文章编号：1008－8857(2023)02－0082－06 **DOI**: 10.13259/j.cnki.eri.2023.02.002

基于能耗监管平台的现有医院空调系统运行节能优化

贾 鹏，陈剑波，王成武，姚晶姗
（上海理工大学 环境与建筑学院，上海 200093）

摘 要：基于上海某医院能耗监管平台数据，利用 EnergyPlus 软件建立了该医院门诊楼建筑模型和空调系统模型，并验证了该模型的准确性。对该医院集中式空调系统运行策略进行优化分析，结果表明：当室内负荷低于冷水机组总额定制冷量 80% 时，负荷分配优化运行方案节能率最高，达到 9.7%；当室内负荷高于冷水机组总额定制冷量 80% 时，机组联合运行并采用负荷平均分配时比一台机组满负荷运行另一台机组部分负荷运行时节能，节能率为 1.5%～3.7%。分析了冷却水变流量对冷水机组和冷却水系统的影响及节能效果。结果表明，离心机组变流量运行时节能率达到 17%，而螺杆机组在定流量 45.13 $kg \cdot s^{-1}$ 运行时比较合理和节能。

关键词：集中式空调系统；能耗模拟；模型校验；节能优化
中图分类号：TU83 **文献标志码**：A

Energy-saving optimization of air conditioning system in an existing hospital based on energy consumption monitoring platform

JIA Peng，CHEN Jianbo，WANG Chengwu，YAO Jingshan
(School of Environment and Architecture, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: The building and air conditioning system model of its outpatient building was established using EnergyPlus software. Its accuracy was verified. The results show that when the indoor load is less than 80% of total rated cooling capacity of water chillers, the highest energy-saving rate by the operation scheme of optimized load distribution reaches 9.7%. When the indoor load is higher than 80% of its total rated cooling capacity, the energy-saving rate of 1.5%～3.7% is achieved by averaged load distribution of unit combination operation. Influence of cooling water flow rate on water chiller and cooling water circulation system as well as energy-saving was analyzed. The results show that the energy-saving rate of centrifugal unit can reach 17% in the variable flow

收稿日期：2020－09－23
第一作者：贾 鹏(1996—)，男，硕士研究生。研究方向：空调系统节能技术。E-mail：738184575@qq.com

operation, while reasonable system operation and energy-saving for screw unit can be achieved at constant flow rate of 45.13 kg·s^{-1}.

Keywords: central air conditioning system; energy consumption simulation; model validation; energy-saving optimization

近年来，随着医疗技术的进步、诊疗设备的发展、医院建筑规模的扩大、各科室环境标准的提高，医院建筑能耗逐年增长[1]。医院建筑节能是一项十分复杂的工程，其中空调系统能耗是医院建筑能耗的主要部分。本文基于医院能耗监管平台数据，选取上海某医院典型建筑——门诊楼作为研究对象，利用 EnergyPlus 软件对门诊楼建立建筑模型和空调系统模型，利用上述平台监测得到的数据[2]进行校准化模拟，深入分析整个医疗建筑空调系统中各设备的能耗特点和使用情况；将模型数据和能耗监管平台监测数据进行对比分析，为空调运行、节能管理提供优化方案。

1　研究对象

门诊楼建筑面积约 35 210 m^2，地下 2 层，地上 12 层，本文研究范围为门诊楼 1～12 层夏季舒适性空调系统。门诊楼建筑围护结构主要由地面、外墙、玻璃幕墙、外窗、屋面等组成。外墙平均传热系数为 2.0 W·m^{-2}·K^{-1}；屋面传热系数为 1.5 W·m^{-2}·K^{-1}；外窗为厚度 6 mm 的透明玻璃，其传热系数为 5.7 W·m^{-2}·K^{-1}，遮阳系数为 0.8；玻璃幕墙为 6 mm 绿色吸热层 + 12 mm 空气层 + 6 mm 透明中空玻璃，其传热系数为 2.8 W·m^{-2}·K^{-1}。门诊楼空调冷水机组配置如表 1 所示，各机组均位于 B1F 空调机房。

