

基于精准气象条件下供暖热负荷调控研究进展

刘 洁^{1,2}, 柳 伊^{1,2*}, 邹大伟^{1,2}

¹山东省气象防灾减灾重点实验室, 山东 济南

²山东省泰安市气象局, 山东 泰安

收稿日期: 2024年10月26日; 录用日期: 2024年11月22日; 发布日期: 2024年11月29日

摘 要

节能是推进碳达峰、碳中和、促进高质量发展的重要支撑, 供热节能是全球面临的重要难题, 实现及时准确的热负荷预测是实现供热系统节能的基础。在影响热网负荷发生变化的众多因素当中, 室外温度、太阳辐射、风速和相对湿度等气象因素的影响最为显著。文章阐述了近年来我国精细化气象预报技术的发展历程, 回顾了气象要素与供暖热负荷相关性研究进展。我国多元化、网格化、精细化的气象预报发展, 为按需供热及供热精细化调控提供了有利条件。同时随着研究手段的进步, 回归分析和机器学习等基于数据支撑下的负荷预测方法被广泛应用, 且在负荷预测中表现出了较高的精度, 为多气象参数的负荷预测奠定了良好的基础。研究分析认为随着我国综合气象观测系统、多源实况融合分析技术和多尺度数值模式的快速发展, 能够建立基于综合气象参数的气候补偿调控模型, 有利于提高按需供热精细化调控水平。

关键词

供热节能, 气象预报, 热负荷预测

A Review of Research Process in Heating Regulation Technology Based on Precise Meteorological Forecast

Jie Liu^{1,2}, Yi Liu^{1,2*}, Dawei Zou^{1,2}

¹Key Laboratory of Meteorological Disaster Prevention and Mitigation of Shandong, Jinan Shandong

²Tai'an Meteorological Bureau of Shandong, Tai'an Shandong

Received: Oct. 26th, 2024; accepted: Nov. 22nd, 2024; published: Nov. 29th, 2024

*通讯作者。

文章引用: 刘洁, 柳伊, 邹大伟. 基于精准气象条件下供暖热负荷调控研究进展[J]. 气候变化研究快报, 2024, 13(6): 1682-1687. DOI: 10.12677/ccrl.2024.136181

Abstract

Energy conservation is an important support for promoting carbon peaking, carbon neutrality and high-quality development. Energy saving in a heating system is a serious challenge faced by the world. Timely and accurate heat load prediction is the basis of energy saving in heating system. Among the many factors that affect the change of heat network load, the meteorological factors such as outdoor temperature, solar radiation, wind speed and relative humidity are the most significant effects. This paper introduces the developing process of fine meteorological forecast in recent years in China, reviews the research progress of correlation between meteorological elements and heating load. Meanwhile, with the progress of research methods, load forecasting methods based on data such as regression analysis and machine learning have been widely applied, and have shown high accuracy in load forecasting, laying a good foundation for load forecasting with multiple meteorological parameters. The research speculates that, with the rapid improvement of the fine Meteorological Forecast in China, comprehensive meteorological observation system, multi-source real-time fusion analysis technique and multi-scale numerical model, a climate compensation regulation model is expected to be established based on comprehensive meteorological parameters, which is conducive to improving the level of refined regulation of on-demand heating.

Keywords

Energy Saving of Heat Supply, Meteorological Forecast, Heating Load Forecast

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

节能是生态文明建设的重要内容，是推进碳达峰、碳中和、促进高质量发展的重要支撑。其中供热节能是全球面临的重要难题。近年来，我国供热节能工作的重要性也越来越突出，在全国城镇建筑总能耗中，北方城镇采暖能耗约占 40%，为城镇建筑总能耗中的最大组成部分，可见开展供热节能意义重大。集中供热节能主要有两条途径：一是提高建筑节能性能和保温水平，降低供热负荷；二是提高供热系统自身能效。近年来，随着我国新建建筑节能标准要求的不断提高，以及北方采暖区既有居住建筑节能改造工作的大力发展，围护结构的保温性能较之前明显提升，已经接近现阶段构件生产水平的上限，因此供热系统节能在我国建筑节能工作中的重要性越来越突出。

