徐骁,熊文静,马西祥,等. 面向实验动物设施的能耗监测系统设计与应用[J]. 中国比较医学杂志, 2024, 34(10): 88-96.
Xu X, Xiong WJ, Ma XX, et al. Design and application of energy monitoring system for laboratory animal facilities[J]. Chin J Comp Med, 2024, 34(10): 88-96.
doi: 10.3969/j.issn.1671-7856.2024.10.011

面向实验动物设施的能耗监测系统设计与应用

徐 骁,熊文静,马西祥,母丹丹,周顺长*

(华中科技大学实验动物中心,武汉 430030)

【摘要】 目的 实验动物设施的能源消耗在科研机构能耗中占据相当大的比例,且其能耗特点与普通建筑物存在显著不同,因而需要专门的监测与管理。**方法** 面向实验动物设施设计了一套能耗监测系统,选取华中科技大学 SPF 级实验动物设施进行了部署。**结果** 该系统上线运行后,实现了设施用电量数据的实时采集和记录,并提出了 3 种应用场景下的管理节能措施。**结论** 面向实验动物设施的能耗监测系统具备可靠、高效、易用的特点,对实验动物设施能源管理工作具有指导意义与推广价值。

【关键词】 能耗监测系统;实验动物设施;节能管理
【中图分类号】 R-33 **【文献标识码】** A **【文章编号】** 1671-7856 (2024) 10-0088-09

Design and application of energy monitoring system for laboratory animal facilities

XU Xiao, XIONG Wenjing, MA Xixiang, MU Dandan, ZHOU Shunchang*
(Laboratory Animal Center, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430030, China)

【Abstract】 Objective Experimental animal facilities account for a significant proportion of the energy consumption by scientific research institutions; however, the energy consumption characteristics of these facilities differ from those of ordinary buildings, and thus require specialized monitoring and management. **Methods** A set of energy consumption monitoring systems was designed for experimental animal facilities and deployed in the specific pathogen-free-level experimental animal facility of Huazhong University of Science and Technology. **Results** The system achieved real-time collection and recording of the facility's electricity consumption data, and proposed energy-saving measures for three application scenarios. **Conclusions** This energy consumption monitoring system designed for experimental animal facilities is reliable, efficient, and user-friendly, and has the potential to guide and promote energy management programs at experimental animal facilities.

【Keywords】 energy consumption monitoring system; laboratory animal facilities; energy saving management
Conflicts of Interest: The authors declare no conflict of interest.

实验动物设施的节能管理不仅关乎机构的经济效益,更直接影响到环境保护和动物福利。有效的监测能够更加科学地了解能源的使用情况,识别能耗高峰期和节能潜力,从而制定更合理的能源管理策略,降低能源成本,提高能源利用效率。

因此,设计并实施面向实验动物设施的能耗监

[基金项目]华中科技大学实验技术研究项目(HZKJSYJSXM2024M096)。
[作者简介]徐骁(1990—),男,硕士,研究方向:实验动物设施管理。E-mail:xuxiaolac@hust.edu.cn
[通信作者]周顺长(1968—),男,高级工程师,研究方向:兽医学。E-mail:1989020590@hust.edu.cn

测系统具有重要的理论和实践意义。本文旨在针对实验动物设施的高能耗问题,设计一套可靠、高效、易用的监测系统,并探讨其在实际应用中的效果,以期为实验动物设施的节能管理提供有效的技术支持和决策依据。

1　能耗监测系统的实施背景

1.1　实验动物设施节能研究现状

实验动物设施的节能手段主要包括技术节能与管理节能,技术节能是指采用新设备、新技术,提高能源利用率。目前,新设备的主要关注点在降低除湿能耗、热回收等方面。Guan 等[1]研究比对了溶液除湿空气处理系统(liquid desiccant air conditioning,LDAC)与常规空气处理系统在实验动物设施应用中的能耗差异,结论显示 LDAC 可实现 37.3%的节电率。Li 等[2]针对 LDAC 在实验动物设施应用中氨吸收性能不佳的特点,提出使用溴化锂溶液的方法,可以在实现节能运行的同时,显著地降低 LDAC 送风中氨浓度。余俊祥等[3]以杭州市 3 个实验动物设施为例,对比分析了 LDAC、四管制多功能热泵以及冷水机组的能耗情况,结果显示 LDAC 能耗约为冷水机组的 55%,四管制多功能热泵能耗为冷水机组的 71%。Liu 等[4]比较了热管、液体循环和溶液吸收 3 种余热回收技术的能效比,并进行了 4 个不同气候区的比较:严寒、寒夏、寒冬、夏暖冬。任尔媛[5]分析了新排风热管显热回收及 U 型除湿热回收两种措施的节能效果,结论表明投资回收期小于 1 年。吴强等[6]介绍了三维热管在除湿中的应用效果,全年可实现节能率为 20%。闫辰等[7]统计分析乙二醇热回收装置在实验动物设施全年运行中的节能效果,并结合其特点提出了运行建议。

