统中的供能压力。因此，对于多微网系统，提升其电能调控能力以应对未来增加的供能压力是急需要关注的问题。

2）大量计算任务的本地化以及可再生能源的渗透带来的随机性、外部扰动等因素均会对多微网系统的电能稳定带来不良的影响。因此，如何设计一类控制器，其通过合理控制多微网系统内部的可控要素 (如图1.3所示) 从而能够消除这些不利因素对多微网系统的负面影响也是是值得研究的问题，尤其是消除随机性、外部扰动对于各微电网内部的母线频率偏差和母线电压偏差稳定的影响。

3）除多微网系统的稳定控制问题之外，该系统中仍由许多性能指标值得优化，如提升可再生能源的利用率、避免由于过度控制导致的电力设备的损耗以及提升计算任务的本地计算量等等。

4）针对多微网系统的微分方程建模已经有一些研究成果，但是很少有研究采用微分方程模型对任务计算进行动态建模，从而描述其具有的随机性以及外部扰动对于多微网系统稳定性的影响。此外，更为精确但更加复杂的建模方式仍有待研究，并且基于该复杂建模方式的控制方法也同样需要得到研究。

1.4　本文主要工作和贡献

针对上文所讨论的基于能量路由的多微网系统，本文介绍了一种基于软件定义控制架构的控制逻辑，并针对模型建立以及控制策略设计环节进行了研究，通过应用多种鲁棒 H_∞ 控制方法和基于纳什不等式的 H_2/H_∞ 混合随机控制方法，从而解决 1.3.3 小节中提出的多个研究问题。

本研究的主要内容和贡献如下：

1）本研究提出一种新的能量路由概念，将能量传输过程和任务调度包括在其中。在现有的能源互联网的能量管理研究中，大多数工作考虑的重点仅放在了微电网中电力设备的控制上，而忽视了信息层中任务计算和任务调度对于能量管理的影响。相比之下，本研究将任务计算的能耗看作为多微网系统中的一种可控的地理可转移负荷，通过对任务调度、任务计算以及电力设备的综合控制，从而实现该系统中各个微电网的电力供需平衡以及母线频率、电压稳定。相较于现有方法仅控制能量层中的发电设备和能量传输，本研究基于能量路由的控制方法有利于进一步提高离网状态下多微网系统的电力调节能力和灵活性。此外，该场景也为提高边缘计算供能问题上的可再生能源渗透率提供了一种解决方案，可以一定程度减少由于未来边缘计算带来的能源压力和环境污染。

2）本研究使用一系列常系数微分方程、随机微分方程对微电网的任务调度、任务计算、能量传输、可再生发电等一系列信息、能量过程进行建模，从而模拟其动态变化、随机性以及外部扰动对于系统的影响。另一方面，本研究采用带有马尔可夫跳变的随机微分方程对所研究系统进行建模，从而提高了对于系统建模的真实性。通过上述建模，面对计算任务、可再生能源等带来的随机性和外部扰动，一些 H_∞ 随机控制理论以及粒子群优化算法被应用到解决该系统母线频率、电压偏差的鲁棒稳定问题之中。本研究还进一步通过设置控制信号强度上限防止过度控制导致的设备损耗，以及通过进一步优化 γ 的取值提高所提方法的鲁棒控制效果。

3）通过随机控制理论和纳什均衡不等式的综合应用，本研究提出一种控制策

略，对多微网系统内部的一些重要性能进行优化：（1）尽可能提高可再生能源的渗透率；（2）另一方面也尽可能最大化就地得到处理的边缘计算量从而降低网络传输带宽的使用和云端数据中心的计算压力；（3）最后防止由于一些过度控制导致的设备故障。但是，优化性能指标会导致系统的抗干扰能力下降，而且提高系统的抗干扰能力反过来也会造成性能优化效果变差。为解决这一困境，本文将两种控制问题转换为纳什均衡问题，通过求解纳什均衡点使得二者达到一种平衡。

1.5　本文章节安排

根据图1.2所示的基于能量路由的多微网系统，本研究的主要内容如图1.5所示。

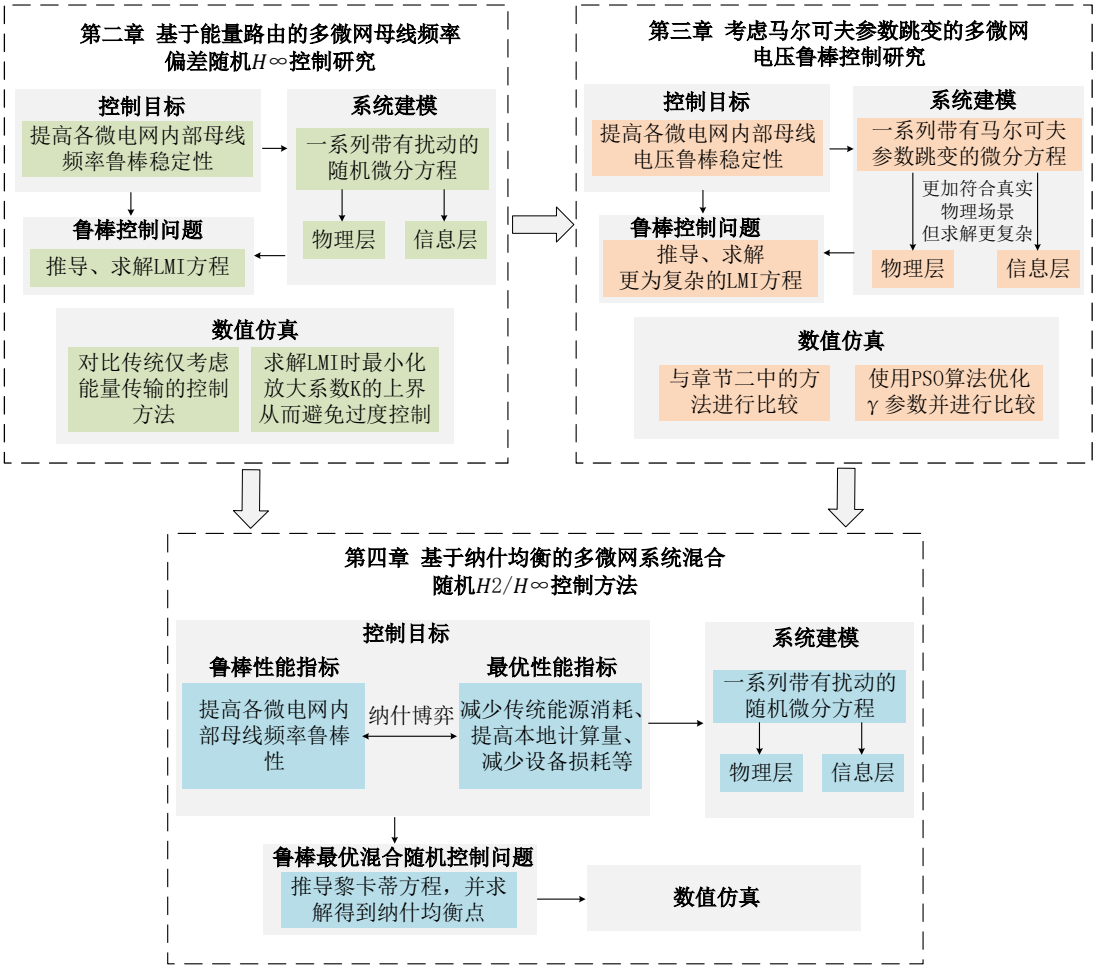


图 1.5　本文研究内容说明图

第 2 章对所研究的基于能量路由的多微网系统的交流频率鲁棒控制问题进行研究，考虑边缘计算任务、可再生能源发电以及用户负载的随机性和外部扰动干扰，通过一系列带有扰动的随机微分方程的应用，对各个微电网的可再生能源、可控发电机、任务调度、任务计算等过程进行动态建模。同时，任务调度存在时间延

迟，因此在建立任务调度模型时额外考虑了时间延迟对于整个系统鲁棒稳定的影响。最后将一种鲁棒 H_∞ 控制策略应用到了该场景下的交流频率鲁棒控制问题中，并且控制效果在数值仿真在得到了验证。此外，为防止过度控制导致的设备损耗，本章对上述鲁棒 H_∞ 控制方法进行改进，通过在求解 LMI 方程时增加约束，抑制控制信号反馈增益 K 的值，从而防止过度控制。

第 3 章对所研究系统的直流电压鲁棒控制问题进行研究，相较于上一章节，本章节采用了马尔可夫跳变微分方程对能量、信息层的动态过程进行建模，从而使得建模更接近真实的物理场景并且能够更好地表达系统内部的随机性。面对带有马尔可夫跳变的系统方程，虽然建模十分复杂，但是本研究通过一系列数学方法进行公式推导从而得到了 LMI 方程。该方法与章节 2 所采用的鲁棒 H_∞ 控制方法进行比较，结果表面在存在系统方程存在马尔可夫跳变的情况下，本章所采用的方法在能量路由的多微网系统的直流电压鲁棒控制上具有更好的效果。此外，为了提高直流电压的鲁棒稳定性，本章节进一步通过粒子群优化算法优化 γ 值并取得一定效果。

第 4 章在提高所研究系统鲁棒性的同时额外考虑了能量与信息层的性能指标最优控制（也称为 H_2 控制）问题，从而优化可再生能源的渗透率、防止过度控制以及最大化本地任务计算等性能指标，并且应用纳什博弈理论从而实现鲁棒性和最优性能之间的平衡控制。仿真证明，基于纳什均衡的 H_2/H_∞ 通过找到纳什均衡点实现了二者的平衡控制，并取得不错的效果。

第 2 章　基于能量路由的多微网母线频率偏差随机 H_∞ 控制研究

2.1　研究背景及贡献

根据上文所讨论的内容，随着本地计算任务量、可再生能源渗透率的增加，本研究所讨论多微网系统内部的各个微电网母线频率偏差的稳定性和可靠性也会面临一些挑战。而不同微电网间可以通过能量路由器的任务调度功能进一步提高可再生能源的利用率、优化边缘计算资源的使用效率，进而助于调节各个微电网内部的功率平衡以及系统内部的电压、频率稳定[13]。

作为能源互联网中的重要指标，母线频率偏差稳定性和鲁棒性受到了许多研究者的关注[55]。母线频率偏差的波动产生的原因主要是电力系统内部的电能生产量和负荷消耗量之间发生不平衡[56]。值得注意的是，尽管目前在能源互联网系统中交流母线频率的鲁棒控制研究方面有许多研究成果, 如文献 [57-58]，但绝大多数仅仅考虑了能量层对于母线频率的影响，而忽略了作为信息-能量高度融合的能源互联网中的信息过程对于母线频率的影响。而在本文中，任务调度、任务计算和能量传输均被定义为能量路由，本文所设计的控制器能够综合控制该广义的能量路由过程和发电过程进一步提高离网状态下多微网系统的能量调节能力，从而应对未来大规模任务计算本地化带来的供能压力，并且消除大量计算任务和可再生能源渗透带来的随机性和外部扰动对于系统稳定性的影响。

通过微分方程对能源互联网的能量层中的能量调度、生产发电以及储能充放电等动态过程进行建模已经在许多文献中得到了研究和应用[17,59]。但是能源互联网能量路由器中的任务调度和任务计算等动态过程的微分方程模型却很少有文献涉及和研究。在本文所研究的多微网系统中，任务调度和任务计算等信息过程也需要运用微分方程的方法对其进行建模，从而能够和能量层结合在一起讨论。在建模方面，考虑到边缘任务计算中存在动态性和随机性，作者在文献 [44] 中提出使用常微分方程和随机微分方程来建模边缘节点的计算资源分配。然而，现有的研究并没有使用随机微分方程对边缘计算系统中的任务调度和功率消耗进行建模。因此，本文基于文献 [44] 的思路和方法，通过微分方程对能量路由中的任务调度与任务计算进行了动态建模。

在本文研究的场景中，大量的可再生能源接入以及大量任务计算本地化等过程具有的随机性、可能受到的外部干扰都会对系统内部的母线频率偏差产生影响。此外，任务调度存在的通信时延也会对母线频率偏差的稳定控制过程产生影响。根

据第 1 章中的综述，这些因素对能源互联网系统的影响已经有一些工作进行了研究[13,57]，但是并没有同时得到考虑。为消除功率偏差导致的频率偏差波动，可以通过同时对能量路由器间的能量传输以及任务调度、传统发电设备的发电生产等过程进行有效地控制。因此需要为本文中研究的由能量路由器连接的多微网系统设计一种频率偏差鲁棒控制策略从而通过控制上述过程减少外部扰动、随机性、时延等因素导致的频率偏差波动。

本章节采用了随机微分方程和常微分方程对所研究多微网系统中的包括能量路由在内的多种动态过程进行数学建模，从而更加全面地描述计算任务本地化和可再生能源渗透所带来的随机性、外部扰动等对各微电网母线频率偏差的影响。通过建模得到总系统方程后，本文以母线频率偏差稳定调节为目的，通过应用随机 H_∞ 控制理论，最后将该频率调节问题转化为了一种随机 H_∞ 控制问题。H_∞ 控制是为了抑制传递函数组从噪声到期望输出的最大增益，从而达到抗干扰的目的[60] [61]。本文的主要目的是寻找一种状态反馈控制器，使系统的输出即频率偏差在各种外部干扰下保持稳定 H_∞。通过推导 LMI 方程，从而把这类问题转化为一个易于求解的优化问题[59,62]，最后通过 matlab CVX 求解工具解决这一问题并得到一个有效的状态反馈控制器。此外，传统的随机 H_∞ 控制方法很少考虑过度控制导致的微电网发电设备的损耗，本研究通过舒尔补方法得到了控制强度的上界，并将该上界作为求解 LMI 方程时的约束和优化项。

本文的主要贡献如下：

1）本章将边缘计算任务视为一种可控的地理可转移负荷，相较于传统的研究仅考虑微网间的能量传输，本文提出的能量路由概念能够进一步提高离网状态下多微网系统的能量调节能力和上限。

2）本章采用随机微分方程和常微分方程等对能量路由在内的动态过程进行建模。通过这样，系统母线频率所受到的来自外部扰动、随机性、时延等因素的影响被很好的描述。值得注意的是，这是首次采用微分方程对任务调度和任务计算进行动态建模。

3）本工作设计了一种基于随机鲁棒 H_∞ 控制策略，通过对各微电网内部的传统发电设备（微型燃气轮机）和微电网间的能量路由进行有效控制，从而提升各微电网内部的母线频率稳定控制效果。此外，为避免过度控制以减少被控设备的运行负担，本研究通过在求解 LMI 方程时最小化控制放大系数 K 的上界从而优化控制信号强度。

本章节的其余部分结构如下。第二小节描述了系统架构和任务调度、任务计算、能量组件的建模。第三小节阐述了随机鲁棒控制问题并给出了解决方案。第

四小节提供了一些数值模拟。最后，第五小节对本章节做出了结论。

2.2　系统构建

在本小节中，我们首先介绍系统架构，并建立了可再生能源发电设备、传统能源发电设备和储能设备、能量传输的功率变化模型以及任务调度、任务计算的任务量变化模型，最终得到总的系统方程。

2.2.1　系统架构描述

如图2.1所示，本文假设存在 n 个由能量路由器连接的微电网系统组成，形成一个区域能源互联网系统架构——多微网系统。其中每个微电网内部都连接着传统发电设备、储能电池和可再生能源发电设备、能量路由器以及用户负载。由于该场景并没有与大电网并网，因此维持各微电网系统母线频率的供-需功率平衡需要依靠对能量路由器的任务调度、能量传输以及微电网内部的发电设备进行合理地控制。

能量传输作为传统的多微网系统电能调节方式，可以通过能量路由器实现不同微电网间的电能交换，但是由于其需要依托提前建设好的传输线等基础设施，在调节能力上存在一定局限性。而任务调度在多微网系统中被视为一种可转移负荷，不同能量路由器之间可以通过任务调度转移负荷压力，由于任务调度仅需要依托网络通信，在灵活度上明显优于能量传输。因此本文基于传统的仅考虑发电设备和能量传输控制的方法[38,57]，通过引入新的可控制对象——任务调度，从而进一步提升多微网的能量调节能力，以消除未来计算任务和可再生能源的大量接入所带来的随机性和外部扰动对于多微网系统稳定的影响。图2.1中左侧蓝线代表所连微电网间存在能量传输，橙线表示存在任务调度。值得注意的是，考虑到地理位置、时延等因素，本文中任何两个能量路由器之间并不总是存在通信和能量传输。

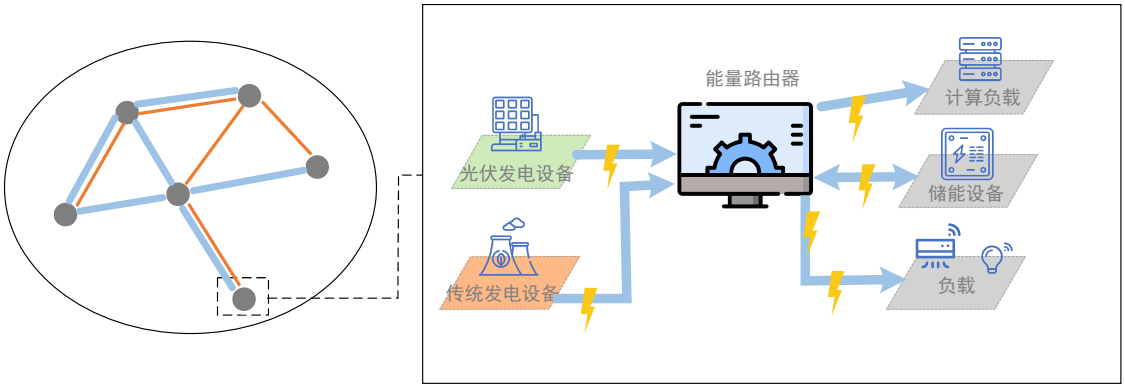


图 2.1　基于能量路由的多微网系统架构图

其中 MTi, BESi, PVi 分别代表第 i 个微电网中的传统发电设备 (微型燃气轮机)、储能设备、可再生能源发电设备。本文的研究内容是设计一种控制策略，在存在系统随机性和外部扰动的干扰下，通过对微电网内部的发电设备以及微电网间的能量路由过程 (任务调度和能量传输) 进行合理地控制，维持各个微电网内部的功率平衡和母线频率偏差稳定。

2.2.2　光伏设备和用户负荷建模

Bevrani 等人首先在文献 [59] 中使用微分方程对能源互联网内部的光伏、可控发电机发电、储能设备充放电等功率变化进行动态建模。建模为如下形式。

$$\dot{x(t)} = Ax(t) + B_1 v(t) + B_2 u(t), \tag{2-1}$$

$x(t)$、$v(t)$、$u(t)$ 分别为系统状态、外部干扰和控制输入。另外 A、B_1、B_2 为系统参数，这些参数能够基于相关的真实数据通过文献 [54] 提出的参数估计的方法获得。由于参数估计并不是本文研究的重点，因此本文的大部分参数均从其他文献 [41, 59] 中参考得来。根据该公式的形式, 以光伏发电功率变化率为例，由于光伏发电在本文中为不可控对象，因此可以令控制信号 u(t)=0，建模如下：

$$d\Delta \dot{P}_{PV}^{k}(t) = \frac{1}{T_{PV}^{k}}\left(- \Delta P_{PV}^{k}(t) + v_{PV}^{k}(t)\right)dt, \tag{2-2}$$

其中 T_{PV}^{k} 是光伏设备的时间常数[59]。在公式（2-2）中仅仅考虑了系统可能受到的外部扰动 $v(t)$，之后基于公式（2-1）的建模方法被大量的文献使用并改进，如文献 [37, 41, 43] 等。其中文献 [41] 在此方程的基础上添加了不确定性，文献 [43] 在此方程的基础上添加了随机性，使用了布朗运动对随机性进行建模。值得注意的是这些动态过程的微分方程参数在文献 [59] 中给出或者可以通过文献 [54] 提出的参数估计方法获得。之后，基于上述的讨论，本文中包括微型燃气轮机、储能设备、光伏发电等在内的动态过程便可以基于文献 [41, 59] 提供的微分方程形式进行数学建模。

基于上述讨论，本文将光伏组件（PV）用作可再生能源发电设备。考虑到光伏功率的随机性和可能的外部干扰，如光强的变化，采用带扰动的随机微分方程 $v_{PV}^{k}(t)$ 来模拟光伏功率的变化。第 k 个微电网中光伏组件的功率变化建模如下所示[59]。

$$\begin{aligned} d\Delta \dot{P}_{PV}^{k}(t) = &\frac{1}{T_{PV}^{k}}\left(- \Delta P_{PV}^{k}(t) + v_{PV}^{k}(t)\right)dt \\ &+ r_{PV}^{k}\Delta P_{PV}^{k}(t)dw(t), \end{aligned} \tag{2-3}$$

其中 T_{PV}^{k} 是光伏设备的时间常数，r_{PV}^{k} 是扩散项的系数，$w(t)$ 为用来模拟光伏发

电随机性的标量维纳过程[63-64]。这些参数能够基于相关的真实数据通过已有文献[54] 提出的参数估计的方法获得, 例如表达光伏发电功率变化的微分方程（2-3）中的参数可以由相关的气候数据估计得出[54]。

在微电网中，包括光伏在内的发电设备生产的电能需要满足当地负荷消耗需求。由于负荷功率变化本身具有随机性，并且可能会受到一些外部扰动的影响，如大功率设备的突然接入等。因此，本文中的本地负荷功率变化值也采用带有外部扰动的随机微分方程进行建模。类似于光伏建模，根据文献 [41, 43], 负载功率变化值 $\Delta P_L^k(t)$ 建模如下：

$$d\Delta \dot{P}_L^k(t) = \frac{1}{T_L^k}\Big(- \Delta P_L^k(t) + v_L^k(t)\Big)dt + r_L^k \Delta P_L^k(t) dw(t), \tag{2-4}$$

其中 T_L^k 是负荷功率变化的时间常数，r_L^k 是扩散项的系数，$w(t)$ 为用来模拟负荷功率随机性的标量维纳过程[64]。

2.2.3　微型燃气轮机建模

由于可再生能源的不可控性和强随机性以及该场景为离网运行，因此针对常规发电机制定适当的控制策略是十分有必要的，从而保证在可再生能源以及储能设备难以承担所有负荷需求时进行电能补充。在不丧失通用性的情况下，本文基于文献 [41, 59] 的思路通过带有控制信号的常微分方程对微型燃气轮机（MT）的发电功率变化值进行建模。$u_{MT}^k(t)$ 表示微型燃气轮机的控制输入。第 k 个微电网连接的微型燃气轮机的功率变化建模如下所示[41,59]。

$$\Delta \dot{P}_{MT}^k(t) = \frac{1}{T_{MT}^k}\Big(- \Delta P_{MT}^k(t) + b_{MT}^k u_{MT}^k(t)\Big), \tag{2-5}$$

