

# 轨道交通车站空调水系统新型节能控制方法研究

李可可<sup>1</sup>, 周建华<sup>1</sup>, 姜宏超<sup>1</sup>, 兰波<sup>2</sup>

(1. 北京航空航天大学 能源与动力工程学院, 北京 100037; 2. 辽宁爱思迪冷却技术有限公司, 辽宁 丹东 118000)

**摘要:** 面对轨道交通能耗逐年递增的现状, 我国大力提倡轨道交通节能, 并提出绿色轨道交通的概念; 针对传统轨道交通空调系统所存在的冷水机组制冷量过剩、冷冻和冷却水流量无法自动调节等问题, 设计一种新型节能控制系统, 对车站冷负荷变化规律进行分析, 对系统进行集中监控; 利用变频技术和闭环控制系统, 计算所需冷负荷, 智能控制电机转速, 自动调节冷水机组的制冷量与空调末端冷量, 使冷却系统处于最节能的工作点; 轨道交通空调水系统应用该节能系统后耗电量大幅度降低, 从而节约大量能源。

**关键词:** 轨道交通; 节能; 控制; 变频

## Research on New Energy—Saving Control Method of Air Conditioning Water System in Rail Transit station

Li Keke<sup>1</sup>, Zhou Jianhua<sup>1</sup>, Jiang Hongchao<sup>1</sup>, Lan Bo<sup>2</sup>

(1. School of Energy and Power Engineering, Beihang University, Beijing 100037, China;

2. Liaoning ST Cooling Technology Co., Ltd, Dandong 118000, China)

**Abstract:** Energy consumption of Rail transit in our country is increasing year by year, thus the state vigorously promotes energy conservation and puts forward the concept of green rail transit. Since traditional air conditioning system of rail transit cannot adjust the water flow of cooling and refrigeration automatically under the dynamic work environment, and chillers cooling capacity surplus and other issues have not yet been solved, a new energy—saving control system has been researched in this paper. By analyzing the change law of cooling load of the station, this paper proposes centralized monitoring system, frequency conversion technology and the closed—loop control system so as to calculate the cooling load, achieve the control of motor speed intelligently as well as automatically adjust the volume of the refrigerating capacity of the chiller and air—conditioning terminal. Thus the cooling system can always working in the energy saving point. Since the energy—saving system is practiced in rail transit air—conditioning water system, power consumption has been considerably reduced and enormous energy conserved.

**Keywords:** rail transit; energy—saving; control; frequency conversion

## 0 引言

21 世纪, 建筑能耗已经成为我国当前三大能耗之一。根据建筑物能耗数据分析, 空调占办公建筑能耗的 60%, 因此空调系统的节能对我国建筑能耗影响十分重大。据统计, 我国现有的公共建筑物中, 只有不到 10% 达到节能标准。就使用节能空调的建筑在部分国家的统计情况来看, 欧洲节能空调使用率占其总量的 15%, 美国为 20%, 澳大利亚则达到 60%, 而我国却仅达 1%。综上, 空调节能作为降低建筑能耗的重要组成部分, 在我国有着非常大的提升空间。

近年来, 我国通过大力发展轨道交通来解决城市交通问题。至 2014 年底, 我国城市轨道交通总里程数达到 3 173 公里。根据规划, 到 2020 年, 全国 79 个城市规划的轨道交通总里程将达到 13 385 公里, 轨道交通车站间距平均为 1.32 公里。以此推算, 至 2020 年大约要增加 7 700 个车站。同时按照现行的能耗数据测算, 轨道交通车站空调水系统的能耗将翻两番, 这对于国家建筑能耗将是巨大的挑战, 因此对轨道交通车站空调水系统进行节能控制刻不容缓。传统轨道交通空调水系统设计按当地天气最热、负荷最大时进行设计, 并留有

10%~20% 的余量; 冷冻水泵和冷却水泵却不能随冷负荷的变化进行调节, 导致冷冻水和冷却水系统长期满负荷运行。在浪费了大量能源的同时, 轴承、阀门、管道等部件极易损坏, 从而使得维护费用较高。如果仅由人工调节冷冻主机的出水温度, 在环境温度较低或空调末端温控设备灵敏度不高时, 会严重降低系统的运行质量。基于以上问题, 国家提出了“绿色轨道交通”的概念。

