区域能源互联网系统控制策略研究

(申请清华大学工学硕士学位论文)

培 养 单 位 ： 自动化系

学　　科 ： 控制科学与工程

研　究　生 ： 秦 钰 超

指 导 教 师 ： 曹 军 威　研究员

二〇二〇年五月

Control and Optimization for Regional Energy Internet Systems

Thesis Submitted to

Tsinghua University

in partial fulfillment of the requirement

for the degree of

Master of Science

in

Control Science and Engineering

by

Qin Yuchao

Thesis Supervisor: Professor Cao Junwei

May, 2020

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。

本人保证遵守上述规定。

（保密的论文在解密后应遵守此规定）

作者签名：_____　　导师签名：_____

日　　期：_____　　日　　期：_____

摘 要

能源互联网为可再生能源在传统电力系统的接入提供了可靠的解决方案，同时也是应对未来能源危机和气候变化等问题的重要手段。然而，光伏和风力发电等可再生能源发电功率中存在的随机性和不确定性给能源互联网系统的运行与控制带来了巨大的挑战。基于能源互联网的基础架构和组织形式，本文针对多微网这一典型的区域能源互联网系统开展研究。通过机器学习、随机分析和控制理论等技术手段的综合应用，本文对微电网系统能量管理，多微网协同控制与优化和能量路由器的能量传输策略等不同层次的区域能源互联网能量管理问题进行了研究，从电力系统控制与优化的角度为未来能源互联网系统的研究提供了一定的支撑。通过统计分析和数值仿真等手段，本文提出的区域能源互联网系统的控制与优化方法的性能与优越性也得到了分析与验证。

本文的贡献和创新点主要包括以下几点。

- 基于神经网络的电量预测模型和基于随机过程的概率模型被同时用于对光伏等可再生能源发电功率和电力负荷功率的建模过程中。这一新型的建模方法既具有机器学习方法带来的高精度电量预测效果，同时也能将可再生能源和负荷功率中存在的随机性纳入微电网系统的模型中。
- 随机微分方程被用于构建区域能源互联网系统的动态模型。相比于基于常微分方程的传统电力系统模型，在由随机微分方程组描述的微电网系统中，功率波动的随机性和不确定性被分别作为随机过程和扰动输入进行建模。这不仅提高了微电网系统的建模精度，同时也有利于提升相关控制策略的可靠性。
- 区域能源互联网系统内的几类典型能量管理问题被建模为控制问题，并通过随机最优控制，风险敏感控制和鲁棒控制问题等等先进的控制方法得到了解决。相比于在传统电力系统控制中广泛使用的频域控制方法，这些时域控制方法能够有效地处理本研究中电力系统模型具有的随机性。

关键词： 能源互联网；随机控制；最优策略；机器学习

Abstract

Confronted with the energy crisis and climate change, the energy internet provides a practical way to achieve better utilization of renewable energy sources. However, due to the stochastic and uncertain nature of the renewable energy sources such as the solar power and wind power, the control problems in energy internet scenarios are much more complex than those in conventional power systems. With the application of machine learning, stochastic analysis and control and optimization techniques, the energy management problems in different levels and aspects of power systems in the setting of regional energy internet are considered in this work. Advanced control schemes for energy routers, microgrids and multi-microgrid systems are developed, and the feasibility and effectiveness of these methods are evaluated with statistics and numerical simulations.

The main contributions of this work can be found as follows.

- For the dynamical models of the power deviations from Photovoltaic generators and loads, a hybrid model of neural networks and stochastic processes is proposed in this work. This hybrid model is capable to capture the stochastic characters in the power deviations from PVs and loads as well as providing accurate power forecasting results.
- Compared with the widely used deterministic models for power systems, in this work, the randomness and uncertainty existing in the power deviations in the energy internet system are modeled separately via stochastic models. With higher modeling accuracy, the control strategies obtained could be more reliable when applied in practical energy internet systems.
- The energy management problems for the regional energy internet system studied in this work are formulated as corresponding control problems. These problems are then solved with advanced control techniques like stochastic optimal control and robust control. Compared with the conventional frequency-domain methods, the time-domain methods adopted in this work is more suitable to tackle the stochastic terms introduced in the system modeling for energy internet systems.

Key Words: Energy Internet; Stochastic Control; Optimal Strategies; Machine Learning

目 录

第 1 章 引言 1
1.1 研究背景 1
1.2 国内外研究现状 4
1.3 区域能源互联网系统的控制与优化 7
1.4 本研究的主要贡献 9
1.5 本文的章节安排 10
第 2 章 微电网系统的能量管理策略 12
2.1 离网运行的微电网系统模型 13
2.1.1 基于神经网络的电量预测模型 14
2.1.2 分布式光伏发电设备的功率模型 16
2.1.3 电力负荷功率动态模型 19
2.1.4 电池储能设备的电量与使用寿命模型 22
2.1.5 微型燃气轮机的受控功率动态模型 24
2.2 微电网系统的中长期能量管理问题 24
2.2.1 微电网系统动态模型 24
2.2.2 微电网系统电池储能设备使用寿命优化 25
2.3 基于随机最优控制方法的微电网能量管理策略 27
2.4 数值算例 28
2.5 本章小结 31
第 3 章 直流多微网系统鲁棒电压控制方法 32
3.1 直流多微网系统的组织模式和具体构成 33
3.1.1 直流多微网系统架构 33
3.1.2 直流微电网系统的组成成分及其动态模型 35
3.1.3 能量路由器功率流动态模型 37
3.2 直流多微网系统的电压控制问题 38
3.2.1 多微网系统动态模型 38
3.2.2 直流多微网系统电压稳定性指标 39
3.3 直流多微网系统的鲁棒电压控制策略 40
3.3.1 确保鲁棒稳定性的电压控制策略 40
3.3.2 基于凸优化技术的鲁棒电压控制策略 41

3.4 数值算例 43
3.5 本章小结 48
第 4 章 风险敏感的交流多微网系统频率控制 49
4.1 微电网系统和能量路由器的动态模型 50
4.2 风险敏感的多微网系统频率控制技术 51
4.2.1 多微网系统动态模型 52
4.2.2 多微网系统的风险敏感控制问题 53
4.2.3 风险敏感的交流多微网系统频率控制策略 54
4.3 数值算例 55
4.4 本章小结 60
第 5 章 能量路由器的能量存储管理方法 61
5.1 能量路由器的能量传输动态模型 61
5.2 能量路由器能量存储管理问题 64
5.3 能量路由器能量存储的鲁棒控制方法 65
5.4 数值算例 67
5.5 本章小结 71
第 6 章 总结与展望 72
6.1 主要研究内容总结 72
6.2 本研究存在的不足以及对未来研究的展望 73
参考文献 74
致 谢 80
声 明 81
个人简历、在学期间发表的学术论文与研究成果 82

主要符号对照表

EI	能源互联网
ER	能量路由器
MG	微电网
MT	微型燃气轮机
DEG	柴油发电机
FC	燃料电池
BES	电池储能设备
FES	飞轮储能设备
PV	光伏发电设备
WTG	风力发电设备
Load	电力负荷
LSTM	长短期记忆神经网络
MLP	多层感知器神经网络
f	微电网系统的母线频率
V	微电网系统的母线电压
Hz	频率单位
pu	标幺值
P_{MT}	微型燃气轮机的输出功率
P_{DEG}	柴油发电机的输出功率
P_{FC}	燃料电池的输出功率
P_{BES}	电池储能设备的充放电功率
P_{FES}	飞轮储能设备的充放电功率
P_{PV}	光伏发电设备的输出功率
P_{WTG}	风力发电设备的输出功率
P_{Load}	电力负荷功率
$P_{\odot}$	太阳辐射度
Δf	微电网系统的母线频率相对于参考值的偏差
ΔV	微电网系统的母线电压相对于参考值的偏差
ΔP_{MT}	微型燃气轮机的输出功率相对于参考值的偏差
ΔP_{DEG}	柴油发电机的输出功率相对于参考值的偏差
ΔP_{FC}	燃料电池的输出功率相对于参考值的偏差

ΔP_{BES}	电池储能设备的充电/放电功率相对于参考值的偏差
ΔP_{FES}	飞轮储能设备的充电/放电功率相对于参考值的偏差
ΔP_{PV}	光伏发电设备的输出功率相对于参考值的偏差
ΔP_{WTG}	风力发电设备的输出功率相对于参考值的偏差
ΔP_{Load}	电力负荷功率相对于参考值的偏差
$\mathbb{R}$	实数域
$\mathbb{R}^+$	正实数域
$\mathbb{E}$	数学期望算符
$(\cdot)^\intercal$	矩阵转置符号

第 1 章　引言

1.1　研究背景

随着全球工业化水平和经济发展水平的不断提升，人类活动对地球环境与资源带来的压力也日益显著。为了保护地球环境，实现可持续发展，在联合国框架下，世界各国政府就应对气候变化与实现人类可持续发展达成了《巴黎气候变化协定》[1]，《2030 年可持续发展议程》[2] 等多项协议。作为对传统化石能源的替代能源，可再生能源技术和产业也因其良好的发展前景而受到全球各国的持续关注[3]。可再生能源的推广可以有效减少包括二氧化碳在内的温室气体的排放，减缓全球变暖速度。然而，可再生能源（如光伏发电和风力发电等）的发电能力非常容易受到其安装地点附近的环境因素的影响，具有较强的间歇性和波动性，这给可再生能源在电网系统中的接入带来了挑战[4]。

为了提高可再生能源利用效率，有效地将可再生能源接入现有的电力系统，微电网（Microgrid）这一概念应运而生[5-6]。微电网是一种相对小型的电力网络，具有独立于主干电网自主运行的能力[7]。微电网的发电功能主要由分布式的可再生能源和小型发电设备提供。具有离网运行功能的微电网通常还配有储能设备，以实现长期可靠的电力服务。通过部署在其系统各处的智能监测和控制系统，微电网能够实现对其管理区域内的功率平衡，并实现智能化的能量调度[6,8-9]。自提出以来，微电网相关的技术和架构已被大量地用于光伏和风力发电等分布式可再生能源相关的研究中[8,10-14]。由于其实用可靠的特点，微电网技术也在世界各地得到了很多实际应用[15-17]。

近年来，随着信息与通信技术的发展，能源和电力系统的信息化和自动化程度也在不断提高[18-19]。电力系统中大量部署的智能电表和高度信息化、自动化的运行控制系统也使得构建智能电网（Smart Grid）系统变得可能[20]。另一方面，随着分布式可再生能源在电力系统中渗透率的提升，电力系统也越来越容易受到具有较大不确定性的天气等自然环境因素的影响。通过智能电网的建设，大数据分析和机器学习等先进的信息技术将在电力系统中得到有效的应用，电力系统的能源利用效率及其能源服务可靠性也将随之提升[19-22]。随着电力系统规模的增长和智能电网概念的扩展，与电力系统有着密切联系的供冷、供热、交通运输等周边系统也被纳入了智能电网的研究范畴[23-24]。智能电网的概念也被进一步拓展为能源互联网[18,25]（Energy Internet）。

能源互联网一词首次出现在英国《经济学人》杂志中[26-27]。经过数年的发展，

相关概念在美国未来学者里夫金的著作《第三次工业革命》[28] 中得到了进一步的总结和发展，能源互联网也变得更加广为人知，并引起了各国政府和相关产业界的重视[19,29]。在智能电网的基础上，能源互联网进一步引入了类似于信息互联网的开放、互联、分布式等高级特征[18,28,30]。参考信息互联网的架构模式，能源互联网可以大致分为物理层、信息层和应用层三部分[31-32]。其中物理层以能源和电力系统为核心，为能源互联网提供基础的能源供应与保障[18]；信息层依托通信和网络系统，通过软件定义网络（Software-defined Network）等技术手段为应用层和物理层的能量和信息交换提供了基础支撑[32]；应用层依托物理层和信息层，为多种能源互联网应用场景提供智能化的解决方案，同时面向用户提供综合的能源服务[29]。通过物理层、信息层与应用层系统的密切协作，能源互联网系统的运作与服务也将更加智能可靠[31]。

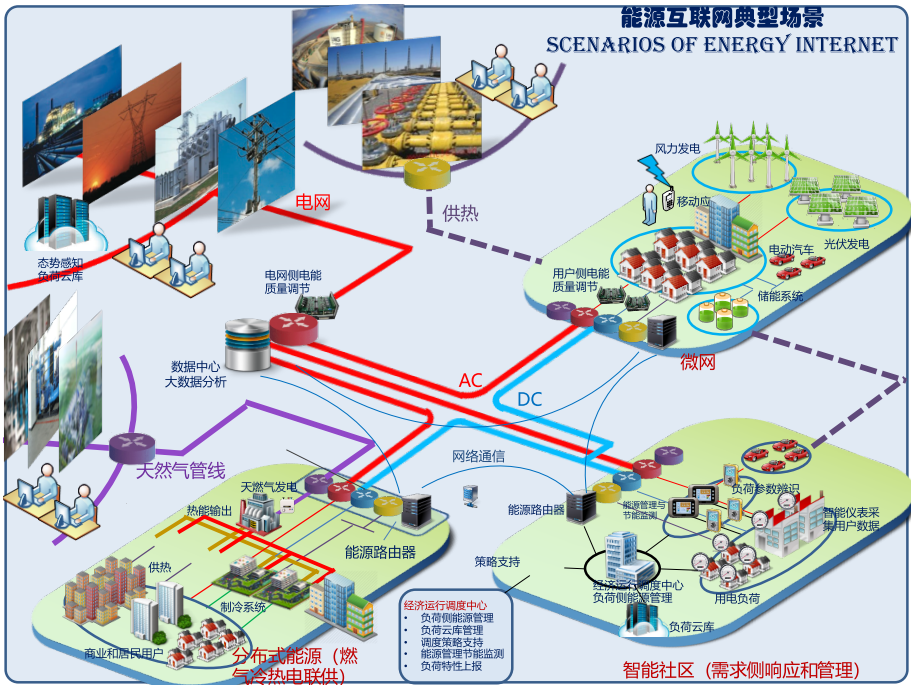


图 1.1　能源互联网系统典型应用场景[29]

典型的能源互联网应用场景如图 1.1 所示。包括微电网在内的多种局域电力系统通过能量路由器[33-37] 和能源电力传输线路构成的能量路由网络彼此相连，组成一个区域能源互联网系统。区域能源互联网系统内部署的智能电表等智能监测设备收集的数据被汇集到区域性的数据中心，从而实现与主干电网运行控制的协调规划以及对能源生产交易的合理调节[20]。其中，能量路由器在微电网系统内部的运行控制以及微电网间的能量传输调度中发挥着关键作用[33]。在微电网内部，能量路由器将根据系统运行状态和监测数据制定相应的控制策略，保证微电网系统高效、稳定的运行[10,38]。在微电网之间的能量传输系统中，能量路由器则能够通

过合理的能量传输协议和能量传输策略实现可靠的能量路由功能[39]，并通过微电网间的协同电力调度实现整个区域能源互联网系统的稳定运行[40-41]。

能源互联网为未来能源和电力系统提供了一种极具前景的发展方向，同时也带来了很多新的挑战。能源互联网的建设与发展围绕电力系统等重要能源系统开展，其物理基础与互联网具有较大差异[30]。要实现其开放共享、对等互联等高级特性，相关基础设备和设施的研发与建设不可或缺[18,33]。与此同时，由于能源互联网涉及到能源、电力、信息等多个领域，具有复杂的应用场景，其构建和运行管理需要跨学科的理论研究与实践探索作为支撑[20,24]。

可再生能源和来自用户的电力负荷是能源互联网中的两个重要元素。受到环境因素的影响，分布式部署的可再生能源（光伏、风力发电等）的发电功率具有较强的随机性和不确定性[41-42]，这给电力系统的运行和管理带来了不小的困难[40]。为了保障能源互联网中电力系统的稳定运行，可调节的分布式发电设备和储能设备被广泛应用于能源互联网系统中[10,43]。这些设备在为相关能源电力系统的可靠性提供保障的同时，也给能源互联网带来了额外的运行和控制成本。在能源互联网的实际应用中，为了实现经济高效的运行管理，可再生能源带来的不确定性、发电设备的成本以及储能设备的损耗等因素都需要被纳入考虑。同时，用户的能源和电力消费行为也具有较强的不确定性。随着居民用电水平的不断提高和电动汽车产业的发展，源自用户电力负荷的不确定因素给电网带来的影响也更加明显[44]。能源互联网以用户为中心的特性也要求用户多样化的用电需求在电力系统的运行与控制中得到充分的保障。另一方面，随着物联网等先进信息技术的发展，大量智能化的电气设备也进入到用户的日常生活中。在能源互联网的应用中，通过与这些智能设备的协作，用户用电行为将得到更精确的建模，用户用电负荷也将具有一定的可控性[45]。

为了实现能源互联网系统的高效稳定运行，能源利用效率、系统可靠性、用户行为等复杂因素都需要在系统的运行与控制中得到恰当的考虑[40,45-48]。随着能源互联网系统的建设与发展，过去在电力系统中得到广泛应用的传统控制与优化方法往往需要与机器学习等新型技术进行结合，以更好地适应未来能源互联网系统的控制需求。为了充分利用能源互联网提供的高级特性，提升能源和电力服务水平，智能能量管理方法的研究与实践变得至关重要。另一方面，机器学习技术已经在图像识别，自然语言处理等领域的复杂任务中取得了成功的应用。相关的理论与技术在能源互联网的研究领域也得到了大量关注。近年来，深度强化学习理论[49] 也因其在复杂系统的控制决策任务中表现出的巨大潜力在智能电网研究中受到了广泛关注。

由于能源互联网仍然处于发展建设过程，很多相关的研究仍针对和智能电网相似的应用场景开展。能源互联网具有的开放共享、对等互联等高级特性没有得到充分的考虑。作为能源互联网中的重要设施，能量路由器在相关能量管理任务中的应用也仍需要进一步的研究。本文将综合应用机器学习技术和控制、优化理论等技术手段，针对区域能源互联网这一典型能源互联网应用场景下电力系统的控制与优化问题开展研究，为能源互联网系统的高效、可靠运行提供解决方案。

1.2　国内外研究现状

从微电网概念的提出到近年来能源互联网研究的兴起，国内外的学者和研究人员已经就电力系统的控制与优化技术展开了大量研究，涉及到能源互联网应用的诸多方面。电力系统作为能源互联网物理层的核心系统之一[30]，长期以来一直是相关领域的研究热点，同时也是本文的主要研究对象。此处主要对近年来能源互联网研究领域中与电力系统相关研究动态进行介绍。

电力系统的稳定性和调度优化研究是能源互联网应用的基础。为了实现高质量的电力服务，能源互联网物理层电力系统的运行与调度通常会采用中心式控制方法，以利用全局信息实现优化。在这种情况下，能源互联网应用层中的虚拟电力网络可以和物理层中实际的电网系统直接对应，相关的控制策略与方法可以同时适用于物理层和应用层的应用。中心式控制方法通常将控制目标和被控系统的模型结合并转化为对应的优化问题，应用相关数学理论求解得到对应的控制策略。近年来，为了应对可再生能源和用户用电负荷等因素带来的不确定性，一些人工智能方法也被引入控制策略的设计过程中，以取得更好的控制效果。在文献 [50-51] 中，Vachirasricirikul 等考虑了一类典型微电网系统的频率稳定问题。其中，微电网系统通过线性微分方程模型得到近似建模，对应的频率稳定目标也被转化为具有特定结构的混合最优鲁棒控制问题，并通过元启发式算法（Metaheuristic Algorithm）得到了最优的比例微分积分控制器（Proportional Integral Differential Controller）参数。这一方法通过传统控制方法与人工智能方法的结合，有效地提高了控制器的频率稳定性能。但在上述研究中，可再生能源和电动汽车等设备给微电网系统带来的随机性和不确定性都被简单地作为扰动输入处理，未能得到进一步的建模和分析。

随着分布式可再生能源在智能电力系统中的广泛部署，近年来，随机控制理论也开始被应用于电力系统的分析与控制中。基于微电网系统的实际运行数据，Heymann 等对微电网系统的能量管理问题进行了研究[15]。Heymann 等采用随机微分方程（Stochastic Differential Equation）对用户用电负荷的波动进行描述，并结合

随机控制理论和动态规划算法对微电网的能量管理问题进行了求解。在文献 [52] 中，Odun-Ayo 和 Crow 也采用了随机系统描述微电网的动态，并基于动态系统稳定性分析理论中的能量函数发展了一种新的电力系统稳定性评估的方法。类似地，Hua 等人采用随机系统对多微电网系统的频率稳定问题进行研究，并且考虑了系统模型的参数不确定性和多微电网系统中通信时延带来的影响[53]。相比于在电力系统运行控制中得到广泛应用的定常系统，随机模型可以将能源互联网中的部分不确定性（如光伏发电功率的波动、用电负荷功率的变化等）作为作为系统模型中的随机部分显式地建模并加以分析，得到的控制器的控制效果更加精准。但是随机控制问题的求解比定常系统的控制问题更加复杂，系统参数辨识的难度也相对较高。值得注意的是，上述研究中，线性微分方程模型得到了大量应用。在智能电网的暂态控制任务研究的的时间尺度上，线性模型的精度已基本满足智能电网的控制需求，同时也带来了较高的求解效率[50-51,53]。而非线性模型虽然具有更高的精度，但其建模与控制的难度较高，相关控制策略的求解需要的计算量和时间消耗也远高于线性模型。因次，这类非线性模型主要适用于中长期的能量管理与控制任务。受到数学理论发展的限制，非线性系统控制问题的求解仍较为困难。常规的动态规划方法[15] 被用于求解相关的最优控制问题[54] 时往往会消耗大量的存储和计算资源。很多求解方法甚至具有指数式的时间复杂度[15]，因而难以在具有较高维度状态空间的能源互联网的控制问题中实际应用。此外，凸优化等优化技术同样在能源互联网的研究领域中得到了广泛应用。典型的应用包括电力系统的稳态最优潮流计算[55]，分布式优化控制[56] 等。由于数学模型上的差异，采用这些方法解决能源互联网控制问题时，往往需要将实际的控制问题转化为等效的优化问题进行求解[57-59]。

随着机器学习技术在其他领域接连得到成功应用，在电力系统中也出现了大量相关的研究，可再生能源发电量预测和用电负荷预测是其重要的应用方向之一。得益于在图像识别和自然语言处理等领域发展的大量技术和方法，目前的可再生能源发电量与用电负荷预测技术已经相对成熟，可以实现较高的预测精度。典型的应用包括对家庭用电负荷的预测[48] 和对光伏发电功率的预测[47] 等。电量预测技术的发展也促进了电力系统控制方法的改进与提高。通过综合应用电量预测技术和模型预测控制（Model Predictive Control）技术，能源互联网中一些复杂的非线性控制问题可以得到较好的解决。如 Kou 等在文献 [57,59] 中分别提出的两种基于风力发电功率预测的风电系统控制方法。在对应的研究中，电量预测模型给出的风力发电功率概率分布在模型预测控制策略的设计环节被纳入考虑，得到的控制策略能够对复杂的应用场景做出智能的响应。

类似地，分布式控制方法在能源互联网系统中同样有着广泛的应用空间。能源互联网系统允许用户动态地接入电力网络，实现能源生产和消费单元的即插即用[30,34]。在典型的能源互联网应用场景中，应用层中的虚拟电力网络拓扑能够实时地发生变化，一个子网络可以随时与其他子网络新增或是断开连接，而不是由云端数据中心统一控制。在这类应用场景下，中心式控制方法虽然可能仍然可行，但是与之对应的系统运行和控制成本将大大提高，而分布式控制方法则具有天然的优势。近年来，分布式优化方法在智能电网系统的控制中得到了广泛应用[60]。在很多应用场景下，这些分布式优化方法可以提供和中心式控制方法效果接近的控制策略。如 Pourbabak 等提出的基于共识算法的分布式电网经济调度方法，在实现用户隐私保护的同时，得到了与中心式控制方法相近的调度优化效果[56]。虽然这类分布式算法能够有效管理分布式智能电网系统，初步实现能源互联网所要求的对等、互联等部分特性，但是它们仍然具有一定的局限性。例如，文献 [56,61] 中提出的分布式控制方法均针对特定的优化问题设计，对于控制目标明确的电力系统具有较强的应用价值，但是在处理用户的复杂需求时就显得灵活性不足。在能源互联网中，用户处于中心地位，其能源需求需要在系统的运行和管理中得到充分的考虑。而单纯地依靠分布式优化方法并不足以应对用户复杂的用电需求和行为模式给能源互联网系统运行与能量管理带来的挑战。对于通过自底向上模式构建的能源互联网[32] 来说，发展更加智能的分布式控制系统具有尤为重要的意义。

智能电网相关的传统控制方法具有作用明确、可靠性较高等优点，但是现实系统中普遍存在的非线性和随机性因素会给这些方法的效果带来一定的影响，在包含大量复杂因素的能源互联网领域尤甚。能源互联网中广泛部署的数据监测单元和智能控制设备则为机器学习方法的应用提供了便利条件。借助机器学习领域的发展成果，可以针对不同的场景和应用需求设计智能的能量管理策略。在智能电网的研究中，粒子群优化算法（Particle Swarm Optimization）等启发式算法已在控制器参数设计等问题中得到大量应用，并使传统控制方法的性能得到了明显改进[50-51,62]。多种神经网络技术也在智能电网系统的电量预测任务中得到了成功应用[47-48]。而在 Kou 等人的研究中，电量预测领域的研究成果被应用于风力发电系统的智能控制策略的设计中[57,59]。

借助神经网络强大的拟合能力，深度强化学习能够综合考虑多种复杂因素并对复杂系统进行控制决策。最近几年，随着强化学习技术在理论和实践上的进步和发展[63]，其受到的关注也在不断增长，在智能电网领域也出现了很多相关的研究。Zhang 等研究者将电力系统状态的连续变化转化为图像形式，并基于卷积神经网络和演员-评论家（Actor-Critic）算法构建了深度强化学习系统，实现了智能电

网系统暂态电压稳定的控制目标[64]。在文献 [65] 中，Yousefian 和 Kamalasadan 将基于强化学习的控制器集成进智能电网的广域控制系统中，并且设计了基于李雅普诺夫（Lyapunov）能量函数的优先度算法来保证系统的可靠性与性能表现。强化学习方法同样也被应用于智慧建筑中电力系统的能量管理任务中。Mocanu 等人采用数据驱动的控制方法，综合考虑多种限制条件并设计了复杂的反馈机制，使得强化学习算法能在在线学习过程中对神经网络的权重进行合理调整[66]。虽然强化学习在能源互联网相关的研究中得到了大量关注，但是由于强化学习算法及能源互联网应用场景的复杂性，仍然有大量相关的问题需要进一步的探索与研究。

由上述分析可知，分布式可再生能源和用户用电行为给电力系统带来的随机性与不确定性仍然是能源互联网研究领域中的关注热点。为了减少这些不确定因素对系统带来的影响，实现高效、可靠的能源服务，随机分析、优化理论以及机器学习等技术被大量应用于能源互联网相关领域的研究中。其中，机器学习技术因其对复杂函数的强大拟合能力而受到广泛的关注。对于包含海量监测数据和复杂用户服务需求的能源互联网系统，其未来的发展也必然需要机器学习技术作为支撑。

1.3　区域能源互联网系统的控制与优化

如前所述，在未来的能源互联网系统中，可再生能源的渗透率将随着新能源发电等技术的发展而不断提高。顺应这一发展趋势，关于安装了大量分布式可再生能源的区域能源互联网系统的控制与优化也成为能源互联网领域的重要研究话题。其中，针对工作在离网模式的区域能源互联网系统的研究具有较强的代表性。在这种工作模式下，区域能源互联网系统将断开与主干电网的连接，依靠其内部的分布式能源和智能控制系统独立运行。此时，可再生能源将成为区域能源互联网系统的主要能量来源之一。相关的控制与优化问题也更加具有挑战性。另一方面，从可再生能源推广以及环境保护的角度来看，发展先进的区域能源互联网控制与优化技术，在保证其电力系统和电力服务稳定性的同时实现对可再生能源的高效利用对未来能源互联网系统的发展与实践具有重要意义。

区域能源互联网具有多种组织形式，其中，多个微电网通过能量路由器相互连接而形成的区域能源互联网（也称多微网）系统是一种比较有代表性的应用场景。因此，本研究将针对多微网系统的控制与优化问题展开。根据多微网系统的组织架构，相关的控制与优化问题包括微电网系统的能量管理，基于能量路由器的多微网协调控制以及面向能量路由器的能量传输策略三大方面。根据时间尺度的不同，区域能源互联网系统的控制问题又可以分为针对多微网系统稳定性的暂

态控制问题和针对微电网中长期能量管理与优化的稳态控制问题两大类。按照上述分类方式，本文关于区域能源互联网系统控制与优化的研究可以总结为如图 1.2 所示的几个主要内容。

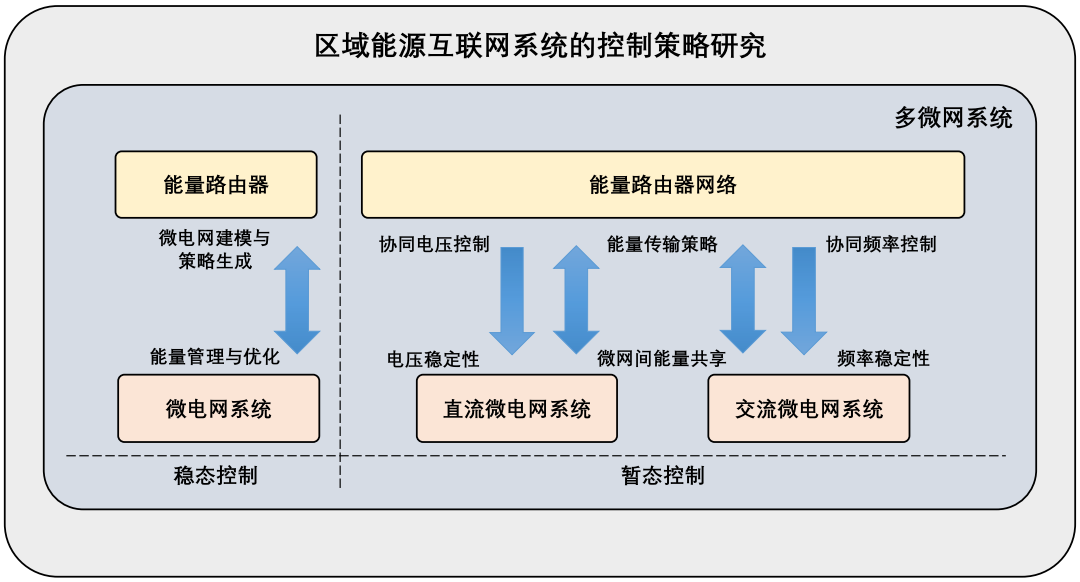


图 1.2　典型区域能源互联网系统的控制与优化问题

针对微电网系统的稳态控制问题，本研究提出了一种基于机器学习技术和随机过程模型的新型能量管理策略。以离网运行的微电网系统中电池储能设备使用寿命的优化为例，本文介绍了该方法在在微电网系统能量管理问题中的具体应用，并对其控制效果进行了验证。该新型微电网系统控制策略在经过简单的扩展后同样可以用于对并网微电网系统和多微网系统的能量管理问题中[42,67]。

针对区域能源互联网系统的暂态控制问题，本文分别就多微网系统母线电压与频率的调节与控制以及面向能量路由器的能量传输策略等话题开展研究。通过鲁棒控制和风险敏感控制等先进控制技术的应用，本研究分别为交流和直流多微网系统母线电压和频率的协调控制问题提供了基于随机模型的新型控制方法。这些针对多微网系统的控制方法同样也可以用于对单个微电网的相关控制任务中。针对特定能量传输协议下能量路由器能量路由功能的稳定性，本研究提出了一种基于鲁棒控制的能量传输策略，通过对能量路由器内部能量存储的管理，实现了对能量路由器能量路由功能稳定性的提升。

通过对图 1.2 所示的典型区域能源互联网系统的控制与优化问题的研究，本研究为未来区域能源互联网系统中几个具有代表性的控制问题提供了对应的解决方案，为相关领域的进一步发展提供了一定的基础。

1.4　本研究的主要贡献

面向典型的区域能源互联网应用场景，本文针对不同层次的电力系统在不同时间尺度上的控制与优化问题开展研究，旨在从电力系统能量管理的角度为未来的区域能源互联网系统提供可能的控制方案。

本研究的主要贡献与创新点总结如下：

(1) 本研究创新地使用了随机微分方程模型对光伏和风力发电等可再生能源发电功率和用户用电负荷功率动态进行建模。相比于广泛应用与电力系统建模与分析中的常微分方程模型，随机微分方程模型的应用使得可再生能源发电功率和电力负荷功率波动中存在的随机性和不确定性得到分别建模。这一方面提高了电力系统功率动态模型的精度，另一方面也使得更多的信息可以被用于相关的理论分析和控制策略的设计中。这对于具有高可再生能源渗透率的能源互联网系统的控制与优化具有重要意义。同时，对于具有较小不确定性的电力系统，随机微分方程模型对系统动态变化中随机性和不确定性的分离使得最优控制理论也能够被有效地应用于暂态电压和频率的调节与控制任务中。

(2) 通过机器学习技术和随机分析理论的综合应用，本研究针对微电网系统中的光伏发电设备和电力负荷的电量预测提出了一种新型建模方法。相比于传统电量预测方法，采用该方法建立的电量预测模型既能够充分利用机器学习技术实现精准的电量预测，也能将存在于光伏发电和负荷功率波动中的随机性纳入考虑。同时，得益于随机微分方程模型的应用，这一电量预测模型可以被直接集成在现有的基于常微分方程组构建的微电网系统模型中。这使得相关的微电网系统能量管理问题可以通过现有的随机控制理论得到解决。

