

# 中央空调水系统低阻设计方法与研究

## ——以某大型商业综合体为例

陈彦康

上海博世空调系统有限公司

DOI:10.32629/pe.v4i2.20029

**[摘要]** 在我国“双碳”战略与能源结构转型的双重驱动下,降低中央空调系统能耗已成为暖通设计和施工领域的关键课题。中央空调水系统作为冷热量输送的关键环节,其输送能耗约占系统总能耗的15%–25%,降低其运行阻力减少水泵扬程与功率是实现节能运行的根本途径。本文旨在系统阐述中央空调水系统的低阻设计方法,核心内容包括:(1)系统形式与管路布局的优化策略;(2)基于经济比摩阻的管径与流速确定原则;(3)低阻力关键设备(冷热源、末端、阀门)的选型要点;(4)基于动态平衡阀的水力平衡控制技术。文中结合一大型商业综合体空调水系统的设计实例,详细介绍了低阻设计的应用过程、水力计算与设备选型方法。实例表明,系统性的低阻设计可使水泵扬程降低约10%–20%,全年水泵输送能耗下降25%–40%,具有显著的经济效益和环保价值。本文旨在为暖通空调设计人员提供一套可操作的、系统的低阻设计方法论与实践参考。

**[关键词]** 中央空调; 水系统; 低阻设计; 水力计算; 节能; 水泵选型

中图分类号: TU831.3+5 文献标识码: A

### Low-Resistance Design Method and Research for Central Air Conditioning Water Systems—A Case Study of a Large Commercial Complex

Yankang Chen

Shanghai Bosch Air Conditioning Systems Co., Ltd.

**[Abstract]** Under the dual drivers of China's "dual carbon" strategy and energy structure transformation, reducing the energy consumption of central air conditioning systems has become a critical issue in the field of HVAC design and construction. As a key link in cold and heat transportation, the water system of central air conditioning accounts for approximately 15%–25% of the total system energy consumption. Lowering operational resistance to reduce pump head and power is the fundamental approach to achieving energy-efficient operation. This paper systematically elaborates on low-resistance design methods for central air conditioning water systems, with core content including: (1) optimization strategies for system configuration and pipeline layout; (2) principles for determining pipe diameter and flow velocity based on economic friction ratio; (3) key considerations for selecting low-resistance critical equipment (heat sources, terminals, valves); and (4) hydraulic balance control technology based on dynamic balancing valves. Using a design case study of an air conditioning water system in a large-scale commercial complex, the paper provides detailed insights into the application process of low-resistance design, hydraulic calculations, and equipment selection methods. The case demonstrates that systematic low-resistance design can reduce pump head by approximately 10%–20% and annual pump transportation energy consumption by 25%–40%, yielding significant economic benefits and environmental value. This paper aims to provide HVAC designers with a practical, systematic low-resistance design methodology and practical reference.

**[Key words]** central air conditioning; water system; low-resistance design; hydraulic calculation; energy efficiency; pump selection

#### 引言

中央空调系统是现代大型公共建筑的能耗大户,其能耗能

够占到建筑总能耗的40%–60%。中央空调水系统(包括冷冻水系统和冷却水系统)承担着在冷热源与末端空气处理设备之间输

送冷热量的任务,而水泵作为核心的输送设备,其能耗在空调系统总能耗中占有重要份额,通常可达15%~25%。水泵的轴功率与扬程、流量的乘积成正比,在满足系统流量需求的前提下,降低系统阻力缩小水泵扬程是减少水泵能耗最直接、最有效的途径。

鉴于此,本文从设计全流程出发,系统归纳低阻设计的核心原则,并结合具体工程实例,详细阐述其应用方法与效果评估,以期暖通设计工作的精细化与节能化提供参考。本文首先论述低阻设计的四项核心原则,然后通过一个商业综合体案例展示其应用,最后进行讨论与总结。

## 1 低阻设计核心原则

低阻设计并非一项单一的技术措施,而是一项贯穿方案规划、水力计算、设备选型与平衡策略全过程的系统性工程,其目的在于从源头上减小系统固有阻力,并通过动态调节避免运行中的无效节流,主要遵循以下四项原则:

