

doi: 10.3969/j.issn.1672-6073.2020.06.022

北京新机场线通风空调智能化控制系统设计

邵嘉兴¹, 张世勇², 翟宇昕², 褚海容³, 门晓龙¹, 常晟¹

(1. 同方泰德国际科技(北京)有限公司, 北京 100044; 2. 北京市轨道交通建设管理有限公司, 北京 100044; 3. 北京城建设计发展集团股份有限公司, 北京 100044)

摘要: 针对北京新机场线一期工程进行通风空调智能化控制系统的应用设计, 分别从控制系统、控制工艺两方面进行论述。控制系统设计角度: 通过对常规系统设计现状调研与分析, 提出一套适用于新机场线的控制架构, 并对系统架构、系统组成等方面进行论述; 控制工艺设计角度: 分别从负荷预测、风机模式控制、供冷模式控制、冷源效率控制等方面进行论述, 形成一套完整的控制工艺流程。旨在通过对新机场线智能化控制系统的设计与应用, 为后期线路提供通风空调系统的设计与建设经验。

关键词: 新机场线; 通风空调; 智能化; 控制系统; 控制工艺

中图分类号: U231 文献标志码: A 文章编号: 1672-6073(2020)06-0139-07

Design Practice of the Intelligent Control System for Ventilation and Air Conditioning in Beijing New Airport Line

SHAO Jiaying¹, ZHANG Shiyong², ZHAI Yuxin², CHU Hairong³, MEN Xiaolong¹, CHANG Cheng¹

(1. Tongfang Technovator Int.(Beijing) Co., Ltd., Beijing 100044; 2. Beijing Rail Transit Construction Management Co., Ltd., Beijing 100044; 3. Beijing Urban Construction Design & Development Group Co., Ltd., Beijing 100044)

Abstract: Aiming for an intelligent control system application design for the ventilation and air conditioning in the first phase of the Beijing New Airport Line project, this paper discusses the control system design and control process design. For the control system design, this paper proposes a set of control architectures suitable for the new airport line and discusses the system architecture and system composition according to the investigation and analysis of the current system design status. For the control process design, this paper discusses the load forecasting, fan mode control, cooling mode control, and cold source efficiency control, forming a complete set of control process flows. Aims to provide the design and construction knowledge of ventilation and air conditioning systems for future airport lines in accordance with the intelligent control system of Beijing New Airport Line.

Keywords: new airport line; ventilation and air conditioning; intelligent control system; control process

1 北京新机场线项目概况

北京市轨道交通新机场线一期工程南起新机场北航站楼北至草桥站, 一期工程共设置3座车站。该工程采用站台设置屏蔽门通风空调系统, 系统开、闭式

运行。通风空调系统由区间隧道通风及防排烟系统、车站公共区通风空调及防排烟系统(简称大系统)、车站设备及管理用房通风空调及防排烟系统(简称小系统)、空调水系统、备用多联分体空调系统组成。

在轨道交通能耗中, 通风空调系统以超过30%的总能耗占比成为仅次于牵引的第二大能耗^[1]。依托于北京市科技重大专项“新机场线快速轨道交通设备系统关键技术研究及应用示范”项目对车站通风空调系统智能化控制关键技术进行研究。将研究成果应用于

收稿日期: 2019-07-31 修回日期: 2019-08-27
第一作者: 邵嘉兴, 男, 硕士, 从事轨道交通通风空调系统节能研究与应用, shaojiaying@thtf.com.cn
基金项目: 北京科委社会发展领域项目(D171100008117002)

北京新机场线的建设中,为后续开展新建车站通风空调系统节能工作提供示范指导经验。

对新机场线各站通风空调控制系统架构、实施方式、控制工艺等进行综合论述,从而实现智能化控制系统的搭建与落地实施。

2 智能化控制系统概述

现有车站环境与设备监控系统(简称BAS系统)对通风空调的节能控制已经做了相应考虑与设计,如焓值控制^[2]。目前设计方式具有如下特点^[3-4]:各站控制方式相同,控制参数与切换条件一致;设备通常采用局部闭环控制,如风机频率PID(proportion integral differential)控制;风、水系统均采用固定控制模式。此种控制方式往往在后期运行过程中并未发挥其应有效果。究其原因,主要集中于下述几方面:①地铁车站负荷复杂多变,受人流量、活塞风、投运时间等影响;②车站建筑具有多联通特点,导致新风量、新风负荷、气流组织复杂;③大空间建筑,大热惯性;④受使用时间、维保状态影响,各站设备性能变化迥异。

