

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2013.02.023

基于RT-LAB的高速动车组牵引传动系统实时仿真*

顾春杰, 韦 巍*, 何 衍
(浙江大学 电气工程学院, 浙江 杭州 310027)

摘要: 针对如何搭建高速动车组牵引传动系统硬件在环仿真模型及实现该系统相关信号量的实时在线监测问题, 通过利用RT-LAB实时仿真器和以GE公司CT11系统为开发平台的控制器搭建了高速动车组牵引传动系统的硬件在环仿真模型。采用了算法简单、控制效果更精确的直接转矩控制(DTC)方式作为系统逆变器的控制算法来驱动异步电机; 为了使整个系统更接近实际的高速动车组, 引入了列车通信网络(MVB)完成与硬件在环仿真模型的通信问题; 在列车通信网络环境下, 系统的运行速度曲线比较平滑, 且始终保持在限速范围之下, 满足了实际动车组对运行速度的要求。研究表明, 该系统能够根据列车的运行特性曲线实时地获得不同工况下的运行结果, 从而对实现牵引传动系统的实时在线监测具有重要的研究意义。

关键词: 动车组; RT-LAB; 实时监测; 牵引传动; 直接转矩控制; 硬件在环仿真

中图分类号: U265; TM922 文献标志码: A

文章编号: 1001-4551(2013)02-0218-05

Real-time simulation of high-speed EMU traction drive system based on RT-LAB

GU Chun-jie, WEI Wei, HE Yan

(College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: Aiming at how to build the simulation model of hardware in the loop in a high-speed EMU traction drive system and realize the real-time online monitoring of the semaphore in the system, the RT-LAB real-time simulation and the controller based on the development platform of GE CT11 system were used to build the simulation model of hardware in the loop in the high-speed EMU traction drive system. Because the algorithm is simple and the result is accurate, direct torque control(DTC) method was used in the inverter to drive the induction motors. In order to make the whole system closer to the actual high-speed EMU, the train communication network(MVB) was introduced into the system to realize the communication with the simulation model of hardware in the loop. In the environment of train communication network, the operating speed curve of the system is relatively smooth under the limited speed range and it can meet the requirements of the actual EMU running speed. The results indicate that this system can get the results of different operation conditions in real time according to the EMU operating characteristics curve and it has an important significance to the real-time online monitoring of the traction motor.

Key words: EMU; RT-LAB; real-time monitor; traction drive; direct torque control(DTC); simulation of hardware in the loop

0 引 言

为进一步缓解铁路运力紧张、提升运输服务品质, 在全国范围内实现高速铁路网是必然的趋势^[1]。牵引传动系统作为高速列车的重要组成部分, 是列车

的动力来源。由于实验条件限制以及相关硬件设备的成本问题, 研究者不可能在实验室完成真实的牵引传动系统的平台搭建, 如今用的比较多的是使用Matlab等仿真软件完成模型的搭建和相关数据的纯软件仿真。虽然通过仿真能得到被测量所需的理想结果,

收稿日期: 2012-09-18

基金项目: 国家高技术研究发展计划("863"计划)资助项目(2011AA11A101)

作者简介: 顾春杰(1987-), 男, 江苏南通人, 主要从事轨道交通关键技术方面的研究。E-mail: gurenmen@126.com

通信联系人: 韦 巍, 男, 教授, 博士生导师。E-mail: wwei@zju.edu.cn

但不能实现信号的实时在线监测和故障发生时控制器对故障情况的及时响应。

本研究利用RT-LAB实时仿真软件搭建高速列车牵引传动系统的仿真模型,并与GE公司CT11系统为开发平台的控制器以及列车通信网络(MVB)组成硬件在环的实时仿真系统。

1 CRH3型高速动车组牵引传动系统

CRH3型高速动车组采用的是4动4拖8辆编组,其中相邻的两辆动车为一个基本的动力单元,每个动力单元都有相应的牵引传动系统,其基本结构框图如图1所示。牵引传动系统主要由牵引变压器、牵引变流器和牵引电机三部分组成。25 kV/50 Hz单相交流电从接触网经受电弓、真空断路器,经牵引变压器降压后,输出单相1 550 V/50 Hz的交流电。牵引变流器输入侧为两个并联的四象限脉冲整流器(4QC),输出电压经过中间直流环节得到平滑的直流电压。直流电压经PWM逆变器转换成牵引传动系统所需要的变频三相交流电,从而驱动异步牵引电机^[2-3]。