1.1 系统形式优化:奠定低阻基础框架。系统形式的选择从根本上决定了系统的阻力特性和可调节性,是低阻设计的顶层规划,系统形式优化主要包括以下三个方面:

(1) 水泵并联与一对一系统:水泵和主机一对一系统在一定条件下相比水泵并联系统可以减少阀门、管道弯头和三通等,有效减少系统阻力,并且具有更好的水力平衡度,启停一台主机单元时对其他运行单元的水力干扰极小,系统更稳定。(2) 同程与异程系统:对于规模较大、分支复杂的系统,应优先采用同程系统。同程系统通过使各环路的总物理长度相近从而实现自然的水力平衡,从根本上减少了为平衡远端和近端环路而施加的额外节流阻力。异程系统虽节省管材,但近端环路压差过大,必须通过安装高阻力的平衡阀或手动调节阀进行节流,从而增加了系统的总阻力。

1.2 管道水力优化:控制沿程与局部阻力。在确定系统形式后,管道设计是阻力控制的主体,中央空调水系统中的管径和流速是影响沿程阻力的决定性因素。

(1) 经济流速与比摩阻:传统设计手册中推荐的冷冻水流速为1.5~3.0 m/s,冷却水流速为1.5~2.5 m/s,从低阻和节能的角度看,宜取推荐范围的中下限值。在满足设计流速的同时,更科学的做法是同时引入经济比摩阻作为控制指标,推荐主干管的经济比摩阻范围为100~300 Pa/m,通过水力计算选择管径,使比摩阻落在此区间内,能在初投资和运行费之间取得最佳平衡。(2) 局部阻力控制:局部阻力往往占总阻力的30%~50%甚至更高,设计时应尽量减少不必要的管件并采用管道设计,降低局部阻力,常用的局部阻力控制方法如下:①合理布置管路,避免管线迂回和交叉;②减少不必要的管件,尽量避免急弯、突然扩大或收缩、多余的弯头和三通;③采用大曲率半径( $R \geq 1.5D \sim 2D$ )弯头或斜接弯头,降低局部阻力系数;④管道变径时使用渐缩/渐扩管,并将锥角控制在 $15^\circ$ 以内;⑤空间允许时采用 $45^\circ$ 弯头替代 $90^\circ$ 弯头,支管与干管连接时采用 $45^\circ$ 斜接或顺水流方向连接,减少涡流。

1.3 设备精细化选型:降低设备环节阻力。水系统中所有的设备和管件都是系统阻力的组成部分,将其水阻作为关键选型参数,选择低阻力设备和管件也是系统低阻设计的重要措施,主

要考虑的低阻力设备如下:

(1) 冷热源与换热设备:在选型时,除了关注机械性能外,还必须对比其在设计流量下的水侧压降。不同品牌、型号的冷水机组和板式换热器的水阻可能相差甚大,在满足性能要求的前提下应选择水阻较低的产品。(2) 末端空气处理设备:组合式空调机组(AHU)、风机盘管(FCU)的盘管水阻是末端阻力的主要组成部分,在选型时应在满足换热能力的前提下,选择盘管排数合理、通路设计优化且水阻较低的产品。

1.4 水力平衡策略:设计与运行双控:水力失调导致的阀门节流是系统阻力虚增的主要原因。低阻设计要求将平衡问题前置解决,解决方法主要分两步:

(1) 一是需要在设计阶段实现预平衡,主要是通过精确的水力计算,调整各并联环路管道的路径和管径,使其在设计流量下的计算阻力尽可能接近,为运行时实现平衡打下良好基础。(2) 二是应用动态平衡与调节设备,在关键分支、立管及末端装置回水管上设置必要的动态平衡电动调节阀,这种阀门能将环路剩余压头消耗在阀芯的主动调节上,而不是消耗在无谓的节流上,确保在系统压力波动时各末端仍能获得精确流量,同时避免了因过度节流导致的系统总阻力升高。