其中 T_{MT}^k 微型燃气轮机（MT）的时间常数, 即响应速度, b_{MT}^k 是相关系统系数。

2.2.4　任务调度建模

能量路由器中的任务调度是一个动态过程。为了更好地描述这种动态特性，在文献 [44] 中使用了常微分方程用来模拟边缘计算设备间的资源调度。在许多研究成果中，例如文献 [35]，任务调度被认为是一个可控的过程，当某个边缘节点过载时，可以通过控制信号将部分任务调度给其他边缘节点。然而，目前还没有这样的研究成果，即使用带有控制输入的微分方程对任务调度进行建模。此外，由于网络传输所需的时间，在边缘计算的任务调度建模中必须考虑时延。借鉴文献 [41] 中描绘物理过程时间延迟的方法，本文也类似地在建模中使用变量 $\tau(t)$ 对任务调度的时延进行描述。因此，基于文献的思路，本文通过具有时滞和控制输入的常微

分方程对任务调度进行建模。

$$\Delta\dot{S}_{TS}^{l}(t)=\frac{1}{T_{TS}^{l}}\Big(-\Delta S_{TS}^{l}(t-\tau(t))+b_{TS}^{l}u_{TS}^{l}(t)\Big), \tag{2-6}$$

其中，$\Delta S_{TS}^{l}(t)$ 表示在第 l 条通信线路上调度的任务量的变化，并且 $u_{TS}^{l}(t)$ 是控制输入。T_{TS}^{l} 和 b_{TS}^{l} 分别表示任务调度的时间常数和相关控制系数。

2.2.5　本地任务计算建模

基于文献 [44] 的思路，本文通过微分方程对任务计算进行建模。但是文献 [44] 中的模型过于简单，没有考虑随机性、外部扰动等其它因素。比如，对于单个能量路由器，考虑到其周围终端设备产生的任务请求量的变化不可能是平滑的，本文采用维纳过程 $w(t)$ 来模拟任务量变化的随机性。此外，考虑到某些干扰可能对总线频率偏差产生不利影响，例如突然接收大量任务请求，使用变量 $v_{TC}^{k}(t)$ 表示此类干扰输入。在本文中，每个能量路由器接收的局部计算任务量由一个带有干扰输入的随机微分方程建模。本地任务计算的建模如下所示。

$$\begin{aligned}d\Delta\dot{S}_{TC}^{k}(t)=&\frac{1}{T_{TC}^{k}}\Big(-\Delta S_{TC}^{k}(t)+v_{TC}^{k}(t)\Big)dt\\&+r_{TC}^{k}\Delta S_{TC}^{k}(t)dw(t),\end{aligned} \tag{2-71}$$

其中 T_{TC}^{k} 是任务计算的时间常数，并且 r_{TC}^{k} 是系统系数。$\Delta S_{TC}^{k}(t)$ 表示第 k 个能量路由器要执行的计算任务的变化值。

2.2.6　能量传输建模

在许多研究成果[17,35,44]中，微电网间的能量传输被认为是一个可控的过程，当某个微电网自身供能小于需求时，可以通过能量路由器将附近其他微电网中多余的电量调度给自身。在本研究中，能量路由器同样具备不同微电网系统间的能量交换功能，从而保持整个多微电网系统的电源供需平衡。第 i 个能量传输线上的的能量传输功率动态变化值 $\Delta P_{EE}^{i}(t)$ 建模如下所示[17]。

$$\Delta\dot{P}_{EE}^{i}(t)=\frac{1}{T_{EE}^{i}}\Big[-\Delta P_{EE}^{i}(t)+b_{EE}^{i}u_{EE}^{i}(t)\Big], \tag{2-8}$$

其中 T_{EE}^{i} 是功率交换的时间常数, $u_{EE}^{i}(t)$ 功率交换的控制输入，b_{EE}^{i} 表示与控制器相关的系统系数。

2.2.7　储能电池和频率偏差建模

为了进一步保持能源消耗和发电之间的平衡，能源供应系统中考虑了储能设备。在本文中，储能设备作为一个被动控制的关键设备，可以根据当时的母线频

率偏差进行充放电，当供大于需时，储能设备进行充电以吸收多余的电能，当供小于需时，储能设备将存储的电量释放出来用于弥补功率偏差。第 k 个微电网内部的储能电池充放电功率变化值建模如下[57,59]：

$$\Delta \dot{P}_{BES}^{k}(t)=\frac{1}{T_{BES}^{k}}\Big(-\Delta P_{BES}^{k}(t)+\Delta f^{k}(t)\Big), \tag{2-9}$$

其中 T_{BES}^{k} 是储能设备的时间常数, $P_{BES}^{k}(t)$ 表示第 k 个微电网中电池储能的功率变化。由于本文的研究重点不是储能设备本身，因此没有考虑电荷态（SOC）。例如，文献 [41] 中使用了不考虑 SOC 的类似建模方法。在公式 (2-9) 中, $\Delta f^{k}(t)$ 是第 k 个微电网系统内部的母线频率偏差，可建模如下[59] [65]：

$$\Delta \dot{f}^{k}(t)=-\frac{2\bar{D}^{k}}{\bar{M}^{k}}\Delta f^{k}(t)+\frac{2}{\bar{M}^{k}}\Delta P^{k}(t), \tag{2-10}$$

其中 $\bar{M}^{k}$ 表示惯性常数, $\bar{D}^{k}$ 表示第 k 个边节点的阻尼系数。在公式 (2-10) 中, $\Delta P^{k}(t)$ 表示第 k 个微电网系统的总线功率，其建模如下。

$$\Delta P^{k}(t)=-G\Big(S_{TC}^{k}(t)-\sum_{l=1}^{m}f(k,l)\cdot S_{TS}^{l}(t)\Big)+P_{PV}^{k}(t)-P_{L}^{k}(t) \tag{2-11}$$

$$+P_{MT}^{k}(t)+P_{BES}^{k}(t)+\sum_{i=1}^{n}g(k,i)\cdot \Delta P_{EE}^{i}(t).$$

G 是任务变化和功率变化之间的比例关系,g 和 m 分别表示能量传输线路和通信传输线的总数。$S_{TC}^{k}(t)-\sum_{l=1}^{m}f(k,l)\cdot S_{TS}^{l}(t)$ 表示能量路由器在考虑任务调度后需要执行的任务的变化量。函数 $f(k,l)$ 表示任务调度的方向。当 $f(k,l)=1$，第 k 个微电网内部的能量路由器通过传输线 l 向其他能量路由器调度任务。当 $f(k,l)=-1$，第 k 个微电网内部的能量路由器通过传输线 l 接收由其他能量路由器调度的任务。同理，$g(k,i)$ 同样表示能量传输的方向，$\sum_{i=1}^{g}g(k,i)\cdot \Delta P_{EE}^{i}(t)$ 表示在能量传输线路 i 上的能量传输功率变化。

2.2.8　系统建模

为了简化对系统的描述，我们定义了以下向量。对于第 k 个微电网，系统状态向量定义为 $x^{k}(t)=[\Delta S_{TC}^{k}(t),\Delta P_{PV}^{k}(t),\Delta P_{L}^{k}(t),\Delta P_{MT}^{k}(t),\Delta P_{BES}^{k}(t),\Delta f^{k}(t)]'$。控制输入定义为 $u_{MT}^{k}(t)$。干扰输入向量为 $v^{k}(t)=[v_{TC}^{k}(t),v_{PV}^{k}(t),v_{L}^{k}(t)]'$。然后，将能量路由器间任务调度的状态向量定义为 $x_{TS}(t)=[\Delta S_{TS}^{1}(t),\Delta S_{TS}^{2}(t),...,\Delta S_{TS}^{m}(t)]'$。任务调度的控制输入向量定义为 $u_{TS}(t)=[u_{TS}^{1}(t),u_{TS}^{2}(t),...,u_{TS}^{m}(t)]'$, 其中 m 是通信线路的数量。将能量路由器间能量传输的状态向量定义为 $x_{EE}(t)=[\Delta P_{EE}^{1}(t),\Delta P_{EE}^{2}(t),...,\Delta P_{EE}^{g}(t)]'$。任务调度的控制输入向量定义为 $u_{EE}(t)=[u_{EE}^{1}(t),u_{EE}^{2}(t),...,u_{EE}^{g}(t)]'$, 其中 g 是能量传输线路的数量。

对于整个系统，本章定义系统状态向量为 $x(t)=[x^1(t)', x^2(t)', ..., x^n(t)', x_{TS}(t)', x_{EE}(t)']'$。系统控制向量为 $u(t)=[u^1_{MT}(t)', u^2_{MT}(t)', ..., u^n_{MT}(t)', u_{TS}(t)', u_{EE}(t)']'$。系统控制输出矢量为 $z(t)=[\Delta f^1(t), \Delta f^2(t), ..., \Delta f^n(t)]'$ 其中 n 表示微电网系统的总数。最后，本章将考虑的多微网系统转换为以下形式：

$$\begin{cases} dx=(Ax+A_d x(t-\tau(t)))+Bu+Cv)dt+RxdW(t) \\ z=Dx \end{cases} \tag{2-12}$$

从（2-3）到（2-12），我们通过微分方程建模将该系统转化为了一个数学控制系统，其中 A、B、C、D、R、A_d 为系统参数矩阵，由公式（2-3）至（2-10）整理得出，由于这些矩阵维度和体积过大，因此本文不在正文中展示其内容。本章节的主要工作是通过求解得到的控制信号 u 对任务调度和可控发发电机进行控制，从而消除该具有时滞 $\tau(t)$ 和随机性 $W(t)$ 的多微网系统的系统输出 z 受到外部扰动干扰 v 的不良影响。其中 z 表示系统输出，即各个微电网内部的母线频率偏差变化值。该问题的具体内容将在下一节详细讨论。

2.3　问题提出与解决

通过完成上述数学建模，该系统内部的随机性、时滞性以及可能受到的外部扰动均包含在了系统（2-12）之中。外部干扰, 如太阳辐射的突然变化会影响光伏发电功率变化，会严重影响各微电网系统内部母线频率偏差的稳定[17]。此外，系统本身具有的时滞性和随机性也增大了母线频率稳定控制的复杂性[66] [67]。

因此，针对上述问题，该多微网系统的母线频率偏差稳定控制问题在本节中被描述为一种随机鲁棒 H_∞ 控制问题，并通过 LMI 方程求得控制信号。从而使得该具有随机性和时滞的物理系统在受到外部干扰时，控制器能够迅速发出控制信号，通过控制各个微电网内部的可控发电机发电功率以及微电网间的任务调度和能量传输，维持各个微电网系统内部的母线频率偏差稳定。

本文剩余部分的主要目标是得到一种状态反馈控制器 $u^*=Kx$，以便适当减少受控输出即母线频率偏差 z，即消除外部干扰输入 v 对本身具有随机性和时滞性的系统（2-12）的不良影响。

综上所述，对于本章所考虑的具有随机性以及时滞的多微网系统（2-12），其鲁棒 H_∞ 性能好坏主要取决于来自太阳辐射的突然变化、本地任务量的突然增多等外部干扰输入对于各个微电网内部母线频率偏差的影响是否得到有效抑制。为实现这一目标，在数学上，我们为系统（2-12）提供了一个 H_∞ 鲁棒稳定（或等价的鲁棒稳定）的定义，如下所示。

定义：给定一个标量 $\gamma>0$, 本文研究的频率调节问题可以用 H_∞ 性能来描述，

其公式为 $\|z(t)\| < \gamma\|v(t)\|$，其中 $\|\cdot\|$ 定义为：

$$\|z(t)\| \triangleq \left(\mathbb{E}\left\{\int_0^\infty |z(t)|^2\,dt\right\}\right)^{\frac{1}{2}}, \tag{2-13}$$

其中 γ 表示干扰衰减。然后，H_∞ 控制问题的性能指标可以表述为公式（2-14）[68]。

$$J(u,v) \triangleq \mathbb{E}\left[\int_0^T (z'(t)z(t) - \gamma^2 v'(t)v(t))dt\right]. \tag{2-14}$$

本章研究的核心优化指标为公式（2-14），即为了解决该带有时滞的随机鲁棒 H_∞ 控制问题，我们需要求解得到合适的控制信号 u^*，使得在扰动 v 的干扰下，H_∞ 性能指标 (2-14) 小于 0, 简单来说就是尽量减小外部扰动对于系统输出母线频率偏差的影响。由于本系统建模时考虑了任务调度的时延以及光伏发电的随机性，为了求解得到满足代价函数 (2-14) 小于 0 的控制信号 u^*，本章节采用了李雅普诺夫函数、伊藤公式等数学方法推导出线性矩阵不等式方程（LMI 方程），从而能够利用现有的数学求解工具求解控制信号。该 LMI 方程如定理 1 所示。

定理 1.[68] 给定一个标量 $\gamma > 0$, 如果存在满足 LMI（A.2-10）的对称矩阵 $X > 0$、$S > 0$ 和矩阵 Y，则可以得到一个控制输入 u^*，以实现时滞随机系统输出的鲁棒稳定，其中 $u^* = Kx$, $K = YX^{-1}$。

$$\begin{bmatrix} \Omega & A_d X & XD' & XR' & C \\ XA_d' & -(1-h)S & 0 & 0 & 0 \\ DX & 0 & -I & 0 & 0 \\ RX & 0 & 0 & -X & 0 \\ C' & 0 & 0 & 0 & -\gamma^2 I \end{bmatrix} \leqslant 0, \tag{2-15}$$

其中 $\Omega = AX + XA' + BY + Y'B' + S$。

该 LMI 方程可以参考文献 [68] 中的思路来推导得到，详细的证明过程在本文附录中已说明。完成上述步骤之后，基于 LMI 方程（2-12）以及总系统方程（2-15），一些求解工具可以相对轻易地求解得到控制反馈增益 $K = YX^{-1}$，如 matlab CVX 工具箱, 进而得到控制信号 $u^* = Kx$。

然而，较小的干扰抑制通常表明控制器的反馈增益较大，这在实际的多微网场景中可能并不合适。因为，反馈增益较大的反馈控制信号可能会导致可控发电机的过度功率调整，从而导致潜在的设备损害并且增加相应的控制成本[69], 并且可控发电机的过度控制同样会带来更多的燃料消耗以及相应的经济成本。为了避免该过度控制的情况，可以通过限制反馈增益的大小实现。利用舒尔补定理，可

以得到：

$$\begin{bmatrix} P & I \\ I & X \end{bmatrix} \geqslant 0 \leftrightarrow P - X^{-1} \geqslant 0, \tag{2-16}$$

其中 P 是半正定对称矩阵，用于表达 X^{-1} 的上限。通过舒尔补定理，公式（2-16）右侧的不等式被转换为左侧的线性矩阵不等式形式，从而易于被求解。根据反馈增益 $K = YX^{-1}$，可以得到 $\|K\|_2 \leqslant \frac{1}{2}\left\|X^{-1}\right\|_2 + \frac{1}{2}\|Y\|_2 \leqslant \frac{1}{2}\|P\|_2^2 + \frac{1}{2}\|Y\|_2^2$, 其中 $\|\cdot\|_2$ 为 2 范数。通过最小化反馈增益 K 的上限 $\|P\|_2^2$ 和 $\|Y\|_2^2$，得到的控制信号的控制强度将会受到限制，这将防止由于较大反馈增益带来的过度控制。值得注意的是，降低反馈增益 K 也会带来控制效果相应变差，但是本章认为牺牲小幅度控制效果换取更高的安全性和更低的控制成本 (燃料消耗) 是有实际意义和需求的。基于上述讨论，我们可以得到以下优化问题。

$$\begin{aligned} &min && \|P\|_2^2 + \|Y\|_2^2 \\ &s.t. && \begin{bmatrix} \Omega & A_d X & XD' & XR' & C \\ XA_d' & -(1-h)S & 0 & 0 & 0 \\ DX & 0 & -I & 0 & 0 \\ RX & 0 & 0 & -X & 0 \\ C' & 0 & 0 & 0 & -\gamma^2 I \end{bmatrix} \leqslant 0 \\ &&& S > 0 \\ &&& X > 0 \\ &&& \begin{bmatrix} P & I \\ I & X \end{bmatrix} > 0 \end{aligned} \tag{2-17}$$

表 2.1　仿真参数表

参数	数值	参数	数值	参数	数值	参数	数值
T_{TC}^k	[1.4,1.8]	T_{PV}^k	[1.1,1.4]	T_{MT}^k	[1.2,1.5]	T_{BES}^k	[0.12,0.15]
T_{TS}^k	[0.11,0.16]	r_{TC}^k	[0.5,0.9]	T_L^k	[1.5,1.8]	T_{EE}^i	[0.2,0.22]
b_{TS}^k	[1.2,1.5]	r_{PV}^k	[0.6,0.9]	b_{MT}^k	[1.5,2.4]	b_{ee}^i	[1.4,1.7]
$\bar{D}^k$	[0.011,0.016]	$\bar{M}^k$	[0.18,0.23]	r_{BES}^k	[1.2,1.5]	r_L^k	[1.1,1.2]
γ	0.35	h	0.7	G	4		

2.4　数值仿真

为了验证该方法的可行性，文中给出了数值模拟结果本节。表2.1参照文献 [16] 中的参数设定，给出了各个微电网系统参数的数值，其中 [...] 代表参数在这个区间中以同等概率随机取值。本章中任务调度的时延 $\tau(t)$ 的变化如图2.2所示。并且该时间延迟 $\tau(t)$ 时在约束限制 $0 < \tau(t) \leqslant \mu < \infty, \dot{\tau}(t) \leqslant h < 1$ 下由程序随机生成的，其中 μ 取 0.06。

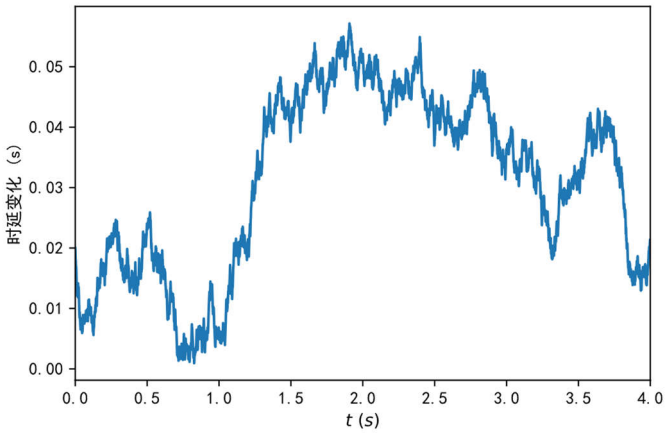
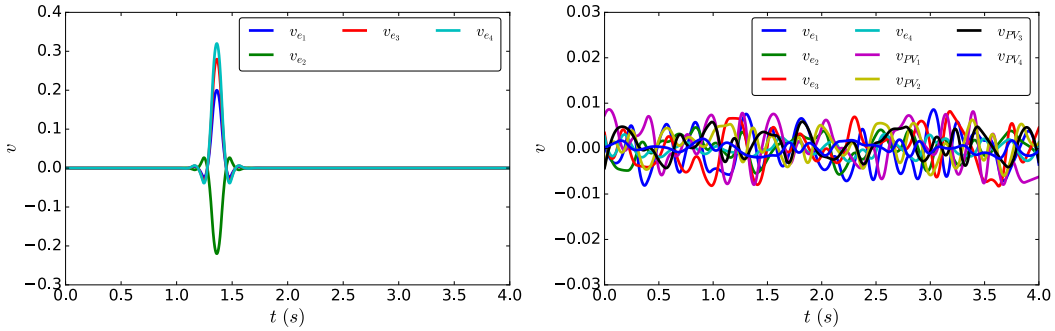


图 2.2　时延 $\tau(t)$

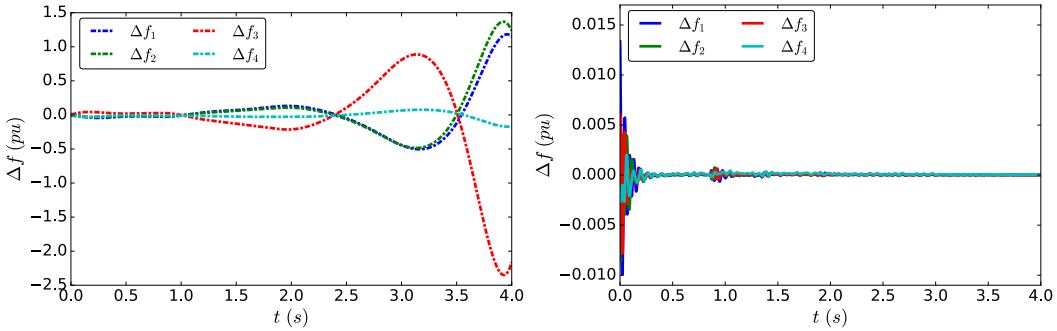


(a) 脉冲扰动输入　　(b) 连续扰动输入

图 2.3　两种外部扰动

为了展示该随机 H_∞ 鲁棒控制效果，本次算例分别采用两种不同外部扰动进行仿真测试，分别是脉冲扰动输入 (图2.3(a)）和连续扰动输入（图2.3(b)）。脉冲扰动输入的特点是在某一时刻有较大能量的扰动发生，如图2.3(a) 中的扰动波形在 1.4s 左右发生赋值较大的波动。连续扰动输入的特点是在较长时间范围内持续发生能量较小的扰动，如图2.3(b)。

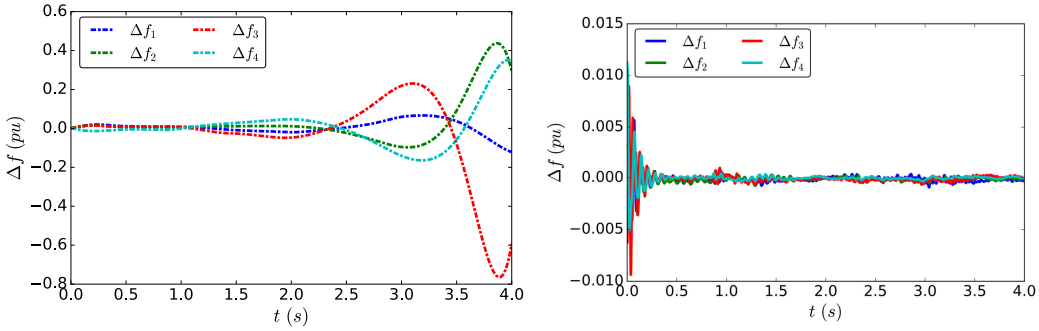
在脉冲扰动输入的干扰下，通过比较图2.4（a）和2.4（b），可以看出，在所提出的控制策略下，四个微电网内频率偏差是有效稳定的。值得注意的是，在没有实施控制器的情况下，约 1.3 秒的干扰会导致较大的频率偏差，这可能会导致系统