本文根据轨道交通车站空调水系统运行现状, 设计出一种新型节能控制系统。它是利用变频技术、PLC、传感器等构成的闭环节能自动控制系统, 对制冷主机、冷却塔、冷冻水和冷却水系统进行综合改造, 从而达到降低能耗、稳定系统的目的, 同时延长设备的使用寿命。

## 1 系统设计与实现

轨道交通空调水系统节能控制系统按照控制对象的不同, 可分为单元控制级和集中监控级两层结构。其中, 单元控制级包括水泵控制柜、冷却塔风机控制箱和信号采集装置; 集中控制级即车站空调水系统节能控制柜。节能控制系统组成如图 1 所示, 水泵控制柜对冷冻水泵和冷却水泵的配电、启动、调节进行智能调配; 冷却塔风机控制箱对冷却塔的电机、风机转速进行调配; 信号采集装置对系统管道中的流量、温度、压力等值进行采集、存储和传输。车站空调水系统节能控制柜对上述单元控制级进行集中控制、监控和运行管理, 其与车站的环境、设备监控系统 (BAS) 通过以太网进行信号传输。

节能控制系统采用“集中管理、分散控制”构架进行设

收稿日期: 2015-10-09; 修回日期: 2015-11-09。

**作者简介:** 李可可 (1992-), 男, 河南人, 硕士研究生, 主要从事制冷系统总体技术的研究。

周建华 (1977-), 男, 辽宁人, 讲师, 硕士研究生导师, 主要从事进气管道流动控制、太阳能热利用、新型能源的研究。

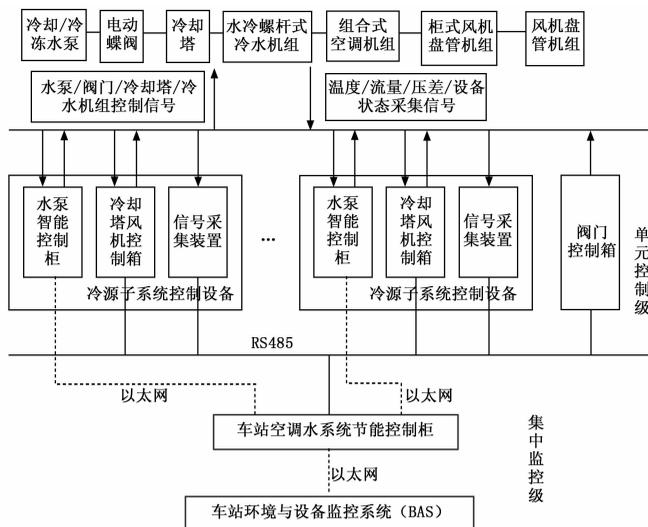


图 1 轨道交通空调水节能新型控制系统组成图

计，各个相互独立的单元控制级分别控制每个受控设备或系统，单元级控制系统可通过显示屏进行现场监控、调节；车站空调水系统节能控制柜设计了功能化的组态软件，可实现部分设备的关联控制，具有很高的灵活性。对于不同的控制对象设计了相应节能方案，对环境各种参数进行采集，对制冷机组、冷冻水泵、冷却水泵、冷却塔风机等耗能设备进行耗能量的统计，控制耗能设备优化运行，降低能耗。

节能控制系统运行稳定，抗干扰能力强，当节能控制柜的通信设备发生故障时，新系统单元控制级中的智能控制器可独立控制设备稳定运行，工作人员也可对其进行人工控制。

## 2 系统硬件设计

### 2.1 车站空调水系统节能控制柜

车站空调水系统节能控制柜主要由控制计算机、数据处理单元、报警保护单元、通信协议转换单元等组成；其指标为：CPU 主频 2.8 GHz，内存 4 G，硬盘 1T，网卡 10 M/100 Mbps，计算机系统采用 windows 7。

### 2.2 单元控制级

#### 2.2.1 水泵控制柜

水泵控制柜是控制系统的单元控制级，由配电系统提供动力电源，对各个冷冻水泵、冷却水泵进行配电、变频起停、自动调节转速。并配有 7 英寸、分辨率为 800×600 的彩色液晶显示屏。

