

# 热能动力系统智能化控制策略研究

李燕皇

控软自动化技术(北京)有限公司 北京 100176

**摘要:** 随着能源危机与环境污染问题日益严峻, 热能与动力工程作为国民经济的重要支撑领域, 亟需通过智能化控制手段提升系统运行效率、降低能耗并减少排放。近年来, 人工智能、大数据、物联网等新兴技术在能源动力领域的应用不断深化, 为热能动力系统的优化运行提供了新的理论基础与实践路径。本文从智能化控制的基本原理出发, 系统梳理了热能动力系统的构成与运行特点, 分析了现有控制策略的不足, 提出了面向多目标优化的智能化控制方法, 包括预测控制、模糊控制、群体智能算法与深度学习优化等。通过对锅炉、汽轮机、区域供热系统等典型设备与系统的案例研究, 验证了智能化控制的有效性与前瞻性。研究表明, 智能化控制不仅能够提升热能动力系统的整体能效与安全性, 还可为能源结构转型与碳中和目标的实现提供重要技术支撑。

**关键词:** 热能动力系统; 智能化控制; 预测控制; 群体智能; 能效优化

## 引言

热能动力系统涵盖锅炉、汽轮机、余热回收、区域供热等多个环节, 是能源利用与转化的重要组成部分。然而, 传统控制方式多依赖人工经验或固定参数模型, 难以应对能源需求波动、燃料品质差异与外部环境扰动等复杂工况。这不仅导致能源浪费和设备运行风险, 也制约了行业的可持续发展。智能化控制技术以其自适应性、实时优化性与全局协调能力, 为热能动力系统的高效运行提供了新契机。本文旨在构建适应复杂工况的智能化控制策略框架, 提升热能动力系统的综合能效。

## 一、热能动力系统运行特征与控制需求

### 1. 系统结构与运行特性分析

热能动力系统通常由燃料供应、燃烧单元、热力转换装置、能量输配网络以及余热回收环节构成, 其功能在于实现燃料化学能向热能、机械能及电能的有序转化。锅炉作为核心设备, 承担燃料燃烧与热能释放的主要任务; 汽轮机则通过蒸汽膨胀完成能量的机械输出; 供热管网和余热利用装置在下游环节进一步实现能量的空间转移与梯级利用。这一系统结构体现出高度的耦合性和层级性, 不同单元之间既存在能量与物质的传递关系, 也形成复杂的动态反馈机制。因此, 任何局部环节的扰动都会对系统整体运行状态产生放大效应。

热能动力系统在长期运行过程中表现出多维度的复杂性。首先, 其动力学过程高度非线性, 燃烧反应受燃料成分、空气供给、温度场分布等多因素耦合作用, 导

致系统状态呈现显著的动态非线性特征。其次, 系统具有显著的多变量耦合属性, 锅炉燃烧与汽轮机进汽条件、热网负荷需求之间相互制约, 形成典型的多输入多输出(MIMO)特性。此外, 系统运行目标具有多样性, 既需满足能效与经济性的要求, 又必须兼顾环境排放、安全稳定性与设备寿命等多重约束。在此基础上, 不确定性因素的存在进一步增加了控制难度, 例如燃料品质波动、外部气象条件变化以及设备老化带来的工况偏移, 均可能导致系统性能的显著波动。

### 2. 传统控制方式的局限与智能化控制的需求

在现有工程实践中, PID控制、串级控制及经验型调节策略仍是主流。这些方法在单变量、稳定工况下能够保证基本的运行需求, 但在复杂动态环境中往往力不从心。原因在于其模型基础多为线性假设, 难以准确反映系统的非线性本质; 在处理多变量耦合时缺乏协调机制, 容易导致局部最优与全局失衡; 在优化目标上, 传统方法通常聚焦于功率输出或供热温度的稳定, 而忽视了能效提升与排放控制的协同需求。此外, 传统方法依赖人工经验, 缺乏对大规模实时数据的利用能力, 因而在面对快速波动或突发扰动时, 表现出响应滞后甚至失稳的风险。

在“双碳”战略与能源转型的背景下, 热能动力系统对控制策略提出了更高要求。第一, 控制方法必须具备自适应性, 能够根据负荷变化与燃料特性自动修正控制参数, 保证运行的鲁棒性。第二, 需要引入预测能力, 基于历史数据与机理模型对未来状态进行推演, 从