(a) 无控制输入　　(b) 有控制输入

图 2.4　脉冲扰动下的频率偏差

断电，而相同的干扰在所提出的控制器下只会导致较小的波动。



(a) 无控制输入　　(b) 有控制输入

图 2.5　连续扰动下的频率偏差

在连续扰动输入的干扰下，比较图2.5（a）和图2.5（b），可以看出，所提出的方法使频率偏差在连续干扰下保持稳定。与图2.4（b）相比，图2.5（b）中的频率偏差控制效果稍差，这是由于持续干扰的长期负面影响。

本文提出了一种新的基于能量路由的控制策略，综合控制能量路由器间的能量传输、任务调度以及各个微电网内部的燃气轮机发电。本文将计算任务视为一种可控的地理可转移负荷，通过能量路由器的任务调度功能实现负荷的微网间转移，从而提高了离网状态下多微网系统的能量调控能力，从而在应对同样程度的随机性和外部扰动时能够更好维持母线频率稳定性。如图2.6所示，本研究提出的基于能量路由在外部干扰强度较大时的控制效果明显由于仅考虑能量传输的方法[38,57]的控制效果。

通过求解优化问题（3-1），本章节以微电网系统 3 中的母线频率偏差和可控发电机功率变化为例说明控制效果。可以看出，在考虑过度控制抑制反馈增益 $\boldsymbol{K}$ 的上限后，母线频率偏差的控制效果虽然在浮动上的平均变化变大，但是显然在波动趋势上变得更加平缓且更靠近零轴。而对于可控发电机功率变化来说，十分明显的是在考虑过度控制后，可控发电机发电功率偏差变得更加温和。因此，当实

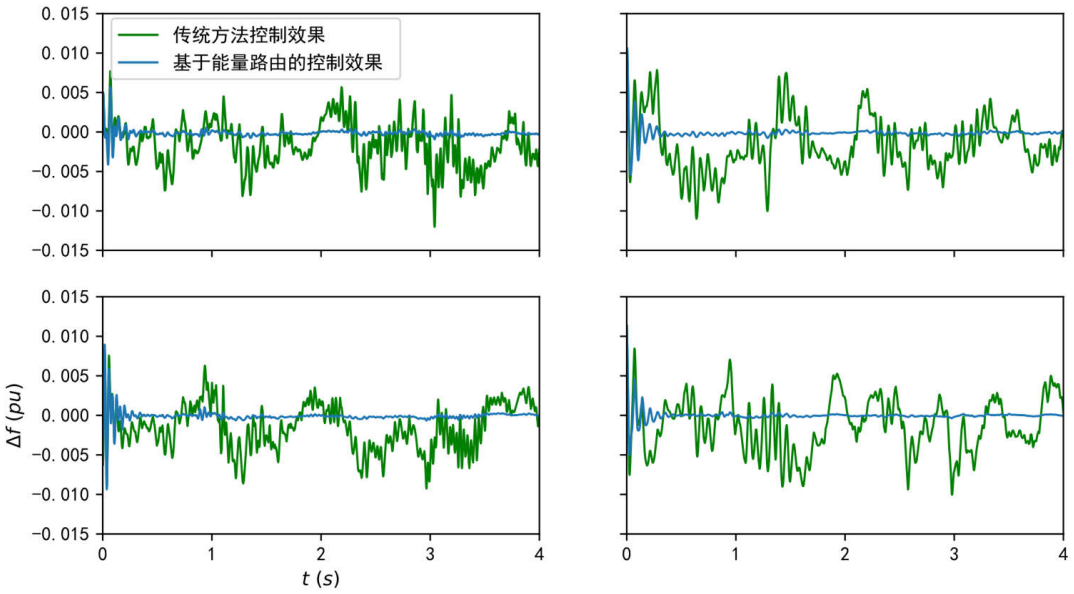


图 2.6　与传统方法对比图

际工程中的可控发电机无法承受强烈的功率变化时，该考虑过度控制的方法更加符合实际需求。

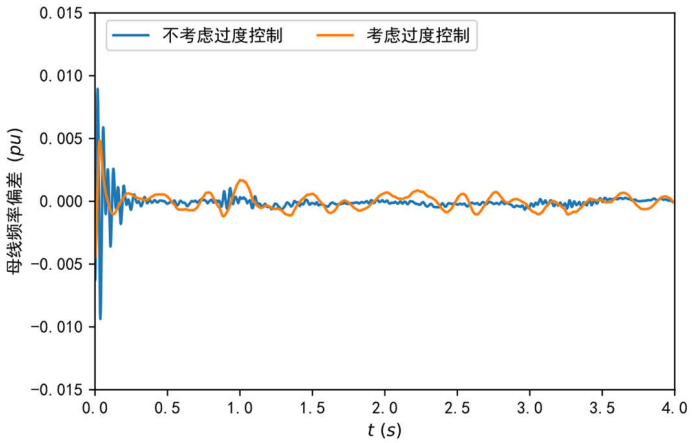


图 2.7　母线频率偏差对比图

2.5　本章结论

本文讨论了由能量路由器连接的多微网系统母线频率偏差稳定调节问题。考虑到系统的动力学特性、任务调度的时滞和外部干扰，本章节采用一系列微分方程对任务调度、任务处理和能源功率变化等动态过程进行建模。最后，我们将该母线频率偏差调节问题转化为了一种随机鲁棒 H_∞ 控制问题，并使用李雅普诺夫函数、伊藤公式等数学方法推导出线性矩阵不等式方程（LMI 方程），从而能够利

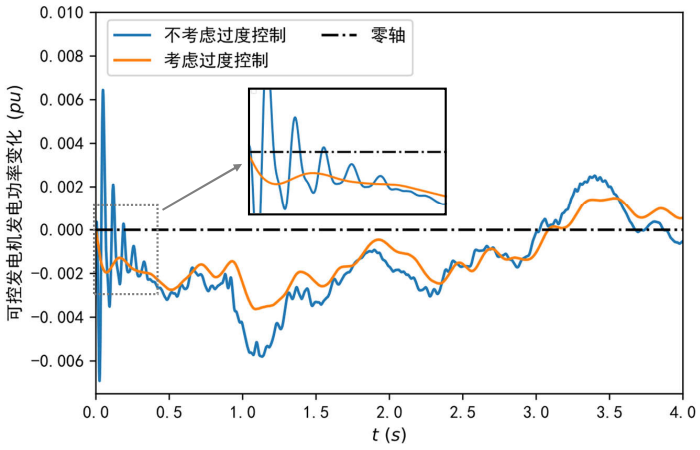


图 2.8　微型燃气轮机功率变化对比图

用现有的数学求解工具求解得到控制信号。此外，在求解控制信号的过程中，本文另外通过引入一些新的约束条件缓解由于求解出的反馈增益 $\boldsymbol{K}$ 过大而引起的设备过度控制问题，最后上述方法的有效性和可行性在数值模拟成功地得到了验证。

第 3 章　考虑马尔可夫参数跳变的多微网电压鲁棒控制研究

3.1　研究背景和贡献

本章节研究的主要工作是解决在离网状态下的多微网系统中的直流电压随机鲁棒控制问题。为确保整个能源互联网系统稳定运行，在每个微电网系统中保持直流电压偏差稳定是非常重要的[16,70]。影响电压偏差的最重要的因素就是供-耗功率偏差，即生产的电力与相应的负荷消耗之间的偏差，因此可再生能源的大量接入和大量任务计算本地化所带来的随机性、时延以及各类设备的参数变化等因素也会对供-耗功率平衡乃至电压偏差造成严重的影响[16]。

考虑到可再生能源存在的强随机性和间歇性，单个离网状态下的微电网可能难以通过自身的电力生产实现的内部的功率平衡，因此多个微电网之间的能量交换受到了广泛关注[35,52]。近年来，许多研究都集中在微网的电压和频率稳定控制与优化上。文献 [71] 提出了一种新的二次控制策略，以保持电压和频率偏差的稳定性。此外，微网中的一个重要问题是延长储能设备的使用寿命[72]。为了获得更精确的光伏和负载能量模型，在文献 [43] 中提出了一种将神经网络和随机微分方程相结合的方法。提出了延长储能设备寿命的方法。并且，微电网系统中不仅能量层存在明显的随机性和不确定性[17]，例如光伏发电直接受阳光强度的影响，负载受当地用户生活活动的影响，而且信息层中也存在随机性和不确定性[31]，例如在能量路由器中计算任务的数量等。为了模拟系统建模中的真实随机性和不确定性，一些经典方法，如布朗运动、白噪声方法[73]等，已被应用于许多研究[17]。

然而很少有文章讨论系统参数的随机性和波动性，在现实工程中，各个设备由于工作模式切换或者其它外界因素，其对应的微分方程建模的参数往往不是一成不变的，因此通过微分方程对系统进行建模时，忽略参数的变化可能会影响最后的控制效果[74-75]。因此，为了模拟这一系统参数变化，本章节采用带有马尔可夫参数跳变的微分方程对微电网中的能量-信息动态过程进行建模。并且，由于考虑马尔可夫参数跳变后会导致问题求解变得更为复杂和困难，本章研究将一种先进的考虑马尔可夫参数跳变的随机鲁棒 H_∞ 控制方法以及最优粒子群算法用于求解这一问题。

马尔可夫跳变系统是一个由一组线性系统中的一个系统控制的动态系统，它由一个连续时间的马尔可夫过程决定，该过程是线性系统的活动过程。当马尔可夫过程的当前状态发生变化时，连续状态的动力学从一个系统“跳跃”到另一个系统[74]。马尔可夫跳变系统已被应用于微电网控制问题的许多研究中。在文献 [76]

中，马尔可夫跳用来描述微电网系统中时滞的随机性。为了在随机 DoS 攻击下保持微电网的频率稳定性，在文献 [15] 中，马尔可夫跳变系统被用来描述系统在不同攻击下的不同状态。

综上所述，由于光伏设备、传统发电设备、负载和储能设备具有一定随机性和不确定性，如设备本身的故障和来自外部的扰动等，设备本身可能会出现不可预知的结构变化，为了更好地表达这些变化，本章节采用带有马尔可夫参数跳变的微分方程对系统进行建模。通过系统建模，便可以通过本章节提出的 H_∞ 鲁棒控制方法得到控制信号从而调控能量路由和发电等动态过程，实现各个微电网系统内部的功率平衡以及电压随机鲁棒稳定的目标。根据上述过程，所研究问题被转化为了考虑马尔可夫参数跳变的 H_∞ 鲁棒控制问题，最后通过推导 LMI 方程以及使用粒子群优化算法等求解工具进行求解控制信号，实现了对所讨论的由能量路由器连接的多微电网系统内部的直流电压稳定控制。

本章的主要内容如下：

1）本章研究首次将马尔可夫参数跳变常微分方程不仅用于能源系统建模，而且用于信息调度和任务计算建模。本工作将由能量路由器连接的多微网系统建模为一种具有马尔可夫参数跳变、随机性、外部干扰和时滞的系统。通过这样做，该系统的建模更接近真实的物理场景，并且可以更好地表达系统的复杂性。

2）本章研究将多微电网系统的直流电压稳定问题表述为马尔可夫参数跳变系统的随机鲁棒 H_∞ 控制问题。虽然建模系统比较复杂，但可以在状态反馈形式中推导得到 LMI 方程，这使得该问题变得容易被一些现有的数学算法进行求解。结果表明，该方法在解决本章中提出的多微电网系统中的直流电压偏差稳定控制问题上具有不错的控制效果。

3）仿真结果表明，本章研究所提出的 H_∞ 方法相比本文第 2 章提出的 H_∞ 方法具有更好的控制效果。此外，在满足 LMI 的基础上，本章研究进一步通过粒子群优化算法算法最小化参数 γ，进一步提高了该控制方法稳定系统内部直流电压偏差的效果。

3.2　系统建模

本节首先阐述了所研究的多微电网系统场景，并通过一系列带有马尔可夫参数跳变的微分方程对该场景中的包括电力生产、电力传输、信息调度等在内的多个动态过程进行数学建模，并分析了该建模方法的合理性。

3.2.1　系统描述

为了一般化多微电网系统，假设存在 n 个微电网，并且两个之间可能存在能量以及信息交换。

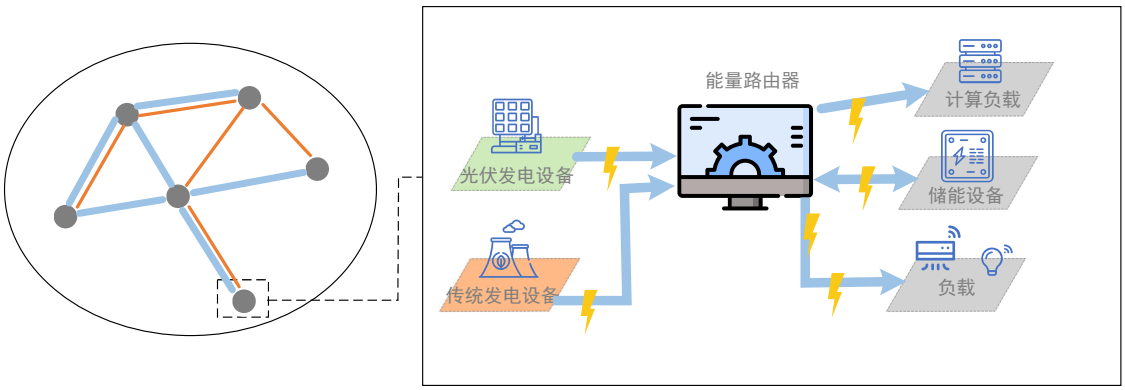


图 3.1　多微电网系统架构图

如图3.1所示，描述了该基于能量路由的多微网系统架构。由于距离、地理位置等原因，并不是所有的能量路由器都是连通的。在图3.1的左侧，在能量层中，多个能量路由器通过能量传输线连接，其中蓝线表示能量传输线路。此外，在信息层中，在一些能量路由器之间存在信息传输，这由黄线表示。图 1 的右侧显示了每一个微电网的详细构成。每个微电网通常连接光伏设备、传统发电设备（可控微型燃气轮机）、储能设备和各种负载。

为了使系统建模更接近真实物理场景，更好地表达系统的随机性，本文中的系统参数的状态转移遵循有限状态马尔可夫跳变过程。马尔可夫链 r_t^k 是表示所研究多微网系统中第 k 个微电网参数跳变所遵循的有限状态马尔可夫跳过程，其中马尔可夫链的状态空间是 $S = 1,2,...,s$。转移概率矩阵表示为 $\Pi = [\pi_{i,j}]$，其中 $i,j = 1,2,...,s$，并满足

$$Pr\{r(t+dt) = j | r(t) = i\} = \begin{cases} \pi_{i,j}dt, & i \neq j \\ 1 + \pi_{i,i}dt, & i = j \end{cases} \tag{3-1}$$

其中模态切换率 $\pi_{i,j} \geqslant 0, \pi_i \triangleq \pi_{i,i} \leqslant 0$ 并且 $\sum_{j=1,j\neq i}^{s} \pi_{i,j} = -\pi_{i,i}$。为说明本文使用带有马尔可夫参数跳变的微分方程建立各个动态过程的合理性，本文首先在下文中以光伏的建模为例，通过一些经典文献的支撑对这一建模过程进行解释。此外，如微型燃气轮机发电功率变化等在内的其它动态过程也同样采用了相似的建模方式。

3.2.2　负载和光伏建模

在第 2 章中本文已经提到了 Bevrani 等人首先在文献 [59] 中使用微分方程对能源互联网内部的光伏、可控发电机发电、储能设备充放电等功率变化进行了较为基础的动态建模，并基于此类建模形式很多研究工作[16,37]引申出了多种更加复杂的微分方程建模方法，如添加随机性、不确定性等等。具体阐述说明间章节 2.2.2。能源互联网场景下的多微电网系统作为一种物理系统，并无法保证其系统在运行期间内其系统参数是恒定不变的，但是上述所有建模都假设了系统参数不会发生变化，在参数设定时均设定为一个恒定不变的常数。因此，面对这一建模上的缺陷，本文采用了带有马尔可夫参数跳变的微分方程对微电网内部的物理、信息动态过程进行建模，使得建模更加符合实际，文献 [2] 也类似地采用了带有马尔可夫参数跳变的微分方程对微电网进行建模。

为了给边缘设备提供更环保、更经济的能源，有必要充分利用可再生能源。本文将光伏作为可再生能源的来源。考虑到光伏和负载可能会受到外部干扰，如光强和用户用电的突然变化，为了更真实地建模负载和光伏，使用带有干扰的常微分方程对其进行建模。负荷和光伏设备在第 k 的功率变化建模如下[17]。并且在文献 [17] 中指出，马尔可夫参数的跳变路径可以由基于文献 [54] 中提到的参数估计方法得出。

$$\Delta \dot{P}_L^k(t) = -\frac{1}{T_L^k(r_t^k,t)}\Delta P_L^k(t) + \frac{1}{T_L^k(r_t^k,t)}\upsilon_L^k(t), \tag{3-2}$$

$$\Delta \dot{P}_{PV}^k(t) = -\frac{1}{T_{PV}^k(r_t^k,t)}\Delta P_{PV}^k(t) + \frac{1}{T_{PV}^k(r_t^k,t)}\upsilon_{PV}^k(t), \tag{3-3}$$

其中 $T_{PV}^k(r_t^k,(t))$ 和 $T_L^K(r_t^k,(t))$ 分别是负载和光伏设备的时间常数，υ_L^k 是负载可能受到的外界干扰，如用户用电的突然变化，$\upsilon_{PV}^k(t)$ 代表光伏设备可能受到的外界干扰，如光照强度的突然变化。在本文中，之后的包括微型燃气轮机、储能设备在内的所建立的微分方程也是基于文献 [59] 以及后续其它文献 [37, 43] 提供的模型得到的。

3.2.3　微型燃气轮机建模

可再生能源具有很强的随机性，可能导致微电网内部的电力供需不平衡，严重影响任务计算等负荷的正常工作。因此，本文将消耗传统化石能源的微型燃气轮机作为一种可控电源部署在每个微电网中。通过控制微型燃气轮机的发电量，可以补偿光伏发电的不足。第 k 微电网中微型燃气轮机的功率变化建模如下所示[17]。

$$\Delta \dot{P}_{MT}^k(t) = -\frac{1}{T_{MT}^k(r_t^n,t)}\Big(\Delta P_{MT}^k(t) + b_{MT}^k(r_t^n,t)u_{MT}^k(t)\Big), \tag{3-4}$$

其中 $T_{MT}^{k}(r_t^k,t)$ 是微型燃气轮机发电功率变化的时间常数, $b_{MT}^{k}(r_t^k,t)$ 是与控制器相关的系统系数，以及 $u_{MT}^{k}(t)$ 代表控制输入。

3.2.4　任务计算与调度建模

本文提出的能量路由概念的核心运行载体为能量路由器，一方面，能量路由器可以处理和调度计算任务，另一方面，其也具有微电网间能量传输的功能。随着智能城市的发展，越来越多的计算任务对时延和网络稳定性提出了严格的要求[77]。作为一种有效且有前途的计算范式，边缘计算负责最初在云中处理的部分计算任务[78] [79]。因此，对于本文所考虑的多微网系统来说，这些大规模任务所造成的能量消耗是不可忽略的。基于这一情况，任务计算和任务调度对本文研究的多微网系统的功耗平衡偏差乃至电压偏差有着显著的影响。为了动态地描述这些影响，带有马尔可夫的常微分方程被用来建模任务计算和任务调度。

考虑到任务计算的动态性，文献 [44] 使用微分方程模拟边缘计算节点间的资源调度。因此，为了更好地表达任务计算的动态性质，我们使用常微分方程来表示计算任务的数量。在本文中，我们考虑到能量路由器中的计算模块可能会受到外部扰动的干扰，例如来自用户的任务请求的突然增加。这些干扰会显著改变任务计算带来的能耗，从而影响直流电压偏差。考虑到上述所有因素，基于文献 [44] 的建模思路，第 k 个微电网中的能量路由器的计算任务变化由带有干扰的常微分方程建模。

$$\Delta\dot{S}_{TC}^{k}(t)=-\frac{1}{T_{TC}^{k}(r_t^k,t)}S_{TC}^{k}(t)+\frac{1}{T_{TC}^{k}(r_t^k,t)}v_{TC}^{k}(t), \tag{3-5}$$

其中 $T_{TC}^{k}(r_t^k,t)$ 为时间常数, 并且 $v_{TC}^{k}(t)$ 表示外部干扰，例如来自用户的任务请求的突然增加。

基于章节 2.2.4 中的讨论以及任务调度计算变化量模型（3-6）, 本文进一步将其建模为带有马尔可夫参数跳变的常微分方程。带有马尔可夫参数跳变的任务调度变化量建模 $\Delta S_{TS}^{m}(t)$ 如下所示。

$$\Delta\dot{S}_{TS}^{m}(t)=\frac{1}{T_{TS}^{m}(r_t^k,t)}\Big(-\Delta S_{TS}^{m}(t-\tau(t))+b_{TS}^{m}(r_t^k,t)u_{TS}^{m}(t)\Big), \tag{3-6}$$

其中，$\Delta S_{ts}^{m}(t)$ 表示在第 m 条通信线路上调度的任务量的变化，并且 $u_{ts}^{l}(t)$ 是控制输入。$T_{ts}^{m}(r_t^k,t)$ 和 $\tau(t)$ 分别表示任务调度的时间常数和任务传输延迟。系统系数 $b_{ts}^{m}(r_t^k,t)$ 可通过参数估计方法获得。本章节所设计的控制方法为中心式，其通过调整控制信号 u_{TS}^{m} 的大小从而改变第 m 条传输线上的计算任务调度量变化。比如，能量路由器 A 和 B 之间存在任务传输，当 A 所在微电网系统中任务量过大导致耗能过高且 B 所在系统供能压力较低时，可以通过设置一定的控制信号值，改变从

A 中调度到 B 中的任务变化量进而提高第 m 条传输线上整体的任务调度量；反之，若 B 系统的供功能压力也较大，该控制器可以通过控制信号 $u_{TS}^{m}(t)$ 改变能量路由器 A 向 B 调度的任务变化量进而降低第 m 条传输线上整体的任务调度量。这样，任务调度也参与进了整个多微网系统的能量平衡管理中，进而助于调节各个微电网系统内部的电压偏差稳定。

