

文章编号: 1671-6612 (2025) 06-822-11

基于负荷预测的 区域供冷冷冻水系统变压差控制方法及效果分析

周 杰¹ 杨 轩¹ 吴海波¹ 曹晓庆¹ 王庆琳¹ 鲁 展² 苏丽弘³ 刚文杰^{3,4,5}

(1. 武汉华源电力设计院有限公司 武汉 430000;

2. 武汉楚兴技术有限公司 武汉 430040;

3. 华中科技大学人工智能研究院 武汉 430074;

4. 华中科技大学环境科学与工程学院 武汉 430074;

5. 长江流域多介质污染协同控制湖北省重点实验室 武汉 430074)

【摘 要】 区域供冷系统管网覆盖面积广、用户多, 冷冻水系统的控制尤为重要。现有冷冻水系统常用定压差或定温差控制方法, 而变压差控制具有更好的节能潜力。因此提出一种基于负荷预测的变压差水力系统控制优化方法, 为区域供冷系统运行阶段节能增效提供技术支持。人工神经网络负荷预测基于气象参数、时间标签和历史负荷作为输入, 输出 6 个分区的负荷, 典型负荷日的预测误差仅 0.19。较传统干管定压差方法, 基于预测结果的变压差控制在高负荷典型日的全天节能率可达 74%~76.6%, 在低负荷典型日的节能率可达 83.5%~84.1%, 节能效果显著。

【关键词】 区域供冷; 人工神经网络; 负荷预测; 冷冻水系统; 变压差控制
中图分类号 TU831.3 文献标志码 A

A Method for the Variable Differential Pressure Control Based on Load Prediction

Zhou Jie¹ Yang Xuan¹ Wu haibo¹ Cao Xiaoqing¹
Wang Qinglin¹ Lu Zhan² Su Lihong³ Gang Wenjie^{3,4,5}

(1.Wuhan Huayuan Electric Power Design Institute Co., Ltd, Wuhan, 430000;

2.Wuhan Chuxing Technology Co., Ltd, Wuhan, 430040;

3.Institute of Artificial Intelligence, Huazhong University of Science & Technology, Wuhan, 430074;

4.Department of Building Environment & Engineering, Huazhong University of Science & Technology, Wuhan, 430074;

5.Hubei Key Laboratory of Multi-media Pollution Cooperative Control in Yangtze Basin, School of Environmental Science and Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan, 430074)

【Abstract】 Due to the large coverage area of the pipeline network and many users, the control of the chilled water system is particularly important. Currently, constant pressure difference or constant temperature difference control methods are commonly used, while variable pressure difference control has better energy-saving potential. In this paper to analyze the operating characteristics of district cooling systems, and a control optimization method of variable pressure difference for hydraulic system based on load prediction is developed to provide technical support for energy-saving and efficiency-increasing of district cooling

作者简介: 周 杰 (1983.4-), 男, 本科, 机电工程师 (中级), E-mail: summer330@163.com

通讯作者: 苏丽弘 (1999.4-), 女, 博士研究生, E-mail: sulihong@hust.edu.cn

收稿日期: 2025-03-13

systems in operation stage. The load prediction of the artificial neural network based on meteorological parameters, time label, and historical load as input was determined to output the load of six zones and directly use the data of the previous day. The prediction accuracy of the typical load day measured by MAPE value can reach 0.19. Compared with the traditional methods of constant pressure difference of the main pipe, the pressure difference control based on predictive results can achieve an energy saving rate of 74%~76.6% on high-load typical day, and an energy saving rate of 83.5%~84.1% on low-load typical day. The energy saving is significant.

【Keywords】 District cooling system; ANN; Load prediction; Chilled water system; Variable differential pressure control

0 引言

区域供冷系统是由一个或多个能源站集中制备冷媒,通过主管网系统运输到一个区域内各个单体建筑,以满足不同位置的用户冷需求的空调冷源系统^[1]。冷冻水系统是区域供冷系统重要组成部分,其冷热管网铺设面积大、冷热传输具有延迟性^[2,3]。多个用户之间相互影响,因此系统存在一定的控制难度。基于经验的控制和维护方法通常无法实现精确控制,并具有滞后性^[4]。目前常见的冷冻水系统变流量控制策略一般为压差控制和温差控制。温差控制策略理论上节能效果较好,但实际上控制时效性较差,容易出现水力失调、负荷难以满足要求等问题。压差控制策略响应快,延迟性小,但定压差方法节能空间有限,现有的变压差控制仍存在控制不准确,节能潜力有限等问题。因此为了提高区域供冷系统运行稳定性,进一步提升节能效果,需要对水力系统运行优化控制进行研究。由于空调系统大部分时间处于部分节能率下运行^[5],控制不当易出现“大流量小温差”现象^[6,7],对于区域供冷系统来说,大流量小温差情况更易出现且问题将更加严重,这也造成了大量的能源浪费。

为了提升区域供冷系统的运行效果,本文在相关研究的基础上,提出了一种基于负荷预测的变压差控制方法。首先对采集到的系统运行数据进行分析 and 建模,然后基于机器学习算法进行负荷预测,最后根据典型负荷日数据对冷冻水系统开发高效控制方法,为系统节能降耗提供技术支持。

1 方法介绍

为更好地提升既有区域供冷系统部分负荷下运行能效,本文提出基于负荷预测地变压差水力系统控制方法。首先基于人工神经网络利用既有运行数据预测接次日系统负荷,并计算压差;随后,检验基于负荷预测的水力系统变压差控制方法有效

性,并与常规控制方法对比。

基于负荷预测的用户变压差方法如图 1 所示,具体步骤如下:

