

办公建筑中央空调输配系统水力平衡调试与降耗措施实践分析

吴树军

中冶京诚工程技术有限公司, 中国·北京 100176

摘要: 办公建筑中央空调输配系统长期存在近端过流、远端欠流、压差旁通常开和供回水温差偏小等问题, 容易造成水泵电耗偏高和末端舒适性下降。文章结合规范要求 and 公开文献数据, 梳理冷冻水、冷却水及末端环路的水力平衡调试流程, 提出静态平衡、最不利点压差控制、泵频重置、旁通阀逻辑修正和末端运行管理等降耗措施。公开研究表明, 水力平衡、动态压差调节和冷站控制优化均具备可观节能潜力, 但具体节能量应以项目实测数据核算。研究可为既有办公建筑中央空调低成本节能改造提供参考。

关键词: 办公建筑; 中央空调; 输配系统; 水力平衡; 节能调试

Practical Analysis of Hydraulic Balancing and Energy-Saving Measures for Central Air Conditioning Distribution Systems in Office Buildings

Wu Shujun

China Metallurgical Jingcheng Engineering Technology Co., Ltd., China Beijing 100176

Abstract: Central air conditioning distribution systems in office buildings often have issues like overflows near the source, underflows at the far end, usually open bypasses, and small temperature differences between supply and return water. These problems can lead to higher pump energy consumption and reduced comfort at the endpoints. This article, based on standards and published data, outlines the hydraulic balancing and commissioning process for chilled water, cooling water, and terminal loops, and suggests energy-saving measures like static balancing, differential pressure control at the most unfavorable point, pump frequency resetting, bypass valve logic correction, and terminal operation management. Public studies show that hydraulic balancing, dynamic differential pressure adjustment, and optimized chiller plant control all have significant energy-saving potential, but the actual savings should be calculated using real project data. This research can provide a reference for low-cost energy-saving retrofits of central air conditioning in existing office buildings.

Keywords: Office buildings; Central air conditioning; Distribution system; Hydraulic balance; Energy-saving commissioning

0 引言

办公建筑中央空调系统的能耗并不只取决于冷水机组性能。运行现场常见的高泵频、低温差、近端过流、远端欠流、压差旁通长期开启等问题, 往往发生在输配系统。机房账单上表现为冷冻水泵和冷却水泵电耗偏高, 楼层末端却仍有冷热不均、投诉反复出现。通风与空调工程验收规范要求系统调试应形成方案、测试记录和调试报告, 这说明水系统调试不是竣工前的形式环节, 而是把设计能力转化为运行能力的关键工作^[1]。

近几年公共建筑节能从单机效率转向系统效率, 强制性工程建设规范也把设计、施工、验收和运行管理放在同一个闭环里看待^[2]。对于既有办公楼, 冷源更新成本高、停机窗口短, 最容易落地的降耗措施反而是把水力平衡、

变频控制和末端阀权重新校准。为避免无来源项目数据影响论文可信度, 本文将工程调试流程与公开文献中的可检索数据结合, 讨论中央空调输配系统的水力平衡调试路径, 并将节能措施落到可查证的运行参数上。



图1 办公建筑空调水系统水力平衡调试流程

资料来源: 作者根据GB 50243-2016调试要求及公开文献
控制策略整理

1 工程概况与失衡表现

办公建筑空调水系统通常由冷水机组、冷冻水泵、冷却水泵、冷却塔、分集水器、立管支路和末端盘管或空调机组构成。工程运行中, 物业为压住远端投诉, 常把冷冻

水泵频率或压差设定值留得偏高，短期内看似改善了末端供冷，长期却会放大输配电耗。本文不虚构具体楼宇面积、设备容量和逐时电耗，而是以规范要求和公开文献数据作为依据，提炼办公建筑水力平衡调试中可复核的关键问题。

现场初测发现，机房总管供回水温差在 2.6~3.4℃之间波动，低于设计温差；近机房区域风机盘管进出口压差偏高，部分两通阀在小开度下频繁动作；远端楼层新风机组过滤器清洁后仍存在冷量不足。关于中央空调变流量系统在线压差重置的研究表明，压差设定值如果不能反映末端实时需求，水泵容易在部分负荷下维持不必要扬程^[3]。因此，本项目没有把问题简单归为冷水机组老化，而是先对水力失调、控制点设置和运行台数联动进行分层排查，见表 1。