水泵控制柜包括数模转换模块、温度传感器、温度模块、PLC 等器件，配备西门子新一代变频器，柜体设有进出线电抗器，能够有效抑制谐波电流，增加变频器的稳定性。在控制柜面板设置正反转、电机增减速、紧急停止、变频/工频、PLC 控制等控制按钮，并设置指示灯。

#### 2.2.2 冷却塔风机控制箱

为每台冷却塔风机控制箱配备相互独立的智能控制器、控制软件、开关器件、断路器、指示灯、接触器等设备。

#### 2.2.3 信号采集装置

信号采集装置包括温度采集装置，湿度采集装置，流量测试及信号传输装置，压力测试及信号传输装置。这些装置分布

在冷却系统内部及车站环境中，可精确采集信号并通过以太网进行信号传输。

## 3 系统软件设计

### 3.1 系统软件架构

系统软件功能模块组成如图 2 所示。系统软件架构包括监控平台和管理平台两大部分。其中，监控平台负责轨道交通空调水系统各硬件设备的参数采集和控制，主要包括制冷主机控制模块、冷冻水系统控制模块、冷却水系统控制模块和其它系统控制模块；管理平台包括数据库和管理功能模块。数据库包含了控制策略、故障记录和参数中心，管理功能模块包含了权限管理、参数设置、故障报警与保护、控制模式切换、计量功能、参数报警与恢复等模块。

## 4 节能控制策略

本部分针对轨道交通空调水系统的各个子系统，采取相应的节能策略设计节能控制系统，节能控制策略如图 3 所示。

### 4.1 制冷主机节能控制方法

随着站内人员流动及外界环境的变化，空调系统保持在

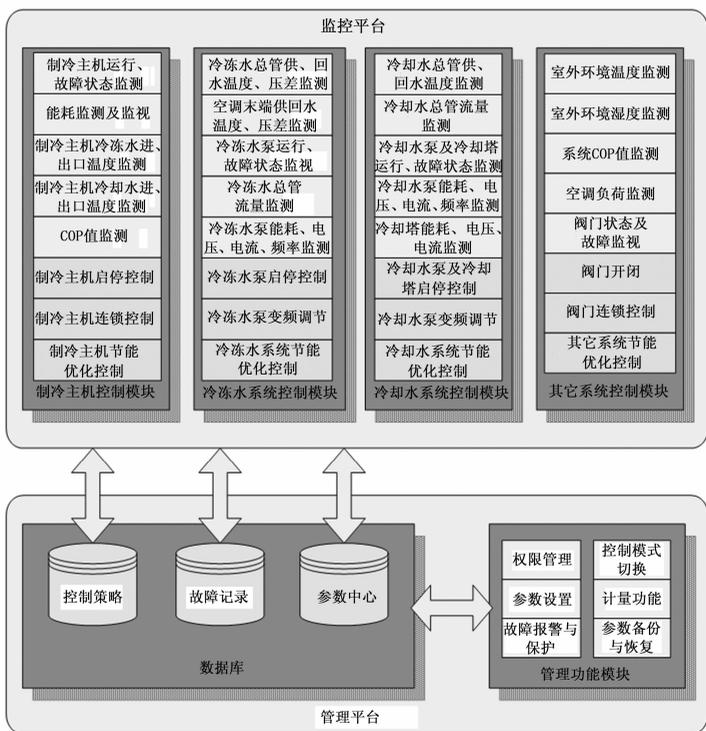


图 2 系统软件功能模块组成

设计负荷下运行并非必要。据统计，全年空调系统运行负荷低于设计值 70% 的时间占总运行时间的 63%。如果冷水机组工频运行，会造成制冷量与冷负荷量不匹配，进而造成大量的制冷量浪费，因此要对制冷主机进行节能控制。

为使制冷主机节能运行，系统根据冷负荷特性，结合设备容量、效率、自动控制系统功能及投入资本等多方因素，本系统采用群控方案对制冷主机进行节能设计。制冷主机和空调末端设备有强相关性，采用群控技术，根据空调末端的动态冷负荷和空调负荷率对应的时间频数来匹配冷水机组冷量。

