

文章编号: 1671-6612 (2025) 01-103-05

基于数据驱动的空调制冷机房在线优化控制研究

文永全¹ 王郁芊² 陈晓²

(1. 湘潭市规划建筑设计院有限责任公司 湘潭 411100;

2. 湖南工程学院 湘潭 411104)

【摘要】 建立了基于历史运行数据驱动的空调制冷机房的全局优化控制模型, 以 LabVIEW 为平台开发了空调制冷机房在线优化控制系统, 采用 COM 组件技术进行 LabVIEW 与 MATLAB 混合编程。在线优化控制系统根据实时采集的数据, 调用 MATLAB 程序的 COM 组件计算出优化变量的设定值, 对机房的运行参数进行优化控制。搭建实验系统对在线优化控制系统的功能进行了验证。

【关键词】 数据驱动; 空调制冷机房; 优化控制模型; 在线优化控制

中图分类号 TU831 文献标志码 A

Study on the Online Optimal Control of Air-conditioning and Refrigerating Stations Based on Data-driven

Wen Yongquan¹ Wang Yuqian² Chen Xiao²

(1. Xiangtan Planning and Architectural Design Institute Co., Ltd, Xiangtan, 411100;

2. College of Building Engineering, Institute of Hunan Engineering, Xiangtan, 411104)

【Abstract】 A global optimal control model for air-conditioning and refrigerating stations driven by historical operation data is established. An online optimal control system for air-conditioning and refrigerating stations is developed based on LabVIEW, in which the COM component technology is used for mixed programming of LabVIEW and MATLAB. According to the real-time data collected, the online optimal control system will utilize the com component of MATLAB program to calculate the set value of optimization variables, and will optimize the operation parameters of air-conditioning and refrigerating stations. An experimental system is built to verify the function of the online optimal control system.

【Keywords】 Data-driven; Air-conditioning and refrigerating station; Optimal control model; Online optimal control

0 引言

中央空调系统满负荷运行时间占全年运行时间的比例通常不到 5%, 有 95% 以上的时间运行在部分负荷下^[1]。自适应优化控制系统是高效空调制冷机房的重要组成部分^[2]。刘守超等^[3]报道了某地铁站制冷机房采用主动寻优控制策略的节能效果, 未提及主动寻优控制策略的模型及算法。黄健^[4]提出了某商业广场冷水机组的台数起停控制优化策略, 张炜杰等^[5]提出一种 COP 优化控制策略, 采用拉格朗日算法确定最优负荷分配, 并通过控制机组的冷水出水温度来实现负荷的分配。文献[4,5]

中的优化控制策略只考虑了冷水机组 COP 的优化, 未考虑水泵及冷却塔能耗对系统进行全局优化控制。

当空调系统处于部分负荷工况时, 可以通过调节水泵流量、冷却塔风量及冷水机组供水温度来适应负荷的变化。调节以上运行参数对不同设备功率的影响是相反的, 导致系统总功率的变化。降低冷却水流量可以降低冷却水泵功率, 但是会降低冷水机组 COP; 降低冷却塔风量可以降低冷却塔功率, 但会提高冷却塔出水温度, 降低冷水机组 COP; 提高供水温度可以提高冷水机组 COP, 但需要增

大冷水流量，增大了冷水泵功率。由此可见，有必要实施全局优化控制策略，合理调节冷却水流量、冷却塔风量及冷水机组供水温度，使得系统的总功率最小化。本文建立基于数据驱动的空调制冷机房的全局优化控制模型，在此基础上开发在线优化控制系统。

1 全局优化控制模型

1.1 优化控制的目标函数

对于冷水机组、冷水泵、冷却水泵及冷却塔台数都为 n 的空调制冷机房，优化控制的目标函数如式 (1) 所示。

$$\min TP = \left(\sum_{i=1}^n (N_i + L_i + P_i) Z_i + \sum_{i=1}^n W_i Y_i \right) \quad (1)$$

式中： TP 为机房设备总功率，kW； N_i 、 L_i 、 P_i 及 W_i 分别为第 i 台冷水机组、冷水泵、冷却水泵及冷却塔的功率，kW； Z_i 表示第 i 台冷水机组及其对应的水泵的开关状态 ($Z_i=0$ 或 1)； Y_i 表示第 i 台冷却塔的开关状态 ($Y_i=0$ 或 1)。