3.2.5　功率交换建模

在许多研究成果中，例如文献 [17]，微电网间的能量传输被认为是一个可控的过程，当某个微电网自身供能小于需求时，可以通过能量路由器将附近其他微电网中多余的电量调度给自身。在本研究中，能量路由器同样具备不同微电网系统间的能量交换功能，从而保持整个多微电网系统的电源供需平衡。第 l 个能量传输线 $\Delta P_{EE}^{l}(t)$ 之间的功率交换建模如下所示[17]

$$\Delta \dot{P}_{EE}^{l}(t)=\frac{1}{T_{EE}^{l}(r_t^k,t)}\Big[-\Delta P_{EE}^{l}(t)+b_{EE}^{l}(r_t^k,t)u_{EE}^{l}(t)\Big], \tag{3-7}$$

其中 $T_{EE}^{k}(r_t^k,t)$ 是功率交换的时间常数, $u_{EE}^{l}(t)$ 功率交换的控制输入，$b_{EE}^{l}(r_t^k,t)$ 表示与控制器相关的系统系数。

3.2.6　储能设备和电压偏差的建模

储能设备通过吸收功率偏差来维持微电网系统的电力供需平衡，从而保证微电网的正常运作。因此，本文将储能设备部署在每个微电网中。储能电池充放电功率变化值的建模如下所示[17]。

$$\Delta \dot{P}_{BES}^{k}(t)=-\frac{1}{T_{BES}^{k}(r_t^k,t)}\Big(\Delta P_{BES}^{k}(t)-r_{BES}^{k}(r_t^k,t)\Delta V^{k}(t)\Big), \tag{3-8}$$

其中 $T_{BES}^{k}(r_t^k,t)$ 是储能设备的时间常数，$r_{BES}^{k}(r_t^k,t)$ 表示系统参数。由于研究的重点不是储能设备本身，因此本文不考虑电荷态（SOC）。类似的模型已有很多研究采用，如文献 [57]。$\Delta V^{k}(t)$ 为直流电压偏差，其建模如下所示[41]。

$$\Delta \dot{V}^{k}(t)=-\frac{1}{p^{k}(r_t^k,t)}\Delta V^{k}(t)+\frac{1}{q^{k}(r_t^k,t)}\Delta P^{k}(t), \tag{3-9}$$

其中 $p^{k}(r_t^k,t)$ 和 $q^{k}(r_t^k,t)$ 是系统参数，$\Delta P^{k}(t)$ 表示第 k 个微电网系统内部的总线功率偏差，并满足以下等式

$$\begin{aligned}\Delta P^{k}(t)=&-E\cdot\Delta S_{TC}^{k}(t)-\Delta P_{L}^{k}(t)+\Delta P_{PV}^{k}(t)+\Delta P_{MT}^{k}(t)\\&\pm\Delta P_{BES}^{k}(t)+\sum_{l=1}^{L}f(k,l)\cdot\Delta P_{EE}^{l}(t)\end{aligned} \tag{3-10}$$

$$+\sum_{m=1}^{M} g(k,m)\cdot E\cdot \Delta S_{TS}^{m}(t).$$

$f(k,l)$ 表示能量交换的方向。当 $f(k,l)=1$, 第 k 个微电网内部的能量路由器通过线路 l 将电能传输到其它能量路由器中。当 $f(k,l)=-1$ 时，第 k 个微电网内部的能量路由器通过传输线 l 接收从另一个能量路由器发送的电能，L 表示共有 L 条能量传输线，$\sum_{l=1}^{L} f(k,l)\cdot \Delta P_{EE}^{l}(t)$ 一项表示传输到第 k 个微电网内部的能量传输功率变化值。类似的，M 和 $g(k,m)$ 分别代表全部的 M 条信息通信线路和信息通信的方向，E 是任务变化以及电力消耗的变化之间的比例关系，任务量变化值与比例系数 E 的乘积则为功率变化值，如 $E\cdot \Delta S_{TC}^{k}(t)$ 一项为第 k 个微电网内部的本地任务量变化导致的负载功率变化；$\sum_{m=1}^{M} g(k,m)\cdot E\cdot \Delta S_{TS}^{m}(t)$ 一项表示调度到第 m 条通信线路上的计算任务变化值所导致的第 k 个微电网内部负载功率变化值。

3.2.7　所研究的多微网系统建模

在本小节中，所研究的多微网系统被简化为一种数学状态空间控制系统。首先，所研究的离网状态下的多微网系统中的第 k 个微电网的状态向量定义被为 $x^{k}(t)=[\Delta S_{TC}^{k}(t),\Delta P_{PV}^{k}(t),\Delta P_{L}^{k}(t),\Delta P_{MT}^{k}(t),\Delta P_{BES}^{k}(t),\Delta V^{k}(t)]'$。控制输入向量定义为 $u_{MT}^{k}(t)$，并且干扰输入向量定义为 $v^{k}(t)=[v_{TC}^{k}(t),v_{PV}^{k}(t),v_{L}^{k}(t)]'$。传输线的系统状态向量定义为 $x_{EE}(t)=[\Delta P_{EE}^{1}(t),\Delta P_{EE}^{2}(t),...,\Delta P_{EE}^{l}(t)]'$。通信线路的系统状态向量定义为 $x_{TS}(t)=[\Delta S_{TS}^{1}(t),\Delta S_{TS}^{2}(t),...,\Delta S_{TS}^{m}(t)]'$。传输线的控制输入矢量定义为 $u_{EE}(t)=[u_{EE}^{1}(t),u_{EE}^{2}(t),...,u_{EE}^{l}(t)]'$。通信线路的控制输入向量定义为 $u_{TS}(t)=[u_{TS}^{1}(t),u_{TS}^{2}(t),...,u_{TS}^{m}(t)]'$。

然后，得到系统的总状态向量，即 $x(t)=[x^{1'}(t),x^{2'}(t),...,x^{n'}(t),x_{EE}^{'}(t),x_{TS}^{'}(t)]'$。总控制向量为 $u(t)=[u_{MT}^{1'}(t),u_{MT}^{2'}(t),...,u_{MT}^{n'}(t),u_{EE}^{'}(t),u_{TS}^{'}(t)]'$。该系统的输出向量为 $z(t)=[\Delta V^{1}(t),\Delta V^{2}(t),...,\Delta V^{n}(t)]'$。

通过这样做，系统可以转化为一个数学状态空间控制系统（3-11）, 其中 A、B、C、D、A_d 为系统参数矩阵，由公式（3-2）至（3-9）整理得出。不失一般性的情况下，本研究假设该多微网系统中不同微电网参数跳变遵循同一个马尔可夫链条 r_t。

$$\begin{cases} dx(t)=[A(r_t,t)x(t)+A_d(r_t,t)x(t-\tau(t))+B(r_t,t)u(t)+C(r_t,t)v(t)]dt \\ z(t)=D(r_t,t)x(t) \end{cases} \tag{3-11}$$

根据系统（3-11），本章节的主要工作是通过求解得到的控制信号 u 对任务调度、能量传输和可控发发电机进行控制，从而消除该具有时滞 $\tau(t)$ 以及带有参数跳变的多微网系统的系统输出 z 受到外部扰动干扰 v 的不良影响。其中 z 表示系

统输出，即各个微电网内部的母线直流电压偏差变化值。该问题的具体内容将在下一节详细讨论。

3.3　问题的提出与解决

通过完成上述数学建模，该系统内部的时滞性以及可能受到的外部扰动均包含在了系统（3-11）之中, 并且通过马尔可夫链条模拟了系统参数的随机跳变过程。马尔科夫跳变系统实际是一种具有多个模态的随机系统，每个模态下的系统参数不完全相同，并且系统在各个模态之间的跳变转移是由一组马尔科夫链来决定的。这使得本文中的建模更加符合实际，也同样增大了母线电压稳定控制的复杂性。

本章节的目标是针对上述考虑了系统参数跳变和任务传输时延的多微网系统，仍能够通过一种合理的控制器实现系统在有外部扰动干扰的情况下能保持各微电网内部的母线直流电压鲁棒稳定。一方面，所考虑的微电网系统可能会受到各种外部干扰的影响[17]。例如，突然进入大功率电气设备引起的负载功率变化、光照强度变化引起的光伏设备发电功率变化、用户任务请求突然增加引起的计算能耗功率变化等。另一方面，本研究所考虑的系统参数会随着时间的变化而发生“跳变”, 也就是说，系统参数模态随着马尔可夫链条跳变会导致系统的参数发生变化，而参数在发生变化后，控制器则需要改变其当前的控制策略以继续维持母线电压的鲁棒稳定，而当参数在一段时间内并没有发生挑变时，则控制器需要维持现有的控制策略不变。综上所述，考虑马尔可夫参数跳变进一步加大了控制的难度。

因此针对上述问题，在本节中，多微网系统的各子系统的直流母线电压偏差稳定调节问题被描述为一类鲁棒 H_∞ 控制问题，并且由于系统参数存在不同的模态，因此本研究的解决思路时推导、求解一组不同 LMI 方程得到不同参数模态下的控制信号，从而使得该具有时滞性的且系统参数存在随机跳变的物理电力系统在受到外部干扰时，控制器仍能够迅速发出控制信号，通过控制微型燃气轮机发电功率、能量路由器间的任务调度以及能源传输，维持各个微电网系统内部的母线电压偏差稳定。

本文剩余部分的主要目标是得到一组状态反馈控制器 $u_i^*(t) = -K_i x(t)$，以便适当减少受控输出即母线电压偏差 z，即消除外部干扰输入 υ 对本身具有时滞性和参数跳变的系统的不良影响。

为了实现这一目标，我们引入了一个标量 γ，它表示电压稳定性的抗干扰能力。γ 越小，控制器的抗干扰能力越强，系统的鲁棒性越强。通过这种鲁棒控制方法，可以通过调节 γ 值来抑制外部干扰对微电网系统直流电压偏差稳定性的不利影响。

3.3.1　针对带有马尔可夫参数跳变系统的母线电压鲁棒控制问题

综上所述，对于本章所考虑的具有系统参数跳变的多微网系统（3-11），其鲁棒 H_∞ 性能好坏主要取决于来自太阳辐射的突然变化、本地任务量的突然增多等外部干扰输入对于各个微电网内部母线电压偏差的影响是否得到有效抑制。为实现这一目标，我们为系统（3-11）提供了一个鲁棒稳定（或等价的鲁棒稳定）的定义，如下所示。

定义 1[74]：给定一个标量 $\gamma > 0$, 本文提出的直流电压鲁棒控制问题的 H_∞ 性能指标是 $\|z(t)\| < \gamma\|v(t)\|$, 其中 $\|\cdot\|$ 的定义如下

$$||z(t)|| \triangleq \left(\mathbb{E}\left\{\int_0^\infty |z(t)|^2\, dt\right\}\right)^{\frac{1}{2}}, \tag{3-12}$$

其中 $\mathbb{E}$ 表示数学期望。基于此 H_∞ 性能，代价函数公式如下。

$$J(u,v) \triangleq \mathbb{E}\left[\int_0^T (z'(t)z(t) - \gamma^2 v'(t)v(t))dt\right]. \tag{3-13}$$

通过建立代价函数（3-13），该 H_∞ 控制问题可以通过找到一组控制信号序列 $u_i^*(t)$，只要满足对于所有非零扰动 $v(t)$，$J(u,v) < 0$ 都能成立，既可以实现抑制外部干扰输入对于各个微电网内部母线电压偏差的影响。根据（3-13），显然，γ 越小，控制器的干扰抑制能力越强。利用文献 [74] 提出的推导思路，得到了解决这一问题的 LMI 方程。推导过程见附录。

定理 1[74]. 如果存在满足下列 LMI 的对称矩阵 $X_i > 0$，$R > 0$ 和矩阵 Y_i。稳定系统输出的控制器可表述为 $K_i = Y_i X_i^{-1}$ 和 $u_i^* = -K_i x$。

$$\begin{bmatrix} \Omega_i + A_{di}RAd_i' & X_i'D' & C_i & \Xi_i \\ DX_i & -I & 0 & 0 \\ C_i' & 0 & -\gamma_2 I & 0 \\ \Xi_i' & 0 & 0 & -\Gamma_i \end{bmatrix} \leqslant 0 \tag{3-14}$$

其中 $\Omega_i \triangleq X_i A_i' + A_i X_i - Y_i' B_i' - B_i Y_i + \pi_i X_i$，$\Xi_i \triangleq [\sqrt{\pi_{i,1}}X_i, \cdots, \sqrt{\pi_{i,i-1}}X_i, \sqrt{\pi_{i,i+1}}X_i, \cdots, \sqrt{\pi_{i,s}}X_i, X_i]$

并且 $\Gamma_i \triangleq diag[X_i, \cdots, X_{i-1}, X_{i+1}, \cdots, X_s, R]$. 为了简化符号，$A(r_t)$ 等类似符号被定义为 A_i。

所研究的带马尔可夫参数跳变的系统是一类由一组线性系统方程组成的动态系统，它由一个连续时间的马尔可夫过程确定。当马尔可夫过程的当前状态发生变化时，连续状态的动力学从一个系统“跳跃”到另一个系统。为了找到不同马尔

可夫状态下的目标控制输入 $u_i^*(t) = -K_i x(t)$，需要求解每组系统对应的 LMI，即定理 1 中的公式（A.2-10）。

3.3.2　优化 γ 取值

根据公式（3-13），我们可以发现当 γ 较低时，控制器的鲁棒性较好。因此，我们将原定理 1 推广到一个凸优化问题。LMI 和其他不等式用作约束，以最小化 γ 的平方。优化问题如下：

$$
\begin{aligned}
&min \quad k\gamma^2 \\
&s.t. \begin{bmatrix} \Omega_i + A_{di} R A d_i' & X_i' D' & C_i & \Xi_i \\ DX_i & -I & 0 & 0 \\ C_i' & 0 & -\gamma_2 I & 0 \\ \Xi_i' & 0 & 0 & -\Gamma_i \end{bmatrix} \leqslant 0 \\
&\gamma >= 0 \\
&X_i > 0 \\
&R > 0
\end{aligned} \tag{3-15}
$$

其中 k 是权重系数.

针对该优化问题（3-15），本章节采用了粒子群优化算法进行求解，粒子群算法具体执行过程的介绍如下：

1. 确定粒子的数量和移动范围，并且通过随机赋值初始化粒子的速度和位置。

2. 借助 MATLAB 的 μ-Analysis and Synthesis 工具箱从而基于方程（3-15）计算每个粒子的适应度值。

3. 计算之前访问过的每个例子的最佳位置 pbest 和全局最佳位置 gbest。

4. 使用以下方程式更新粒子的速度和位置。

$$v_{i+1} = w \cdot v_i + c_2 \cdot rand_1 \cdot (pbest_i - x_i) + c_2 \cdot rand_2 \cdot (gbest_i - x_i), \tag{3-16}$$

$$x_{i+1} = x_i + v_{i+1}. \tag{3-17}$$

$$w = w_{max} - \frac{w_{max} - w_{min}}{iter_{max}} iter. \tag{3-18}$$

其中 x_i、v_i 分别为第 i 个粒子的位置和速度，c_1、c_2 分别为学习因子，$rand_1$、$rand_2$ 分别为 $[0, 1]$ 内的随机数，w、w_{min}、w_{max} 分别为惯性权重、最小惯性权重和最大惯性权重,$iter$ 和 $iter_{max}$ 分别为当前迭代次数和最大迭代次数。

5. 检查迭代次数是否达到最大值，如果是则结束，否则返回步骤 2。

表 3.1　系统参数表

参数	取值	参数	取值	参数	取值	参数	取值	参数	取值
T_{TC}^{1}	1.7	T_{TC}^{2}	1.3	T_{TC}^{3}	1.5	T_{TC}^{4}	1.8	T_{PV}^{1}	1.6
T_{PV}^{2}	1.2	T_{PV}^{3}	1.4	T_{PV}^{4}	1.7	T_{L}^{1}	1.0	T_{L}^{2}	1.3
T_{L}^{3}	1.5	T_{L}^{4}	1.4	T_{MT}^{1}	0.05	T_{MT}^{2}	0.03	T_{MT}^{3}	0.04
T_{MT}^{4}	0.06	T_{BES}^{1}	0.5	T_{BES}^{2}	0.7	T_{BES}^{3}	0.3	T_{BES}^{4}	0.6
T_{ER}^{1}	0.24	T_{ER}^{2}	0.20	T_{ER}^{3}	0.25	T_{ER}^{4}	0.28	b_{MT}^{1}	1.1
b_{MT}^{2}	1.0	b_{MT}^{3}	1.4	b_{MT}^{4}	1.2	r_{BES}^{1}	1.1	r_{BES}^{2}	1.2
r_{BES}^{3}	1.4	r_{BES}^{1}	1.0	b_{ER}^{1}	1.5	b_{ER}^{2}	1.3	b_{ER}^{3}	1.1
b_{ER}^{4}	1.0	T_{TS}^{1}	0.11	T_{TS}^{2}	0.14	T_{TS}^{3}	0.16	T_{TS}^{4}	0.18
b_{TS}^{1}	1.1	b_{TS}^{2}	1.2	b_{TS}^{3}	1.6	b_{TS}^{4}	1.3	γ	0.8
E	0.8	p^{1}	0.10	p^{2}	0.14	p^{3}	0.13	p^{4}	0.030
q^{1}	0.033	q^{2}	0.027	q^{3}	0.12	q^{4}	0.12	$\pi_{i,j}$	0.001
T	10	k	0.01						

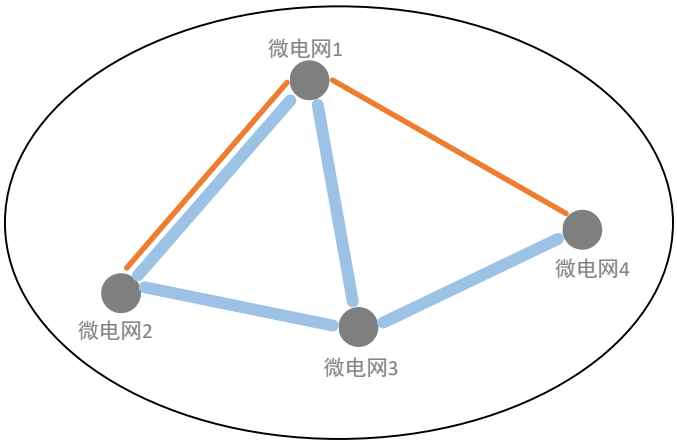


图 3.2　一种用于数值算例的典型多微网系统图

3.4　数值算例

在本节中，我们用 LMI 方法解决这个 H_{∞} 控制问题。数值模拟结果验证了该方法的可行性。

为便于仿真，本文采用了图3.2中所示的由四个微电网组成的多微网系统，其中蓝色线和橙色线分别表示存在能量传输和信息任务调度。为了更加实用，考虑到通信和地理位置的限制，本文所考虑的由能量路由器连接的多微网系统中并非

每两个能量路由器都有信息或能量传输。

系统参数列在表3.1中，不失一般性的，假设所研究多微网系统的所有微电网参数转换遵守一条马尔可夫链条。本研究将跳变模态数量设置为 5，即 $S=[1,2,...,s]$，其中 $s=5$，并且将表3.1中的参数值作为平均值并遵循均匀分布原则，随机生成不同模态下的系统参数。

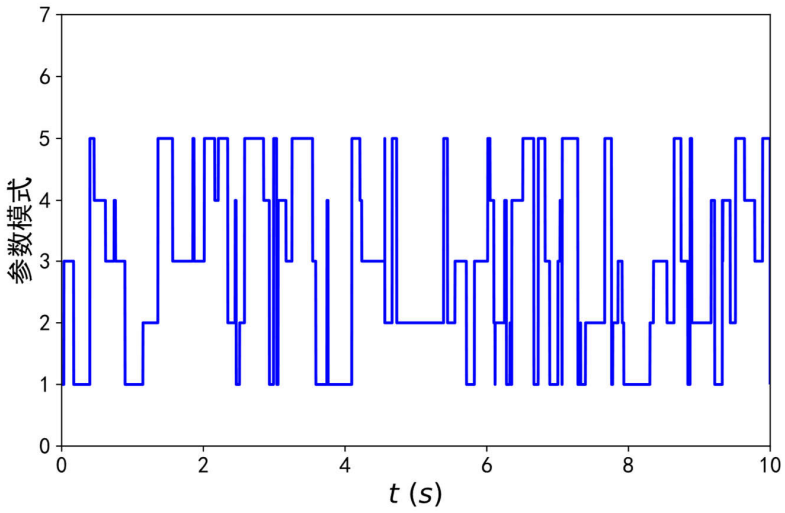


图 3.3　系统参数的状态转换。

算例 1. 在本算例中，证明了在所提出的 H_∞ 控制方法的控制下的直流电压偏差的稳定性。如图.3.3所示，系统的状态模态从 1 变为 5。马尔可夫跳变系统控制问题的解本质上等价于在不同的状态模态下找到相应的控制信号 u^*。在本文中，我们得到了 5 种不同的控制器 u^*，分别是 u^1，u^2，u^3，u^4 和 u^5。例如，当状态模态从 2 变为 1 时，控制信号也从 u^2 变为 u^1。