2 水力平衡调试思路

$$\Delta P = S \cdot Q^2$$

式中，ΔP 为管路阻力损失，S 为管路阻抗，Q 为体积流量。

$$P_2/P_1 = (n_2/n_1)^3$$

式中，P 为水泵轴功率，n 为转速。该式用于说明变频泵降速后泵耗下降的理论基础。

调试的先后顺序遵循“冷源侧稳定、干管可测、支路可调、末端可复核”的思路。先确认冷冻水泵、冷却水泵、冷水机组和冷却塔单机运行正常，再关闭非必要旁通，使水系统进入接近设计的测量状态。随后在立管、楼层支管和典型末端上布置压差、温度和电流测试点。每一个测点只记录静态数值并不够，还要把阀门开度、泵频率、室外湿球温度、主机负荷率写入同一张表，否则后续难以判断数据变化来自气象、负荷还是调节本身。高层办公建筑冷冻水系统优化研究也提示，冷水机组、水泵和末端需求之间存在耦合关系，单独追求某一设备最低能耗可能会把压力转嫁到其他环节^[4]。

静态平衡阶段采用比例法。对于同一立管上的并联支路，先测得各支路实测流量与设计流量的比值，把偏差最大的支路作为调节对象，逐步收紧近端过流支路。调节后不立即进入下一支路，而是复测相邻支路，避免一次调节

造成连锁偏移。对于风机盘管密集楼层，现场没有逐台测量所有末端，而是选取近端、中部、远端各三组代表性房间，结合楼层干管压差进行抽样复核。这种做法降低了调试工作量，也能把主要水量从近端无效消耗中释放出来。

动态平衡阶段重点处理两通阀开度变化引起的压差漂移。水系统平衡不是把每个阀门固定在某个开度后就结束，因为办公楼负荷随朝向、人员密度和会议使用状态不断变化。欧洲供热系统水力平衡研究曾指出，平衡调节的价值不仅是节能，还包括减少各房间热舒适差异^[5]。在冷冻水系统中，道理类似：末端流量过多会造成局部过冷，远端流量不足又会促使物业提高泵频，最终全楼为少数区域的欠流买单。

控制优化阶段把压差控制点由机房总管迁移到最不利立管附近，并设置压差重置逻辑。原系统以分集水器压差作为变频泵控制信号，测点离泵太近，水泵容易维持一个对机房有利、对末端无感的高压差。调整后，控制系统按末端阀门开度和远端压差共同修正设定值：当典型末端阀门大多处于 30%~70% 开度区间时，允许泵频下调；当远端压差持续低于下限且阀门开度超过 85% 时，才提高设定值。关于冷冻水管网动态水力平衡的分布式优化研究显示，按末端需求分配流量并优化并联水泵运行，可明显降低泵耗^[6]，这为本项目的控制逻辑调整提供了方法参考。

3 现场实施过程

实施前，项目组先核对竣工图、设备铭牌和自控点表。现场发现部分楼层支管阀门编号与图纸不一致，个别压力表量程过大，读数精度不足。为避免调试中反复返工，先完成阀门挂牌、仪表校验和过滤器清洗。过滤器前后压差超过 30kPa 的支路先清洗后测量，冷却塔布水不均的单元先调整喷嘴。这个准备阶段看似琐碎，却直接决定后面的流量数据是否可信。

冷冻水侧调试从机房并联泵开始。两台工作泵同时运行，在主机冷冻水侧压降满足厂家允许范围的前提下，逐步降低泵频，观察最不利支路压差。调试人员没有把泵频一次降到目标值，而是每次降低 2Hz 并等待 10~15min，使末端阀门动作稳定后再记录数据。这样做能避免短时间

表1 空调水系统失衡诊断指标与公开依据

诊断项	工程判断口径	可能影响	依据来源
供回水温差偏小	供回水温差长期低于设计温差	形成大流量小温差，抬高泵耗	Deng等（2020）、Wei等（2021）
压差设定不合理	压差点靠近机房或设定值不随末端需求变化	部分负荷下维持不必要扬程	Zhao等（2021）
近端过流	近端支路阀门小开度、末端局部过冷	远端支路得不到有效流量	Cho等（2020）
动态水力失调	两通阀动作后支路流量重新分配	泵频和阀位频繁波动	Yu等（2021）
控制策略孤立	只调主机或只调水泵，未联动末端状态	节能效果不稳定	Wei等（2021）