新技术的主要关注点是空气处理系统的优化控制策略以及计算机辅助气流组织设计。Zhuang 等[8]提出了一种自适应的温湿度解耦控制方法,对现有的空气处理系统(air handling unit, AHU)进行改造后,结合室内外温湿度差调整进风量与进风方式,尽量避免在除湿阶段的降温与再加热过程,改造后空调系统的年能耗可降低 6.8%~40.8%。Liu 等[9]提出了一种基于多风扇变频的改进系统,用于满足非工作模式下的压力控制要求,可节省 39.8%的能耗,同时保证洁净度。钟加晨等[10]、王文涛等[11]、龚光彩等[12]利用计算机流体力学模拟方法,对实验动物设施内的气流组织进行了仿真计算,并得出相应改进建议。上述研究均取得了非常显著的节能效果。

管理节能是指在不改变现有技术、设备、工艺等硬件措施的条件下,通过管理手段优化运行方式、降低能源漏损率。目前,管理节能的主要关注点在与合理调整换气次数。Shan 等[13]针对一处制药洁净车间进行了空气处理系统的控制策略优化,无需任何形式的设备更新投入,每年最高可节省 42%的能源使用。Loomans 等[14]讨论了基于需求控制过滤(demand controlled filtration, DCF)方法,根据洁净车间的实际被使用情况来动态地调整换气次数,在典型条件下,最高可实现 93.6%的节能率。Zhuang 等[15]提出了一种协调需求控制通风策略,通过协调空气处理系统和冷热源系统之间的运行来动态调整换气次数,实现多区洁净室空调系统运行节能率分别达到 63.3%。Cheng 等[16]研究了 GMP 条件下洁净实验室中的生产模式与待机模式的双向切换,实现了节能控制,并对造成的压差梯度影响进行了讨论。

从以上国内外研究不难看出,无论是新技术新设备应用还是管理手段优化运行当中,节能潜力的分析、节能方案的制订、节能效果的衡量都非常依赖准确的能耗分析,以支撑实验动物设施的节能管理向着精细化、精准化的方向发展。

1.2　实验动物设施能耗分析方法

实验动物设施相比于其他公共建筑的能耗特征存在明显差异。丁贤明等[17]对浙江大学实验动物中心的整体能耗进行了计量与测算,核算后监测期内实验动物设施的单位面积能耗是普通公共建筑的 8.52~21.88 倍。唐利军等[18]对实验动物设施的基本能耗结构进行了分析,结论表明冷热源及新风系统的能耗占设施总能耗的 50%以上,应重点予以关注。

实验动物设施能耗分析包括如下步骤(图 1):

(1)能耗数据收集。通过收集实验动物设施的能源消耗数据,如电力、热力、水等,对能源消耗的趋势、周期性变化等进行统计和分析。

(2)能耗模型建立。结合已收集的能耗数据,建立实验动物设施的能耗模型,对设施的能源消耗进行仿真和进一步预测。可以借助建模软件,根据设施的结构、设备特点等,通过模拟实验和参数优化,预测设施的能源使用最佳效率,建立能耗基线

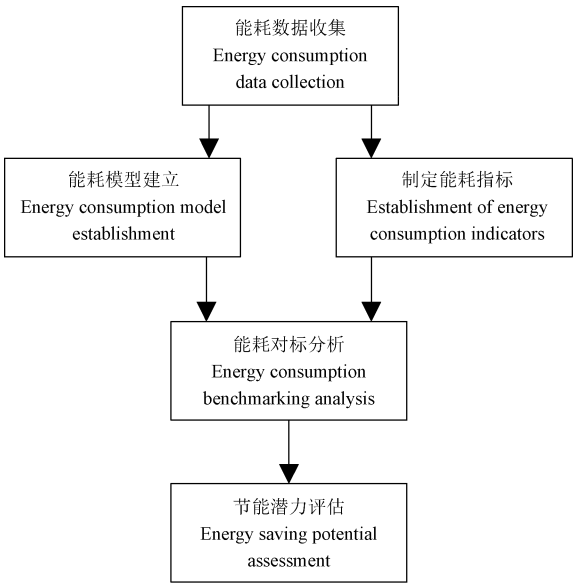

图 1 实验动物设施能耗分析步骤

Figure 1 Steps for energy consumption analysis of a laboratory animal facility

用于对比。

(3)制定能耗指标。借鉴能耗评估标准和指南,制定适用于特定实验动物设施的能耗评估指标,评估设施的能源利用效率和节能潜力,为能源管理和决策提供科学依据。

(4)能耗对标分析。使用已经建立的能耗指标或能耗模型,对实验动物设施的能耗状况进行评判。也可以利用能流图等工具,进一步对能源的流向、转化和损耗进行分析。

(5)节能潜力评估。结合对标结果,对影响实验动物设施能耗的各种因素进行分析,包括环境参数、设备运行、人为活动等,确定各种因素对能耗的影响程度,评估出潜在的节能潜力与措施。

在传统的能耗分析中,数据收集一般采用人工手抄方式,难以保证数据的准确性与实时性,严重影响后续的数据分析与评估。能耗监测系统的出现,解决了传统抄表中的诸多问题,具有重要的实用意义。