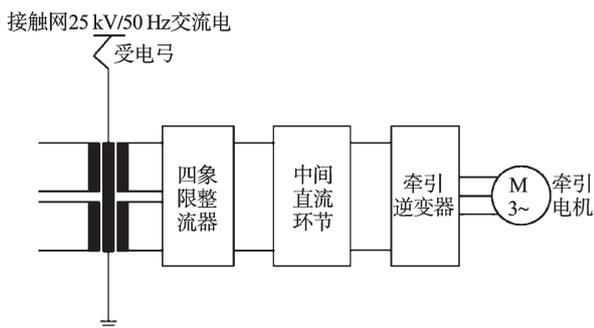


图1 CRH3动车组一个动力单元的基本结构

1.1 四象限脉冲整流器

目前整流器电流控制技术主要有间接电流控制和直接电流控制,由于瞬态直接电流控制策略能使系统直流侧电压稳定快、动态响应好、对系统参数变化能做出快速调整,该技术是高速动车组脉冲整流器普遍采用的控制技术^[4-5]。

瞬态直接电流控制框图如图2所示。为了使中间直流环节电压恒定,本研究将实时检测到的中间直流电压 U_d 与给定电压 U_d^* 进行比较,经PI调节器输出增大或减小的 I_N^* ,以达到反馈控制 U_d 的目的。同时实时检测电网电压和电流值,经运算电路后输出参考电压信号 U_s^* 与三角载波进行SPWM调制,生成控制信号驱动开关器件。

1.2 牵引传动系统直接转矩控制

传统的动车组牵引传动系统牵引电机的控制方式主要采用矢量控制技术,而继矢量控制技术之后发展起来的直接转矩控制技术(DTC)^[6],它是在定子坐标系下观测电机定子磁链和电磁转矩,将磁链、转矩

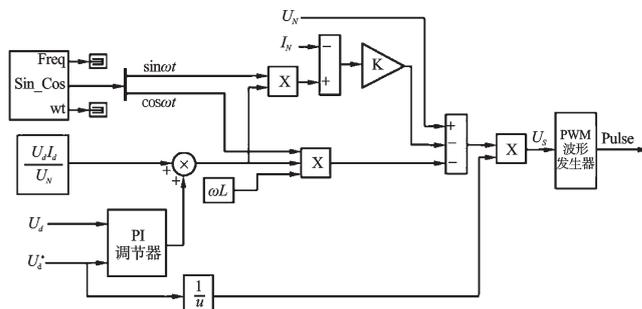


图2 瞬态直接电流控制框图

观测值与参考值经滞环比较器比较后得到磁链、转矩的控制信号,再由开关表选择合适的电压矢量控制定子磁链的走向,从而达到控制转矩的目的。定子磁链的计算只与定子电阻有关,而定子电阻的测量又相对比较容易,使得磁链的估算更容易、更精确,受电机参数变化的影响较小。所以本研究提出的动车组牵引传动系统采用直接转矩控制方式驱动牵引电机^[7-8]。

牵引电机的直接转矩控制系统将电机给定转速和实际转速相比较,经速度PI调节器输出给定的转矩;同时该系统根据实测电机三相电流和电压值,利用磁链和转矩估计模型分别计算电机的定子磁链和电磁转矩大小、计算电机转子的位置。然后分别计算电机给定磁链和转矩与实际值的误差,经滞环控制器后根据它们的状态选择逆变器的开关矢量,从而得到所需的SPWM波形,实现对牵引电机的直接转矩控制^[9]。

2 CRH3型动车组牵引控制单元

2.1 牵引与制动特性

动车组在牵引和制动过程中可分为两个区域:准恒转矩输出区和恒功率输出区^[10]。CRH3型动车组在不同的速度时刻根据牵引与制动特性曲线输出所需的牵引力,使动车组顺利完成牵引或制动过程。

牵引工况时,牵引力和速度的数学关系为:

$$\begin{cases} F = -0.285 v + 300, v \leq 119 \text{ km/h} \\ F = 31\,500/v, v > 119 \text{ km/h} \end{cases} \quad (1)$$

制动工况时,制动力和速度的数学关系为:

$$\begin{cases} F = 59.8 v, v \leq 5 \text{ km/h} \\ F = -0.285 v + 300, 5 \text{ km/h} < v \leq 106.7 \text{ km/h} \\ F = 28\,800/v, v > 106.7 \text{ km/h} \end{cases} \quad (2)$$