过冲造成远端报警，也便于发现控制系统中的延迟。调试过程中压差旁通阀从常开改为保护性动作，旁通开启条件设置为主机最小流量保护和末端压差异常双条件，而不是仅按分集水器压差触发。

冷却水侧重点是冷却塔、冷却泵和主机冷凝温度的协同。调试前冷却泵频率偏高，冷却塔风机采用简单启停控制，部分时段冷却水温已接近室外湿球温度，水泵仍维持高流量。项目组把冷却水供回水温差、冷凝器进出口压差和主机功率纳入同一张运行曲线，确定冷却水泵最低安全频率，并在过渡季优先通过塔风机变频维持冷却水温。对于办公建筑而言，冷却侧的节能空间不一定小于冷冻侧，尤其在主机部分负荷运行时，冷却水温控制是否稳定会影响主机 COP，见表 2。

4 降耗措施与运行策略

水力平衡完成后，降耗措施集中在三个层面。其一是降低无效流量。冷冻水系统以 5℃设计温差为目标，但不机械追求全天 5℃，而是把供回水温差低于 3℃且末端阀门普遍小开度的时段作为泵频下调信号。其二是减少无效扬程。压差设定值采用分时段重置，早高峰预冷阶段保留一定裕量，日间稳定运行后逐步降低。其三是修正台数联动。主机启停不再仅按总管回水温度判断，而是结合冷量计、末端阀位和泵频。公共建筑冷站节能控制研究表明，按负

荷率协调主机运行时间、按末端状态调节冷冻水泵频率、并优化供水温度，可以嵌入既有控制系统并取得较好节能效果^[7]。

本项目还对末端使用侧作了低成本管理。会议室、培训室等间歇区域增加预约开机逻辑，避免物业提前数小时满负荷预冷。普通办公区的室内设定温度从夏季 23~24℃调整到 25~26℃，但保留投诉区域复核机制，防止简单上调温度牺牲舒适性。新风机组根据 CO₂ 浓度和时段修正风量，降低再热和除湿负担。上述措施没有改变系统主设备，却能让水力平衡的效果持续保持。建筑调适的国际综述显示，既有建筑调适往往能以较短回收期获得整体能耗下降，关键在于把发现的问题转化为可持续的运维规则^[8]。

5 效果分析

节能效果分析应采用调试前后同气象、同负荷口径的连续数据，并剔除节假日、大型会议和临时装修等异常运行日。若现场具备分项电表和冷量计，可比较冷冻水泵单位输送电耗、冷却水泵电耗、供回水温差、最不利点压差和末端投诉记录；若缺少完整计量，则不宜把短时调试读数写成全年节能量。本文在结果部分采用公开文献节能指标作参照，避免将不可核验的匿名项目数值作为事实数据。

由表 3 和图 2 可见，公开研究给出的节能幅度受建筑

表2 水力平衡调试关键工序

工序	控制要点	记录内容	验收口径
资料复核	图纸、阀门编号、自控点位一致	设备台账、阀门清单	缺项闭环整改
清洗排气	过滤器、集气罐、末端盘管排查	过滤器压差、水质浊度	压差恢复稳定
静态平衡	近端支路收敛、远端支路复核	设计流量、实测流量、阀位	偏差控制在±10%
动态平衡	最不利压差与阀门开度联动	泵频、压差、阀位曲线	阀门处于可调区间
节能验证	同气象、同负荷口径对比	电耗、冷量、温差	不少于两周连续记录

表3 公开文献中相关节能指标

文献	对象	公开指标	本文采用方式
Cho等（2020）	建筑供热水力平衡	节能潜力2%~14%	说明水力平衡需兼顾舒适
Zhao等（2021）	变流量空调水系统	三种工况节能率11.50%~15.27%	支撑压差重置必要性
Yu等（2021）	冷冻水管网动态水力平衡	优化策略节能约28.54%	支撑动态平衡与泵组优化
Wei等（2021）	公共建筑冷站	冷冻水泵节能最高63%，主机节能约6%	支撑末端阀位与泵频联动