(3) 本研究为基于能量路由器构建的区域能源互联网系统的控制与优化提供了多层次的解决方案。针对微电网系统的中长期能量管理任务，本研究提出了一种基于随机控制理论的新型微电网系统控制策略，并就电池储能设备使用寿命优化这一典型应用对该控制策略的控制效果进行了分析与验证。针对多微网系统的协调优化控制问题，本分别就直流和交流多微网系统这两种典型的区域能源互联网应用场景，利用鲁棒 H_∞ 控制、风险敏感控制等先进的随机控制方法对微电网母线电压和频率的控制问题进行了研究。针对能量路由器的能量传输控制问题，本文就特定能量传输协议下能量路由器系统内部能量存储的控制和管理进行了研究，并提出了一种基于鲁棒控制技术的能量路由器能量传输策略。这些研究为区域能源互联网系统不同层次的控制与优化问题提供了可能的解决方案，为区域能源互联网系统的发展建设提供了一定的基础。

1.5　本文的章节安排

根据图 1.2 所示的区域能源互联网系统的控制与优化问题，本文的研究内容组织如下。

第 2 章对离网运行的微电网系统中电池储能设备使用寿命的优化问题开展研究。针对这一典型的微电网系统中长期能量管理问题，第 2 章中提出了一种基于神经网络模型和随机过程模型的新型建模方法，并将其用于光伏发电设备和电力负荷的电量预测模型的构建中，最终得到了一种新型的微电网系统动态模型。通过对电池储能设备使用寿命的分析与建模，一种随机最优控制问题被提出以实现对电池储能设备使用寿命的优化。这一随机控制问题通过随机控制理论得到了解决，相关控制策略的电池储能设备保护效果在数值仿真中得到了验证。通过和针对定常系统的传统控制策略的对比，基于随机系统模型的微电网系统能量管理策略的优势也在数值仿真中得到了分析与讨论。

第 3 章对直流多微网系统的直流母线电压控制问题开展研究。通过随机微分方程模型的应用，各个微电网系统内的可再生能源与电力负荷功率中存在的随机性和不确定性得到了独立的建模。同时，多微网系统内能量传输的协商与能量传输控制带来的系统延迟也在能量路由器的功率传输模型中得到了充分的考虑。基于直流多微网系统母线电压稳定性指标，两种鲁棒 $\boldsymbol{H}_\infty$ 控制策略被提出以满足不同应用场景下的电压控制需求。通过与传统电压下垂控制方法的比较，这两种控制策略在直流多微网系统电压控制问题上的优势在数值仿真中得到了验证。

第 4 章对交流多微网系统的交流母线频率稳定性开展研究。可再生能源发电功率与用户电力负荷功率的随机波动通过 Wiener 过程驱动的随机微分方程得到了建模。基于交流多微网系统的动态模型，微电网系统母线频率控制问题被建模为一类风险敏感控制问题，并通过随机最优控制理论得到了解决。在相关的数值仿真中，通过和传统的频率下垂控制方法的对比，第 4 章提出的基于风险敏感控制的交流多微网母线频率控制策略的频率控制性能得到了充分的验证。

第 5 章研究了特定能量传输协议下能量路由器的能量存储管理问题。基于传输控制协议下网络流的流体模型，能量路由器能量传输策略对其内部能量存储占用的影响通过线性微分方程组得到建模。能量路由器网络中能量流传输的不确定性也在该模型中得到了考虑。根据能量路由器能量存储的动态模型和对应的能量存储水平稳定性指标，能量路由器能量存储管理问题被建模为一类鲁棒 $\boldsymbol{H}_\infty$ 控制问题，并通过鲁棒控制理论得到了解决。对应的能量传输策略的控制效果通过数值算例得到了分析和验证。

第 6 章结合区域能源互联网系统不同层次的控制需求对本文的主要研究内容

进行了总结，并根据本文的研究中存在的不足之处对相关领域未来的研究方向进行了总结与分析。

第 2 章　微电网系统的能量管理策略

在未来的能源互联网场景下，光伏和风力发电等分布式可再生能源将成为微电网系统电力供应的主要来源之一[18,24]。与传统电源相比，这些可再生能源的输出功率具有更强的随机性和不确定性，并给能源互联网系统的控制与管理带来了许多困难和挑战[12,16,43]。面对可再生能源在传统电力系统中接入困难等问题，微电网等新型电力系统也应运而生，并且得到了工程与技术人员的广泛关注与研究[5,7,17]。在能源互联网系统中，作为区域能源互联网的重要组成部分，微电网以及与之相关的智能控制技术也得到了大量应用[10,18,41,43]。

虽然光伏和风力发电等可再生能源能够通过微电网等新型电力系统架构实现在现有电力系统中的接入，但是这些可再生能源具有的随机特性仍然会对其利用效率带来负面影响[40]。因此，针对微电网系统的电量预测技术和可再生能源随机性的建模技术也成为近年来的研究热点。例如，基于历史电力负荷数据自相似性的假设，文献 [68] 针对微电网系统的短期电量预测问题提出了一种基于分型理论和小波分析技术的新型负荷预测方法。针对光伏发电功率预测问题，文献 [69] 提出了一种基于小波分解和重构技术以及多层感知器神经网络的电量预测模型，实现了对光伏电站输出功率的高精度预测。类似地，文献 [70] 比较了几种典型循环神经网络结构在不同时间尺度的负荷预测任务中的性能表现，并提出了一种在长期和短期负荷功率预测任务中均具有优秀性能表现的的电量预测方法。类似的关于微电网系统电量预测的研究还有很多，此处不再一一赘述。虽然这些电量预测模型具有良好的电量预测效果，但是它们往往缺少对可再生能源和负荷功率随机性的关注[38,67]。在具有高可再生能源渗透率的微电网系统中，基于这些电量预测模型制定的微电网系统运行控制策略的实际性能可能会受到一定的影响。

在对微电网系统内可再生能源与负荷功率建模的相关研究中，随机分析技术和随机过程模型也得到了广泛的应用[71]。例如，在文献 [15] 关于微电网运行成本优化的研究中，随机微分方程被用来近似描述电力负荷功率的随机波动。类似地，文献 [52] 采用随机动态系统对可再生能源的功率波动进行建模，并用于微电网系统暂态稳定性的研究中。进一步地，针对光伏和风力发电设备输出功率中存在的随机性和不确定性，带有扰动输入的随机微分方程模型在文献 [40] 关于微电网系统电压稳定性的研究中得到了应用。这类基于随机过程的电量模型往往具有解析的形式，可以很好地和现有的电力系统模型结合。因而，在使用这类随机过程模型时，经过大量实践检验的传统电力系统的分析与优化技术也能够被继续用于微

电网系统的运行与控制中。但和采用神经网络等先进机器学习技术的电量预测模型[69-70] 相比，这些基于随机过程模型的电量模型往往很难达到同等的电量预测精度。

结合随机过程模型和神经网络模型各自的优势，本章的研究中提出了一种适用于具有高可再生能源渗透率的微电网系统的新型电量预测模型，并将其用于对分布式可再生能源发电功率和电力负荷功率的建模。与单纯基于随机微分方程的微电网模型[15,52] 相比，本章提出的建模方法通常具有更高的电量预测精度。与基于深度学习技术的电量预测模型[69-70] 相比，本章提出的建模方法则充分考虑到了可再生能源和电力负荷功率曲线表现出的随机性，因而能够对微电网系统功率动态进行更加细致的描述。基于这一新型微电网系统模型，本章以电池储能设备使用寿命优化这一典型的微电网系统能量管理问题为例提出了一种用于微电网系统中长期能量管理的控制方法，并通过数值仿真对该控制方法的性能表现进行了分析与验证。

本章节的内容安排如下，第 2.1 节介绍了典型的离网运行的微电网系统的组成以及相关设备的动态模型，并重点说明了本章提出的新型光伏和负荷功率建模方法。第 2.2 节以微电网系统内电池储能设备使用寿命的优化问题为例，介绍了本章提出的新型建模方法在微电网系统中长期能量管理中的典型应用。结合微电网系统的动态模型，对应的电池储能设备使用寿命优化问题被建模为一类随机最优控制问题，并通过第 2.3 节介绍的风险敏感控制方法得到了解决。第 2.4 节通过数值算例比较了本章提出的微电网控制方法和传统控制方法在电池储能设备使用寿命优化这一任务上性能表现的差异，并对本章提出的控制方法对微电网系统能量管理问题的实际意义进行了分析。最后，第 2.5 节对本章的主要研究内容进行了总结。

2.1　离网运行的微电网系统模型

在能源互联网的应用场景下，能量路由器在对微电网系统内部各种电气设备的监测与调节过程中发挥着重要作用。同时，微电网系统可以通过能量路由器与同一区域的其他微电网建立能量与信息连接，共同构成区域能源互联网系统。这种情况下，微电网系统将工作在并网模式，并能够通过与区域内其他微电网的能量交换实现稳定可靠的电力服务。在某些特殊的应用场景（如海岛、沙漠、军事禁区等）下，微电网系统将无法连接到外部的电力网络，只能依靠其内部的可控电气设备实现独立运行[38,40]。此时，微电网将工作在离网模式。在离网模式下保持正常运转的能力对于一般的微电网系统也同样具有重要的意义。当区域能源互联

网系统发生局部故障时，某些微电网和其他微电网间的电力连接可能会暂时中断。此时，具有离网运行能力的微电网系统将能够继续为其内部的电力负荷提供稳定的电力供应，直到相关故障被完全修复。

根据上述分析可知，离网运行的微电网系统的运行与控制问题在区域能源互联网的应用场景中具有更强的代表性，相关的控制方法在经过简单的扩展和调整后也可以被用于并网运行的微电网系统的控制任务中[42]。因此，本章的研究将针对图 2.1 所示的工作在离网模式的微电网系统开展。该微电网系统由能量路由器、分布式光伏发电设备、微型燃气轮机、电池储能以及用电负荷组成。在离网模式下，能量路由器将主要周期性地负责为微电网系统生成控制策略，并分发到对应的可控电气设备中，以维持微电网系统的正常运转。从这个意义上讲，本章提出的微电网能量管理策略也将被部署在能量路由器中。

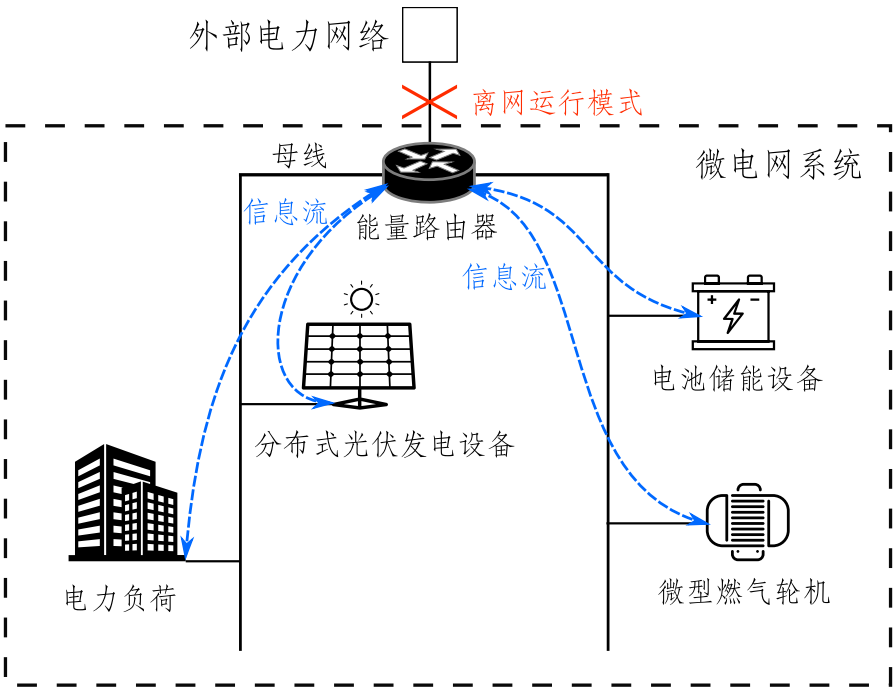


图 2.1　典型的离网运行微电网系统

下面将依次对图2.1 所示微电网系统中的光伏发电设备、电力负荷、电池储能设备和微型燃气轮机的动态模型进行介绍。

2.1.1　基于神经网络的电量预测模型

首先，针对光伏和负荷功率的建模，来自数据源 [72] 的实际光伏发电和电力负荷功率记录（365 天，采样频率为 1 分钟）和相关的环境观测数据（365 天，采样频率为 1 小时）构成的数据集 $\mathcal{D} = \{(H_{t,k}, \tilde{P}_{PV}(t), \tilde{P}_{Load}(t))\}_{t=t_1}^{t_{8760}}$ 被用于电量预测模

型的构建。在数据集 $\mathcal{D}$ 中，$H_{t,k}$ 为过去 k 小时的历史环境观测数据（温度，降水概率，云量等）和对应的时间戳生成的特征向量，$\tilde{P}_{PV}(t)$ 表示 t 时刻附近光伏发电功率的平均值，$\tilde{P}_{Load}(t)$ 表示 t 时刻附近电力负荷功率的平均值。在本章的研究中，特征向量 $H_{t,k}$ 对应的历史数据长度设置为 $k=4$，预测目标值 $\tilde{P}_{PV}(t)$ 和 $\tilde{P}_{Load}(t)$ 均根据实际电量数据处理得到。

本章针对微电网系统内分布式光伏发电设备和电力负荷提出的新型功率模型包括确定性的电量预测和基于随机过程的电量波动模型两部分。其中的电量预测部分可以利用类似于文献 [68-70] 中介绍的电量预测技术实现，相关的研究也已经非常成熟。作为示例，在本章的研究中，图 2.2 中的神经网络模型 $\mathcal{M}$ 被用于对光伏和负荷功率的预测。

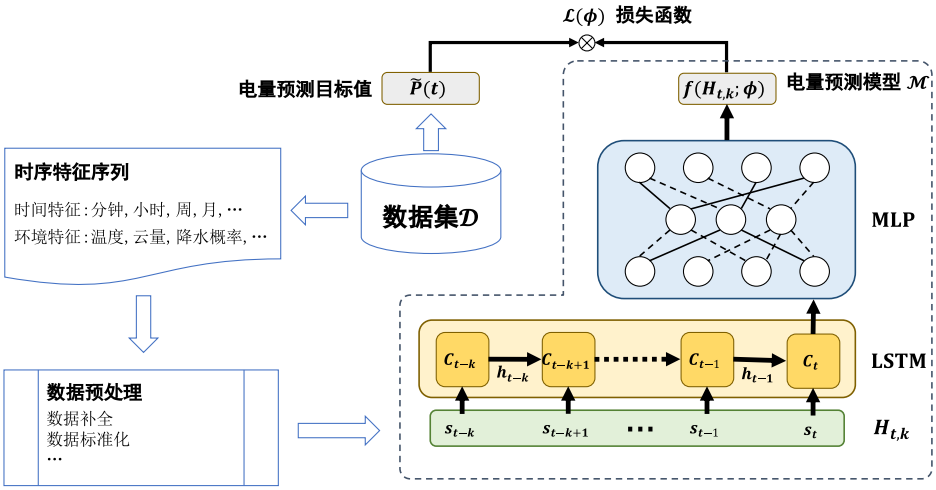


图 2.2　微电网电量预测模型

如图 2.2 所示，模型 $\mathcal{M}$ 由一个标准长短期记忆（LSTM）神经网络和包括两个隐藏层的多层感知器（MLP）网络组合而成。来自数据集 $\mathcal{D}$ 的时序特征在经过一系列预处理步骤后被转换为特征向量 $H_{t,k}$ 并输入 LSTM 网络。LSTM 网络编码得到的时序特征被进一步提供给 MLP 网络并得到相应的预测输出 $f(H_{t,k};\phi)$。最终的功率预测结果则可以通过对网络输出 $f(H_{t,k};\phi)$ 进一步处理得到。

结合光伏发电设备输出功率和电力负荷功率各自的特点，第 2.1.2 节和第 2.1.3 节对相应的两种功率模型进行了介绍。

2.1.2　分布式光伏发电设备的功率模型

在光伏电站等应用场景中，光伏发电设备可以被集中安装在同一区域，并进行集中式的控制与调度[69]。但在其他情况下，光伏发电设备往往会被分散地安装在微电网各处的楼房和住宅中，这使得对光伏发电功率的统一控制变得十分困难[9]。在本章的研究中，微电网系统内光伏发电设备的输出功率被认为是不可控的，下面给出的光伏发电功率模型也只用于对分布式光伏发电设备总的输出功率进行建模。

根据数据集 $\mathcal{D}$ 提供的实际电力系统运行数据，本节结合神经网络模型和随机过程模型的优点，提出了一种适用于微电网系统中长期能量管理问题的新型光伏发电功率建模方法。具体来说，微电网系统内光伏设备总的发电功率 $P_{PV}(t)$ 被分解为 $\hat{P}_{PV}(t)$ 和 $\Delta\hat{P}_{PV}(t)$ 两部分。

$$P_{PV}(t) = \hat{P}_{PV}(t) + \Delta\hat{P}_{PV}(t) = P_{\odot}(t)\left(r_{PV}(t) + e_{PV}(t)\right), \tag{2-1}$$

其中 $P_{\odot}(t)$ 为微电网所在区域单位面积上接收到的太阳辐射功率，可以通过 *Python* 工具包 Pysolar[73] 计算得到，$\hat{P}_{PV}(t) = P_{\odot}(t)r_{PV}(t)$ 为 t 时刻光伏发电功率的预期值，反映了在 t 时刻附近光伏发电功率的平均水平，$r_{PV}(t)$ 则代表了云量、降水情况等天气因素对光伏发电设备实际发电能力的影响。而 $\Delta\hat{P}_{PV}(t) = P_{\odot}(t)e_{PV}(t)$ 则代表了在环境因素影响下实际光伏发电功率相对于光伏发电功率预测值 $\hat{P}_{PV}(t)$ 产生的随机波动，因子 $e_{PV}(t)$ 则代表了 t 时刻的天气条件等环境因素对微电网系统内分布式光伏发电设备输出功率产生的影响。

利用图 2.2 所示的神经网络模型 $\mathcal{M}$ 可以实现对光伏发电功率预期值中的因子 $r_{PV}(t)$ 的预测。此处将对应的预测模型记为 $\mathcal{M}_{PV}$，并将模型 $\mathcal{M}_{PV}$ 的可学习参数记为 ϕ_{PV}。基于公式 (2-2) 所示的损失函数，采用随机梯度下降方法在数据集 $\mathcal{D}$ 上对模型 $\mathcal{M}_{PV}$ 进行训练即可实现对因子 $r_{PV}(t)$ 的学习。

$$\mathcal{L}(\phi_{PV}) = \sum_{H_{t,k},\tilde{P}_{PV}(t)\in\mathcal{D}} |\tilde{P}_{PV}(t) - P_{\odot}(t)f(H_{t,k};\phi_{PV})|^2, \tag{2-2}$$

在训练过程中，数据集 $\mathcal{D}$ 被按照 8：1：1 的比例随机划分为训练集、验证集和测试集三部分，根据训练得到的模型参数 ϕ^*_{PV}，光伏发电功率预测值可表示为 $\hat{P}_{PV}(t) = P_{\odot}(t)f(H_{t,k};\phi^*_{PV})$。为了定性地说明模型 $\mathcal{M}_{PV}$ 的预测精度，图 2.3 展示了训练完成的模型 $\mathcal{M}_{PV}$ 给出的典型光伏功率预测结果。在图 2.3 中，实际光伏发电功率数据 P_{PV} 由红色圆点标记，光伏发电功率预测值 $\hat{P}_{PV}$ 由蓝色三角形标记。通过简单的对比可知，模型 $\mathcal{M}_{PV}$ 能够实现对光伏发电功率较为准确的预测。

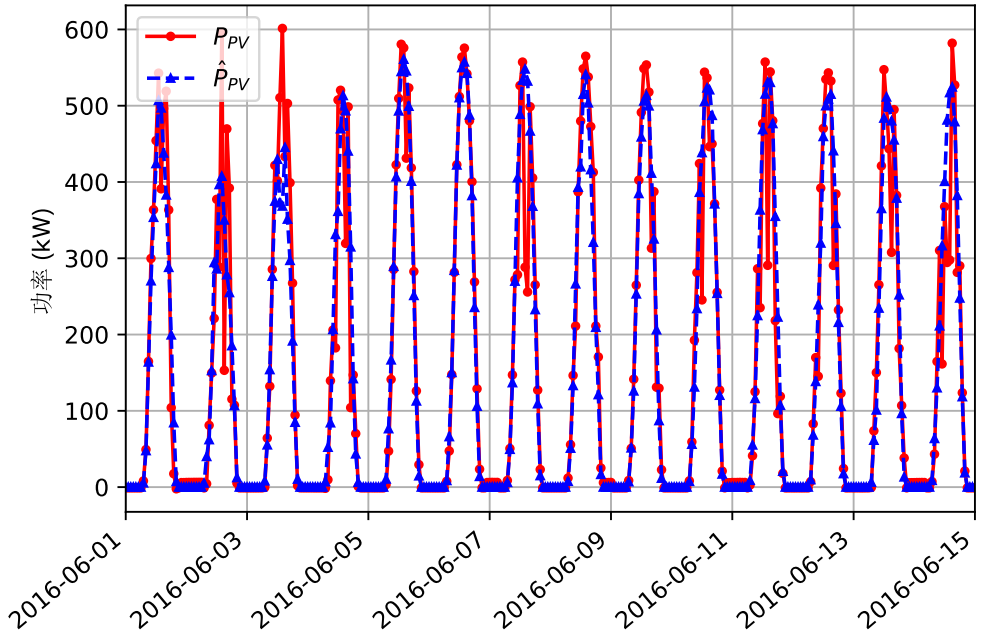


图 2.3　典型光伏发电功率预测结果

进一步地，作为一种回归模型，模型 $\mathcal{M}_{PV}$ 的电量预测性能可以通过决定系数[74]（Coefficient of determination）R^2 的大小进行衡量。决定系数 R^2 越接近 1，则模型的预测准确度越高。根据表 2.1 所示的数据可知，采用的光伏功率预测模型 $\mathcal{M}_{PV}$ 在训练集、验证集和测试集三个数据集上均表现出了较高的预测精度。但是该模型在验证集和测试集上的精度要稍微低一点，这表明在训练过程中可能存在一定程度的过拟和现象。同时，由于公式 (2-1) 给出的光伏功率模型考虑到了光伏发电设备夜间无法发电的特点，光伏功率预测模型 $\mathcal{M}_{PV}$ 对全天光伏发电功率的预测精度也得到了一定的提升。

表 2.1　光伏功率预测模型在数据集 $\mathcal{D}$ 上的预测精度

决定系数	训练集	验证集	测试集
R^2(日间数据)	0.8776	0.7967	0.7880
R^2(全天数据)	0.9326	0.8902	0.8825

值得注意的是，公式 (2-1) 给出的光伏发电功率模型中并没有对光伏发电功率预测模型 $\mathcal{M}_{PV}$ 的形式和结构做出限制。这意味着图 2.2 中的电量预测模型可以被替换为具有更好的预测性能和可靠性的神经网络模型，从而减轻过拟合的问题，并进一步提升电量预测精度。但作为示例来说，表 2.1 给出的模型精度已经可以满足要求，因此在本章的研究中不再对模型 $\mathcal{M}_{PV}$ 进行更多的优化和改进。利用上述光伏发电功率预测模型 $\mathcal{M}_{PV}$，本章研究的微电网系统内光伏发电设备发电功率的

变化趋势可以根据未来一段时间的天气预测结果得到。

另一方面，根据光伏发电功率相对于预测值 $\hat{P}_{PV}(t)$ 波动的模式的不同，几何布朗运动、分形布朗运动等随机过程模型可以被用于描述光伏发电功率受到环境因素影响而产生的随机波动。作为示例，本章中采用如公式 (2-3) 所示的 Ornstein-Uhlenbeck 过程[75] 作为公式 (2-1) 中因子 $e_{PV}(t)$ 的动态模型。

$$\mathrm{d}e_{PV}(t) = -\theta_{PV}(t)(e_{PV}(t) - \mu_{PV}(t))\mathrm{d}t + \sigma_{PV}(t)\mathrm{d}w_{PV}(t), \tag{2-3}$$

其中，$w_{PV}(t)$ 为一维标准 Wiener 过程，$\theta_{PV}(t) \geqslant 0$，$\mu_{PV}(t)$ 和 $\sigma_{PV}(t)$ 为对应的模型参数，可以通过极大似然法等参数估计方法得到。

根据随机分析理论，给定模型参数 $\theta_{PV}(t) = \theta_{PV}$，$\mu_{PV}(t) = \mu_{PV}$ 和 $\sigma_{PV}(t) = \sigma_{PV}$，公式 (2-3) 存在形如公式 (2-4) 的唯一解[76]。

$$e_{PV}(t) = e_{PV}(t_0)e^{-\theta_{PV}t} + \mu_{PV}(1 - e^{-\theta_{PV}t}) + \sigma_{PV}\int_{t_0}^{t} e^{-\theta_{PV}(t-s)}\mathrm{d}w_{PV}(s), \tag{2-4}$$

其中 $e_{PV}(t_0)$ 为时刻 t_0 因子 $e_{PV}(t)$ 的初始值。

光伏发电设备发电功率的随机性的大小与天气变化有着明显的联系。本章的研究中假设，对于时间 $t \in [t_0, t_0 + T_0]$ 内持续的同一天气状态，公式 (2-3) 中的参数 $\theta_{PV}(t)$，$\mu_{PV}(t)$ 和 $\sigma_{PV}(t)$ 均为恒定值。这一假设也使得对相关参数的估计成为可能。

取步长 $\Delta t = T_0/N$，公式 (2-4) 可以被转化为公式 (2-5) 中的离散时间模型。

$$e_{PV}(t_{k+1}) = e_{PV}(t_k) + \theta_{PV}(\mu_{PV} - e_{PV}(t_k))\Delta t + \sigma_{PV}\Delta w_{PV}(t_k), \tag{2-5}$$

其中 $t_k = t_0 + k\Delta t$，$\Delta w_{PV}(t_k) = w_{PV}(t_{k+1}) - w_{PV}(t_k)$。根据光伏发电功率预测值 $\hat{P}_{PV}(t)$ 和实际的光伏发电功率数据可以计算出对应于时间序列 $t_0, t_1, \cdots, t_N$ 的 $\boldsymbol{e}_{PV}^{0:N}$ 序列。

$$\boldsymbol{e}_{PV}^{0:N} = [e_{PV}(t_0), e_{PV}(t_1), \cdots, e_{PV}(t_N)]'. \tag{2-6}$$

根据 Wiener 过程的性质，对于确定的 $w_{PV}(t_k)$，$w_{PV}(t_{k+1}) - w_{PV}(t_k)$ 服从均值为 0，方差为 Δt 的正态分布 $\mathcal{N}(0, \Delta t)$。由此可知，序列 $\boldsymbol{e}_{PV}^{0:N}$ 中任意两个相邻的数据点 $e_{PV}(t_k)$ 和 $e_{PV}(t_{k+1})$ 均满足公式 (2-7) 给出的条件概率。

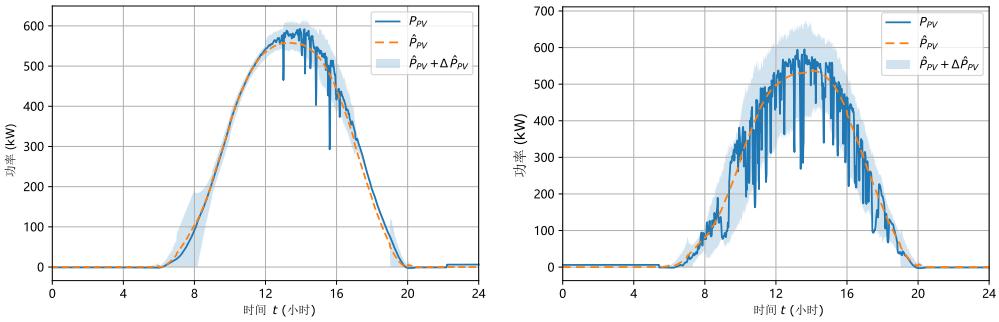
$$p(\Delta e_{PV}(t_k)|e_{PV}(t_k)) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\Delta t}}\exp\left(-\frac{(\Delta e_{PV}(t_k) + \theta_{PV}e_{PV}(t_k)\Delta t)^2}{\sigma_{PV}^2\Delta t}\right), \tag{2-7}$$

其中 $\Delta e_{PV}(t_k) = e_{PV}(e_{k+1}) - e_{PV}(t_k) - \theta_{PV}\mu_{PV}$。

根据公式 (2-7) 给出的条件概率计算公式可以得到序列 $\boldsymbol{e}_{PV}^{0:N}$ 对应于参数 θ_{PV} 和 σ_{PV} 的似然概率

$$p(\boldsymbol{e}_{PV}^{0:N}|\theta_{PV},\mu_{PV},\sigma_{PV}) = \prod_{k=0}^{N-1} p(\Delta e_{PV}(t_k)|e_{PV}(t_k),\theta_{PV},\mu_{PV},\sigma_{PV}). \tag{2-8}$$

利用文献 [38] 中给出的参数估计方法，对应于时间 $t \in [t_0, t_0 + T_0]$ 范围内光伏发电设备输出功率波动模式的参数 θ_{PV}，μ_{PV} 和 σ_{PV} 的值可以通过最大化公式 (2-8) 给出的似然概率得到。



(a) 晴朗天气　　(b) 多云天气

图 2.4　两种天气条件下的光伏发电功率预测结果

至此，本章提出的光伏发电设备功率动态模型介绍完毕。为了更加直观地展示该模型的特点，图 2.4 给出了在晴朗和多云天气两种天气条件下，公式 (2-1) 对应的典型光伏发电设备功率预测结果

图 2.4 中的蓝色实线对应于实际的光伏发电功率数据，黄色虚线为神经网络模型 $\mathcal{M}_{PV}$ 给出的光伏发电功率预测值 $\hat{P}_{PV}(t)$。光伏发电功率相对于预测值的波动 $\Delta\hat{P}_{PV}(t)$ 主要体现为图 2.4 中的蓝色阴影区域，该阴影区域的面积代表了对应时间范围内光伏发电功率随机性的大小。对比图 2.4 中的实际光伏发电功率和公式 (2-1) 给出的光伏发电功率模型可知，本章提出的光伏发电功率建模方法可以充分利用机器学习技术带来的较高的电量预测精度，同时也能利用随机过程模型对不同天气条件下光伏发电功率的随机特性进行体现。

2.1.3　电力负荷功率动态模型

类似于 2.1.2 节中提出的光伏发电功率建模方法，针对图 2.1 所示微电网系统中的电力负荷，公式 (2-9) 给出了相应的动态模型。

$$P_{Load}(t) = \hat{P}_{Load}(t) + \Delta\hat{P}_{Load}(t), \tag{2-9}$$

此处，$\hat{P}_{Load}(t)$ 为电力负荷功率预测值，代表了负荷功率的平均变化趋势，$\Delta\hat{P}_{Load}(t)$ 描述了电力负荷功率相对于预测值 $\hat{P}_{Load}(t)$ 的随机波动。

基于数据集 $\mathcal{D}$，图 2.2 中的神经网络模型 $\mathcal{M}$ 同样被用于对电力负荷预测值 $\hat{P}_{Load}(t)$ 进行建模。此处将该预测模型和模型参数分别记为 $\mathcal{M}_{Load}$ 和 ϕ_{Load}，对应的损失函数见公式 (2-10)。

$$\mathcal{L}(\phi_{Load}) = \sum_{H_{t,k},\tilde{P}_{Load}(t)\in\mathcal{D}} |\tilde{P}_{Load}(t) - f(H_{t,k};\phi_{Load})|^2, \tag{2-10}$$

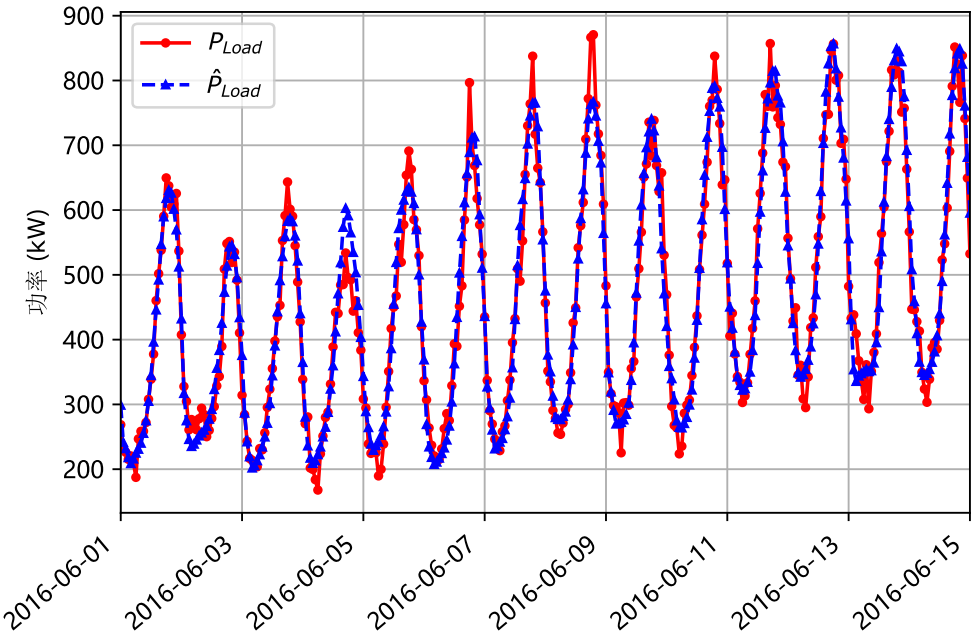


图 2.5　典型电力负荷功率预测结果

在数据集 $\mathcal{D}$ 上最小化损失函数 $\mathcal{L}(\phi_{Load})$ 即可得到对应于实际负荷功率变化规律的模型参数 ϕ^*_{Load}。经过训练后，负荷功率预测模型 $\mathcal{M}_{Load}$ 给出的典型负荷功率预测结果如图 2.5 所示。