式中: F —一个编组(16台电机)轮轨牵引力/制动力, kN; v —动车组速度, km/h。

2.2 牵引电机转矩、转速以及负载转矩计算公式

牵引电机转矩指令可以根据当前列车速度和牵引特性曲线计算得到:

$$T_e = \frac{F \times d}{2 \times N \times a \times \eta} \quad (3)$$

牵引电机转速与动车组运行速度换算关系为:

$$n = \frac{120 \times v \times a}{3.6 \times \pi \times d \times n_p} \quad (4)$$

高速动车组基本阻力公式为^[11]:

$$f_z = (7.75 + 0.062367v + 0.00113v^2) \times m \quad (5)$$

由转矩计算公式可得每台牵引电机的负载转矩为:

$$T_L = \frac{f_z \times d}{2 \times N \times a \times \eta} \quad (6)$$

式中: F —一个编组(16台电机)轮轨牵引力/制动力, kN; v —动车组速度, km/h; T_e —一台牵引电机输出转矩, N·m; d —车轮直径, m; N —动车组牵引电机总数; a —传动比; η —传动效率; n —电机转速, r/min; n_p —电机极对数; f_z —动车组基本阻力, N; m —动车组总质量, t; T_L —一台牵引电机负载转矩, N·m。

2.3 牵引控制策略

列车牵引控制策略的结构框图如图3所示。

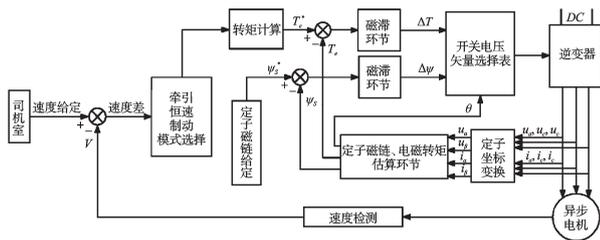


图3 列车牵引控制策略的结构框图

CRH3型动车组由司机室的牵引手柄、速度手柄和制动手柄来控制列车运行。该系统根据目标速度与列车实际速度之间的关系来实现牵引、恒速运行和制动等不同运行工况下的模式切换。

在列车启动阶段,司机给定列车运行的目标速度,由牵引特性曲线得到相应的牵引力,牵引力经列车牵引控制单元计算相应的转矩,从而作为牵引电机直接转矩控制模型的输入来控制牵引变流器,使列车处于牵引加速的运行状态。当给定速度与列车实际速度的偏差大于5 km/h时,列车处于牵引模式。

当给定速度与列车实际速度的偏差在-5 km/h~5 km/h之间时,列车进入恒速运行模式,使列车实际运行速度保持恒定。

列车运行在不同区域时有不同的限速要求,列车速度超过限速值或者给定速度与列车实际速度的偏差小于-5 km/h时,列车进入制动模式,最后在限速值或者给定的速度下稳定运行。

3 列车牵引传动系统的半实物仿真

3.1 RT-LAB实时仿真系统简介

RT-LAB实时仿真器是由加拿大Opal-RT公司开发的一套基于模型设计和测试应用的平台,它主要应

用于实时仿真系统、快速控制原型和硬件在环测试系统。它与其他仿真平台的不同之处在于:它可以把复杂的模型划分为多个子系统,再把这些子系统分配到多个目标机的节点上,从而构成了一个可伸缩的分布式实时仿真系统。

一台装有 Matlab/Simulink 和 RT-LAB 软件的主机(Host)可以完成系统建模、在线参数调节和信号监测等工作。而运行 QNX 或者 Redhat 等实时操作系统的目标机(Target)完成的是对模型的实时计算。目标机是 Opal-RT 公司为硬件在环仿真应用设计的实时仿真器,其内部配置了多核处理器,可以进行复杂系统的模型计算。主机和目标机之间通过 TCP/IP 或者 IEEE 1394 进行实时在线交互^[12]。