表 1　空调冷水机组配置

Tab. 1　Configuration of air conditioning water chiller

名称	设备参数
1号离心机组	额定制冷量2 590 kW，装机功率419 kW
2号离心机组	额定制冷量2 590 kW，装机功率419 kW
3号螺杆机组	额定制冷量940 kW，装机功率253 kW

2　基于能耗监管平台的数据分析

利用数据处理技术从能耗分项计量和机组负荷率频数两个维度对能耗监管平台数据进行分析。

2.1　能耗分项计量

从整个建筑用能品类出发，通过能耗分项计量精准找出建筑能耗的节能重点。图 1 为门诊楼各系统用电量。可见，空调系统是门诊楼能耗的节能重点，其用电量约占总用电量的 45%[3]。

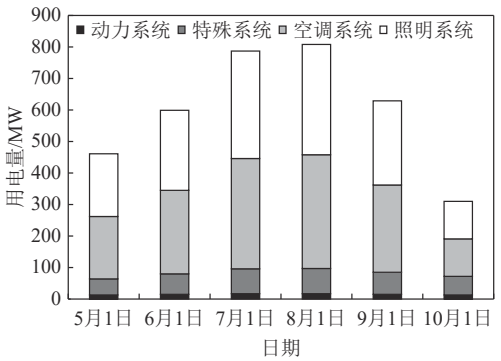


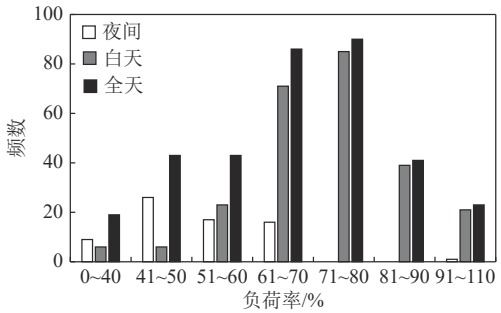
图 1　门诊楼各系统用电量

Fig. 1　Power consumption distribution of an outpatient building

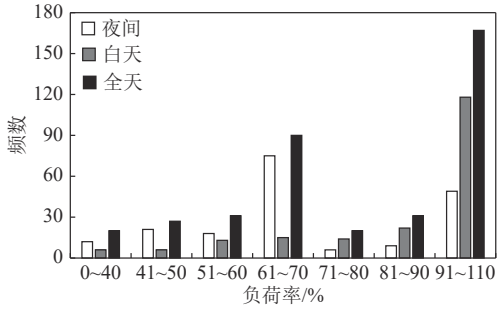
2.2　机组负荷率频数

图 2 为根据能耗监管平台记录的 2017 年 5 月 1 日至 9 月 31 日设备运行数据统计得到的各机组负荷率频数分布。由图可知：1 号离心机组全天运行时段负荷率在 60%～80% 的频数占比在 50% 以上；机组夜间运行时段负荷率主要集中在 40%～60%；机组白天运行时段负荷率在 65% 以上的频数占比为 70%，负荷率在 60%～80% 的频数占比为 54%。3 号螺杆机组全天运行时段负荷率达到 90% 的频数占比高达 53%，机组白天运行时段负荷率达到 85% 的频数占比高达 80%，即机组大部分时间以最大负荷运行。

综上可知，随着门诊楼门诊量的增多以及各种医疗设备的进入，楼内空调系统长期处于高负荷运行状态。



(a) 1 号离心机组



(b) 3 号螺杆机组

图 2 1 号离心机组和 3 号螺杆机组负荷率频数分布

Fig. 2 Frequency distribution of load rate for centrifugal unit 1 and screw unit 3

3 医院典型建筑能耗模型

建筑能耗模拟是进行建筑节能分析、建筑方案选择、标准制定、技术经济优化等的有效手段。本文建立了上海某医院门诊楼建筑模型和空调系统模型。门诊楼建筑模型如图 3 所示。

对门诊楼进行热工区域划分，并设定围护结构信息、室内环境参数，以及建筑内部照明和插座设备。以室内人员密度分析为依据进行模型内部人员设定。对建筑模型的空调系统空气环路、冷冻水环路、冷却水环路分别进行建模。图 4 为门诊楼空调水系统拓扑图，其中右侧虚线框内为冷却水环路的需求侧半环路。