1.3 能耗监测系统及其在其他行业中的应用

能耗监测系统是通过安装能耗计量装置,采用实时传输等手段,及时采集并记录能耗数据的软硬件系统。作为一种能够实时监测和管理能源消耗的技术,可以实现能源消耗过程的数字化、信息化,因而在医院、制药洁净车间、高校实验室当中已经得到了广泛的应用[19-21]。上述设施与实验动物设施具有显著的相似性,运用能耗监测系统实现实验动物设施精细化节能管理,有望成为未来实验动物设施能源管理的主要发展方向。

2 能耗监测系统的设计

2.1 系统设计的基本原则与需求分析

在设计面向实验动物设施的能耗监测系统时,需要遵循以下基本原则:

(1)实时性。应具备实时监测能耗数据的功能,能够实时采集实验动物设施各项能源的消耗数据,包括电、气、水,以保证数据的准确性和及时性。

(2)灵活性。系统设计应考虑到不同实验动物设施的特点和需求差异,具有灵活的配置功能,能够根据具体情况调整监测参数和监测频率,以满足不同设施的监测要求。

(3)完整性。系统应具备完善的数据存储和管理功能,能够对采集到的能耗数据进行存储、备份和管理,以确保数据的安全性和可追溯性。

(4)易用性。系统应提供数据可视化和报表分析功能,能够将监测到的能耗数据以图表、报表等形式直观展示,满足不同用户的使用需求,包括科研人员、管理人员、设施运维人员等,降低用户的学习成本和使用难度。

(5)可扩展性。系统设计应考虑到未来的发展需求,具有良好的可扩展性,能够随着实验动物设施规模的扩大或技术的更新而进行相应的升级和扩展,保持系统的持续性和适应性。

2.2 系统整体架构设计

能耗监测系统架构整体可以分为采集层、传输层、平台层(图 2)。

(1)采集层。采集层是系统的基础,负责采集实验动物设施各项能源的消耗数据和环境参数。包括电力仪表、水表、气体流量计以及温湿度采集器等。采集器的选择应考虑到精度、稳定性、适应性等因素。

(2)传输层。负责将采集器采集到的数据传输至上层处理单元。采用有线或无线通信技术,如以太网、Wi-Fi、LoRa 等,确保数据的及时、稳定地传输。

(3)平台层。平台层又细分为数据处理层与应用服务层。在数据处理层,接收传输层的数据,并进行处理、分析和存储。该层的功能包括数据清洗、数据分析、异常检测、数据存储等,以确保数据的准确性和完整性。在应用服务层,提供系统的各

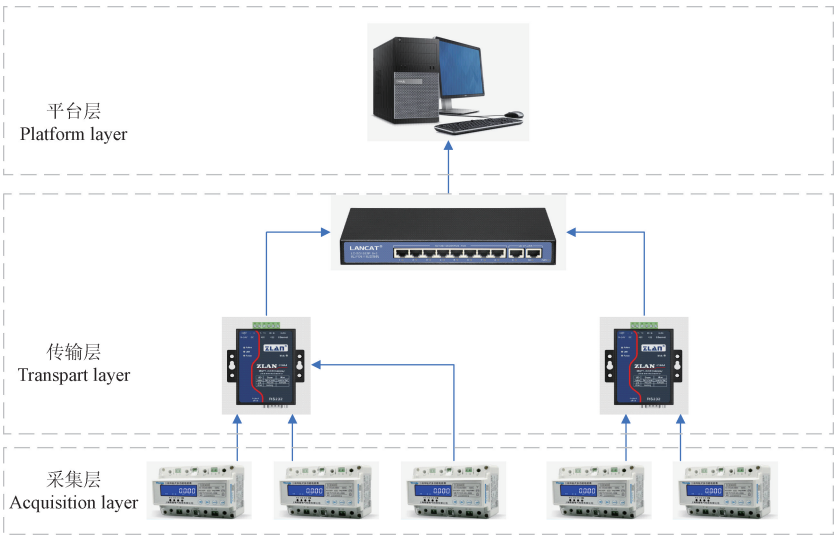

图 2　系统架构图

Figure 2　Architecture of system

项功能和服务,包括数据可视化、报警与预警、能耗分析、报表生成等。用户可以通过 Web 界面访问系统,查看实时数据和历史数据,并进行相应的操作和管理。

2.3　系统硬件与软件设计

能耗监测系统主要包括硬件系统和软件系统。

(1)硬件系统。硬件系统主要由智能计量仪表、数据传输网关和服务器 3 部分组成。智能电表计量精度不低于 1.0 级,配备 RS485 通讯接口,采用 Modbus-RTU 标准协议,性能指标符合国标 GB/T 17215、GB/T 17883 和 DL/T 614 对电能表的各项技术要求,配套使用的电流互感器精度等级不低于 0.5 级。考虑转化楼实际布线经济性,数据传输网关使用有线/无线两种方式进行通讯。考虑实验动物屏障设施对信号屏蔽性强,无线传输选用 Lora 方式,可以实现-140 dBm 的接收灵敏度和+20 dBm 的输出功率,最远通讯距离达到 8 km。