3.2 硬件在环系统仿真模型

RT-LAB 实时仿真器包含有 op5340、op5330、op5353、op5354 模拟量和数字量输入输出模块,GE CT11 系统装有 TEWS 公司 tpmc 系列输入输出模块。由 GE CT11 系统为开发平台的控制器接收司机室经列车通信网络(MVB)传来的控制信号,通过 tpmc551dac 模块将数字量转化为模拟量,并将其传输给 RT-LAB 实时仿真器的 op5340AI 模块,下载有软件仿真模型的 RT-LAB 实时仿真器接收到控制信号后会实现不同模式下运行工况的仿真。同时本研究将牵引传动系统仿真模型中有用的信号量通过 I/O 通道输出,再由 GE 公司 CT11 系统经 MVB 通信网络传输到司机室,以便对牵引传动系统进行实时在线监测,也可以对发生的故障做出及时的判断。在列车通信网络环境下,牵引传动系统的硬件在环仿真系统结构框图如图4所示。

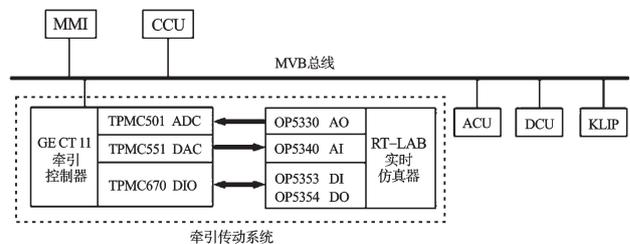


图4 牵引传动系统硬件在环结构框图

在整个列车牵引传动系统硬件在环仿真系统中,被下载到 RT-LAB 实时仿真器中的软件仿真模型如图5所示,它被分作4个模块,由仿真器的4个核作并行运算处理。其中,sm_TC是由电网电压、牵引变压器、牵引变流器以及牵引电机组成的子系统;ss_monitor子系统用于控制信号的给定与反馈信号的监测,该子系统中包含信号输入/输出模块,通过 GE CT11 系统可以实现仿真器输入/输出模块与司机室之间的信号传输;ss_TCU子系统完成四象限整流器和逆变器直接传

矩控制算法的仿真;ss_console子系统将部分信号量由示波器进行观测。

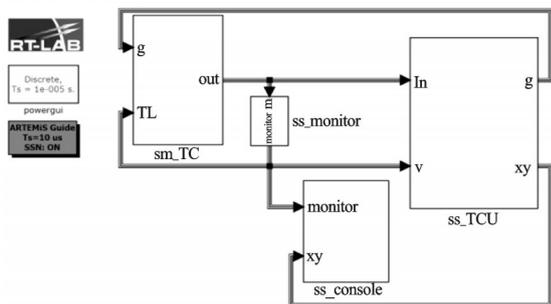


图5 牵引传动系统RT-LAB软件仿真框图

3.3 仿真结果及分析

本研究由司机室给定的牵引、制动及速度信号来模拟不同的运行工况。CRH3动车组牵引电机具体参数如表1所示。

表1 CRH3动车组牵引电机参数

参数	数值	参数	数值
额定功率	562 kW	额定电压	2 700 V
定子电阻	0.15 ohms	定子漏感	1.42 mH
转子电阻	0.16 ohms	转子漏感	0.60 mH
互感	25.4 mH	额定转速	4 100 r/min
最大转速	5 900 r/min	转动惯量 <i>J</i>	5 kg·m ²
极对数 <i>p</i>	2	中间直流电压	3 000 V

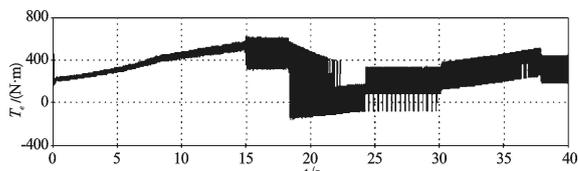
式(3~6)是牵引电机转矩、转速以及负载转矩计算公式。针对CRH3型动车组,其用到的车辆基本参数如下^[13-15]:

$$d = 0.875 \text{ m}, N = 16, a = 2.788, \eta = 0.97, n_p = 2, m = 536 \text{ t}.$$