图 2.5 中，实际负荷功率数据 P_{Load} 由红色圆点标记，电力负荷预测值 $\hat{P}_{Load}$ 由蓝色三角形标记。对比图 2.5 中实际负荷功率和对应的功率预测结果可知，负荷功率预测模型 $\hat{P}_{Load}(t) = f(H_{t,k};\phi^*_{Load})$ 能够实现较好负荷功率预测效果。该模型在数据集 $\mathcal{D}$ 上的整体预测性能由表 2.2 给出，其中的 R^2 为决定系数。

表 2.2　负荷功率预测模型在数据集 $\mathcal{D}$ 上的预测精度

决定系数	训练集	验证集	测试集
R^2(全天数据)	0.9492	0.9449	0.9460

类似于光伏发电功率模型，在本章的研究中，Ornstein-Uhlenbeck 过程也被用于对电力负荷功率的随机波动 $\Delta P_{Load}(t)$ 的建模，详见公式 (2-11) 。

$$\mathrm{d}\Delta\hat{P}_{Load}(t) = -\theta_{Load}(t)(\Delta\hat{P}_{Load}(t) - \mu_{Load}(t))\mathrm{d}t + \sigma_{Load}(t)\mathrm{d}w_{Load}(t), \quad (2\text{-}11)$$

其中，$w_{Load}(t)$ 为一维标准 Wiener 过程，$\theta_{Load}(t) \geqslant 0$，$\mu_{Load}(t)$ 和 $\sigma_{Load}(t)$ 为模型参数。这些参数可以通过 2.1.2 节中介绍的参数估计方法得到，此处不再赘述。

图 2.6 展示了本节提出的电力负荷功率模型 (2-9) 的典型功率预测结果，其中的蓝色实线对应于实际的负荷功率数据，黄色虚线为负荷功率预测模型 $\mathcal{M}_{Load}$ 给出的电量预测值。

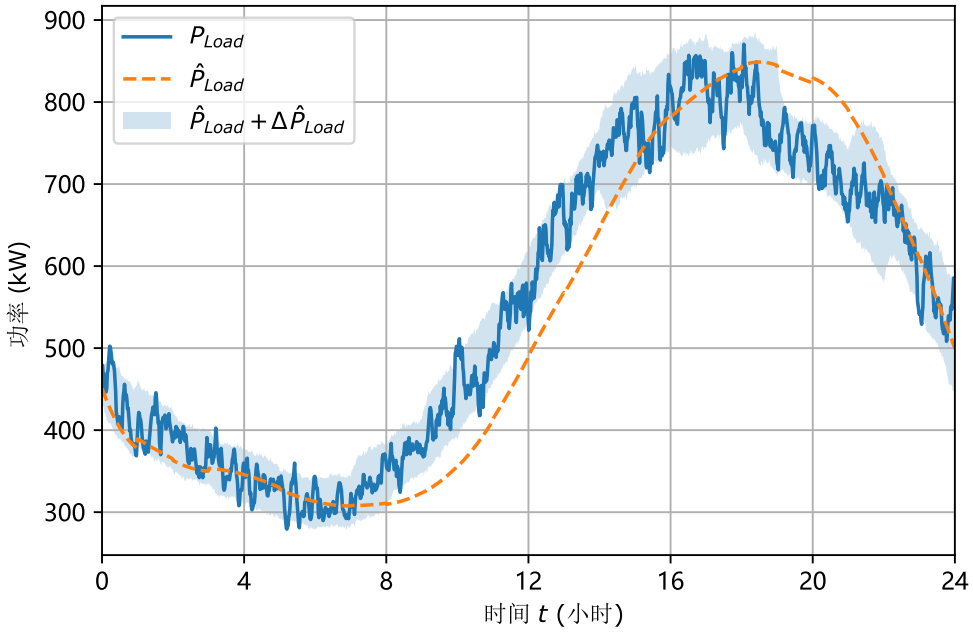


图 2.6　典型负荷功率预测结果

容易看到，公式 (2-9) 中的负荷功率模型给出的负荷功率预测曲线大部分都分布于图 2.6 中的蓝色阴影区域，其覆盖范围表示负荷功率波动的随机性的大小。同时，虽然电量预测模型 $\mathcal{M}_{Load}$ 给出的负荷功率预测值 $\hat{P}_{Load}(t)$ 和实际的电力负荷功率之间存在一定的偏差，公式 (2-11) 引入的随机过程模型可以在对电力负荷功率波动的随机性进行建模的同时，对这一偏差进行有效的修正。根据上述分析可知，本章提出的电力负荷功率模型可以实现对负荷功率较为准确的建模。

至此，本章针对光伏和电力负荷功率提出的新型建模方法介绍完毕，下面将对电池储能设备和微型燃气轮机的动态模型进行简要介绍。

2.1.4　电池储能设备的电量与使用寿命模型

在实际的微电网系统中，光伏发电设备发电的高峰期和电力负荷功率需求的高峰时段往往存在着一定的差异。在白天光照较为充足的时段，微电网内的电力需求可能远小于分布式光伏发电设备的发电能力。在晚间电力使用高峰时期，微电网内的光伏发电设备却无法提供电能。对于图 2.1 所示的离网运行的微电网系统来说，为了提高可再生能源的利用效率，白天过剩的光伏发电功率可以被储存在电池储能设备中，并在晚间用电高峰期为用电负荷提供电能。由于响应速度快，输出功率调整灵活等特点，电池储能设备也常用于消纳微电网内发电和用电功率直接的偏差，以保证微电网系统内部的功率平衡[43,77-78]。

在本章的研究中，电池储能设备主要起到两方面的作用。一方面，当光伏发电功率超过微电网内实际的电力需求时，一部分过剩的电能将被保存在电池储能设备中以供未来使用。同时，电池储能设备将作为微型燃气轮机的辅助，用于弥补微电网系统内发电和用电功率的偏差。在这一过程中，电池储能设备将频繁地进行充电和放电的循环，这对其使用寿命将造成一定的影响。

记 t 时刻电池储能设备的电量百分比为 $\zeta(t)$，并将对应的 t 时刻电池储能设备的充放电功率记为 $P_{BES}(t)$。显然 $\zeta(t) \in [0,1]$。电池储能设备的电量模型可以由公式 (2-12) 给出

$$\dot{\zeta}(t) = \frac{\eta(P_{BES}(t))P_{BES}(t)}{Q_S}, \tag{2-12}$$

其中，Q_S 为电池储能设备的容量。通常来说，电池储能设备的容量将随着其使用时间的增长而逐渐下降[79]。但在实际的应用中，电池储能设备的容量往往不会在短时间内发生显著改变，因而此处假设 Q_S 为常数。

公式 (2-12) 中，$\eta(P_{BES}(t))$ 描述了电池储能设备的充放电效率，并满足

$$\eta(P_{BES}(t)) = \begin{cases} \eta_{in}, & P_{BES}(t) \geqslant 0, \\ \dfrac{1}{\eta_{out}}, & P_{BES}(t) < 0, \end{cases} \tag{2-13}$$

其中，参数 η_{in} 和 η_{out} 分别表示电池储能系统的充电效率和放电效率，其数值通常在 1 附近[67,79]。

由于常规电池的循环次数有限，不合理的电池使用策略将提高微电网系统的运行成本[80]。在本章的研究中，对储能设备的合理使用主要是通过减少电池储能使用寿命损失实现的。通常来说，电池储能设备的使用寿命损耗可以通过 Miner 准则[81] 和其电池循环次数模型进行估计。根据文献 [82]，电池储能的循环次数 N 与

其放电深度 $\Delta\zeta$ 之间存在如公式 (2-14) 所示的近似关系。

$$N = C_{BES}\Delta\zeta^{-k_D}, \tag{2-14}$$

其中 C_{BES} 和 k_D 是和电池储能设备的型号相关的常数。参数 k_D 的值通常在 1.1 到 1.3 之间[82]。

假设电池储能设备在损坏之前共经历了 m 种不同深度的放电过程，根据 Miner 准则，可以假设公式 (2-15) 中的等式近似成立。

$$\frac{n_1}{N_1} + \cdots + \frac{n_i}{N_i} + \cdots \frac{n_m}{N_m} = 1, \tag{2-15}$$

其中，n_i 为第 i 种放电深度对应的放电过程总数，N_i 为电池储能设备在该种放电深度下的最大循环次数。

记电池储能设备当前的寿命损失量为 H_{BES}。根据公式 (2-15) 可知，放电深度 $\Delta\zeta$ 的放电过程对电池使用寿命带来的影响可以通过 $\Delta H_{BES} = C_{BES}^{-1}\Delta\zeta^{k_D}$ 进行近似计算。

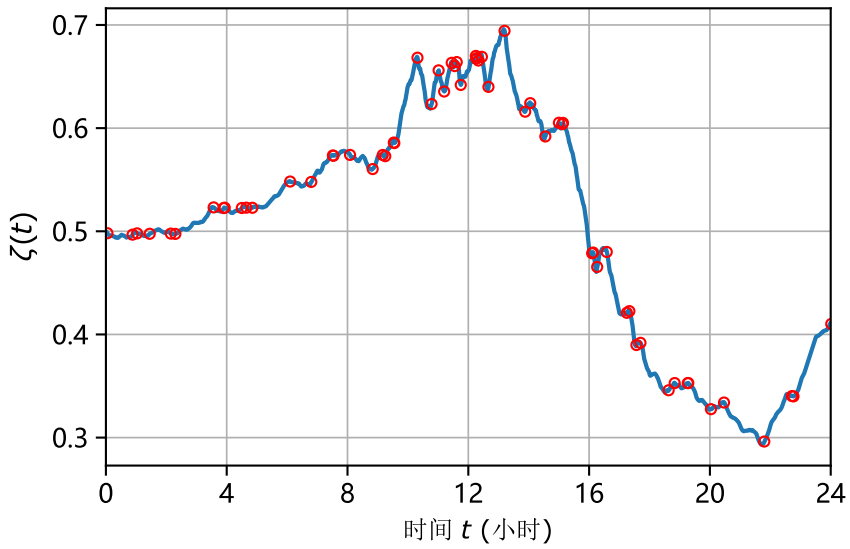


图 2.7　典型的电池储能设备电量变化曲线

图 2.7 给出了电池储能设备在一天内的典型电量变化情况，电池储能设备充电和放电过程的起始点被红色圆圈标记了出来。根据图 2.7 中的电池储能设备使用情况，可以估算出相应的使用寿命损失 $\Delta H_{BES} = 0.7993‰$。

2.1.5　微型燃气轮机的受控功率动态模型

微型燃气轮机能够为微电网系统提供稳定的电力供应，其输出功率也具有较强的可控性[9]。在本章研究的离网运行的微电网系统中，当天气条件发生变化，以至于光伏发电设备无法提供足够的功率输出时，微型燃气轮机将成为微电网中主要的电力来源。同时，通过对微型燃气轮机输出功率的合理规划，微电网系统的运行控制给电池储能设备使用寿命带来的损耗也可以得到降低。但对微型燃气轮机输出功率的调节也可能带来额外的燃料消耗，增加微电网系统的运行成本。

类似于文献 [9] 中采用的可控发电机模型，在本章的研究中，微型燃气轮机受控功率输出的动态模型通过公式 (2-16) 中的线性常微分方程表达。

$$\dot{P}_{MT}(t) = -\frac{1}{T_{MT}}(P_{MT}(t) - u(t)), \tag{2-16}$$

其中，$P_{MT}(t)$ 表示微型燃气轮机的受控输出功率，$u(t)$ 为微型燃气轮机的控制输入信号。在实际的应用中，考虑到微型燃气轮机的发电特性，控制输入信号 $u(t)$ 的大小也需要合理的设计，从而使得微型燃气轮机输出功率在其设计范围内变化。

2.2　微电网系统的中长期能量管理问题

在本节中，图 2.1 中的微电网系统被建模为一类随机动态系统。基于这一微电网系统模型，电池储能设备使用寿命优化对应的能量管理问题被建模为一类随机最优控制问题，并通过最优控制相关的理论和技术得到解决。

2.2.1　微电网系统动态模型

根据 2.1 节中的公式 (2-1) 至公式 (2-12)，本章研究的离网运行的微电网系统可以被建模为公式 (2-17) 中的动态系统。

$$\begin{cases} \mathrm{d}e_{PV}(t) = -\theta_{PV}(t)(e_{PV}(t) - \mu_{PV}(t))\mathrm{d}t + \sigma_{PV}(t)\mathrm{d}w_{PV}(t), \\ \mathrm{d}\Delta\hat{P}_{Load}(t) = -\theta_{Load}(t)(\Delta\hat{P}_{Load}(t) - \mu_{Load}(t))\mathrm{d}t + \sigma_{Load}(t)\mathrm{d}w_{Load}(t), \\ \dot{P}_{MT}(t) = -\dfrac{1}{T_{MT}}(P_{MT}(t) - u(t)), \\ \dot{\zeta}(t) = \dfrac{\eta(P_{BES}(t))P_{BES}(t)}{Q_S}. \end{cases} \tag{2-17}$$

根据微电网系统内电力生产和消耗之间的功率平衡条件，公式 (2-17) 中的电池储能设备的充放电功率 $P_{BES}(t)$ 可以通过公式 (2-18) 计算得到。

$$\hat{P}_{PV}(t) + P_{\odot}e_{PV}(t) + P_{MT}(t) - \hat{P}_{Load}(t) - \Delta\hat{P}_{Load}(t) - P_{BES}(t) = 0. \tag{2-18}$$

令 $\boldsymbol{x}(t)=[e_{PV}(t),\Delta\hat{P}_{Load}(t),P_{MT}(t),\zeta(t)]^{\intercal}$，$\boldsymbol{u}(t)=[u(t)]$，$\boldsymbol{w}(t)=[w_{PV}(t),w_{Load}(t)]^{\intercal}$，公式 (2-17) 中的微电网系统模型可以被改写为公式 (2-19) 给出的一般化的动态随机系统。

$$\begin{cases}\mathrm{d}\boldsymbol{x}(t)=(\boldsymbol{A}(t)\boldsymbol{x}(t)+\boldsymbol{B}(t)\boldsymbol{u}(t)+\boldsymbol{C}(t))\,\mathrm{d}t+\boldsymbol{D}(t)\mathrm{d}\boldsymbol{w}(t),\\ \boldsymbol{x}(t_0)=\boldsymbol{x}_0,\end{cases}\tag{2-19}$$

其中的参数矩阵 $\boldsymbol{A}(t)$，$\boldsymbol{B}(t)$，$\boldsymbol{C}(t)$ 和 $\boldsymbol{D}(t)$ 可以对比公式 (2-17) 得到。

2.2.2　微电网系统电池储能设备使用寿命优化

作为一种典型的面向微电网系统中长期运行的能量管理问题，根据公式 (2-19) 种的微电网系统模型，本章考虑的电池储能设备使用寿命延长的控制目标被建模为时间 $t\in[t_0,T]$ 范围内的一类随机最优控制问题。下面对这一过程进行具体分析和介绍。

如前所述，本章研究的主要目的在于实现电池储能设备的合理使用，而这一点具体体现在对电池储能设备寿命损失的减小上。根据第 2.1 中关于电池储能设备的介绍，其充放电循环对应的寿命损失可以直接通过公式 (2-14) 和公式 (2-15) 进行估算。然而，在控制周期 $t\in[t_0,T]$ 结束之前，电池储能设备的放电深度和循环次数无法预知，这给相关的控制目标函数的设计带来了困难。

根据公式 (2-14)，电池储能设备使用寿命的损耗与其放电深度直接相关。放电程度越深，对应的电池使用寿命损失也就越大。换言之，通过减小电池储能设备的电量变化幅度，其放电深度在一定程度上也可以得到限制。进而电池储能设备的寿命损失可以得到减小。同时，在实际的微电网系统运行过程中，储能设备的电量 $\zeta(t)$ 应当维持在适当的范围内（即 $\zeta_{min}\leqslant\zeta(t)\leqslant\zeta_{max}$）以保证其具有足够的调节能力。这一运行约束也和减小电池储能设备充放电幅度的目标一致。

借鉴文献 [79] 中的做法，在本章的研究中，公式 (2-20) 中的成本函数 J_{BES} 被用于体现微电网系统运行过程给电池储能设备使用寿命带来的影响。该成本函数同时也体现了对电池储能设备电量变化范围的限制。

$$J_{BES}=\int_{t_0}^{T}[\zeta(t)-\bar{\zeta}]^2\mathrm{d}t,\tag{2-20}$$

其中，$\bar{\zeta}=\frac{1}{2}(\zeta_{min}+\zeta_{max})$ 为电池储能设备运行约束范围的中值。

进一步地，对控制周期结束时刻 T 对应的电池储能设备电量的约束可以通过

公式 (2-21) 中的成本函数体现。

$$\boldsymbol{J}_{BES,T} = [\zeta(\boldsymbol{T}) - \bar{\zeta}]^2 \tag{2-21}$$

另一方面，微型燃气轮机的控制信号 $u(t)$ 也需要得到适当的约束。首先，可行的控制策略应当将微型燃气轮机的输出功率控制在其允许的最大值 $\boldsymbol{P}_{MT}^{max}$ 和最小值 $\boldsymbol{P}_{MT}^{min}$ 之间。这一约束通过公式 (2-22) 中的成本函数 $\boldsymbol{J}_{MT}$ 近似体现。

$$\boldsymbol{J}_{MT} = \int_{t_0}^{T} [P_{MT}(t) - \bar{P}_{MT}]^2 \mathrm{d}t, \tag{2-22}$$

其中，$\bar{P}_{MT} = \frac{1}{2}(\boldsymbol{P}_{MT}^{min} + \boldsymbol{P}_{MT}^{max})$。

此外，相比于储能设备，微型燃气轮机往往不支持对其输出功率的大幅度调节。极端条件下，频繁而且大幅度变化的控制信号甚至可能对微型燃气轮机造成损伤。因而，合理的控制策略也必须对控制信号相对于微型燃气轮机当前受控功率输出的变化幅度加以限制。在本章的研究中，微型燃气轮机的输出功率 $\boldsymbol{P}_{MT}(t)$ 被作为微型燃气轮机控制信号的参考值，用于对控制信号大小的限制。该参考值可表示为 $\boldsymbol{F}\boldsymbol{x}(t)$。其中矩阵

$$\boldsymbol{F} = [0 \quad 0 \quad 0 \quad 1 \quad 0]. \tag{2-23}$$

据此，通过最小化公式 (2-24) 给出的控制器 $\boldsymbol{u}(t)$ 相对于其参考值的波动累计量 $\boldsymbol{J}_u$，可以实现对微型燃气轮机的合理调控。

$$\boldsymbol{J}_u = \int_{t_0}^{T} (u(t) - \boldsymbol{F}\boldsymbol{x}(t))^{\intercal}(u(t) - \boldsymbol{F}\boldsymbol{x}(t))\mathrm{d}t, \tag{2-24}$$

结合上面对储能设备和微型燃机轮机控制要求的分析与讨论，本章的研究中，针对微电网系统在控制周期 $t \in [t_0, \boldsymbol{T}]$ 内的能量管理问题，提出了如公式 (2-26) 所示的优化目标。

$$\boldsymbol{J}(t_0, \boldsymbol{x}(t_0), \boldsymbol{u}(t)) = \frac{1}{\theta} \log \left[\mathbb{E}_{\boldsymbol{x},t}[\exp\left(\theta \boldsymbol{C}(\boldsymbol{u}(t), \boldsymbol{x}(t))\right)] \right], \tag{2-25}$$

其中，$\mathbb{E}$ 为数学期望算符，θ 为风险敏感因数，此处要求 $\theta > 0$。公式 (2-25) 中的

指数项 $C(\boldsymbol{u}(t), \boldsymbol{x}(t))$ 由公式 (2-26) 给出。

$$\begin{aligned} C(\boldsymbol{u}(t), \boldsymbol{x}(t)) &= \alpha_1 J_{BES} + \alpha_2 J_{MT} + \alpha_3 J_u + \alpha_4 J_{BES,T} \\ &= \int_0^T [(\boldsymbol{x} - \boldsymbol{x}_r)^\intercal \boldsymbol{Q}(\boldsymbol{x} - \boldsymbol{x}_r) + (u - \boldsymbol{F}\boldsymbol{x})^\intercal \boldsymbol{R}(u - \boldsymbol{F}\boldsymbol{x})]\mathrm{d}t \\ &\quad + (\boldsymbol{x}(T) - \boldsymbol{x}_r)^\intercal \boldsymbol{S}(\boldsymbol{x}(T) - \boldsymbol{x}_r), \end{aligned} \tag{2-26}$$

其中，α_1，α_2，α_3 和 α_4 为权重系数。通过调整这些权重系数可以实现对电池储能设备寿命损失最小化等控制目标的重要性的调整。

如公式 (2-27) 所示，本章的研究目标即寻找最优的微电网能量管理策略 $\boldsymbol{u}^*(t)$，以实现对目标函数 $\boldsymbol{J}(t_0, \boldsymbol{x}(t_0), \boldsymbol{u}(t))$ 的最小化。

$$\begin{aligned} \min_{u(t)\in\mathbb{U}} \quad & \boldsymbol{J}(t_0, \boldsymbol{x}(t_0), \boldsymbol{u}(t)), \\ s.t. \quad & \mathrm{d}\boldsymbol{x}(t) = (\boldsymbol{A}(t)\boldsymbol{x}(t)) + \boldsymbol{B}(t)\boldsymbol{u}(t) + \boldsymbol{C}(t))\,\mathrm{d}t + \boldsymbol{D}(t)\mathrm{d}\boldsymbol{w}(t), \end{aligned} \tag{2-27}$$

其中 $\mathbb{U}$ 为微电网系统 (2-19) 允许的所有控制器 $\boldsymbol{u}(t)$ 的集合。

2.3　基于随机最优控制方法的微电网能量管理策略

在微电网系统动态模型 (2-19) 中，电池储能设备充放电效率 $\eta(P_{BES}(t))$ 是系统状态 $\boldsymbol{x}(t)$ 的非线性函数，这给能量管理问题 (2-27) 的求解带来了一定的困难。但当电池储能设备处于持续的充电或放电状态时，充放电效率 $\eta(P_{BES}(t))$ 的取值实际上将保持恒定。在这种情况下，公式 (2-19) 中的微电网系统模型将变为线性随机系统。这使得对应的最优控制问题能够得到高效的解决。考虑到微电网系统的中长期能量管理问题的时间尺度，电池储能设备在短时间内的充电和放电过程对其电量的影响微乎其微，只有长期持续的充电或放电过程才能体现在公式 (2-25) 给出的目标函数中。在设计微电网系统能量管理策略时，假设充放电效率 $\eta(P_{BES}(t))$ 取固定值具有一定的合理性。因此，本章在 $\eta(P_{BES}(t))$ 保持恒定的前提下对能量管理问题 (2-27) 进行求解。

根据随机分析理论和控制与优化理论，公式 (2-27) 中的能量管理问题可以通过定理 2.1 得到解决。简洁起见，定理 2.1 中，时间记号 t 在不必要出现时将被忽略。

定理 2.1 ([83])：　假设公式 (2-25) 给出的目标函数中 $\boldsymbol{R} > 0$。给定终端条件 $\boldsymbol{P}(T) = \boldsymbol{S}, \boldsymbol{h}(T) = \boldsymbol{0}, g(T) = 0$ 和矩阵 $\boldsymbol{A}_\star = \boldsymbol{A} + \boldsymbol{B}\boldsymbol{F}$，$\boldsymbol{C}_\star = \boldsymbol{C} + \boldsymbol{A}_\star \boldsymbol{x}_r$，若公式 (2-28) 中的

Riccati 方程组有解并且有唯一解 $(\boldsymbol{P}(t), \boldsymbol{h}(t), g(t))$，则控制问题 (2-27) 也有唯一的最优解 $\boldsymbol{u}_\theta^*(t)$，并且 $\boldsymbol{u}_\theta^*(t) = \boldsymbol{F}\boldsymbol{x}(t) - \frac{1}{2}\boldsymbol{R}^{-1}\boldsymbol{B}^\intercal(2\boldsymbol{P}(\boldsymbol{x}(t) - \boldsymbol{x}_r) + \boldsymbol{h}(t))$。

$$\begin{cases} \dot{\boldsymbol{P}} + \boldsymbol{Q} + \boldsymbol{P}^\intercal\boldsymbol{A}_\star + \boldsymbol{A}_\star^\intercal\boldsymbol{P} - \boldsymbol{P}^\intercal(\boldsymbol{B}\boldsymbol{R}^{-1}\boldsymbol{B}^\intercal - 2\theta\boldsymbol{D}\boldsymbol{D}^\intercal)\boldsymbol{P} = 0, \\ \dot{\boldsymbol{h}} + \boldsymbol{A}_\star^\intercal\boldsymbol{h} + 2\boldsymbol{P}^\intercal\boldsymbol{C}_\star - \boldsymbol{P}^\intercal(\boldsymbol{B}\boldsymbol{R}^{-1}\boldsymbol{B}^\intercal - 2\theta\boldsymbol{D}\boldsymbol{D}^\intercal)\boldsymbol{h} = 0, \\ \dot{g} + \boldsymbol{C}_\star^\intercal\boldsymbol{h} + \mathrm{tr}(\boldsymbol{D}\boldsymbol{D}^\intercal\boldsymbol{P}) - \frac{1}{4}\boldsymbol{h}^\intercal(\boldsymbol{B}\boldsymbol{R}^{-1}\boldsymbol{B}^\intercal - 2\theta\boldsymbol{D}\boldsymbol{D}^\intercal)\boldsymbol{h} = 0. \end{cases} \tag{2-28}$$

值得注意的是，当公式 (2-19) 中的系数矩阵 $\boldsymbol{D}(t) \equiv \boldsymbol{0}$ 时，由于 $\theta_{PV}(t)$ 和 $\theta_{Load}(t)$ 均非负，对应的随机动态系统实际上将退化为仅考虑到光伏发电功率预测值 $\hat{P}_{PV}(t)$ 和负荷功率预测值 $\hat{P}_{Load}(t)$ 的确定性系统。另一方面，根据定理 2.1 可知，当风险敏感因数 $\theta = 0$ 时，系数矩阵 $\boldsymbol{D}(t)$ 事实上对最优能量策略 $\boldsymbol{u}_\theta^*(t)$ 的取值没有任何贡献。因此，在风险敏感因数 $\theta \to 0$ 的极限情况下，定理 2.1 给出的最优能量管理策略 $\boldsymbol{u}_0^*(t)$ 事实上将退化为针对确定性系统的传统线性二次型最优控制器。基于这一点，下面称 $\theta = 0$ 对应的控制策略 $\boldsymbol{u}_0^*(t)$ 为传统控制策略。

这同时表明，对于本章中研究的微电网能量管理问题 (2-27)，第 2.1 节中提出的光伏发电功率和电力负荷功率建模方法只有在 $\theta \neq 0$ 的情况下才会起到实际的作用。这一结果也展现了随机控制策略和针对确定系统的传统控制方法的区别。具体来说，随机控制策略能够根据微电网系统的随机性对其控制策略进行相应的调整，从而提高其控制性能的稳定性。

下面将通过数值算例对不同 θ 取值的对应的微电网能量管理策略 $\boldsymbol{u}_0^*(t)$ 的控制效果进行具体分析和讨论。

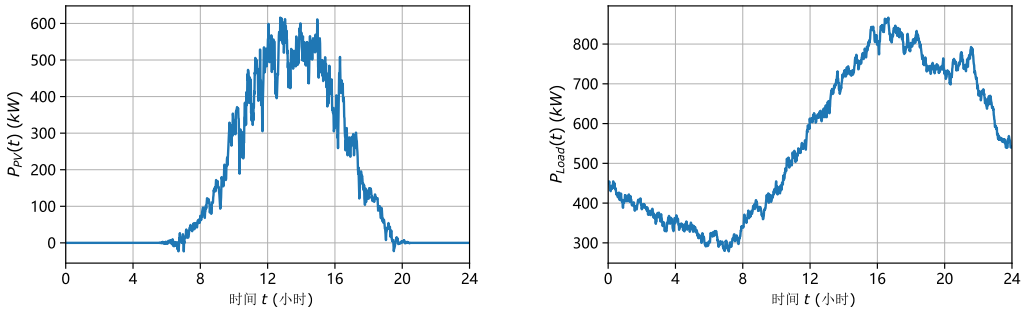
2.4　数值算例

本节通过数值仿真对 2.3 节提出的微电网系统能量管理策略 $\boldsymbol{u}_\theta^*(t)$ 的可行性和控制效果进行了验证。数值仿真的时间范围设置为 $t \in [0, 24]$ （单位为小时），仿真的时间步长设置为 1 分钟，控制周期设置为 30 分钟。数值仿真基于公式 (2-19) 给出的微电网系统动态模型开展。对应于 $t_0 = 0$ 时刻的电池储能设备的电量初始值为 $\zeta(t_0) = 0.5$，微型燃气轮机的初始输出功率为 $P_{MT}(t_0) = P_{Load}(t_0) - P_{PV}(t_0)$。其他用于仿真的微电网系统参数见表 2.3 。

对应于图 2.8 所示的光伏发电功率和负荷功率曲线，在单次数值仿真中不同的微电网能量管理策略 $\boldsymbol{u}_\theta^*(t)$ 对应的控制效果如图 2.9 所示。比较图 2.9(a) 中的微型燃气轮机的受控功率输出曲线可知，在不同的能量管理策略 $\boldsymbol{u}_\theta^*(t)$ 的控制下，微型燃气轮机的受控功率输出曲线的变化趋势基本一致，并且基本保持在微型燃气轮机允许的输出功率范围内。容易发现，对应于图 2.9(a) 中的四种风险敏感因数 θ

表 2.3　数值仿真参数设置

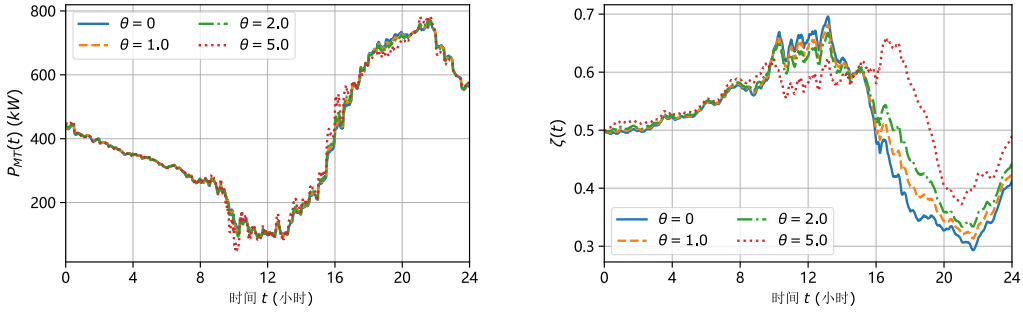
参数	典型值	参数	典型值	参数	典型值
T_{MT}	3 (min)	P_{MT}^{max}	800 (kW)	P_{MT}^{min}	0 (kW)
C_{BES}	605.23	k_D	1.15	ζ_{max}	0.9
ζ_{min}	0.3	η_{in}	1.0	η_{out}	1.0
Q_S	500 (kWh)	α_1	50.0	α_2	1.0
α_3	1×10^{-4}	α_4	100.0		



(a) 典型光伏发电功率曲线　　(b) 典型电力负荷功率曲线

图 2.8　数值仿真中的光伏发电功率和电力负荷功率曲线

设置，微型燃气轮机的输出功率曲线中均未表现出频繁而且大幅度的波动，这表明本章提出的微电网能量管理策略确实能够实现对微型燃气轮机的合理控制。



(a) 微型燃气轮机功率曲线　　(b) 电池储能设备电量曲线

图 2.9　能量管理策略 $\boldsymbol{u}_\theta^*(t)$ 控制效果比较

另外，通过观察，图 2.9(a) 中四条功率曲线的主要差异出现在第 10 小时到第 20 小时之间。对比图 2.9(b) 中的电池储能设备电量曲线可知，这些差异主要来源于不同能量管理策略 $\boldsymbol{u}_\theta^*(t)$ 对公式 (2-25) 给出的控制性能指标（即目标函数）稳定性的重视程度。根据表 2.3 中的参数设置，风险敏感因数 θ 越大，相应的最优能量管理策略 $\boldsymbol{u}_\theta^*(t)$ 对储能设备的电量 $\zeta(t)$ 相对于参考值 $\bar{\zeta} = 0.6$ 的波动越敏感。具体来说，对于风险敏感因数 θ 取值越大，在光伏发电功率和电力负荷功率的随机性

比较强的时段，定理 2.1 给出的能量管理策略 $\boldsymbol{u}_{\theta}^{*}(t)$ 也将加保守。作为结果，微电网系统内电池储能设备的电量波动也将被控制在更小的范围内。对比图 2.9(b) 中第 10 小时到第 20 小时之间的四条电量曲线可知，能量管理策略 $\boldsymbol{u}_{\theta=5.0}^{*}(t)$ 控制下的电池电量被更好地控制在了参考值 0.6 附近。该能量管理策略控制下微型燃气轮机的受控功率输出曲线和图 2.9(a) 中的其他功率曲线也存在较为明显的区别。反之，对应于 $\theta = 0$ 的极限情况，传统控制策略 $\boldsymbol{u}_{0}^{*}(t)$ 完全没有考虑到微电网系统内功率波动的随机性，对应的电池储能设备电量波动幅度也最大。

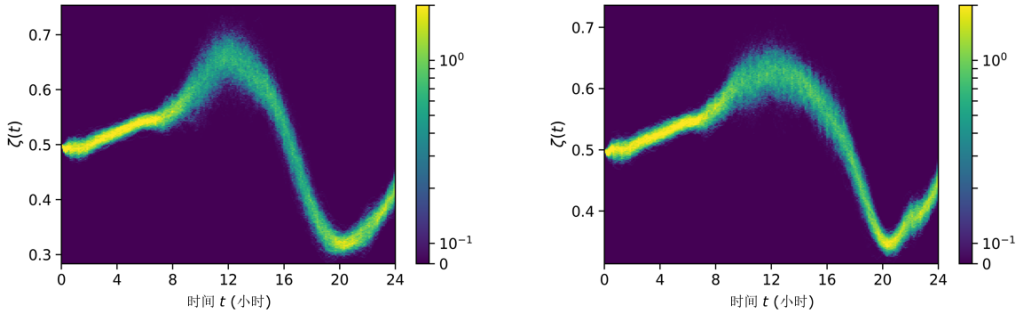
表 2.4　不同控制策略对应的储能设备寿命损失估计

控制策略	储能寿命损失 ΔH_{BES}
$\boldsymbol{u}_{0}^{*}(t)$	$0.7715 \pm 0.0041‰$
$\boldsymbol{u}_{\theta=1.0}^{*}(t)$	$0.7461 \pm 0.0040‰$
$\boldsymbol{u}_{\theta=2.0}^{*}(t)$	$0.7281 \pm 0.0040‰$
$\boldsymbol{u}_{\theta=5.0}^{*}(t)$	$0.7672 \pm 0.0039‰$