2.1 系统设计范围

系统针对车站大系统通风、小系统通风及空调水系统进行设计。以磁各庄为例,设备详细控制清单如表1所示。

2.2 实现功能

智能控制系统作为BAS外接控制平台,替代了BAS对上述设备的自动监控功能。正常工况下,通过该系统可实现对设计范围内设备的监视、优化控制、运行能耗分析等功能。

该系统由中央管理控制子系统、大系统控制子系统、小系统控制子系统、水系统控制子系统组成。各子系统实现对所辖设备的数据采集、处理、分析、运算,接收与下发控制指令等功能。

相对于传统BAS系统对通风空调的控制,该系统更加独立,完整度更高,为实现通风空调设备全变频优化控制提供了灵活性,与此同时也为数据采集、分析、控制策略执行提供了基础。

3 控制系统设计

3.1 设计原则

通风空调智能化控制系统采用“集中管理、分散控制、信息共享”的设计理念,以安全、高效、经济为原则。系统具有灵活的、开放的数据接口,可与ISCS、

BAS、PSCADA、智能低压等系统实现互联,还可采集车站各类能源数据和环境监测等数据,同时也可实现对相关设备的管理控制。

表1 磁各庄站智能控制系统设备详细控制清单

Tab. 1 Intelligent control system control boundary in Cuigezhuang Station

序号	系统	设备名称	数量
1	空调大系统	组合式空调机组	2
2		回排风机	2
3		新风阀	2
4		排风阀	2
5		回风阀	2
6		能量调节阀	2
7	空调小系统	组合式空调机组	3
8		回排风机	2
9		新风机组	1
10		排风机	1
11		新风阀	4
12		回风阀	2
13		排风阀	3
14		能量调节阀	4
15	水系统	冷水机组	2
16		冷冻泵	2
17		冷却泵	2
18		冷却塔	2
19		压差旁通阀	1
20		冷冻水电动蝶阀	2
21		冷却水电动蝶阀	2
22		冷却塔电动蝶阀	2
23		电动三通阀	2
24		水处理设备	1
25		定压补水	1
26		加药设备	2
27		旁滤设备	2
28	仪表类	智能电表、流量计、温湿度计、压力计	若干

3.2 常规系统架构

常规车站通风空调系统架构通常采用图1、图2所示两种形式^[5]。

采用系统架构(1)时,通风空调系统设备控制全部集成于BAS设计,BAS对大、小系统进行模式控制和焓值控制,对空调水系统设备进行启停控制以及基本的联锁保护控制,风系统和水系统各自独立运行。

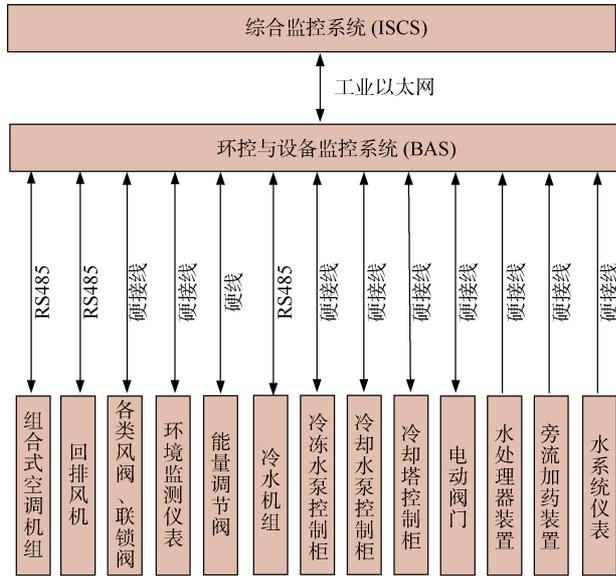


图1 系统架构(1)
Fig. 1 System structure (1)