第一步,收集数据,包括系统基本信息、系统架构和主要设备构成、历史运行数据、历史气象参数、并对数据进行预处理。

第二步,基于历史负荷和气象参数进行负荷预测。本研究采用 ANN 进行负荷预测,输入参数包括历史负荷数据和气象数据,输出未来一段时间负荷。为获得最优预测结果,本文对比分析多种预测策略,并从中选取最优。

第三步,基于负荷预测结果,可根据管网运行特性计算获得二次泵所需要的压差。本研究采用二次函数拟合水利管网阻力特性,并设定最小值,当负荷低于一定值时,压差将设置为一恒定值。

第四步,将计算获得的压差设定值传输给 PID 控制器,PID 控制器将设定压差信号并与检测到的用户侧压差信号对比进行调节,输出水泵频率至水泵控制器。当一个分区内有多台水泵时,多台水泵同频运行。

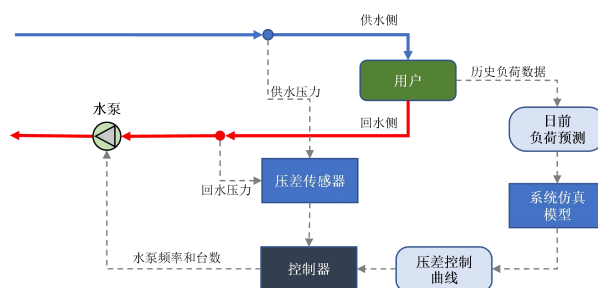


图 1 基于负荷预测的用户变压差控制方法

Fig.1 Variable differential pressure control method for users based on load prediction

2 系统模型建立

为验证所提出的基于负荷预测的变压差控制方法,本文选取夏热冬冷地区某多功能产业园区的

区域供冷系统（设计冷/热/电负荷分别为 29.40MW、17.50MW、13.05MW）进行研究。本研究利用 Flowmaster 平台搭建其冷冻水系统动态仿真模型，经运行数据修正验证后，在该平台应用所提方法，并与常用管网调节方法对比。系统采用冷热电三联供系统（电制冷+吸收式制冷），通过一次泵并联供冷。管网结构为：总供、回水管经分、集水器分别连接 3 支供回水母管，分集水器中间设置旁通管。每支供水母管分两路经二次泵供给 2 个分区用户（共 6 个），回水通过二次泵房汇总后经回水母管返回集水器。

2.1 负荷预测模型介绍

负荷预测是本文变压差控制方法基础。本文构

建人工神经网络模型，预测未来一天的负荷，为压差设定提供依据。输入特征包括天气相关参数（环境温度、相对湿度、露点温度、辐射）、时间相关参数（月份、星期、小时数、分钟数）以及历史负荷（前一周/天同期值）。通过对比不同 ANN 模型（输入、输出及参数设置见表 1），并采用平均绝对百分误差（MAPE，见式（1））评估，确定最优预测模型。

$$MAPE = \left(\frac{1}{n} \right) \sum_{t=1}^n \left| \frac{A_t - F_t}{A_t} \right| \times 100\% \quad (1)$$

式中： A_t 为样本实际负荷； F_t 为样本预测负荷； n 为样本数量； t 为当前样本编号。

表 1 负荷预测参数设置

Table 1 Parameters of load prediction model

编号	输入	输出	训练范围	神经元数量	激励函数	算法
I-a	环境温度、露点温度、	同时	全部	864	relu	adam
I-b	辐射、工作日、小时数		>10%	1166	relu	adam
II-a	环境温度、露点温度、	独立	全部	1337/118/225/141/141/118	relu	adam
II-b	辐射、工作日、小时数		>10%	1013/1019/689/356/191/785	relu	adam
III-a	环境温度、露点温度、辐射、	同时	全部	361	relu	adam
III-b	工作日、小时数、一周前负荷		>10%	1155	relu	adam
IV-a	环境温度、露点温度、辐射、	独立	全部	1026/682/433/342/1015/1246	relu	adam
IV-b	工作日、小时数、一周前负荷		>10%	686/574/945/209/1160/555	relu	adam
V-a	一周前负荷					
V-b	一天前负荷（工作日区分）			——		
VI	IV-a 和 V-b 结果平均					

2.2 管网动态模型建立与验证

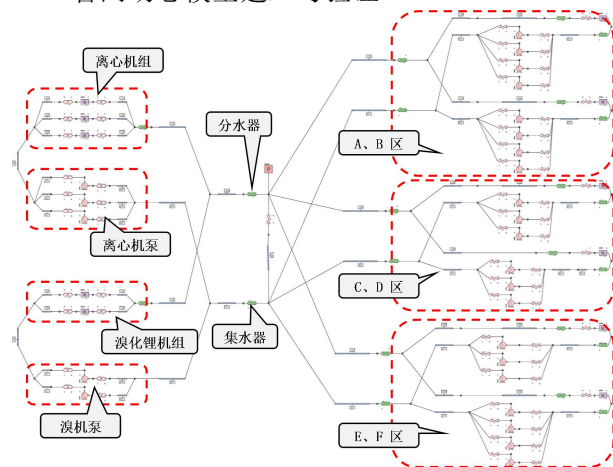


图 2 Flowmaster 软件中的管网模型

Fig.2 Pipe network model in Flowmaster software

本文采用 Flowmaster 软件建立简化管网模型（见图 2），包含一次侧供（3 台离心机组+2 台溴化锂机组）和二次侧（6 个分区用户）。管道尺寸按实际设置，简化弯头、三通和阀门等组件，其阻力以及分集水器、机组等阻力均使用阻力件等效替代。

为模拟实际水力工况，需要对管网模型进行验证，本文基于历史实测数据确定用户阻力特性，对管网模型进行静态工况验证。用户侧阻力系数难以直接获取且会随负荷变化，故根据水泵及系统运行参数计算二次侧总阻力，反推出用户的阻力系数（总阻力-管道及阻力件阻力）。将系数输入 Flowmaster 模型并模拟，结果如表 2 所示，模拟结果中分区流量与设置流量值误差均 < 1.4%（多数 < 0.5%），表明模型符合实际。