(2)软件系统。软件系统采用 B/S 架构设计,是一种以分布式思想结合模块化运行的设计架构,用户无需安装客户端,使用主流浏览器即可以访问系统。软件系统主要包括应用平台与数据库两部分。本系统应用平台选取 100%开源的物联网开发引擎 Thingsboard,支持 MQTT、CoAP、SNMP、LWM2M、Modbus、OPC UA 和 HTTP 等行业标准物联网协议。数据库选用 PostgreSQL+Cassandra 组合。PostgreSQL 数据库用于储存关系型数据及属性数据,Cassandra 数据库用于储存时间序列数据,如电能实时采集数据。数据库对外提供统一的数据服务接口,Thingsboard 平台使用数据服务,提供各类应用,包括后台管理工具、数据可视化、数据分析应用及其他功能。

3　能耗监测系统的实现与验证

3.1　系统实施概况

华中科技大学转化医学大楼 15、16 楼实验动物设施(后文简称“转化楼”)为 SPF 级洁净实验动物设施,总建筑面积 6800 m^2,其中屏障内面积 1600 m^2。在转化楼设计部署一套能耗监测系统,主要内容包括各低压配电室及馈线回路增设智能电表、电流互感器、数据采集网关,通信网络构建与软件平台部署等。

转化楼总进线由大楼地下二层配电房引出,共含有一二级负荷 652.90 kW,三级负荷 2116.85 kW,主要包括空气处理系统、冷热源系统、蒸汽发生系统、净化水及辅助生产系统、照明及动力系统、安防弱电系统等用电负荷。结合转化楼低压配电室实际物理分布位置,能耗监测系统所接入的计量点位共计 27 个。

3.2　系统效果及验证

能耗监测系统由华中科技大学实验动物中心自行实施开发与部署,2023 年 12 月正式投入使用,截至 2024 年 4 月,系统接收能耗数据包 15 837 768 条,丢包率 2.87%,整体运行稳定(图 3)。

为验证数据采集与计量准确性,选取 2023 年 12 月 12 日~2023 年 12 月 24 日期间,由本系统采集电量数据与高压配电房进线总电表数据进行比

图 3 系统实际运行界面

Figure 3 Actual operating interface of the system

对,如表 1 所示。

受数据采集周期、智能电表采集精度误差等因素影响,能耗监测系统数据与总表数据误差率为 0.5%,证明系统采集计量准确,满足实际应用标准。

以 2024 年度第一季度(2024 年 1 月~2024 年 3 月)为例,如图 4 显示,2024 年度第一季度转化楼总耗电量为 244 558.58 kWh。子系统方面,冷热源系统耗电量占比 58.94%,空气处理系统耗电量占比 35.13%,两者合计占总用电量的 94.07%。

设备方面,如图 5 所示,用电量排名前三的依次为 2 号风冷热泵、进排风机组、4 号冷热循环水泵,与子系统耗电量整体情况相吻合。由此看出,转化楼管理节能应重点关注冷热源系统与空气处理系统。

表 1 能耗监测系统采集电量数据准确性验证比对

Table 1 Verification and comparison of the accuracy of electricity data collection in energy monitoring systems

日期 Date	总电表数据/kWh Total meter data	能耗监测系统数据/kWh System data
2023/12/12	3950	3819.33
2023/12/13	3380	3091.34
2023/12/14	2206	2924.98
2023/12/15	4999	3996.44
2023/12/16	3624	4280.02
2023/12/17	5073	4299.23
2023/12/18	1205	3986.94
2023/12/19	5948	3757.35
2023/12/20	4279	3788.93
2023/12/21	3992	4847.33
2023/12/22	5168	5028.99
2023/12/23	4511	4421.72
2023/12/24	4154	3983.17
合计 Total	52 489	52 225.77
总误差 Total error		263.23
误差率/% Error rate		0.50%

3.3 系统节能应用

(1)换气次数动态调整分析。合理设置换气次数在实验动物设施节能中至关重要。转化楼的设计风量为 45 000 m^3,设计平均换气次数为 18.75/h,高于国标要求的最小换气次数。考虑工作时间段(6:00~20:00)人员流动,需要留有一定风量冗余以维持压力差稳定。在非工作时间段(20:00~次日 6:00)降低风量为 40 000 m^3,平均换气次数为 16.67/h,以实现节能。

使用能耗监测系统计量节能效果,如图 6 所示,以典型日 2024 年 4 月 17 日为例,工作时间段(6:00~20:00)风机机组功率为 38.85 kW,在非工作时间段(20:00~次日 6:00)风机机组功率为 21.02 kW。降低风量运行后节能率为 45.89%,推算得全年节电量约为 52 063.6 kWh。

(2)过渡季节运行辅助决策。在制热工况过渡季节(新风温度低于目标控制温度 5 ℃左右),所需的制热负荷较低,为实现节能目标,此时进行温湿度控制一般有两种运行方式:仅使用冷热源系统或仅使用电再热系统。两种方式需手动切换,依赖人工经验与判断,且缺乏数据分析支撑以确定最优策略。

