

# 城市轨道交通车站空调水变频技术现场测试与 数据分析后评估

周慧敏

(上海申通地铁集团有限公司技术中心,200003,上海//工程师)

**摘要** 随着客流和室外温度的变化,空调季节地铁车站的冷负荷在一天中会有一些的变化。空调水系统能根据负荷的变化进行工作,具有很大的节能空间。自2010年起,空调水变频技术已在上海轨道交通100多座地下车站进行了改造应用,由此,开展了对空调水变频节能技术的能效、维护、运行安全等方面的综合评估。

**关键词** 城市轨道交通;车站;空调系统;水变频技术

**中图分类号** U231.4

**DOI:**10.16037/j.1007-869x.2020.05.021

## Field Test and Post Data Analysis Assessment of Water Frequency Conversion Technology for Rail Transit Station Air Conditioning System

ZHOU Huimin

**Abstract** With the changes of passenger flow and outdoor temperature, the cooling load of metro station in air conditioning seasons will have changes in the day. The air conditioning water system can work according to the changes of load with large energy saving space. Since 2010, water frequency conversion technology has been applied in more than 100 underground stations of Shanghai metro. On this basis, the energy efficiency, maintenance and operation safety of the water frequency conversion technology are comprehensive evaluated.

**Key words** urban rail transit; station; air conditioning system; water frequency conversion

**Author's address** Technological Centre of Shanghai Shentong Metro Group Co., Ltd., 200003, Shanghai, China

目前,国内大多数已建成的地铁车站冷水机组的能耗约占空调系统年能耗的30%~40%,水泵能耗约占6%~8%。随着客流和室外温度的变化,空调季节地铁车站的冷负荷在一天中会有一些的变化,空调水系统能根据负荷的变化进行工作,具有很大的节能空间<sup>[1]</sup>。自2010年起,空调智能水变频

技术已在上海轨道交通100多座地下车站进行了改造应用,随着时间的推移和技术的进步,至今未对其实际使用效果进行过测试评估。因此,对空调水系统智能水变频技术的能效、维护、运行安全等方面开展综合评估是十分必要的。

## 1 现场测试与分析方案

### 1.1 空调水变频技术原理

空调水系统变频是指通过对冷却水泵和冷冻水泵,进行变频改造,实现水系统的变流量运行,使空调系统的负荷与实际相匹配。

常规地下车站冷水机组是在定流量设计下运行的。冷水机组要保持定流量的主要原因是:①蒸发器(或冷凝器)内水流速的改变会改变水侧放热系数,影响传热;②管内流速太低,若水中含有机物或盐,在流速小于1 m/s时,会造成管壁腐蚀;③避免由于冷水流量突然减小,引起蒸发器的冻结<sup>[2-3]</sup>。实际水泵变频改造工程表明,空调水系统水泵的变频节能改造对冷水机组的功率几乎没有影响<sup>[4]</sup>。

当环控系统部分负荷时,水系统变频通过减小冷冻水和冷却水流量来维持空调系统冷负荷的不变,从而节省循环水系统中水泵的能耗。根据水泵的工作原理可知,水泵的输入功率与转速的立方成正比关系。当水泵的转速降低后,流量按照降速比例减小,相应泵的功率按照降速比例的三次方下降<sup>[5]</sup>。

### 1.2 现场测试方案

#### 1.2.1 测试工况

- 1) 冷水机组运行正常,且处于稳定运行状态。
- 2) 变频、工频测试时,机组统一设定机组出水温度为7℃。
- 3) 每个车站测试4个工况:早/晚高峰工频、早/晚高峰变频;平时段工频、平时段变频。

4) 同一时段工频、变频的 2 次测试中,机组、水泵、冷却塔、空调箱开启情况基本相同。

1.2.2 测试参数

- 1) 冷水机组的输入总功率、冷水总流量、冷水进出水温度、冷却水总流量及冷却水进出水温度。
- 2) 冷水泵的输入总功率。
- 3) 冷却水泵的输入总功率。
- 4) 室外环境的温度及相对湿度。
- 5) 站台及站厅的温度及相对湿度。