## 2 工程实例—某商业综合体空调水系统低阻设计

2.1 项目概况:项目为位于华东地区的某大型商业综合体,总建筑面积约20万平方米,包含购物中心和写字楼,空调设计冷负荷为18,600 kW,热负荷为10,500 kW。冷源采用5台1200RT的双一级变频离心式冷水机组(4用1备)和1台500RT的变频螺杆式冷水机组,供回水温度为 $6^\circ\text{C}/13^\circ\text{C}$ ,热源为燃气热水锅炉,供回水温度为 $60^\circ\text{C}/50^\circ\text{C}$ 。水系统采用一次泵变流量系统,其中办公高区采用板换中继换热后供冷供热,整个空调系统为两管制系统。

2.2 低阻设计应用与水力计算:在本项目中,系统性地应用了前述低阻设计核心原则,主要包括系统形式优化、管道水力优化、设备精细化选型和水力平衡设计。

首先,在系统形式优化方面:将水系统根据业态和运行时间划分为商业、低区办公和高区办公三个独立环路,设置集水器和分水器,实现分区分控,减少相互干扰和无效输送。每个分区内部的主干管和立管均采用同程布置,有效保证了各层环路的自然平衡性。同时将原设计的水泵并联系统优化为水泵和主机一对一的系统,通过调整水泵基础高度使水泵出口和主机入口在同一水平高度,水泵出口能通过水平管直联主机,相比原并联系统能够减少管道阀门、弯头和三通,优化后冷冻水测阻力减少了约13kPa,约1.3mH<sub>2</sub>O。

其次,在管道水力优化方面:管径设计严格依据经济比摩阻与推荐流速双重控制,比摩阻方面按照主干管 $\leq 150\text{Pa}/\text{m}$ ,支干管 $\leq 200\text{Pa}/\text{m}$ ,末端支管 $\leq 250\text{Pa}/\text{m}$ 。流速方面按照DN300及以上管道流速 $< 2.5\text{m}/\text{s}$ ; DN200~DN250管道流速1.5~2.0 m/s; DN80~DN150管道流速1.2~1.5 m/s; DN50及以下管道流速 $< 1.0\text{m}/\text{s}$ 。同时利用BIM技术进行管线综合优化,避免管线迂回和交叉,所有弯头、连接均采用低阻构造,所有弯头按照 $R=1.5D$ 的曲率半径

进行设计,支管与干管连接采用45°斜接或顺水流方向连接,并且弯头、三通等管件之间和水泵出入口保留足够直管段用以避免涡流干扰,同时在有变径的地方设置渐扩/渐缩管。

再者,在设备精细化选型方面:明确提出冷水机组、AHU、FCU等核心设备的许用最大水阻指标,将原设计要求中的冷水机组两器压降不大于80kPa的标准提升到不大于60kPa,最终选定的冷水机组在设计工况下蒸发器压降45kPa,冷凝器压降55kPa。同时要求AHU盘管在设计流量下的水阻不大于45kPa,FCU水阻不大于35kPa,并将过滤器的初始阻力值控制在5kPa以下。关键阀门选用低阻类型,总管关断采用双向软密封蝶阀,止回阀采用低阻力静音式止回阀。

最后,在水力平衡策略方面:在同程布置实现自然平衡的基础上,于关键分支设置动态压差平衡型电动调节阀,末端AHU回水管设置动态平衡电动二通调节阀,FCU采用内置自动流量平衡阀的电动二通阀。

基于上述设计进行详细水力计算,核心目标是控制最不利环路的总阻力。通过反复迭代计算,确定了最优管径组合,计算得冷水最不利环路总长约450米,系统阻力计算如下:

(1)冷水机组蒸发器压损:45kPa。(2)最不利末端压损:45kPa。(3)管道沿程阻力:75kPa。(4)管道局部阻力(含管件、阀门等):118kPa。

系统阻力总计283kPa,约合28.3mH<sub>2</sub>O,各并联环路阻力不平衡率均控制在7%以内,远小于《民用建筑供暖通风与空气调节设计规范》(GB 50736-2012)中不平衡率<15%的要求。最终确定冷冻一次泵设计扬程为33mH<sub>2</sub>O,相比于原设计的冷冻一次泵扬程38mH<sub>2</sub>O,降低了约13.2%。