表 2 设计工况模拟结果对比

Table 2 Comparison of simulation results under designed scenarios

分区	设置负荷 /(kW)	设置流量 /(m ³ /h)	设置温差 /℃	水泵开 启台数	水泵运行频率 /Hz	模拟流量 /(m ³ /h)	模拟温差 /℃	流量误差 /%
A	3292	452.6	6.26	2	44.7	450.9	6.29	-0.40
B	1660	234.4	6.10	1	49.9	234.3	6.10	-0.10
C	2060	349.0	5.08	1	49.7	349.0	5.08	0.00
D	894	173.3	4.44	1	49.6	172.6	4.46	-0.40
E	1177	160.0	6.33	1	50.0	157.7	6.42	-1.40
F	5153	781.5	5.68	2	44.4	782.8	5.67	0.20
总计	14235	2150.8	5.70	——	——	2147.4	5.71	-0.20
溴机	3370	551.0	——	2	50.0	545.9	——	-0.90
离心机	3516	408.0	——	3	50.0	407.9	——	0.00
旁通管	——	175.2	——	——	——	169.5	——	-3.20

2.3 传统控制方法

为验证本研究所提方法的有效性和优越性, 本文对比了干管定压差、用户定压差、用户定温差和昼夜变压差 4 种传统控制方法和本研究所提连续变压差、分段变压差 2 种方法, 具体如下:

(1) 干管定压差控制: 压差监测点位于分水器与用户二次泵入口之间。PID 控制器依据实测压差与额定工况设定值的偏差调节水泵频率, 输出至水泵控制器。分区内多台水泵同频运行(30~50Hz)。水泵控制器依据频率阈值进行台数控制 ($\geq 45\text{Hz}$ 增泵, $\leq 35\text{Hz}$ 减泵), 并设 30 分钟延时保护防止频繁启停。

(2) 用户定压差控制: 压差监测点位于用户入口供水管与二次泵入口之间。控制逻辑(PID 调节、水泵同频运行、频率范围、台数切换阈值及延时保护)同干管定压差控制。

(3) 用户定温差控制: 温差监测点位于用户入口供水管与二次泵入口之间。PID 控制器依据实测温差与设定值(7°C)的偏差调节水泵频率。水泵控制逻辑(频率范围、台数切换阈值、延时保护)同压差控制。允许低负荷(单泵 30Hz 运行时)出现温差低于设定值的合理情况。

(4) 用户昼夜变压差控制: 为简化对比, 实施两档压差设定, 日间(8:00~20:00)采用设计工况满负荷压差设定值; 夜间(22:00~7:00)采用基于夜间负荷设计的优化压差设定值; 过渡时段(7:00~8:00, 20:00~22:00)保持前一阶段设定值。压差监测点及水泵控制逻辑同用户定压差控制。

(5) 用户连续变压差控制: 即本文所提方法, 基于实时预测结果实现。压差测点在用户供回水管道上, 水泵控制器依据频率阈值进行台数控制 ($\geq 48\text{Hz}$ 增泵, $\leq 32\text{Hz}$ 减泵), 并设 30 分钟延时保护防止频繁启停。

(6) 用户分段变压差控制: 为平衡实时控制的计算负荷与工程响应需求, 本研究还提出分段变压差控制, 将全天划分为 8 个固定时间段独立设定压差值(0:00~6:00, 6:00~9:00, 9:00~12:00, 12:00~14:00, 14:00~17:00, 17:00~19:00, 19:00~21:00, 21:00~0:00)。各时段压差设定值取对应时段内实时压差曲线的统计第 5 大值(排除偶然极值干扰), 其余规则类同连续变压差控制法。

3 结果分析与讨论

为验证所提基于负荷预测的变压差控制方法性能, 本文选取高、低负荷典型日进行控制效果测试, 考察在该控制方法下系统的水力特性和能耗特征, 并与传统控制方法(干管定压差、用户定压差、用户定温差和昼夜变压差)比较。

3.1 负荷预测结果分析

基于 ANN 的不同预测模型测试结果如图 3 所示, VI 类方法在测试集上的误差小于其他方法, MAPE 约在 0.19~0.23 之间, 此外该方法对不同区的数据依赖性较小。综合来看, 该方法结果较优, 更具可靠性和可行性, 可为后续的控制研究提供更有力的依据和基础。

