

集中供热系统运行调度的动态规划与实时控制

汤鲁振

华电青岛热力有限公司

摘要: 集中供热系统在我国城乡供热中占有极重要的地位。为了提高供热系统的热力效率,本研究采用动态规划与实时控制的方法,对集中供热系统进行运行调度优化。首先,我们根据供热系统的能量平衡方程和热用户的需求模型,设立了目标函数,旨在整个供热周期内最大限度降低供热系统的能耗。然后,我们以此目标函数作为优化目标,运用动态规划方法,对不同气象、设备状况和用户热负荷等条件下供热系统的运行调度进行了优化,得出了最优运行策略。接着,我们构建了实时控制系统,根据实时的设备监控数据、气象预报数据和用户热负荷预测数据,实时更新和修正运行策略。研究表明,这种集成了动态规划和实时控制的运行调度方法,在保证用户舒适度的前提下,可以有效降低供热系统在运行中的能耗,提高热力效率,有助于实现供热系统的绿色化、智慧化运行。

关键词: 集中供热系统; 动态规划; 实时控制; 运行调度优化; 热力效率

【DOI】10.12254/j.issn.2096-6539.2024.24.120

引言

我国是一个冬季采暖需求巨大的国家,特别是在北方地区,急需一个高效、可靠、环保的集中供热系统。这个系统在我国城乡供热中发挥了举足轻重的作用。然而,集中供热系统在运行过程中,如何提高供热效率,满足用户需求,保证能源的可持续利用,是供热系统面临的主要挑战和目标。这涉及供热系统的运行调度问题,旨在优化能源使用,提高供热效率,尽可能降低硫酸盐、氮氧化物和颗粒物等污染物的排放。为了实现这个目标,本研究选用动态规划和实时控制这两种方法,对供热系统进行优化调度,从而实现供热系统能效的提升。首先,根据供热系统能量平衡方程和热用户需求模型设计目标函数,接着采用动态规划方法对系统进行优化,然后通过与实时控制系统的融合,使供热系统能够适应气象状况、设备状况和用户热负荷的变化,实现优化调度。这种新型的供热系统运行调度方法对于我国的能源管理和环境保护具有重要的价值和深远的影响。

一、集中供热系统的能耗优化目标设定

(一) 集中供热系统的概述

集中供热系统是一种有效的大规模供热方式,通常应用于城市和乡镇的采暖和热水供应^[1]。该系统通过热电站生成热能,通过管道网络将热能输送到各个用户,

具有高效、稳定和环保的特点。集中供热系统的结构主要包括热源、热网和用户端三部分。热源可以是燃煤、燃气、热电联产、地热能和废热回收等多种形式,由此生成的热水或蒸汽在热网中通过热媒(通常为水)进行传输,通过热交换器将热能传递给用户,以满足其供暖或热水需求^[2]。

能耗是集中供热系统的重要考量指标,直接关系到运行成本 and 环境影响。在实际运行过程中,由于外界气象条件、用户需求变化、设备性能波动等因素,集中供热系统的运行调度具有复杂性和不确定性。为保证供热效果的稳定性和用户舒适度,实现系统能耗的最小化,迫切需要对其进行科学合理的运行优化。

集中供热系统的优化目标是提高整体热力效率,这一目标可以通过降低热源燃料消耗、减少热网热损失、改善用户端换热效率等途径实现。还需保证在不同气象条件和用户负荷下系统运行的高效性,使得热能在供热周期内分配最优化,从而实现节能减排的目标。

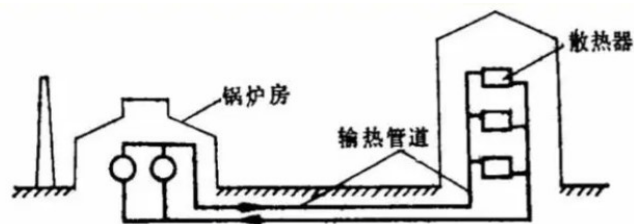


图1 集中供热系统应用示意图

供热系统能量平衡是制定能耗优化策略的基础。能量平衡方程通常结合热源输入、输配过程中的损失和用户端需求的计算,形成系统全局能量守恒。通过此方程能够准确描述供热系统的热力状态和运行特性,为后续优化目标的确立和方法设计提供理论依据。供热系统运行优化还需考虑系统的动态特性和实时调控能力,以适应环境和需求的实时变化,从而达到最佳运行效果。

(二) 供热系统能量平衡方程的解析

集中供热系统的能量平衡方程在其运行调度中起着至关重要的作用,通过对能量平衡方程的解析,可以深入了解系统中的能量传递和转换情况,为运行调度优化提供理论依据。供热系统能量平衡方程主要描述了系统内部各个能量源、负荷及储能设备之间的相互关系,其核心是在某一时间段内,能量的输入与输出要保持平衡。