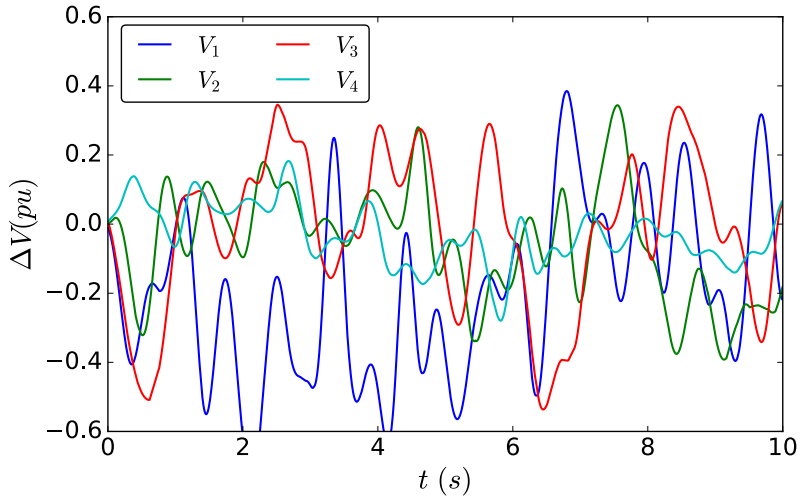


图 3.4　无控制下的直流电压偏差

本章的主要目的是在外部干扰和系统参数跳变的情况下，使各微电网内部的

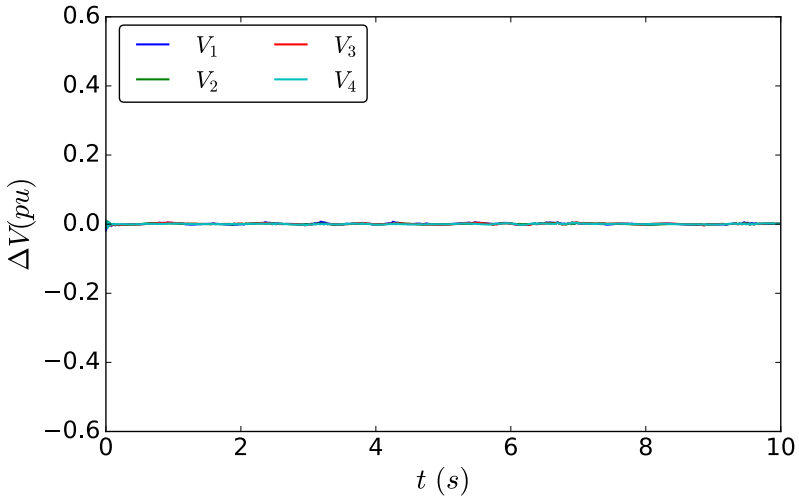


图 3.5　有控制下的直流电压偏差

直流电压偏差保持稳定。在图3.4中，在连续扰动下，无 H_∞ 控制的直流电压偏差明显处于不稳定的状态。通过比较图3.4和图3.5，可以看出该方法在抑制外部干扰方面具有良好的性能。

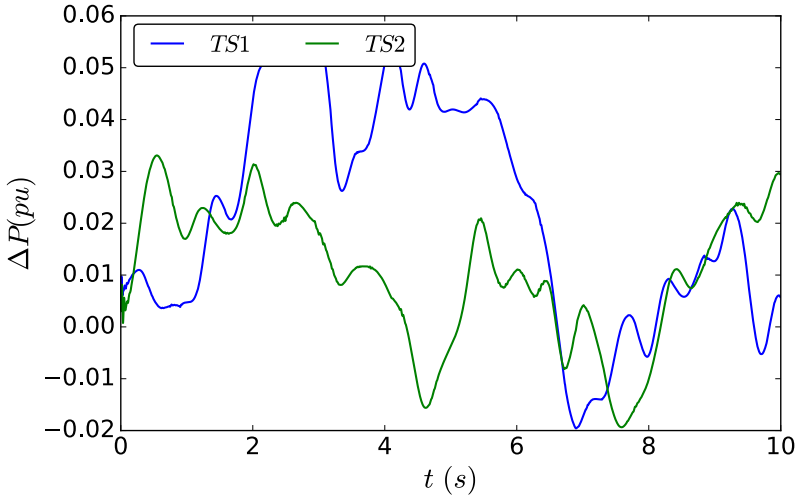


图 3.6　在控制信号作用下的任务传输功率变化

图3.6和图3.7分别显示了在所提出的带有马尔可夫跳变的 H_∞ 控制方法下，信息调度和能量传输引起的能量变化。根据图3.5、图3.6和图3.7，可以推断，在所提出的 H_∞ 控制方法的控制下，不同微电网之间的能量传输和任务调度可以有效地减少外部干扰和系统参数跳变对直流电压偏差的影响。

由于微电网系统中负载和光伏发电的随机性，微型涡轮发电机需要在控制器的控制下改变其发电量，如图3.8所示。这表明微型燃气轮机可以吸收部分直流电压偏差。

Case 2. 本算例讨论了所提出的带有马尔可夫跳变的 H_∞ 控制方法与传统 H_∞ 控制方法相比的优点。

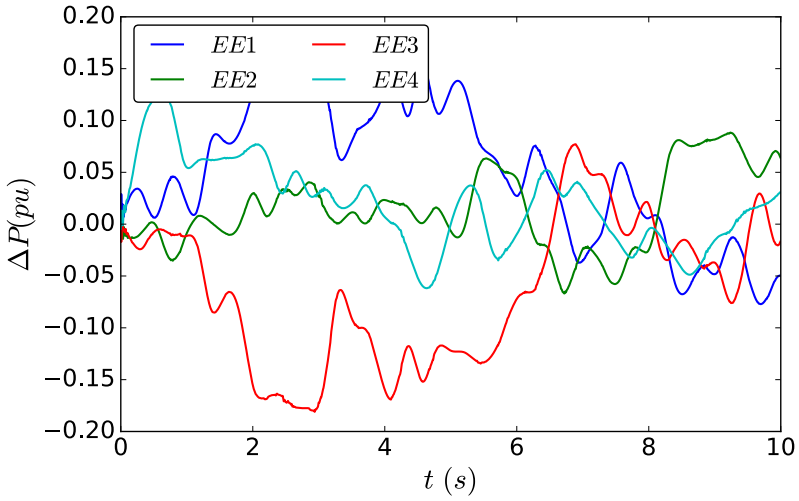


图 3.7　在控制信号作用下的能量传输功率变化

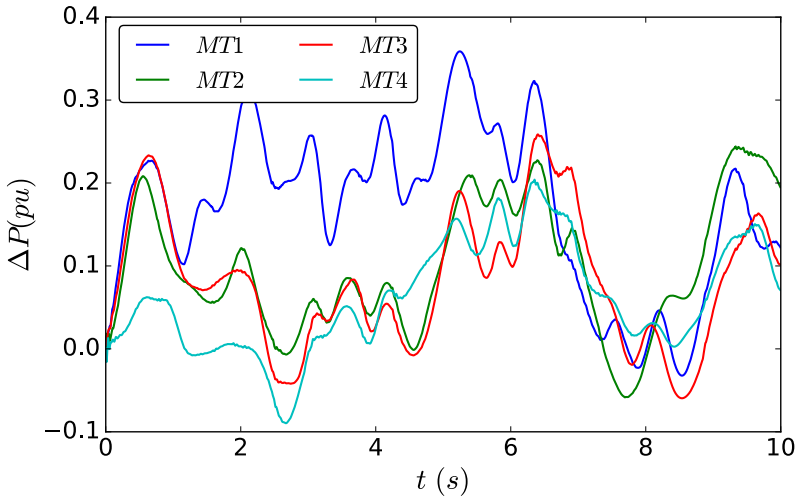


图 3.8　在控制信号作用下的微型涡轮发电机功率变化

本文讨论的传统 H_∞ 控制方法是通过求解单个 LMI 来获得控制信号，而本文提出的方法实际上是求解一组 LMI 来获得适合不同马尔可夫参数模态的控制信号。由于该特性，该方法能够处理马尔可夫跳变引起的模型参数变化，从而保证控制效果。

在图3.9中，显示了在两种不同控制策略下微电网 1 中电压稳定性的控制效果。红线表示本章节所提出的考虑马尔可夫参数跳变的 H_∞ 控制方法控制效果。灰色线表示传统 H_∞ 控制方法的控制效果。在这种情况下，通过改变不同马尔可夫模态下的参数差异，我们可以在参数差异较大时看出所提出方法的优势。在图3.9的四个子图中，不同模式的参数偏差从左到右和从上到下增加。显然，随着不同模态参数偏差的增大，本章所提方法的控制效果不受影响，但不考虑马尔可夫跳变的传统方法的控制效果越来越差，甚至发散。此外，该方法控制的电压稳定曲线波动较小，仅限于传统方法控制的电压稳定曲线。显然，在本文提出的 H_∞ 策略

的控制下，微电网系统 1 内的直流电压更稳定，性能更好。

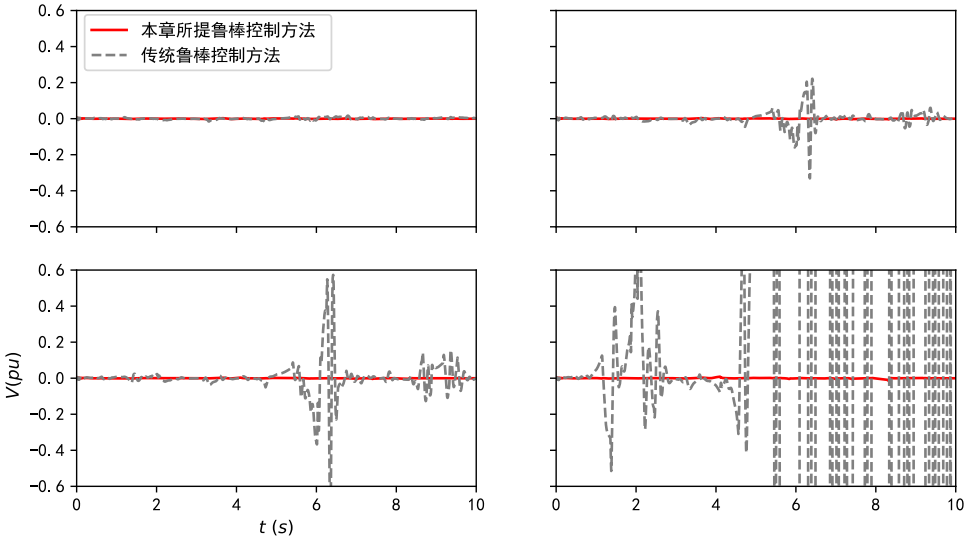


图 3.9　传统方法与所提出方法的比较

Case 3. 本算例将提出的 H_∞ 控制方法进一步优化，以获得更强的系统鲁棒性。对于真实的物理系统，外部干扰的强度可能更大。因此，提高控制器在高强度外部干扰下的鲁棒性是非常重要的。在这种情况下，系统的外部干扰在情况 1 和情况 2 的基础上增加了 10 倍，马尔可夫跳变的频率增加了一倍。图3.10中的灰色线是基于定理 1 的控制器下电压偏差的控制效果。通过比较图3.5中的线条与图3.10中的灰色线条，当抑制较高强度的干扰时，控制器的鲁棒性并不理想。因此，该算例通过求解定理 2 提出的优化问题进一步提升系统母线电压偏差的稳定控制效果。

本算例采用粒子群算法进行求解，具体算法参数如下：粒子数为 40，最大迭代次数为 35，c_1 和 c_2 分别为 0.2 和 0.3，w_{min}、w_{max} 分别为 0.3 和 0.9。通过设置 $k=0.01$，最后求得 γ 的最小值为 0.0193。如图3.10所示，在根据优化问题（3-15）所求解得到的控制信号的控制下，直流母线电压偏差对外部干扰的抑制效果得到进一步的提高。在这种情况下，通过最小化 γ，本章节进一步优化了所提出的 H_∞ 微电网系统母线电压稳定控制方法。

3.5　本章总结

本文讨论了由多个由能量路由器连接的微电网系统组成的能源互联网系统中的直流母线电压偏差稳定调节问题。考虑到系统的动态性、不确定性和随机性、外部干扰以任务调度存在的时延等因素，本章采用具有更加复杂的带有马尔可夫参

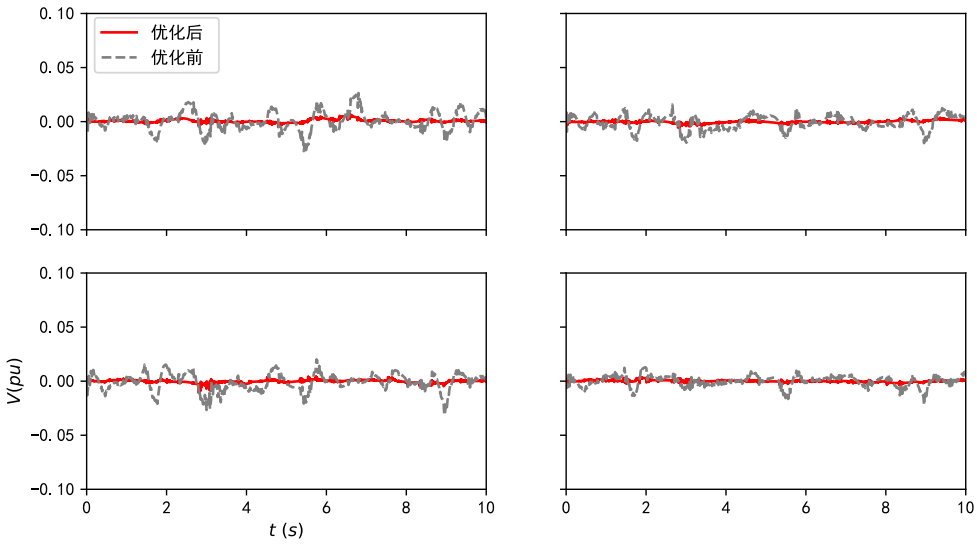


图 3.10　算例 1 和算例 3 中方法的比较

数跳变、外部扰动以及随机项等构成的微分方程对微电网系统内部的能量、信息过程进行建模。为了保证各边缘微电网内部的直流母线电压偏差稳定，保证足够稳定的能量供应是非常重要的。综合上述因素，本章将直流电压调节问题转化为具有马尔可夫参数跳变的鲁棒 H_∞ 控制问题，并通过数学工具推导出 LMI 方程，最后通过求解该 LMI 方程得到控制信号。该方法的有效性和可行性通过数值仿真成功地得到验证。通过对比仿真，本文提出的 H_∞ 策略控制的微电网系统直流电压更稳定，性能更好。此外，为进一步提高该方法的控制效果，本文利用鲁棒 H_∞ 控制方法的原理对干扰衰减因子 γ 进行了优化。

在本文中，我们考虑调度任务的时间延迟，在所讨论的多微网系统中，时延会影响用户体验，甚至影响系统的安全性。当延时过大时，控制信号可能无法及时传输到各装置，从而威胁直流电压的稳定性。因此，如何避免控制信号的丢包，或者在控制信号丢包的情况下仍能控制直流电压稳定是一个值得关注的问题。在未来，我们将进一步考虑由过高的延迟引起的控制信号损失，从而设计一种电压稳定控制方法，即使在一些控制信号丢失的情况下也能保持多微网系统的直流电压稳定。

第 4 章　基于纳什均衡的多微网系统随机 H_2/H_∞ 混合控制方法

4.1　研究背景及贡献

在现有的能源互联网与边缘计算系统结合的研究中，如通过能源互联网的多微网架构为边缘计算系统进行供能，这类问题的解决方案主要是将问题转换为优化问题，从而对计算卸载和资源调配实施调控。文献 [30] 将微网为边缘系统供能的问题转化为了一种混合整数非线性优化问题。文献 [34] 研究了通过优化电能储存管理策略，从而维持由可再生能源供能的边缘计算系统的稳定。但很少有文献通过微分方程研究边缘计算系统的动态性和最优控制问题。实际上，边缘计算设备的工作功率具有一定的随机性并且也会受到外界的扰动（如用户的非常规操作或是来自外界的网络攻击）[80]，这不但会对能源互联网中的信息层运行造成影响，同时也会严重影响能量层的能量调节与控制。而通过微分方程可以更加精确地对边缘计算任务的动态性、随机性以及可能受到的外部扰动进行建模，从而进一步讨论这些性能对边缘计算系统和能源互联网系统的影响。

因此，提高具有计算能量的电力系统的鲁棒性，也是值得关注的问题。除鲁棒性之外，为提高能量-信息调控的可靠性、经济性以及高效性，本文所讨论的由能量路由器连接的多微网系统同时也有很多性能指标需要得到优化。在第二章以及第三章中，本文主要针对第一项问题即微电网系统的鲁棒稳定性单独进行了讨论和研究，并且通过引入不同的 H_∞ 鲁棒控制方法实现了不错的控制效果。而本章则重点将鲁棒稳定性与微电网系统内部的一些性能最优性同时作为控制优化的目标，这使得所提出的问题求解变得更加复杂但却更加符合实际工程中的要求。

本章节考虑了一种处在远离大电网（离网状态下）和云端服务器的极端环境下的多微网系统，系统内部存在多个微电网系统互联，为能量路由器中的计算中心进行供能（需要注意的是，由于能量路由器本身的体积较大且不需受限，因此本文所讨论的能量路由器中的计算能力可以被设定为数据中心级别）。

性能优化性能指标可以分为能量层和信息层两种。在信息层中，本文主要考虑保持尽可能最大化能量路由器中任务计算量，即尽量减少计算任务上传至云端进行计算。边缘计算的核心是将原本在云端处理的任务卸载到边缘侧进行计算，从而减少因网络传输带来的时延。考虑到系统地理位置偏僻，并且一些数据隐私需要得到保护，因此需要尽量将更多的计算任务安排在能量路由器中的数据中心上执行，以提高任务计算的速度、可靠性以及安全性。在能量层中，由于本章讨论的

场景处在远离大电网的偏僻地理位置，鉴于由于传输等原因导致的传统能源（如柴油发电）较高的发电成本以及减少传统能源使用导致的环境污染，在能量层的控制中，应尽可能最大化使用可再生能源，减少传统发电设备的使用。另外，能量层中的电力设备可能会因为过度控制导致设备受到严重损坏，因此防止设备过度控制也是能量层需要考虑的重要性能指标之一。

在系统的鲁棒稳定性方面，光伏的输出功率和边缘计算系统的工作功率分别会受到太阳辐射的变化和用户的非常规操作而产生随机波动，这种波动会严重干扰系统的交流频率[81]。综上所述，本文尝试在基于能量路由器连接的多微网场景中应用随机 H_2/H_∞ 混合控制，从而从系统最优性和鲁棒稳定性两个方面进行控制优化。该多微网系统包含了诸如光伏、微型燃气轮机、储能设备、负载、边缘设备和能量路由器等设备，通过能量层对信息层进行供能，从而保证计算任务的顺利执行。

为将一些先进的 H_2/H_∞ 混合控制方法应用到上文所提到的问题中，通过微分方程将信息层和能量层中的一系列动态过程进行建模是必要的。但事实上，通过微分方程对边缘计算过程进行系统建模与控制的文献非常少。其中文献 [44] 通过微分方程对边缘计算中的计算资源分配进行了建模。但是这类文章并没有引入控制，也没有采用 H_2/H_∞ 控制策略，因此采用随机 H_2/H_∞ 控制策略对能量路由器内部的数据中心的能耗进行控制是本文的创新点。

另外，将 H_2/H_∞ 控制应用在微网系统管理控制的文献有很多，比如文献 [82]。但是这些文章一方面很少考虑能源互联网信息层中的性能指标，并且也很少考虑最优性和鲁棒性之间的纳什均衡。事实上，H_2 控制在优化性能指标时会削弱 H_∞ 控制提升系统抗干扰能力的效果，相反 H_∞ 提高系统抗干扰能力的同时会导致 H_2 控制在优化性能指标上的效果降低。使用纳什均衡求解的优势在于使二者各自的控制相互博弈，从而达到一种均衡，并且在该均衡下，二者均无法再通过改变自身的控制策略从而提升自身的控制效果。

本章研究的主要工作如下：

1) 考虑到真实物理环境对所研究的多微网系统的外部干扰（如光照强度的变化以及对计算单元的非常规操作）以及系统本身具有的随机性，本章研究采用随机微分方程对多微网系统的信息层和能量层中的一些动态过程进行建模。此外，本文将能量路由器中的计算任务量当作一种可控负载，通过改变在能量路由器上执行的任务量从而改变其负荷大小。

2) 本章研究考虑了系统性能的最优控制（也称为 H_2 控制）问题，减少传统能源使用，尽量最大化使用能量路由器处理本地计算任务，从而降低网络传输带宽

的使用和云端数据中心的计算压力，并防止过度控制。另外，系统的随机性和外界干扰可能会导致频率偏差不稳定，因此本文同时考虑了鲁棒 H_∞ 控制问题。

3) 优化非可再生能源消耗等性能指标将导致系统的抗干扰能力下降，而提高系统的抗干扰能力反过来也会造成系统的性能变差。为解决这一困境，本文将两种控制问题转换为纳什均衡问题，通过求解纳什均衡点使得二者达到一种平衡。在该平衡点上，两种控制问题均达到一种最优状态，并且此后无法通过改变自身的策略来获得更多收益。本文根据定理从理论上求得控制问题的显式解析解。这种解析解的优点在于，其正确性已得到定理的论证，因此不同系统使用该类控制器时只需进行相应的参数修改，与数值解相比应用起来更加方便快捷。

本文其余部分安排如下：第 2.2 小节对系统进行建模；第 2.3 小节描述 H_2/H_∞ 控制的纳什均衡问题及其求解；第 2.4 小节利用 Python 进行数值仿真，并对结果进行详细的分析，验证控制策略的有效性；最后，第 2.5 小节总结本文工作，提出对未来研究方向的展望。

4.2　系统建模

4.2.1　系统架构

本文所考虑如图 4.1 所示的能源互联网场景。这是一种与电力主干网不相连、地处偏远地区且需要执行大量计算任务的特殊场景（如地处戈壁滩的科考站或是园区）。本文讨论的能源互联网系统由多个由能量路由器连接的微电网系统组成，并且可以通过能量路由器的部署，实现能量的相互传输。

4.2.2　微网组件功率的动态建模

能源互联网系统中的微网通常会部署可再生能源发电设备、传统能源发电设备、储能设备以及各种耗能设备。如图 4.1所示，本文的系统中的每一个微电网均由负载、光伏发电设备、微型燃气轮机、储能电池以及能量路由器构成。其中，能量路由器内部的计算任务负荷作为一种可控负载，由系统中的其它发电设备和储能设备对其供能。各种设备的模型描述如下。

4.2.2.1　负载和光伏功率的动态建模

为了更绿色且经济地为信息层中的边缘计算任务进行供能，可再生能源的最大化利用是必要的。本文以光伏作为可再生能量的来源。考虑到负载和光伏能量具有随机性和不确定性，为更真实地对负载和光伏进行建模，本文采用了随机微分方程对二者进行建模。基于参考文献 [16] 中的模型，第 k 个微网的负载和光伏