采用群控技术，在多台冷水机组并联运行时选择最佳的机组运行台数，使得冷水机组能在高 COP（能量与热量之间的转换比率）状态下运行。冷水机组的控制原理图如图 4 所示。

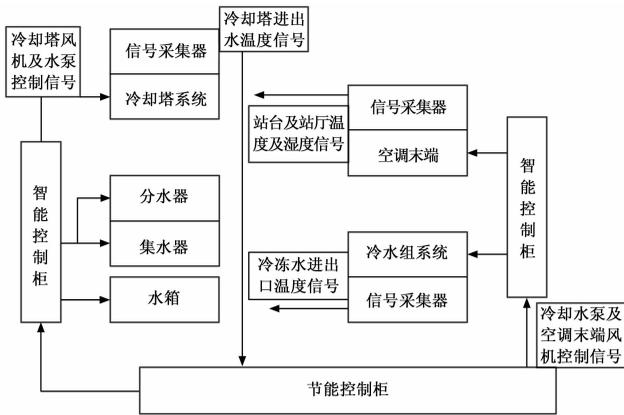


图 3 节能控制系统图

通过以下条件建立冷水机组群控: 建立冷水机组的运行特性模型, 记录所有冷水机组的负荷特性; 不同的冷水机组其负荷性能不同, 同种冷水机组其部分负荷性能也有差异, 利用计算机技术和信号采集技术, 获得各个冷水机组的性能系数 COP 及其随负荷率变化的曲线图。对空调冷负荷进行预测, 建立系统冷负荷预测模型, 为冷水机组与冷负荷的匹配提供依据, 对机组的开、增、减、停机进行群控。对冷水机组的冷冻水流量进行调节控制, 实现冷负荷的动态分配, 保证每台机组都在 COP 最大的负荷率上运行。使各台冷水机组的冷冻水出水温度尽可能一致。根据冷负荷的变化趋势, 计算开机数量, 智能判断增机、减机、停机, 计算各台机组的负荷率和 COP, 选择合适的机组工作状态。

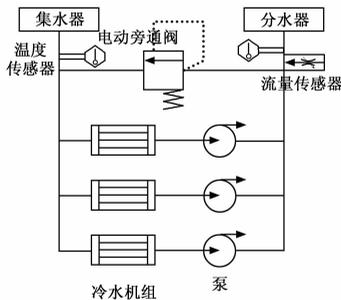


图 4 冷水机组的控制

#### 4.2 冷却水/冷冻水系统节能控制方法

整个空调水系统中, 冷却水/冷冻水系统提供了水系统的循环水的流动及控制, 这部分的能耗约占空调水系统总能耗的 20%, 系统的运行工况决定了循环水的大小, 所以根据系统的运行工况来调整循环水量的大小是可行且十分必要的。

冷冻水泵和冷却水泵为空调水系统提供循环水, 在系统部分负荷时, 可以通过二次泵变流量系统来控制循环水流量。二次泵变流量系统中, 一次泵采用定流量系统, 根据系统负荷进行设计; 二次泵系统采用变流量系统, 根据冷却水系统/冷冻水系统的进出水温差调整二次泵的循环水流量。利用二次泵变流量系统可以在保证循环水系统平稳运行的基础上, 根据系统的需要调整水流量大小。利用变频技术改变二次泵转速来调节水流量, 变频器调速平滑, 可平稳调节水系统, 智能控制流量, 延长冷水机组和管道设备的使用寿命。

冷冻水/冷却水系统的节能控制原理图如图 5 所示, 温度采集器采集冷却塔的进出水温度信号以及冷水机组的进出水

度信号, 温度控制器将采集到的信号传输给水量控制平台, 控制平台对信号进行分析处理, 将其转化为脉冲信号传递给变频器, 变频器改变二次泵的电机转动频率, 从而调节循环水流量。如果温差较大, 说明所需冷量较大, 变频器控制二次泵增加水流量, 反之, 则控制二次泵减少循环水量, 从而控制系统的制冷量。