为了进一步量化比较不同能量管理策略的电池储能设备寿命优化效果，表 2.4 给出了 500 轮数值仿真中电池储能设备寿命损失的统计数值。可以看到，基于本章提出的新型光伏和电量负荷建模方法，定理 2.1 给出的风险敏感的能量管理策略 $\boldsymbol{u}_{\theta}^{*}(t)$ 相比于传统控制方法 $\boldsymbol{u}_{0}^{*}(t)$ 能够更加合理地实现对电池储能设备使用，从而带来相对更小的储能设备寿命损失。对比不同能量管理策略下的储能寿命损失可以发现，储能设备寿命损失并不会随着风险敏感因数 θ 的增大而单调减小。对比第 2.1 节中的储能寿命损失估算方法以及公式 (2-25) 的控制目标函数 $\boldsymbol{J}(t_0, \boldsymbol{x}(t_0), \boldsymbol{u}(t))$ 定义可以发现，虽然控制储能设备电量的变化幅度可以在一定程度上减少其寿命损失，但是这一控制目标和储能寿命损失的估算方法之间仍然存在着一定的差异。微电网的能量管理策略 $\boldsymbol{u}_{\theta=5.0}^{*}(t)$ 虽然能将储能设备的电量的变化幅度控制在更小的范围，但是它也给储能设备带来了更多的充放电循环，因而造成了较大的储能寿命损失。

表 2.4 中的数据也体现了微电网系统随机性对相关能量管理策略性能的影响。虽然传统控制方法 $\boldsymbol{u}_{0}^{*}(t)$ 同样能够利用神经网络模型给出的电量预测结果，实现对微电网系统的有效控制，但是对光伏和负荷功率随机性的忽视使得其控制性能相对来说更加不稳定。

结合图 2.10 中两种能量管理策略下电池储能设备电量曲线的统计分布可以更加明显地看到这种差异。在第 12 小时附近，图 2.10(a) 和图 2.10(b) 中的电池储能设备电量曲线的高概率分布区域具有相近的宽度，但是风险敏感控制策略 $\boldsymbol{u}_{\theta=2.0}^{*}(t)$



(a) 传统控制策略 $\boldsymbol{u}_0^*(t)$　　(b) 风险敏感控制策略 $\boldsymbol{u}_{\theta=2.0}^*(t)$

图 2.10　两种能量管理策略下电池储能设备电量曲线的统计分布

能够根据光伏和负荷功率波动的随机性大小提前做出一定的调整，从而将电池储能设备电量曲线的波动控制在更小的范围内。相比之下，传统控制策略 $\boldsymbol{u}_0^*(t)$ 则完全没有考虑微电网系统的随机性，对应的控制效果的稳定性也较差。

根据上述数值仿真结果可知，本章提出的微电网系统能量管理策略能够在利用神经网络模型带来的高精度电量预测的同时，将微电网系统功率波动的随机性纳入考虑，有效地实现对电池储能设备使用寿命的优化。值得注意的时，本章提出的能量管理策略仅设置在微型燃气轮机中，文献 [79,82] 中针对电池储能设备本身设计的控制策略可以和本章提出的方法同时使用，在电池储能设备内部进行优化调度，从而进一步提升相关优化效果。

2.5　本章小结

本章首先提出了一种适用于可再生能源和电力负荷功率动态建模的新型建模方法。该模型结合了神经网络模型和随机过程模型的优势，在实现较高精度的电量预测的同时，还可以对可再生能源和电力负荷功率波动中存在的随机性进行合理的建模。基于这一新型建模方法，本章以离网运行的微电网系统内电池储能设备的使用寿命优化任务为例，提出了一种适用于微电网系统中长期能量管理的控制方法，并通过数值仿真对该方法的可行性和控制效果进行了分析与验证。

由于本章提出的微电网系统的能量管理问题对系统运行约束条件做了一定的简化，在实际的应用中往往需要通过对控制目标权重的仔细调节才能保证对应的控制策略的合理性。相比之下，文献 [84] 提出的基于贝尔曼方程和动态规划方法的最优控制器求解方法则能够处理更加复杂的系统约束条件和控制目标。但是，受到维度灾难的影响，这类数值求解方法往往无法被用于具有较大规模的微电网系统的控制中。因此，适用于微电网系统中复杂能量管理问题的高效求解算法将成为相关研究领域的重要研究方向。

第 3 章　直流多微网系统鲁棒电压控制方法

直流微电网技术的应用有助于能源互联网系统电能质量和电力传输容量的提升，相关的直流输电技术在智能电网和能源互联网系统中也得到了很多应用[85]。在区域能源互联网的应用场景中，随着可再生能源渗透率的提升，直流微电网系统电力服务的可靠性也面临着全新的挑战。

作为电力服务可靠性的一个重要指标，电力系统的电压稳定性成为了相关领域近年来的研究热点。电力系统电压稳定性分析以及相关的电压控制技术也得到了广泛的关注。例如，文献 [86] 中，考虑到通信噪声和时延对实际电力系统电压控制带来的干扰，作者提出了一种基于局域电压量测和梯度投影方法的分布式无功控制策略，通过非实时的数据通信即可实现对配电网络电压波动的快速响应和控制。针对包含大量分布式能源的配电网络，文献 [87] 中，作者比较了基于局部电压策略的无功补偿策略和基于分布式控制技术的无功调节方法的电压控制效果，并提出了一种基于多智能体协作的分布式电压控制策略，在实现配电网电压稳定性的前提下有效减少了电力传输带来的能量损失。通过自适应下垂控制方法的应用，文献 [88] 在保证合理的电压调节性能的同时，实现了对直流微电网系统均流控制精度的提升。借鉴电压下垂控制的原理，文献 [89] 中，作者针对离网运行的微电网系统提出了一种新型电压反馈控制策略，并将其用于微电网系统电压稳定性和无功功率平衡的控制任务中。同样针对孤岛微电网这一能源互联网应用场景，文献 [40] 发展了一种新型的适用于具有参数不确定性的直流微电网系统的电压控制策略，实现了对离网运行的微电网系统电压稳定性的保障。

分布式可再生能源发电功率的随机性、控制和通信时延以及系统建模误差等多种因素都可能对电力系统的电压稳定性造成影响。这些因素在上面提到的关于电力系统电压控制的研究中均有涉及，但是并没有得到同时的考虑。在能源互联网系统中，可再生能源的广泛应用以及自底向上的系统组织形式使得这些干扰因素对电力系统稳定性的影响变得更加显著[40]。首先，能源互联网系统往往具有较高的可再生能源渗透率。这意味着可再生能源发电功率的随机波动将对微电网系统内部的功率平衡产生显著影响，从而导致直流母线电压的大幅度波动。同时，能源互联网系统内的控制与调度过程可能会受到通信时延的影响[24,90]，这一时延往往会体现在多微网间的能量传输过程中。受到能量路由器能量传输协议和能量传输策略的影响，相对于各个微电网实际的电力需求，微电网间的能量流传输调度可能存在一定的滞后性。这一特性需要在多微网系统的模型中得到一定的体现。在

多微网系统的建模过程中客观存在的系统测量误差和建模误差也将不可避免地对相关电压控制策略的性能造成影响，极端情况下甚至给整个多微网系统的运行带来故障。因此，在设计多微网系统的电压控制策略时，多微网系统的建模误差也必须得到充分的考虑。这通常可以通过在多微网系统模型中引入参数不确定性实现[40,91-93]。

基于上述分析与讨论，本章提出的直流多微网系统模型中综合考虑了可再生能源的随机性和不确定性和能量传输时延的影响，并采用文献 [40] 中提出的结构化参数不确定性模型描述系统建模误差。基于这一动态模型，直流多微网系统的电压控制问题被建模为一类鲁棒 H_∞ 控制问题，并通过文献 [94] 中提出的基于线性矩阵不等式的鲁棒控制方法得到解决。此外，传统的鲁棒控制方法往往仅关注被控系统的稳定性，而忽视了相关控制策略带来的控制成本。本章在鲁棒 H_∞ 控制方法的基础上，针对两种典型的直流多微网系统电压控制需求，分别提出了具有最优电压控制性能和兼顾控制成本和电压稳定性的电压控制策略。这两种新型电压控制策略的相关性能表现也通过数值仿真得到了验证。

本章节的内容安排如下，第 3.1 节介绍了区域能源互联网场景下的直流多微网系统组织模型，并对其中的直流微电网系统和能量路由器的动态模型进行了具体的分析和讨论。第 3.2 节首先采用随机动态模型对直流多微网系统进行了建模，并结合该随机系统模型介绍了直流多微电网电压稳定性相关的控制指标。通过鲁棒 H_∞ 控制方法和凸优化理论的综合应用，第 3.3 节提出了两种新型的直流多微网系统电压控制策略。这两种控制策略的特性和控制效果在第 3.4 节通过具体的数值算例得到了验证。最后，第 3.5 节对本章的主要研究内容进行了总结。

3.1　直流多微网系统的组织模式和具体构成

本节首先对区域能源互联网场景下的直流多微网系统的组织模式进行了介绍。结合直流多微网系统的电压控制问题，布朗运动驱动的随机微分方程以及带有时延和参数不确定性的微分方程被用于构建各个微电网系统以及能量路由器的动态模型。

3.1.1　直流多微网系统架构

当直流多微网系统工作在并网模式时，其内部可再生能源和电力负荷的功率波动可以被与其相连的主干电网直接消纳，相关的电压控制问题相对来说较为简单。相对地，工作在离网模型的直流多微网系统需要独立于主干电网自治运行。其直流母线电压的控制因而具有相对较高的难度，同时也具有较好的代表性。基于

上述考虑，本章的研究主要针对工作在离网模式的直流多微网系统开展。典型的离网运行的直流多微网系统应用场景如图 3.1 所示。

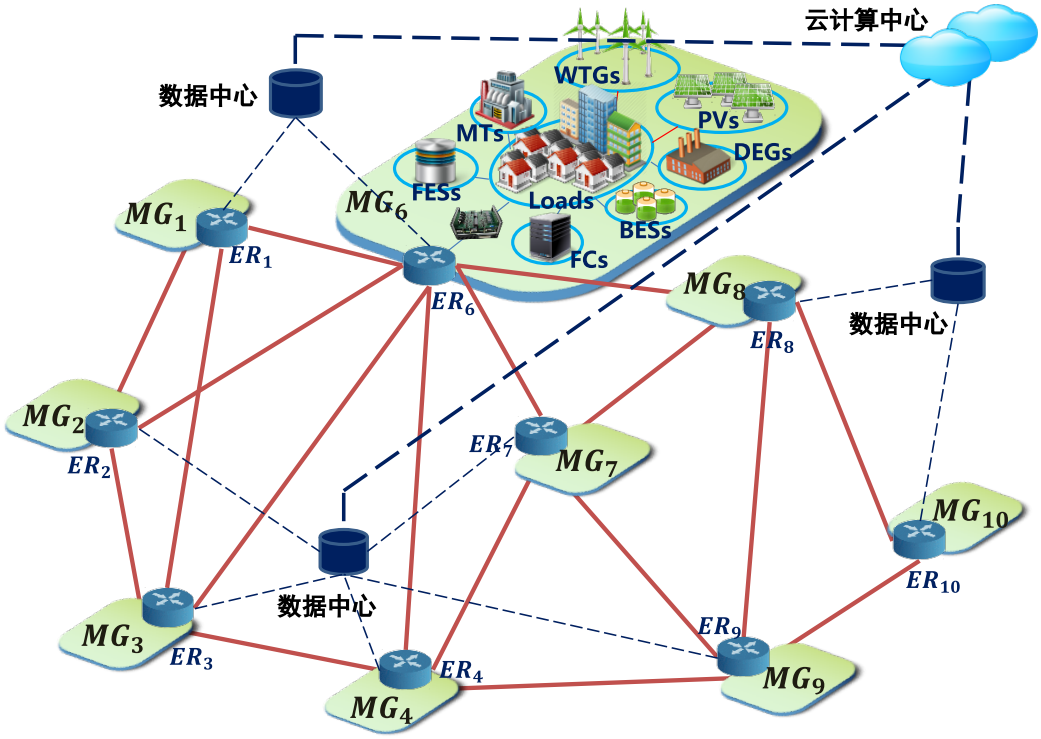


图 3.1　离网运行的直流多微网系统应用场景示意图

按照图 3.1 所示的多微网系统组织模式，每个直流微电网有一个能量路由器与之对应。该能量路由器将负责其多种内部电气设备的接入和运行控制，并实现和其他微电网的能量交换。具体来说，各个能量路由器将收集微电网系统的运行信息，并上传至其附近的数据中心，用于在云端生成相应的控制策略，并对整个多微网系统的运行进行规划和调度。云端生成的各种控制和调度方案将通过数据中心分发至各个能量路由器，再由能量路由器转发到各个微电网以及其可控电气设备中。

本章的研究针对由 n 个直流微电网组成的直流多微网系统开展。这些直流微电网间的能量传输依靠各个能量路由器和电力传输线路构成的能量路由器网络实现。在能量路由器网络中，能量路由器可以被视作连通图 $\mathcal{G} = (\mathbb{V}, \Xi)$ 中的顶点 $v \in \mathbb{V}$，连接不同能量路由器的电力传输线路可被视作顶点间的边 $\xi \in \Xi$。给定顶点集合 $\mathbb{V} = \{1, 2, \cdots, n\}$，图 3.1 所示的直流多微网系统中的直流微电网和对应的能量路由器可以被分别记为 MG_i 和 ER_i，$i \in \mathbb{V}$。能量路由器 ER_i 和 ER_j 之间的

电力传输线路可以记为 $\xi_{i,j} \in \Xi$。

3.1.2　直流微电网系统的组成成分及其动态模型

实际的直流多微网系统中，各个直流微电网的组成和结构通常都千差万别。例如，某些微电网可能同时通过其内部安装的光伏和风力发电装置为其电力负荷提供能源供应，而另外一些微电网系统可能仅安装有分布式光伏发电设备，并通过其附属的储能系统实现稳定的电力供应。

不失一般性，本章假设每个直流微电网中都安装有光伏和风力发电设备、电力负荷、微型燃气轮机、柴油发电机、燃料电池、电池储能以及飞轮储能设备。这样的微电网系统具有较强的代表性，在稍加调整后即可用于对大多数能源互联网应用场景的描述和建模。下面将以直流多微网系统中第 i 个直流微电网为例，介绍上述典型的微电网系统内各组成成分的功率动态模型。

参照文献 [40] 中采用的建模方法，连续时间的随机系统被用于建立光伏和风力发电设备等可再生能源的动态功率模型。如公式 (3-1) 所示，一维标准 Wiener 过程 $w^i_{PV}(t)$, $w^i_{WTG}(t)$ 和 $w^i_{Load}(t)$ 被分别用于描述光伏和风力发电设备以及电力负荷的功率波动 $\Delta P^i_{PV}(t)$, $\Delta P^i_{WTG}(t)$ 和 $\Delta P^i_{Load}(t)$ 中存在的随机性。

$$\mathrm{d}\Delta P^i_{\mathcal{M}}(t) = \frac{1}{T^i_{\mathcal{M}}}\left[-(1+\Delta a^i_{\mathcal{M}}(t))\Delta P^i_{\mathcal{M}}(t) + v^i_{\mathcal{M}}(t)\right]\mathrm{d}t + e^i_{\mathcal{M}}\Delta P^i_{\mathcal{M}}(t)\mathrm{d}w^i_{\mathcal{M}}(t), \quad (3\text{-}1)$$

其中，下标 $\mathcal{M} \in \{PV, WTG, Load\}$，$v^i_{PV}(t)$, $v^i_{WTG}(t)$ 和 $v^i_{Load}(t)$ 分别表示关于 $\Delta P^i_{PV}(t)$, $\Delta P^i_{WTG}(t)$ 和 $\Delta P^i_{Load}(t)$ 的扰动输入，这些扰动主要来源于天气等环境因素以及用户复杂的用电行为模式。公式 (3-1) 中的 $\Delta a^i_{PV}(t)$, $\Delta a^i_{WTG}(t)$ 和 $\Delta a^i_{Load}(t)$ 均为有界连续函数，用于体现系统建模误差给对应模型的参数带来的不确定性。时间常数 T^i_{PV}, T^i_{WTG} 和 T^i_{Load} 和系统参数 e^i_{PV}, e^i_{WTG} 和 e^i_{Load} 分别体现了 $\Delta P^i_{PV}(t)$, $\Delta P^i_{WTG}(t)$ 和 $\Delta P^i_{Load}(t)$ 变化的剧烈程度和随机性强弱，并可以通过参数估计等方法从微电网实际运行数据中得到。

在未来的能源互联网场景下，可再生能源将在电力系统中得到更加广泛的应用。光伏和风力发电等典型的分布式可再生能源具有的随机性和不确定性也使得微电网系统内部电能供需平衡的维持变得更加困难，直流微电网系统的母线电压的稳定性也将随之受到影响。在直流微电网系统中，直流母线上的电压波动可以通过对微型燃气轮机、柴油发电机和燃料电池等具有灵活调节能力的可控发电设备输出功率的精细控制得到有效抑制。

借鉴文献 [40,42,52] 中对微电网系统的建模方法，微型燃气轮机、柴油发电机和燃料电池等可控发电设备输出功率相对于其各自参考值的偏差对应的动态功率

模型如公式 (3-2) 所示。

$$\mathrm{d}\Delta P^i_{\mathcal{N}}(t) = \frac{1}{T^i_{\mathcal{N}}}\Big[-(1+\Delta a^i_{\mathcal{N}}(t))\Delta P^i_{\mathcal{N}}(t) + (1+\Delta b^i_{\mathcal{N}}(t))u^i_{\mathcal{N}}(t)\Big]\mathrm{d}t, \tag{3-2}$$

其中，下标 $\mathcal{N} \in \{MT, DG, FC\}$，时间常数 T^i_{MT}, T^i_{DG} 和 T^i_{FC} 描述了这些发电设备对于控制输入的响应速度，可以通过实际设备的使用手册等途径得到，控制输入 u^i_{MT}, u^i_{DG} 和 u^i_{FC} 对应于微型燃气轮机等可控发电设备上设置的控制器，参数不确定性 $\Delta a^i_{MT}(t)$, $\Delta a^i_{DG}(t)$ 和 $\Delta a^i_{FC}(t)$ 为有界连续函数，用于描述公式 (3-2) 中的线性微分方程模型的建模误差。

和微型燃气轮机、燃料电池等可控发电设备相比，储能设备往往具有更快的响应速度[38,90,95]。作为对可控发电设备的补充和重要的能量调节手段，储能系统对微电网系统的正常运行具有重要的意义。关于电池和飞轮储能等设备的运行与控制策略得到了大量的研究[90,96]。这些研究往往主要针对储能系统内部的运行控制设计解决方案，并不涉及与外部的可控发电设备的协同调控。

借鉴文献 [12,38,40] 中采用的储能设备动态模型，本章的研究中，电池储能和飞轮储能设备上采用电压下垂控制策略，用于为各个直流微电网提供参考电压。据此，在直流微电网 MG_i 中的电池储能和飞轮储能设备的动态功率模型将由公式 (3-3) 给出。

$$\mathrm{d}\Delta P^i_{\mathcal{S}}(t) = \frac{1}{T^i_{\mathcal{S}}}\Big[-(1+\Delta a^i_{\mathcal{S}}(t))\Delta P^i_{\mathcal{S}}(t) + (1+\Delta o^i_{\mathcal{S}}(t))\Delta V^i(t)\Big]\mathrm{d}t, \tag{3-3}$$

其中，下标 $\mathcal{S} \in \{BES, FES\}$，时间常数 T^i_{BES} 和 T^i_{FES} 描述了储能设备对直流母线电压波动的响应速度，可以通过实际设备的参数指标得到，参数不确定性 $\Delta a^i_{BES}(t)$, $\Delta o^i_{BES}(t)$, $\Delta a^i_{FES}(t)$ 和 $\Delta o^i_{FES}(t)$ 为有界连续函数，用于描述公式 (3-3) 的建模误差。

记直流微电网 MG_i 直流母线电压相对于参考电压的波动为 $\Delta V^i(t)$。根据文献 [97]，微电网 MG_i 直流母线电压波动 $\Delta V^i(t)$ 同时受到其内部的电力供需平衡的波动和来自于能量路由器的功率流的影响，其动态模型如公式 (3-4) 所示。

$$\mathrm{d}\Delta V^i(t) = \frac{1}{T^i_V}\Big[(1+\Delta a^i_V(t))(\Delta P^i_{in}(t) - \Delta P^i_m(t))\Big]\mathrm{d}t, \tag{3-4}$$

其中，有界函数 $\Delta a^i_V(t)$ 描述了该动态模型的参数不确定性，$\Delta P^i_m(t)$ 对应于微电网 MG_i 内部的功率供需之间的偏差，其表达式见公式 (3-5)，$\Delta P^i_{in}(t)$ 为通过能量路由器传输到微电网 MG_i 的功率流的总和，可以根据公式 (3-7) 进行计算。

$$\begin{aligned}\Delta P^i_m = \Delta P^i_{Load} - \Delta P^i_{PV} - \Delta P^i_{WTG} - \Delta P^i_{BES} - \Delta P^i_{DG} - \Delta P^i_{FC} \\ -\Delta P^i_{MT} - \Delta P^i_{FES}.\end{aligned} \tag{3-5}$$

3.1.3　能量路由器功率流动态模型

在直流多微网系统这一典型的能源互联网场景中，能量路由器主要用于实现直流微电网之间的能量交换。能量路由器允许多微网系统能够更加主动地对能量流的传输进行控制[24,42]。当微电网 MG_i 和微电网 MG_j 进行能量交换时，功率流传输请求将首先被发送到对应的能量路由器 ER_i 和 ER_j 中，在能量流传输协商完成后，相关的功率流才会通过对应的电力传输网络进行跨微电网的能量传输。此处记 t 时刻经过能量路由器 ER_i 和 ER_j 之间的电力传输线路的功率流为 $P_{ER}^{i,j}, i < j, i, j = 1, 2, \cdots, n$。为避免混淆，本章的研究中将不使用满足 $i \geqslant j$ 的功率流符号 $P_{ER}^{i,j}$。

功率流 $P_{ER}^{i,j}$ 的参考方向实际上可以任意选取，其符号决定了功率流在能量路由器 ER_i 和 ER_j 之间的实际传输方向。本章的研究中，功率流 $P_{ER}^{i,j}$ 的参考方向被设定为从电力传输线路 $\xi_{i,j}$ 在能量路由器 ER_i 的一侧出发，到能量路由器 ER_j 对应的一侧结束。功率流 $P_{ER}^{i,j} > 0$ 表示其传输方向与该参考方向一致，功率流 $P_{ER}^{i,j} < 0$ 则表示其传输方向与该参考方向相反。基于上述参考方向的定义，来自能量路由器的功率流对各个直流多微网内功率平衡的影响可以通过公式 (3-4) 和公式 (3-7) 进行计算。

在典型的区域能源互联网应用场景中，出于效率和灵活性的考虑，各个微电网和能量路由器的控制策略通常由如图 3.1 所示的区域性控制中心进行计算和分发，受到实际工程应用中控制系统和通信系统传输时延的影响，能量路由器网络中功率流的变化往往会存在一定的滞后性[98-99]。同时，电力传输线两端能量路由器功率传输的协商过程也可能引入一定的时延。为了充分考虑能量路由器系统的上述特性，本章中采用公式 (3-6) 给出的包含扰动输入和时延因素的的线性微分方程模型对通过能量路由器网络传输的功率流 $P_{ER}^{i,j}$ 的动态变化进行建模。

$$\begin{aligned} \mathrm{d}\Delta P_{ER}^{i,j}(t) = \frac{1}{T_{ER}^{i,j}}\big[& -(1+\Delta a_{ER}^{i,j}(t))\Delta P_{ER}^{i,j}(t) + v_{ER}^{i,j}(t) \\ & +(a_d{}_{ER}^{i,j} + \Delta a_d{}_{ER}^{i,j}(t))\Delta P_{ER}^{i,j}(t-\tau(t)) \\ & +(1+\Delta b_{ER}^{i,j}(t))\Delta u_{ER}^{i,j}(t)\big]\mathrm{d}t, \end{aligned} \tag{3-6}$$

此处，时间常数 $T_{ER}^{i,j}$ 描述了传输线路 $\xi_{i,j}$ 上的能量流对控制信号 $u_{ER}^{i,j}$ 和扰动输入 $v_{ER}^{i,j}$ 的响应速度，可以基于实际多微网系统中能量路由器网络的运行监测数据估计得到，参数 $a_d{}_{ER}^{i,j}$ 反映了上面提到的通信延迟对功率流动态变化的影响，有界函数 $\Delta a_{ER}^{i,j}(t)$, $\Delta a_d{}_{ER}^{i,j}(t)$, 和 $\Delta b_{ER}^{i,j}(t)$ 代表了公式 (3-6) 对传输线路 $\xi_{i,j}$ 上功率流动态模型的建模误差。公式 (3-6) 中，$\Delta P_{ER}^{i,j}(t-\tau(t))$ 表示与线路 $\xi_{i,j}$ 上传输的能量流相关

的系统时延，其中时延函数 $\tau(t)$ 满足 $0 < \tau(t) \leqslant \mu < +\infty$ 和 $\dot{\tau}(t) \leqslant h < 1$。

根据图 3.1 所示的多微网系统与能量路由器之间的连接关系，经过能量路由器输入直流微电网 MG_i 的总功率 $\Delta P_{in}^i(t)$ 满足

$$\Delta P_{in}^i = \sum_{j \in \mathbb{V}} r_{j,i} \Delta P_{ER}^{j,i}, \tag{3-7}$$

其中，$r_{j,i}$ 描述了能量路由器 ER_i 和 ER_j 的连接关系。$r_{j,i} = 1$ 表示能量路由器 ER_i 和 ER_j 通过输电线路直接相连，而 $r_{j,i} = 0$ 表示能量路由器 ER_i 和 ER_j 之间不存在实际的输电线路。

3.2　直流多微网系统的电压控制问题

本节中，直流多微网系统的动态模型首先被改写为一类具有一般性的随机微分方程组。基于这一随机系统模型，直流多微网系统的母线电压控制问题被进一步建模为一类鲁棒随机控制问题。

3.2.1　多微网系统动态模型

根据第 3.1 节给出的直流微电网系统模型和能量路由器功率流模型，本章研究的直流多微网系统的动态模型可以被转化为一个随机微分方程组。

简单起见，借鉴文献 [40] 中的做法，在下面的分析中假设 $w_{PV}^i(t) = w_{WTG}^i(t) = w_{Load}^i(t) = w(t), i \in \mathbb{V}$ 成立。在直流微电网 MG_i 中，其系统状态向量 $\boldsymbol{x}^i(t) \in \mathbb{R}^9$ 如公式 (3-8) 所示。

$$\begin{aligned} \boldsymbol{x}^i(t) = [&\Delta P_{PV}^i(t), \Delta P_{WTG}^i(t), \Delta P_{Load}^i(t), \Delta P_{MT}^i(t), \Delta P_{DG}^i(t), \\ &\Delta P_{FC}^i(t), \Delta P_{BES}^i(t), \Delta P_{FES}^i(t), \Delta V^i(t)]^\intercal. \end{aligned} \tag{3-8}$$

类似地，微电网 MG_i 的控制向量 $\boldsymbol{u}^i(t) \in \mathbb{R}^3$ 和扰动输入向量 $\boldsymbol{v}^i(t) \in \mathbb{R}^3$ 可分别记为 $\boldsymbol{u}^i(t) = [u_{MT}^i(t), u_{DG}^i(t), u_{FC}^i(t)]^\intercal$ 和 $\boldsymbol{v}^i(t) = [v_{PV}^i(t), v_{WTG}^i(t), v_{Load}^i(t)]$。假设能量路由器之间共存在 m 条电力传输线路，这些传输线路显然可以与二元组集合 $\mathbb{L} = \{(i,j) | i < j, \xi_{i,j} \in \Xi\}$ 的元素一一对应。记集合 $\mathbb{L}$ 的元素为 $l_1, l_2, \cdots, l_m$，从而能量路由网络的状态向量 $\boldsymbol{x}^{ER}(t) \in \mathbb{R}^m$，控制输入 $\boldsymbol{u}^{ER}(t) \in \mathbb{R}^m$ 和扰动输入向量 $\boldsymbol{v}^{ER}(t) \in \mathbb{R}^m$ 可以被表示为

$$\begin{cases} \boldsymbol{x}^{ER}(t) = [\Delta P_{ER}^{l_1}, \cdots, \Delta P_{ER}^{l_i}, \cdots, \Delta P_{ER}^{l_m}]^\intercal, \\ \boldsymbol{u}^{ER}(t) = [u_{ER}^{l_1}, \cdots, u_{ER}^{l_i}, \cdots, u_{ER}^{l_m}]^\intercal, \\ \boldsymbol{v}^{ER}(t) = [v_{ER}^{l_1}, \cdots, v_{ER}^{l_i}, \cdots, v_{ER}^{l_m}]^\intercal. \end{cases} \tag{3-9}$$

根据上述记号约定，整个多微网系统的状态向量 $\boldsymbol{x}(t) \in \mathbb{R}^{9n+m}$，控制输入 $\boldsymbol{u}(t) \in \mathbb{R}^{3n+m}$ 和扰动输入向量 $\boldsymbol{v}(t) \in \mathbb{R}^{3n+m}$ 可以被表示为

$$\begin{cases} \boldsymbol{x}(t) = [\boldsymbol{x}^1(t)^\intercal, \cdots, \boldsymbol{x}^i(t)^\intercal, \cdots, \boldsymbol{x}^n(t)^\intercal, \boldsymbol{x}^{ER}(t)^\intercal]^\intercal, \\ \boldsymbol{u}(t) = [\boldsymbol{u}^1(t)^\intercal, \cdots, \boldsymbol{u}^i(t)^\intercal, \cdots, \boldsymbol{u}^n(t)^\intercal, \boldsymbol{u}^{ER}(t)^\intercal]^\intercal, \\ \boldsymbol{v}(t) = [\boldsymbol{v}^1(t)^\intercal, \cdots, \boldsymbol{v}^i(t)^\intercal, \cdots, \boldsymbol{v}^n(t)^\intercal, \boldsymbol{v}^{ER}(t)^\intercal]^\intercal. \end{cases} \tag{3-10}$$

记 t 时刻 n 个直流微电网系统的母线电压相对于参考电压的偏差为 $\boldsymbol{z}(t) = [\Delta V^1(t), \cdots, \Delta V^i(t), \cdots, \Delta V^n(t)]'$。公式 (3-1) 至公式 (3-7) 给出的多微网系统动态模型可以被改写为公式 (3-11) 给出的具有一般形式的随机系统。

$$\begin{cases} \mathrm{d}\boldsymbol{x}(t) = [\boldsymbol{A}(t)\boldsymbol{x}(t) + \boldsymbol{A}_d(t)\boldsymbol{x}(t-\tau(t)) + \boldsymbol{D}\boldsymbol{v}(t) \\ \qquad\qquad + \boldsymbol{B}(t)\boldsymbol{u}(t)]\mathrm{d}t + \boldsymbol{E}\boldsymbol{x}(t)\mathrm{d}w(t), \\ \boldsymbol{z}(t) = \boldsymbol{C}\boldsymbol{x}(t), \\ \boldsymbol{x}(t) = \boldsymbol{\phi}(t), \quad -\mu \leqslant t \leqslant 0, \end{cases} \tag{3-11}$$

其中 $\boldsymbol{\phi}(t), -\mu \leqslant t \leqslant 0$ 为系统状态变量 $\boldsymbol{x}(t)$ 的初始值。公式 (3-11) 中的系数矩阵的具体形式见公式 (3-12)。

$$\begin{cases} \boldsymbol{A}(t) = \boldsymbol{A} + \Delta\boldsymbol{A}(t), \\ \boldsymbol{A}_d(t) = \boldsymbol{A}_d + \Delta\boldsymbol{A}_d(t), \\ \boldsymbol{B}(t) = \boldsymbol{B} + \Delta\boldsymbol{B}(t). \end{cases} \tag{3-12}$$

本章的研究中假设公式 (3-12) 中的参数不确定性矩阵满足公式 (3-13) 给出的结构。

$$[\Delta\boldsymbol{A}(t) \quad \Delta\boldsymbol{A}_d(t) \quad \Delta\boldsymbol{B}(t)] = \boldsymbol{M}\boldsymbol{F}(t)[\boldsymbol{N}_a \quad \boldsymbol{N}_{ad} \quad \boldsymbol{N}_b], \tag{3-13}$$

其中，$\boldsymbol{M}$，$\boldsymbol{N}_a$，$\boldsymbol{N}_{ad}$ 和 $\boldsymbol{N}_b$ 均为实矩阵，而 $\boldsymbol{F}(t)$ 为任意的矩阵函数，并且满足 $\boldsymbol{F}(t)^\intercal\boldsymbol{F}(t) \leqslant \boldsymbol{I}, t \in \mathbb{R}^+$。值得注意的是，具有类似于公式 (3-13) 中参数不确定性结构的系统模型在电力系统的建模与控制中已有了一些的应用[40]。