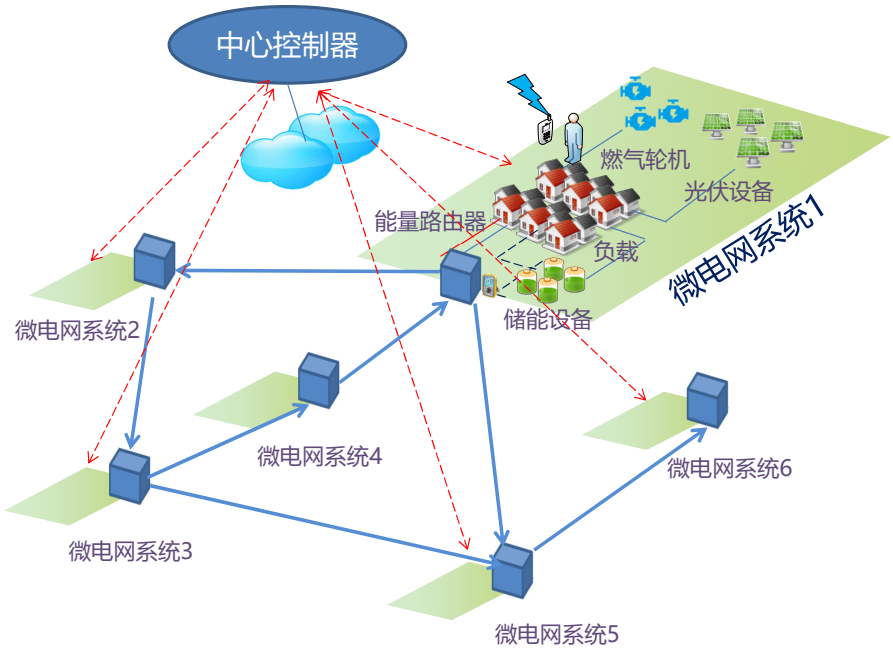


图 4.1　本章所研究的多微网系统架构图

的功率建模如下：

$$dP_L^k(t) = \frac{1}{T_L^k}(-P_L^k(t) + v_L^k(t))dt + \frac{r_L^k}{T_L^k}P_L^k(t)dw(t), \tag{4-1}$$

$$dP_{PV}^k(t) = \frac{1}{T_{PV}^k}(-P_{PV}^k(t) + v_{PV}^k(t))dt + \frac{r_{PV}^k}{T_{PV}^k}P_{PV}^k(t)dw(t), \tag{4-2}$$

其中，维纳过程 $w(t)$ 用来描述负载功率和光伏功率的随机性，$v_L^k(t)$ 和 $v_{PV}^k(t)$ 分别表示负载和光伏受到的外界干扰信号（如大功率设备的突然接入或是光照强度的突然变化）。时间常数 T_L^k ,T_{PV}^k 和系统系数 r_L^k ,r_{PV}^k 由参数估计方法获得。

4.2.2.2　微型燃气轮机功率的动态建模

可再生能源具有一定的随机性，这可能会导致微网中电能的供需不平衡，从而严重影响边缘任务计算及其他负载的正常运行。因此，使用传统能源的微型燃气轮机被作为可控发电设备部署在每个微网中，通过控制微型燃气轮机的发电功率可以弥补光伏发电的不足，从而保证能量路由器中计算模块的正常工作。类似于文献 [16]，微型燃气轮机的建模可以用常微分方程表示：

$$\dot{P}_{MT}^k(t) = \frac{1}{T_{MT}^k}(-P_{MT}^k(t) + b_{MT}^k u_{MT}^k(t)), \tag{4-3}$$

其中时间常数 T_{MT}^k 体现了微型燃气轮机的响应速度，u_{MT}^k 表示微型燃气轮机的控制信号，系统系数 b_{MT}^k 由参数估计方法获得。

4.2.2.3　任务计算消耗功率的动态建模

边缘计算通过将尽可能多的计算任务下放到靠近用户的边缘侧执行，从而减小服务时延，提高计算服务质量。另一方面，由于地理位置偏远的科考站或是园区可生产的电能是有限的，并且传统能源的生产代价很高，因此在保障任务正常执行的同时，也要通过控制在能量路由器中执行的任务量来调节边缘任务计算带来的电能消耗。

文献 [44] 通过随机微分方程对边缘计算任务进行动态建模，但是并没有考虑控制或扰动。本文提出将能量路由器中的边缘任务计算作为一个可控负载设备。综合文献 [44, 83] 中的建模方法，可以假设其耗能和其正在执行的任务量成正比，通过控制在能量路由器上执行的计算量可以改变其耗能大小。另外，能量路由器由于计算带来的能耗也会受外界温度等因素的影响，因此本文额外考虑了外界扰动和随机性，其系统建模如下：

$$dP_{ED}^k(t) = \frac{1}{T_{ED}^k}(-P_{ED}^k(t) + b_{ED}^k u_{ED}^k(t) + v_{ED}^k(t))dt + \frac{r_{ED}^k}{T_{ED}^k}P_{ED}^k(t)dw(t), \quad (4\text{-}4)$$

其中时间常数 T_{ED}^k 和系统系数 b_{ED}^k,r_{ED}^k 由参数估计获得，维纳过程 $w(t)$ 表示系统的随机性，u_{ED}^k 表示对能量路由器的控制信号，v_{ED}^k 表示受到的外界扰动，如设备外部的温度变化。

4.2.2.4　储能设备功率和频率偏差的动态建模

在微电网中，储能设备可以通过吸收功率偏差，维持微电网的功率平衡，从而保障边缘计算任务的正常进行。本文考虑了一种非控制储能设备，其充放电受到频率偏差的影响。储能设备的建模如下：

$$\dot{P}_{BES}^k(t) = \frac{1}{T_{BES}^k}(-P_{BES}^k(t) + \Delta f^k(t)), \quad (4\text{-}5)$$

其中 T_{BES}^k 为第 k 个微电网中储能设备的时间常数。由于本文的研究重点并非储能设备本身，因此本文不考虑电池的充放状态（类似的不考虑充放状态的文献有 [53]）。

定义在第 k 个微电网的频率偏差为 Δf^k 。根据文献 [53]，由于频率偏差受到微电网系统内部的功率偏差的影响，因此动态建模如下：

$$\dot{\Delta f}^k(t) = \frac{2\bar{D}^k}{\bar{M}^k}\Delta f^k(t) + \frac{2}{\bar{M}^k}\Delta P^k(t), \quad (4\text{-}6)$$

其中，$\bar{D}^k$ 表示衰减系数，$\bar{M}^k$ 表示惯性系数，ΔP^k 表示第 k 个微电网的功率偏差，表示为：

$$\Delta P^k = -P_L^k(t) + P_{PV}^k(t) + P_{MT}^k(t) - P_{ED}^k(t) + P_{BES}^k(t) + \sum_{l=1}^{m} f(k,l) \cdot P_{ER}^l(t), \quad (4\text{-}7)$$

当 $f(k,l)=1$，第 k 个微电网内部的能量路由器通过传输线 l 向其他能量路由器调度任务。当 $f(k,l)=-1$，第 k 个微电网内部的能量路由器通过传输线 l 接收由其他能量路由器调度的任务。其中 m 为传输线的总数。

4.2.3　能量路由器功率的动态建模

当某一个微电网系统内部生产了多余的电能时，可以通过能量路由器将过剩的电能传输给其它微电网中。而当某一个微电网无法满足自给自足时，可以通过能量路由器，从其它的微电网系统中获取电能。本文假设相邻微电网之间由能量路由器连接，从而实现微电网间能量传输。定义第 l 条传输线上的能量传输功率为 $P_{ER}^l(t)$。$P_{ER}^l(t)$ 可以建模为：

$$\dot{P}_{ER}^l(t) = \frac{1}{T_{ER}^l}(-P_{ER}^l(t) + b_{ER}^l u_{ER}^l(t)), \quad (4\text{-}8)$$

其中时间常数 T_{ER}^l 和系数 b_{ER}^l 由参数估计获得，u_{ER}^l 表示能量路由器的控制信号。

4.2.4　所讨论的多微网系统动态建模

本文考虑了 n 个微电网系统组成的能源互联网系统，为处在偏远地区和远离大电网的需要执行大量计算任务的园区或是科考站进行供能。值得注意的是，这类园区或是科考站内的边缘计算耗能与其它负载耗能相比是更为显著的。对于每一个微电网系统 k，定义系统状态向量为 $x^k(t) = [P_L^k(t), P_{PV}^k(t), P_{MT}^k(t), P_{ED}^k(t), P_{BES}^k(t), \Delta f^k(T)]'$，控制输入向量为 $u^k(t) = [u_{MT}^k(t), u_{ED}^k(t)$, 扰动输入向量为 $v^k(t) = [v_L^k(t), v_{PV}^k(t), v_{ED}^k(t)]'$。

对于该多微网系统，本文定义其状态向量以及控制向量分别为 $x^{ER}(t) = [P_{ER}^1(t), P_{ER}^2(t), ..., P_{ER}^n(t)]'$ 以及 $u^{ER}(t) = [u_{ER}^1(t), u_{ER}^2(t), ..., u_{ER}^n(t)]'$，其中' 表示矩阵转置。

对于整个所研究的能源互联网系统，定义系统的状态变量为 $x(t) = [x'^1(t), x'^2(t), ..., x'^n(t), x'^{ER}(t)]'$，控制输入为 $u(t) = [u'^1(t), u'^2(t), ..., u'^n(t), u'^{ER}(t)]'$，扰动输入为 $v(t) = [v'^1(t), v'^2(t), ..., v'^n(t)]'$。该系统输出频率偏差向量为 $z(t) = [\Delta f^1(t), \Delta f^2(t), ..., \Delta f^n(t)]'$。根据公式 (1)-(8)，本文所讨论的多微网系统可以被写

成以下形式：

$$\begin{cases} dx(t) = (Ax(t) + Bx(t)) + Cv)dt + Dx(t)dw(t) \\ z(t) = Fx(t) \end{cases} \tag{4-9}$$

至此，本文所研究的基于能量路由器连接的多微网系统已转化为数学形式上基于微分方程建模的控制系统，其中 A、B、C、D、F 为系统参数矩阵，由公式（4-1）至（4-8）整理得出。

4.2.5　随机 H_2/H_∞ 问题的描述和求解

4.2.5.1　问题描述

本小节将在极端条件下的通过能源互联网系统中能量层设备为信息层中边缘任务计算进行供能的问题转换为随机 H_2/H_∞ 控制问题。需要注意的是，本文所考虑的能源互联网系统中的负载、光伏和边缘计算任务存在随机扰动，这严重影响了交流频率的稳定性。消除这些扰动的干扰需要定义 H_∞ 性能指标。该性能指标表示如下（下文中时间 t 忽略）：

$$J_1 = E\left[\int_0^T (z'z - \gamma^2 v'v)dt\right], \tag{4-10}$$

其中 E 为数学期望，γ 为扰动衰减度，T 为终端时间。

另一方面，系统需要定义一种随机 H_2/H_∞ 控制问题的代价函数。首先，本文所描述的园区或是科考站远离大电网，并且所处的地理位置偏远，需要尽量减少传统能源的使用，从而减少运输成本，降低对环境的污染。本文中的随机 H_2/H_∞ 控制问题的代价函数可以表示为：

$$\begin{aligned} J_2 =& E\left[\int_0^T \left(\varepsilon_1 \sum_{k=1}^{n} (P_{MT}^k)^2 - \varepsilon_2 \sum_{k=1}^{n} (P_{ED}^k)^2 + \varepsilon_3 \sum_{k=1}^{n} (\Delta f^k)^2\right) dt\right] \\ &+ E\left[\int_0^T \left(\varepsilon_4 \sum_{k=1}^{n} (u_{MT}^k)^2 + \varepsilon_5 \sum_{k=1}^{n} (u_{ED}^k)^2 + \varepsilon_6 \sum_{l=1}^{n} (u_{ER}^l)^2\right) dt\right], \end{aligned} \tag{4-11}$$

在公式（4-11）中，$E\left[\int_0^T \varepsilon_1 \sum_{k=1}^{n} (P_{MT}^k)^2 dt\right]$ 通过减少对微型燃气轮机的使用从而减少传统能源的消耗。考虑到网络通信的时延和可靠性，计算任务应尽可能在本地的能量路由器中执行。在公式 (11) 中的 $-E\left[\int_0^T \varepsilon_2 \sum_{k=1}^{n} (P_{ED}^k)^2 dt\right]$ 表示尽可能多的在能量路由器中执行计算任务。为了保证多微网系统中各微网的频率偏差最小，因此本文加入 $E\left[\int_0^T \varepsilon_3 \sum_{k=1}^{n} (\Delta f^k)^2 dt\right]$ 这一目标项。

最后，本文还将考虑控制器的过度控制可能导致设备严重损坏的情况。为了

防止对设备的过度控制，目标函数中加入了下列几项：

$$E\left[\int_0^T\left(\varepsilon_4\sum_{k=1}^{n}(u_{MT}^k)^2+\varepsilon_5\sum_{k=1}^{n}(u_{ED}^k)^2+\varepsilon_6\sum_{l=1}^{n}(u_{ER}^l)^2dt\right)\right], \tag{4-12}$$

其中 $\varepsilon_1,\varepsilon_2,\varepsilon_3,\varepsilon_4,\varepsilon_5,\varepsilon_6$ 为程度因子（或放大系数），可以按照需求改变因子的大小来调节对应项的影响程度。例如，想要侧重于减小频率偏差 Δf，则可以通过增大 ε_3 的值实现。

通过定义矩阵 M 和 R，最优性能指标（4-11）被转换为下式：

$$J_2=E\left[\int_0^T(x'Mx+u'Ru)\right]dt. \tag{4-13}$$

4.2.6　使用纳什均衡理论求解

鲁棒 H_∞ 控制通常用以消除来自外部扰动对系统的影响，本文通过鲁棒 H_∞ 控制抵消光照变化等外部干扰对频率偏差稳定性的影响。除此之外，为了优化某些系统的性能指标，比如尽量减少传统能源的消耗、尽量能将更多的计算任务下放到能量路由器中执行、防止过度控制，本文也考虑了最优控制。

然而，对化石能源消耗等性能指标的优化会导致系统的抗干扰能力下降，反之提高系统的抗干扰能力则会造成系统的性能变差。因此，二者无法同时达到各自单独作用于系统时所能获得的最好的控制效果。为了平衡二者的控制效果，本文引入了纳什均衡概念，通过寻找纳什均衡点使得二者的控制效果达到一种制衡状态。在该状态下，二者均无法再通过改变自身策略来提高自身的控制效果。

本章节研究针对所讨论的能源互联网系统，提出了一种随机混合 H_2/H_∞ 控制策略。本章节通过数值仿真，验证了该控制策略的可行性。

接下来，本文通过纳什均衡理论，将上述两个控制问题转换为随机混合 H_2/H_∞ 控制问题。给定 $\gamma>0$ 以及终端时间 $0<T<\infty$，该随机混合 H_2/H_∞ 控制问题的目的则是寻找 u^* 满足 H_∞ 控制指标 $E\left[\int_0^T(\gamma^2v'v-z'z)dt\right]\geqslant 0$，而且如果存在最坏情况下的光照、温度以及负载等扰动 v^* 并作用于系统，u^* 能够最小化目标函数 J_2。

随后，该随机混合 H_2/H_∞ 控制问题被转换为了纳什均衡问题：寻找到纳什均衡点 (u^*,v^*) 使得 $J_1(u^*,v^*)\leqslant J_1(u^*,v)$ 并且 $J_2(u^*,v^*)\leqslant J_2(u,v^*)$，即控制信号 u 和扰动输入 v 达到一种最优值 u^* 和 v^*，当控制信号 u 试图进一步优化 J_2 而偏离纳什均衡点的 u^* 时，会导致优化系统性能指标的效果反而变差。

定理 1 根据文献 [84-85], 对于系统（4-9），假设（4-14）中的黎卡提方程存在解 (P_1, P_2, K_1, K_2)，且满足终端条件 $P_1(T)=0, P_2(T)=0, P_1(0)\geqslant 0, P_2(0)\geqslant 0$，则该随机混合 H_2/H_∞ 控制问题的解为 $u^*=-K_2x, v^*=-K_1x$。

$$\begin{cases}\dot{P}_1 - F'F + 2P_1A + D'P_1D - 2P_1BK_2 - \gamma^2 P_1CC'P_1 = 0\\ \dot{P}_2 + 2P_2A - 2P_2CK_1 + D'P_2D - P_2BR^{-1}B'P_2 + M = 0\\ K_1 = \gamma^{-2}C'P_1'\\ K_2 = R^{-1}B'P_2'\end{cases} \tag{4-14}$$

通过求解该黎卡提方程，得到了该随机混合 H_2/H_∞ 控制问题的解 u^*，该控制策略可以实现微网内的频率稳定、减少传统能源的消耗、尽量将更多的计算任务下放到能量路由器中执行等目的。

4.3　数值算例

表 4.1　仿真参数表

参数	数值	参数	数值	参数	数值	参数	数值
T_L^k	[2.5,3]	T_{PV}^k	[1.2,1.5]	T_{BES}^k	[0.09,0.11]	T_{ED}^k	[4.9,6.0]
T_{MT}^k	[1.1,1.5]	T_{MT}^k	[1.0,1.2]	T_{ER}^k	[1.1,1.3]	b_{ER}^k	[2.8,3.0]
b_{MT}^k	[2.5, 3.1]	b_{ED}^k	[1.1, 1.3]	$\bar{M}^k$	[0.06,0.07]	$\bar{D}^k$	[0.003,0.005]
r_{ED}^k	[1.2,1.6]	r_{PV}^k	[1.1,2.1]	r_L^k	[1.0,2.0]	ε_1	3
ε_2	5	ε_3	18	ε_4	3	ε_5	4
ε_6	4	T	3s				

该仿真系统由 5 个微电网系统组成。表4.1 参照文献 [16] 中的参数设定，给出了各个微电网系统参数的数值，其中 [...] 代表参数在这个区间中以同等概率随机取值。如，$T_L^k=[2.5,3]$ 表示 T_L^k 在 2.5 到 3 之间随机取值。

本次仿真首先通过方程（4-14）获得纳什均衡解 u^*，之后将 u^* 代入到系统（4-9）中，从而获得各个设备的功率以及各个微电网的频率偏差的变化曲线。由于物理系统的参数是不断变化的，假设短时间内的系统参数的变化忽略不计，因此可以将一次控制的终端时间 T 取值为 $3s$，之后以 $3s$ 为周期重新测量系统参数并计算新的控制输入 u^*。为了文章的简洁，本次仿真只展示其中一个周期。

图4.2是根据表4.1中的参数由公式（4-1）和（4-2）得到的负载和光伏的功率仿真曲线图。从图中可以看出，光伏和负载功率的模拟曲线并非是光滑的，且有很明显的随机波动，更加准确地描述随机干扰或非常规操作导致的瞬时剧烈变化。

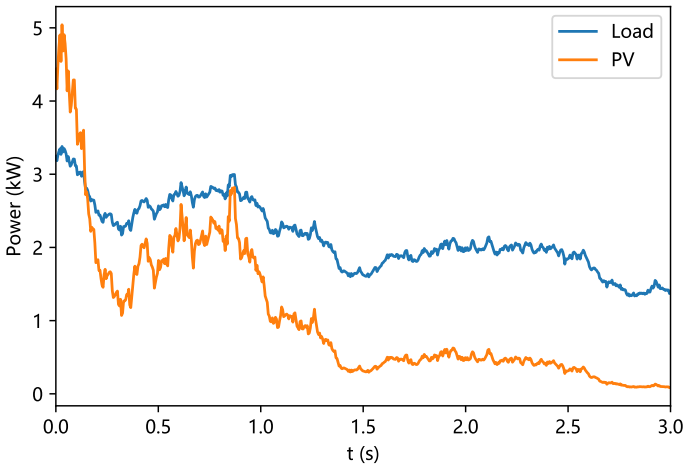


图 4.2　微电网 2 中的光伏和负载功率

这正是由公式（4-1）和公式（4-2）中的随机项 $dw(t)$ 导致的。

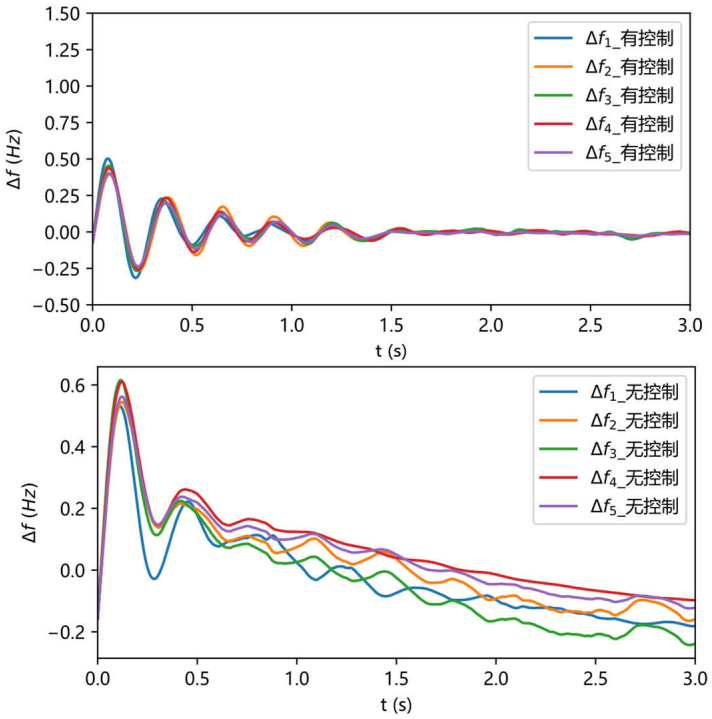


图 4.3　频率偏差（本文控制策略对比无控制）

4.3.1　与无控制相比较

图 4.3 是本文所提的控制策略与无控制输入对于频率偏差的控制效果对比图。可以看出，本文所提的随机混合 H_2/H_∞ 控制策略可以将频率偏差稳定到 0。然而无控制输入的情况下，频率偏差不断偏离 0 值。这一结果验证了本文所提出的控制策略符合目标函数 J_2 中减小 Δf 的目标，实现了存在外界扰动如光伏随机变化时，保证频率偏差的稳定。

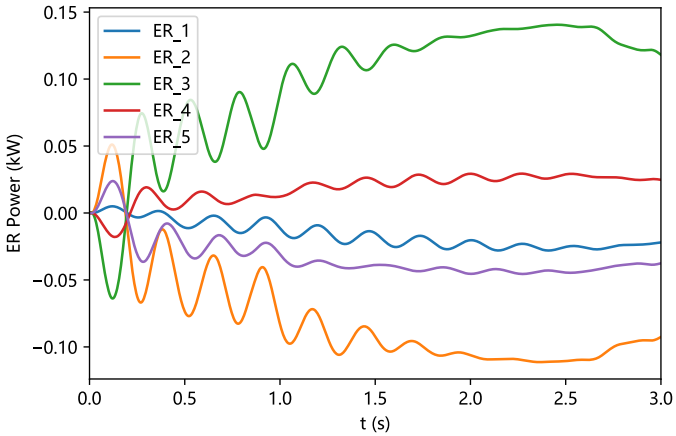


图 4.4　微电网的能量传输功率

每个能量路由器的能量传输功率如图4.4 所示，图中曲线代表在所提控制策略控制下的能量传输功率。结果显示，本文所提出的控制策略实现了能源互联网系统中各个微电网之间能量传输的稳定。其中能量路由器 1 的功率为正值，根据图4.4中描绘的系统结构图可知，微电网 1 在向微电网 2 传输能量。