优化变量的约束条件为：供水温度在 $7^\circ\text{C} \sim 10^\circ\text{C}$ 之间变化，冷却水流量在 $50 \sim 100\%$ 之间变化，冷却塔风量在 $40 \sim 100\%$ 之间变化。设备状态约束条件为：在任何时候至少要开启 1 台冷却水泵、1 台冷水机组及 1 台冷却塔，且冷却塔的开启台数不少于冷水机组的开启台数。此外，每台设备启动后的半小时内不可以关闭，每台设备关闭后的半小时内不可以启动。

1.2 冷水机组能耗模型

冷水机组能耗模型的精度直接影响优化控制的寻优结果。动态模型可以用来模拟冷水机组的瞬态运行工况，但模型结构复杂、变量较多，不适于在线优化控制模型。经验模型是根据厂家提供的数据，通过统计回归分析得出的经验公式，大多将 COP 与制冷量、蒸发器出水温度、冷凝器进水温度之间的关系式，包括线性回归模型、二次回归模型及多元多项式回归模型等^[6]。经验模型仅反映了 COP 与影响因素之间的统计学关系，不具有任何物理意义，能耗预测偏差较大^[6]。本文采用基于热力学原理和线性化热损失原理的 Gordon-Ng 模型^[7]，该模型考虑了冷水机组的运行机理，变量较少。对于冷却水变流量运行的机组，Gordon-Ng 模型表示为式 (2)^[7]。

$$\frac{T_{eo}(1+N/Q_e)}{T_{ci}} - \frac{N+Q_e}{T_{ci}C_wG_w} - 1 = C_1 \frac{T_{eo}}{Q_e} + C_2 \frac{T_{ci}-T_{eo}}{T_{ci}Q_e} + C_3 \left(\frac{N+Q_e}{T_{ci}} \right) \quad (2)$$

式中： G_w 为冷却水流量，kg/s； T_{eo} 为蒸发器出水温度，K； T_{ci} 为冷凝器进水温度，K； N 为冷水机组功率，kW； Q_e 为制冷量，即冷水机组负荷，kW； C_w 为冷水的比热。

将冷水机组工况点的 G_w 、 T_{eo} 、 T_{ci} 、 N 及 Q_e 数据代入上式，可得到形如 $A=C_1B+C_2D+C_3E$ 的多元线性方程。如果获得足够多个工况点的运行数据，通过多元线性回归分析，得到系数 $C_1 \sim C_3$ 。

1.3 冷却塔出水温度及风机能耗计算模型

冷却塔出水温度（即冷凝器进水温度 t_{ci} ）可表示为风量 G_a 和室外湿球温度 t_{wb} 的函数，见式 (3)^[8]。

$$t_{ci} = \frac{(1+COP^{-1})Q_e}{C_p G_w} \left(\frac{C_p + C_p D_1 \left(\frac{G_w}{G_a} \right)^{D_2}}{D_3 G_w^{D_2-1}} - 1 \right) + t_{wb} \quad (3)$$

式 (3) 中： C_p 为冷却水的比热； D_1 、 D_2 、 D_3 为待定的系数，根据历史运行数据回归分析得出。

冷却塔风机功率可表示为风量的三次多项式函数。

$$W = b_1 + b_2 \lambda + b_3 \lambda^2 + b_4 \lambda^3 \quad (4)$$

式 (4) 中： λ 为风机风量与额定风量之比； $b_1 \sim b_4$ 为待定的系数。

1.4 冷水泵能耗模型

冷水流量与负荷及冷水机组的供水温度有关（即蒸发器出水温度 t_{eo} ）。忽略供水管道的冷水温升，认为空调末端风机盘管进水温度等于供水温度。由于提高供水温度会降低风机盘管的产冷量，需要提高冷水流量弥补冷量的降低，使冷量保持不变。韩伟国等^[9]对多个系列风机盘管的测试数据进行回归分析，发现在风量不变的情况下，变水温工况与标准工况之间存在关系式，如式 (5) 所示。

$$\frac{Q}{Q_0} = \frac{t_s - t_{eo}}{t_s - 7} \left(\frac{G_c}{G_{c0}} \right)^{0.367} \quad (5)$$

式 (5) 中： Q 和 G_c 分别为变水温工况下的冷量和冷水流量； Q_0 和 G_{c0} 分别为 7°C 供水标准工况下的冷量和冷水流量； t_s 为盘管进风的湿球温度，等于标准工况中的 19.5°C 。根据上式可计算出供水