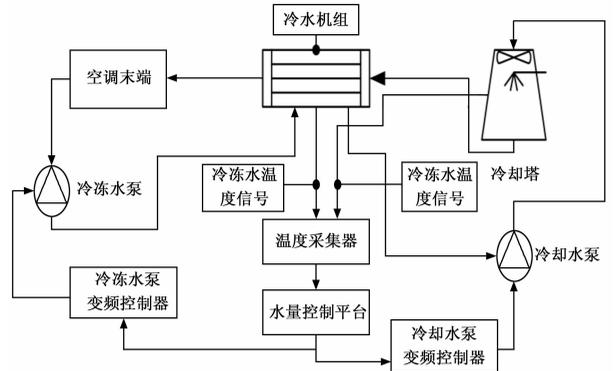


图 5 冷却水/冷冻水系统节能控制原理图

#### 4.3 冷却塔节能控制方法

冷却塔是重要的节水设备, 同时又是耗能设备, 据统计,  $1 \text{ m}^3/\text{h}$  循环水在冷却塔上的能耗为  $0.07 \sim 0.1 \text{ kW}$  (其中风机耗电量为  $0.03 \sim 0.06 \text{ kW}$ ), 我国中等城市一条地铁线的冷却塔风机年耗电量达  $1.8 \times 10^6 \text{ kW} \cdot \text{h}$ , 因此研究冷却塔的节能问题意义重大。

冷却塔的设计参数一般是参照炎热季节的日平均湿球温度来确定的, 该温度一年中出现的频率为  $5\% \sim 10\%$ 。各地的月均湿球温度变化比较大, 在气温较低的季节冷却塔能够提供的冷却负荷可能会远远大于所需量, 这时, 我们可以对冷却塔进行调整使其冷却能力与所需冷负荷相匹配, 可以节约能源, 减少工作部件损耗。

冷却塔主要依靠空气和冷却水的热对流以及冷却水的蒸发进行散热, 进而使冷却水降温, 因此调节冷却水和空气的对流速度可有效控制冷却塔的散热量。如果冷却塔的冷却能力过高, 可以调节风量来使冷却塔的冷却能力与冷凝器散热量匹配。冷却塔的主要耗能部件是风机, 风机会消耗大量电能, 因此可以通过降低风机的转速减少风量来降低冷却塔的耗电量, 达到节能的目的。

调节风量的有效方法有两种: 一是调整运行风机的数量, 二是调节风机的性能。调整运行风机数量的方法具有间断性、阶梯变化、非连续性调节的特点, 水温可能发生突变, 无法对冷却量进行无级定量调节。调节风机的性能, 最直接方法是调节电机转速, 目前变频调节电机转速的技术日趋完善和成熟, 可以通过改变电机转速对冷却塔风机性能进行无极调速。

根据热力学理论, 我们知道风机转速与冷却塔的散热量成正比, 风机所消耗功率与其转速的 3 次方成正比。根据美国马力公司所做实验证明, 3 台额定转速风机与 4 台相同型号以 75% 额定转速运行的风机能够为冷却塔提供相同的散热能力, 冷却塔与 4 台 75% 额定转速的冷却塔同时运行, 能够为冷水机组提供相同的冷量, 但是后者方法的耗电量只有前者的 56.25%。该实验同时表明采用 4 台 75% 额定转速风机的额冷却塔比 3 台全速运行的冷却塔能够节约 43.75% 的耗电量。该实验表明, 当需要为冷水机组提供的冷量调整时, 单纯依靠调整风机运行数量与调节风机转速相比, 并不利于我们进行节

能；另外，在应用变频调速装置时，其频率不宜调到较低的区间，这是因为电机在低转速运行时会产生大量的热，易烧毁电机；另一方面频率较低时，转速也会降低，此时运行工况会偏离正常工作点，其实际意义并不大。所以，在转速低于 40% 额定转速时可以靠停开风机台数来调节，这对于系统的设备起到很好的保护作用。随着科技和工业水平的不断发展，变频设备所需的投入资本成本越来越低，因此在调节变频电机转速的基础上，再通过减少风机运行数量而进行风量调节的方案，在工程应用中成为了切实可行的方法。综上，切实可行的调节冷却塔风量的措施就是，在变频调节电机转速的基础上，如所需风量达到一定程度则通过减少风机运行数量调整风量。