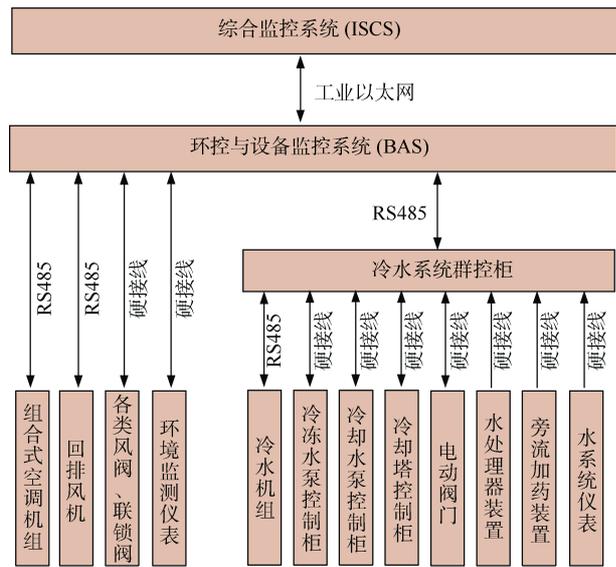


图2 系统架构(2)
Fig. 2 System structure (2)

采用系统架构(2)时,大、小系统全部集成于BAS设计, BAS 实现大、小系统模式控制和焓值控制。空调水系统由冷水群控系统进行集成控制, BAS 只需给冷水群控下发启停指令即可。此种架构的风水系统同样独立运行。

以上两种架构的控制方式相对简单, 并且风系统和水系统独立运行, 不能根据车站负荷变化对通风空调系统进行联合优化。而本文提出的通风空调智能化控制系统从数据传输、安全性、可实施性、执行稳定性等方面对架构做出设计, 实现通风空调系统数据的

互通互联, 安全稳定, 联合调节。

3.3 智能化系统组成架构

通风空调智能化控制系统由管理层、采集控制层、设备层三级构成。

管理层即为通风空调系统集中管理平台, 通过与BAS的工业以太网接口实现对地铁车站通风空调系统中大、小系统组合式空调机组、回排风机、各类风阀、能量调节阀和环境监测、电计量的信息采集与控制。同时与通风空调水系统采集与控制子系统联动, 实现风水系统的全局协调优化控制。

采集控制层即为通风空调水系统采集与控制系统, 负责对通风空调水系统中冷水机组、冷冻水泵、冷却水泵、冷却塔风机、电动蝶阀、电动三通阀、电动压差旁通阀、水处理装置、旁流加药、采集仪表等设备直接监控与管理。

设备层包括现场采集仪表和变频柜, 采集工艺信息和变频调速。

通风空调全变频自适应控制系统采用图3所示系统架构。

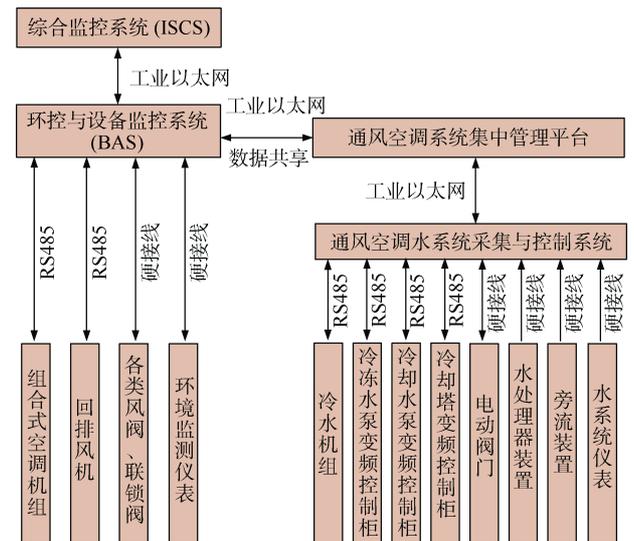


图3 系统架构

Fig. 3 System architecture

通风空调系统集中管理平台与车站综合监控系统 (ISCS) 无接口, 综合监控系统通过与BAS的工业以太网接口实现对通风空调系统集中管理平台所监控设备的监视与管理。

