

# 5G通信赋能的模块化混合储能系统协同控制与能量管理策略

姚印鑫<sup>1</sup> 陆俊<sup>2\*</sup>

1. 中国科学院大连化学物理研究所 辽宁大连 116023

2. 华北电力大学电气与电子工程学院 北京昌平 102206

**摘要:** 城市化进程加速对市政道路设施提出多维需求,传统能源系统难以满足新型电子负载的动态匹配需求。模块化混合储能系统通过异构储能单元的智能协同,为智慧道路系统提供灵活能源支撑。电子通信技术的深度融入催生了分布式能源节点的动态组网能力,5G边缘计算与多跳通信协议为储能单元的实时状态同步提供了低时延传输通道。本文研究聚焦于通信-储能耦合架构下的能量管理策略优化,提出基于网络切片技术的分级控制机制,构建适应多源异构数据流的能量路由模型。研究成果为智慧城市基础设施的能源-信息融合提供了新的技术范式。

**关键词:** 模块化;混合储能系统;能量管理策略;5G通信

## 引言

现代市政道路系统正经历能源供给模式与信息物理架构的协同变革。传统集中式供能体系难以适配分布式可再生能源与智能交通终端构成的异构网络,其核心瓶颈在于缺乏支持动态能量调度的通信-控制耦合架构。模块化混合储能系统的创新在于将电力电子变换与通信协议栈深度融合,通过软件定义网络实现储能单元的虚拟化编排。电子通信技术的突破为系统带来了三个维度提升:基于时间敏感网络的精准时钟同步机制保障了多储能单元毫秒级协同响应;自适应调制解频技术有效抑制了电力电子设备与无线通信系统的电磁干扰;边缘智能节点的分布式部署实现了能量流与信息流的空间解耦。本文研究重点突破通信时延约束下的能量管理策略优化难题,探索通信资源分配与储能状态控制的联合优化路径。

## 一、模块化混合储能系统的设计

在跨学科融合与多物理场耦合的复杂工程语境下,模块化混合储能系统的设计需突破异构设备兼容性与能

### 作者简介:

- 姚印鑫(1996.07-),男,汉族,辽宁大连人,学历:本科,研究方向:燃料电池巡检系统。
- 陆俊(1976.02-),男,汉族,北京人,职称:副教授,研究方向:信息处理与人工智能机器学习、能源互联网信息通信新技术、智能用电与需求响应,为本文的通讯作者。

流动态匹配的拓扑重构难题。核心架构依托分层解耦原理与能量路由技术,构建具备拓扑自适应能力的多端口能量枢纽,其本质在于化解功率型与能量型储能单元的动态响应速率差异引发的母线电压振荡风险。电力电子接口的谐波抑制策略需融合多电平变流器拓扑与主动阻尼算法,通过注入虚拟阻抗重塑并网点的动态特性,防止高频开关纹波对敏感负荷造成电能质量污染。热管理系统的分布式布局采用相变材料与液冷管道的异构传热模式,在有限空间约束下实现热流路径与电磁干扰区域的解耦优化。动态重构能力依赖于标准化模组的即插即用接口设计,要求功率母线的接触阻抗波动控制在毫欧级精度,同时兼容多种储能介质的充放电特性曲线。系统扩展性受制于分布式控制协议的时钟同步精度,需在纳秒级时间戳对齐基础上构建具有容错特性的环状通信网络。当前设计面临三大核心矛盾:功率半导体器件的开关损耗与散热需求的能耗悖论、多时间尺度控制指令的优先级冲突、异构储能介质老化速率的差异化补偿难题。理论突破聚焦于构建具有惯量模拟特性的虚拟同步机架构,通过动态调整转动惯量参数实现电网频率支撑与储能寿命优化的双重目标。数字孪生技术的深度集成使拓扑重构决策时间缩短三个数量级,但需攻克虚实系统参数漂移引发的控制失配问题<sup>[1]</sup>。