使用能耗监测系统,以转化楼制热工况在过渡季节(2024 年 3 月~4 月)的运行数据为例,对其运行方式的选择进行了辅助决策分析,其结果如表 2 所示。

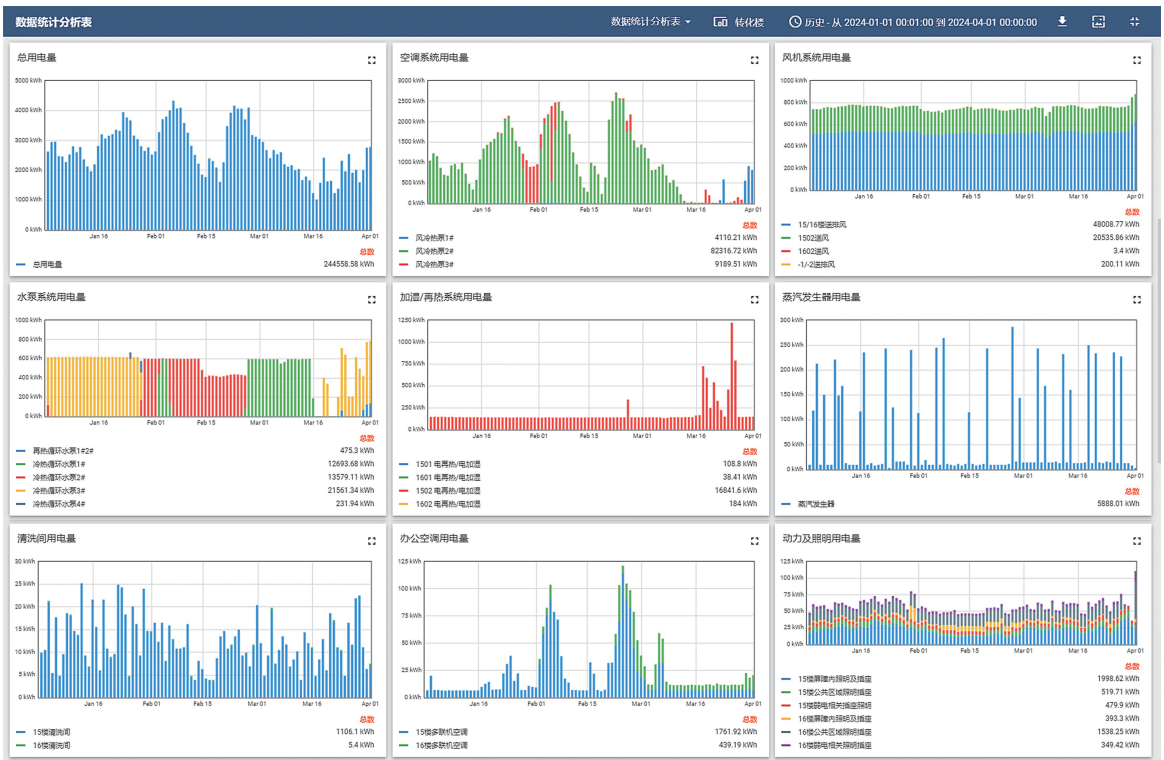

图 4　系统实际运行界面-分项统计电量(2024 年 1 月~2024 年 3 月)

Figure 4　Actual operating interface of the system-itemized electricity counting (January 2024~March 2024)

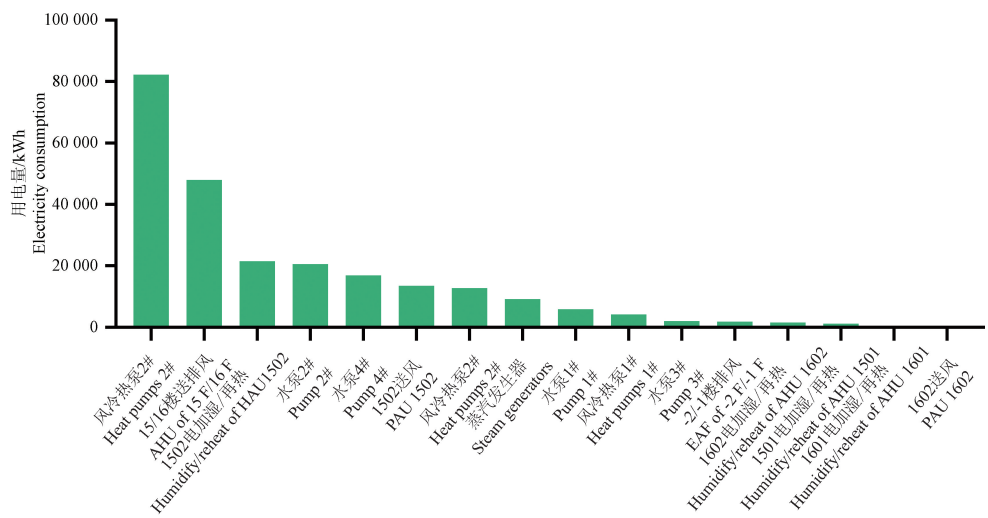

图 5　设备用电量排名(2024 年 1 月~2024 年 3 月)