1.2.3 测点布置要求<sup>[6-7]</sup>

- 1) 冷冻水及冷却水流量、温度:根据机房内管路情况,测试总管流量,选取水平直管段或水流向上的直管段。如不满足上述要求,测试支管流量。温度测点根据流量测点位置确定。
- 2) 输入功率:在电源进线端的变频器之前测试输入总功率。
- 3) 室外环境温度、相对湿度:其测点设在无阳光直射、通风良好、无设备等其它直接影响的位置,距离地面 1 m 处。
- 4) 站厅及站台温度、相对湿度:选取有代表性的区域测试。

1.2.4 测试时间

每个工况连续测试 1 h。

1.3 结果计算<sup>[6-7]</sup>

冷水机组制冷量为

$$Q = V \cdot (T_2 - T_1) \rho C / 3\,600 \tag{1}$$

式中:

- $Q$ ——冷水机组制冷量, kW;
- $V$ ——冷水流量,  $\text{m}^3/\text{h}$ ;
- $T_1$ ——冷水机组出水温度,  $^{\circ}\text{C}$ ;
- $T_2$ ——冷水机组进水温度,  $^{\circ}\text{C}$ ;
- $\rho$ ——水密度,取  $1\,000\text{ kg}/\text{m}^3$ ;
- $C$ ——水比热容,取  $4.186\,8\text{ kJ}/(\text{kg} \cdot ^{\circ}\text{C})$ 。

冷水机组运行效率为

$$P_c = Q / N_1 \tag{2}$$

式中:

- $P_c$ ——冷水机组运行效率;
- $N_1$ ——冷水机组输入功率, kW。

冷源系统运行效率为:

$$P_s = Q / (N_1 + N_2 + N_3 + N_4) \tag{3}$$

式中:

- $P_s$ ——冷源系统运行效率;
- $N_2$ ——冷水泵输入功率;

$N_3$ ——冷却水泵输入功率;

$N_4$ ——冷却塔输入功率。

冷水机组节能率为:

$$\eta_1 = \frac{\left(\frac{1}{P_1} - \frac{1}{P_2}\right)}{\frac{1}{P_1}} \times 100\% \tag{4}$$

式中:

$P_1$ ——冷水泵与冷却水泵工频运行时的冷水机组运行效率;

$P_2$ ——冷水泵与冷却水泵变频运行时的冷水机组运行效率。

冷源系统节能率为:

$$\eta_2 = \frac{\left(\frac{1}{P_{s1}} - \frac{1}{P_{s2}}\right)}{\frac{1}{P_{s1}}} \times 100\% \tag{5}$$

式中:

$P_{s1}$ ——冷水泵与冷却水泵工频运行时的冷源系统运行效率;

$P_{s2}$ ——冷水泵与冷却水泵变频运行时的冷源系统运行效率。

1.4 测试仪器

本次检测评估使用的仪器如表 1 所示。

表 1 测试仪器表

仪器名称	型号	检测参数	仪表准确度
功率计	3169-20	功率/电量	1.5 级
功率分析仪	3390	功率/电量	1.5 级
电能综合分析测试仪	DZFC-1	功率/电量	1.5 级
超声波流量计	G601	水流量	1%
温湿度数据记录仪	Testo 176T2	供、回水温度	0.2 $^{\circ}\text{C}$
精密型温湿度记录仪	Testo 625	温度、相对湿度	0.2 $^{\circ}\text{C}$

2 测试结果与分析

2.1 各车站测试结果

本次对上海轨道交通 10 座地下车站进行检测。

1) 宜山路站:测试期间,冷水机组负荷率约 50%。变频工况下,冷水泵和冷却水泵频率均为 50 Hz,冷水机组的实际出水温度约为 12~14  $^{\circ}\text{C}$ 。

2) 桂林路站:测试期间,冷水机组负荷率约为 60%。变频工况下,高峰段及平时段冷冻水泵频率均约为 20 Hz,冷却水泵频率均约为 31 Hz,冷水机组的实际出水温度高于 16  $^{\circ}\text{C}$ 。

3) 大世界站:测试期间,冷水机组负荷率约为

90~100%。变频工况下,高峰段及平时段冷冻水泵频率均约为 35 Hz,冷却水泵频率均约为 36 Hz,冷水机组的实际出水温度约为 9℃。

4) 江苏路站:测试期间,冷水机组负荷率约为 70~80%。变频工况下,高峰段冷水泵及冷却水泵频率均约为 30 Hz,平时段冷冻水泵频率约为 33 Hz,冷却水泵频率均约为 32 Hz,冷水机组的实际出水温度约为 14.6℃。