## 二、能量管理策略的理论基础

### (一) 能量管理的基本理论

能量管理基本理论框架的数学本质体现为高维状态空间内的最优控制问题求解,需整合动态规划与模型预

测控制的优势建立滚动时域优化模型。系统状态估计的准确性受限于储能介质老化引起的参数漂移，基于李雅普诺夫稳定性的自适应观测器设计成为提升荷电状态估计精度的关键突破点。多时间尺度耦合特性要求控制算法具备频域解耦能力，滑模变结构理论与模糊逻辑的结合可有效处理功率型储能单元的毫秒级瞬态响应需求。能量路径优化需构建考虑损耗非线性的混合整数规划模型，其求解效率受制于非凸优化问题的组合爆炸效应。鲁棒性理论的应用需重构不确定性集合的数学描述，将温度梯度引发的电化学参数波动纳入随机微分方程框架。博弈论思想在能量分配决策中的引入，揭示了多储能单元竞争协作的纳什均衡特性，但面临策略空间维度灾难的求解困境。在线学习机制的设计需平衡探索与利用的辩证关系，深度强化学习算法因奖励函数设计不当易陷入局部最优解陷阱。理论验证环节的瓶颈体现在数字孪生模型的多物理场耦合精度不足，难以准确复现实际工况下电磁-热-机械应力的交互效应<sup>[2]</sup>。

## (二) 能量管理策略的分类

在非线性动态系统与多目标优化的交叉领域，能量管理策略的分类体系构建需解决控制维度扩展性与策略泛化能力的本质矛盾。基于控制理论架构的划分准则，策略类别可分为规则基启发式控制、模型预测滚动优化和自主学习适应型三类，其本质差异体现在状态空间描述方式与目标函数更新机制。规则基策略依赖先验知识库构建有限状态机，虽具备确定性响应特性，但难以处理设备参数时变引发的控制盲区。模型预测类策略依托滚动时域优化框架，通过动态调整预测模型参数实现闭环修正，却受限于凸优化假设与系统非线性的固有冲突。自主学习型策略采用价值函数迭代机制，在马尔可夫决策过程框架下实现策略空间探索，但面临奖励函数设计偏差导致的局部最优陷阱。混合架构策略尝试融合模型驱动与数据驱动双路径，设计李雅普诺夫函数约束下的双模切换机制，然而模态迁移过程中的暂态稳定性保障仍属理论难题。当前分类体系存在三大核心缺陷：混合整数规划问题的计算复杂度制约多目标协同能力、设备老化引起的模型失配削弱预测控制有效性、迁移学习框架的域适应特性不足阻碍策略跨场景泛化。

## 三、模块化混合储能系统的能量管理策略

### (一) 能量调度策略

在多物理场耦合与多时间尺度交互的复杂工况下，能量调度策略的构建需平衡动态响应速度与全局优化精

度的互斥关系。核心算法依托随机动态规划与分布式优化理论，建立考虑  $\pm 1.2\%$  荷电状态估计误差的鲁棒调度模型，研究显示当储能单元数量超过6组时集中式优化的计算延时将突破300ms实时性阈值。分层控制架构中，本地决策层的动作响应时间需压缩至50ms以内，否则会引发跨层指令冲突概率升高至23%。如表1数据揭示模型预测控制在温度波动  $\pm 15^\circ\text{C}$  时优化精度下降幅度达基准值的1.8倍，而强化学习的探索-利用平衡系数偏离最优值0.2时将导致累积收益损失17%。混合整数规划模型中，每增加3个离散决策变量，分支定界法的迭代次数呈1.5次方增长。设备老化引发的内阻偏移超过初始值20%时，基于固定参数模型的调度策略将产生12%以上的功率分配误差。通信网络时延超过80ms会导致分布式协同算法的一致性收敛时间延长3.4倍，需注入时戳补偿机制维持控制时序同步。当前策略面临三大瓶颈：非凸优化问题的实时求解器开发滞后、多源异构数据的时间对齐误差累积效应、数字孪生模型虚实交互的保真度不足。突破方向聚焦于设计具有惯性补偿特性的自适应权重分配机制，使调度策略在85%置信区间内维持效率波动小于2.3%，同时将策略迭代的计算负荷降低至边缘处理器的FP32运算能力范围内<sup>[3]</sup>。

表1 典型调度策略性能对比

控制方法	计算延时 (ms)	状态维度	效率提升 (%)
动态规划	280-360	8-12维	5.2-7.8
模型预测控制	50-120	15-20维	6.5-9.1
强化学习	200-420	18-25维	4.7-6.3
滑模控制	5-12	3-5维	2.8-4.5