Figure 5　Equipment electricity consumption ranking (January 2024~March 2024)

以上分析可以得出:在过渡季节同等温度条件下,新风湿度与目标湿度控制值(回风平均湿度)的湿度差值是决定选择运行方式的关键参数。以转化楼为例,湿度差的临界值为 24%~26%左右,湿度差低于临界值选择电再热系统更加节能,高于临界值选择冷热源系统更加节能。

(3)加湿方式切换辅助决策。冬季新风湿度较低,转化楼采用电热加湿方式保证屏障内湿度,配合空气处理系统覆盖全部饲养区域,且无法分区域进行调整。在设施启用初期,笼位使用率不足 20%,造成了严重的能源浪费。

使用能耗监测系统,快速识别并发现了这一问题,采用分布式加湿器实现了 IVC 笼具内湿度的独立控制,加湿系统耗电量占日用电量比例由 28.08%~33.03%下降至 4.95%~6.27%。其加湿效果及用电量情况如表 3 所示。

以电热加湿系统加湿方式切换前典型日(12 月 26 日)及切换后典型日(12 月 28 日)为例(图 7),

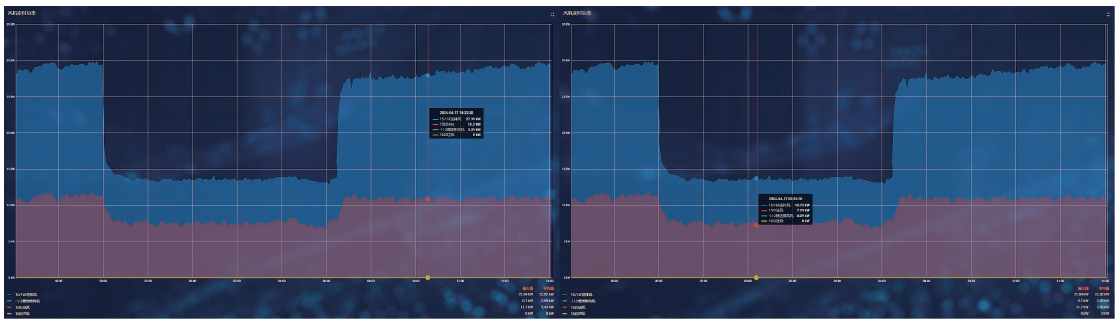

图 6 换气次数动态调整

Figure 6 Ventilation rate dynamic adjustment

表 2 过渡季节不同气候条件下不同运行方式的用电量比较

Table 2 Comparison of electricity consumption under different operating modes in various climate conditions during transitional seasons

运行方式 Operating mode	日期 Date	新风平均温度/℃ Average temperature of fresh air	回风平均温度/℃ Average temperature of return air	新风平均湿度/% Average humidity of fresh air	回风平均湿度/% Average humidity of return air	湿度差/% Humidity difference	用电量/kWh Electricity consumption
冷热源 Cooling and heating source	3 月 13 日 March 13th	16.4	20.3	47.4	36.9	10.5	605.83
电再热 Electric reheating	3 月 20 日 March 20th	17.0	20.4	41.5	31.5	10.0	540.79
冷热源 Cooling and heating source	3 月 27 日 March 27th	14.3	20.1	80.0	53.3	26.7	748.26
电再热 Electric reheating	4 月 4 日 April 4th	14.3	20.2	77.2	52.7	24.5	780.8
冷热源 Cooling and heating source	3 月 24 日 March 24th	16.6	20.1	88.9	59.3	29.6	647.71
电再热 Electric reheating	3 月 17 日 March 17th	16.7	20.1	89.3	61.8	27.5	723.19

表 3 不同加湿方式的加湿效果及用电量比较

Table 3 Comparison of effect and electricity consumption of different humidification methods

加湿方式 Humidification method	日期 Date	回风平均湿度/% Average humidity of return air	IVC 笼具内平均湿度/% Average humidity of IVC	加湿系统耗电量/kWh Electricity consumption of humidification system	日总用电量/kWh Total electricity consumption	加湿系统用电量占比/% Proportion of electricity consumed by humidification system
集中式加湿 Centralized humidification	12 月 22 日 Dec 22nd	29.8	35.4	1631.99	5031.31	32.44
	12 月 23 日 Dec 23rd	29.3	35.5	1454.41	4421.81	32.89
	12 月 24 日 Dec 24th	30.9	37.4	1315.19	3981.56	33.03
	12 月 25 日 Dec 25th	29.4	36.4	1043.20	3643.63	28.63
	12 月 26 日 Dec 26th	29.4	36.7	969.61	3453.01	28.08
切换过渡期 Transition period	12 月 27 日 Dec 27th	27.7	34.6	408.00	3049.55	13.38
分布式加湿 Distributed humidification	12 月 28 日 Dec 28th	26.3	38.4	147.20	2631.20	5.59
	12 月 29 日 Dec 29th	30.5	42.6	147.19	2658.51	5.54
	12 月 30 日 Dec 30th	39.8	53.4	147.19	2474.02	5.95
	12 月 31 日 Dec 31st	27.3	39.7	147.19	2348.80	6.27
	1 月 1 日 Jan 1st	25.2	36.5	145.60	2627.47	5.54
	1 月 2 日 Jan 2nd	30.9	45.4	145.61	2943.46	4.95