集中供热系统中各子系统的给定值都是由预报热负荷所决定的，采暖热负荷是指为了满足用户的需求，系统在单位时间内向建筑物供给的热量，它随着建筑物得到热量、失去热量的热负荷之和的变化而变化，因此实现及时准确的热负荷预测是实现供热系统节能的基础。在影响热网负荷发生变化的众多因素当中，气象因素的影响最为显著。大量研究表明，气象因素中室外温度、风速、太阳辐射以及相对湿度等是导致热网负荷发生变化的主因。因此，实现基于多种气象要素的供热动态调控和按需调控，提高未来供热负荷的预测精度，提高能源使用效率，降低供热污染排放，实现按需供热、智慧供热，将为“碳达峰、碳中和”目标提供坚实支撑[1]。

2. 国内精细化气象预报技术研究进展

天气预报技术在过去一二十年取得了巨大进展，其背后驱动力为气象科技和信息技术的快速进步，

电子通讯、计算系统和观测系统的发展,以及用户对天气信息越来越精细和个性的专业需求。实现“以人为本、无微不至、无所不在”的精细化气象预报和个性化服务是中国和世界各国气象部门共同的发展目标。

目前,中国已经初步构建了包括天气监测、中尺度分析、临近预报、短时预报、短期预报、中期预报、延伸期预报的天气预报体系。同时,自2014年起,在综合气象观测系统、多源实况融合分析技术和多尺度数值模式快速发展的基础上,我国开始开展精细化的智能网格预报业务;2017年12月,全国智能网格预报业务正式运行,空间分辨率为 $5\text{ km} \times 5\text{ km}$,时间为逐3 h发布未来10天的预报,实现了精细的数字化,格点化预报[2]-[4]。

中国自主创新的数值模式快速发展也为预报准确率的提高奠定了基础。20世纪末至21世纪初,中国气象局做出了自主开发数值天气预报业务系统的重大决策。2001年开始,自主研发了新一代多尺度数值天气预报系统——GRAPES,至2018年实现了从区域3~10 km到全球25~50 km分辨率的确定性与集合预报的完整数值天气预报体系[5]。

综上,我国多元化、网格化、精细化的气象预报发展[6],为按需供热及供热精细化供热调控提供了有利条件。

3. 气象要素与供暖热负荷相关性研究

对于热网负荷预测模型而言,不仅仅是选取合适的预测算法会影响其精度,选取对热网负荷产生影响的因素不同也会导致预测精度的很大差异。因此,正确分析影响热网负荷变化的因素对提高预测模型的精度具有重要意义。影响热负荷的因素众多,包括建筑因素、时间因素、社会经济因素、气象因素等,其中气象因素的影响最为显著。

大量研究表明,气象因素中室外温度、风速、太阳辐射以及相对湿度是导致热网负荷发生变化的主因。以下通过一元回归分析法,具体分析气象因素是如何影响热网负荷的变化。

(1) 室外温度。它是影响热负荷变化最直接,最显著的气象因素。热负荷与室外温度的关联性很明显,随着室外温度升高,所需热负荷减小;随着室外温度降低,所需热负荷增加。

(2) 太阳辐射。太阳辐射对热负荷的影响可以理解为太阳辐射通过对温度的改变影响热负荷发生变化。当太阳照射到建筑物墙体或通过窗户辐射阳光时,会使屋内温度升高,反之亦然。当然,太阳辐射的影响还与建筑物的朝向、太阳光的照射角度、建筑物窗墙比相关,鉴于影响系数较为复杂,本项目中暂不考虑。热负荷与太阳辐射的关联性是:随着太阳辐射的增加,所需热负荷减少;随着太阳辐射的减少,所需热负荷增加。