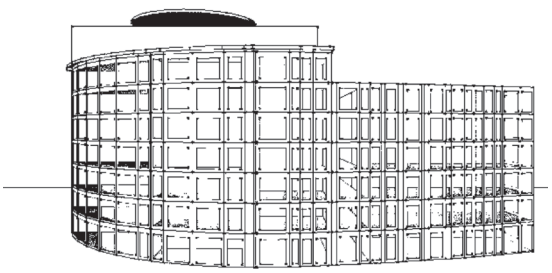


图 3 门诊楼建筑模型

Fig. 3 Outpatient building model

结合能耗监管平台数据，对室外温度、供热和供冷不满足小时数、制冷季节建筑分项电耗，以及制冷季节制冷量的实测值和模拟值进行对比分析，结果显示：室外温度满足标准规定值的天数占总天数的 97%；供热和供冷不满足小时数为 128 h，不舒适小时数为 2 298 h；空调系统电耗模拟值占建筑总电耗的 49%，与空调系统电耗实测值的占比相差 4%；在室外温度实测值和模拟值误差小于 5% 时，两者变化趋势基本一致。以上结果均在规定误差范围内，从而验证了所建立的建筑能耗模型的有效性。

4 集中式空调系统运行优化

本文主要从集中式空调系统能耗角度出发，从冷水机组负荷分配和冷却水变流量运行两个方面进行运行优化。

4.1 冷水机组负荷分配

在设计建筑空调系统时，为满足最不利条件下室内热舒适性及空气质量要求，冷水机组通常按最大负荷选型[4]。机组匹配计划如表 2 所示。本小节仅针对组合方式 3 进行研究。

由于在实际运行过程中冷水机组大部分运行时段处于非额定状态，其能耗不仅由机组本身负荷性能决定，还与机组负荷分配方式密切相关。以该医院门诊楼冷水机组为研究对象，通过 EnergyPlus 软件模拟不同负荷分配方式，并结合能耗监管平台数据和前文所建立的模型，在保证机组性能满足需求的情况下，提出制冷季节冷水机组联合运行时负荷分配优化策略。

机组运行方案分为：方案一，两台机组同时开启，并以相同的负荷率运行；方案二，两台机组逐台开启，当第一台机组达到额定制冷量时开启第二台机组；方案三，两台机组同时开启，在满足空调末端冷负荷并确保医疗安全的前提下，

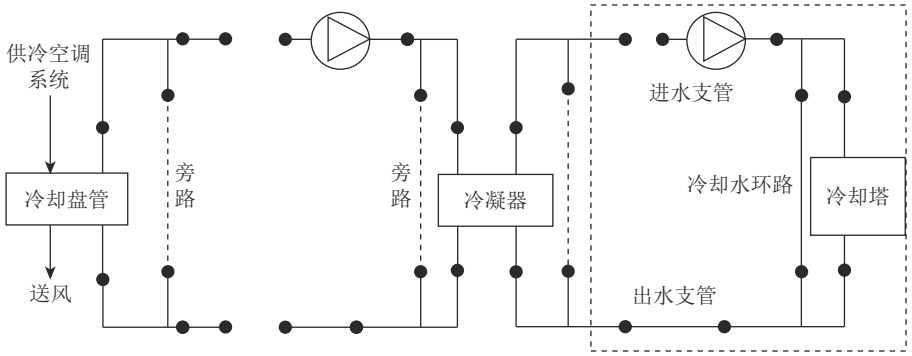


图 4　门诊楼空调水系统拓扑图

Fig. 4　Topography of air conditioning water system in an outpatient building

表 2　机组匹配计划

Tab. 2　Proposal of unit combination

组合方式	匹配形式	最大制冷量/kW
1	3号螺杆机组	890
2	1号离心机组	2 450
3	1号离心机组＋2号离心机组	4 900
4	1号离心机组＋3号螺杆机组	3 340

以冷水机组整体能耗最小为目标，提出冷水机组负荷分配优化策略，合理分配两台机组负荷。

由能耗监管平台数据可知，离心机组负荷率在 60%～80% 的频数占比在 50% 以上，故选取离心机组负荷率高于 80% 以及负荷率低于 80% 的典型日进行分析。7 月 10 日和 7 月 21 日白天（7:00～16:45）开启 1 号、2 号离心机组，机组负荷平均分配。图 5 为典型日白天空调负荷。从图中可知，7 月 10 日空调最大负荷为 2 707 kW，机组负荷率低于 80%；7 月 21 日空调最大负荷为 4 856 kW，机组负荷率高于 80%。