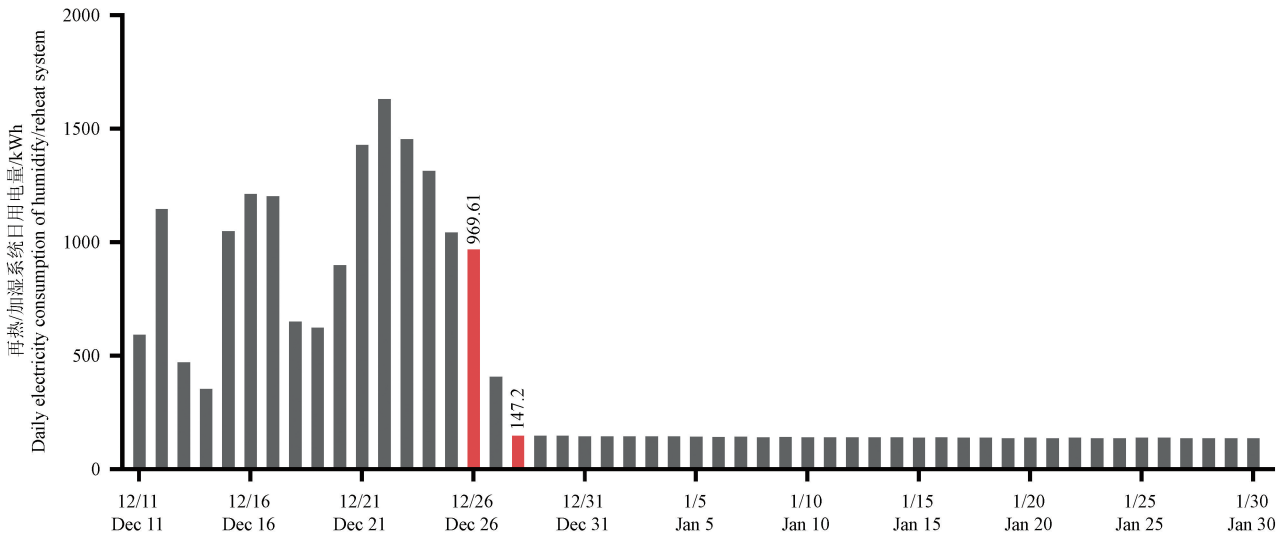

图 7　加湿方式切换节能效果

Figure 7　Energy saving effects of humidification mode switching

切换前典型日用电量为 969.61 kWh,切换后典型日用电量为 147.2 kWh,理论对比节能率为 84.8%。

4　结论

实验动物设施的节能降耗研究,非常依赖能耗数据的收集与分析。传统的数据清洗、过滤、整合等工作需要消耗大量的人力和时间,能耗监测系统能够简洁高效地进行复杂的数据收集、处理和分析工作。本文设计了面向实验动物设施的能耗监测系统,并结合华中科技大学转化医学大楼 15、16 楼实验动物设施进行了应用,探索并评估了实验动物设施管理节能的手段和效果。本研究表明,能耗监测系统在实验动物设施中具有显著的实用价值和推广价值。

参考文献:

[1] GUAN B, ZHANG T, LIU X. On-site performance investigation of liquid-desiccant air-conditioning system applied in laboratory rodent room: a comparative study [J]. Energy Build, 2021, 232: 110664.

[2] LI S, LIU X, ZHANG T. Ammonia absorption performance of a liquid desiccant dehumidification system applied in laboratory rodent room [J]. Appl Therm Eng, 2021, 199: 117523.

[3] 余俊祥, 林金成, 高克文, 等. 实验动物用房暖通空调系统节能策略研究 [J]. 暖通空调, 2023, 53(12): 24-29.
YU J X, LIN J C, GAO K W, et al. Research on energy saving strategies of HVAC system for laboratory animal facilities [J]. Heat Vent Air Cond, 2023, 53(12): 24-29.

[4] LIU C, MA H, LIU S, et al. Heat recovery technology and energy-saving effect analysis apply to cleanroom exhaust waste heat characteristics [J]. Energy Build, 2024, 306: 113935.

[5] 任尔媛. 某 SPF 级动物房空调系统节能措施效果分析 [J]. 暖通空调, 2021, 51(6): 71-74.
REN E Y. Effect analysis on energy saving measures of air conditioning system in a SPF animal house [J]. Heat Vent Air Cond, 2021, 51(6): 71-74.