(3) 风速。风速是影响热负荷变化的主要因素之一,主要是从风力的风力附加、风向以及冷风渗透等方面的影响。建筑物门窗的封闭性不足以达到密不透风,冷风会通过这些缝隙进入室内从而使室内温度降低。热负荷与风速的相关性为:随着风速增加,所需热负荷增加;随着风速减小,所需热负荷减少。

(4) 相对湿度。相对湿度对热负荷变化的影响主要是通过改变温度的高低间接产生影响。热负荷与相对湿度的相关性表现为:随着相对湿度增加,所需热负荷减少;随着相对湿度减小,所需热负荷增加。

4. 供暖热负荷预测技术研究进展

随着研究手段的进步,采用建筑能耗数据的统计分析方法被应用于建筑热特性分析中,学者们开始研究基于数据支撑下的负荷预测方法。研究方法大致可分为2类:回归分析法和机器学习法。回归分析是一种简单有效的方法,通过寻找影响因素和热负荷值之间的相关系数建立负荷计算模型。

2013年,丹麦学者 Peder Bacher [7]提出了一种48 h内的逐时热负荷预测模型。预测模型中的系数是

根据当地 16 栋建筑的实测数据辨识获得。该模型以气温、太阳辐射和风速 3 种气象参数为影响因子, 预测逐时的热负荷。研究结果表明, 该模型对于不同建筑有良好的适应性和准确性。

2016 年, 斯洛文尼亚学者 Ferbar Tratar L [8]通过多元线性回归法及指数平滑法对每日、每周、每月 3 个时间尺度下的供热负荷进行预测, 结果表明多元线性回归法在每日和每周的短期负荷预测方面精度较高, 指数平滑法更适合于长期负荷预测。

由于回归分析法的计算结果无法准确展现非线性参数对动态热负荷的影响, 随着算法的发展, 学者们逐步使用机器学习方法实现非线性建模的需求。

2015 年, 澳大利亚学者 M. Killian [9]提出了 1 种模糊黑箱模型预测建筑室内温度。该模型以供水温度、室外温度、太阳辐射和空置率为输入参数, 采用局部线性模型描述传热过程中的非线性关系, 使得模型求解速度较快。

2016 年, 科威特学者 Alshammari E T [10]通过嵌入萤火虫算法对支持向量机的负荷预测算法进行优化, 相比于遗传算法和神经网络算法, 优化后的支持向量机算法对于未来 1~10 h 内的热负荷预测更为准确。

2018 年, 天津大学赵婧[11]提出了 1 种将回归分析与机器学习进行综合的建筑负荷预测方法。研究将小波变换、支持向量机、偏最小二乘法 3 种方法组合, 通过输入气象参数及建筑模型信息, 实现较准确预测 24 h 内的建筑负荷。此外, 影响建筑供热负荷预测精度的主要气象参数为室外温度及太阳辐射强度, 预测精度与相对湿度、风速、风向相关性较弱。

上述统计分析方法以能耗数据为基础, 将建筑的热惰性内化成模型的基础参数。该类方法在负荷预测中表现出了较高的精度, 为多气象参数的负荷预测奠定了良好的基础。近年来, 基于多种气象要素的供暖热负荷预测也取得了一些成果。

2004 年, Westphal 等人[12]基于巴西 206 个地点, 设计了利用简化的气象数据分析非住宅建筑热负荷的方法。气象数据包括月平均最高和最低气温、气压、云量和相对湿度等, 对于每个月, 使用两个典型日来估计冷负荷和热负荷, 使用传递函数法进行负载计算, 并评估其有效性。通过实验, 发现该方法显示了低质量围护结构情况下的良好结果, 但揭示了热惯性对全年制冷和制热负荷影响的局限性。