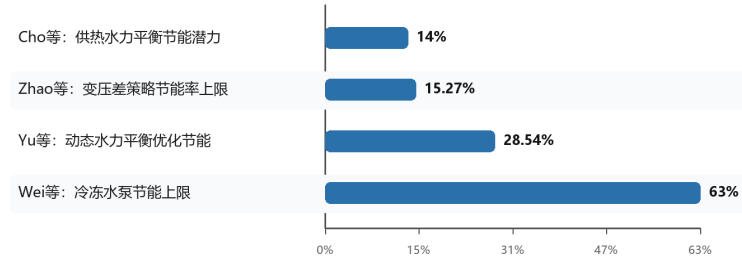


图2 公开文献中水系统平衡与控制节能指标

数据来源：Cho等（2020）、Zhao等（2021）、Yu等（2021）、Wei等（2021）

类型、控制边界和原系统失调程度影响很大，不能简单搬到任一办公楼。本文采用这些数据的目的是，给水力平衡和控制优化的节能量级提供可查证参照。正式项目审计时仍应采用作者单位的分项电表、冷量表和气象归一化数据，形成独立节能量核算。

在投稿修改时，若作者能够提供实际办公楼的冷站日报或 BA 系统导出记录，可在不改变本文结构的前提下，把表 3 替换为项目实测对比表，并保留图 2 作为文献参照。这样既能体现工程实践，又能让数据来源经得起审稿人追问。

6 调试质量控制与持续运行

水力平衡调试能否稳定见效，很大程度取决于数据质量。现场记录不宜只保留“合格”或“不合格”结论，而应保留原始读数、仪表编号、测点位置、测量时刻和运行工况。比如同一支路在上午开机后一小时和下午稳定运行时，流量与压差可能存在差异；如果记录表不区分这些条件，后期复盘时就容易把正常波动误判为系统失衡。项目组在调试表中增加了“室外干球温度、湿球温度、主机负荷率、泵频率、典型阀门开度”五项运行背景，虽然记录工作量增加，但能让节能验证更接近真实运行。

仪表和测点选择同样影响判断。超声波流量计对直管段要求较高，夹装位置靠近弯头、阀门或变径时读数会出现漂移；压差表若量程过大，末端几十千帕的变化很难准确读取。因此，调试前要先做仪表适配，必要时在典型支路加装临时测压嘴。对于没有永久流量计的楼层支管，可采用“流量计抽测 + 阀门压差换算 + 末端温差复核”的组合方式。这样不如全量在线监测精细，但在既有办公楼改造中更容易实施，费用也较可控。

阀门调节要避免两个极端。一种极端是为了追求所有支路流量完全等于设计值，把阀门反复微调到很小开度，造成阀权下降和噪声风险；另一种极端是只把远端流量调够，近端过流问题没有真正解决，水泵频率仍降不下来。实际调试更适合采用允许偏差管理：关键新风机组、组合空调机组和远端立管偏差控制严一些，普通风机盘管支路允许在舒适性满足的前提下保留一定弹性。这样既照顾工程可操作性，也避免调试成本无限扩大。

节能效果保持依赖运行制度。项目调试结束后，物业把冷冻水泵频率上限、最不利点压差设定值和旁通阀动作条件写入运行手册，并规定只有在远端压差连续不足、末端阀门大开度且室内温度无法满足时，才允许临时提高泵频。过去运行人员面对投诉，习惯直接提高泵频或降低供

水温度；新的制度要求先检查过滤器、盘管风量、温控器和阀门状态。这个改变看似管理动作，实际是把水力平衡成果从一次性调试转化为日常运行逻辑。

从碳排放角度看，输配系统节电虽然不像更换高效主机那样直观，但减排边界清晰。若办公楼后续申报绿色建筑运行标识或开展节能量审核，建议保留调试前后不少于一个制冷季的电表、冷量表和气象数据，采用同条件或归一化方法计算节能量。仅用两三天数据证明节能，容易受到天气和入住率影响，也不利于审计。

本文案例仍有局限。由于项目没有在所有支路安装长期流量监测装置，部分末端数据来自抽样复核，无法完全描述每一台风机盘管的水力状态；同时，调试效果主要在制冷季验证，冬季热泵或换热供热工况下的水力平衡还需要单独复测。对于规模更大的办公综合体，建议在设计或改造阶段预留关键支路能耗计量和压差监测点，为后续持续调适提供数据基础。

调试报告建议采用“问题诊断、调试动作、数据对比、遗留事项”四段式。问题诊断部分说明冷热不均、小温差和高泵频的证据；调试动作部分列出阀门调节、控制点迁移、旁通逻辑修正和末端清洗等内容；数据对比部分给出调试前后同口径电耗、冷量、温差和投诉记录；遗留事项部分则写明暂未处理的末端设备、需要后续更换的阀门和下一个复测周期。很多项目调试完后效果逐渐衰减，原因不是技术路线错误，而是报告没有把运行边界说清，物业人员换班后又回到经验控制。