3.2.2　直流多微网系统电压稳定性指标

针对公式 (3-11) 中给出的直流多微网系统模型，控制器 $\boldsymbol{u}(t)$ 控制下的多微网系统电压稳定性体现在以下两方面。首先，在多微网系统模型存在建模误差的情况下，控制器 $\boldsymbol{u}(t)$ 仍然能够对实际的多微网系统进行有效的控制，保障多微网系统电压的稳定。其次，在受到来自可再生能源、电力负荷以及能量传输系统等多

种来源的扰动输入干扰的情况下，控制器 $\boldsymbol{u}(t)$ 依然可以有效抑制各个直流微电网母线电压相对于参考电压的波动，满足直流多微网系统的稳定性需求。

根据文献 [100] 针对时域随机系统提出的的鲁棒 $\boldsymbol{H}_\infty$ 性能指标。上面关于多微网系统电压稳定性的数学表述可以分别由定义 3.1 和定义 3.2 给出。

定义 3.1 ([100])：在扰动输入 $\boldsymbol{v}(t) \equiv \boldsymbol{0}$ 的情况下，若对于所有满足公式 (3-13) 的有界参数不确定性矩阵 $\boldsymbol{\Delta A}(t)$，$\boldsymbol{\Delta A}_d(t)$ 和 $\boldsymbol{\Delta B}(t)$，公式 (3-11) 中的直流多微网系统在控制器 $\boldsymbol{u}(t)$ 控制下满足 $\lim\limits_{t\to+\infty} \mathbb{E}\|\boldsymbol{x}(t)\|_2^2 = 0$，则称控制器 $\boldsymbol{u}(t)$ 控制下的直流多微网系统 (3-11) 具有鲁棒稳定性，此处 $\|\boldsymbol{x}(t)\|_2$ 为 $\boldsymbol{x}(t)$ 的 L^2 范数。

定义 3.1 给出了本章研究的直流多微网系统在控制器 $\boldsymbol{u}(t)$ 控制下具有鲁棒稳定性需要满足的必要条件。当该必要条件被满足时，即使公式 (3-11) 存在一定的建模误差，在合适的控制器 $\boldsymbol{u}(t)$ 的控制下该微电网系统仍然能保持稳定。

在系统鲁棒稳定性得到确保的前提下，公式 (3-11) 中扰动输入对直流多微网系统母线电压的影响也需要得到恰当的处理。根据控制理论中鲁棒 $\boldsymbol{H}_\infty$ 稳定性的概念，在扰动输入和模型参数不确定性同时存在的情况下，直流多微网系统 (3-11) 电压稳定性对应的鲁棒 $\boldsymbol{H}_\infty$ 性能指标由定义 3.2 中给出。

定义 3.2 ([100])：给定扰动衰减因数 $\gamma > 0$，如果控制器 $\boldsymbol{u}(t)$ 控制下的直流多微网系统 (3-11) 满足定义 3.1 给出的鲁棒稳定性，同时对于所有非零的扰动输入 $\boldsymbol{v}(t)$，$\|z(t)\|_2 \leqslant \gamma\|\boldsymbol{v}(t)\|_2$ 成立，则控制器 $\boldsymbol{u}(t)$ 实现了对直流多微网系统 (3-11) 的鲁棒 $\boldsymbol{H}_\infty$ 控制，其中 $\|\boldsymbol{f}(t)\|_2 = \left(\mathbb{E}[\int_0^{+\infty} \boldsymbol{f}(t)'\boldsymbol{f}(t)\mathrm{d}t]\right)^{1/2}$ 为向量函数 $\boldsymbol{f}(t)$ 的 L^2 范数，$\mathbb{E}$ 为数学期望算符。

基于定义 3.2给出的直流多微网系统母线电压的鲁棒 $\boldsymbol{H}_\infty$ 性能指标，本章的重点在于为系统 (3-11) 设计恰当的状态反馈增益 $\boldsymbol{K}$，使得对应的状态反馈控制器 $\boldsymbol{u}(t) = \boldsymbol{K}\boldsymbol{x}(t)$ 能够实现对直流微电网母线电压的有效控制。

3.3　直流多微网系统的鲁棒电压控制策略

通过传统的鲁棒 $\boldsymbol{H}_\infty$ 控制技术的应用，在本章的研究中，针对两种典型的直流多微网系统的电压控制需求，两种新型直流多微网母线电压控制策略被提出以满足相关应用场景下的控制需要。

3.3.1　确保鲁棒稳定性的电压控制策略

首先，针对公式 (3-11) 中的直流多微网系统的动态模型，定理 3.1 给出了一类满足定义 3.2给出的直流多微网系统电压鲁棒 $\boldsymbol{H}_\infty$ 性能指标的状态反馈控制器。

定理 3.1 ([100])：对于给定的扰动衰减因数 $\gamma > 0$，如果存在对称正定矩阵 $\boldsymbol{X}$ 和 $\boldsymbol{S}$，一般矩阵 $\boldsymbol{Y}$ 以及正实数 ε，使得公式 (3-14) 中的线性矩阵不等式成立，则控制器 $\boldsymbol{u}(t) = \boldsymbol{Y}\boldsymbol{X}^{-1}\boldsymbol{x}(t)$ 控制下的系统 (3-11) 具有鲁棒稳定性，并满足定义 3.2 给出的鲁棒 $\boldsymbol{H}_\infty$ 性能指标。在公式 (3-14)中，$*$ 表示分块矩阵各元素矩阵对应的转置, 矩阵 $\boldsymbol{\Omega}$ 由公式 (3-15) 中给出。

$$\boldsymbol{\Gamma} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{\Omega} & \boldsymbol{A}_d\boldsymbol{X} & \boldsymbol{D} & \boldsymbol{X}\boldsymbol{N}_a^{\intercal} + \boldsymbol{Y}^{\intercal}\boldsymbol{N}_b^{\intercal} & \boldsymbol{X}\boldsymbol{E}^{\intercal} & \boldsymbol{X}\boldsymbol{C}^{\intercal} \\ * & -(1-h)\boldsymbol{S} & \boldsymbol{0} & \boldsymbol{X}\boldsymbol{N}_{ad}^{\intercal} & \boldsymbol{0} & \boldsymbol{0} \\ * & * & -\gamma^2\boldsymbol{I} & \boldsymbol{0} & \boldsymbol{0} & \boldsymbol{0} \\ * & * & * & -\varepsilon\boldsymbol{I} & \boldsymbol{0} & \boldsymbol{0} \\ * & * & * & * & -\boldsymbol{X} & \boldsymbol{0} \\ * & * & * & * & * & -\varepsilon^{-1}\boldsymbol{I} \end{bmatrix} < 0. \tag{3-14}$$

$$\boldsymbol{\Omega} = \boldsymbol{A}\boldsymbol{X} + \boldsymbol{X}\boldsymbol{A}^{\intercal} + \boldsymbol{B}\boldsymbol{Y} + \boldsymbol{Y}^{\intercal}\boldsymbol{B}^{\intercal} + \varepsilon\boldsymbol{M}\boldsymbol{M}^{\intercal} + \boldsymbol{S}. \tag{3-15}$$

公式 (3-11) 中的直流多微网系统是文献 [100] 中研究的动态系统的一种特殊形式。定理 3.1 可以视为文献 [100] 中提出的鲁棒控制方法的一种应用，因而此处略去其证明。

3.3.2　基于凸优化技术的鲁棒电压控制策略

通常来说，线性矩阵不等式 (3-14) 存在多个可行解。定理 3.1 实际上给出了一类满足实际工程应用中对能源互联网系统鲁棒性和电压稳定性要求的控制策略。虽然这类控制策略都能满足定义 3.2 中要求的电压稳定性，但是这些控制策略带来的控制成本往往有着一定的差别。

在某些能源互联网应用场景中，直流微电网的电压稳定性是首要的控制目标。此时，保证定理 3.1 中矩阵不等式有解的扰动衰减因子 γ 对应的电压控制策略 $\boldsymbol{u}(t)$ 将成为最佳选择。

当多微网系统中可控发电设备输出功率调节能力有限，或者系统运营者对电压控制带来的额外成本较为敏感时，对定理 3.1 给出的鲁棒电压控制器的强度进行限制就显得十分必要。这一限制通常可以体现在对反馈增益 $\boldsymbol{K}$ 范数的约束上。

在定理 3.1 的基础上，本章针对以上两种典型的多微网系统电压控制需求，分别提出了对应的鲁棒 $\boldsymbol{H}_\infty$ 控制器以满足相关控制需求。

首先考虑直流微电网母线电压稳定性的提升作为唯一的控制目标的情况。根据定义 3.2 ，扰动衰减因数 γ 的大小与鲁棒 $\boldsymbol{H}_\infty$ 控制器的电压稳定性能直接相关。

对应于较小的扰动衰减因数 γ，扰动输入和微电网系统内功率的随机波动对直流多微网系统直流母线电压带来的干扰也将被限制在相对更小的范围内。

通过寻找公式 (3-11) 中多微网系统调节能力允许范围内最小的扰动衰减因数 γ 以及与之对应的鲁棒 $\boldsymbol{H}_\infty$ 控制器 $\boldsymbol{u}(t)$，扰动输入 $\boldsymbol{v}(t)$ 对直流母线电压的影响将能够被降到最低，从而满足对应的控制需求。这一目标可以通过对公式 (3-16) 给出的优化问题的求解实现。

$$\begin{aligned} \min \quad & \gamma^2, \\ s.t. \quad & \boldsymbol{\Gamma} < 0. \end{aligned} \tag{3-16}$$

记优化问题 (3-16) 的解为 $(\boldsymbol{X}_0, \boldsymbol{Y}_0, \boldsymbol{S}_0, \varepsilon_0, \gamma_0)$，对应于最优的扰动衰减因数 γ_0 的鲁棒 $\boldsymbol{H}_\infty$ 控制器可以表示为 $\boldsymbol{u}^0(t) = \boldsymbol{Y}_0\boldsymbol{X}_0^{-1}\boldsymbol{x}(t)$。显然，$\boldsymbol{u}^0(t)$（以下简称 $\boldsymbol{u}^0$）是定理 3.1 能给出的具有最优电压稳定性能的鲁棒控制器。

另一方面，在直流多微网系统中，更好的电压稳定性往往意味着对微型燃气轮机等可控发电设备更加频繁的调节以及对微电网间功率流传输的大幅度调整。这往往会增加多微网系统的控制成本，并可能给微型燃气轮机等可控发电设备的使用寿命带来潜在的影响。对于本章考虑的直流多微网系统来说，这类控制成本可以通过控制器反馈增益 $\boldsymbol{K}$ 的强度得到体现。

下面讨论如何对控制器反馈增益 $\boldsymbol{K}$ 的强度进行限制。对于定理 3.1 中形如 $\boldsymbol{u}(t) = \boldsymbol{Y}\boldsymbol{X}^{-1}\boldsymbol{x}(t)$ 的控制器，反馈增益 $\boldsymbol{K} = \boldsymbol{Y}\boldsymbol{X}^{-1}$，并且满足 $\|\boldsymbol{K}\|_2 \leqslant \|\boldsymbol{Y}\|_2\|\boldsymbol{X}^{-1}\|_2$。假设存在对称半正定矩阵 $\boldsymbol{Q}$ 使得

$$\begin{bmatrix} \boldsymbol{Q} & \boldsymbol{I} \\ \boldsymbol{I} & \boldsymbol{X} \end{bmatrix} \geqslant 0, \tag{3-17}$$

成立，当 $\boldsymbol{X}^{-1}$ 存在时，根据 Schur 补引理[101]，有 $\boldsymbol{X}^{-1} - \boldsymbol{Q} \leqslant 0$，从而 $\|\boldsymbol{X}^{-1}\|_2 \leqslant \|\boldsymbol{Q}\|_2$。由此可以得到一个关于反馈增益 $\boldsymbol{K} = \boldsymbol{Y}\boldsymbol{X}^{-1}$ 的矩阵 2-范数的上界

$$\|\boldsymbol{K}\|_2 \leqslant \|\boldsymbol{Y}\|_2\|\boldsymbol{X}^{-1}\|_2 \leqslant \frac{1}{2}(\|\boldsymbol{Y}\|_2^2 + \|\boldsymbol{Q}\|_2^2). \tag{3-18}$$

对于状态反馈控制器 $\boldsymbol{u}(t) = \boldsymbol{K}\boldsymbol{x}(t)$，根据矩阵 2-范数的性质，有

$$\|\boldsymbol{u}(t)\|_2 \leqslant \|\boldsymbol{K}\|_2\|\boldsymbol{x}(t)\|_2. \tag{3-19}$$

因此，通过最小化公式 (3-18) 给出的反馈增益 $\boldsymbol{K}$ 的矩阵 2-范数上界，控制器 $\boldsymbol{u}(t) = \boldsymbol{K}\boldsymbol{x}(t)$ 对应的控制成本也可以得到适当的限制。对应的优化问题如公式 (3-20) 所

示。

$$\begin{aligned} \min \quad & \eta\gamma^2 + \|\boldsymbol{Y}\|_2^2 + \|\boldsymbol{Q}\|_2^2, \\ s.t. \quad & \boldsymbol{\Gamma} < 0, \\ & \begin{bmatrix} \boldsymbol{Q} & \boldsymbol{I} \\ \boldsymbol{I} & \boldsymbol{X} \end{bmatrix} \geqslant 0, \end{aligned} \tag{3-20}$$

其中，权重系数 $\eta \geqslant 0$。通过调节权重系数 η 的大小，可以实现直流多微网系统母线电压稳定性能和控制成本之间的均衡，从而满足不同能源互联网应用场景的电压控制需求。方便起见，在本章的后续讨论中，将公式 (3-20) 中优化问题的解对应的鲁棒 H_∞ 控制器记为 $\boldsymbol{u}^1(t)$（以下简称 $\boldsymbol{u}^1$）。

3.4　数值算例

本节通过对直流多微网系统 (3-11) 的数值仿真对 3.3 节中提出的鲁棒 H_∞ 控制策略 $\boldsymbol{u}^0$ 和 $\boldsymbol{u}^1$ 的可行性与电压控制性能进行验证和分析。

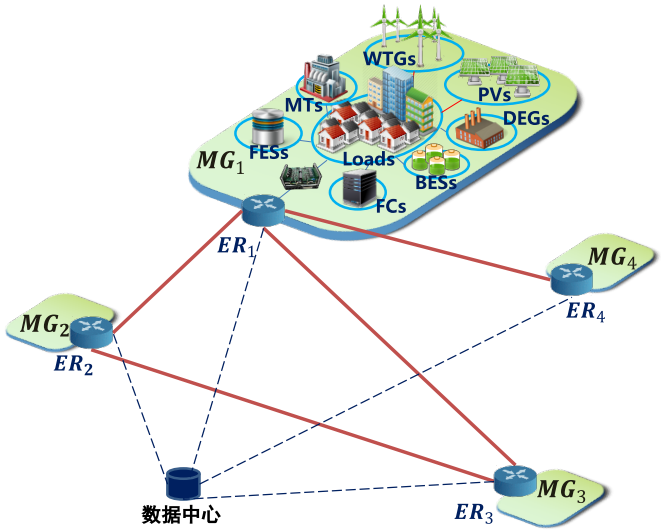


图 3.2　四个直流微电网组成的直流多微网系统

本节的数值仿真中考虑的多微网系统如图 3.2 所示。该多微网系统包含四个直流微电网 MG_1，MG_2，MG_3 和 MG_4，并且独立于主干电网自主运行。这些微电网间的电力传输通过四个能量路由器 ER_1，ER_2，ER_3 和 ER_4 实现。这些能量路由器对应的连接关系见图 3.2。用于数值仿真的多微网系统模型参数根据文献

[12,40,90] 中给出的微电网系统模型参数生成，这些参数的典型值见表 3.1 。

表 3.1　数值仿真中模型参数典型值和权重系数设置

参数	典型值	参数	典型值	参数	典型值
T_{PV}	1.9 (s)	T_{WTG}	1.8 (s)	T_{Load}	1.6 (s)
e_{PV}	0.52	e_{WTG}	0.4	e_{Load}	0.6
T_{MT}	0.3 (s)	T_{DG}	0.4 (s)	T_{FC}	0.5 (s)
T_{BES}	0.1 (s)	T_{FES}	0.14 (s)	T_V	1.2 (s)
T_{ER}	0.3 (s)	a_{dER}	0.05	η	10000

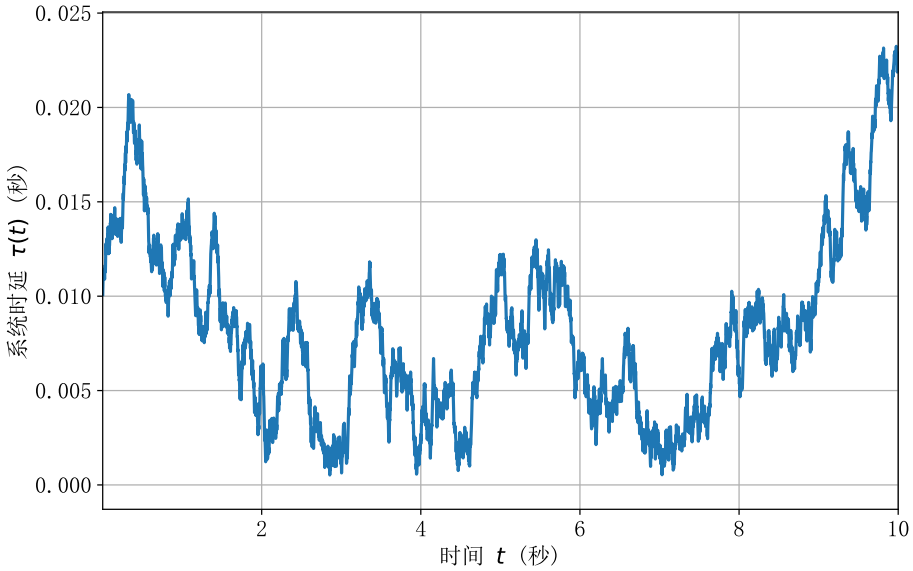


图 3.3　功率流控制系统的时延函数 $\tau(t)$

在数值仿真过程中，数值仿真的时间长度设置为 $t \in [0, 10]$（单位为秒），公式 (3-6) 中能量路由器能量传输系统时延 $\tau(t)$ 对应的参数 h 被设定为 0.3。根据对多微网系统 (3-11) 时延特性的假设，数值仿真中用到的系统时延函数 $\tau(t)$ 的变化曲线如图 3.3 所示。模型 (3-11) 的参数不确定性矩阵满足 $\|\boldsymbol{\Delta A}(t)\|_\infty \leqslant 0.05$，$\|\boldsymbol{\Delta A}_d(t)\|_\infty \leqslant 0.05$ 和 $\|\boldsymbol{\Delta B}(t)\|_\infty \leqslant 0.05$，此处 $\|\cdot\|_\infty$ 表示矩阵的无穷范数。对应的参数不确定性因子 $F(t)$ 的变化曲线如图 3.4 所示。

根据上述直流多微网系统模型参数，3.3 节中提出的两种电压控制策略可以通过 MATLAB 的凸优化工具包 CVX[102] 求解得到。这两种电压控制策略的关键性能指标如表 3.2 所示。

根据表 3.2 可知，控制器 $\boldsymbol{u}^0$ 能够满足扰动衰减因数 $\gamma = 0.0248$ 所要求的鲁棒 $\boldsymbol{H}_\infty$ 稳定性。相比于控制器 $\boldsymbol{u}^1$ 显然能够实现更好的微电网直流母线电压稳定性。但是控制器 $\boldsymbol{u}^0$ 对应的控制成本则非常高昂。根据表 3.2 ，控制器 $\boldsymbol{u}^0$ 的状态反馈增

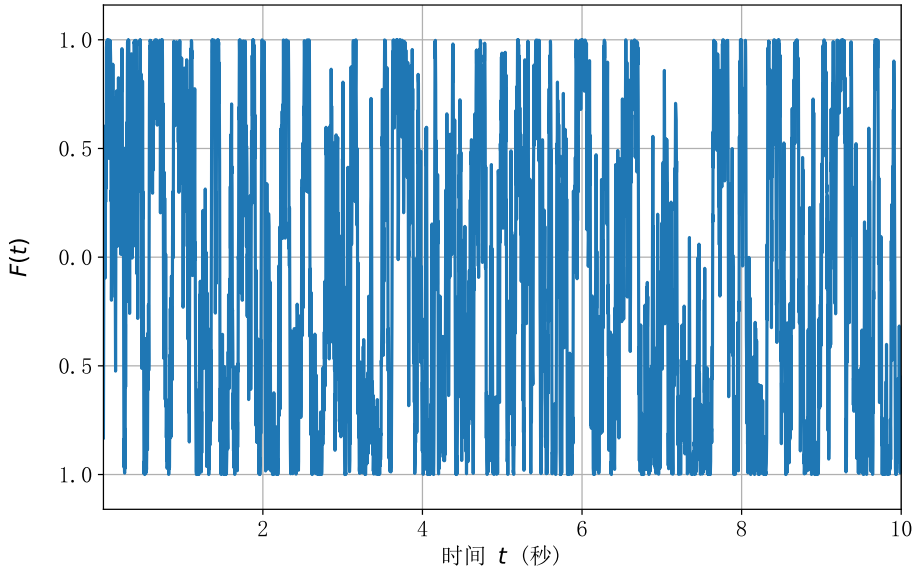


图 3.4　多微网系统模型参数不确定性因子 $F(t)$

表 3.2　鲁棒 H_∞ 电压控制策略的关键性能指标比较

性能指标	$\boldsymbol{u}^0$	$\boldsymbol{u}^1$
γ	0.0248	0.133168
ε	161.074566	4.940192
$\|\boldsymbol{K}\|_2$	1743.919809	27.047299

益矩阵的矩阵 2-范数高达 $\|\boldsymbol{K}\|_2 = 1743.919809$。相反，同时考虑到电压稳定性和对应的控制成本的控制器 $\boldsymbol{u}^1$ 在保持相对优秀的电压稳定性能（$\gamma = 0.133168$）的同时，还能够有效地将状态反馈增益控制在较小的水平（$\|\boldsymbol{K}\|_2 = 27.047299$）。因此，在大多数实际的应用场景下，控制器 $\boldsymbol{u}^1$ 往往是更好的选择。

下面结合具体的数值仿真结果对表 3.2 给出的性能指标进行验证。首先，图 3.5 展示了直流微电网 MG_1 系统内部光伏和风力发电设备输出功率和电力负荷功率相对于各自参考值的波动曲线。显然，公式 (3-1) 中提出的动态模型可以有效表达可再生能源以及电力负荷功率动态变化过程中存在的随机性。

对应于本节考虑的直流多微网系统，图 3.6 给出了不同的控制策略设置下，图 3.2 中的四个直流多微网系统母线电压相对于基准电压值的波动情况。其中，绿色虚线对应于四个微电网单纯依靠电池和飞轮储能进行电压下垂调节时的各个微电网的母线电压波动情况。3.3 节中提出的两种鲁棒 H_∞ 控制器 $\boldsymbol{u}^0$ 和 $\boldsymbol{u}^1$ 对应的电压波动情况分别对应于图中的蓝色实线和橙色点划线。

对比图 3.6 中的电压波动曲线可知，直流微电网系统内安装的电池和飞轮储能设备可以通过电压下垂控制的方式在一定程度上保障其直流母线电压的稳定。但是，当微电网系统内的可再生能源发电功率和负荷功率出现较大的变化时，其直

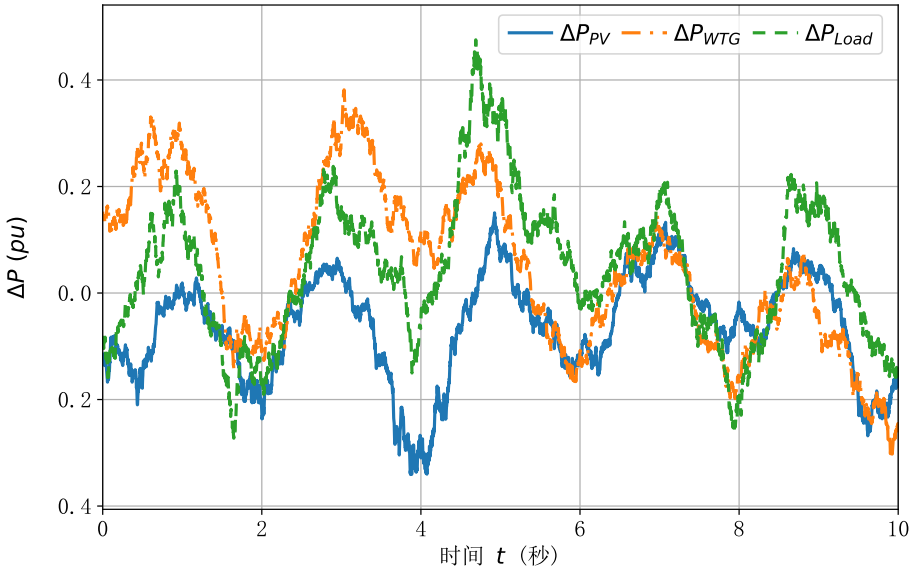


图 3.5　直流微电网 MG_1 中光伏、风力发电功率和电力负荷功率波动曲线

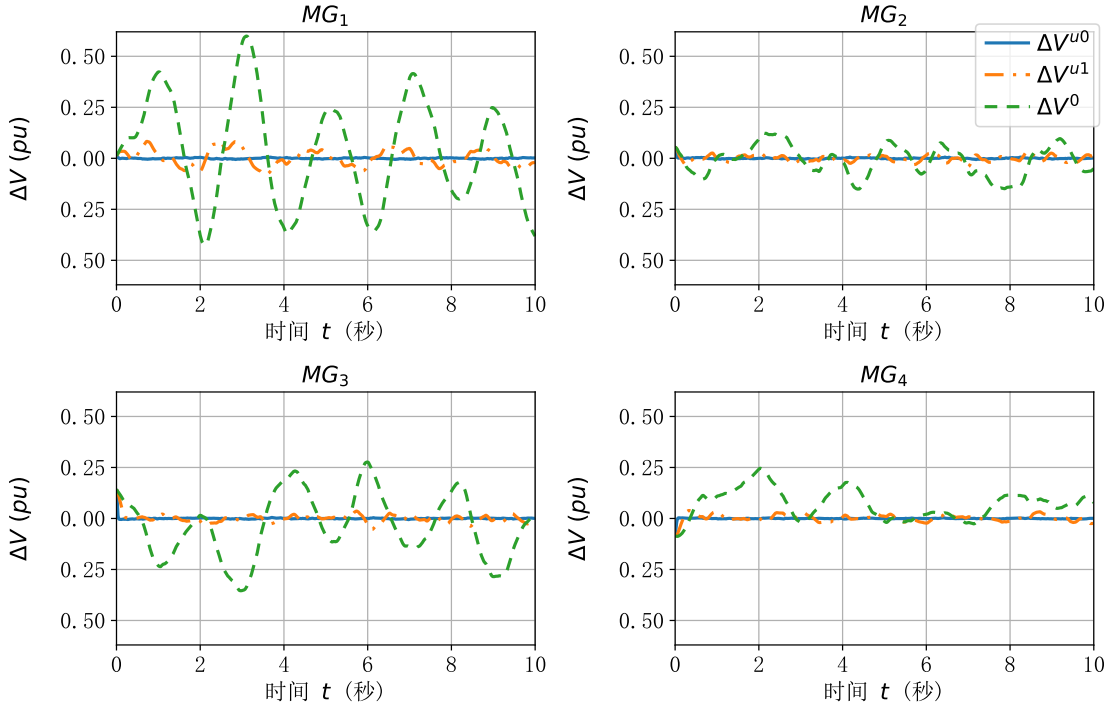


图 3.6　四个直流微电网系统中母线电压波动曲线

流母线电压可能发生大幅度的波动。而控制器 $\boldsymbol{u}^0$ 和 $\boldsymbol{u}^1$ 则能够通过对微型燃气轮机等可控发电设备发电功率和多微网间能量流传输的主动调整实现对各微电网直流母线电压的有效控制。同时，图 3.6 中电压波动曲线也表明，具有更小的扰动衰减因数 γ 的控制器 $\boldsymbol{u}^0$ 确实能够实现比控制器 $\boldsymbol{u}^1$ 更加卓越的电压稳定性能。

与图 3.6 中三种电压波动曲线对应的三种控制策略的电压控制效果在图 3.7 得到了进一步的比较。相关的电压控制效果具体体现为受控输出 $\boldsymbol{z}^0$，$\boldsymbol{z}^{u0}$ 和 $\boldsymbol{z}^{u1}$ 的模

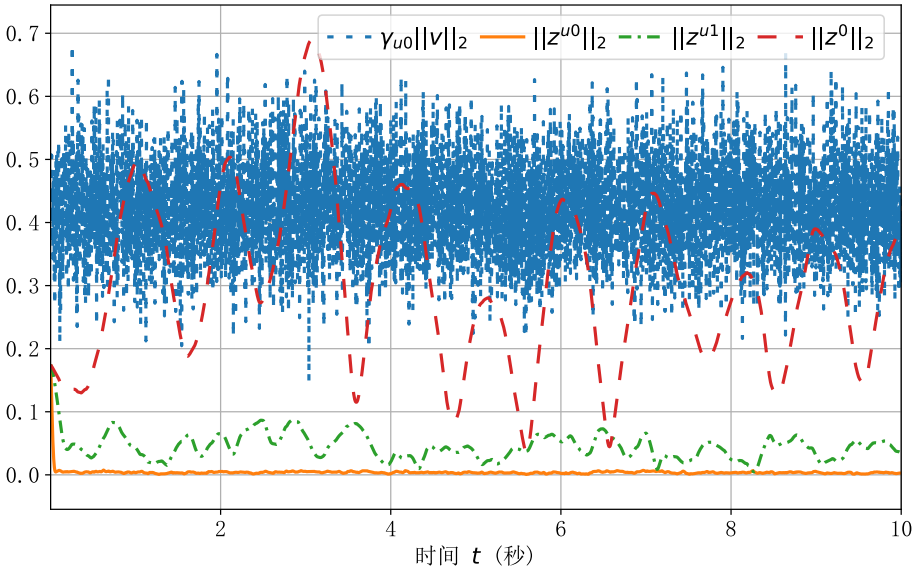


图 3.7　H_∞ 指标上界 $\gamma_{u0}\|\boldsymbol{v}\|_2$ 与受控输出 z 的范数大小对比

长曲线。根据控制器 $\boldsymbol{u}^0$ 对应的扰动衰减因数 $\gamma_{u0}=0.0248$ 和直流多微网系统扰动输入 $\boldsymbol{v}(t)$，图 3.7 中给出了受控输出 $\boldsymbol{z}^{u0}$ 模长的参考上界 $\gamma_{u0}\|\boldsymbol{v}\|_2$。控制器 $\boldsymbol{u}^0$ 控制下的系统 (3-11) 显然满足定义 3.2 中的 $\boldsymbol{H}_\infty$ 稳定性条件。值得注意的是，虽然控制器 $\boldsymbol{u}^1$ 控制下的受控输出 $\boldsymbol{z}^{u1}$ 的稳定性无法与 $\boldsymbol{z}^{u0}$ 控制下的受控输出 $\boldsymbol{z}^{u1}$ 的稳定性媲美，其控制效果实际上完全能够满足扰动衰减因数 γ_{u0} 要求的 $\boldsymbol{H}_\infty$ 性能。

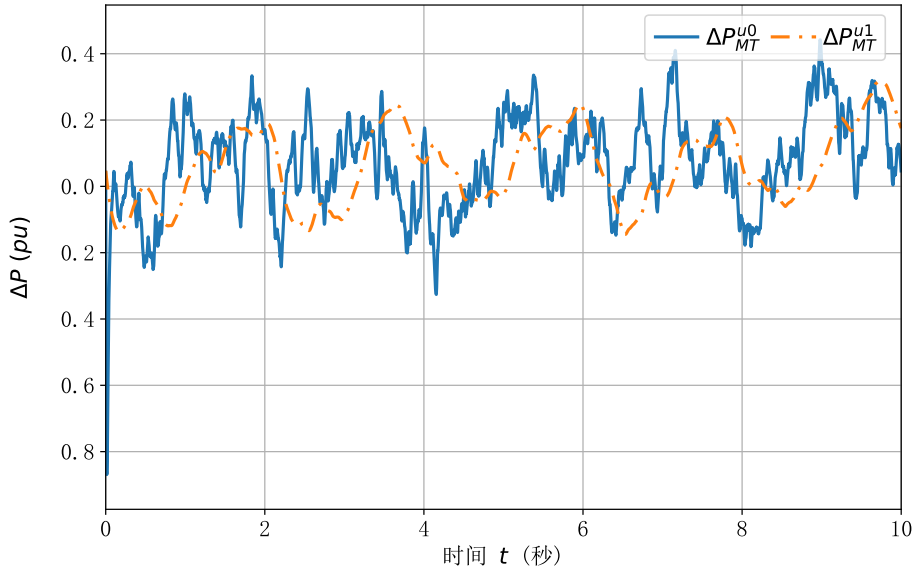


图 3.8　控制器 u^0 与 u^1 控制下的微型燃气轮机发电功率调节曲线

对应于表 3.2 中对反馈增益矩阵 $\boldsymbol{K}$ 范数大小的比较，图 3.8 具体展示了在控制器 $\boldsymbol{u}^0$ 和控制器 $\boldsymbol{u}^1$ 控制下直流微电网 $\boldsymbol{MG}_1$ 中微型燃气轮机的受控功率输出的变化情况。可以看到，控制器 $\boldsymbol{u}^0$ 优秀的电压稳定性能源自其对受控发电设备输出功

率频繁而大幅度的调整。这不仅对微型燃气轮机等发电机的调节能力提出了极高的要求，而且可能对其使用寿命带来潜在的影响。相比之下，控制器 $\boldsymbol{u}^1$ 对微型燃气轮机输出功率的调整要更加合理。参考图 3.7 中的性能的比较结果，控制器 $\boldsymbol{u}^1$ 显然更加符合通常情况下能源互联网系统的应用需求。