温度升高后产生相同冷量所需的冷水流量如式(6)所示。

$$G_c = G_{c0} \left(\frac{t_s - 7}{t_s - t_{e0}} \right)^{2.7248} \quad (6)$$

单台冷水泵的轴功率为:

$$L = \frac{\rho g G_c H}{1000 \eta} \quad (7)$$

$$H = S_H G_c^2 \quad (8)$$

式(7)、式(8)中: L 为冷水泵的轴功率, kW; ρ 为冷水密度, kg/m^3 ; η 为水泵与电机的综合效率; g 为重力加速度, m/s^2 ; G_c 为冷水流量, m^3/s ; H 为水泵的扬程, mH_2O ; S_H 为冷水系统的阻抗, s^2/m^5 。假设系统变流量运行时冷水系统管网的阻抗不变, 可根据冷水泵的设计扬程和设计流量反推求出管路的阻抗 S_H 。

1.5 冷却水泵能耗模型

冷却水系统是一个开式环路, 认为变流量运行时冷却水系统管网的阻抗不变, 根据冷却水泵的设计扬程和设计流量反推求出管路的阻抗 S_w , 则变流量工况下的冷却水泵功率 P 为:

$$P = \frac{\rho g G_t (H_0 + S_w G_t^2)}{1000 \eta} \quad (9)$$

式(9)中: G_t 为冷却水的体积流量, m^3/s ; H_0 为冷却塔进塔水压, mH_2O 。

2 模型的求解与实现

全局优化控制模型涉及的最优化问题属于混合 0—1 整数的单目标非线性规划问题, 编写 MATLAB 程序求解。下面以某空调制冷机房为例说明的全局优化控制模型的求解过程。

基于该空调制冷机房的监测数据, 获得 6910 个离心式冷水机组工况点的功率、冷却水流量、制冷量、供水温度及冷凝器进水温度数据。通过多元线性回归分析, 得到三个系数: $C_1=0.017$, $C_2=257.837$, $C_3=0.007$, 拟合优度 $R^2=0.994$ 。将冷水机组功率表示为式(10)的显式方程。

$$N = \frac{0.017 \frac{T_{e0} T_{ci}}{Q_e} + (T_{ci} - T_{e0}) \left(1 + \frac{257.837}{Q_e} \right) + Q_e \left(0.007 + \frac{1}{C_w G_w} \right)}{\frac{T_{e0}}{Q_e} - \frac{1}{C_w G_w} - 0.007} \quad (10)$$

图 1 为不同运行工况下采用模型预测出的冷水机组功率与实测功率的对比。从图中可以看出, 冷水机组预测的功率与实测功率较好地吻合, 冷水机组负荷较低时的预测精度高于负荷较高的时候, 原因在于样本数据中低负荷工况的数据较多。模型的最大误差为 4.96%, 模型的预测精度较好。

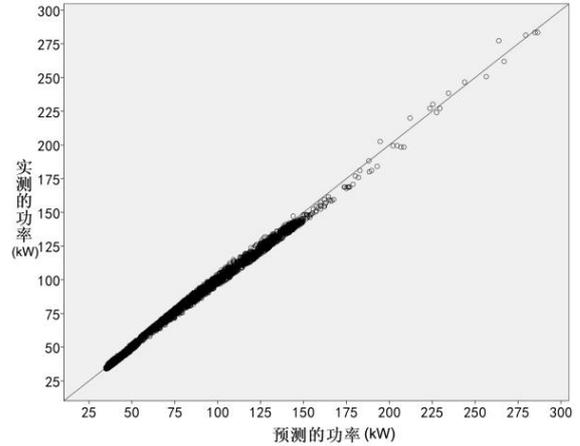


图 1 冷水机组的预测功率与实测功率对比

Fig.1 Comparison between predicted and measured power of the chiller

基于 1440 个冷却塔运行工况点数据进行回归分析, 得出式(3)中 $D_1=1.12$, $D_2=1.11$, $D_3=4.43$ 。冷却塔风机能耗模型中系数 $b_1=0.856$, $b_2=0$, $b_3=-2.886$, $b_4=17.051$ 。冷水机组的额定制冷量为 1934kW, 冷凝器中冷却水额定流量为 317 m^3/h , 冷却塔额定风量为 71.4 kg/s 。需要指出的是: 如果经过一段时间运行, 冷水机组和冷却塔效率下降, 需要根据新的监测数据进行回归分析, 更新模型参数。