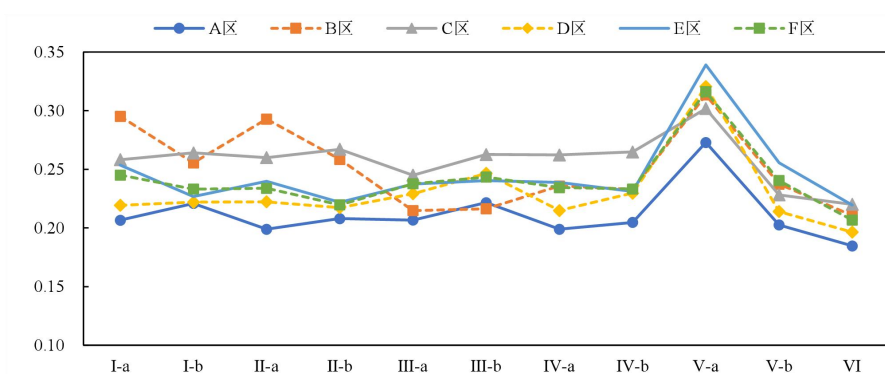


图3 负荷预测模型测试集结果分析

Fig.3 Analysis of load forecasting model results on the test set

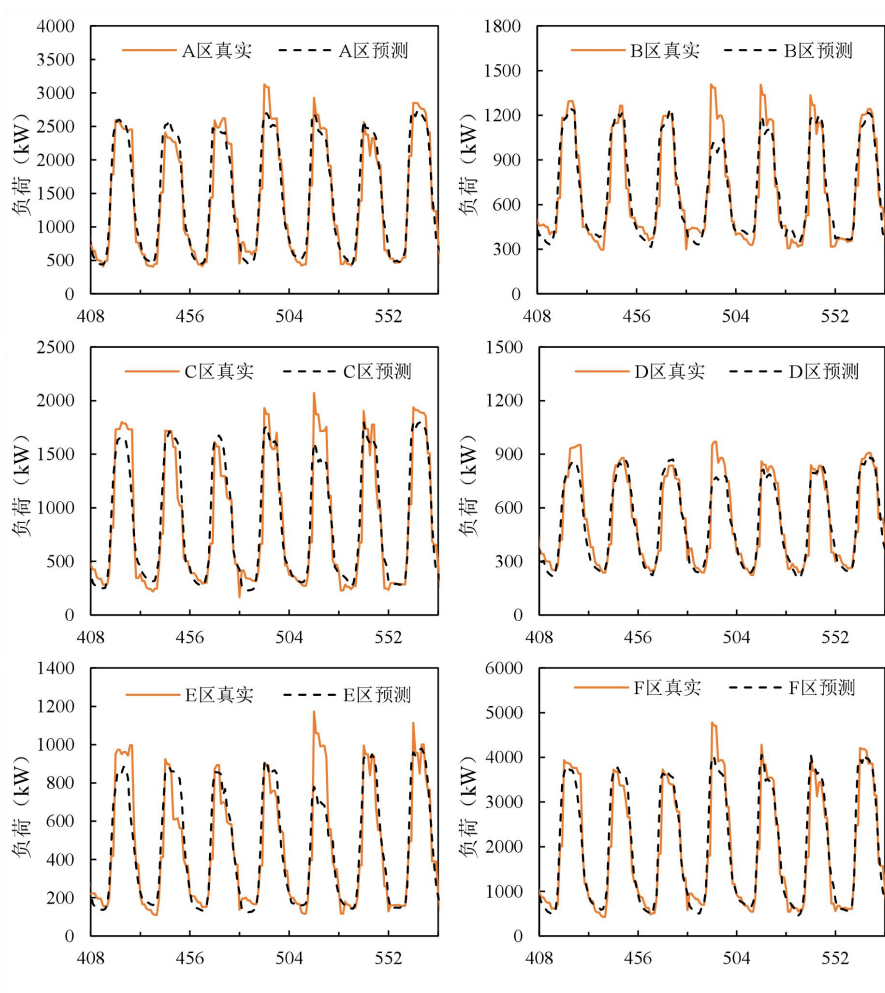


图4 负荷预测VI测试集结果

Fig.4 Load forecasting results on the VI test set

方法VI因其能准确反映实际负荷趋势、适应天气变化并补偿用能规律突变(见图4),被选定为负荷预测方法。本研究采用VI法,分别选取高、低负荷周典型日(2021年9月1日、8日)进行预测,并将结果用于压差控制验证。预测结果如图5、图

6所示,预测值和预测值整体变化趋势一致,在低负荷日(9月8日)夜间,B、D区实际负荷接近0,而预测负荷仍有一定数值(与实际用户无耗能情况相符),导致其预测精度稍逊于高负荷日,此差异属于正常现象,可以接受。