使用变频装置改变电源的频率从而改变电机和风机的转速，能够改变风量，满足冷却塔由于外界环境温度改变对于风量的需求，使得冷却塔冷量与冷水机组所需冷量一致，从而实现节能。冷却塔进出水温度比较容易检测，同时能准确反映冷却能力的变化，因此采用进出水温度信号通过传感器转化为指令传递给变频器，变频器根据指令调整输出频率的大小。当环境温度发生变化时，冷却塔出水温度也会相应变化，指令通过控制回路控制逆变器的导通与截止，实现输出频率变化。由于变频器的调节频率精度一般可达到 1% ~ 2%，频率与转速的关系为线性，因此通过调节频率能够更为精确地调节转速，从而获得变化梯度较小的多条风机性能曲线，分别与总阻力线相交各自的工况点，这些工况点相对变化的梯度也不大，能够更好地达到节能降耗的目的。冷却塔风机变频控制原理如图 6 所示。

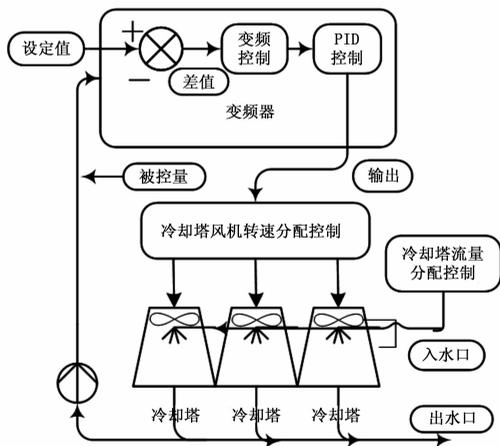


图 6 冷却塔风机变频控制原理

#### 4.4 空调末端节能控制方法

空调末端的实际运行情况对系统运行的效率起到决定性的作用。轨道交通车站空调系统所采用的设备来自不同的供应商，一般系统控制主要重视控制方法以及制冷主机控制器等方面，常忽略考虑冷却系统的末端系统运行情况、冷冻循环水的具体参数值、冷却循环水的具体参数值之间的综合控制。造成冷却系统无法在最高效率下进行工作，导致空调末端存在一定的能源浪费。

空调系统辅助设备和末端的能耗约占 HVAC（空气调节系统）总能耗的 40%，空调末端是整个空调系统能效的最直接体现者，末端节能在中央空调节能中有着非常重要的意义。一般来说空调末端的能耗主要以风机能耗为主，降低末端能耗应注意以下几个方面的问题：正确设定室内温湿度以及新风

量；合理调整冷冻水送回水温差；优化控制系统；选择合适的温度传感器并安装于合适的采集点。

针对上述空调末端中的不足之处，本文利用智能化控制系统，实现对地铁站环境温度的自动监测，将检测结果反馈到控制系统，对空调末端制冷和通风系统进行实时调节控制，控制系统原理如图 7 所示。为了实现对轨道交通站内环境温度的实时监测，需要用到精度较高的温度传感器以及冷水机组进出口水温检测装置，将采集的温度信号传送给中央控制器，再通过 PID 控制器实现对空调风机组进行变频调速闭环控制，从而达到对地铁站温度控制的目的。在保证系统的正常运行前提下在各个支路中添加调节阀门，对水压和水流量进行调节，按照预先的比例进行分配，宜于采用预先流量分配法。室内空调风机组变频控制通过检测对室内风机组变频控制后可达到理想的节电效果，且空调整冷效果优异。

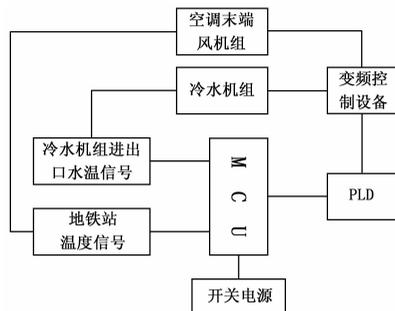


图 7 空调末端控制原理图

在本系统支持下，可以方便地将空调系统的风机盘管、新风机、空气处理器等末端设备纳入统一管理，统一设置运行参数，控制末端设备节能运行，而末端设备运行状态与现场参数也可以反馈给空调系统管理平台，进而实现对整个中央空调系统的节能优化管理与运行控制。