以一个运行工况为例执行最优化模型求解程序。该工况下的冷负荷为 1214kW, 室外湿球温度为 27.2 $^{\circ}\text{C}$, 运行程序后得到的运行参数优化结果如下: 开启一台冷水机组、冷却塔、冷水泵及冷却水泵, 冷却塔风量 58.44 kg/s , 冷却水流量 243.57 m^3/h , 供水温度 8.1 $^{\circ}\text{C}$, 优化后的制冷机房设备总功率为 201.14kW。如果不进行冷却塔风量、冷却水流量及供水温度的调节控制, 而是按照传统的定流量方式运行, 使水泵和冷却塔仍然运行在额定流量和风量下, 供水温度仍维持在设计温度 7 $^{\circ}\text{C}$, 制冷机房设备总功率为 237.72kW。经过优化控制, 该制冷机房节能 15.39%, 优化控制可以获得良好的节能效果。

考虑到中央空调系统调节控制的时间滞后特性，调节控制的间隔时间不宜过短，如果间隔时间过短，将无法发挥调节的作用。文献[1]建议每 15 分钟完成一次优化运算及调节控制。可根据不同空调系统的实际情况设定调节控制的间隔时间，对于空调水系统较大、较复杂的项目，调节控制的时间间隔较长，一般不超过 30 分钟。

3 在线优化控制系统开发与实验验证

LabVIEW 是一款常用的上位机系统开发软件，拥有强大的界面开发能力和良好的软硬件接口。虽然 LabVIEW 对各种算法的支持能力较弱，但是能够与 MATLAB 进行混合编程，发挥 MATLAB 强大的科学计算能力。本文采用 LabVIEW 作为在线优化控制系统开发平台，采用 COM 组件技术进行 LabVIEW 与 MATLAB 混合编程，COM 组件技术可以使在线优化控制系统脱离 MATLAB 开发环境运行，便于优化控制系统软件的移植和推广^[10]。

所开发的在线优化控制系统包括数据采集模块、混合编程模块、参数设定模块、数据分析模块等。将 MATLAB 寻优程序编译成 COM 组件，该组件可以作为独立的对象供 LabVIEW 使用。系统每隔 15~30 分钟采集一次室外湿球温度、冷水流量、冷水供水及回水温度，计算出实时空调负荷，作为 MATLAB 寻优程序运算的输入变量，MATLAB 程序的 COM 组件运算得出优化后的冷水机组供水温度、水泵流量及冷却塔风量。建立水泵流量及冷却塔风量与电源频率的关系式，由上位机向 PLC 控制柜发出频率控制指令，调节水泵流量及冷却塔风量。通过 RS485 串口通信协议向冷水机组发出指令，由冷水机组调节供水温度。

为了验证所开发系统的功能，搭建了一个冷却水流量控制实验系统。图 2 为实验系统构成，图 3 为实验系统的实物图。水泵从冷却塔出口水箱吸水，加压后送入一个电加热器升温，以模拟冷水机组冷凝器的放热过程。控制柜中安装有 PLC 控制器和变频器，PLC 控制器与上位机控制系统之间通过 TCP/IP 协议通信，传送温度、电源频率等参数，还能执行水泵启停及变频控制指令。上位机控制系统实时采集室外干球温度和湿度，根据干球温度和相对湿度计算出湿球温度。

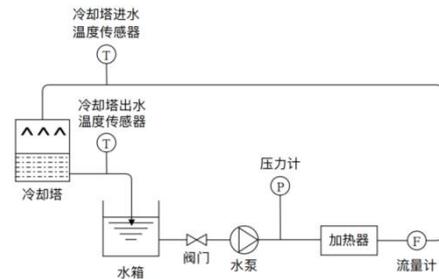


图 2 实验系统的构成

Fig.2 Layout of the experimental system



图 3 实验系统的实物图

Fig.3 Photo of the experimental system



图 4 优化后水泵频率值和水泵频率反馈值对比

Fig.4 The optimized value and feedback value of the power frequency of water pump