2.3水泵选型与节能分析:该项目水泵和主机采用一对一的系统,冷冻水泵根据主机设计容量选用5大1小共计6台变频立式离心泵,单台设计流量分别为635m<sup>3</sup>/h和265m<sup>3</sup>/h,扬程均为33m,水泵电机额定功率分别为90kW和37kW。

以1200RT冷水机组对应的冷冻水泵为例,由于扬程降低(与38m对比),单台水泵轴功率理论上降低约(38-33)/38=13.2%,实际配套电机额定功率从常规的110kW降至90kW,降低18.2%。

该项目水泵采用变频控制,实际运行中水泵绝大部分时间在部分负荷下运行。得益于低阻设计带来的低扬程特性曲线以及降频调速控制,冷冻水泵全年平均运行效率大幅提升,根据模拟计算,全年水泵输送能耗比未经低阻设计且采用定频控制的系统降低约35%。

### 3 讨论

低阻设计的成功不仅取决于设计方案本身,更依赖于从投资决策到运行维护的全过程协同。本实例的实施经验引发了以下延伸思考:

(1)与造价控制的协调:低阻设计往往意味着更大的管径、更优质的阀门管件、更精细的设计服务和更高的初投资。本实例中,管材费用估计增加约5%-8%,然而,通过全生命周期成本分析,增加的投资可在3-5年内通过节省的运行电费收回,这就需

要设计师需要通过全生命周期成本分析报告,积极与业主沟通,阐明其在运行阶段的节能回报。(2)对施工质量的高要求:设计图纸的低阻意图需要精准的施工来实现,管道必须严格按图施工,保证弯头的曲率半径和管道连接方式满足设计要求,且要保持同程管的几何长度相等。在焊接时需防止内壁产生焊瘤导致缩径,在使用前必须彻底冲洗,保证系统内无焊渣等异物。并且建议加强施工过程中的巡查与验收,任何施工中的瑕疵都可能抵消设计阶段的降阻努力。

上述讨论表明,暖通设计师在推行低阻设计时,需具备更强的全局观与协调意识,确保节能理念贯穿项目始终。

### 4 结束语

综上所述,本文系统探讨了中央空调水系统的低阻设计方法,并通过工程实例验证了其应用效果,主要结论为:

(1)低阻设计是一个涵盖系统形式、管道水力、设备选型及平衡策略的系统工程,四项核心原则相辅相成;(2)采用同程系统、一次泵变流量、低阻设备及动态平衡阀等技术措施,可有效降低系统固有阻力;

基于本文研究,提出以下建议:

(1)在暖通设计实践中,建议将系统全生命周期能效作为核心评价指标,在方案阶段即引入低阻设计理念,并进行多方案技术经济比较;(2)建议在设计文件(如设计说明、设备技术规格书)中明确关键设备的水阻限值要求,以及管道施工的特殊工艺标准,为采购与施工提供依据;

低阻设计体现了从“满足工况”到“优化能效”的设计理念的转变。在“双碳”战略目标下,推广和应用空调水系统低阻设计,对降低建筑运行能耗、推动绿色建筑发展具有重要的现实意义。未来再结合BIM技术进行管道综合与阻力模拟优化,将进一步推动低阻设计向数字化、精细化方向发展。

### 【参考文献】

[1]中国建筑节能协会.中国建筑能耗研究报告2022[R].北京,2023.

[2]陆耀庆.实用供热空调设计手册(第三版)[M].北京:中国建筑工业出版社,2017.

[3]江亿.建筑环境系统模拟分析方法——DeST[M].北京:中国建筑工业出版社,2006.

[4]ASHRAE.ASHRAE Handbook—HVAC Systems and Equipment (SI Edition)[M].Atlanta:American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers,2020.

[5]李志生,张国强.暖通空调系统水力平衡与节能[J].暖通空调,2015,45(8):1-6.

[6]Wang S., et al. Life-cycle cost analysis of energy-efficient designs for variable water volume chilling systems[J]. Applied Energy, 2011, 88(5): 1937-1946.

### 作者简介:

陈彦康(1992--),男,汉族,江苏常州人,硕士研究生,研究方向:空调系统节能。