2006 年, Nielsen 等人[13]研究了区域供热系统的耗热量, 建立了耗热量与室外温度、风速、太阳辐射等的关系, 用灰盒法(构建模型的过程分为基于理论的整体模型结构识别, 然后是基于数据的建模, 从而识别模型的细节), 构建了一个将热耗与气象要素、日期信息等联系起来的模型。

2014 年, 吴素良等[14]利用 1961~2011 年的气象资料研究了西安采暖期气温变化对供暖的影响, 结果表明气候变暖与冬季供暖能耗有着密切关系: 20 世纪 90 年代前年平均气温较低, 多在 14℃以下, 1984 年最低为 12.7℃, 1994 年之后气温升高, 多在 14℃之上, 近 50 年平均气温每 10 年上升 0.44℃; 20 世纪 80 年代后期供暖强度低于平均值, 20 世纪 90 年代后采暖结束较早, 且供暖期度日数均低于近 50 年平均值, 2000 年后, 采暖开始较迟, 且采暖期较短, 低于 50 年平均值; 当年平均温度升高 1℃时, 西安供暖日减少 9 天。相对于 1971 年~2000 年的平均值, 西安 2001~2010 年因气候变暖平均每年节能 17.8%。

2016 年, 蔡麒[15]利用回归分析方法, 研究了气象因素与换热站热负荷之间的关系。结果表明, 综合考虑光照与风速共同影响下的室外温度与热负荷的线性相关性比只考虑室外温度要高。说明综合考虑多种气象要素下的气温与供热负荷的线性相关性较强, 且风速与光照直接作用于室外温度进而共同影响供热负荷, 通过以上结论进一步提高室外温度与采暖热负荷的拟合优度。

2016 年, 王文标等[16]针对大连市某高校的区域集中供热系统, 着重研究了气象因素对集中供热系统热负荷的影响, 结果表明室外温度对热负荷有直接影响, 风速或日照对室外温度有直接影响, 然后间接影响热负荷。同时建立了集中供热系统热负荷预测模型, 该模型适用于在热负荷预测领域推广与使用。

2018 年,周振起和王盛华[17]分析表明,“三北”地区供热机组难以实现按需供热,当机组强迫出力大时,电网消纳风电的能力进一步降低。他们利用风速、光照等气象要素修正室外温度,进一步提高室外温度与采暖热负荷拟合优度,通过建立采暖热负荷与气象因素之间的关系来提高热负荷预测精度,精确预测采暖热负荷是实现供热机组按需供热,预测供热机组调峰范围的前提。

2019 年,张文倩等[18]利用传统的统计学习的方法和随机森林模型进行热负荷预测,并最终确定了包括日期属性、气象因素、昨日负荷等预测属性,并构建了融合的模型,通过实验环节对比分析了气象要素对供热负荷的影响,同时在实验环节证明了模型的有效性,即可以进一步提高预测精度,其对噪声和异常值容忍度较高,以及不容易出现过拟合等优势。

气象作为科技型、基础性、先导性的社会公益事业,已日益成为实施“双碳”战略的重要科学基础。面对新形势、新需求,气象部门需要建立新型供暖气象服务业务,深挖供暖气象服务需求,形成监测-预报-传递-联动-调控的供暖产业链条,开发精准的供暖气象监测预警预报服务产品,实现与供热企业的智慧联动,进一步提高供暖气象服务的社会、经济和生态效益,从而推进气象事业的高质量发展,为城市绿色健康发展提供气象力量。

我国在气候补偿技术方面的研究,已逐渐把重心从应用效果研究转向调控机理研究。以前受限于对综合气象参数在建筑热负荷及供热调控中的作用认识不足,长期以来,利用气候补偿技术的供热调控主要以室外气温一个气象参数作为调节依据,随着近年来气象预报内容不断丰富,精细化水平不断提高,时间尺度不断缩小,将为探究综合气象参数下的动态热负荷预测算法和气候补偿调控模型等提供有力支撑,为实现短期供热精细调控,长期供热调控决策制定提供新的契机。