优化控制系统能够实时采集各项数据，能够控制水泵启停，设定各项控制参数。以一个给定工况

为例进行优化控制功能的验证, 该工况的冷水流量 $290\text{m}^3/\text{h}$, 冷水供水 7.4°C , 回水 10.5°C , 负荷为 1045kW , 根据实时温度和湿度计算出湿球温度。系统调用 MATLAB 程序的 COM 组件, 得出优化变量设定值, 根据冷却水泵流量与电源频率的关系式向 PLC 控制柜发出频率控制指令, 将水泵电源频率调节至频率设定值, 图 4 为系统界面上的水泵频率反馈值与设定值, 均为 38.38Hz , 说明该系统的上位机能够根据实时的运行工况调用优化模型计算出优化变量设定值, 并且将优化变量设定值传递给 PLC 控制柜, 由 PLC 控制柜将优化变量调节至设定值。

4 结论

建立了基于历史运行数据驱动的空调制冷机房的全局优化控制模型, 编写了全局优化控制模型求解的 MATLAB 程序, 基于 LabVIEW 开发了空调制冷机房在线优化控制系统, 采用 COM 组件技术进行 LabVIEW 与 MATLAB 混合编程。搭建实验系统对系统功能进行验证, 实验结果表明: 所开发的在线优化控制系统能够根据实时的运行工况将优化变量调节至优化设定值, 实现空调制冷机房的在线优化控制。后续将进一步完善系统功能, 在实际工程中推广应用。

参考文献:

- [1] 徐伟.中国高效空调制冷机房发展研究报告[M].北京:中国建筑工业出版社,2021.
 - [2] 李元阳,邱艺德,方兴,等.高效制冷机房标准化设计及其应用[J].制冷与空调,2023,23(6):92-100.
 - [3] 刘守超,吴疆,张瑞,等.基于主动寻优控制系统的制冷机房性能分析[J].制冷与空调,2023,23(3):56-61.
 - [4] 黄健.制冷机房多台冷水机组运行优化节能控制研究[J].安装,2019,(2):34-37.
 - [5] 张炜杰,裘舒年,李铮伟.冷水机组运行策略对比评价[J].建筑节能,2019,47(9):44-47.
 - [6] 魏峥,王碧玲.基于机器学习的冷水机组能耗模型辨识方法研究[J].建筑科学,2018,34(6):115-122.
 - [7] Jiang W, Reddy T A. Reevaluation of the Gordon-Ng performance models for water-cooled chillers[J]. ASHRAE transactions, 2003,109:272.
 - [8] Jin G Y, Cai W J, Lu L, et al. A simplified modeling of mechanical cooling tower for control and optimization of HVAC systems[J]. Energy Conversion & Management, 2007,48(2):355-365.
 - [9] 韩伟国,陆亚俊.风机盘管加新风空调系统 e 值比较设计方法[J].暖通空调,2002,32(5):80-83.
 - [10] 徐何,李滔,李勇.Matlab 与 LabVIEW 混合编程方法应用研究[J].科学技术与工程,2010,10(33):8267-8271.
-
- (上接第 55 页)
- [3] 王宏伟,李斯南,张芸栗,等.基于 TRNSYS 模拟土壤源热泵长期运行效果研究[J].建筑技术,2024,55(9):1064-1068.
 - [4] 胡志高,胡平放,王彦芳,等.武汉地理管地源热泵系统能效测试分析[J].煤气与热力,2024,44(3):1-5.
 - [5] 吴子龙.跨季节土壤蓄冷—土壤源热泵系统运行特性及优化研究[D].杭州:浙江理工大学,2023.
 - [6] 唐茂川,陈金华,田昊洋.重庆某医疗建筑复合式地源热泵系统分析[J].制冷与空调,2022,36(5):763-767.
 - [7] 李永,崔军艳,鲍玲玲.跨季节空气—土壤蓄热式热泵系统运行特性分析[J].制冷与空调,2022,22(10):61-69.
 - [8] MichaelisMark.C#本质论[M].北京:人民邮电出版社,2008.
 - [9] 刘铁猛.深入浅出 WPF[M].北京:中国水利水电出版社,2010.
 - [10] DB11/T 1413-2017,民用建筑能耗指标[S].北京:北京市质量技术监督局,2017.
 - [11] 国网北京市电力公司代理购电工商业用户电价表[EB/OL]. <https://www.95598.cn/omg-static//omg-static/99309271846191757911301501758590.pdf>.