供热系统能量输入主要来自燃料燃烧生成的热能,

此部分热能通过锅炉或热交换器传递给热媒（水或蒸汽）。能量输入方程可以表示为：

$$Q_{in} = \eta \cdot Q_{fuel}$$

其中， Q_{in} 为系统的总输入能量， η 为锅炉或热交换器的热效率， Q_{fuel} 为燃料燃烧产生的热量。

系统的能量输出包括向用户提供的热能和系统自身的热损失。向用户提供的热能可表示为：

$$Q_{out} = m \cdot C_p \cdot (T_{supply} - T_{return})$$

其中， m 为流经热媒的质量流量， C_p 为热媒的比热容， T_{supply} 和 T_{return} 分别为热媒的供回水温度。

系统的热损失则包括管道传热损失、散热损失等，各种损失可以综合表示为 Q_{loss} 。完整的能量平衡方程可以表达为：

$$Q_{in} = Q_{out} + Q_{loss}$$

在实际应用中，能量平衡方程不仅用于总系统的能量核算，还应用于各子系统及设备的能量传递情况分析。通过对此方程的动态监控和实时计算，可以有效地辅助调度策略的制定，确保供热系统的运行稳定性和高效性。正确理解和应用能量平衡方程，不仅能够降低不必要的能耗，还能够提高供热系统的整体效率，进而实现低碳、绿色发展的目标。

（三）目标函数的设定最大限度降低供热系统的能耗

为最大限度地降低集中供热系统的能耗，目标函数的设定需要综合考虑整个供热周期内的多种因素。设定的目标函数为系统总能耗 E 的最小化问题，即：

$$\min E = \sum_{t=1}^T (Q_t + P_t + L_t)$$

其中， Q_t 为时刻 t 的热量需求， P_t 为时刻 t 的功耗， L_t 为时刻 t 的输送损失。目标函数需满足供热系统的能量平衡方程与热用户需求模型，考虑气象条件和设备状况对能量损耗的影响。

能量平衡方程为：

$$\sum_{i=1}^n Q_{i, in} - \sum_{i=1}^n Q_{i, out} = \Delta E_{system}$$

热用户需求由热负荷预测模型确定，具体公式为：

$$Q_{user}(t) = \alpha \cdot A \cdot (T_{indoor}(t) - T_{outdoor}(t))$$

其中， α 为热传导系数， A 为热交换面积， $T_{indoor}(t)$ 和 $T_{outdoor}(t)$ 分别为室内和室外温度。

考虑气象条件、设备状况和其他随机因素的影响，引入限制条件：

（1）供热质量和用户舒适度：确保供热质量满足用户需求，不得产生超温或低温的问题。

（2）系统可靠性：优化调度策略需保证系统在不同运行状态下的可靠性和安全性^[3]。

（3）环境效益：通过降低系统能耗减少碳排放，实现供热系统的环保目标。

优化目标在处理过程中采用动态规划算法，通过确定各阶段的决策变量，逐步迭代更新，以此找到全局最小能耗的解。最终目标函数的设定和求解为供热系统运行调度的优化提供了理论基础和实际指导。

二、集中供热系统运行调度的动态规划优化

（一）动态规划方法的引入

动态规划在集中供热系统中的应用，旨在通过精细化控制实现节能高效。该方法将供热过程划分为多个阶段，并考虑气象、设备和用户负荷等实时状态变量。在每个阶段，系统根据当前状态选择最优的供热策略，如调整锅炉燃烧率、循环泵速度等，以最小化能耗为目标。

通过动态规划的递归求解，系统能够预测并优化整个供热周期的运行策略，确保在不同条件下都能实现能耗的最小化。这不仅提高了供热效率，也降低了运营成本，为集中供热系统的智能化管理提供了有力支持。动态规划的应用为实时控制系统的集成提供了理论依据，使供热系统更加高效、环保。

（二）不同气象设备状况和用户热负荷下的运行调度优化

在集中供热系统的运行调度优化中，动态规划方法发挥着核心作用。该方法充分考虑了气象条件、设备状况和用户热负荷等多重因素的影响。气象条件如温度、湿度等直接影响供热需求，动态规划通过引入天气预报数据，实现供热策略的灵活调整。设备状况的监控数据确保系统能够根据设备性能实时调整运行策略，维持高效运行。同时，用户热负荷的预测数据帮助系统精准匹配供热需求，避免能源浪费。

通过集成这些多维数据，动态规划方法为集中供热系统提供了全面的优化方案。这不仅有效降低了能耗，提高了供热效率，还确保了系统在各种复杂情境下的稳定运行。这种基于动态规划的优化方法，为集中供热系统的智能化管理提供了有力支持，是实现节能降耗和高效运行的关键所在。

（三）最优运行策略的制定

动态规划方法用于制定集中供热系统的最优运行策略时，需要考虑多个因素。基于不同气象条件、设备状况和用户热负荷预测，建立综合评估模型。通过动态规划算法，对各类状态变量进行多阶段决策，优化每个时间步的供热策略，以最大限度地降低能耗。具体来说，通过迭代计算不同决策的能耗，选择最优路径，实现供热系统的经济高效运行。结合实时控制系统的反馈信息，对运行策略进行不断调整和优化，从而确保最优策略始终适应实际情况。