通过增加通风空调系统集中管理平台, 实现各设备联合优化与控制进行。除此之外, 还可实现对通风空调系统设备运行的专业化分析。如能效分析

(对系统运行能效进行实时分析与管理)、能耗分析(掌握能耗异常,全面提升能源管理能力)、报警管理(提供专业化报警管理服务,对设备异常运行状态进行提前预警)。

相比于传统架构,本系统优势体现如下:

1) 智能控制系统作为 BAS 外接控制平台,可独立完成通风空调系统数据采集、计算、优化等专项工作,实现系统控制“专事专做、集中考虑”。

2) 作为外接系统,可进行独立设计与工程实施,保证系统设计、实施与运行的高完整性与可靠性。

3) 独立系统架构为工艺策略的实施调试、运行管理提供了架构基础。

4 控制工艺设计

4.1 设计原则

智能化控制系统基于全变频自适应控制算法,该系统可持续跟踪、学习车站的负荷特点及设备特性,并进行针对性、适应性的调节。为各座车站提供了一套普适性控制策略。

4.2 负荷预测

车站负荷预测的准确与否关乎控制工艺的正常稳定执行。通过历史运行数据对负荷灰箱模型进行实时训练与检测,获得准确度高、实时自适应的负荷预测模型^[6]。具体流程及方法如下:

1) 将地铁车站负荷进行拆分,将拆分后各项负荷进行物理模型建立。受篇幅限制,此处以人员负荷为例进行分析。人员负荷物理模型为^[7]

$$Q_i = n(q_{sc} + q_{sp}) \quad (1)$$

式中: Q_i 为逐时人员负荷; q_{sc} 为显热发热量; q_{sp} 为潜热发热量; n 为人员拟合系数。

针对其他负荷采用上述模型建立方法,最终形成

车站负荷灰箱模型。灰箱模型建立后,根据运行数据构建模型训练数据集合及模型准确度检测集合。其中:训练数据集合用于对灰箱模型的训练,准确度检测集合用于检测模型预测的准确性。数据累计越多,负荷模型越准确。通过上述方式可实现未来某时间负荷的预测。为了便于理解,预测流程展示如图 4 所示。

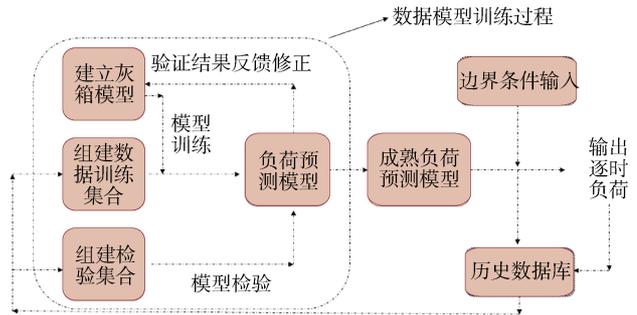


图 4 负荷预测流程

Fig. 4 Load forecasting flow chart

通过上述模型便可对未来时刻负荷进行实时预测,进而指导下述控制工艺的执行。

4.3 风机模式控制

地铁车站通风空调系统通常采用全空气一次回风系统。该系统先天性地决定了通风系统的高能耗特点,通过调研统计,在北方地铁车站公共区通风系统能耗占车站空调总能耗的 25%~40%^[8]。

针对地铁车站多联通特点,新机场线公共区通风系统执行如下风机运行模式:①全新风只送不排;②全新风只排不送;③全新风送排结合;④小新风送排结合。前 3 个模式统称为全新风模式,第 4 个模式称为小新风模式。