而在扰动发生前完成主动调节。第三，全局协调成为智能化控制的核心诉求，即通过分布式控制与信息融合，将锅炉、汽轮机与供热管网等子系统纳入整体优化框架，并进一步拓展至与电力、天然气等其他能源系统的跨域协同。为了更加直观地展示传统控制方式与智能化控制方式的差异，本文将二者在控制模型、优化目标、适应能力、数据利用和系统协调等方面进行对比（见表1）。从表中可以看出，传统控制方法往往局限于单目标调节和经验参数修正，在多目标优化与复杂工况下存在明显不足；而智能化控制在方法论与实现路径上更加注重自适应性与全局协调，能够满足能效提升与碳排放控制的综合需求。

表1 传统控制方式与智能化控制方式的比较

对比维度	传统控制方式	智能化控制方式
控制模型	线性化模型，参数固定，依赖经验	机理模型与数据驱动相结合，具备自适应性
优化目标	单目标（功率输出或温度稳定）	多目标（能效、排放、安全、经济性）
适应能力	难以应对燃料品质波动、负荷变化	能根据实时数据与预测结果动态调整
鲁棒性	抗扰动性能有限，易出现滞后或失稳	具备较强鲁棒性，可在复杂工况下保持稳定
数据利用	依赖人工经验，缺乏大数据支持	融合实时监测与历史数据，具备学习能力
系统协调	以单机或单变量为主，缺乏全局优化	强调子系统间协同与跨能源系统耦合优化

## 二、热能动力系统智能化控制的理论基础

### 1. 智能化控制的理论框架

热能动力系统的运行过程涉及燃烧、换热、输运与能量分配等多个环节，表现出强非线性、参数不确定性和多目标约束的复杂特征。传统线性控制难以全面刻画其动态特性，往往在大扰动和复杂工况下表现出局限性。为此，智能化控制的理论框架应当同时依托机理模型和数据驱动两种思路：机理模型基于热力学与流体力学方程，能够揭示系统的物理规律并提供边界条件，而数据驱动方法通过大规模运行数据的学习，补充了机理模型在复杂非线性场景下的不足。二者的融合使控制系统既具有物理合理性，又能保持灵活性和自适应性，为实现预测性调度与全局优化奠定了基础。

这种“机理—数据双驱动”的框架不仅解决了传统建模难以完全捕捉实际工况的问题，也为复杂能源系统的优化提供了理论支撑。在该框架下，智能化控制能够在满足能效、经济性、安全性和环保等多目标约束的同

时，提升系统在动态环境下的鲁棒性和运行效率。

### 2. 控制方法与技术路径

在上述框架指导下，智能化控制的发展逐渐形成了多样化的技术路径。模型预测控制（MPC）通过滚动优化实现对未来状态的预测与调节，适用于锅炉燃烧和热网运行等多约束场景。模糊控制与专家系统则将经验知识转化为模糊规则，在不确定性较强的条件下表现出较好的鲁棒性。群体智能算法如遗传算法和粒子群优化，能够在燃烧配比、余热回收等问题中进行全局搜索，避免局部最优。近年来，深度学习与强化学习的引入则进一步扩展了系统的自适应与进化能力，能够在复杂环境中通过持续学习优化控制策略。在实际应用中，单一方法难以满足多维度需求，混合控制逐渐成为趋势。例如，将MPC的预测性与模糊控制的抗扰性结合，可同时实现优化与稳定；将群体智能算法与深度学习融合，则能够在多目标优化问题中提升计算效率与适应性。这类集成的技术路径，使热能动力系统能够在复杂工况下实现更高水平的协调运行与全局优化。

## 三、热能动力系统智能化控制的应用案例

### 1. 锅炉燃烧与汽轮机运行的智能控制实践

在传统燃煤锅炉中，燃料品质差异和负荷波动往往导致燃烧效率下降和污染物排放增加。通过引入基于模型预测控制（MPC）的燃烧调节策略，可以实现送风量、一次风与二次风比例以及煤粉给料速率的动态优化。该方法在保持主汽温度与蒸汽压力稳定的同时，有效降低了氮氧化物（NO<sub>x</sub>）排放，并提升锅炉热效率。与传统PID控制相比，MPC能够在约束条件下进行滚动优化，因而在面对负荷扰动和燃料不均一时表现出更强的稳定性和适应性。汽轮机的运行优化同样受益于智能化控制的引入。利用模糊控制与专家系统结合的方法，可以在不同负荷区间内实现蒸汽流量与阀门开度的动态匹配。该策略不仅改善了汽轮机的能量转换效率，也降低了频繁调节对设备带来的机械磨损。实践表明，在典型300MW机组的应用案例中，模糊专家控制可在负荷波动工况下维持汽轮机效率的相对稳定，并减少因人工操作不及时而引发的能效损失。由此可见，锅炉与汽轮机的智能控制已经在工程实践中展现出显著优势，为大型机组的安全、高效运行提供了有效支撑。