### 5 节能率测试评估

应用本文设计的新型节能控制系统，参照传统轨道交通车站空调水系统，对某地铁站进行为期 30 天的节能率测试。

#### 5.1 测试方法

系统采用能耗比较法进行节能率测试，即在冷负荷基本相同，环境温度湿度达标且基本一致的条件下，分别测量轨道交通车站水系统应用节能系统与传统系统运行时的能耗，通过计算得到节能系统的节能率。本次测量，在系统冷负荷基本相同的条件下，将节能系统与传统系统在某个月交替运行十五天，分别对其实时能耗进行统计。

系统节能率：指在环境条件相近、运行工况和运行时间相同的情况下，系统应用节能控制装置所节约的能耗量与传统系统的能耗量之比。即：

$$\eta = \Delta Q / Q_w$$

#### 5.2 测试条件

为使节能测试的数据具有更高的可信度，在交替运行的能耗测试过程中，满足以下条件：

- 1) 运行的制冷设备一致。
- 2) 运行时间一致，且每天测试过程中，覆盖系统正常运行的全部时间。
- 3) 负荷情况基本一致，即室外气候条件和空调的使用情况基本相同。
- 4) 运行工况一致，制冷主机的冷冻水出水温度为额定出

水温度,且主机的输出功率不大于其额定功率。

5) 测量仪表一致,即空调系统变流量与定流量交替运行时测量各设备能耗的电表采用相同仪表。

### 5.3 能耗数据记录与节能率的计算

#### 5.3.1 运行参数记录

在节能测试过程中,每隔一定的时间段对空调系统的运行参数进行记录和整理,以便对系统运行状况进行分析。

#### 5.3.2 测试时间相同情况下的能耗记录及计算

在进行节能测试时,如果系统定流量和变流量运行时间完全相同,可对各自的能耗数据进行记录,进行数据汇总和计算,得出使用节能控制装置后中央空调系统的节能率。节能控制系统与传统系统的能耗对比图如图 8 所示。

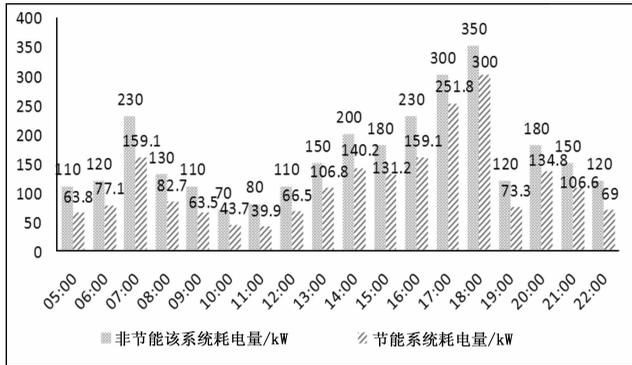


图 8 节能控制系统与传统系统的能耗对比图

以上统计表数据是参照某地铁站夏季 30 天的平均值,据上述节能率公式,经计算可得出采用节能系统所得节能率约为 29.6%。

## 6 结论

该节能系统采用先进变频技术,控制制冷主机工作状态,调节系统内冷冻水及循环水的循环水量以及冷却塔和空调末端

的风机风量,收到很好的节能效果。节能系统的应用提高空调水系统的成本,但是应用后将会节约大量能耗,根据节能测试评估过程中能耗表的记录可知,该地铁站采用节能控制系统节能率达到 29.6%,每天平均节省电能约为 870 kW,大约两年就能收回成本。实际运行情况表明,该节能控制系统节能效果好、运行稳定可靠、操作方便、设备寿命有所提高,可以在国内轨道交通空调水系统中应用。如果能推广到全国各个城市的轨道交通中,将会节省大量的电能,取得很好的经济效益回报,而且能提升对能源的有效利用率。