以新机场线磁各庄站为例,车站公共区通风空调系统运行工况表设计如表 2 所示。

表 2 磁各庄站公共区通风空调系统运行工况

Tab. 2 Ventilation system operating conditions in Cuigezhuang Station

工况			组合式空调机组		回排风机		全新风阀	小新风阀	排风阀	回风阀	小新风阀	全新风阀	排风阀	回风阀
			KT/A	KT/B	HPF/A	HPF/B	DT/A5	DT/A6	DT/A7	DT/A8	DT/B5	DT/B6	DT/B7	DT/B8
空调季	小新风	$h_{\text{室外}} > h_{\text{室内}}$	变	变	变	变	×	○	●	○	○	×	●	○
	全新风送排结合	$h_{\text{室外}} \leq h_{\text{室内}}$, $t_{\text{室外}} < 29$	变	变	变	变	○	×	○	×	×	○	○	×
	全新风只送不排	$h_{\text{室外}} \leq h_{\text{室内}}$, $t_{\text{室外}} \geq 29$	变	变	×	×	○	×	×	×	×	○	×	×
通风季	小新风	$t_{\text{室外}} \geq 29$	变	变	变	变	×	○	●	○	○	×	●	○
	送排结合	$29 > t_{\text{室外}} > \text{设定值}$, 设定值(初始值 27)	变	变	变	变	○	×	○	×	○	×	×	○
	只送不排	设定值 $> t_{\text{室外}} > 19$, 设定值(初始值 27)	变	变	×	×	○	×	×	×	×	○	×	×

续表

工况			组合式空调机组		回排风机		全新风阀	小新风阀	排风阀	回风阀	小新风阀	全新风阀	排风阀	回风阀
			KT/A	KT/B	HPF/A	HPF/B	DT/A5	DT/A6	DT/A7	DT/A8	DT/B5	DT/B6	DT/B7	DT/B8
通风季	只排不送	$t_{\text{室外}} \leq 19$	×	×	变	变	×	×	○	×	×	×	○	×
冬季	只送不排	$5 \leq t_{\text{室外}} \leq 12$	变	变	×	×	○	×	×	×	×	○	×	×
	只排不送	$t_{\text{室外}} > 12$	×	×	变	变	×	×	○	×	×	×	○	×
	A端只送不排	$5 \leq t_{\text{室外}} \leq 12, t_{\text{B室内}} < 12, t_{\text{A室内}} > 12$	变	×	×	×	○	×	×	×	×	×	×	×
	A端只排不送	$t_{\text{室外}} > 12, t_{\text{B室内}} < 12, t_{\text{A室内}} > 12$	×	×	变	×	×	×	○	×	×	×	×	×
	B端只送不排	$5 \leq t_{\text{室外}} \leq 12, t_{\text{A室内}} < 12, t_{\text{B室内}} > 12$	×	变	×	×	×	×	×	×	○	×	×	×
	B端只排不送	$t_{\text{室外}} > 12, t_{\text{A室内}} < 12, t_{\text{B室内}} > 12$	×	×	×	变	×	×	×	×	×	×	○	×
	停机模式	$t_{\text{室外}} < 5$ 或 $(t_{\text{A室内}} < 12, t_{\text{B室内}} < 12)$	×	×	×	×	-	-	-	-	-	-	-	-

注：表中“×”表示关状态；“○”表示开状态；“●”表示部分开启状态；“变”表示变频风机变频运行；“-”表示此设备保持现有运行状态； $h_{\text{室外}}$ 表示室外焓值； $h_{\text{室内}}$ 表示室内焓值； $t_{\text{室外}}$ 表示室外温度； $t_{\text{室内}}$ 表示室内温度； t_{A} 表示A端温度； t_{B} 表示B端温度。

1) 全新风、小新风模式转换遵循如下原则：空调季全新风与小新风模式切换根据室内外焓值进行对比确认，当室外焓值大于室内焓值时，运行小新风模式，反之运行全新风模式；通风季全新风与小新风根据室外温度与站内温度设定值进行对比(该站站内温度设定值为 29℃)，当室外温度大于站内温度设定值时，运行小新风模式，反之运行全新风模式。

2) 工况表中设定值确定原则如下。

设定值主要用于全新风工况中单送与单排模式的确认。确认方式如下：

a. 手动设定。通过集中管理平台进行人为手动给定，从而完成模式转换。

b. 自动计算。采用单送或单排模式时，对于送排风气流组织会产生一定影响，即局部区域超温(尤其对于非标站或换乘通道处)。通过系统实时监测站内温度，如因气流组织不佳引起的局部区域环境参数不达标，则降低设定值，反之升高设定值。通过此种方式确保各站设定值与站内气流组织特点相符。