利用 EnergyPlus 软件模拟得到 7 月 10 日和 7 月 21 日机组负荷分配优化方案对比结果，分别如图 6、7 所示，其中，PLR 为冷水机组负荷率，COP 为冷水机组性能系数。

（1）7 月 10 日模拟结果分析

图 6（a）为采用三种方案模拟运行时冷水机组负荷分配情况。结合图 5 发现，7 月 10 日空调最大负荷为 2 707 kW，低于机组总额定制冷量的 80%，机组负荷率约为 60%。采用方案二时，其中一台机组始终在低于 20% 负荷率下运

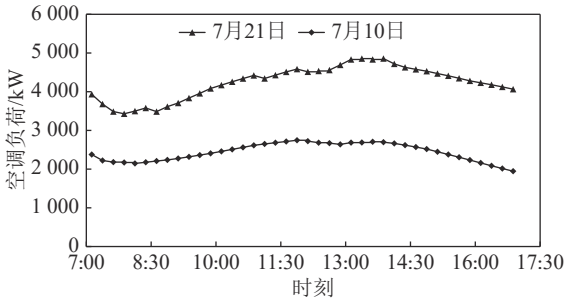


图 5　典型日白天空调负荷

Fig. 5　Actual cooling load on a typical day

行，这不利于机组的安全运行。方案三中负荷分配方式为 1 号离心机组占 45% 和 2 号离心机组占 55%。图 6（b）为采用三种方案模拟运行时冷水机组 COP，结果表明采用方案三时 COP 高于其他两种方案，其中采用方案二时 COP 最低。图 6（c）为采用三种方案模拟运行时机组功率。在稳定运行期间，采用方案三时冷水机组能耗从方案一时的 9 499 kW·h 下降到 9 012 kW·h，能耗降低 488 kW·h，节约电耗 5.1%。方案三的模拟结果与方案二的相比，节约电耗 9.7%。

（2）7 月 21 日模拟结果分析

图 7（a）为采用三种方案模拟运行时冷水机组负荷分配情况。9：00 后其空调负荷高于冷水机组总额定制冷量的 80%，机组负荷率在 80% 以上。此时方案三的负荷分配方式与方案一的基本相同，即负荷平均分配。图 7（b）为采用三种方案模拟运行时冷水机组整体 COP，方案三的负荷分配方式与方案一的一致，且两者整体 COP 均高于方案二。由图 7（c）可以看出，当室