资助项目

山东省气象局引导类项目(2022SDYD19);山东省气象局青年项目(2021SDQN11)。

参考文献

- [1] 孙玫玲,袁闪闪,张宇峰,陈跃浩. 基于精细化气象预报的供热调控技术研究进展[J]. 建筑科学, 2019, 35(10): 182-190.
- [2] 杨绚,代刊,朱跃建. 深度学习技术在智能网格天气预报中的应用进展与挑战[J]. 气象学报, 2022, 80(5): 649-667.
- [3] 胡争光,薛峰,金荣花,孙靖,宋文彬,高博晗. 智能网格预报应用分析平台设计与实现[J]. 气象, 2020, 46(10): 1340-1350.
- [4] 金荣花,代刊,赵瑞霞,曹勇,薛峰,刘凑华,赵声蓉,李勇,韦青. 我国无缝隙精细化网格天气预报技术进展与挑战[J]. 气象, 2019, 45(4): 445-457.
- [5] 沈学顺,王建捷,李泽椿,陈德辉,龚建东. 中国数值天气预报的自主创新发展[J]. 气象学报, 2020, 78(3): 451-476.
- [6] 李泽椿,毕宝贵,金荣花,徐枝芳,薛峰. 近 10 年中国现代天气预报的发展与应用[J]. 气象学报, 2014, 72(6): 1069-1078.
- [7] Bacher, P., Madsen, H., Nielsen, H.A. and Perers, B. (2013) Short-term Heat Load Forecasting for Single Family Houses. *Energy and Buildings*, **65**, 101-112. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.04.022>
- [8] Ferbar Tratar, L. and Strmčnik, E. (2016) The Comparison of Holt-Winters Method and Multiple Regression Method: A Case Study. *Energy*, **109**, 266-276. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.04.115>
- [9] Killian, M., Mayer, B. and Kozek, M. (2015) Effective Fuzzy Black-Box Modeling for Building Heating Dynamics. *Energy and Buildings*, **96**, 175-186. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.02.057>
- [10] Al-Shammari, E.T., Keivani, A., Shamshirband, S., Mostafaeipour, A., Yee, P.L., Petković, D., et al. (2016) Prediction of Heat Load in District Heating Systems by Support Vector Machine with Firefly Searching Algorithm. *Energy*, **95**, 266-273. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2015.11.079>

-
- [11] Zhao, J. and Liu, X. (2018) A Hybrid Method of Dynamic Cooling and Heating Load Forecasting for Office Buildings Based on Artificial Intelligence and Regression Analysis. *Energy and Buildings*, **174**, 293-308. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.06.050>
- [12] Westphal, F.S. and Lamberts, R. (2004) The Use of Simplified Weather Data to Estimate Thermal Loads of Non-Residential Buildings. *Energy and Buildings*, **36**, 847-854. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2004.01.007>
- [13] Nielsen, H.A. and Madsen, H. (2006) Modelling the Heat Consumption in District Heating Systems Using a Grey-Box Approach. *Energy and Buildings*, **38**, 63-71. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2005.05.002>
- [14] 吴素良, 张文静, 王琦. 西安采暖期气温变化对供暖的影响[J]. 陕西气象, 2014(1): 18-21.
- [15] 蔡麒. 气象因素与供热负荷的关系研究[J]. 区域供热, 2016(4): 27-32.
- [16] 王文标, 蔡麒, 汪思源. 基于气象因素的集中供热系统热负荷预测研究[J]. 计算机测量与控制, 2016, 24(2): 22-26.
- [17] 周振起, 王盛华. 基于气象因素的供热机组热负荷预测方法的改进[J]. 东北电力大学学报, 2018, 38(5): 64-68.
- [18] 张文倩. 基于气象因素的集中供暖系统的热负荷预测研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 华北电力大学, 2019.