3.5　本章小结

在本章的研究中，随机微分方程被用于对直流多微网系统功率和电压动态模型的构建。在实际能源互联网应用场景中广泛存在的时延因素和系统近似带来的建模误差在上述模型中也得到了一定的考虑。对应的多微网系统的电压控制问题被建模为一类鲁棒 $\boldsymbol{H}_\infty$ 控制问题，并通过随机控制理论得到了解决。此外，本章针对两种典型的多微网系统电压控制需求，提出了两种鲁棒 $\boldsymbol{H}_\infty$ 控制策略，并通过数值算例对这两种控制器的电压稳定性能进行了分析和验证。

值得注意的是，随着多微网系统规模的增长，本章提出的直流微电网系统动态模型的维数也将随之增加，本章提出的鲁棒控制器求解方法中涉及的线性矩阵不等式的规模也将成倍增长。这给对应鲁棒控制器的求解带来了较大的挑战。在未来的相关研究中，分布式优化算法和机器学习技术的应用将成为解决这一问题的关键。

第 4 章　风险敏感的交流多微网系统频率控制

本章的研究主要针对工作在离网模式的交流多微网系统的母线频率控制问题开展。对于交流微电网系统，其交流母线频率的波动主要来源于其电力生产与实际电力负荷之间的偏差。这一功率偏差往往有多重的来源。首先，随着气温、风力等环境因素的变化，微电网系统内安装的光伏发电和风力发电设备的输出功率也将受到影响[103]。同时，用户多变的用电行为模式也会导致微电网系统内部电力负荷的随机波动[52]。当微电网内的能量存储设备的充电状态过高或过低时，为了保持足够的动态响应能力，储能设备也将根据其能量管理策略进行充电和放电操作。这也会给微电网内的功率平衡带来一定的影响[42]。

近年来，微电网系统的稳定性问题受到了相关领域研究人员的广泛关注。在文献 [24] 中，基于粒子群优化算法的频率控制方法被用于实现微电网系统的母线频率控制。在文献 [40] 中，一种非线性的随机微分方程被用于孤岛微电网的动态模型建模。基于该随机动态模型，文献 [40] 提出了一种 H_∞ 控制方法以提升微电网系统直流母线电压的稳定性。关于交流母线的频率控制问题，文献 [12] 对 H_∞ 控制方法和 μ 综合控制方法在交流微电网场景下的性能表现进行了详细的分析与比较。文献 [10] 则提出了一种混合 H_2/H_∞ 方法以实现微电网系统频率稳定性要求和电池设备保护之间的纳什均衡。值得注意的是，上述方法都存在一定的不足之处。例如，文献 [62] 和文献 [12] 均采用频域方法对微电网系统的动态特性进行研究，这使得它们无法充分地将微电网系统中广泛存在的随机性纳入考虑。文献 [10] 虽然使用了时域模型对微电网系统的功率动态进行建模，但是其中采用的常微分方程组模型同样忽略了微电网系统的随机性。文献 [40] 采用的 H_∞ 控制方法考虑到了微电网系统的随机性，但是该方法没有充分地考虑微电网系统调节能力的限制。因此，在实际的应用中，文献 [40] 中提出的 H_∞ 控制方法可能给出超出微电网系统调节能力的控制策略。

为了解决上述方法存在的缺点，本章针对典型的交流多微网系统交流母线频率控制问题，提出了一种新型的交流母线频率控制方法。该方法既考虑到了微电网系统中来自光伏和风力发电等可再生能源的随机功率波动，同时也可以在微电网母线频率控制性能和控制成本之间实现平衡。

本章节的内容安排如下，第 4.1 节介绍了典型的交流多微网的系统结构，并对其中的微电网和能量路由器的动态模型进行了介绍。第 4.2 节首先通过随机微分方程组对典型的交流多微网系统进行了建模，并根据该多微网系统模型提出了基

于风险敏感控制的频率控制方法。第 4.3 节通过数值算例对本章提出的交流多微网系统频率控制方法的控制效果进行了验证。最后，第 2.5 节对本章的主要研究内容进行了总结。

4.1　微电网系统和能量路由器的动态模型

本章就图 4.1 所示的典型交流多微网系统开展研究。在该多微网系统中，光伏和风力发电等可再生能源被作为多微网系统的主要电力来源使用。可控发电设备，如微型燃气轮机和燃料电池等则主要作为可再生能源的补充，为多微网系统提供一定的调节能力。同时，部署在交流微电网之间的能量路由器则为该多微网系统提供了灵活的能量共享功能。值得注意的是，该多微网系统工作在离网模式，为实现其内部电力需求与供给之间的平衡，该多微网系统必须要通过合理的微电网系统控制算法和能量路由策略以保证其内部各种电力服务的正常运转。不失一般性，此处假设图 4.1 中每个微电网均包含光伏发电机，风力发电机，微型燃气轮机，燃料电池，电池储能和用户电力负荷等设备。

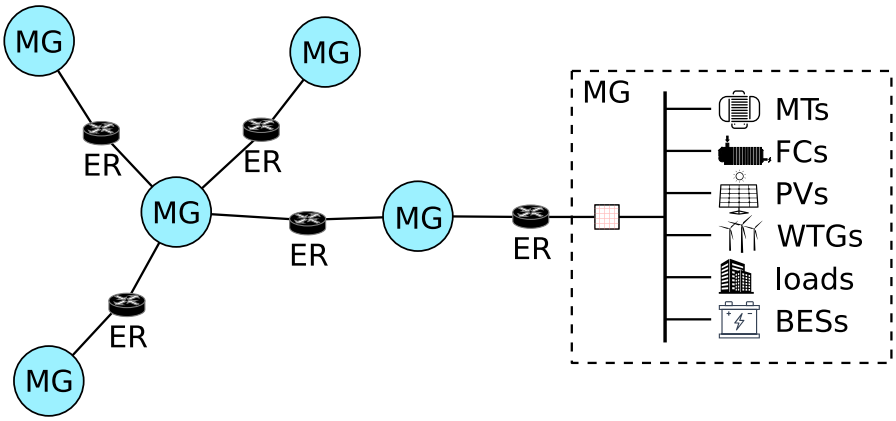


图 4.1　典型交流多微网系统结构示意图

参照文献 [12] 中的设定，电池储能设备主要用于抑制交流微电网内母线频率的波动，并且设置有对母线频率的下垂控制机制。因此，本章的研究主要基于微型燃气轮机，燃料电池和能量路由器设计对应的频率控制策略。

参考图 4.1 中所示的典型交流多微网系统的组织架构，考虑包含 n 个交流微电网的多微网系统。在短时间内，第 i 个交流微电网内部电力设备的功率波动及其母

线的频率动态变化可以由公式 (4-1) 中给出的微分方程组近似描述。

$$\begin{cases} \mathrm{d}\Delta P_{Load_i} = -r_{Load_i}\Delta P_{Load_i}\mathrm{d}t + s_{Load_i}\mathrm{d}w_{Load_i}(t), \\ \mathrm{d}\Delta P_{PV_i} = -r_{PV_i}\Delta P_{PV_i}\mathrm{d}t + s_{PV_i}\mathrm{d}w_{PV_i}(t), \\ \mathrm{d}\Delta P_{WTG_i} = -r_{WTG_i}\Delta P_{WTG_i}\mathrm{d}t + s_{WTG_i}\mathrm{d}w_{WTG_i}(t), \\ \Delta\dot{P}_{MT_i} = -\dfrac{1}{T_{MT_i}}\Delta P_{MT_i} + \dfrac{1}{T_{MT_i}}u_{MT_i}, \\ \Delta\dot{P}_{FC_i} = -\dfrac{1}{T_{FC_i}}\Delta P_{FC_i} + \dfrac{1}{T_{FC_i}}u_{FC_i}, \\ \Delta\dot{P}_{BES_i} = -\dfrac{1}{T_{BES_i}}\Delta P_{BES_i} + \dfrac{1}{T_{BES_i}}\Delta f_i, \\ \Delta\dot{f}_i = -\dfrac{2D_i}{M_i}\Delta f_i + \dfrac{2}{M_i}\Delta P_i, \end{cases} \tag{4-1}$$

其中，$w_{Load_i}(t)$，$w_{PV_i}(t)$ 和 $w_{WTG_i}(t)$ 均为一维标准 Wiener 过程，用于对光伏发电机，风力发电机和电力负荷的短期随机功率波动进行建模，u_{MT_i} 和 u_{FC_i} 分别为设置在第 i 个微电网内微型燃气轮机和燃料电池中的控制器。公式 (4-1) 中的参数可以通过参数估计方法从实际微电网的运行数据中得到[104-105]。类似的微电网系统动态模型在关于能源互联网系统的研究中有着广泛的应用[10,12,40,42,52]。

类似地，对于处于第 i 个微电网和第 j 个微电网之间的能量路由器 $ER_{i,j}$，其受控功率流传输的动态模型可以由公式 (4-2) 中的线性微分方程表示。

$$\Delta\dot{P}_{ER_{i,j}} = -\frac{1}{T_{ER_{i,j}}}\Delta P_{ER_{i,j}} + \frac{1}{T_{ER_{i,j}}}u_{ER_{i,j}}, \tag{4-2}$$

其中，$u_{ER_{i,j}}$ 为设置在能量路由器 $ER_{i,j}$ 上的控制器。由于 $\Delta P_{ER_{i,j}}$ 和 $\Delta P_{ER_{j,i}}$ 实际上对应于同一个能量路由器，在本章中仅使用 $\Delta P_{ER_{i,j}}, (i > j)$ 描述能量路由器 $ER_{i,j}$ 的受控功率流动态模型。当需要知道 $\Delta P_{ER_{j,i}}, (j > i)$ 的值时，只需要简单地计算 $\Delta P_{ER_{i,j}}$ 的相反数即可。

另外，公式 (4-1) 中的 ΔP_i 表示第 i 个微电网内部能量供给与需求间的功率偏差，并且可以按照公式 (4-3) 进行计算。

$$\Delta P_i = -\Delta P_{Load_i} + \Delta P_{PV_i} + \Delta P_{WTG_i} + \Delta P_{MT_i} + \Delta P_{FC_i} + \Delta P_{BES_i} - \Delta P_{ER_{i,j}}. \tag{4-3}$$

4.2　风险敏感的多微网系统频率控制技术

本节中，交流多微网系统的频率控制问题被建模为一种风险敏感的随机最优控制问题，并通过最优控制理论得到求解。

4.2.1　多微网系统动态模型

对于本章研究的交流多微网系统母线频率控制问题，需要关注的变量主要包括可再生能源发电设备，可控发电设备，储能设备和能量路由器的功率以及交流微电网母线频率相对于参考值的变化量。此处使用向量 $\boldsymbol{x}(t)$ 表示这些系统状态在 t 时刻的值，即

$$\boldsymbol{x}(t)=[\boldsymbol{x}_{Load}^{\intercal},\boldsymbol{x}_{PV}^{\intercal},\boldsymbol{x}_{WTG}^{\intercal},\boldsymbol{x}_{MT}^{\intercal},\boldsymbol{x}_{FC}^{\intercal},\boldsymbol{x}_{BES}^{\intercal},\boldsymbol{x}_{ER}^{\intercal},\boldsymbol{x}_{f}^{\intercal}]^{\intercal}, \tag{4-4}$$

其中，

$$\begin{cases}\boldsymbol{x}_{Load}=[\Delta P_{Load_1},\cdots,\Delta P_{Load_i},\cdots,\Delta P_{Load_n}]^{\intercal},\\ \boldsymbol{x}_{PV}=[\Delta P_{PV_1},\cdots,\Delta P_{PV_i},\cdots,\Delta P_{PV_n}]^{\intercal},\\ \boldsymbol{x}_{WTG}=[\Delta P_{WTG_1},\cdots,\Delta P_{WTG_i},\cdots,\Delta P_{WTG_n}]^{\intercal},\\ \boldsymbol{x}_{MT}=[\Delta P_{MT_1},\cdots,\Delta P_{MT_i},\cdots,\Delta P_{MT_n}]^{\intercal},\\ \boldsymbol{x}_{FC}=[\Delta P_{FC_1},\cdots,\Delta P_{FC_i},\cdots,\Delta P_{FC_n}]^{\intercal},\\ \boldsymbol{x}_{BES}=[\Delta P_{BES_1},\cdots,\Delta P_{BES_i},\cdots,\Delta P_{BES_n}]^{\intercal},\\ \boldsymbol{x}_{f}=[\Delta f_1,\cdots,\Delta f_i,\cdots,\Delta f_n]^{\intercal},\\ \boldsymbol{x}_{ER}=[\Delta P_{ER_{2,1}},\cdots,\Delta P_{ER_{i,j}},\cdots,\Delta P_{ER_{n,n-1}}]^{\intercal},i>j,i,j=1,2,\cdots,n.\end{cases} \tag{4-5}$$

类似地，记设置在微型燃气轮机，燃料电池和能量路由器上的控制器为 $\boldsymbol{u}(t)$，有

$$\boldsymbol{u}=[\boldsymbol{u}_{MT}^{\intercal},\boldsymbol{u}_{FC}^{\intercal},\boldsymbol{u}_{ER}^{\intercal}]^{\intercal}, \tag{4-6}$$

其中，

$$\begin{cases}\boldsymbol{u}_{MT}=[u_{MT_1},\cdots,u_{MT_i},\cdots,u_{MT_n}]^{\intercal},\\ \boldsymbol{u}_{FC}=[u_{FC_1},\cdots,u_{FC_i},\cdots,u_{FC_n}]^{\intercal},\\ \boldsymbol{u}_{ER}=[u_{ER_{2,1}},\cdots,u_{ER_{i,j}},\cdots,u_{ER_{n,n-1}}]^{\intercal},i>j,i,j=1,2,\cdots,n.\end{cases} \tag{4-7}$$

基于公式 (4-4) 和公式 (4-6) 给出的系统状态变量 $\boldsymbol{x}(t)$ 和控制器 $\boldsymbol{u}(t)$，由公式 (4-1) 至公式 (4-3) 描述的交流多微网动态模型可以被改写为公式 (4-8) 给出的一般形式。

$$\begin{cases}\mathrm{d}\boldsymbol{x}(t)=\boldsymbol{A}\boldsymbol{x}(t)+\boldsymbol{B}(t)\boldsymbol{u}(t)+\boldsymbol{C}\mathrm{d}\boldsymbol{w}(t),\\ \boldsymbol{x}(t_0)=\boldsymbol{x}_0,\end{cases} \tag{4-8}$$

其中，$\boldsymbol{w}(t)$ 为多维 Wiener 过程，$\boldsymbol{x}_0$ 为系统状态变量在 t_0 时刻的初始值。系数矩阵 $\boldsymbol{A}$，$\boldsymbol{B}$ 和 $\boldsymbol{C}$ 可以对比公式 (4-1) – 公式 (4-3) 得到。由于这些系数矩阵的维度较大，此处不对其具体形式进行赘述。

至此，本章考虑的交流多微网系统的短期动态通过公式 (4-8) 中的随机微分方程组得到建模。下面将根据本章所考虑的交流多微网系统的能量管理目标，提出相应的目标函数的具体数学形式。

4.2.2　多微网系统的风险敏感控制问题

本章的研究旨在在交流多微网系统中实现两个主要的控制目标。其一为确保每个交流微电网的交流母线频率得到有效的控制，避免过大的频率波动。其二为减小相关的控制成本，避免对可控发电设备输出功率频繁而大幅度的调节，提升相关控制方法的实际应用价值。

针对公式 (4-8) 中的交流多微网系统，其系统整体在 $[t_0, \boldsymbol{T}]$ 时间段内的控制目标可表示为公式 (4-9) 中给出的目标函数。

$$\begin{aligned}\boldsymbol{J}(t_0, \boldsymbol{x}(t_0), \boldsymbol{u}(t)) = \mathbb{E}_{\boldsymbol{x},t}\Big\{ \exp\Big[\theta \int_{t_0}^{T} [\sum_{i=1}^{n} q\Delta f_i(t)^2 + r\boldsymbol{u}(t)^{\intercal}\boldsymbol{u}(t)]\mathrm{d}t \\ +\theta\big[\sum_{i=1}^{n} \Delta f_i(\boldsymbol{T})^2\big]\big]\Big\},\end{aligned} \tag{4-9}$$

其中 $\mathbb{E}$ 为数学期望算符，θ 为风险敏感因数，标量 q 和 r 为权重系数。

公式 (4-9) 中的目标函数可以被改写为更加一般的形式，如公式 (4-10) 所示。

$$\begin{aligned}\boldsymbol{J}(t_0, \boldsymbol{x}(t_0), \boldsymbol{u}(t)) = \mathbb{E}_{\boldsymbol{x},t}\Big\{ \exp\Big[\theta \int_{t_0}^{T} [\boldsymbol{x}(t)^{\intercal}\boldsymbol{Q}\boldsymbol{x}(t) + \boldsymbol{u}(t)^{\intercal}\boldsymbol{R}\boldsymbol{u}(t)]\mathrm{d}t \\ +\theta\boldsymbol{x}(\boldsymbol{T})^{\intercal}\boldsymbol{S}\boldsymbol{x}(\boldsymbol{T})\big]\Big\},\end{aligned} \tag{4-10}$$

其中 $\mathbb{E}$ 为数学期望算子，θ 为风险敏感因数，参数矩阵 $\boldsymbol{S}$，$\boldsymbol{Q}$ 和 $\boldsymbol{R}$ 可以直接对比公式 (4-9) 中目标函数的具体形式得到。下面将分别讨论这一目标函数中不同部分的实际含义。

首先，在本章的研究中，对交流多微网系统交流母线频率的控制是通过最小化 $[t_0, \boldsymbol{T}]$ 时间段内的累计频率波动量以及结束时刻 $\boldsymbol{T}$ 的频率波动幅度实现的。对应于公式 (4-10)，对结束时刻 $\boldsymbol{T}$ 交流母线频率波动的抑制体现为末端成本 $\boldsymbol{x}(\boldsymbol{T})^{\intercal}\boldsymbol{S}\boldsymbol{x}(\boldsymbol{T})$。为了确保所有微电网的交流母线频率在 $[t_0, \boldsymbol{T}]$ 时间段内都得到有效的控制，在这

一时间段内的累计频率波动量 $\int_{t_0}^{T} \boldsymbol{x}(t)^{\intercal}\boldsymbol{Q}\boldsymbol{x}(t)\mathrm{d}t$ 也在公式 (4-10) 给出的优化目标中得到了体现。

另一方面，微电网交流母线频率稳定性的提升通常依赖于对微型燃气轮机等可控发电设备发电功率频繁的调节。然而，对发电设备密集而大幅度的调节也可能带来额外的控制成本。例如，发电机需要消耗更多的燃料以实现控制器要求的输出功率，满足相关控制需求的发电设备具有更高的成本等等[62]。同时，当发电机无法实现控制器要求的输出功率时，微电网系统可能因功率供给与需求的失衡而发生局部故障。此外，按照能源互联网系统自底向上的能源管理原则[42]，通过能量路由器传输的功率流也应当保持一定的稳定性，不应当对其进行过大幅度的调整。因此，有必要对控制器 $\boldsymbol{u}(t)$ 给出的控制信号的幅度施加一定的限制。在公式 (4-10) 中，这一限制具体体现为控制成本 $\int_{t_0}^{T} \boldsymbol{u}(t)^{\intercal}\boldsymbol{R}\boldsymbol{u}(t)\mathrm{d}t$.

根据公式 (4-8) 给出的交流多微网动态模型和公式 (4-10) 中定义的目标函数，本章所考虑的多微网系统频率控制问题可以建模为公式 (4-11) 中的随机最优控制问题。

$$\begin{aligned} \min_{\boldsymbol{u}(t)\in\mathbb{U}} \quad & \boldsymbol{J}(t_0, \boldsymbol{x}(t_0), \boldsymbol{u}(t)), \\ s.t. \quad & \begin{cases} \mathrm{d}\boldsymbol{x}(t) = \boldsymbol{A}\boldsymbol{x}(t) + \boldsymbol{B}(t)u(t) + \boldsymbol{C}\mathrm{d}w(t), \\ \boldsymbol{x}(t_0) = \boldsymbol{x}_0, \end{cases} \end{aligned} \tag{4-11}$$

其中 $\mathbb{U}$ 为所有可行的控制器 $\boldsymbol{u}(t)$ 的集合。

不同于通常的线性二次最优控制问题[106] 中的优化目标，公式 (4-10) 中目标函数具有指数形式。当控制器性能发生微小的变化时，相应的影响将被指数式地放大。具体来说，交流微电网母线频率的微小波动将可能使得公式 (4-10) 给出的目标函数显著增大。这意味着光伏和风力发电等可再生能源以及电力负荷功率的随机波动对频率稳定性的影响将在控制目标 $\boldsymbol{J}(t_0, \boldsymbol{x}(t_0), \boldsymbol{u}(t))$ 中得到更加突出的体现。最优的控制器 $\boldsymbol{u}^*(t)$ 必须充分考虑多微网系统 (4-8) 中的随机性 (如随机波动的强度 $\boldsymbol{C}$) 给控制器性能指标带来的风险，以确保交流微电网母线频率波动可以得到有效的控制。

由于目标函数 (4-10) 的这一特性，公式 (4-11) 中的控制问题也被称为风险敏感的随机最优控制问题。这一类控制问题自提出以来已经得到了广泛的研究[83,107]。

4.2.3　风险敏感的交流多微网系统频率控制策略

为了解决公式 (4-11) 中的风险敏感性随机最优控制问题，此处首先引入一个假设。

假设 4.1 ([83])：　$\boldsymbol{R} > 0$ 成立，并且公式 (4-12) 中的 Riccati 方程有唯一的全局最优解。

$$\dot{\boldsymbol{P}} + \boldsymbol{Q} + \boldsymbol{P}\boldsymbol{A} + \boldsymbol{A}^{\intercal}\boldsymbol{P} - \boldsymbol{P}(\boldsymbol{B}\boldsymbol{R}^{-1}\boldsymbol{B}^{\intercal} - 2\theta\boldsymbol{C}\boldsymbol{C}^{\intercal})\boldsymbol{P} = 0. \tag{4-12}$$

基于假设 4.1 ，最优控制问题 (4-11) 的解可以由定理 4.1 给出。

定理 4.1 ([83])：　若假设 4.1 成立，则风险敏感性随机最优控制问题 (4-11) 存在唯一的最优解，且该最优解为 $\boldsymbol{u}^{*}(t) = -\boldsymbol{R}^{-1}\boldsymbol{B}^{\intercal}\boldsymbol{P}(t)\boldsymbol{x}(t)$。

4.3　数值算例

本节通过几个典型的数值算例对定理 4.1 给出的风险敏感控制方法在交流多微网系统频率控制任务中的性能表现进行分析和验证。如图 4.2 所示的由四个交流微电网构成的多微网系统被用于本节的数值仿真分析中。该交流多微网系统中微电网间的连接拓扑结构与图 4.2 所示一致。

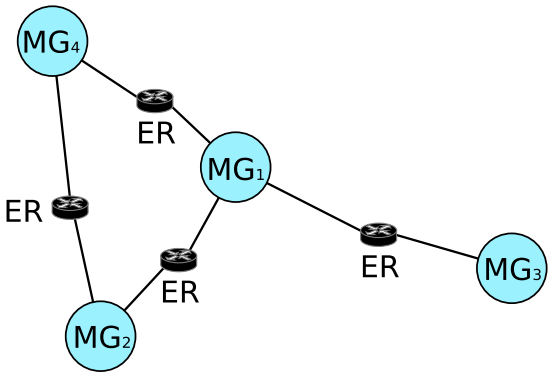


图 4.2　用于数值仿真的交流多微网系统拓扑图

根据文献 [40,62] 中的微电网系统模型参数，公式 (4-8) 对应的多微网系统动态模型的典型参数取值见表 4.1。本节的数值仿真中，仿真的时间范围均取 $t_0 = 0, T = 5$ （单位为秒），风险敏感因数取 $\theta = 0.5$ 图 4.2 中四个交流微电网对应的参数通过对表 4.1 中典型参数进行适当缩放得到。缩放因子的取值服从区间 $[0.8, 1.3]$ 上的均匀分布。

在 $[t_0, T]$ 时段内，由 Wiener 过程驱动的随机微分方程模型给出的光伏发电功率、风力发电功率和电力负荷功率波动曲线如图 4.3 所示。显然，Wiener 过程驱动的随机微分方程能够有效地模拟光伏、风力发电等可再生能源输出功率以及用电负荷功率的随机波动。

表 4.1　交流多微网系统参数典型值

参数	典型值	参数	典型值	参数	典型值
r_{PV}	17.9	r_{WTG}	15.8	r_{Load}	28.8
s_{PV}	0.3	s_{WTG}	0.4	s_{Load}	0.26
T_{MT}	0.02 (s)	T_{FC}	0.03 (s)	T_{BES}	0.01 (s)
T_{ER}	0.10 (s)	M	0.018	D	2.1

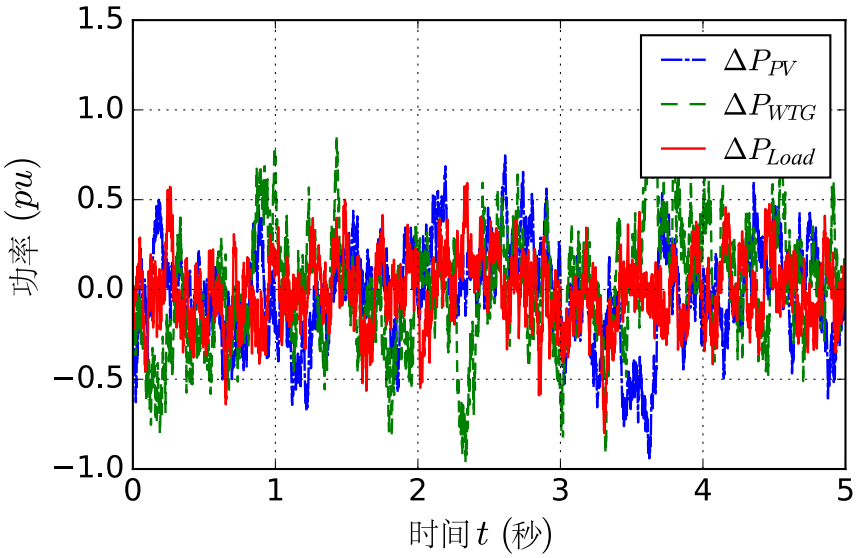


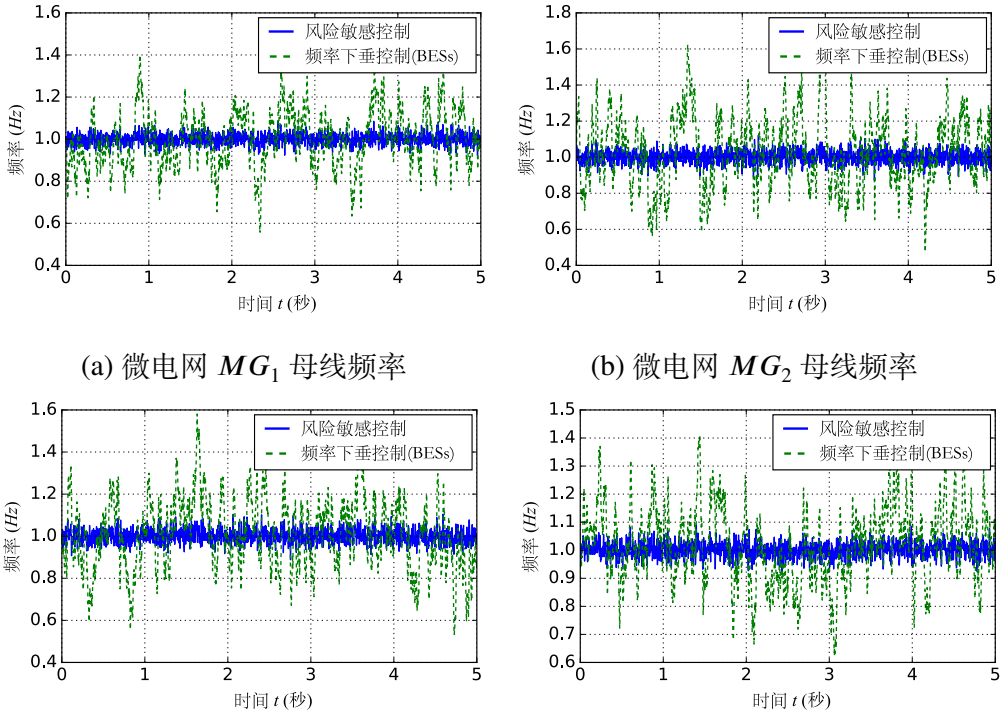
图 4.3　典型的可再生能源发电功率与电力负荷功率波动曲线

首先对本章提出的针对交流多微网系统频率控制的风险敏感控制方法的控制效果进行验证。公式 (4-9) 中目标函数的权重系数被分别设定为 $q = 1.0$ 和 $r = 0.001$。

使用图 4.3 中给出的可再生能源与负荷功率波动曲线作为输入，在应用风险敏感控制方法与无主动控制两种情况下各个交流微电网系统母线频率波动曲线如图 4.4 所示。

显然，本章提出的风险敏感控制方法可以将本节研究的如图 4.2 所示多微网系统内各个交流微电网母线频率相对于参考频率的波动限制在很小的范围内。而在无主动控制的情况下，各个交流微电网仅能依靠其电池储能设备对其自身母线频率进行被动调节。相比于比采用风险敏感控制方法的情形，各个交流微电网的母线频率波动幅度也明显更大。这也体现出多微网系统相比于单个微电网系统具有的独特优势，即，多微网系统可以通过能量路由器提供的能量共享机制实现更强的母线频率调节效果。

下面就公式 (4-9) 中权重系数 r 对本章提出的风险敏感控制器控制性能的影响



(a) 微电网 MG_1 母线频率　　(b) 微电网 MG_2 母线频率

(c) 微电网 MG_3 母线频率　　(d) 微电网 MG_4 母线频率

图 4.4　交流多微网系统内各微电网频率波动对比

进行讨论。两组不同的权重系数 $q = 1.0, r = 0.001$ 和 $q = 1.0, r = 0.01$ 被用于这一分析。

根据图 4.4 可知，图 4.2 中四个交流微电网的母线频率波动模式没有显著的差异。简洁起见，此处仅对比这两组风险敏感控制器权重系数对微电网 MG_1 交流母线的频率控制效果的影响。

根据图 4.5 可知，对应于权重系数 $q = 1.0, r = 0.001$ 和 $q = 1.0, r = 0.01$ 的风险敏感控制器均能将微电网 MG_1 的交流母线频率波动控制在合理的范围内。其中，对于较小的 r，控制器信号的幅值对目标函数 $J(\boldsymbol{u}(t))$ 产生的影响也相对较小。因而，对应的风险敏感控制器能够对微型燃气轮机、燃料电池以及能量路由器的功率进行更大幅度的调整，从而实现更好的频率控制效果。这一点在图 4.5 中得到了清晰的展示，权重系数 $r = 0.001$ 对应的控制器确实比 $r = 0.01$ 对应的控制器具有更好的频率控制性能。

另一方面，这两种风险敏感控制器的控制成本可以使用 L^2 范数进行衡量。如图 4.6 所示，较大的权重系数 $r = 0.01$ 对应的风险敏感控制器给出的控制信号的幅值也更小，对应的控制器 $\boldsymbol{u}(t)$ 的 L^2 范数也相对较小。

类似地，下面对公式 (4-9) 中的权重系数 q 给风险敏感控制器的控制性能带来的影响进行分析。权重系数 $q = 1.0, r = 0.001$ 和 $q = 10.0, r = 0.001$ 对应的风险敏

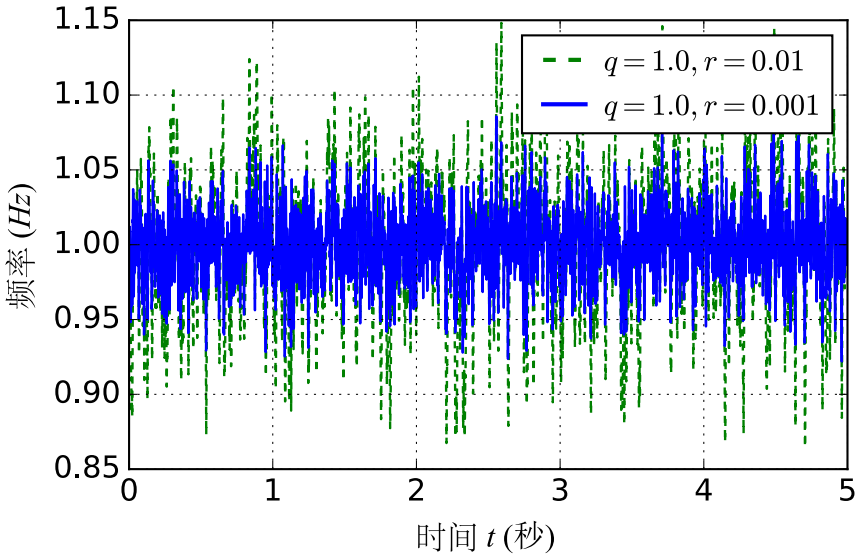


图 4.5　权重系数 r 对微电网 MG_1 交流母线频率控制效果的影响

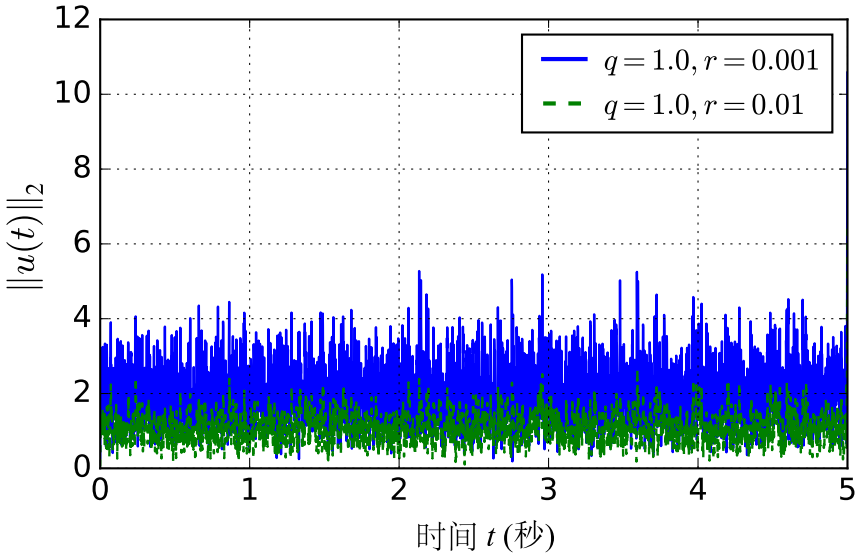


图 4.6　权重系数 r 对风险敏感控制器强度的影响

感控制器对微电网 MG_1 交流母线的频率控制效果如图 4.7 所示。

显然较大的权重系数 q 将增大微电网系统交流母线频率波动对公式 (4-9) 中目标函数的影响，对控制器信号幅度的限制也将相对减弱。因此，在图 4.7 中，权重系数 $q = 10.0$ 对应的风险敏感控制器可以将微电网交流母线的频率波动抑制在更小的范围内，具有更好的频率控制效果。图 4.8 中给出的不同取值权重系数 q 对应的控制器范数大小也印证了上述分析。