3) 考虑冬季工况时，因局部新风渗入导致的站内过冷(尤其局部出入口)，此时需要关闭对应侧风机，保证局部环境的舒适度。

4.4 供冷模式控制

此控制模块实现风系统与水系统的优化调节，共 3 种供冷模式：①新风供冷；②新风冷机联合供冷；③冷源单独供冷。

1) 新风供冷。此种供冷模式是通过新风进行直

接供冷，主要应用于负荷相对较低或者室外温、湿度较低情况。由于受限条件较多，故此种模式应用场景较少。

2) 新风加冷源设备供冷。此种供冷模式下，冷量来源主要分为两部分，一是新风中所带冷量，公式为

$$Q_f = q_f c (i_r - i_f) \quad (2)$$

式中： Q_f 为新风所带冷量； q_f 为新风量； c 为新风比热； i_r 为室内焓值； i_f 为新风焓值。

另一部分是冷机提供冷量，公式为

$$Q_c = q_c c (t_{c,r} - t_{c,s}) \quad (3)$$

式中： Q_c 为冷机提供冷量； q_c 为冷冻水流量； c 为水比热； $t_{c,r}$ 为冷冻水回水温度； $t_{c,s}$ 为冷冻水供水温度。

风、水系统共同供冷，降低机械冷量的供应，从而提升系统运行能效。此种模式下，对应风机应运行在全新风工况下。

3) 冷源设备供冷。此种供冷模式下，新风为负向负荷，对应风机一定处于小新风工况。所有冷量均为机械冷量。

上述 3 种模式切换需综合考虑室外新风负荷、室内负荷、风机运行能耗、冷源运行能耗。如当室外新风温湿度为 27℃，50%相对湿度，此时为了满足站内 28℃，45%~65%的环境目标要求^[9]，需要确定设备开启模式及开启方式。此时共有以下两种极端运行思路。

方式 1：全新风工况下，尽可能大地开启送风机频率，降低冷源设备出力。

方式 2：全新风工况下，将风机频率控制在允许范围内最低值，提升冷源设备出力。

两种方式均可实现控制目标，但其所消耗的能耗一定存在差异。为了解决上述问题，需建立设备能耗模型及冷量供应模型，再将室外温湿度、室内负荷需求、风机模式作为输入条件，对最终供冷模式及设备出力进行优化控制。

4.5 冷源效率控制

风机运行模式及供冷模式确定后，冷源效率控制模块的目标就是对冷源所提供的冷量进行能效最优控制。

由于冷站设备高耦合特性，所以单独降低某类设备的能耗会引起整个系统能耗的升高。例如：降低冷却水流量(通过变频、关小阀门等措施)，可以降低冷却泵电耗，却会造成冷机冷凝温度上升，对冷机效率有不利影响；增开冷却塔风机，虽然会增加冷却塔风机电耗，却会使冷机冷凝温度下降，提高冷机运行效率。因此，对各设备单独进行节能调节并不能实现冷源全局效率最优，节能策略应当以冷源全局能耗最低为目标。

为了降低系统耦合带来的寻优难度，将能耗占比较低的冷却塔控制做如下简化：通过查阅文献及实测可知，在不同湿球温度条件下，当冷塔风水比达到 1.1~1.5 时，或效率达到最大值 80%时，冷却塔频率在提升，对冷却水降温作用趋于平稳^[10-11]。因此在调控时，为简便控制方式，尽可能提升冷却塔频率，直到风水比或冷塔效率处于相应范围内。

去除冷却塔后，将剩余设备建立灰箱模型(由于篇幅限制，此处不对灰箱模型进行论述)，根据建立的设备模型进行寻优控制。为了提升寻优的稳定性，将各设备寻优步长适当延长，如水泵频率以 3 Hz 为步长进行寻优。寻优流程如图 5 所示。

根据图 5 过程可实现给定冷量下，系统能效最优的保障。

4.6 整体控制流程

整体控制流程如图 6 所示。

系统根据风机模式控制模块确定全新风、小新风模式。模式确定后，通过供冷控制模块(虚线内部分)、负荷预测模块数据确定供冷模式及风系统、供冷系统各自承担供冷量，最后根据各自承担供冷量完成风系统与冷源系统的优化控制。