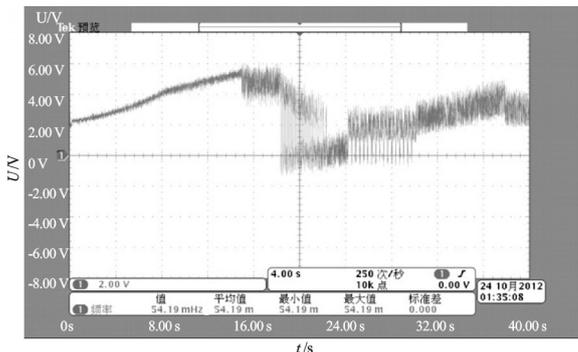
本研究根据搭建的仿真模型设置相关参数,由司机室牵引手柄、速度手柄和制动手柄控制列车的运行。列车初始给定速度为240 km/h,列车处于牵引状态;当列车实际速度到达240 km/h时,列车处于恒速运行状态;25 s时,列车给定速度降为180 km/h。当然列车运行期间还要考虑运行环境问题,即限速问题。

由于RT-LAB仿真软件中模拟量输出模块所对应的硬件的输出电压范围是-16 V~-16 V,本研究在实测输出结果的时候将仿真模型中的相关信号量缩小一百倍处理,以满足硬件对量程的要求。本研究使用RT-LAB仿真软件ScopeView工具查看的仿真波形和使用Tektronix公司的MSO3032示波器实测所得RT-LAB仿真器模拟量输出波形,如图6、图7所示。

在实测运行速度输出值满足硬件量程的前提下,比较图7(a)和7(b),发现图7(a)中实线所对应的列车运行速度仿真曲线与图7(b)中实测运行速度曲线的变化趋势保持一致。通过这两张图可以看出,列车运行

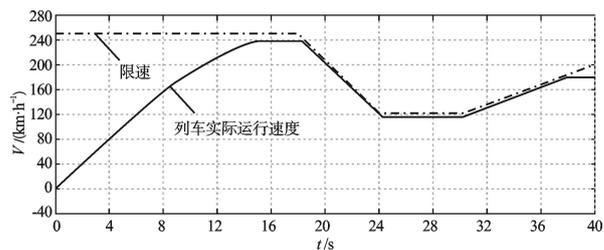


(a) 列车输出转矩仿真曲线

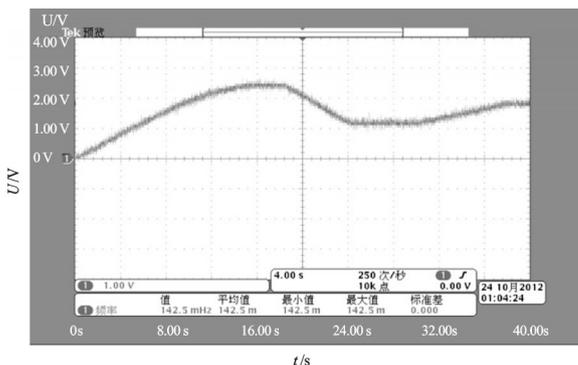


(b) 列车输出转矩实测曲线

图6 列车输出转矩曲线



(a) 运行速度仿真曲线



(b) 运行速度实测曲线

图7 列车运行速度曲线

速度比较平稳。牵引状态时列车运行速度从0 km/h开始加速,当速度达到一开始给定的目标速度240 km/h后,列车进入恒速运行模式;18.5 s时运行速度比限速大,列车处于制动模式,此时实际速度略低于限速值;24 s后,列车保持在略低于限速值120 km/h的恒速运行模式;25 s时,给定速度由240 km/h降为180 km/h,此时列车仍以略低于限速的速度运行;38 s时运行速度达到180 km/h,列车再次进入恒速运行模式。

对仿真结果及实测波形进行分析,图6中牵引电机输出转矩的仿真结果与实测波形保持一致,并随速度的变化而平稳变化;运行速度的仿真结果与实测波形的变化趋势保持一致,在图7(a)中虚线所示的列车

运行限速条件下列车的运行速度曲线比较光滑,并始终保持在规定的限速范围以下。通过对波形的比较分析说明,牵引电机直接转矩控制对定子磁链和转矩具有较好的控制效果。

4 结束语

通过对 CRH3 型高速动车组牵引传动系统的介绍,本研究在 Matlab/Simulink 环境下,基于 RT-LAB 软件搭建了整个系统的仿真模型,并利用 RT-LAB 实时仿真器和 GE CT11 系统以及列车通信网络(MVB)组成了硬件在环的仿真平台。该模型牵引电机采用直接转矩控制技术,依据列车的牵引控制策略,可以完成牵引、恒速运行、制动等不同运行工况的模拟。