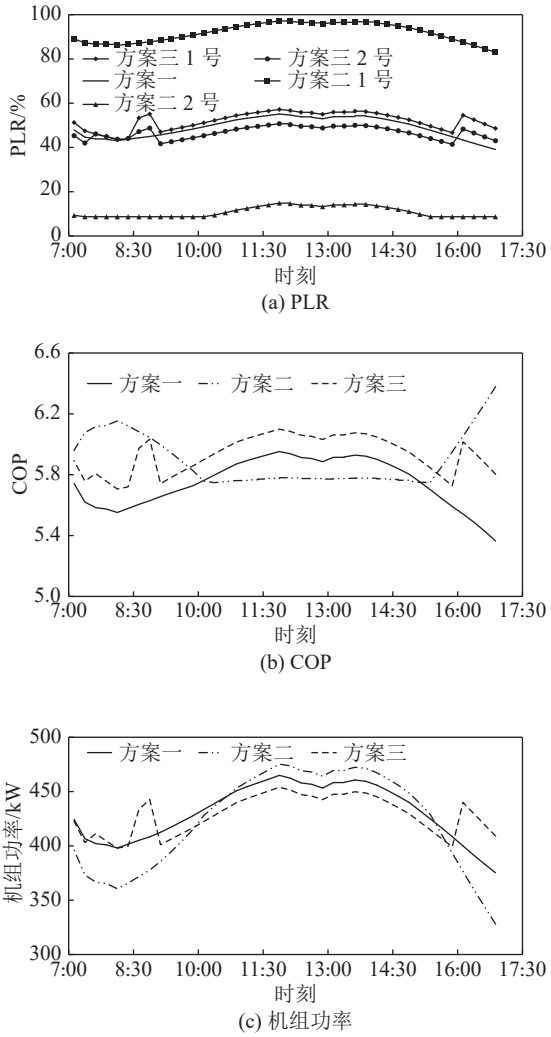


图 6 7 月 10 日机组负荷分配优化方案对比

Fig. 6 Comparison of unit load for each optimized scheme on July 10

内负荷高于机组总额定制冷量 80% 时，方案一较为节能，相比方案二节能 1.5%～3.7%。

4.2 冷却水变流量运行

利用 EnergyPlus 软件对 1 号离心机组和 3 号螺杆机组在部分负荷下单独进行变流量运行模拟，并保证室内负荷以及冷却水流量不低于冷凝器最低流量[5]。图 8 为冷却水定流量和变流量运行时功率随机组负荷的变化。由图中可见，冷却水变流量运行前、后离心机组功率变化与机组和冷却水系统功率之和的变化趋势一致。随着负荷下降，机组功率明显减小，但冷却水变流量前、后机组功率曲线几乎重合，说明冷却水变流量对离心机组能耗影响不大；而变流量运行时机

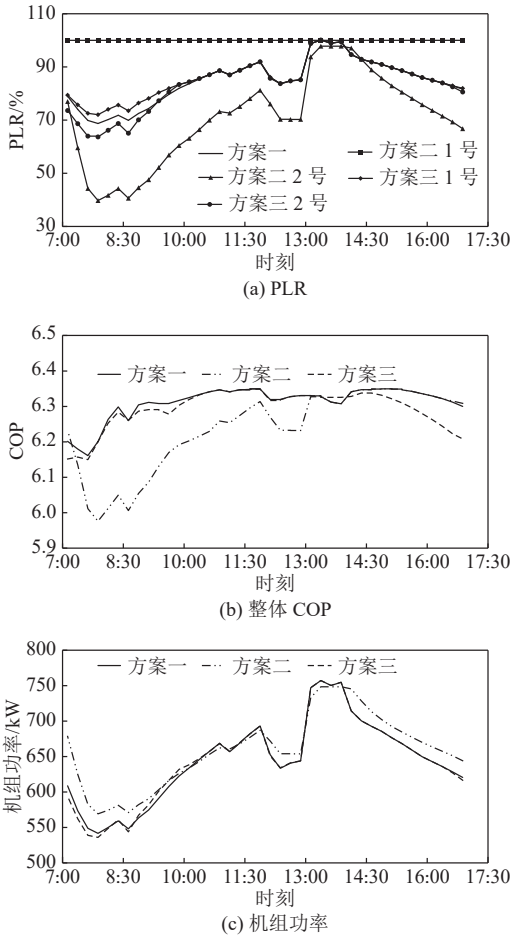


图 7 7 月 21 日机组负荷分配优化方案对比

Fig. 7 Comparison of unit load for each optimized scheme on July 21

组和冷却水系统功率之和始终低于定流量运行时的值，因为冷却水变流量时节省了更多的冷却水泵能耗[6–7]。在负荷率为 50% 时，冷却水变流量对于离心机组冷却水系统有显著的节能效果，节能率达到 17%。

3 号螺杆机组单独运行时冷却水变流量运行数据如表 3 所示。由图 8(b)和表 3 中可见，虽然随着螺杆机组负荷下降，冷却水流量降低，冷却水泵功率下降，但冷却水变流量在螺杆机组负荷率大于 90% 时使能耗略有下降，相反在负荷率低于 80% 后，由于螺杆机组负荷调节方式与离心机组负荷调节方式不同，螺杆机组功率以及机组和冷却水系统功率之和均随负荷率下降先上升后下降，在机组负荷率 57% 时功率达到最大。由能耗监管平台数据可知，螺杆机组单独运行