4.7 小结

对系统控制工艺进行论述。对比传统控制方式该系统具有如下特点：

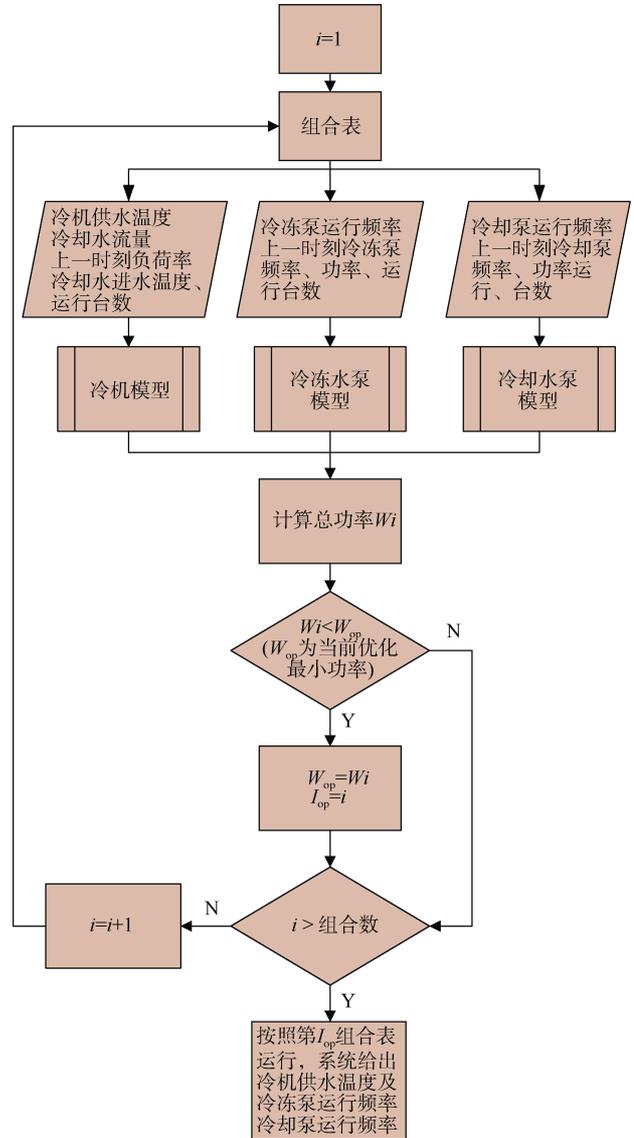


图 5 冷源寻优控制流程

Fig. 5 Cold source optimization control process

1) 系统可实时适应各车站负荷特性与设备特性，保证控制策略的实时匹配。

2) 风、水系统通过供冷模式模块进行整体控制，解决了传统系统单独控制带来的整体能效不佳问题。

3) 冷源系统控制考虑了设备间耦合问题，从整体能效出发进行寻优控制，解决了单体设备闭环调节带来的总体能效不佳问题。

5 结语

针对现阶段通风空调系统存在的诸多问题，借助北京市科委重大专项对通风空调系统智能化控制技术的研究，将该研究成果在新机场线中落地应用，实现新建阶段对通风空调系统控制的创新设计。新机场线