然而，根据公式 (4-10) 和最优控制问题 (4-11)，风险敏感控制问题具有指数形式的目标函数。这意味着权重系数 r 和 q 取值的改变对目标函数的影响也是指

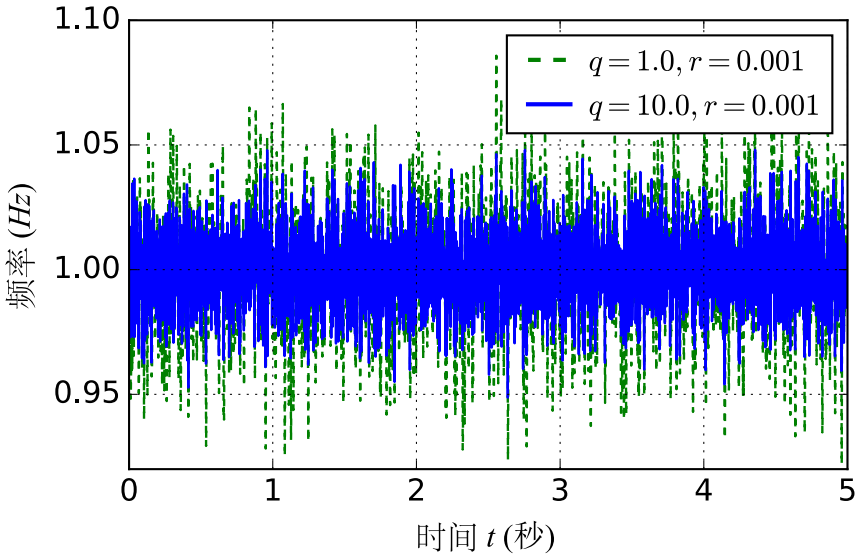


图 4.7　权重系数 q 对微电网 MG_1 交流母线频率控制效果的影响

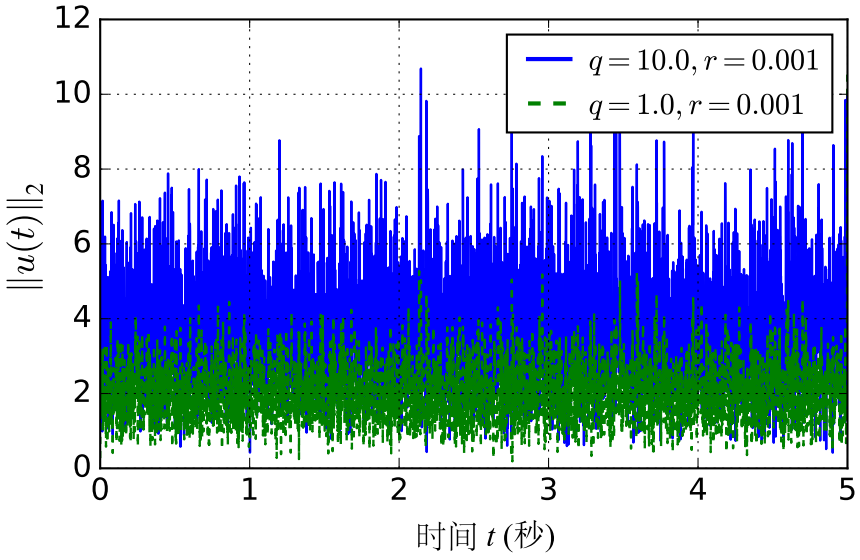


图 4.8　权重系数 q 对风险敏感控制器强度的影响

数式的。权重系数 q 的取值越大，则与 r 对应的控制器控制成本对目标函数的影响就变得越小。对比图 4.7 和图 4.8 的结果可以发现，权重系数 $q = 1.0$ 和 $q = 10.0$ 对应控制器的频率控制性能并没有显著差异，但 $q = 10.0$ 情况下的控制器信号的变化幅度显著更大。因此，为了保证本章提出的风险敏感控制器的综合性能表现，对公式 (4-9) 中权重系数的选择至关重要。

4.4　本章小结

针对交流多微网系统的母线频率控制问题，本章提出了一种基于风险敏感控制方法的线性反馈控制器，以实现在可再生能源发电和用电负荷功率的随机波动干扰下对交流微电网母线频率波动的控制。相关的随机最优控制问题通过随机控制理论得到了解决，对应风险敏感控制策略的频率控制性能通过几个数值算例得到了验证。和通过电池储能设备实现的频率下垂控制相比，本章提出的交流多微网频率控制策略能够更加有效地利用多微网系统中的可控发电设备，并实现更加优秀的频率控制性能。

值得注意的是，本章采用线性随机系统对交流多微网系统的短期动态变化进行建模，这不可避免地带来了一定的建模误差，相应的风险敏感控制器因而仅能用于在较短的时间范围内对多微网系统的控制。在未来的研究中，数据驱动的多微网系统建模方法和更加精准的多微网系统模型将成为能源互联网领域的重要研究方向。

第 5 章　能量路由器的能量存储管理方法

如前所述，以自底向上模式构建的多微网系统是一种典型的区域能源互联网系统[18]。在这类区域能源互联网系统中，能量路由器[33,37] 是各个微电网系统间进行能量传输和交易的主要途径[18]。能量路由器组成的能量路由网络将各个微电网系统紧密地联系起来，其分布式的网络结构和灵活的能量传输功能极大地提升了整个系统的可靠性和抗干扰能力。

能量路由器的研究和发展在关于能源互联网的研究中得到了广泛关注[35]。例如，文献 [62,108] 根据能源互联网的能量管理准则，提出了基于能量路由器的微电网系统能量调度策略。而能源互联网系统中的能量路由策略则在文献 [109] 中得到了讨论。通过图论等相关技术的应用，文献 [109] 提出了针对能量路由器网络的能量调度和管理策略，为多微电网系统之间的能量调度提供了解决方案。

作为对上述研究的补充，本章主要针对能量路由器内部能量存储的管理问题开展研究。通过网络流模型和先进控制理论的综合应用，本章针对能量路由器的能量传输策略提出了一种鲁棒 H_∞ 控制方法，通过对能量路由器内部能量存储的管理实现其能量路由功能稳定性的提升。

本章节的内容安排如下，第 5.1 节介绍了在特定能量传输协议下能量路由器的能量传输动态模型，并对其与能量路由器的能量存储之间的关联进行了讨论。第 5.2 节结合能量路由器中能量传输的动态模型，将能量路由器内部能量存储的管理问题建模为一类鲁棒 H_∞ 控制问题。这一控制问题通过第 5.3 节中介绍的基于线性矩阵不等式的控制方法得到了解决，对应的能量路由器能量传输控制策略的控制效果在第 5.4 节通过数值算例得到了验证。最后，第 5.5 节对本章的主要研究内容进行了总结。

5.1　能量路由器的能量传输动态模型

在区域能源互联网系统中，能量路由器是实现微电网系统运行与管理的关键设备。在微电网系统内部，能量路由器能够为各种可再生能源和电气设备提供即插即用的接入端口[35]。与此同时，各个微电网中安装的能量路由器之间通过输电网络彼此连接，通过其能量路由功能实现跨微电网的能量交易和共享[18]。在本章的研究中，与该能量路由功能紧密相关的能量路由器能量存储管理问题得到了进一步的研究。

未来的能源互联网中，电能将以 “能量信息流”[33] 的形式在电力系统之间传

输。受到计算机网络中路由器的启发，能量路由器具有在区域能源互联网系统内传输和暂存能量和信息流的功能[18,37]。

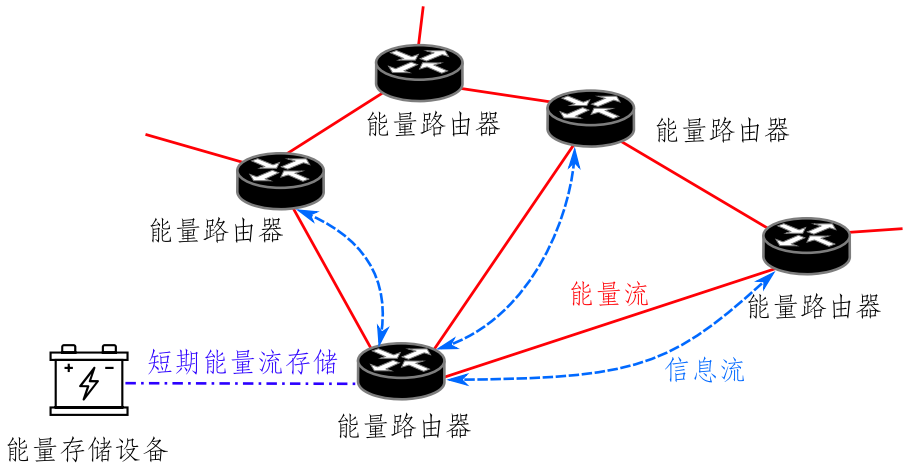


图 5.1　能量路由器网络

当一个能量路由器接收到的能量传输请求超出其传输容量时，具有较低优先度的能量信息流将暂时存储在能量路由器内部的能量存储设备中。一般来说，与微电网系统中安装的能量存储系统相比，能量路由器内部的能量存储容量相对有限。因此，能量路由器中设置的能量传输策略必须实现对其内部能量存储设备容量的合理使用，避免出现能量存储容量耗尽的情况。具体来说，对于能量路由器的能量存储管理问题，其内部能量存储的容量占用水平应当被控制在给定的工作点附近，以维持其能量路由功能的稳定。

本章的研究中，能量信息流的传输协议被假定与信息互联网的传输控制协议具有相似的特性。根据传输控制协议下网络流的流体模型[110-111]，能量路由器的能量传输动态可以被建模为公式 (5-1) 给出的动态系统。

$$\begin{cases} \dot{W}(t) = \dfrac{1}{R(t)} - \dfrac{W(t)W(t-R(t))}{2R(t)} p(t-R(t)), \\ \dot{q}(t) = \dfrac{W(t)N(t)}{R(t)} - C(t), \end{cases} \tag{5-1}$$

其中，$W(t)$ 为 t 时刻该能量路由器能量信息流传输的窗口大小，$q(t)$ 为 t 时刻该能量路由器内部能量存储的占用水平，$R(t)$ 为 t 时刻经由该能量路由器传输的能量信息流中信息流的平均往返时间，$C(t)$ 为 t 时刻该能量路由器的能量传输容量，$N(t)$ 为 t 时刻经该能量路由器传输的能量信息流的数量，$0 \leqslant p(t) \leqslant 1$ 是该能量路由器

在 t 时刻对来自其他能量路由器的能量传输请求的拒绝概率。

在公式 (5-1) 给出的能量路由器能量传输模型中，能量传输请求的拒绝概率 $p(t)$ 将被用于按照优先级对能量信息流的传输请求进行选择性的拒绝和接受。如果一个能量信息流的传输请求被该能量路由器拒绝，对应的能量流将不会通过该能量路由器进行传输。在一个能量路由器的内部能量存储容量即将被暂存的能量流耗尽的情况下，通过提高其对能量传输请求的拒绝概率来调整其内部能量存储的占用情况。反之，当能量路由器内部能量存储设备的容量压力较小时，该能量路由器可以降低对能量传输请求的拒绝概率来改善能量路由网络的传输性能。据此，通过对拒绝概率 $p(t)$ 的恰当调整，能量路由器内部能量存储容量的占用水平也可以得到相应的调节。

本章的研究着重于对能量路由器内部能量存储在短期内相对于设定水平的波动进行抑制。假设在时刻 $t = 0$，公式 (5-1) 对应的能量路由器工作在给定的工作点 (W_0, q_0, p_0) 处，通过线性化方法[110-111]，公式 (5-1) 中的非线性模型可以在短时间内被近似为公式(5-2) 中的线性模型。

$$\begin{cases} \Delta\dot{W}(t) = -\dfrac{2N_0}{R_0^2 C_0}(\Delta W(t) + \Delta W(t - R_0)) - \dfrac{1}{R_0^2 C_0}(\Delta q(t) \\ \qquad\qquad -\Delta q(t - R_0)) - \dfrac{R_0 C_0^2}{2N_0^2}\Delta q(t - R_0), \\ \dot{q}(t) \;=\; \dfrac{N_0}{R_0}\Delta W(t) - \dfrac{1}{R_0}\Delta q(t), \end{cases}$$

此处，$\Delta W = W(t) - W_0$, $\Delta q = q(t) - q_0$, $\Delta p(t) = p(t) - p_0$。公式(5-2) 中，$\Delta p(t) = p(t) - p_0$ 表示该能量路由器对能量传输请求的拒绝概率 $p(t)$ 相对于参考值 p_0 的变化量，$\Delta W = W(t) - W_0$ 和 $\Delta q = q(t) - q_0$ 也均表示对应变量相对于各自参考值的变化量。参数 R_0, N_0 和 C_0 分别表示在时间 $t = 0$ 时刻附近能量信息流经该能量路由器到其目的地的传输往返时间，经该能量路由器传输的能量流的数量和该能量路由器的能量流传输容量。

记 $\boldsymbol{x}(t) = [\Delta W(t), \Delta q(t)]^{\mathrm{T}}$, $\boldsymbol{u}(t) = [\Delta p(t)]$，公式 (5-2) 给出的能量路由器能量传输暂态模型可以被改写为公式 (5-2) 中的线性系统。

$$\begin{cases} \dot{\boldsymbol{x}}(t) = \boldsymbol{A}\boldsymbol{x}(t) + \boldsymbol{A}_d\boldsymbol{x}(t - R_0) + \boldsymbol{B}\boldsymbol{u}(t), \\ \boldsymbol{z}(t) = \boldsymbol{C}\boldsymbol{x}(t). \end{cases} \tag{5-2}$$

在实际的能源互联网应用场景中，即使是在较短的时间范围内，能量路由器的能量传输容量，能量信息流传输往返时间和能量流传输数量等参数也可能发生一定的波动。为了将这些参数复杂的变化模式给能量路由器的短期能量传输特性带来

的影响纳入考虑，参数不确定性[40]，外界扰动输入和系统时延[35,99,112] 等因素被引入系统 (5-2) 中。改进后的能量路由器能量传输模型如公式 (5-3) 所示。

$$\begin{cases} \dot{\boldsymbol{x}}(t) = (\boldsymbol{A} + \Delta\boldsymbol{A})\boldsymbol{x}(t) + (\boldsymbol{A}_d + \Delta\boldsymbol{A}_d)\boldsymbol{x}(t-d) \\ \qquad\qquad + \boldsymbol{B}_1\boldsymbol{\omega}(t) + (\boldsymbol{B}_2 + \Delta\boldsymbol{B}_2)\boldsymbol{u}(t), \\ \boldsymbol{z}(t) = \boldsymbol{C}\boldsymbol{x}(t). \end{cases} \tag{5-3}$$

此处，$\boldsymbol{z}(t)$ 为系统状态 $\boldsymbol{x}(t)$ 的观测值，代表了能量路由器内部能量存储容量占用水平 $\boldsymbol{\omega}(t)$ 为系统 (5-3) 的扰动输入，可以体现能量信息流传输过程中的功率波动对该能量路由器能量传输带来的影响，系统时延 d 满足 $R_0 \leqslant d \leqslant R_0 + h$，其中，$h$ 表示系统动态中时延的波动，可以用来描述能量路由网络能量传输容量的实时变化给能量信息流传输带来的影响。系统 (5-3) 中的参数矩阵可以对比系统 (5-2) 得到。

$$\boldsymbol{A} = \begin{bmatrix} -\frac{N_0}{R_0^2 C_0} & -\frac{1}{R_0^2 C_0} \\ \frac{N_0}{R_0} & -\frac{1}{R_0} \end{bmatrix}, \boldsymbol{A}_d = \begin{bmatrix} -\frac{N_0}{R_0^2 C_0} & -\frac{1}{R_0^2 C_0} \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \tag{5-4}$$

$$\boldsymbol{B}_2 = \begin{bmatrix} -\frac{R_0 C_0^2}{2N_0^2} \\ 0 \end{bmatrix}, \boldsymbol{C} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \end{bmatrix}. \tag{5-5}$$

本章的研究中，与系统 (5-3) 建模误差相关的参数不确定性矩阵 $\Delta\boldsymbol{A}$, $\Delta\boldsymbol{B}_2$ 和 $\Delta\boldsymbol{A}_d$ 被假设满足

$$[\Delta\boldsymbol{A} \quad \Delta\boldsymbol{B}_2 \quad \Delta\boldsymbol{A}_d] = \boldsymbol{E}\boldsymbol{\Sigma}(t)[\boldsymbol{F}_1 \quad \boldsymbol{F}_2 \quad \boldsymbol{F}_d], \tag{5-6}$$

其中参数不确定性因子矩阵 $\boldsymbol{\Sigma}$ 满足 $\boldsymbol{\Sigma}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{\Sigma} \leqslant \boldsymbol{I}$，$\boldsymbol{F}_1$，$\boldsymbol{F}_2$ 和 $\boldsymbol{F}_d$ 均为定常矩阵。

5.2　能量路由器能量存储管理问题

根据 5.1 节中给出的系统模型 (5-3)，对应能量路由器的能量存储管理问题可以被建模为一类鲁棒 $\boldsymbol{H}_\infty$ 控制问题。

如前所述，本章研究的重点在于实现对能量路由器内部能量存储的合理利用，这主要体现在能量路由器能量路由功能的稳定性上。而能量路由器内部能量存储占用水平的稳定是其能量路由功能稳定性的重要指标。当能量路由器能量存储占用水平偏离设定的工作点时，与该能量路由器相连的其他能量路由器中能量信息流的传输也很可能受到影响。单个能量路由器能量路由功能的不稳定性带来的局部能量传输故障甚至可能导致整个能源路由网络的崩溃。因此，保障能量路由器

内能量存储容量占用水平的稳定性对于区域能源互联网系统具有重要意义。为此，有必要发展可靠的能量路由器能量传输策略。

对于本章考虑的能量路由器系统，其内部能量存储占用水平的稳定性可以通过公式 (5-7) 给出的基于 L^2 范数的 H_∞ 性能指标进行衡量。

$$J = \|\boldsymbol{z}(t)\|_2 - \gamma^2\|\boldsymbol{\omega}(t)\|_2 \leqslant 0, \tag{5-7}$$

其中，γ 为预设的扰动衰减因数；$\boldsymbol{z}(t)$ 和 $\boldsymbol{\omega}(t)$ 分别是公式 (5-3) 中能量路由器内部能量存储占用的观测值和扰动输入，$\|\cdot\|_2$ 为向量函数的 L^2 范数。对一个给定的连续向量函数 $\boldsymbol{f}(t)$，其 L^2 范数可以按照公式 (5-8) 进行计算。

$$\|\boldsymbol{f}(t)\|_2 = \int_0^\infty \boldsymbol{f}(t)^\intercal \boldsymbol{f}(t)\mathrm{d}t. \tag{5-8}$$

公式 (5-7) 中的扰动衰减因数 γ 取值与对应的 H_∞ 性能直接相关，在实践中应当根据实际需求进行合理设置。一般来说，γ 值越小，满足的 H_∞ 性能指标的能量路由器能量传输策略也将具有更好的能量存储容量控制性能，但是对应的控制成本也会更高。

基于公式(5-7) 给出的 H_∞ 指标，能量路由器的能量存储管理问题可以表示为公式 (5-9) 中的鲁棒 H_∞ 控制问题。

$$\begin{aligned}
\min_{\boldsymbol{u}(t)\in\mathbb{U}} \quad & 0, \\
s.t. \quad & J \leqslant 0, \\
& \begin{cases}
\dot{\boldsymbol{x}}(t) = (\boldsymbol{A}+\Delta\boldsymbol{A})\boldsymbol{x}(t) + (\boldsymbol{A}_d+\Delta\boldsymbol{A}_d)\boldsymbol{x}(t-d) \\
\qquad\qquad +\boldsymbol{B}_1\boldsymbol{\omega}(t) + (\boldsymbol{B}_2+\Delta\boldsymbol{B}_2)\boldsymbol{u}(t), \\
\boldsymbol{z}(t) = \boldsymbol{C}\boldsymbol{x}(t),
\end{cases}
\end{aligned} \tag{5-9}$$

其中，$\mathbb{U}$ 为所有运行的能量路由器能量传输策略 $\boldsymbol{u}(t)$ 的集合。

5.3　能量路由器能量存储的鲁棒控制方法

本节通过引入两个关于动态系统鲁棒控制的定理，给出了满足鲁棒 H_∞ 控制问题 (5-9) 要求的能量路由器能量传输策略。

首先，定理 5.1 给出了在无扰动输入条件下使系统 (5-3) 镇定的充分条件。

定理 5.1 ([110])：对于给定的反馈控制器 $\boldsymbol{u}(t) = \boldsymbol{K}\boldsymbol{x}(t)$，假设扰动输入 $\boldsymbol{\omega}(t) = \boldsymbol{0}$，如果存在对称半正定矩阵 $\boldsymbol{P}$，$\boldsymbol{Q}$，$\boldsymbol{M}$ 和 $\boldsymbol{Z}$，矩阵 $\boldsymbol{N}$ 以及正实数 $\varepsilon > 0$，使得矩

阵不等式 (5-11) 成立，其中 $*$ 表示不等式 (5-11) 中大矩阵内各分块矩阵的转置，$\bar{d} = R_0 + h$，

$$\boldsymbol{\Omega} = \boldsymbol{P}(\boldsymbol{A} + \boldsymbol{B}_2\boldsymbol{K}) + (\boldsymbol{A} + \boldsymbol{B}_2\boldsymbol{K})^{\mathsf{T}} + d\boldsymbol{M} + \boldsymbol{N} + \boldsymbol{N}^{\mathsf{T}}, \tag{5-10}$$

则系统 (5-3) 在控制输入 $\boldsymbol{u}(t) = \boldsymbol{K}\boldsymbol{x}(t)$ 下为渐近稳定的。

$$\begin{bmatrix} \boldsymbol{\Omega} & -\boldsymbol{N} + \boldsymbol{P}\boldsymbol{A}_d & (\boldsymbol{A} + \boldsymbol{B}_2\boldsymbol{K})^{\mathsf{T}} & \boldsymbol{P}\boldsymbol{E} & (\boldsymbol{F}_1 + \boldsymbol{F}_2\boldsymbol{K})^{\mathsf{T}} \\ * & -\boldsymbol{Q} & \boldsymbol{A}_d^{\mathsf{T}} & \boldsymbol{0} & \boldsymbol{F}_d^{\mathsf{T}} \\ * & * & -\bar{d}^{-1}\boldsymbol{Z} & \boldsymbol{E} & \boldsymbol{0} \\ * & * & * & -\varepsilon\boldsymbol{I} & \boldsymbol{0} \\ * & * & * & * & -\varepsilon^{-1}\boldsymbol{I} \end{bmatrix} \leqslant 0. \tag{5-11}$$

基于定理 5.1，定理 5.2 进一步给出了保证该能量路由器系统鲁棒稳定性的充分条件。该充分条件的核心为公式 (5-13) 中的线性矩阵不等式。该不等式可以通过凸优化等优化技术实现高效求解。

定理 5.2 ([110])：给定扰动衰减因数 γ，在扰动输入 $\boldsymbol{\omega}(t)$ 存在的情况下，如果存在对称半正定矩阵 $\boldsymbol{X}$，$\boldsymbol{Q}$，$\boldsymbol{M}$ 和 $\boldsymbol{Z}$, 矩阵 $\boldsymbol{Y}$ 和 $\boldsymbol{N}$ 以及正实数 $\varepsilon > 0$，使得线性矩阵不等式 (5-13) 成立，其中 $*$ 表示不等式 (5-13) 中矩阵对应分块矩阵的转置，$\bar{d} = R_0 + h$，

$$\boldsymbol{\Xi} = \boldsymbol{A}\boldsymbol{X} + \boldsymbol{B}_2\boldsymbol{Y} + \boldsymbol{X}\boldsymbol{A}^{\mathsf{T}} + \boldsymbol{Y}^{\mathsf{T}}\boldsymbol{B}_2^{\mathsf{T}} + \boldsymbol{N} + \boldsymbol{N}^{\mathsf{T}} + \boldsymbol{Q}, \tag{5-12}$$

则系统 (5-3) 在控制器 $\boldsymbol{u}(t) = \boldsymbol{K}\boldsymbol{x}(t) = \boldsymbol{Y}\boldsymbol{X}^{-1}\boldsymbol{x}(t)$ 下是渐近稳定的，并且能够满足公式 (5-7) 中要求的 H_∞ 性能。

$$\begin{bmatrix} \boldsymbol{\Xi} & \boldsymbol{A}_d\boldsymbol{X} - \boldsymbol{N} & \boldsymbol{B}_1 & \boldsymbol{X}\boldsymbol{A}^{\mathsf{T}} + \boldsymbol{Y}^{\mathsf{T}}\boldsymbol{B}_2^{\mathsf{T}} & \boldsymbol{M} & \boldsymbol{X}\boldsymbol{C}^{\mathsf{T}} & \boldsymbol{E} & \boldsymbol{X}\boldsymbol{F}_1^{\mathsf{T}} + \boldsymbol{Y}^{\mathsf{T}}\boldsymbol{F}_2^{\mathsf{T}} \\ * & -\boldsymbol{Q} & \boldsymbol{0} & \boldsymbol{X}\boldsymbol{A}_d^{\mathsf{T}} & \boldsymbol{0} & \boldsymbol{0} & \boldsymbol{0} & \boldsymbol{X}\boldsymbol{F}_d^{\mathsf{T}} \\ * & * & -\gamma^2 & \boldsymbol{B}_1^{\mathsf{T}} & \boldsymbol{0} & \boldsymbol{0} & \boldsymbol{0} & \boldsymbol{0} \\ * & * & * & -\bar{d}^{-1}\boldsymbol{Z} & \boldsymbol{0} & \boldsymbol{0} & \boldsymbol{E} & \boldsymbol{0} \\ * & * & * & * & -\bar{d}^{-1}\boldsymbol{M} & \boldsymbol{0} & \boldsymbol{0} & \boldsymbol{0} \\ * & * & * & * & * & -\boldsymbol{I} & \boldsymbol{0} & \boldsymbol{0} \\ * & * & * & * & * & * & -\varepsilon\boldsymbol{I} & \boldsymbol{0} \\ * & * & * & * & * & * & * & -\varepsilon^{-1}\boldsymbol{I} \end{bmatrix} \leqslant 0. \tag{5-13}$$

根据定理 5.1和定理 5.2，鲁棒 H_∞ 控制问题 (5-9) 对应的解可以通过对线性矩阵不等式 (5-13) 的求解得到。

5.4　数值算例

本节通过数值仿真对5.3节中提出的鲁棒 H_∞ 控制方法在能量路由器能量存储控制任务中的效果进行验证，并对相关结果进行了比较与分析。

在本节的数值仿真中，系统 (5-3) 的扰动输入 $\boldsymbol{\omega}(t)$ 通过公式 (5-14) 中描述的 Ornstein-Uhlenbeck 过程[42] 产生。

$$\mathrm{d}\boldsymbol{\omega}(t) = -\theta(\boldsymbol{\omega}(t) - \mu)\mathrm{d}t + \sigma\mathrm{d}w(t), \tag{5-14}$$

其中的参数 θ，μ 和 σ 在表 5.1 中给出，$w(t)$ 为一维标准 Wiener 过程[42]。数值仿真时间范围设置为 $t \in [0, 3]$ （单位为秒），与能量路由器能量传输模型 (5-3) 相关的系统参数如表 5.1 所示。系统 (5-3) 中系数矩阵 $\boldsymbol{B}_1$，$\boldsymbol{E}$ 的取值见公式 (5-15) , 与

表 5.1　能量路由器系统参数

参数	典型值	参数	典型值
N_0	10	C_0	1500
R_0	0.23 (s)	h	0.12 (s)
γ	1.3	ε	1.9
θ	3.8	μ	0.5
σ	1.0	$\bar{d}$	3.5 (s)

参数不确定性相关的矩阵 $\boldsymbol{F}_1$，$\boldsymbol{F}_2$ 和 $\boldsymbol{F}_d$ 的值见公式 (5-16) 。

$$\boldsymbol{B}_1 = \begin{bmatrix} 10 \\ 5 \end{bmatrix}, \boldsymbol{E} = \begin{bmatrix} 1.0 & 0.3 \\ -0.2 & 1.0 \end{bmatrix}, \tag{5-15}$$

$$\boldsymbol{F}_1 = \begin{bmatrix} 0.185 & 0.185 \\ 0.317 & 0.317 \end{bmatrix}, \boldsymbol{F}_2 = \begin{bmatrix} 0.264 \\ 0.053 \end{bmatrix}, \boldsymbol{F}_d = \begin{bmatrix} 0.264 & 0.264 \\ 0.053 & 0.053 \end{bmatrix}. \tag{5-16}$$

利用 *Python* 的凸优化工具包 CVXPY[113-114] 对公式 (5-13) 中的线性矩阵不等式进行求解，可得反馈控制增益 $\boldsymbol{K} = [0.5423 \quad 0.1272]$。

在数值仿真中，根据公式 (5-14) 计算得到的扰动输入 $\boldsymbol{\omega}(t)$ 的轨迹如图 5.2 所示。能量路由器能量传输模型 (5-3) 对应的时延见图 5.3 。显然图 5.3 中的系统时延 d 符合系统 (5-3) 中的假设，即 $R_0 + h \leqslant d \leqslant R_0$。

在本节的数值仿真中，系统 (5-3) 的参数不确定性因子矩阵 $\boldsymbol{\Sigma}(t) \in \mathbb{R}$ ，其随时间的变化曲线如图 5.4 所示。

在图 5.2 ，图 5.3 和图 5.4 给出的系统扰动输入，能量流传输动态时延以及系统参数不确定性因子矩阵的共同作用下，控制器 $\boldsymbol{u}(t) = \boldsymbol{K}\boldsymbol{x}(t)$ 被用于调整能量路

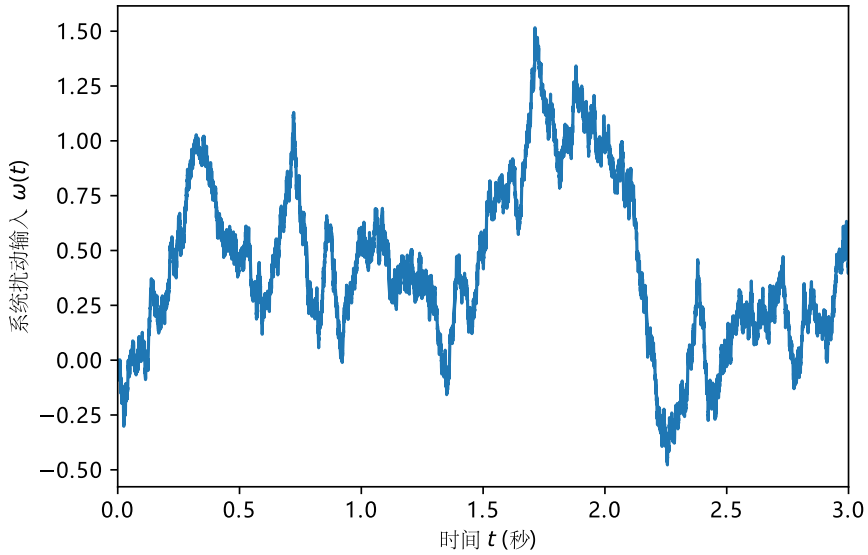


图 5.2　系统扰动输入 $\boldsymbol{\omega}(t)$

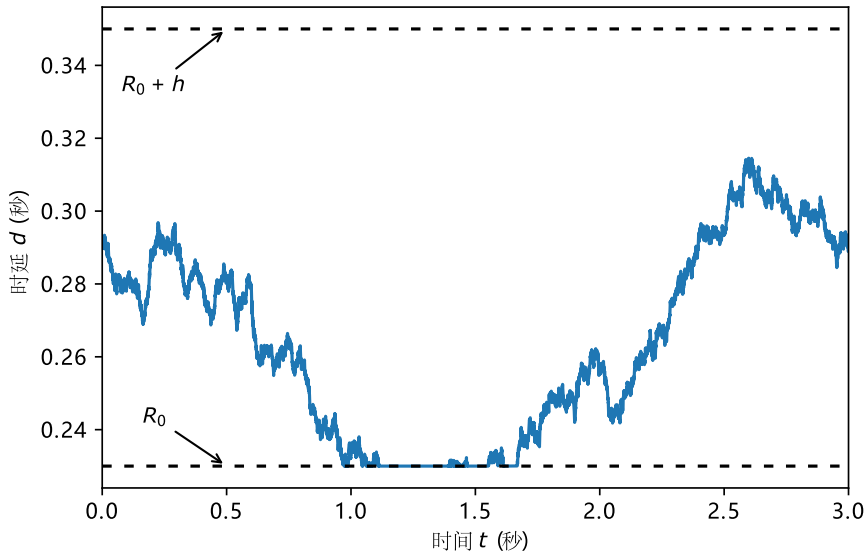


图 5.3　能量路由器系统的时延变化曲线

由器对应的能量流传输请求拒绝概率 $p(t)$，以实现对该能量路由器内部能量存储容量占用水平的调节。相关数值仿真的的主要结果如图 5.5，图 5.6 和图 5.7 所示。