仿真及实测得到的列车运行速度曲线平稳,控制效果比较好。而通过对比仿真结果与实测波形变化趋势的一致性,进一步说明了搭建的牵引传动系统硬件在环仿真模型的正确性。本研究在列车通信网络的背景下搭建的硬件在环仿真模型,以整个列车系统为对象来研究列车的牵引控制策略,为之后进一步的实时在线监测和故障诊断研究提供了基础。

参考文献(References):

- [1] 张曙光. 京沪高速铁路系统优化研究[M]. 北京:中国铁道出版社,2009.
- [2] 姜东杰. CRH3 型动车组牵引传动系统[J]. 铁道机车车辆,2008,28(B12):95-99.
- [3] 宋雷鸣. 动车组传动与控制[M]. 北京:中国铁道出版社,2007.
- [4] 邹仁. 四象限变流器瞬态电流控制的仿真研究[J]. 机车电传动,2003(6):17-20.
- [5] 冯晓云. 交流传动及其控制系统[M]. 北京:高等教育出版社,2009.
- [6] 刘益标,陈钧. 基于 DSP 的电梯同步电机的 DTC 控制系统[J]. 机电工程技术,2011,40(11):28-31.
- [7] 冯东. 高速列车同步牵引系统仿真研究[D]. 杭州:浙江大学电气工程学院,2012.
- [8] 李夙. 异步电机直接转矩控制[M]. 北京:机械工业出版社,1994.
- [9] 余丹萍,周盛,江全元. CRH3 型动车组牵引传动系统的直接转矩控制研究[J]. 机电工程,2010,27(10):62-67.
- [10] 李官军,冯晓云,王利军,等. 高速动车组恒速控制策略的研究与仿真[J]. 机车电传动,2007(5):12-14.
- [11] 路小娟. 动车组控制技术[M]. 成都:西南交通大学出版社,2011.
- [12] 常晓飞,符文星,闫杰. RT-LAB 在半实物仿真系统中的应用研究[J]. 测控技术,2008,27(10):75-78.
- [13] 朱帼蓉,陈慧民. CRH3 高速动车组牵引特性分析[J]. 上海铁道科技,2010(4):97-99.
- [14] 上海科梁科技发展公司. 实时分布式仿真与测试[Z]. 上海科梁科技发展有限公司,2004.
- [15] OPAL-RT Inc.. RT-LAB Version 10. 4 User Guide [Z]. OPAL-RT Inc.,2007.

[编辑:李辉]

(上接第 205 页)

者可以通过低温热源补偿和改变压缩机的制冷量的方法,来实现冰箱冷藏室冷冻室的匹配控制。根据热负荷来改变压缩机制冷量,可以实现能量的最佳匹配,实现温度准确控制和节能的目的。

参考文献(References):

- [1] 卢智利. 直冷式多路循环冰箱特性研究[D]. 上海:上海交通大学机械与动力工程学院,2006:3-8.
- [2] CORTELLA G, MANZAN M, COMINI G. CFD simulation of refrigerated display cabinets[J]. **International Journal of Refrigeration**, 2001, 24(3):250-260.
- [3] 谢堃. 环境温湿度对陈列柜制冷系统运行特性影响的实验[J]. 上海水产大学学报,2007,16(5):4-8.
- [4] 邵延年. 谈谈直冷式双门双温冰箱结构设计的合理性[J]. 家电科技,1986(6):4-7.
- [5] 傅烈虎. 变频制冷压缩机的实验研究[J]. 制冷与空调,2008,8(3):44-46.
- [6] SHAO Shuan-guan, SHI Wen-xing, LI Xian-ting, et al. Performance representation of variable-speed compressor for inverter air conditioners based on experimental data[J]. **International Journal of Refrigeration**, 2004 (27) : 805-815.
- [7] 叶文浩. 双门双温直冷式冰箱不同环境温度下设计合理性浅谈[J]. 家电科技,1987(5):3-6
- [8] 石毅登. 采用变频技术的制冷装置的优势分析[J]. 制冷与空调,2004,4(5):59-62.
- [9] 李成武. 变频压缩机对冰箱节能的影响[J]. 家电科技,2010(9):78-80.
- [10] 丁国良. 全年供冷的风冷式冷水机组问题分析与解决[J]. 建筑热能通风空调,2004,23(2):7-12.
- [11] 吴晓杰. 变频冰箱系统动态特性及控制策略研究[D]. 杭州:浙江工业大学机械学院,2011:13-23.

[编辑:李辉]