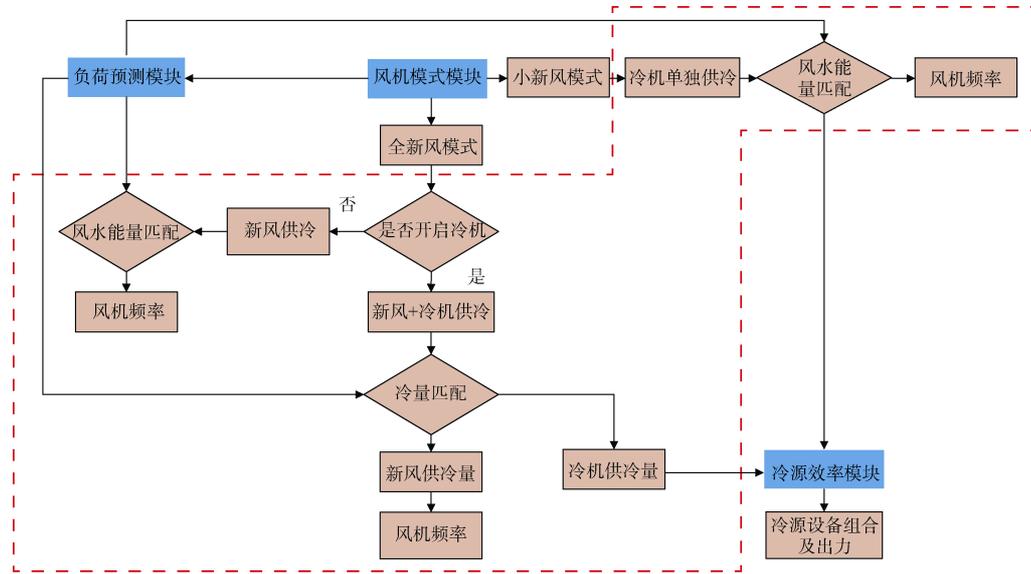


图6 整体控制流程

Fig. 6 Overall control flow

正式投运后，需对各站运行效果及能效进行持续测试与观察，总结经验与不足，为后期轨道交通通风空调控制系统设计与建设提供宝贵建议与数据支撑。

参考文献

- [1] 闻彪, 吴庆, 洪学新. 地铁通风空调系统节能研究[J]. 建筑节能, 2010, 38(4): 32-34.
WEN Biao, WU Qing, HONG Xuexin. Energy-saving for ventilation and air-conditioning system in subway[J]. Building energy efficiency, 2010, 38(4): 32-34.
- [2] 高波, 李先庭, 韩宗伟, 等. 地铁通风空调系统节能的新进展[J]. 暖通空调, 2011, 41(8): 21-26.
GAO Bo, LI Xianting, HAN Zongwei, et al. Energy-saving progress of ventilation and air-conditioning system for underground railway stations[J]. Journal of HV&AV, 2011, 41(8): 21-26.
- [3] 由世俊, 张磊, 袁凤东. 地铁通风空调系统智能化控制与节能研究[C]//全国暖通空调制冷 2008 年学术年会论文集, 2008.
YOU Shijun, ZHANG Lei, YUAN Fengdong. Study on intelligent control and energy saving of subway ventilation and air conditioning system[C]//National Academic Conference on Heating, Ventilation, Air-conditioning and Refrigeration, 2008.
- [4] 王峰. 地铁通风空调系统变频节能研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2007.
WANG Feng. Study on energy-saving of ventilation and air-conditioning system by frequency conversion in subway[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2007.
- [5] 徐华. 地铁 BAS 系统节能控制方式分析与研究[J]. 信息与电脑(理论版), 2018(12): 136-137.
XU Hua. Analysis and research on energy saving control mode of subway BAS system[J]. China computer & communication, 2018(12): 136-137.
- [6] 何菡. 基于人工神经网络的地铁环控热负荷计算[D]. 成都: 西南交通大学, 2002.
HE Han. Calculation of heat load of metro environmental control based on artificial neural network[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2002.
- [7] 李俊. 基于现场实测的地铁车站空调负荷计算方法研究[D]. 北京: 清华大学, 2009.
LI Jun. Subway station air-conditioning load calculation method research based on field measurement[D]. Beijing: Tsinghua University, 2009.
- [8] 杨乐. 地铁站用能特征与节能策略研究[D]. 北京: 清华大学, 2017.
YANG Le. Research on the energy use characteristics and energy saving strategies of metro stations[D]. Beijing: Tsinghua University, 2017.
- [9] 地铁设计规范: GB 50157—2013[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2014.
Code for design of metro: GB 50157—2013[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2014.
- [10] 沈启, 魏庆芄, 陈永康. 空调系统节能优化运行与改造案例研究(4): 冷却塔[J]. 暖通空调, 2010(8): 45-50.
SHEN Qi, WEI Qingpeng, CHEN Yongkang. Case study on HVAC energy efficient optimization and renovation (Part IV): Cooling towers[J]. Journal of HV&AV, 2010(8): 45-50.
- [11] 江亿, 姜子炎. 建筑设备自动化[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2007.
JIANG Yi, JIANG Ziyang. Automation of construction equipment[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2007.

(编辑: 王艳菊)