5) 世纪大道站:测试期间,冷水机组负荷率约为 60~70%。变频工况下,高峰段及平时段冷冻水泵频率均约为 41 Hz,冷却水泵频率约为 46 Hz,冷水机组的实际出水温度约为 12.8℃。

6) 东安路站:测试期间,冷水机组负荷率约为 70%。变频工况下,高峰段及平时段冷冻水泵频率均约为 46 Hz,冷却水泵频率约为 41 Hz,冷水机组的实际出水温度约为 13.1℃。

7) 浦电路站:测试期间,冷水机组负荷率约为 20~30%。变频工况下,高峰段及平时段冷冻水泵频率均约为 32 Hz,冷却水泵频率约为 33 Hz,冷水机组的实际出水温度约为 10℃。

8) 芳华路站:测试期间,冷水机组基本满负荷率运行。变频工况下,高峰段冷水泵频率均约为 43 Hz,冷却水泵频率约为 32 Hz,平时段冷水泵频率均约为 40 Hz,冷却水泵频率约为 32 Hz,冷水机组的实际出水温度分别为 13.4℃。

9) 商城路站:测试期间,冷水机组基本满负荷率运行。变频工况下,高峰段及平时段冷冻水泵频率均约为 43 Hz,冷却水泵频率约为 36 Hz,冷水机组的实际出水温度分别为 12.9℃。

10) 祁连山南路站:测试期间,冷水机组基本满负荷率运行。变频工况下,高峰段及平时段冷水泵、冷却水泵频率均约为 31 Hz,冷水机组的实际出水温度分别为 14.4℃。

## 2.2 检测结果分析

### 2.2.1 节能情况

从检测数据可知,测试期间,与工频工况下相比,变频工况下冷水机组进出水温差变化各车站不同。该温差与冷水泵流量、冷水泵的功率直接相关。温差变化较大的车站冷水泵的功率均较低。

变频控制系统的节能体现在冷水泵及冷却水泵功率的降低。由检测数据可以看到,高峰段测试期间,大部分车站变频工况下水泵总功率(冷水泵及冷却水泵功率之和)降低明显。这也是冷源系统

效率提高、实现节能的原因。

各车站的节能率如图 1 所示。由图 1 可见:变频工况下,冷水机组的节能率基本为负值,即冷水机组的效率下降;除宜山路之外,其他车站冷源系统的节能率均为正值,即变频工况下冷源系统效率均上升。

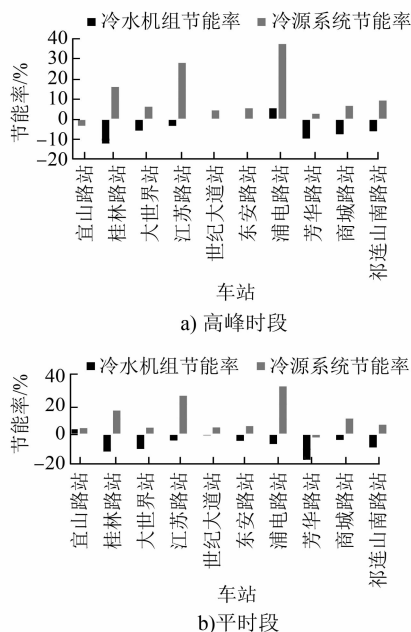


图 1 各车站节能率

由检测数据可知,在城市轨道交通中应用的空调智能水变频技术具有一定的节能效果。空调冷源系统采用冷水泵、冷却水泵变频改造时的节能率一般为 10%~15%。本次检测的车站节电率基本达到平均水平。

### 2.2.2 智能化情况

在测试的车站中,采用手动控制模式的车站有 4 座,占比较大。而且手动设定的频率均偏低。频率降低会造成水泵电动机散热性能下降,频率过低会影响电动机使用寿命,对设备造成一定的损害。

### 2.2.3 对系统设备的影响

频率越低,电耗越小,节电效果越明显,但是对设备、系统会产生一定的影响。根据现场测试数据,在变频工况下,检测车站的冷水机组效率均有不同程度的下降。根据现场调研情况,在水变频开启工况下,近半数冷水机组压缩机均出现排气压力过高的现象,占比较大。

## 3 结语

城市轨道交通车站水系统的运行效率,涉及到

(下转第 96 页)