4.3.2　与非纳什均衡策略相比较

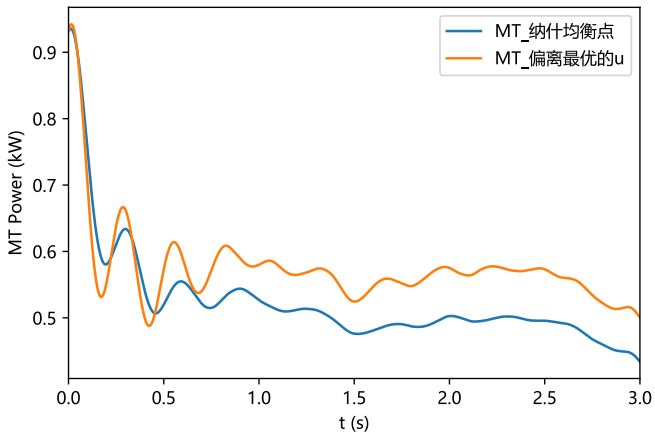


图 4.5　微型燃气轮机发电功率（纳什均衡对比非纳什均衡）

图 4.5 展示了微电网 3 中纳什均衡点偏移到非纳什均衡点后对于微型燃气轮机的影响。其中蓝线表示本文所提控制策略的控制效果，黄线表示 u^* 发生偏移后的控制效果。根据纳什均衡的特点，当控制信号 u 试图偏离纳什均衡点 u^* 时会使其的控制效果变差，即 $J_2(u^*, v^*) \leqslant J_2(u, v^*)$。由图 4.5可以看出，控制信号偏移前对于微型燃气轮机输出功率的抑制效果更好。

图 4.6 展示了微电网 3 中纳什均衡点偏移到非纳什均衡点后对于边缘任务计

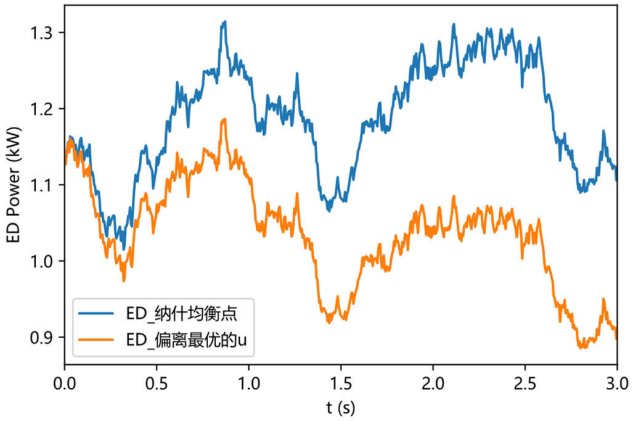


图 4.6　能量路由器任务计算功率（u^* 偏离纳什均衡点）

算功率的影响。其中蓝线表示本文所提控制策略的控制效果，黄色的线表示表示 u^* 发生偏移后的控制效果。根据纳什均衡的特点，当控制信号 u 试图偏离纳什均衡点 u^* 时会会使其的控制效果变差，即 $J_2(u^*, v^*) \leqslant J_2(u, v^*)$ 。由图 4.6 可以看出，控制信号偏移前边缘任务计算功率整体大于偏移后的边缘任务计算功率。

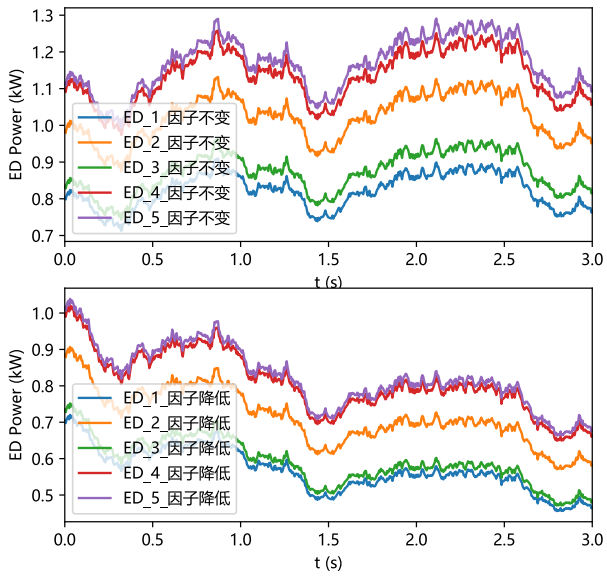


图 4.7　不同程度因子下的边缘任务计算功率

4.3.3　不同程度因子下控制效果

本文通过目标函数优化最小化微型燃气轮的工作功率，尽量维持能量路由器在计算任务时以较高的工作功率运行，减小频率偏差。图4.7 中的上图是按照表4.1 参数保持不变，下图是将目标函数 J_2 中的程度因子 $\varepsilon 2$ 设置为 0.1，其它参数保持不变。通过比较上下两图，可以发现当程度因子 $\varepsilon 2$ 的值很低时，无法再维持能量

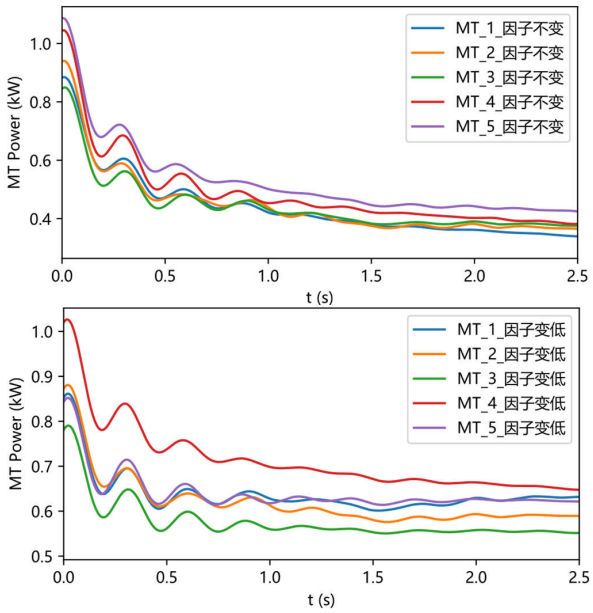


图 4.8　不同程度因子下的微型燃气轮机的工作功率

路由器的计算模块以较高的工作功率运行。

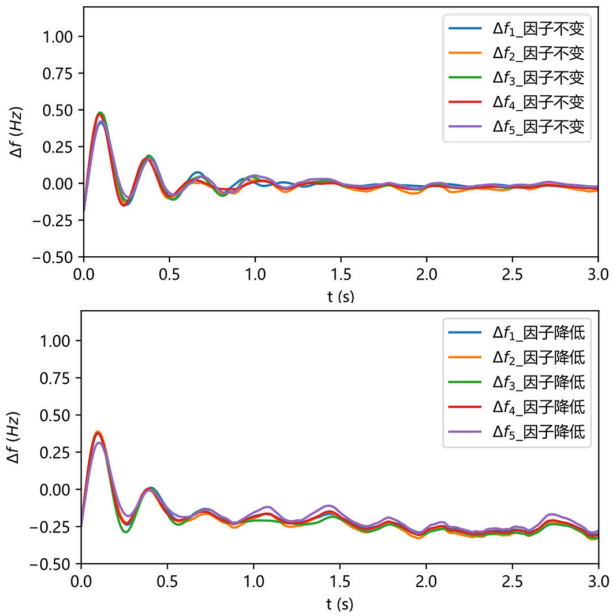


图 4.9　不同程度因子下的频率偏差

图 4.8中的上图按照表4.1 参数保持不变，下图将目标函数 $J2$ 中的程度因子 $\varepsilon 1$ 设置为 1，其它参数保持不变。上图功率最终被控制到 0.3 和 0.5 之间，而下图被控制到 0.55 到 0.7 之间，且有继续上升的趋势，因此可以发现程度因子 $\varepsilon 1$ 影响了对微型燃气轮机的工作功率的抑制效果，满足本文减少传统能源消耗的需求。

图 4.9 中的上图按照表 1 参数保持不变，下图将目标函数 $J2$ 中的程度因子 $\varepsilon 3$ 设置为 4, 其它参数保持不变。通过比较上下两图，可以发现当程度因子 $\varepsilon 1$ 的值很

低时，频率偏差变大且不稳定。

综上所述，本文中的目标函数有效地实现了预期的控制效果

4.4　本章结论

本文讨论了一种地处偏远且远离大电网的基于能量路由的多微网场景，该场景由多个微电网系统组成，每个微网中包括了负载、可再生能源发电设备、储能设备、能量路由器以及传统能源发电设备。为了更加真实地描述物理设备，本文通过一系列随机微分方程和常微分方程对该系统进行建模。其中，将边缘设备用随机微分方程描述为可控负载并实施最优鲁棒控制的方法，是本文的重要理论创新点，这在相关文献中是比较少有的。

本文采用一种基于纳什均衡点的随机混合 H_2/H_∞ 控制策略，在外界干扰下维持系统的稳定运行，减少传统能源的消耗，并尽量将计算任务下放到能量路由器中执行等目标。数值仿真的结果显示，本文所提出的控制策略起到了很好的控制效果。通过比较纳什均衡点的控制和非纳什均衡点的控制效果，可以得出基于纳什均衡点的控制策略具有更好的效果。

在本文所建模的系统中，储能设备作为一种非可控设备，用于吸收微网内的功率偏差。在接下来的研究中，计划将储能设备也作为可控制设备，从而进一步优化能源互联网的稳定性。另外，本文仅考虑边缘设备的能耗随计算任务的负荷的变化，并未考虑计算卸载的因素。因此，在未来的研究中也可以尝试考虑边缘设备之间的计算卸载对能耗的影响，通过优化计算卸载策略来达到控制目标。

第 5 章　总结与展望

5.1　主要研究内容总结

本研究基于控制和优化理论等技术，针对基于能量路由的能源互联网多微网系统中的一些关键控制、优化问题提供了相应的解决方案，为能源互联网中能量-信息的进一步融合提供了思路。本研究主要包括以下几个方面：

（1）基于能量路由的多微网场景的研究。本研究提出一种基于能量路由的多微网控制策略，以进一步提升多微网系统母线频率偏差和母线电压偏差应对随机性和外部扰动的能力，并根据该场景中的一些控制和优化问题展开探讨和研究。

（2）关于多微网系统的鲁棒控制研究。本研究针对电力系统中比较重要的频率和电压稳定问题，开展在多微网系统中的控制研究。首先，本研究通过一系列常系数微分方程、随机微分方程以及带有马尔可夫跳变的微分方程对该多系统中的动态过程进行建模，包括光伏发电、储能设备充放电等能量层中的动态过程以及任务计算、任务调度等信息层中的动态过程。考虑到多微网系统中存在较强的随机性以及任务调度过程存在一定的时间延迟，本研究以交流母线频率鲁棒控制为例，提出了一种基于 H_∞ 随机控制理论的多微网系统协同控制方法。通过对各个微电网系统内部的电力设备以及系统间的任务调度进行控制，从而实现了各个系统内部的鲁棒和稳定性。

此外，为使得所研究的系统在建模上更接近真实情况，本研究通过引入马尔可夫参数跳变从而描述系统中各个设备工作功率的复杂变化，并以直流电压稳定控制为例，提出了一种考虑马尔可夫参数跳变的 H_∞ 鲁棒电压控制方法。该方法能够在系统参数发生跳变的情况下，通过综合控制电力设备以及信息过程从而实现各个微电网系统内部的直流电压稳定。此外，针对以上 H_∞ 鲁棒控制问题，本研究通过进一步抑制反馈增益 K 和减小 γ 提高控制效果。

（3）关于多微网系统的鲁棒与性能最优控制的综合研究。本研究以多微网系统的交流母线频率稳定为鲁棒控制目标，同时将包括降低非可再生能源的使用量、增加能量路由器的计算资源使用量、降低由于过度控制导致的设备损耗等在内的多种性能指标纳入到优化目标之中。最后，本研究提出一种基于纳什均衡点的随机混合 H_2/H_∞ 控制技术，实现了系统鲁棒性和最优性之间的平衡控制，并且在仿真中得到了验证。

5.2　未来研究展望

本研究从能量与信息综合管理的角度为基于能量路由器连接的能源互联网场景提供了相应的解决方法。但是，能源互联网作为一个信息-能量深度融合的跨多学科、跨多领域的重要电力系统，不单单涉及电力系统与网络通讯。因此，本研究受到篇幅、研究时长等限制，主要针对系统内部的暂态电压、频率稳定控制以及性能最优控制问题进行了研究和讨论。在本研究的基础上，还有许多方面在未来的研究工作中需要得到讨论。

（1）包括能量路由器在内的一些能源互联网核心装置仍处于理论研究以及装置开发阶段，本文中的研究主要依靠数学建模和理论分析。因此，在未来的研究中，在实际的能源互联网系统中对本文提出的方法进行研究与验证是必要的。

（2）能源互联网将网络通信等信息层与电力系统等物理层耦合在一起，这种高度耦合使得网络传输时延对于系统的稳定会产生影响。在未来，进一步考虑在时延大小对于控制效果的影响是必要的，比如，在偶发高延迟导致部分控制信号丢失的情况下，如何仍能保证系统稳定运行。

（3）本研究采用的是随机控制理论在内的多种控制方法，包括机器学习在内的智能算法并没有在本研究中涉及。然而机器学习在包括能源互联网在内的工程领域是有非常广的应用空间，因此在未来的研究中，有必要进一步将机器学习应用到本文所研究问题之中。

参考文献

[1] 王继业, 孟坤, 曹军威, 等. 能源互联网信息技术研究综述[J]. 计算机研究与发展, 2015, 52 (5): 1109-1126.

[2] Wang Y, Yang K, Wan W, et al. Energy efficient data and energy integrated management strategy for iot devices based on rf energy harvesting[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2021, 8(17): 13640-13651.

[3] Wang K, Yu J, Yu Y, et al. A survey on energy internet: Architecture, approach, and emerging technologies[J]. IEEE Systems Journal, 2017, 12(3): 2403-2416.

[4] 林震, 冯宗宪, 张中样, 等. 碳达峰与碳中和: 应对全球气候变化的中国行动[J]. 探索与争鸣, 2021(9): 4-31.

[5] 杨新法, 苏剑, 吕志鹏, 等. 微电网技术综述[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(1): 57-70.

[6] 张凡, 牟龙华, 王子豪, 等. 主从控制孤岛微电网的优化故障控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(4): 1241-1248.

[7] 胡学浩. 智能电网——未来电网的发展态势[J]. 电网技术, 2009, 33(14): 1-5.

[8] 董朝阳, 赵俊华, 文福拴, 等. 从智能电网到能源互联网: 基本概念与研究框架[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(15): 1-11.

[9] 刘冠伟. 能源转型背景下的储能技术发展前景[J]. 中外能源, 2017, 22(12): 69-78.

[10] 肖泽青, 华昊辰, 曹军威. 人工智能在能源互联网中的应用综述[J]. 电力建设, 2019, 40(5): 63-70.

[11] 郭慧, 汪飞, 张笠君, 等. 基于能量路由器的智能型分布式能源网络技术[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(12): 3314-3325.

[12] 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.

[13] Li W, Yang T, Delicato C, F, et al. On enabling sustainable edge computing with renewable energy resources[J]. IEEE Communications Magazine, 2018, 56(5): 94-101.

[14] 赵鹏, 蒲天骄, 王新迎, 等. 面向能源互联网数字孪生的电力物联网关键技术及展望[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(2): 447-457.

[15] Liu S, Hu Z, Wang X, et al. Stochastic stability analysis and control of secondary frequency regulation for islanded microgrids under random denial of service attacks[J]. IEEE transactions on industrial informatics, 2019, 15(7).

[16] Hua H, Cao J. Voltage control for uncertain stochastic nonlinear system with application to energy internet：non-fragile robust h_∞ approach[J]. Journal of Mathematical Analysis and Applications, 2018, 463: 93-110.

[17] Hua H, Qin Y, Hao C, et al. Optimal energy management strategies for energy internet via deep reinforcement learning approach[J]. Applied Energy, 2019, 239: 598-609.

[18] 曹军威, 王继业, 明阳阳, 等. 软件定义的能源互联网信息通信技术研究[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(14): 3649-3655.

[19] 孙宏斌, 郭庆来, 潘昭光. 能源互联网: 理念、架构与前沿展望[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(19): 1-8.

[20] Zhou K, Yang S, Shao Z. Energy internet: The business perspective[J]. Applied energy, 2016, 178: 212-222.

[21] Hui H, Xie J, Zhao D, et al. Electrical vehicle wireless charging technology based on energy internet application in china[J]. Procedia Computer Science, 2016, 83: 1332-1337.

[22] 盛万兴, 李鹏华, 段青, 等. 基于 Lyapunov 优化方法的含能量路由器的能源集线器能量管理策略研究[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(21): 6212-6215.

[23] 耿琪, 胡炎, 何建宗, 等. 基于纳什谈判的区域综合能源系统运行优化[J]. 电力建设, 2020, 41(1): 114-125.

[24] 刘畅, 卓建坤, 赵东明, 等. 利用储能系统实现可再生能源微电网灵活安全运行的研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(1): 369-417.

[25] Dong W, Yang Q, Li W, et al. Machine-learning-based real-time economic dispatch in islanding microgrids in a cloud-edge computing environment[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2021, 8(17): 13703 - 13711.

[26] 仲志强, 成海生, 蔡华, 等. 基于分时电价和需求响应的家庭微电网系统协同控制策略及其实现[J]. 现代电力, 2021, 38(1): 69-78.

[27] Arunan A, Sirojan T, Ravishankar J, et al. Real-time adaptive differential feature-based protection scheme for isolated microgrids using edge computing[J]. IEEE Systems Journal, 2020, 15 (1): 1-11.

[28] 王同贺, 华昊辰, 曹军威. 共识边缘计算及其在能源互联网中的应用[J]. 电力建设, 2021, 42(2): 116-125.

[29] 许志荣, 杨苹, 赵卓立, 等. 中国多微网系统发展分析[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(17): 12-20.

[30] Munir S, Abedin F, S, Tran H, N, et al. When edge computing meets microgrid: a deep reinforcement learning approach[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2019, 6(5): 7360-7374.

[31] 华昊辰, 李宇童, 王同贺, 等. 一种基于混合随机 H_2/H_∞ 方法的能源互联网边缘计算系统控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(21): 6875-6885.

[32] 张树华, 仝杰, 张鋆, 等. 面向能源互联网智能感知的边缘计算技术研究[J]. 电力信息与通信技术, 2020, 18(4): 42-50.

[33] 李文博, 李华东, 张鹏飞, 等. 考虑不确定性的区域能源互联网源-荷-储协调优化[J]. 现代电力, 2019, 36(3): 11-18.

[34] Conti S, Faraci G, et.al. Battery management in a green fog-computing node：a reinforcement-learning approach[J]. IEEE Access, 2017, 5: 21126-21138.

[35] Gu L, Cai J, Zeng D, et al. Energy efficient task allocation and energy scheduling in green energy powered edge computing[J]. Future Generation Computer Systems, 2019, 95(4): 89-99.

[36] 徐楚轲, 吴昌宏, 舒杰, 等. 一种面向分布式发电微电网的边缘计算架构与应用[J]. 新能源进展, 2020, 8(5): 8-16.

[37] Yang T, Zhang Y, Li W, et al. Decentralized networked load frequency control in interconnected power systems based on stochastic jump system theory[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2020, 11(5): 4427 - 4439.

[38] Hua H, Qin Z, Dong N, et al. Data-driven dynamical control for bottom-up energy internet system[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2021, 13(1): 315 - 327.

[39] 杨欢红, 杨小强, 黄文焘, 等. 基于双层等效输入扰动的孤岛微电网频率控制[J]. 电力电子技术, 2020, 54(9): 99-103.

[40] 姚建华, 胡晟, 王冠, 等. 基于强化学习的孤岛微电网多源协调频率控制方法[J]. 电力建设, 2020, 41(9): 69-75.

[41] Hua H, Qin Y, Xu H, et al. Robust control method for dc microgrids and energy routers to improve voltage stability in energy internet[J]. Energies, 2019, 12(9): 1622-1639.

[42] Khalghani M R, Solanki J, Solanki S K, et al. Stochastic secondary frequency control of islanded microgrid under uncertainties[J]. IEEE Systems Journal, 2020, PP(99).

[43] Qin Y, Hua H, Cao J. Stochastic optimal control scheme for battery lifetime extension in islanded microgrid via a novel modeling approach[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2019, 10(4): 4467-4475.

[44] Hui H, Zhou C, An X, et al. A new resource allocation mechanism for security of mobile edge computing system[J]. IEEE Access, 2019, 7: 116886–116899.

[45] Kreutz D, Ramos F, Verissimo P. Software-defined networking: A comprehensive survey[J]. Proceedings of the IEEE, 2014, 103(1).

[46] Rafique W, Qi L, Yaqoob I, et al. Complementing iot services through software defined networking and edge computing: A comprehensive survey[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2020, 22(3): 1761 - 1804.

[47] Amin R, Reisslein M, Shah N. Hybrid sdn networks: A survey of existing approaches[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2018, 20(4): 3259 - 3306.

[48] 付永红, 毕军, 张克尧, 等. 软件定义网络可扩展性研究综述[J]. 通信学报, 2017, 38(7): 22-36.

[49] 慈松, 刘前卫, 康重庆, 等. 从" 信息-能量" 基本关系看信息能源深度融合[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(7): 20-27.

[50] 董旭柱, 华祝虎, 尚磊, 等. 新型配电系统形态特征与技术展望[J]. 高电压技术, 2021, 09 (47): 3021-3035.

[51] 曹袖, 黄瀚, 王雪平, 等. 软件定义电网: 概念, 结构与示例[J]. 电力系统自动化, 2016, 40 (6): 1-9.

[52] 桑博, 张涛, 刘亚杰, 等. 多微电网能量管理系统研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40 (10): 3077-3093.

[53] Bevrani H, Feizi R, M, et.al. Robust frequency control in an islanded microgrid: H_∞ and μ -synthesis approaches[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2016, 7: 706-717.

[54] Mathieu J L, Koch S, Callaway D S. State estimation and control of electric loads to manage real-time energy imbalance[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28(1): 430-440.

[55] Hu W, Wu Z, Lv X, et al. Robust secondary frequency control for virtual synchronous machine based microgrid cluster using equivalent modeling[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2021, 12(4): 2879 - 2889.