### 2. 区域供热与综合能源系统的智能调度

在城市供热系统中，传统的固定供水温度调节方式往往无法适应用户需求的动态变化，导致能源利用率低下。随着物联网和大数据技术的应用，区域供热管网可

实现温度、压力和流量的实时监测，并通过群体智能算法进行调度优化。该方法能够根据用户端负荷预测结果动态调整供回水温度与流量分配，从而在保证室内舒适度的前提下显著降低能耗。在某北方城市供热试点项目中，采用基于粒子群优化的管网调度模型，使得系统整体热损失降低约8%，供热效率提升超过5%。

在更大范围的综合能源系统中，智能化控制通过多能互补实现跨系统的协调优化。热能系统与电力系统、天然气系统在运行中存在紧密关联，例如联合供热电厂不仅承担电力输出，还需要兼顾热网的稳定运行。通过建立基于深度学习与强化学习的综合调度平台，可以实现不同能源系统之间的动态匹配与实时优化，从而提高整体能源利用率并减少碳排放。研究表明，在典型区域综合能源网络中，引入智能调度策略后，系统的碳排放水平可降低10%以上，这对实现“碳达峰、碳中和”战略目标具有重要意义。

#### 四、热能动力系统智能化控制的发展趋势与挑战

##### 1. 未来发展趋势

随着人工智能、物联网和大数据技术的快速发展，热能动力系统的智能化控制正呈现出多维度的演进趋势。首先，信息获取的全面化为精准控制提供了基础。传感器网络与实时监测平台能够实现对燃烧状态、蒸汽参数及热网运行的全流程感知，使得控制策略从被动响应向主动预测转变。其次，算法的深度学习化推动了控制能力的进化。深度神经网络与强化学习方法正在实现自适应与自进化，能够在复杂工况下持续优化控制策略，从而突破传统控制在非线性问题上的瓶颈。此外，跨系统的协同优化成为不可忽视的趋势。热能系统正与电力系统、天然气系统以及可再生能源网络逐步融合，未来的控制模式将不仅关注单一系统的优化，更强调在区域综合能源网络中的整体平衡。

低碳化与绿色发展目标也将深刻影响智能化控制的发展方向。在“双碳”战略背景下，控制策略需要在保证供能安全与经济性的同时，实现碳排放的最小化。通过引入碳排放约束和能效评价指标，智能化控制将从单一的效率导向转向“效率—排放—安全”一体化的多目标优化。这种转变不仅有助于提高系统运行的可持续性，也为能源结构转型和清洁能源利用提供了有力支撑。

##### 2. 面临的主要挑战

尽管智能化控制在理论和实践中已展现出广阔前景，但其推广与应用仍面临多方面挑战。首先，模型与算法的复杂性限制了实际部署。高维非线性模型和深度学习算法在计算层面需要大量算力与存储资源，而现有工业控制系统的硬件条件往往难以满足实时性要求。其次，数据质量与安全问题值得关注。系统采集的运行数据可能存在噪声、缺失或异常，影响模型训练与预测精度；同时，能源系统的网络化与数字化程度不断提高，数据安全与网络攻击风险也对系统运行构成威胁。如今工程应用层面仍存在技术落地的障碍。部分老旧机组与管网设备缺乏数字化改造条件，使得智能化控制难以全面实施；同时，企业对新技术的接受程度存在差异，投资成本与运行风险成为制约其推广的重要因素。如何在理论先进性与工程可行性之间找到平衡，是未来智能化控制必须面对的现实问题。由此可见，只有在技术研发、数据治理、设备升级和产业政策等多方面形成合力，智能化控制才能真正实现规模化应用，为热能动力系统的高效、安全与绿色运行提供坚实保障。

##### 结论

本文围绕热能动力系统的运行特征与控制需求，系统阐述了智能化控制的理论基础与技术路径，提出了多目标优化的控制策略，并通过典型案例验证其可行性与优势。研究表明，智能化控制能够有效提升系统能效与运行稳定性，减少能源浪费与环境污染，为热能动力工程的可持续发展提供了重要支撑。如今随着人工智能与能源互联网的进一步融合，热能动力系统智能化控制将向更高水平的自适应性、协同性与绿色化方向发展。

##### 参考文献

- [1] 张景红. 火电厂热能动力工程中的节能技术分析[J]. 智能城市应用, 2024, 7(11): 123-125. DOI: 10.33142/sca.v7i11.14189.
- [2] 王阳杰. 火力发电厂热能动力装置自动检测技术[J]. 自动化应用, 2024, 65(23): 120-122. DOI: 10.19769/j.zdhy.2024.23.035.
- [3] 李易慧. 基于人工智能的热能动力设备故障诊断与预测维护系统分析[J]. 消费电子, 2024, (12): 13-15.