根据计算结果,施工过程地铁隧道顶部最大沉降量为 0.253 mm,最大隆起量为 0.173 mm,满足隧道变形控制要求。

## 4 结语

以某项目隧道重叠交叉段联络通道冻结法施工为工程背景,采用 Midas/GTS 建立三维有限元模型分析联络通道冻结开挖施工对上部盾构隧道的影 响。分析结果表明:

1) 下部隧道联络通道施工完成之后,上部隧道最大沉降量为  $-0.322$  mm,最大隆起量为 0.211 mm,最大水平位移为  $-0.053$  mm,均在控制允许值范围内。隧道结构所受应力均满足混凝土强度设计标准值,也均在安全可控范围内。

2) 本研究以规范理想的施工为前提,而实际施工中存在诸多不确定因素,因此施工中应重点对上

部隧道及轨道结构的位移、净空收敛、管片结构错台与张开、轨距等项目进行密集监测,同时要确保联络通道融沉阶段的注浆密实性。

## 参考文献

- [1] 王晖,李大勇,李健,等.地铁联络通道冻结法施工三维数值模拟分析[J].地下空间与工程学报,2011(增刊2): 1589.
- [2] 张志强,何川.用冻结法修建地铁联络通道施工力学研究[J].岩石力学与工程学报,2005(18): 3211.
- [3] 乔卫国,李大勇.地铁联络通道冻结监测分析[J].岩土力学,2003(4): 666.
- [4] 周志勇,胡向东.隧道联络通道冻结法施工数值模拟与实测分析[J].现代隧道技术,2008(增刊1): 275.
- [5] 岳丰田,张水宾,仇培云,等.地铁联络通道冻结加固融沉注浆研究[J].岩土力学,2008(8): 2283.
- [6] 武亚军,杨敏,李大勇.大连路隧道联络通道冻土帷幕数值分析[J].岩土力学,2006(3): 487.

(收稿日期:2019-11-28)

(上接第 88 页)

- [6] 董诚,郑颖人,陈新颖,等.深基坑土钉和预应力锚杆复合支护方式的探讨[J].岩土力学,2009,30(12): 3793.
- [7] MICHAEL L. Database for retaining wall and ground movements due to deep excavations[J].Journal of Geotechnical Engineering,2001(3): 203.

- [8] 卢萌盟,沈俊,曾宪桃.预应力锚索加固基坑的三维数值分析[J].岩土工程学报,2005(10): 1198.
- [9] 刘霁,贺晨.基于 PLAXIS 基坑围护桩水平位移特性的分析[J].中南林业科技大学学报,2011,31(8): 142.

(收稿日期:2019-06-12)

(上接第 91 页)

以下很多因素:制冷剂、冷冻水及冷却水等 3 种介质的循环热交换;空调箱机组、冷水机组蒸发器、冷水机组机组冷凝器以及冷却塔装置四个热交换过程。此外,由于城市轨道交通车站负荷和环境因素的不确定,水系统运行情况判断需要多参量以及参量间的耦合,具有显著的复杂性特征。

目前,在城市轨道交通中应用的空调水变频技术具有一定的节能效果。国内地铁车站采用先进节能技术的不多,基本仅对风系统或水系统中的某一个引入节能控制技术。通风空调系统的水系统和风系统是一对耦合系统,它们间的良好匹配是实现系统节能的重要保障,对地铁车站的节能意义重大。

## 参考文献

- [1] 李丽.轨道交通车站冷冻水系统变频节能技术探讨.上海隧道

工程[J].2007(4): 49.

- [2] 高养田.空调变流量水系统设计技术发展[J].暖通空调,1996,26(3): 20.
- [3] 王凡,徐玉党.中央空调水系统变流量分析及其改进[J].建筑热能通风空调.2006,25(1): 49.
- [4] 张谋雄.冷水机组变流量的性能[J].暖通空调,2000,30(6): 56.
- [5] 蔡增基,龙天渝.流体力学泵与风机[M].4 版.北京:中国建筑工业出版社,1999.
- [6] 中华人民共和国住房和城乡建设部.采暖通风与空气调节工程检测技术规程:JGJ/T 260—2011[S].北京:中国建筑工业出版社,2011.
- [7] 中华人民共和国住房和城乡建设部.公共建筑节能检测标准:JGJ/T 177—2009[S].北京:中国建筑工业出版社,2010.

(收稿日期:2019-06-12)