[6] 吴强, 尤军, 吴成, 等. 三维热管在实验动物设施除湿中的节能应用 [J]. 实验动物与比较医学, 2020, 40(5): 437-439.
WU Q, YOU J, WU C, et al. Energy-saving application of three-dimensional heat pipes in dehumidification of laboratory animal facilities [J]. Lab Anim Comp Med, 2020, 40(5): 437-439.

[7] 闫辰, 尚晓松, 孙波, 等. 乙二醇热回收装置在实验动物设施运行中的节能效果 [J]. 实验动物科学, 2022, 39(3): 45-50.
YAN C, SHANG X S, SUN B, et al. nergy Saving effect of ethylene glycol heat recovery device in laboratory animal facility operation [J]. Lab Anim Sci, 2020, 40(5): 437-439.

[8] ZHUANG C, WANG S. An adaptive full-range decoupled ventilation strategy for buildings with spaces requiring strict humidity control and its applications in different climatic conditions [J]. Sustain Cities Soc, 2020, 52: 101838.

[9] LIU J, ZHANG L, YANG J, et al. Study on pressure control and energy saving of cleanroom in purification air conditioning system [J]. Energy Build, 2021, 253: 111502.

[10] 钟加晨, 王志毅, 吴强. 基于节能的实验动物人工环境气流组织数值模拟 [J]. 中国比较医学杂志, 2021, 31(3): 104-110.
ZHONG J C, WANG Z Y, WU Q. Numerical simulation of air distribution in an artificial laboratory animal environment designed to minimize energy costs [J]. Chin J Comp Med, 2021, 31(3): 104-110.

[11] 王文涛, 郑功杭, 李先庭, 等. 利用室内空气循环净化降低实验动物房新风量的节能效果 [J]. 制冷学报, 2021, 42(6): 1-7.
WANG W T, ZHENG G H, LI X T, et al. Energy-saving effect of air-conditioning system in laboratory animal room with less fresh air volume and purification of indoor circulating air [J]. J Refrig, 2021, 42(6): 1-7.

[12] 龚光彩, 陈湘, 刘激扬, 等. 空气载能辐射空调系统在实验动物房中的应用分析 [J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2022, 49(3): 211-219.
GONG G C, CHEN X, LIU J Y, et al. Analysis of the application of air carrying energy radiant air-conditioning system in laboratory animal rooms [J]. J Hunan Univ Nat Sci, 2022, 49(3): 211-219.

[13] SHAN K, WANG S. Energy efficient design and control of cleanroom environment control systems in subtropical regions-A comparative analysis and on-site validation [J]. Appl Energy, 2017, 204: 582-595.

[14] LOOMANS M G L C, MOLENAAR P C A, KORT H S M, et al. Energy demand reduction in pharmaceutical cleanrooms through optimization of ventilation [J]. Energy Build, 2019, 202: 109346.

[15] ZHUANG C, SHAN K, WANG S. Coordinated demand-controlled ventilation strategy for energy-efficient operation in multi-zone cleanroom air-conditioning systems [J]. Build Environ, 2021, 191: 107588.

[16] CHENG X, LI C, MA X, et al. Pressure gradient control in bidirectional switching between standby mode and production mode in biopharmaceutical cleanroom [J]. J Build Eng, 2023, 65: 105816.

[17] 丁贤明, 周荣贵, 丁阳, 等. 能耗监管体系在实验动物设施应用和节能措施评价 [J]. 实验动物与比较医学, 2011, 31(6): 453-458.
DING X M, ZHOU R G, DING Y, et al. Application and energy conservation methods assessing in laboratory animal facility by energy monitoring system [J]. Lab Anim Comp Med, 2011, 31(6): 453-458.

[18] 唐利军, 徐国景, 张金明, 等. 实验动物建筑设施节能技术探讨 [J]. 中国比较医学杂志, 2010, 20(1): 73-78.
TANG L J, XU G J, ZHANG J M, et al. Research for energy-saving technologies of laboratory animals building facilities [J]. Chin J Comp Med, 2010, 20(1): 73-78.

[19] 胡铖, 胡晓妍. 医院能耗监测平台的优化与思考 [J]. 中国卫生产业, 2020, 17(5): 80-82.
HU C, HU X Y. Optimization and thinking of hospital energy consumption monitoring platform [J]. China Health Ind, 2020, 17(5): 80-82.

[20] 代丹, 林绿渊, 肖武, 等. 制药厂房洁净空调系统能耗监测及分析方法 [J]. 暖通空调, 2021, 51(10): 33-38, 32.
DAI D, LIN L Y, XIAO W, et al. Energy consumption monitoring and analysis method of clean air conditioning systems in pharmaceutical factories [J]. Heat Vent Air Cond, 2021, 51(10): 33-38, 32.

[21] 支琴, 熊顺子, 彭华松. 基于能耗监测的高校实验室安全管理策略 [J]. 实验室研究与探索, 2020, 39(7): 300-304.
ZHI Q, XIONG S Z, PENG H S. Laboratory safety management strategy based on energy consumption monitoring [J]. Res Explor Lab, 2020, 39(7): 300-304.

〔收稿日期〕2024-04-23