图 5.5 中给出了该能量路由器的能量传输策略，即能量流传输请求拒绝概率相对于设定工作点的变化量。显然，该拒绝概率相对于工作点 q_0 的波动 $\Delta p(t)$ 被控制在很小的范围内。因而不会对该能量路由器的能量流传输性能带来显著的影响。

下面对能量路由器能量存储管理的必要性和本章提出的鲁棒 H_∞ 控制器的具体控制效果进行分析。

图 5.6 给出了能量路由器能量信息流传输窗口大小的变化曲线。图中的蓝色

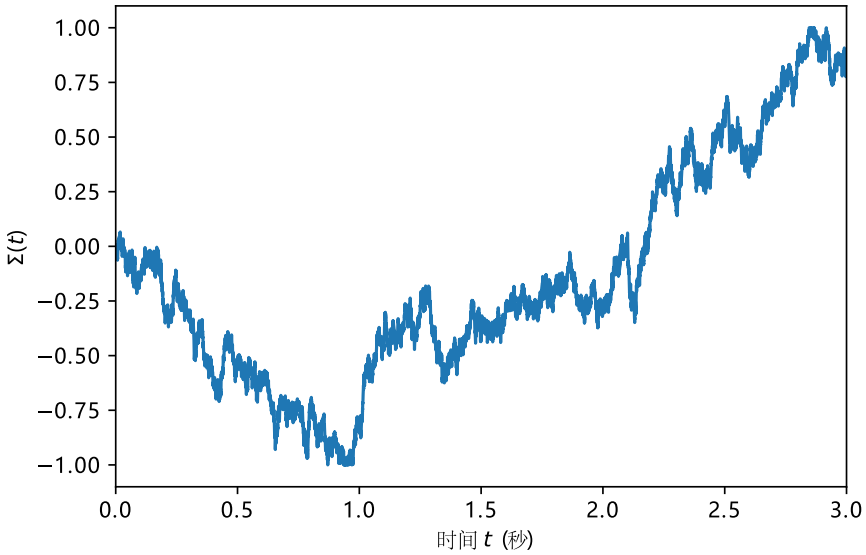


图 5.4　能量路由器系统参数不确定性因子 $\boldsymbol{\Sigma}(t)$ 变化曲线

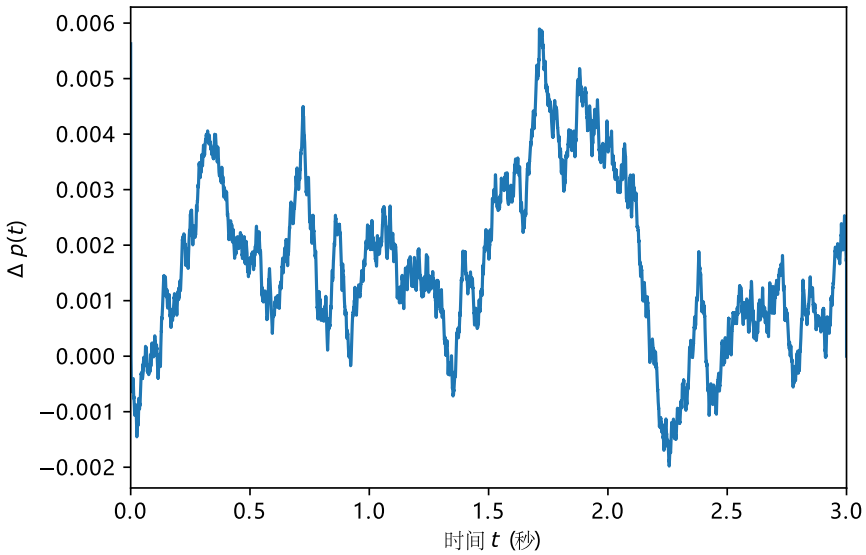


图 5.5　能量传输请求拒绝概率变化量 $\Delta p(t)$

实线对应于鲁棒 H_∞ 控制器控制下该能量路由器的能量流传输窗口的变化。图中黄色虚线则对应于 $\boldsymbol{u}(t)=0$ 的情形。可见，在定理 5.2 给出的鲁棒 H_∞ 控制器控制下能量路由器能量信息流传输窗口大小被很好地稳定在设定的工作点 W_0 附近。

类似地，图 5.7 给出了上述两种能量传输策略对应的能量路由器内部能量存储容量占用曲线。在 $\boldsymbol{u}(t)=0$，即能量路由器的能量传输拒绝概率恒定不变时，该能量路由器的能量存储占用量在 0.3s 内就偏离了给定的工作点。这意味着 5.1 节中给出的能量路由器暂态模型 (5-3) 将很快失效，相对于工作点的大幅度偏离也可能给整个能量路由系统的稳定性带来负面的影响。相反，如图 5.7 中蓝色实线所示，

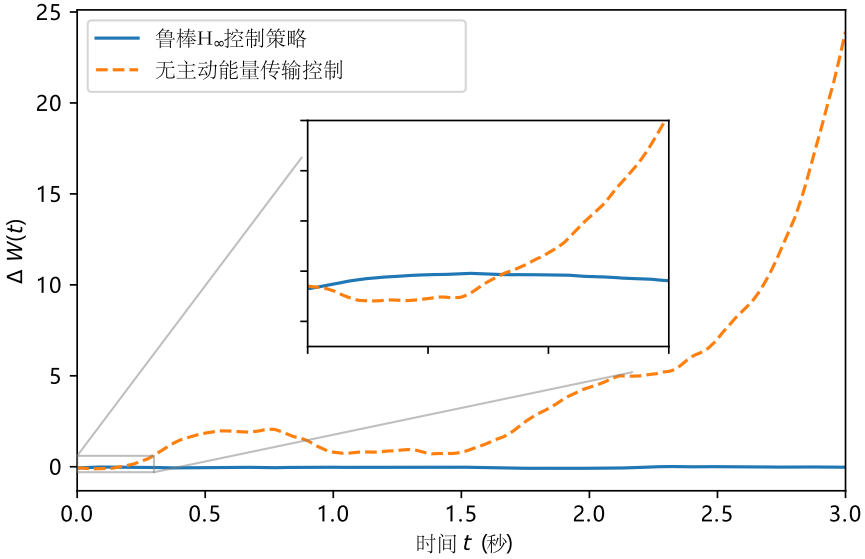


图 5.6　能量路由器能量流传输窗口变化曲线

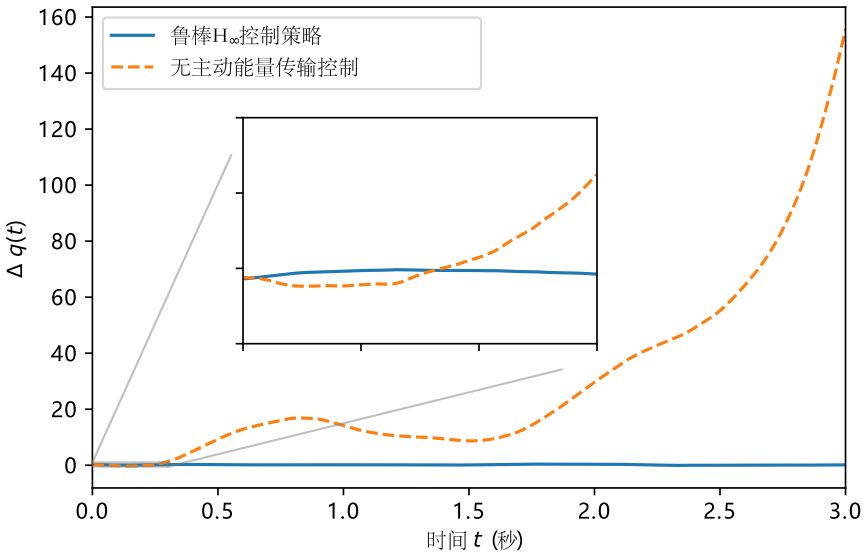


图 5.7　能量路由器能量存储容量占用曲线 $\Delta q(t)$

在能量传输策略 $\boldsymbol{u}(t) = \boldsymbol{K}\boldsymbol{x}(t)$ 的控制下，能量路由器内部的能量存储容量占用能够被稳定的控制在工作点 q_0 附近。

以上数值仿真的结果很好地验证了本章提出的能量路由器能量存储管理策略的控制效果，相关仿真结果也清晰地展现了合理的能量存储管理策略对于能量路由器能量路由功能的重要性。

5.5　本章小结

本章对能量路由器内部能量存储的管理问题进行了探讨。基于网络流的流体模型，能量路由器的能量信息流传输过程被建模为一种特殊的线性动态系统。针对能量路由器能量存储管理对应的 H_∞ 性能指标，一种鲁棒 H_∞ 控制器被提出以实现对能量路由器能量存储的合理利用。该控制器的可行性和控制效果通过数值仿真得了分析与验证。

但是，区域能源互联网系统中能量调度算法以及微电网内部能量管理策略对能量路由器能量信息流传输过程的影响在本章的研究中没有得到充分的考虑。因此，在未来的相关研究中，针对能量路由器和微电网能量管理的协同优化将成为研究的重点。

第 6 章　总结与展望

6.1　主要研究内容总结

本研究基于随机分析、控制与优化理论和机器学习等技术，针对区域能源互联网不同层次的运行与控制问题展开研究，为典型区域能源互联网系统的高效可靠运行提供了相关的解决方案。本研究的主要研究内容包括以下几个方面。

(1) 关于微电网系统中长期的能量管理问题的研究。首先，本研究结合基于机器学习技术的电量预测模型和基于随机过程模型的微电网系统动态模型的优势，提出了一种适用于光伏发电设备和电力负荷功率预测的新型建模方法。通过这一方法得到的动态模型能够有效地对可再生能源和负荷功率的随机性进行建模，并且具有较高的电量预测精度。基于这一新型建模方法和随机最优控制理论，本研究提出了一种用于微电网系统能量管理的控制策略。该控制策略在微电网系统的电池储能设备使用寿命优化任务中得到了应用，其控制效果以及相对于传统控制方法的优势通过数值仿真得到了验证。

(2) 关于多微网系统协同控制的研究。本研究以多微网系统母线电压和频率控制为例，对基于能量路由器构建的多微网系统的协同控制进行了研究。首先，包含光伏和风力发电等可再生能源的多微网系统通过随机微分方程模型得到了建模。对于具有较强不确定性的多微网系统，本研究以直流母线电压控制为例，提出了基于随机鲁棒 $\boldsymbol{H}_\infty$ 控制方法的多微网协同控制技术。通过对能量路由器能量传输的控制实现各个微电网系统间的协同调度，进而实现对直流多微网系统母线电压稳定性的提升。对于随机性占主导地位的多微网系统，本研究以交流母线频率控制问题为例，提出了基于风险敏感控制方法的多微网协调频率控制技术，综合利用区域内各交流微电网的调节能力，实现了对交流多微网系统整体母线频率稳定性的改善。

(3) 关于能量路由器能量传输与管理问题的研究。本研究以能量路由器内部能量存储设备的能量管理问题为例，对特定能量传输协议下能量路由器系统能量路由功能的稳定性进行了研究。基于网络流的流体模型，能量路由器中能量信息流的传输动态通过线性微分方程组得到了建模。根据能量路由器的能量存储管理需求，本研究通过控制和优化理论的综合应用，针对能量路由器提出了一种新型能量传输策略。该能量传输策略下能量路由器能量存储占用水平的稳定性通过数值算例得到了进一步的分析和验证。

6.2　本研究存在的不足以及对未来研究的展望

本研究从能量管理的角度为几种典型的区域能源互联网应用场景提供了相应的控制与优化方法，为未来能源互联网系统的发展提供了一定的支撑。但是，本研究仍存在一些不足之处，在未来的研究中需要加以改进。

首先，本研究主要针对多微网这一典型的区域能源互联网系统开展。在能源互联网系统中，能源开采与交易，交通与能源运输系统，制冷制热系统等周边系统具有与电力系统同样重要的地位。电力系统和上述周边系统的交互与协同控制必然将成为相关领域研究的重点。本研究中提出的控制方法在这类区域能源互联网系统中的应用和进一步改进是值得进一步研究的问题。

其次，由于能源互联网概念与相关技术尚在发展过程中，能量路由器等核心设备仍然处于理论研究和原型机的设计阶段。本研究提出的控制方法暂时只能通过理论分析和数值仿真的方式进行验证，而无法在现实的多微网系统中进行实际测试。为了提高相关方法的可靠性，在未来的研究中，有必要利用经过实践检验的电力系统仿真软件对本章提出的多微网系统控制与优化方法进行验证，并最终在实际的能源互联网系统中进行测试和物理仿真。

最后，本研究分别针对区域能源互联网系统中不同层次和时间尺度的控制问题开展。在实际的应用中，相关的控制方法需要彼此配合以保障能源互联网系统的稳定运行。在未来的研究中，有必要发展一套统一的区域能源互联网系统能量管理框架。从而实现对本章提出的控制方法的有序组织和协调。

参考文献

[1] Schleussner C F, Rogelj J, Schaeffer M, et al. Science and policy characteristics of the paris agreement temperature goal. Nature Climate Change, 2016, 6(9):827-835.

[2] 联合国 2030 年可持续发展议程 [EB/OL]. 2015. https://www.un.org/sustainabledevelopment/zh/development-agenda/.

[3] 沈镭, 钟帅, 胡纾寒. 全球变化下资源利用的挑战与展望. 资源科学, 2018, 40(1):1-10.

[4] 张晓辉, 闫鹏达, 钟嘉庆, 等. 可再生能源激励制度下的低碳经济电源规划. 电网技术, 2015, 39(3):655-662.

[5] Lasseter R, Akhil A, Marnay C, et al. The CERTS microgrid concept. White paper for Transmission Reliability Program, Office of Power Technologies, US Department of Energy, 2002, 2 (3):30.

[6] Lasseter R H, Piagi P. Microgrid: A conceptual solution // 2004 IEEE 35th Annual Power Electronics Specialists Conference: volume 6. Aachen, Germany: IEEE, 2004: 4285-4290.

[7] Lasseter R H, Eto J H, Schenkman B, et al. CERTS microgrid laboratory test bed. IEEE Transactions on Power Delivery, 2011, 26(1):325-332.

[8] 王成山, 王守相. 智能微网在分布式能源接入中的作用与挑战. 中国科学院院刊, 2016, 31 (2):232-240.

[9] Lopes J P, Moreira C, Madureira A. Defining control strategies for microgrids islanded operation. IEEE Transactions on Power Systems, 2006, 21(2):916-924.

[10] Hua H, Qin Y, Cao J. A class of optimal and robust controller design for islanded microgrid // 2017 IEEE 7th International Conference on Power and Energy Systems. Toronto, Canada: IEEE, 2017: 111-116.

[11] Fang X, Yang Q, Wang J, et al. Coordinated dispatch in multiple cooperative autonomous islanded microgrids. Applied Energy, 2016, 162:40-48.

[12] Bevrani H, Feizi M R, Ataee S. Robust frequency control in an islanded microgrid: H_∞ and μ-synthesis approaches. IEEE Transactions on Smart Grid, 2016, 7(2):706-717.

[13] Huang A Q, Crow M L, Heydt G T, et al. The future renewable electric energy delivery and management (FREEDM) system: the energy internet. Proceedings of the IEEE, 2011, 99(1): 133-148.

[14] Soshinskaya M, Crijns-Graus W H, Guerrero J M, et al. Microgrids: Experiences, barriers and success factors. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2014, 40:659-672.

[15] Heymann B, Bonnans J F, Silva F, et al. A stochastic continuous time model for microgrid energy management // European Control Conference. 2016: 2084-2089.

[16] Barnes M, Kondoh J, Asano H, et al. Real-world microgrids–an overview // 2007 IEEE International Conference on System of Systems Engineering. San Antonio, TX, USA: IEEE, 2007: 1-8.

[17] Microgrid projects [EB/OL]. http://microgridprojects.com/.

[18] Cao J, Yang M. Energy internet–towards smart grid 2.0 // 2013 4th International Conference on Networking and Distributed Computing. IEEE, 2013: 105-110.

[19] 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. 电力系统自动化, 2014, 38(15):1-11.

[20] 曹军威, 万宇鑫, 涂国煜, 等. 智能电网信息系统体系结构研究. 计算机学报, 2013.

[21] 邓建玲, 王飞跃, 陈耀斌, 等. 从工业 4.0 到能源 5.0: 智能能源系统的概念, 内涵及体系框架. 自动化学报, 2015, 41(12):2003-2016.

[22] Cosovic M, Tsitsimelis A, Vukobratovic D, et al. 5G mobile cellular networks: Enabling distributed state estimation for smart grids. IEEE Communications Magazine, 2017, 55(10):62-69.

[23] Bui N, Castellani A P, Casari P, et al. The internet of energy: A web-enabled smart grid system. IEEE Network, 2012, 26(4):39-45.

[24] Cao J, Hua H, Ren G. Energy use and the Internet // The SAGE Encyclopedia of the Internet. 2018: 343-350.

[25] 张小平, 李佳宁, 付灏. 全球能源互联网对话工业 4.0. 电网技术, 2016, 6:1607-1611.

[26] Anderson R N. Building the energy internet. Economist, 2004.

[27] 武魏楠. 能源互联网暗战升级. 能源, 2015(4):30-37.

[28] Rifkin J. The third industrial revolution: how lateral power is transforming energy, the economy, and the world. New York: Palgrave Macmillan, 2013: 31-46.

[29] 曹军威, 孙嘉平. 能源互联网与能源系统. 中国电力出版社, 2016.

[30] 孙宏斌, 郭庆来, 潘昭光, 等. 能源互联网: 理念, 架构与前沿展望. 电力系统自动化, 2015, 39(19):1G8.

[31] 王继业, 郭经红, 曹军威, 等. 能源互联网信息通信关键技术综述. 智能电网, 2015, 3(6): 473-485.

[32] 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. 中国电机工程学报, 2015, 35(14):3649-3655.

[33] 任光, 杨刚, 华昊辰, 等. 基于链式路由网络的能源接入管理策略研究. 计算机研究与发展, 2017, 54(4):695-702.

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

[35] Xu Y, Zhang J, Wang W, et al. Energy router: Architectures and functionalities toward energy internet // 2011 IEEE International Conference on Smart Grid Communications. IEEE, 2011: 31-36.

[36] Ma Y, Wang X, Zhou X, et al. An overview of energy routers // 2017 29th Chinese Control And Decision Conference. Chongqing, China: IEEE, 2017: 4104-4108.

[37] Hambridge S, Huang A Q, Yu R. Solid state transformer (sst) as an energy router: Economic dispatch based energy routing strategy // 2015 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition. IEEE, 2015: 2355-2360.

[38] Qin Y, Hua H, Cao J. Stochastic optimal control scheme for battery lifetime extension in islanded microgrid via a novel modeling approach. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 10(4):4467-4475.

[39] Qin Y, Hua H, Cao J. Short-term energy cache regulation for energy router: A robust h-infinity approach // 2019 IEEE International Conference on Energy Internet. Nanjing, China: IEEE, 2019: 161-166.

[40] Hua H, Cao J, Yang G, et al. Voltage control for uncertain stochastic nonlinear system with application to energy Internet: Non-fragile robust H_∞ approach. Journal of Mathematical Analysis and Applications, 2018, 463(1):93-110.

[41] Hua H, Qin Y, Cao J. Coordinated frequency control for multiple microgrids in energy Internet: A stochastic H_∞ approach // 2018 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies - Asia. Singapore: IEEE, 2018: 810-815.

[42] Hua H, Qin Y, Hao C, et al. Stochastic optimal control for energy Internet: A bottom-up energy management approach. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2018, 15(3):1788-1797.

[43] Bevrani H, François B, Ise T. Microgrid dynamics and control. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, 2017.

[44] 周天沛, 孙伟. 基于微网的电动汽车与电网互动技术. 电力系统自动化, 2018, 42(3):98-104.

[45] Jain R K, Qin J, Rajagopal R. Data-driven planning of distributed energy resources amidst socio-technical complexities. Nature Energy, 2017, 2(8):17112.

[46] Thomas L, Zhou Y, Long C, et al. A general form of smart contract for decentralized energy systems management. Nature Energy, 2019, 4(2):140-149.

[47] Jang H S, Bae K Y, Park H S, et al. Solar power prediction based on satellite images and support vector machine. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2016, 7(3):1255-1263.

[48] Shi H, Xu M, Li R. Deep learning for household load forecasting–a novel pooling deep rnn. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 9(5):5271-5280.

[49] Sutton R S, Barto A G. Reinforcement learning: An introduction. IEEE Transactions on Neural Networks, 1998, 9(5):1054-1054.

[50] Vachirasricirikul S, Ngamroo I. Robust controller design of microturbine and electrolyzer for frequency stabilization in a microgrid system with plug-in hybrid electric vehicles. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2012, 43(1):804-811.

[51] Vachirasricirikul S, Ngamroo I. Robust controller design of heat pump and plug-in hybrid electric vehicle for frequency control in a smart microgrid based on specified-structure mixed H_2/H_∞ control technique. Applied Energy, 2011, 88(11):3860-3868.

[52] Odun-Ayo T, Crow M L. Structure-preserved power system transient stability using stochastic energy functions. IEEE Transactions on Power Systems, 2012, 27(3):1450-1458.

[53] Hua H, Hao C, Qin Y, et al. Stochastic robust H_∞ control strategy for coordinated frequency regulation in energy internet considering time delay and uncertainty. 13th World Congress on Intelligent Control and Automation, 2018:111-118.

[54] Touzi N. Stochastic control problems, viscosity solutions and application to finance. 1st ed. Springer, 2017.

[55] Zimmerman R D, Murillo-Sánchez C E, Thomas R J. MATPOWER: Steady-state operations, planning, and analysis tools for power systems research and education. IEEE Transactions on Power Systems, 2011, 26:12-19.

[56] Pourbabak H, Luo J, Chen T, et al. A novel consensus-based distributed algorithm for economic dispatch based on local estimation of power mismatch. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 9:5930-5942.

[57] Kou P, Liang D, Gao L, et al. Stochastic coordination of plug-in electric vehicles and wind turbines in microgrid: A model predictive control approach. IEEE Transactions on Smart Grid, 2016, 7:1537-1551.

[58] Pahasa J, Ngamroo I. PHEVs bidirectional charging/discharging and SoC control for microgrid frequency stabilization using multiple MPC. IEEE Transactions on Smart Grid, 2015, 6:526-533.

[59] Kou P, Gao F, Guan X. Stochastic predictive control of battery energy storage for wind farm dispatching: Using probabilistic wind power forecasts. Renewable Energy, 2015, 80:286-300.

[60] Molzahn D K, Dörfler F, Sandberg H, et al. A survey of distributed optimization and control algorithms for electric power systems. IEEE Transactions on Smart Grid, 2017, 8:2941-2962.

[61] Wang Y, Wu L, Wang S. A fully-decentralized consensus-based ADMM approach for DC-OPF with demand response. IEEE Transactions on Smart Grid, 2017, 8:2637-2647.

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

[63] Silver D, Schrittwieser J, Simonyan K, et al. Mastering the game of go without human knowledge. Nature, 2017, 550:354-359.

[64] Zhang J, Lu C, Fang C, et al. Load shedding scheme with deep reinforcement learning to improve short-term voltage stability. 2018 IEEE Innovative Smart Grid Technologies - Asia, 2018:13-18.

[65] Yousefian R, Kamalasadan S. Energy function inspired value priority based global wide-area control of power grid. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 9(2):552-563.

[66] Mocanu E, Mocanu D C, Nguyen P H, et al. On-line building energy optimization using deep reinforcement learning. IEEE Transactions on Smart Grid, 2019, 10(4):3698-3708.

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

[68] Zhai M Y. A new method for short-term load forecasting based on fractal interpretation and wavelet analysis. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2015, 69:241-245.

[69] Zhu H, Li X, Sun Q, et al. A power prediction method for photovoltaic power plant based on wavelet decomposition and artificial neural networks. Energies, 2016, 9(1):11.

[70] Marino D L, Amarasinghe K, Manic M. Building energy load forecasting using deep neural networks // IECON 2016-42nd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society. Florence, Italy: IEEE, 2016: 7046-7051.

[71] Milano F, Zárate-Miñano R. A systematic method to model power systems as stochastic differential algebraic equations. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28(4):4537-4544.

[72] Dataport, Pecan Street Inc. [EB/OL]. 2018. https://dataport.cloud/.

[73] Pysolar [EB/OL]. 2020. https://pysolar.org/.

[74] Dougherty E R, Kim S, Chen Y. Coefficient of determination in nonlinear signal processing. Signal Processing, 2000, 80(10):2219-2235.

[75] 徐舒玮, 邱才明, 张东霞, 等. 基于深度学习的输电线路故障类型辨识. 中国电机工程学报, 2019, 39(1):65-74.

[76] Alili L, Patie P, Pedersen J L. Representations of the first hitting time density of an ornstein-uhlenbeck process. Stochastic Models, 2005, 21(4):967-980.

[77] Carnegie R, Gotham D, Nderitu D, et al. Utility scale energy storage systems. State Utility Forecasting Group, 2013, 1.

[78] Petrov A Y, Zaltash A, Labinov S D, et al. Dynamic performance of a 30-kW microturbine-based CHP system. Ashrae Transactions, 2005, 111(1):802-809.

[79] Wei Q, Liu D, Liu Y, et al. Optimal constrained self-learning battery sequential management in microgrid via adaptive dynamic programming. IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica, 2016, 4(2):168-176.

[80] Zhao B, Zhang X, Chen J, et al. Operation optimization of standalone microgrids considering lifetime characteristics of battery energy storage system. IEEE transactions on Sustainable Energy, 2013, 4(4):934-943.

[81] Kanapady R, Kyle K Y, Lee J. Battery life estimation model and analysis for electronic buses with auxiliary energy storage systems // 2017 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition. IEEE, 2017: 945-950.

[82] Tran D, Khambadkone A M. Energy management for lifetime extension of energy storage system in micro-grid applications. IEEE Transactions on Smart Grid, 2013, 4(3):1289-1296.

[83] Date P, Gashi B. Generalised risk-sensitive control with full and partial state observation. Journal of Mathematical Modelling and Algorithms in Operations Research, 2014, 13(1):87-101.

[84] Bonnans F, Giorgi D, Heymann B, et al. Bocophjb 1.0. 1–user guide. 2015.

[85] Elsayed A T, Mohamed A A, Mohammed O A. DC microgrids and distribution systems: An overview. Electric Power Systems Research, 2015, 119:407-417.

[86] Zhu H, Liu H J. Fast local voltage control under limited reactive power: Optimality and stability analysis. IEEE Transactions on Power Systems, 2016, 31(5):3794-3803.

[87] Cavraro G, Carli R. Local and distributed voltage control algorithms in distribution networks. IEEE Transactions on Power Systems, 2018, 33(2):1420-1430.

[88] Khorsandi A, Ashourloo M, Mokhtari H, et al. Automatic droop control for a low voltage DC microgrid. IET Generation, Transmission & Distribution, 2016, 10(1):41-47.

[89] Simpson-Porco J W, Dörfler F, Bullo F. Voltage stabilization in microgrids via quadratic droop control. IEEE Transactions on Automatic Control, 2017, 62(3):1239-1253.

[90] Akinyele D, Rayudu R. Review of energy storage technologies for sustainable power networks. Sustainable Energy Technologies and Assessments, 2014, 8:74-91.

[91] Wen G, Hu G, Hu J, et al. Frequency regulation of source-grid-load systems: A compound control strategy. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2016, 12(1):69-78.

[92] Khodaei A, Bahramirad S, Shahidehpour M. Microgrid planning under uncertainty. IEEE Transactions on Power Systems, 2015, 30(5):2417-2425.

[93] Milliken P, Marsh C, Van Brunt B. Minimax controller design for a class of uncertain linear systems. Automatica, 1999, 35(4):583-590.

[94] Arceo J C, Sánchez M, Estrada-Manzo V, et al. Convex stability analysis of nonlinear singular systems via linear matrix inequalities. IEEE Transactions on Automatic Control, 2018, 64(4): 1740-1745.

[95] Aghaei J, Alizadeh M I. Demand response in smart electricity grids equipped with renewable energy sources: A review. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2013, 18:64-72.

[96] Chaouachi A, Kamel R M, Andoulsi R, et al. Multiobjective intelligent energy management for a microgrid. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2013, 60(4):1688-1699.

[97] Huang Y, Yuan X, Hu J, et al. DC-bus voltage control stability affected by AC-bus voltage control in vscs connected to weak AC grids. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2016, 4(2):445-458.

[98] Chaudhuri B, Majumder R, Pal B C. Wide-area measurement-based stabilizing control of power system considering signal transmission delay. IEEE Transactions on Power Systems, 2004, 19 (4):1971-1979.

[99] Cao J, Wan Y, Hua H, et al. Delay analysis for end-to-end synchronous communication in monitoring systems. Sensors, 2018, 18(11):3615.

[100] Xu S, Chen T. Robust h-infinity control for uncertain stochastic systems with state delay. IEEE Transactions on Automatic Control, 2002, 47(12):2089-2094.

[101] Zhang F. The schur complement and its applications: volume 4. Springer Science & Business Media, 2006.

[102] Grant M, Boyd S, Ye Y. CVX: Matlab software for disciplined convex programming. 2009.

[103] Bilgen S, Kaygusuz K, Sari A. Renewable energy for a clean and sustainable future. Energy Sources, 2004, 26(12):1119-1129.

[104] Rajasekar N, Kumar N K, Venugopalan R. Bacterial foraging algorithm based solar pv parameter estimation. Solar Energy, 2013, 97:255-265.

[105] Ding F. Combined state and least squares parameter estimation algorithms for dynamic systems. Applied Mathematical Modelling, 2014, 38(1):403-412.

[106] 钟万勰. 线性二次最优控制的精细积分法. 自动化学报, 2001, 27(2):166-173.

[107] Moon J, Başar T. Linear quadratic risk-sensitive and robust mean field games. IEEE Transactions on Automatic Control, 2016, 62(3):1062-1077.

[108] Hua H, Qin Y, Geng J, et al. Robust mixed H_2/H_∞ controller design for energy routers in energy Internet. Energies, 2019, 12(3):340.

[109] Wang R, Wu J, Qian Z, et al. A graph theory based energy routing algorithm in energy local area network. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2017, 13(6):3275-3285.

[110] 孙平. 鲁棒 H_∞ 控制理论与应用. 清华大学出版社, 2012.

[111] Marami B, Haeri M. Implementation of MPC as an AQM controller. Computer Communications, 2010, 33(2):227-239.

[112] Sun Q, Zhang Y, He H, et al. A novel energy function-based stability evaluation and nonlinear control approach for energy internet. IEEE Transactions on Smart Grid, 2017, 8(3):1195-1210.

[113] Diamond S, Boyd S. CVXPY: A Python-embedded modeling language for convex optimization. Journal of Machine Learning Research, 2016, 17(83):1-5.

[114] Agrawal A, Verschueren R, Diamond S, et al. A rewriting system for convex optimization problems. Journal of Control and Decision, 2018, 5(1):42-60.

致　谢

衷心感谢导师曹军威研究员和华昊辰博士在过去几年中对本人的悉心指导和帮助。我在研究生期间取得的成绩和进步离不开他们的教导和启发。

感谢郝传统，尤海霞等师兄师姐以及秦兆铭等师弟在学习、科研和工作中对我提供的无私帮助和支持。与他们的合作和交流对我的学习和科研起到了很大的帮助。同时也感谢实验室的其他博士后和工作人员在我研究生学习期间对我提供的帮助和启发。

在我过去几年的学习和生活中，我的父母也为我提供了莫大的关怀和帮助。他们的支持和鼓励是我直面科研和生活中遇到的种种困难和挫折，带着勇气和毅力不断前行的最大动力。在此我要对我的父母表示衷心的感谢。

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、在学期间发表的学术论文与研究成果

个人简历

1994 年 2 月 24 日出生于河南省林州市。

2013 年 8 月考入清华大学自动化系，2017 年 7 月本科毕业并获得工学学士学位。

2017 年 9 月免试进入清华大学自动化系攻读工学硕士学位至今。

发表的学术论文

[1] Qin Y, Hua H, Cao J. Stochastic optimal control scheme for battery lifetime extension in islanded microgrid via a novel modeling approach. IEEE Transactions on Smart Grid, 2019, 10(4):4467–4475. (SCI 收录, 检索号: IE7TP, 影响因子: 10.486)

[2] Qin Y, Hua H, Cao J. Short-term energy cache regulation for energy router: A robust H-Infinity approach // IEEE International Conference on Energy Internet. Nanjing, China: IEEE, 2019: 161–166. (EI 收录, 检索号: 20193607393015)

[3] Qin Y, Hua H, Cao J. Energy internet system control and optimization: A stochastic risk-sensitive control approach // 2019 IEEE 15th International Conference on Control and Automation. Edinburgh, United kingdom: IEEE, 2019: 79–84. (EI 收录, 检索号: 20194907778936)

[4] Hua H, Qin Y, Xu H, et al. Robust control method for DC microgrids and energy routers to improve voltage stability in energy internet. Energies, 2019, 12(9):1622. (SCI 收录, 检索号: IA7UD, 影响因子: 2.707)

[5] Hua H, Qin Y, Hao C, et al. Stochastic optimal control for energy internet: A bottom-up energy management approach. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2019, 15(3):1788–1797. (SCI 收录, 检索号: HO0GN, 影响因子: 7.377)

研究成果

[1] 曹军威, 秦钰超, 华昊辰, 等. 微网运行成本最小化的控制处理方法与装置: 中国, CN107317324B. (中国专利公开号)

[2] 曹军威, 秦钰超, 华昊辰, 等. 一种光伏发电功率预测的方法和装置: 中国,

CN107491833A. (中国专利公开号)

[3] 华昊辰, 曹军威, 秦钰超. 基于能源互联网的能量管理方法及装置: 中国, CN109274092A. (中国专利公开号)