### 参考文献:

- [1] 赵荣义. 空气调节 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2009.
- [2] 王寒栋. 空调冷冻水泵变频控制方式分析与比较 [J]. 制冷空调与电力机械, 2004, 25 (1): 16-21.
- [3] 李方园. 冷却塔风机的变频控制与节能降耗 [J]. 风机技术, 2007 (2): 57-59.
- [4] 晋欢欢, 张振国. 冷水机组的优化控制策略 [J]. 制冷与空调, 2011, 25 (z1): 168-171.
- [5] 邱东, 章明华. 中央空调节能控制策略 [J]. 制冷空调与电力机械, 2007, 28 (5): 73-75.
- [6] 徐晓宁, 丁云飞. 中央空调末端控制设备智能控制与管理节能 [J]. 建筑科学, 2008, 24 (8): 43-46.
- [7] 周洪煜, 陈孜虎. 中央空调系统节能运行改造的控制策略与方案 [J]. 计算机测量与控制, 2009, 17 (10): 1977-1980.
- [8] 师洪洪. 水泵的变频控制与节能特性研究 [D]. 北京: 北京建筑工程学院, 2010.
- [9] 胡连江. 冷却塔风机的调速节能探讨 [J]. 天津: 天津大学, 2009, 25 (6): 102-104.
- [10] 地铁节能为何难推进: 地铁用能节能标准体系缺失 [EB/OL]. 瞭望东方周刊, <http://finance.eastmoney.com/>. 2015-08-10.
- [11] SPX Cooling Technologies, INC. Variable flow over cooling towers. Thermal Science [Z].

(上接第 28 页)

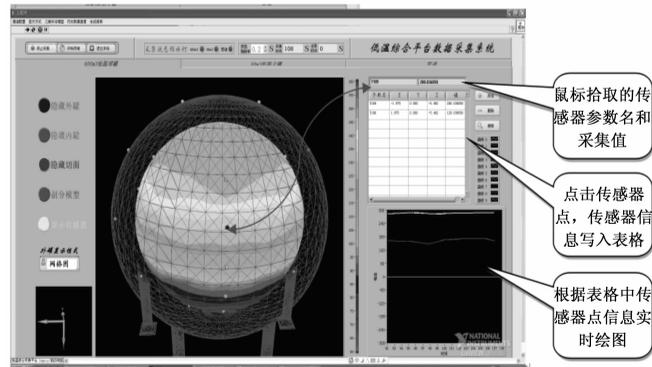


图 12 程序主界面

## 4 结论

本文主要对低温球罐的三维云图显示方式和操作功能进行研究,介绍了 LabVIEW 中的三维云图显示原理、编程方法,模型中的传感器拾取方式,以及针对三维模型的操作及处理,数据采集精度高,界面操作简便,显示直观,通过传感器映射,将三维模型集成到 LabVIEW 环境中,可以更好显示与被测设备相符的采集数据。分配真实数据采集通道或仿真传感

器,将模型显示在 LabVIEW 前面板上。在图像中区分众多通道往往是很困难的,因此该新特性很适合在高通道数的应用中显示数据。在模型中区分独立传感器输出的新特性,也使传感器故障检查变得更轻松,从而提高了测试效率。

### 参考文献:

- [1] 向科峰. 基于 LabVIEW 的数据采集系统设计与实现 [J]. 机械管理开发, 2011, 122 (4): 191-192.
- [2] 耿克达, 郭建国, 高智刚, 等. LabVIEW 下的变质心机构 3D 虚拟显示系统设计 [J]. 计算机测量与控制, 2011, 19 (9): 2245-2251.
- [3] 李彬. 基于环境建模的传感数据收集与插值算法研究 [D]. 长沙: 湖南大学, 2011.
- [4] 许热, 张斌. 用一种改进的几何体插值算法实现颜色空间转换 [J]. 单片机与嵌入式系统应用 [J]. 单片机与嵌入式系统应用, 2012 (8): 8-11.
- [5] 郑彭, 何铁宁, 刘建波. 温度试验可视化系统的关键技术研究 [J]. 中国图像图形学报, 2007, 12 (1): 148-152.
- [6] 陈雄, 谭研, 余晓光. 结晶器三维温度场可视化系统实现 [J]. 仪器仪表学报, 2009, 30 (2): 385-390.
- [7] 唐仪. 基于体绘制的有限元分析结果可视化研究 [D]. 广州: 广东工业大学, 2014.