三、实时控制系统的构建和运行策略的实时优化

(一) 实时控制系统的建立

实时控制系统的构建对集中供热系统的运行调度至关重要。该系统通过集成各类传感器、监测设备和通信网络，实现供热系统数据的实时采集和传输。中央控制单元作为系统的核心，凭借高性能计算服务器快速处理和分析海量数据，同时运行实时优化算法和调度策略。

软件架构方面，实时控制系统包含数据采集与预处理、实时优化和控制指令生成三大模块。数据采集模块确保数据准确传输，实时优化模块基于动态规划计算最优调度方案，而控制指令生成模块则负责将优化结果转化为具体控制指令，指导供热系统运行。此外，系统还具备故障诊断和应急响应功能，确保在设备故障时能够迅速应对，保障供热系统的稳定性和可靠性。这一实时控制系统的构建，为集中供热系统的智能化、高效化运行提供了有力支撑。

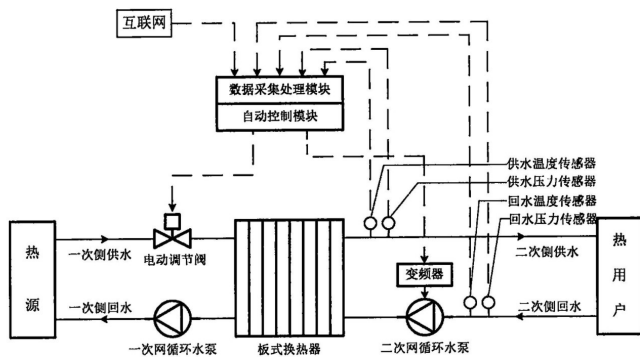


图2 集中供热系统中实时控制系统的构建

通过硬件架构和软件架构的密切配合，实时控制系统能够有效地对供热系统进行实时的监控、数据分析和运行策略调整，在保障用户舒适度的前提下，提高供热系统的运行效率，实现低能耗高效运行目标。

(二) 实时设备监控数据气象预报数据和用户热负荷预测数据的输入

在集中供热系统的运行调度中，实时设备监控数据、气象预报数据和用户热负荷预测数据的输入至关重要。这些数据不仅提供了系统运行的实时反馈，还为运行策略的调整提供了科学依据。

实时设备监控数据确保了供热设备在最佳工况下运行，通过传感器和无线通信模块实时传输到控制中心，为设备的实时监控和及时干预提供了可能。这有助于降低设备故障率，减少维护成本，并提高系统的整体运行效率。气象预报数据为应对气象变化导致的热负荷波动提供了关键支持。通过与权威气象服务机构的合作，系统可以获得高精度的预报数据，并据此修订供热计划，确保供热量的准确匹配，减少能源浪费。用户热负荷预测数据则基于历史数据和机器学习算法，对未来热负荷需求进行精准预测。这有助于实现供需平衡，避免过度供热或供热不足，提高用户舒适度，同时降低系统能耗。

这些实时数据的输入和处理机制通过数据融合方法和优化算法，动态调整运行策略，使集中供热系统能够在复杂多变的环境条件下实现能耗最优化和运行效率的最大化。

(三) 运行策略的实时更新和修正

运行策略根据实时设备监控数据、气象预报及用户热负荷预测进行更新，确保策略适应当前实际情况。根据数据变化调整策略参数，提升供热系统的响应速度和热力效率，优化资源配置，减少能耗，实现供热系统的智慧化运行。

结束语

本文深入研究了集中供热系统的运行调度问题，通过动态规划与实时控制方法，成功提出了降低能耗的目标函数，为供热系统优化运行提供了解决方案。然而，研究也存在局限性，如系统复杂性、气象预报和用户需求的不确定性等，可能影响运行策略的实际效果。此外，如何将实时控制系统应用于实际操作中，仍需进一步探索。未来，我们将继续研究更精确的能耗降低方法和先进的实时控制技术，以优化供热系统运行。我们坚信，通过不懈努力，将能提出更加实用和有效的运行调度策略，推动供热系统向绿色化、智慧化方向发展，为节能减排和可持续发展贡献力量。

参考文献

- [1] 邹兵, 曲德敏, 刘洪波. 大型集中供热系统热源温度实时优化[J]. 今日自动化, 2021, (08).
- [2] 卢大山. 集中供热系统换热站运行节能研究[J]. 幸福生活指南, 2020, (13).
- [3] 时国华, 杨林棣, 张浩, 杨先亮. 集中供热系统多热源调度优化模型[J]. 热力发电, 2020, 49 (03).
- [4] 杨林. 集中供热系统多热源调度优化分析[J]. 建材与装饰, 2020, (21).
- [5] 李化森, 张玉中, 王志成, 薛廷, 曲国栋. 某市集中供热运行调节优化调度案例分析[J]. 区域供热, 2020, (01).