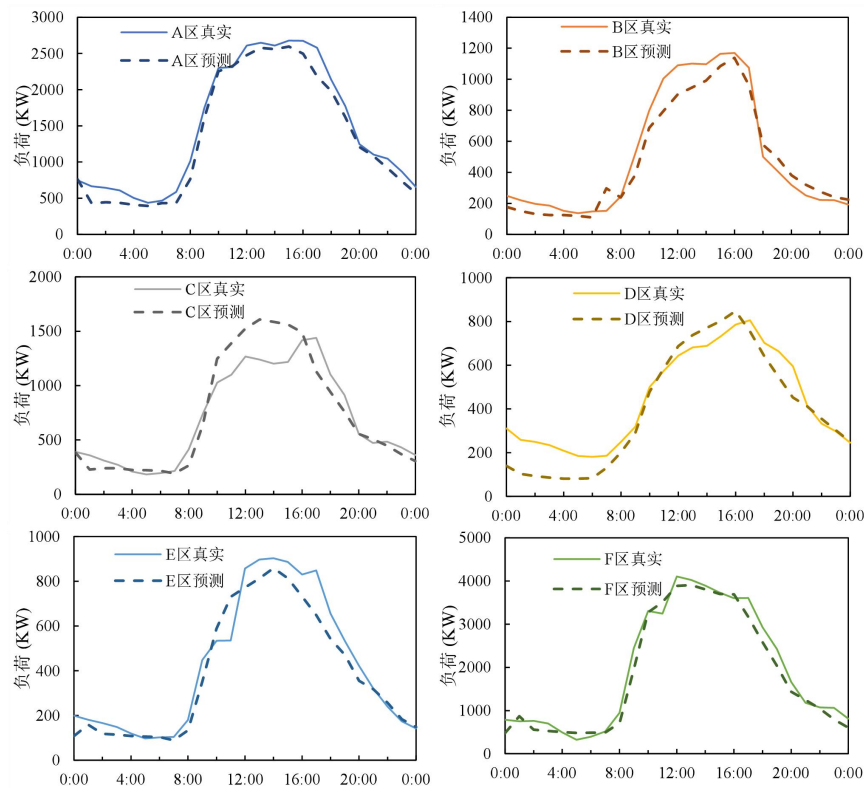


图 5 高负荷周典型日预测结果

Fig.5 Forecasting results of a typical day during a high-load week

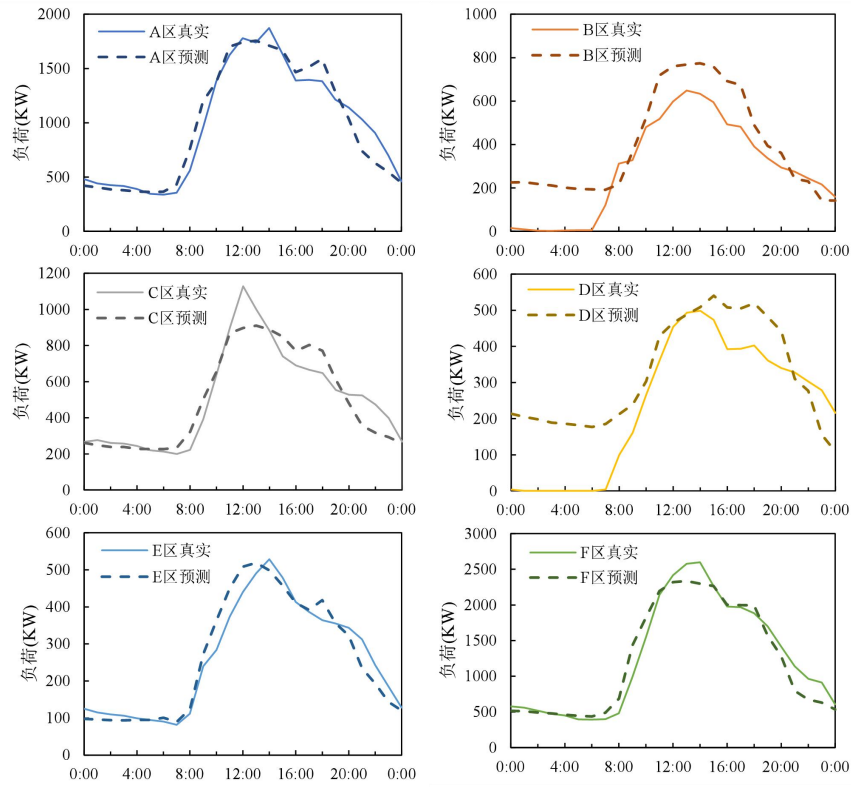


图 6 低负荷周典型日预测结果

Fig.6 Forecasting results of a typical day during a low-load week

3.2 高负荷典型日控制结果

本节基于该模型设置,对高负荷典型日用户连续变压差控制系统运行效果进行分析,其运行结果如图 7 所示。可以看到压差控制精准,整体压差曲线与控制几乎完全一致,水泵台数最多均为 2 台,不同分区的台数变化时间不统一,A 区和 F 区在约 9:00 时水泵台数才增加到 2 台。从温差方面看,日

间温差整体还是维持在 7°C 周围,但由于预测负荷与实际负荷存在一定的差异,部分情况下温差会超过 7°C ,甚至达到 8°C 以上,如 A、C、D 区的早上负荷快速上升时间;在部分情况下温差又会较多低于 7°C ,如 E 区在 11:00 左右。整体来看,用户连续变压差控制的水泵运行稳定,温差控制在可以接受的范围内。

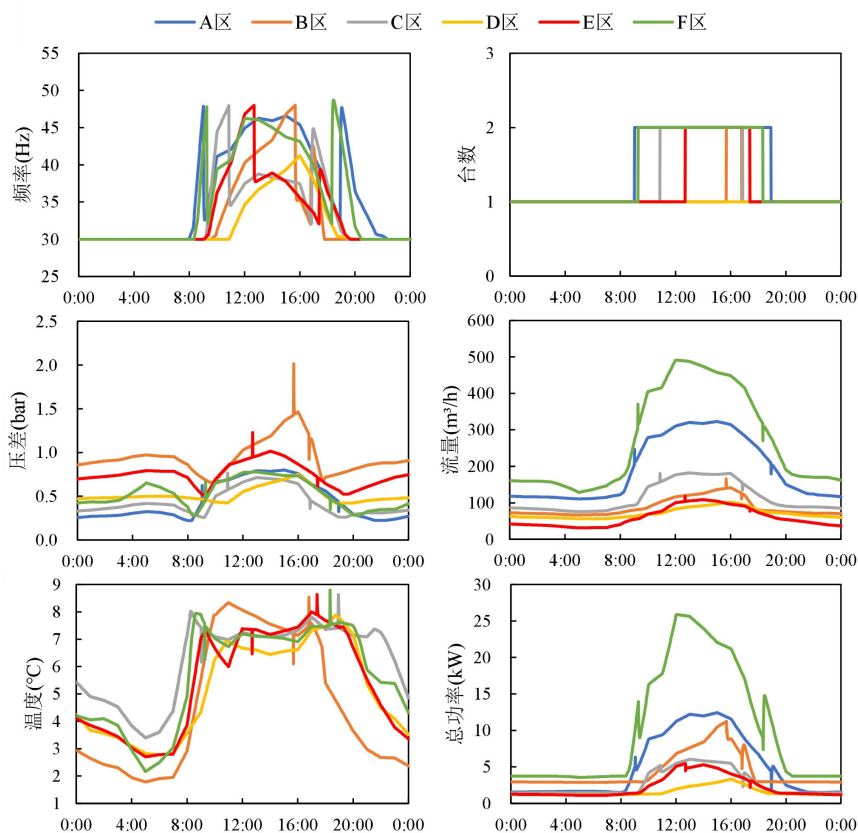


图 7 高负荷典型日用户连续变压差控制结果

Fig.7 Continuous variable differential pressure control results for end-users on a high-load typical day