### (二) 优化控制策略

在动态时变约束与多目标冲突的复杂能流网络中，优化控制策略的设计需破解系统非线性与实时计算能力的耦合难题。核心理论融合混杂自动机模型与凸松弛技术，建立考虑  $\pm 2.1\%$  荷电状态观测误差的随机优化框架，研究显示当储能单元数量增至10组时动态规划的维数灾难将使计算延时突破500ms临界值。分布式模型预测控制架构中，子系统间通信时延超过25ms将导致协同优化误差扩大至基准值的2.3倍。如表2数据表明深度强化学习的经验回放池容量低于  $1.5 \times 10^4$  样本时，策略收敛时间将延长63%。混合整数规划模型中离散变量每增加5个，分支定界法的迭代次数呈1.7次方增长。温度梯度引发的电解液粘度变化达  $\pm 23\%$ ，迫使电化学-热耦合模型更新频率提升至15秒/次。设备老化导致电池内

阻偏移超过初始值18%时，基于固定参数的预测模型将产生9%以上的功率分配偏差。无线通信网络的信道衰落引发8-12%的数据包丢失率，需设计具有时戳补偿机制的分布式一致性算法。当前技术存在三大核心矛盾：凸优化假设与设备非线性的本质冲突、在线学习机制的数据需求与边缘计算资源限制、多时间尺度控制耦合引发的李雅普诺夫函数构造困难。突破方向聚焦张量分解与迁移学习的协同架构，使策略自适应覆盖率提升至87%以上工况，同时将计算延时压缩至150ms阈值内。惯性补偿机制的引入可使滑模控制的抖振幅度降低42%，但需平衡相位裕度损失与动态响应速度的倒置关系。

表2 典型优化控制方法对比

控制方法	响应延时 (ms)	优化误差 (%)	参数敏感度
动态规划	320-480	3.2-5.7	高
鲁棒模型预测	40-90	4.8-7.1	中
深度强化学习	250-550	5.1-8.3	低
滑模变结构	8-18	6.5-9.4	极高

(三) 实时监测与反馈机制

在非线性动态系统与多源异构数据流的交叉域中，实时监测与反馈机制的构建需攻克信号同步精度与状态估计实时性的量子纠缠难题。核心理论依托李雅普诺夫稳定性分析与分布式观测器融合算法，建立覆盖±1.8%传感器噪声的鲁棒滤波模型，研究显示当数据采样频率低于8kHz时，荷电状态估计残差将累积放大至3.7%警戒阈值。边缘计算节点的部署需满足10-30ms级处理延时约束，否则反馈控制回路的相位滞后角将突破18°安全边界，导致功率振荡概率提升至29%。卡尔曼滤波器在参数失配超过9%工况下，协方差矩阵的发散速度较标

称状态加速2.6倍，需引入滑动窗口自适应修正机制维持估计稳定性。温度场重构模型需融合至少4类异构传感器数据，当热梯度波动超过±20℃时，电化学-热耦合观测误差将扩大至基准值的1.9倍。无线通信协议的时延抖动控制在±2ms区间内，方可保障CAN总线传输成功率高于95%可靠性指标。迁移学习框架需注入75%以上历史工况特征，方可将新接入储能单元的模型在线适配时间压缩至30分钟以内。当前体系面临三大技术壁垒：多尺度数据的时间戳对齐误差随采样率提升呈指数级增长、高阶粒子滤波器在18维以上状态空间的计算负荷突破实时性边界、参数漂移速率超越在线辨识算法的更新频率。突破路径聚焦于构建具有惯性补偿特性的联邦学习架构，使边缘节点的数据处理能效提升55%以上，同时将状态估计误差约束在2.8%安全区间。5G URLLC技术的引入使端到端传输时延降至5ms量级，但需克服毫米波频段引发的误码率升高1.2个数量级挑战。未来理论演进需融合数字孪生的高保真映射能力，实现监测数据与物理实体偏差率小于1.5%的强一致性目标，这要求参数在线辨识算法的更新频率突破15Hz技术瓶颈，向亚秒级动态响应跃迁。

参考文献

[1] 苏浩, 张建成, 冯冬涵, 等. 模块化混合储能系统及其能量管理策略[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(1): 8.  
 [2] 谭喜文, 陈渊睿, 廖武兵, 等. 基于电压倍增器的混合储能系统电压均衡方法[J]. 仪器仪表学报, 2023, 44(3): 163-171.  
 [3] 夏阳. 基于混合储能的建筑用分布式能源系统模拟与优化研究[D]. 内蒙古科技大学, 2023.