[56] Khooban M H, Niknam T, Shasadeghi M, et al. Load frequency control in microgrids based on a stochastic non-integer controller[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2017, 13(2): 138-147.

[57] Hua H, Hao C, Qin Y, et al. A class of control strategies for energy internet considering system robustness and operation cost optimization[J]. Energies, 2018, 11(6): 1593-1612.

[58] Babayomi O, Li Z, Zhang Z. Distributed secondary frequency and voltage control of parallel-connected vscs in microgrids: A predictive vsg-based solution[J]. CPSS Transactions on Power Electronics and Applications, 2020, 5(4): 342-351.

[59] Bevrani H, Feizi M R, Ataee S. Robust frequency control in an islanded microgrid: $h\infty$ and μ-synthesis approaches[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2015, 7(2): 1527-1532.

[60] Singh B, Sharma R, Kewat S. Robust control strategies for syrg-pv and wind based islanded microgrid[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2020, 68(4): 3137 - 3147.

[61] Hansen L P, Sargent T J. Robust control and model uncertainty[J]. The American economic review, 2001.

[62] Hamzeh M, Emamian S, Karimi H, et al. Robust control of an islanded microgrid under unbalanced and nonlinear load conditions[J]. IEEE Journal of Emerging & Selected Topics in Power Electronics, 2016, 4(2): 512-520.

[63] Malliaris A G. Wiener process[M]. Econometrics, 1990.

[64] Alqahtani A, Marafi S, Musallam B, et al. Photovoltaic power forecasting model based on nonlinear system identification[J]. Canadian Journal of Electrical & Computer Engineering, 2016, 39(3): 243-250.

[65] Hua H, Qin Y, Cao J. A class of optimal and robust controller design for islanded microgrid [C]//2017 IEEE 7th International Conference on Power and Energy Systems (ICPES). Toronto, ON, Canada, 2017.

[66] Zhao C, Sun W, Wang J, et al. Distributed robust secondary voltage control for islanded microgrid with nonuniform time delays[J]. Electrical Engineering, 2021, 103: 2625‑2635.

[67] Xu L, Guo Q, He G, et al. The impact of synchronous distributed control period on inverter-based cyber‑physical microgrids stability with time delay[J]. Applied Energy, 2021, 301: 117440.

[68] Xu S, Chen T. Robust h_∞ control for uncertain stochastic systems with state delay[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2002, 47: 2089-2094.

[69] Qin Y, Hua H, Cao J. Energy internet system control and optimization: A stochastic risk-sensitive control approach[C]//2019 IEEE 15th International Conference on Control and Automation (ICCA). Edinburgh, UK, 2019: 79-84.

[70] 张忠, 王建学. 采用模型预测控制的微电网有功无功联合实时调度方法[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(24): 6743-6750.

[71] Heydari R, Dragicevic T, Blaabjerg F. High-bandwidth secondary voltage and frequency control of vsc-based ac microgrid[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2019, 36(11): 11320 - 11331.

[72] Pourmousavi S A, Sharma R K, Asghari B. A framework for real-time power management of a grid-tied microgrid to extend battery lifetime and reduce cost of energy[C]//IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies (ISGT). Washington, DC, USA, 2012.

[73] 田德, 张琦. 基于优化核极限学习机的光伏出力短期预测[J]. 电力科学与工程, 2017, 33 (12): 15-21.

[74] Cao Y, Lam J. Robust h_∞ control of uncertain markovian jump systems with time-delay[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2000, 45(1): 77-83.

[75] 孙敏慧, 邹云, 徐胜元. 马尔可夫切换系统的鲁棒 H_∞ 控制[J]. 控制与决策, 2005, 20(12): 1370-1373.

[76] Zhao C, Sun W, Wang J, et al. Distributed cooperative secondary control for islanded microgrid with markov time-varying delays[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2019, 34(4): 2235-2247.

[77] Khan L U, Yaqoob I, Tran N H, et al. Edge-computing-enabled smart cities: A comprehensive survey[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2020, 7(10): 1-1.

[78] Cao K, Hu S, Shi Y, et al. A survey on edge and edge-cloud computing assisted cyber-physical systems[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2021, 17(11): 7806 - 7819.

[79] Khan A, Othman M, Madani S A, et al. A survey of mobile cloud computing application models [J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2014, 16(1): 393-413.

[80] Lu S, Li X. Quantum-resistant lightweight authentication and key agreement protocol for fog-based microgrids[J]. IEEE Access, 2021, 9: 27588 - 27600.

[81] Lin Z, Liu J, Niu Q, et al. Mixed pitch control of wind turbine with a markovian jump model [J]. International Journal of Control, 2018, 91: 156-169.

[82] 李洪跃, 王锡淮, 肖健梅, 等. 差分进化改进微电网负荷频率混合鲁棒控制型[J]. 电机与控制学报, 2019, 23(11): 118-126.

[83] 高赐威, 吴刚, 陈宋宋, 等. 考虑地理分散的数据中心服务器频率调节的电网降损模型[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(06): 1673-1681.

[84] Chen B S, Zhang W. Stochastic h_2/h_∞ control with state-dependent noise[J]. IEEE Transactions on automatic control, 2004: 380-385.

[85] Limebeer D J N, Anderson B D O, Hendel B. A nash game approach to mixed h_2/h_∞ control [J]. Automatic Control, IEEE Transactions on, 1994, 39(1): 69-82.

附录 A　补充内容

A.1　第 2 章公式推导

首先定义合适的状态反馈控制器 $u(t)=Kx(t),K=YX^{-1}$，并且将上述定义的两个等式代入到系统方程 (2-12) 之中, 可以得到以下方程组（A.1-1）：

$$\begin{cases} dx(t)=[(A+BK)x(t)+A_dx(t-\tau)+Cv(t)]dt+Rxdw(t) \\ z=Dx(t) \end{cases} \tag{A.1-1}$$

之后，令 $P=X^{-1},Q=X^{-1}SX^{-1}$。接着定义针对系统A.1-1的李雅普诺夫候选函数[68]A.1-2：

$$V(x,t)=x(t)'Px(t)+\int_{t-\tau}^{t}x(s)'Qx(s)ds \tag{A.1-2}$$

根据伊藤公式，可以得到以下随机微分方程式：

$$\varepsilon\{V(x(t),t\}=\varepsilon\left\{\int_0^t LV(x(s),s)\right\}ds \tag{A.1-3}$$

其中，

$$\begin{aligned} LV(x,t)=&2x'(t)P[(A+BK)x(t)+A_dx(t-\tau)+Cv(t)]+x'(t)R'PRx(t) \\ &+x'(t)Qx(t)-(1-\dot{\tau})x'(t-\tau)Qx(t-\tau) \end{aligned} \tag{A.1-4}$$

接下来定义代价函数：

$$J(t)=\varepsilon\left\{\int_0^t[z'(s)z(s)-\gamma^2v'(s)v(s)]\right\}ds \tag{A.1-5}$$

由于 $t>0$，由公式（A.1-4）和（A.1-5）可得：

$$\begin{aligned} J(t)=&\varepsilon\left\{\int_0^t[z'(s)z(s)-\gamma^2v'(s)v(s)+LV(x(s),s)]\right\}ds-\varepsilon\{V(x(t),t\} \\ \leqslant&\varepsilon\left\{\int_0^t[z'(s)z(s)-\gamma^2v'(s)v(s)+LV(x(s),s)]\right\}ds \end{aligned} \tag{A.1-6}$$

其中，

$$z'(s)z(s)-\gamma^2v'(s)v(s)+LV(x(s),s) \tag{A.1}$$

$$
\begin{aligned}
&= x'(s)D'Dx(s) - \gamma^2 v'(s)v(s) + x'(t)Qx(t) \\
&\quad + 2x'(s)P[(A+BK)x(s) + A_d x(s-\tau) + Cv(s)] \\
&\quad + x'(s)R'PRx(s) - (1-\dot{\tau})x'(t-\tau)Qx(t-\tau) \\
&= [x'(s), x'(s-\tau), v'(s)]\Gamma[x'(s), x'(s-\tau), v'(s)]'
\end{aligned} \tag{A.1-7}
$$

$$
\Gamma = \begin{bmatrix} \Omega & PA_d & PC \\ A_d'P & -(1-h)Q & 0 \\ C'P & 0 & -\gamma^2 I \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} R'X'R & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \tag{A.1-8}
$$

其中，$\Omega = PA + A'P + PBK + K'B'P + D'D + Q$

由公式（A.1-6）到公式（A.1-8），可以得出：

$$
J(t) \leqslant \varepsilon \left\{ \int_0^t [[x'(s), x'(s-\tau), v'(s)]\Psi[x'(s), x'(s-\tau), v'(s)]'] \right\} ds \tag{A.1-9}
$$

矩阵 Ψ 为：

$$
\Psi = \begin{bmatrix} \Omega & PA & D' & R' & PC \\ A'P & -(1-h)Q & 0 & 0 & 0 \\ D & 0 & -I & 0 & 0 \\ R & 0 & 0 & -X & 0 \\ C'P & 0 & 0 & 0 & -\gamma^2 I \end{bmatrix} \tag{A.1-10}
$$

将公式（A.1-10）分别左乘、右乘对角矩阵 $[P^{-1}, P^{-1}, I, I, I]$, 可以得到最终 LMI 方程。

$$
\begin{bmatrix} \Omega & AX & XD' & XR' & C \\ XA_d' & -(1-h)S & 0 & 0 & 0 \\ DX & 0 & -I & 0 & 0 \\ RX & 0 & 0 & -X & 0 \\ C' & 0 & 0 & 0 & -\gamma^2 I \end{bmatrix} \leqslant 0 \tag{A.1-11}
$$

A.2　第 3 章公式推导

首先定义 $\hat{A}_{1i} = A_i - B_i K_i$。并且通过将 $u_i = -K_i x$ 引入到系统公式 (3-11) 之中, 可以得到该闭环系统方程 (A.2-1) :

$$\begin{cases} dx = [\hat{A}_{1i}x + A_{di}x(t-\tau) + C_i v]dt \\ z = D_i x \end{cases} \tag{A.2-1}$$

在本文中，所选择的随机李雅普诺夫泛函 V(x,i)[74] 为如下所示:

$$V(x,i) = x'(t)P_i x(t) + \int_{-\tau}^{0} x'(t-\theta)Qx(t-\theta) \tag{A.2-2}$$

之后可以得到：

$$\begin{aligned} AV(x,i) =& X_i'[\hat{A}_{1i}'p_i + P_i\hat{A}_{1i} + \sum_{j=1}^{s}\pi_{ij}p_j]X_i \\ &+ X_i'(t-\tau)A_{di}'P_iX_i + X_i'P_iA_{di}X_i(t-\tau) \\ &+ v'C_i'P_iX_i + X_i'P_iC_iv + X_i'QX_i \\ &- X_i'(t-\tau)QX_i(t-\tau). \end{aligned} \tag{A.2-3}$$

接下来，我们可以得到以下方程：

$$EV(x,i) = E\{\int_0^T AV(x(s),i(s))ds\} \tag{A.2-4}$$

因此，成本函数可以改写为：

$$\begin{aligned} J &= E\{\int_0^T [z'z - \gamma^2 v'v + AV(x,i)]dt\} - EV(x,i) \\ &\leqslant E\{\int_0^T [z'z - \gamma^2 v'v + AV(x,i)]dt\} \\ &= E\{\int_0^T [\delta'\Theta_i\delta]dt\} < 0, \end{aligned} \tag{A.2-5}$$

其中 $\delta = [x', x'(t-\tau), v']'$ ， Θ_i 的表达式如下.

$$\Theta_i = \begin{bmatrix} \hat{A}_{1i} & P_i A_{di} & P_i C_i \\ A'_{di} P_i & -Q & 0 \\ C'_i P_i & 0 & -\gamma_2 I \end{bmatrix} \leqslant 0 \tag{A.2-6}$$

其中 $\hat{A}_{1i} = \hat{A}'_i P_i + P_i \hat{A}_i + \sum_{j=1}^{s} \pi_{ij} P_j + Q + D'_i D_i$. 通过舒尔补[74]，可以得到基于 (A.2-6) 变换得到的矩阵不等式，该矩阵不等式如下所示：

$$\begin{bmatrix} \hat{A}'_i P_i + P_i \hat{A}_i + \sum_{j=1}^{s} \pi_{ij} P_j + Q & P_i A_{di} & P_i C_i & D'_i \\ A'_{di} P_i & -Q & 0 & 0 \\ C'_i P_i & 0 & -\gamma_2 I & 0 \\ D_i & 0 & 0 & -I \end{bmatrix} \leqslant 0 \tag{A.2-7}$$

通过矩阵 $T_i = diag(X_i, I, I, I)$ 对矩阵不等式 (A.2-7) 进行乘前和乘后之后，该矩阵不等式等价于以下矩阵不等式：

$$\begin{bmatrix} \Omega_i & A_{di} & C_i & X_i D'_i \\ A'_{di} & -Q & 0 & 0 \\ C'_i & 0 & -\gamma_2 I & 0 \\ D_i X_i & 0 & 0 & -I \end{bmatrix} \leqslant 0 \tag{A.2-8}$$

其中 $\Omega_i = X_i \hat{A}'_i - Y_i B' + \hat{A}_i X_i + X_i \sum_{j=1}^{s} \pi_{ij} P_j X_i + X_i Q X_i$. 通过舒尔补, 可以得到以下矩阵不等式（A.2-9）。对于不同状态 $i = 1, ..., s$, 该矩阵不等式可以等效为最终的 LMI (A.2-10) 方程。

$$\begin{bmatrix} \Omega_i + A_{di} Q^{-1} A'_{di} & X_i D'_i & C_i \\ D_i X_i & -I & 0 \\ C'_i & 0 & -\gamma_2 I \end{bmatrix} \leqslant 0 \tag{A.2-9}$$

$$\begin{bmatrix} \Omega_i + A_{di} R A'_{di} & X'_i D' & C_i & \Xi_i \\ D X_i & -I & 0 & 0 \\ C'_i & 0 & -\gamma_2 I & 0 \\ \Xi'_i & 0 & 0 & -\Gamma_i \end{bmatrix} \leqslant 0 \tag{A.2-10}$$

A.3　第 4 章公式推导

根据正文所示，在本工作中，随后，该随机混合 H_2/H_∞ 问题的求解被转换为了寻找纳什均衡点 u^* 和 v^*，从而使得下列两个不等式得到满足：

$$\begin{cases} J_1(u^*, v^*) \leqslant J_1(u^*, v) \\ J_2(u^*, v^*) \leqslant J_2(u, v^*) \end{cases} \tag{A.3-1}$$

首先，令 $u^* = -K_2 x$, 代入到系统方程4-9中可得：

$$dx = [(A - BK_2)x + A_d x(t-\tau) + Cv]dt + Dxdw(t) \tag{A.3-2}$$

假设 $P_1(T) = 0$, 由伊藤公式[84]可得：

$$\begin{aligned} dx' P_1 x =& [x'(PA + A'P)x + 2x'P(Bu + Cv) + x'D'P_1 Dx + x' p_1 x]dt \\ &+ 2x' P_1 Dx dw \end{aligned} \tag{A.3-3}$$

之后，利用配方法改写 H_∞ 性能指标 J_1:

$$\begin{aligned} J_1 =& E\left[\int_0^T (\gamma^2 v'v - z'z)dt\right] \\ =& E\left[\int_0^T (\gamma^2 v'v - z'z)dt\right] + E\left[x'(T)P_1(T)x(T) - x'(0)P_1(0)x'(0)\right] \\ =& E\left[\int_0^T (\gamma^2 v'v - z'z)dt\right] + E\int_0^T dx' P_1 x dt \\ =& E\int_0^T \gamma^2 v'v - x'F'Fx + x'(P_1 A + A'P_1 + D'P_1 D + \dot{P}_1)x + 2x'P_1(Bu + Cv)dt \\ =& E\int_0^T \gamma^2 (v + \gamma^{-2} C'P_1 x)'(v + \gamma^{-2} C'P_1 x) \\ &+ x'(2P_1 A - \gamma^2 P_1 CC'P_1 - F'F + D'P_1 D - 2P_1 BK_2 + \dot{P}_1)x dt \end{aligned} \tag{A.3-4}$$

根据不等式 $J_1(u^*, v^*) \leqslant J_1(u^*, v)$ 可知，在假设 $u^* = -K_2 x$ 的基础上，若（A.3-4）等于 0，则满足 $J_1(u^*, v^*)$ 恒小于等于 $J_1(u^*, v)$，因此可得以下等式：

$$\begin{cases}\dot{P}_1 - F'F + 2P_1A + D'P_1D - 2P_1BK_2 - \gamma^2 P_1CC'P_1 = 0 \\ v = -\gamma^{-2}C'P_1'x\end{cases} \tag{A.3-5}$$

同理，令 $v^* = -K_1x$, 代入到系统方程4-9中可得：

$$dx = [(A - BK_2)x + Adx(t-\tau) + Cv]dt + Dxdw(t) \tag{A.3-6}$$

$$dx = [(A - CK_1)x + Bu]dt + Dxdw(t) \tag{A.3-7}$$

假设 $P_2(T) = 0$, 由伊藤公式可得：

$$dx'P_1x = 2x'P_2[(A - CK_1)x + Bu] + x'D'Dx + x'\dot{p}_2x]dt + 2x'P_2Dxdw \tag{A.3-8}$$

之后，利用配方法[84],H_∞ 性能指标 J_2 可改写为:

$$\begin{aligned}J_2 =& E\int_0^T (x'Mx + u'Ru) + x'(T)P_2(T)x'(T) - x'(0)P_2(0)x'(0) \\ &+ x'(0)P_2(0)x'(0)dt \\ =& E\int_0^T (u + R^{-1}B'P_2'x)'R(u + R^{-1}B'P_2'x) + x'(-P_2BR^{-1}B'P_2' + M + 2P_2A \\ &+ D'P_2'D - 2P_2CK_1 + \dot{P}_2)xdt\end{aligned} \tag{A.3-9}$$

根据不等式 $J_2(u^*, v^*) \leqslant J_2(u, v^*)$ 可知，在假设 $v^* = -K_1x$ 的基础上，若（A.3-9）等于 0，则满足 $J_2(u^*, v^*)$ 恒小于等于 $J_2(u, v^*)$，因此可得以下等式：

$$\begin{cases}-P_2BR^{-1}B'P_2' + M + 2P_2A + D'P_2'D - 2P_2CK_1 + \dot{P}_2 = 0 \\ u = -R^{-1}B'P_2'x\end{cases} \tag{A.3-10}$$

最后，将 $v^* = -K_1x$,$u^* = -K_2x$ 代入公式（A.3-10）和（A.3-5）中，可得耦合的黎卡提方程：

$$\begin{cases} \dot{P}_1 - F'F + 2P_1A + D'P_1D - 2P_1BK_2 - \gamma^2 P_1CC'P_1 = 0 \\ \dot{P}_2 + 2P_2A - 2P_2CK_1 + D'P_2D - P_2BR^{-1}B'P_2 + M = 0 \\ K_1 = \gamma^{-2}C'P_1' \\ K_2 = R^{-1}B'P_2' \end{cases} \tag{A.3-11}$$

致　谢

研究生生涯即将结束之际，衷心地感谢曹军威老师以及华昊辰老师的悉心培养和教导，让我在过去的三年中在学习上收获累累。毕业论文撰写期间，在我困惑焦虑时，曹老师与华老师总是很有耐心地帮助我、指点我，使我克服了许多困难，也成长了许多。

感谢秦钰超师兄、尤海霞师姐、秦兆铭同学以及丁晓可师弟在我的学校学习和生活中的帮助，和他们在一起我度过了十分快乐的校园时光。非常感谢刘迪博士、郭盛博士、梁宏博士等几位实验室博士后在日常科研和学习中对我的帮助，和他们的交流也为我在未来择业选择上提供了很多经验和建议，让我终身受用。

在这三年的学习中，我的父母、爷爷奶奶和其他家人是我最强大的后盾，他们总是默默的关心着我，在日常生活上对我无私支持，在精神上不断鼓励我，十分感谢他们。

声　明

本人郑重声明：所呈交的学位论文，是本人在导师指导下，独立进行研究工作所取得的成果。尽我所知，除文中已经注明引用的内容外，本学位论文的研究成果不包含任何他人享有著作权的内容。对本论文所涉及的研究工作做出贡献的其他个人和集体，均已在文中以明确方式标明。

签　名：_____ 日　期：_____

个人简历、在学期间完成的相关学术成果

个人简历

1996 年 04 月 01 日出生于山西长治市。

2018 年本科毕业并获得工学学士学位。

2019 年 9 月通过研究生考试进入清华大学自动化系攻读控制工程硕士至今。

在学期间完成的相关学术成果

学术论文：

[1] **Li Y**, Hao H, Cao J. Voltage regulation in edge energy router system via H∞ control with markov jump[J]. CSEE Journal of Power and Energy Systems, 2021, Accepted. (二区 SCI，影响因子：3.938)

[2] **Li Y**, Hua H , Guo J , et al. Cloud-edge collaborative optimization for information layer of energy internet[C]// 2020 10th International Conference on Power and Energy Systems (ICPES). IEEE，2020. （EI 收录）

[3] 华昊辰、**李宇童**, 王同贺, 等. 一种基于混合随机 H2/H∞ 方法的能源互联网边缘计算系统控制策略 [J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(21):10.（中文核心期刊、EI 收录）

[4] Li H, Zhang H, Wang Q, You Y, **Li Y**, et al. Robust frequency control for green energy powered edge computing system[C]// 2021 IEEE PES General Meeting. IEEE, 2021. (EI 收录)

专利：

[5] 李宇童, 曹军威. 一种边缘能量路由器系统的控制方法、系统及计算机介质: 中国,202110801258.1.（中国专利申请号）

[6] 李宇童, 华昊辰, 曹军威. 一种面向多边缘能量路由器系统的鲁棒频率偏差稳定控制方法：中国, 申请号：202011268951.9.（中国专利申请号）

在校期间获得奖励：

[7] 清华大学 2021 年研究生社会实践优秀奖学金

[8] 清华大学 2021 年研究生社工优秀奖学金一等奖

[9] 清华大学 2021 年深圳研究生院院级奖学金二等奖

指导教师学术评语

论文提出了……

联合指导教师学术评语

论文提出了……

答辩委员会决议书

论文提出了……

论文取得的主要创新性成果包括：

1. ……

2. ……

3. ……

论文工作表明作者在 ××××× 具有 ××××× 知识，具有 ×××× 能力，论文 ××××，答辩 ××××。

答辩委员会表决，（× 票/一致）同意通过论文答辩，并建议授予 ×××（姓名）×××（门类）学博士/硕士学位。