为分析本文提出的变压差控制方法的综合效果,本文对比了 4 种传统控制方案的运行效果。在高负荷日对这 4 种控制方法的水泵频率、台数和温差运行情况分别进行对比,结果如图 8 所示。从水泵运行状态分析,不同控制方法的水泵运行状况存在较大差异,较本文所提连续变压差控制方法而言,干管定压差、用户定压差以及用户昼夜变压差方法的水泵运行台数较多,同时频率也较高。从温差角度分析,本文所提方法在温差控制方面的效果上更接近定温差方法,其温差控制能力上优于其他三种传统方法。

本研究对高负荷典型日 6 种控制方法的功耗

进行对比,如图 9 所示,包括总功耗、夜间功耗、日间功耗和其他方法相比干管定压差方法的节能率。可以看出,干管定压差功耗最高,用户定压差功耗其次,用户定温差和用户连续变压差的功耗基本一致,约 664kWh 。从总功耗上看,用户连续变压差相比起干管定压差、用户定压差和昼夜变压差的节能率分别为 76.58% 、 72.56% 和 61.98% ;用户分段变压差相比起干管定压差、用户定压差和昼夜变压差的节能率分别为 74.04% 、 69.59% 和 57.86% 。相比之下,日间在功耗绝对值上节能空间更大,不过由于夜间负荷较低,所以节能率上夜间节能潜力更大。

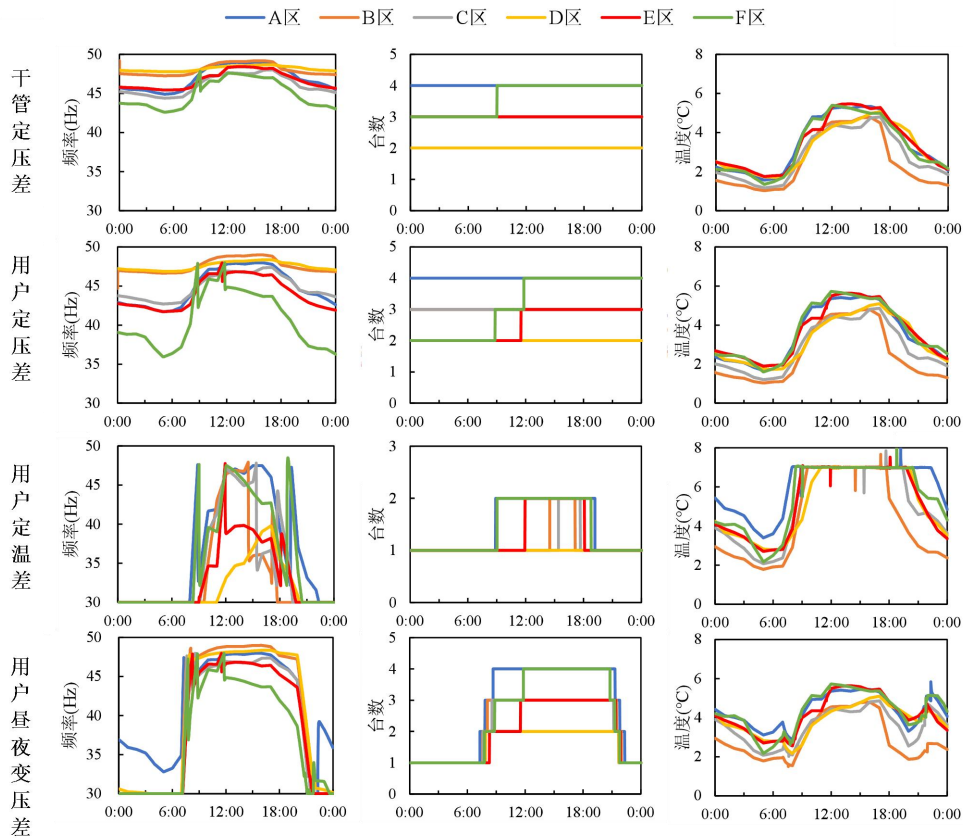


图8 高负荷典型日其他控制方法结果

Fig.8 Results of other control methods on a high-load typical day

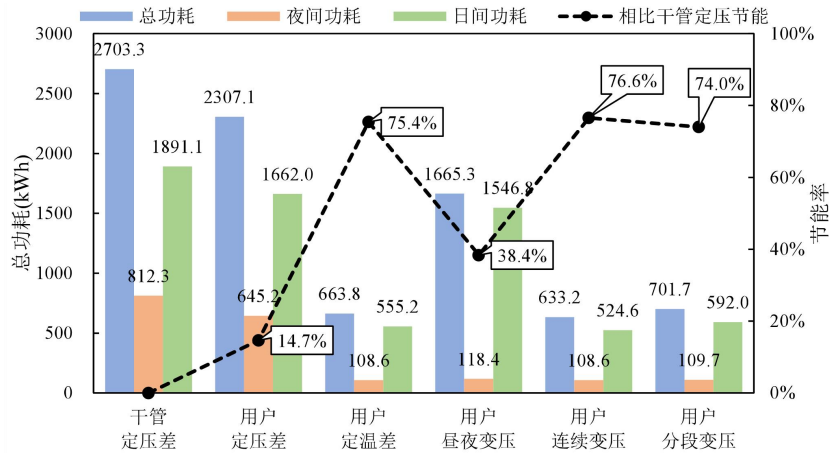


图9 高负荷典型日水泵总功耗对比

Fig.9 Comparison of total pump power consumption on a high-load typical day

3.3 低负荷典型日控制结果

对低负荷典型日下变压差控制系统运行效果进行分析的过程中,模型在水泵变台数点的设定和分段方式等方面与高负荷典型日的处理方式相同。其中用户连续变压差控制在低负荷典型日的运行