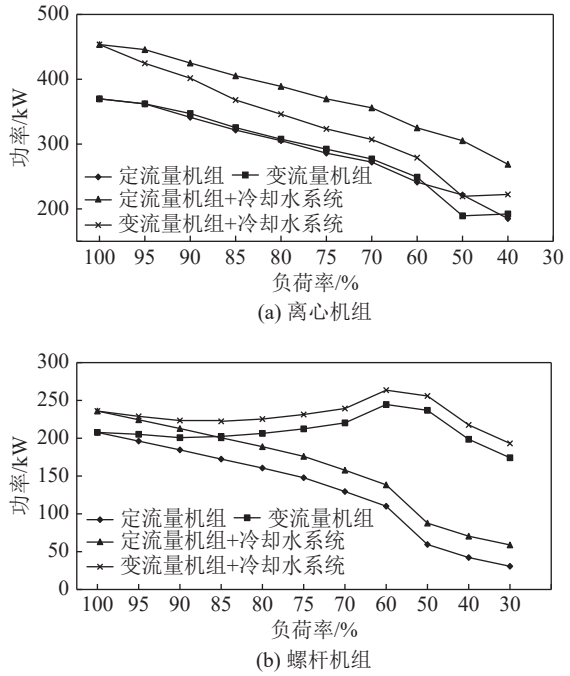


图 8　冷却水定流量和变流量时功率随机组负荷率的变化

Fig. 8　Changes of power with unit load under variable/constant cooling water flow

表 3　螺杆机组单独运行时冷却水变流量运行数据

Tab. 3　Variable flow rate of cooling water for standalone operation of screw unit

负荷率/%	100	95	90	85	80	75	70	60	50
冷却水流量/(kg·s^{-1})	56.35	47.34	45.13	39.86	37.87	37.87	37.86	37.85	37.86
主机输入功率/kW	207.7	205.2	199.76	202.36	206.4	212.4	220.3	244.6	236.9
冷却水泵功率/kW	28.25	23.74	22.64	20.01	19.00	18.99	19.00	18.97	18.98

时，80% 以上的时段是在 85% 负荷率以上运行。经综合考虑，在保证螺杆机组 COP 与制冷量的前提下，冷却水变流量下限为额定流量的 80%，即 45.13 kg·s^{-1}，此时系统运行比较合理和节能。

5　结　论

采用 EnergyPlus 软件对门诊楼集中式空调系统进行建模和运行优化研究，并对空调机组负荷分配和冷却水变流量进行了优化分析，主要结论如下：

（1）当离心机组联合运行，机组负荷低于机组总额定制冷量 80% 时，方案三（1 号离心机组负荷占 45%、2 号离心机组负荷占 55%）相比方案一、方案二更节能，节能率分别为 5.1%、9.7%；当机组负荷高于机组总额定制冷量 80% 时，采用负荷平均分配方式比方案二更节能，节能率为 1.5%～3.7%。

（2）在机组负荷率为 50% 时，离心机组冷却水变流量运行时节能效果明显，节能率达到 17%；螺杆机组冷却水变流量运行时反而会增加机组和冷却水系统能耗。由于螺杆机组在单独运行时，80% 以上时段是在负荷率高于 85% 运行，因此螺杆机组冷却水变流量下限为额定流量的 80%，即 45.13 kg·s^{-1}，此时系统运行比较合理和节能。

参考文献：

[1] 张晓卯. 构建上海公共建筑能耗数据库 推出上海公共建筑节能指数 [J]. 上海节能, 2017(7): 383 – 392.

[2] 朱惠. 上海三甲综合医院能耗和用能规律分析 [J]. 上海节能, 2017(4): 218 – 222.

[3] 路宾, 曹勇, 宋业辉, 等. 上海医院建筑用能状况分析与节能诊断 [J]. 暖通空调, 2009, 39(4): 61 – 64.

[4] 闫军威, 陈城, 周璇, 等. 多台冷水机组负荷分配优化策略仿真研究 [J]. 暖通空调, 2016, 46(4): 98 – 104, 110.

[5] 李苏泷, 邹娜. 空调冷却水变流量控制方法研究 [J]. 暖通空调, 2005, 35(12): 51 – 54.

[6] 孙一坚. 关于集中空调冷却水系统节能运行——评《节能不能因小失大》[J]. 暖通空调, 2003, 33(2): 39.

[7] PARK H S, LEE M, KANG H, et al. Development of a new energy benchmark for improving the operational rating system of office buildings using various data-mining techniques[J]. Applied Energy, 2016, 173(1): 225 – 237.