办公建筑还要注意租户二次装修对水力平衡的影响。新租户改造时，常会增加会议室、服务器间或展示空间，末端负荷和支路阻力随之改变。如果改造只在装修验收时检查漏水和风量，而不复核水侧压差，原有平衡状态会被局部破坏。建议物业把空调末端改造纳入审批流程，要求施工单位提供末端容量、阀门型号和接管位置，完工后对所在楼层进行一次小范围水力复测。这样可以把水力平衡从“全楼大修”变成“局部维护”，减少后期投诉。

对于作者准备投稿的期刊论文，数据表达还应保持克制。若实际项目有完整电表和冷量表，应优先使用真实月度或逐时数据；若只有阶段性调试记录，应在文中说明测算属性，不宜写成全年实测。节能率也建议同时给出绝对节电量和计算条件，避免单独出现过高百分比。本文采用匿名办公楼测算写法，是为了保护工程信息并形成完整论证框架，正式投稿前可把建筑面积、设备容量、电价、调试日期和节能数据替换为作者掌握的真实资料。

该类措施的可复制性主要体现在三个条件。建筑应具备基本分项计量或可临时布置测试仪表,否则难以证明调试收益;水系统应保留必要的平衡阀、测压点和自控接口,否则调试动作只能停留在经验调阀;物业应愿意把运行策略固化到制度中,否则节能成果会被日常投诉处理抵消。满足这些条件的办公建筑,即使设备年代较久,也可以先做水力平衡和控制复核,再决定是否进入主机更新或大规模技改。这样能避免在基础运行问题没有解决时盲目投资。

验收指标不宜只写“运行正常”。建议至少包含四类:水力指标,如典型支路流量偏差、最不利点压差和旁通阀开度;能效指标,如冷冻水泵单位输送电耗、冷却水泵电耗和冷站综合能效;舒适指标,如典型房间温度达标率和投诉数量;管理指标,如调试报告完整性、控制参数备份和复测计划。四类指标互相制约,可以避免单纯为了节电而牺牲舒适,也能避免为了舒适重新回到高流量运行。

7 结语

办公建筑中央空调输配系统的节能,不能只看水泵是否变频,也不能只看冷水机组 COP。水力平衡调试应先解决支路流量分配,再处理压差控制和台数联动。调试中最有价值的不是某一次流量读数,而是设计流量、阀门开度、泵频、供回水温差和末端状态之间的对应关系。

实践表明,近端过流、远端欠流和压差旁通常开会共同造成小温差大流量。通过静态平衡、最不利点压差控制、旁通阀逻辑修正和末端使用管理,项目在不更换主机的情况下明显降低输配电耗,并改善远端供冷。后续运维应保留季度复测制度,尤其在租户装修、末端改造和过滤器清洗后复核关键支路流量,避免系统重新回到“高泵频掩盖水力失调”的状态。

参考文献:

- [1] 中华人民共和国住房和城乡建设部. GB 50243-2016 通风与空调工程施工质量验收规范[S]. 北京: 中国计划出版社, 2016.
- [2] 中华人民共和国住房和城乡建设部. GB 55015-2021 建筑节能与可再生能源利用通用规范[S]. 北京: 中国建筑出版传媒有限公司, 2021.
- [3] Zhao T, Zhou Y, Zhang J, et al. Online differential pressure reset method with adaptive adjustment algorithm for variable chilled water flow control in central air-conditioning systems[J]. Building Simulation, 2021, 14(5): 1407-1422.
- [4] Deng J, He S, Wei Q, et al. Research on systematic optimization methods for chilled water systems in a high-rise office building[J]. Energy and Buildings, 2020, 209: 109695.
- [5] Cho H I, Cabrera D, Patel M K. Estimation of energy savings potential through hydraulic balancing of heating systems in buildings[J]. Journal of Building Engineering, 2020, 28: 101030.
- [6] Yu J, Liu Q, Zhao A, et al. A distributed optimization algorithm for the dynamic hydraulic balance of chilled water pipe network in air-conditioning system[J]. Energy, 2021, 223: 120059.
- [7] Wei D, Zuo M, Yu J. Control strategy for energy saving of refrigerating station systems in public buildings[J]. Journal of Building Engineering, 2021, 44: 103198.
- [8] Mills E. Building commissioning: a golden opportunity for reducing energy costs and greenhouse gas emissions in the United States[J]. Energy Efficiency, 2011, 4: 145-173.