结果如图10所示,除了A区以外,其他区的水泵均保持在1台,A区在约11:00到15:00之间为2台。由于水泵整体频率不高,在夜间低负荷时间段压差均超设定值,控制曲线在夜间不起作用。从温差方面看,大部分区域的日间温差整体维持在7℃

周围, C 区在 12:00 左右的温差较大, 超过了 8°C ; A 区在 20:00 左右温差较大, 约为 7.5°C 。整体来看, 用户连续变压差控制的水泵运行稳定, 由于负

荷较低因此水泵变化不明显, 水泵调节范围有限; 温差控制在可以接受的范围内。

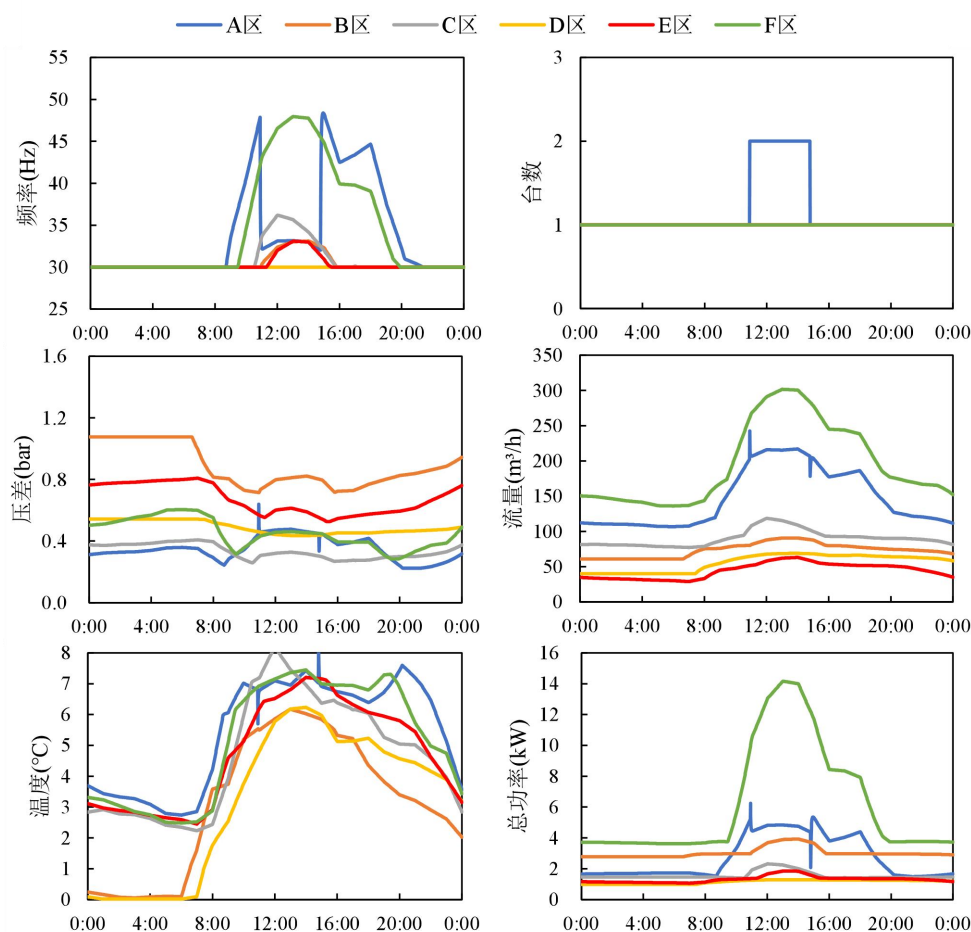


图 10 低负荷典型日用户连续变压差控制结果

Fig.10 Continuous variable differential pressure control results for end-users on a low-load typical day

相比于高负荷典型日, 低负荷下这 4 种传统控制方法的水泵运行状况差异更大, 其水泵频率、台数和温差运行结果如图 11 所示。其中定压差控制方法的水泵均出现了负荷降低时台数没有下降的情况, 而用户定温差方法水泵运行则出现了台数不稳定的情况。温差方面, 本文所提方法和定温差方法能达到 7°C 左右, 效果相对较好。其他 3 种定压差方法的日间最大温差约为 4°C 左右, 都处于“大流量小温差”状况, 日间能源浪费严重, 节能空间明显。

针对低负荷典型日, 本研究同样对 2 种本文所提方法和 4 种传统控制方法的功耗进行对比, 如图

12 所示, 包括总功耗、夜间功耗、日间功耗和其他方法相比干管定压差方法的节能率。与高负荷典型日结果相同, 干管定压差功耗最高, 用户定温差、用户连续变压差和用户分段变压差的功耗基本一致。而在控制过程中, 用户定温差有延迟, 本研究所提方法则实现无延迟控制, 优势显著。从总功耗上看, 用户连续变压差相比起干管定压差、用户定压差和昼夜变压差的节能率分别为 84.14%、80.47%和 71.98%; 用户分段变压差相比起干管定压差、用户定压差和昼夜变压差的节能率分别为 83.48%、79.66%和 70.81%。

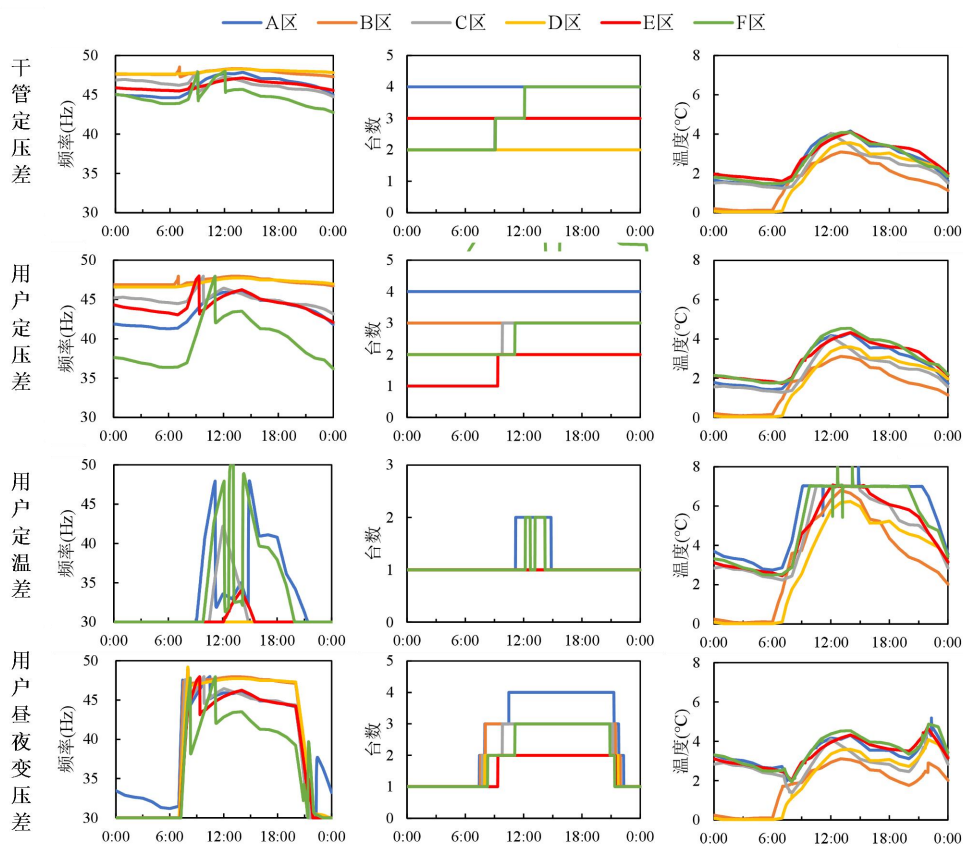


图 11 低负荷典型日其他控制方法结果

Fig.11 Results of other control methods on a low-load typical day

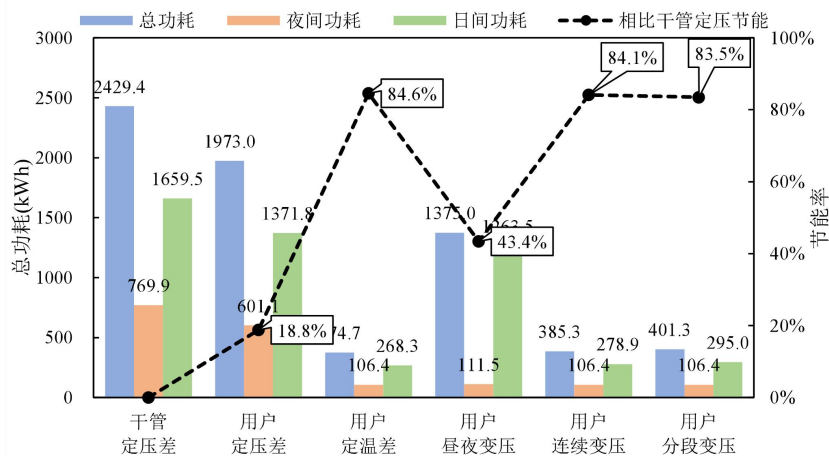


图 12 低负荷典型日水泵总功耗对比

Fig.12 Comparison of total pump power consumption on a low-load typical day

4 结论

为了优化既有区域供冷系统的能效,本文基于某区域供冷系统的实测运行数据,提出基于短期负荷预测的区域供冷冷冻水系统变压差优化调度方

法。经过研究分析得出如下结论:

(1) 该方法通过输入环境温度、露点温度、辐射、工作日、时刻和历史负荷,利用人工神经网络中进行负荷预测,预测结果整体较好,在典型负

荷日预测精度 MAPE 低至 0.19。

(2) 在高负荷典型日中, 与传统的控制方法相比, 连续变压差方法和分段变压差方法的节能潜力明显, 较干管定压差法节能率可达 74%~76.6%, 控制稳定, 在预测负荷的准确性能够保证的前提下, 控制效果能够满足用户需求。

(3) 与高负荷典型日类似, 在低负荷典型日中, 连续变压差方法和分段变压差方法的节能潜力也较为明显, 较干管定压差法节能率可达 83.5%~84.1%。

总的来说, 本文所提基于负荷预测的变压差控制方法节能效果比较明显, 但本研究未与一次侧进行联合控制, 未来可考虑通过将一、二次侧水系统协同控制, 从而优化区域供冷系统的整体能效。

参考文献:

- [1] 曾竞. 区域供冷供热管网系统优化设计研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2017.
- [2] 罗曙光, 王朝晖, 旷金国. 区域供冷系统冷水输配运行控制分析[J]. 暖通空调, 2021, 51(12): 9-15.
- [3] 王赫. 供热系统动态特性的模拟研究及在电力调峰中的应用[D]. 济南: 山东大学, 2016.
- [4] Afram A, Janabi-Sharifi F, Fung A S, et al. Artificial neural network (ANN) based model predictive control (MPC) and optimization of HVAC systems: A state of the art review and case study of a residential HVAC system[J]. Energy and Buildings, 2017, 141: 96-113.
- [5] 李苏泷, 朱孟标, 张国强, 等. 中央空调水系统改造中的几个问题[J]. 自动化博览, 2003, (5): 57-59.
- [6] 蔡宏武. 实际运行调节下的空调水系统特性研究[D]. 北京: 清华大学, 2009.
- [7] Jangsten M, Lindholm T, Dalenbäck J-O. Analysis of operational data from a district cooling system and its connected buildings[J]. Energy, 2020, 203: 117844.