

大连快轨3号线列车网络控制系统

刘 洋¹, 李常贤², 于延霞³, 葛研军¹

(1. 大连交通大学 机械工程学院, 辽宁 大连 116028;
2. 大连交通大学 动车运用与维护学院, 辽宁 大连 116028;
3. 大连机车车辆有限公司 城轨技术开发部, 辽宁 大连 116022)



作者简介: 刘 洋(1982-), 男, 博士研究生, 从事轨道交通列车网络控制系统研究。

摘 要: 介绍了大连快轨3号线城轨列车网络控制系统(TCMS)网络拓扑及系统组成、冗余方案设计、子部件功能设计, 以及系统测试和装车试验。试验和运用结果表明: 该系统软/硬件性能稳定、可靠, 符合预期设计要求。

关键词: 大连快轨; 城轨列车; 网络控制系统; 集成开发

中图分类号: U239.5; TP393 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-128X(2015)06-0067-05

doi: 10.13890/j.issn.1000-128x.2015.06.100

Train Network Control and Monitoring System for Dalian Rapid Rail Line 3

LIU Yang¹, LI Changxian², YU Yanxia³, GE Yanjun¹

(1. College of Mechanical Engineering, Dalian Jiaotong University, Dalian, Liaoning 116028, China; 2. College of Bullet Train Application and Maintenance Engineering, Dalian Jiaotong University, Dalian, Liaoning 116028, China; 3. Technical Development Department of Urban Rail Train, CNR Dalian Locomotive & Rolling Stock Co., Ltd., Dalian, Liaoning 116022, China)

Abstract: The TCMS of Dalian rapid rail line 3 was introduced, including network topology, system composition, redundant design proposal, function design of sub-components, and function test and type test. The test result shows that TCMS software and hardware is stable and reliable, which meets the requirement of anticipatory design.

Keywords: Dalian rapid rail; urban rail train; control and monitoring system; integrated development

0 引言

城轨列车网络控制系统(TCMS)被誉为列车的“大脑”和“中枢神经”, 是列车的核心控制系统之一^[1], 其通常由中央控制单元CCU、远程输入输出模块RIOM、人机接口HMI等子部件组成, 采用分布式的总线控制方式, 将整车各个子控制系统或模块集成为一个完整的控制系统, 从而实现对列车的运行控制、故障诊断、状态监视和管理^[2-3], 是列车安全运行的重要保障^[4]。本文主要介绍大连快轨3号线TCMS总体设计、功能开发、系统装车试验等, 为城轨列车网络控制系统集成应用提供经验。

1 TCMS网络拓扑

大连快轨3号线采用2动2拖4辆编组, 整列车

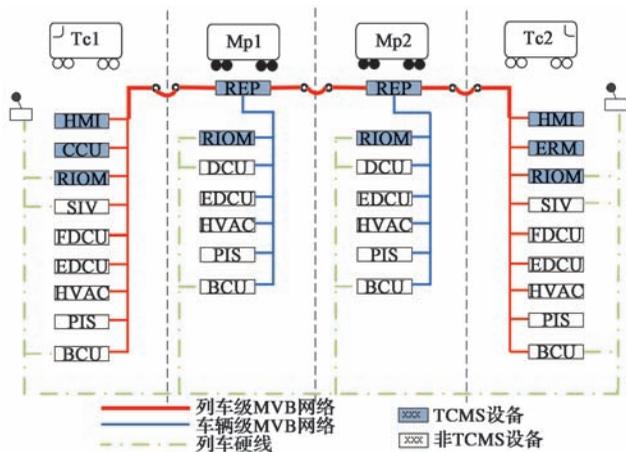
采用符合IEC 61375标准的列车通信网络。由于列车编组短且不需要重联运行, 从技术经济性角度出发, 本车TCMS采用一级MVB总线架构, 即车辆内部和车辆间均采用MVB总线进行联接。物理介质选择电气中距离EMD^[5], 考虑MVB信号衰减, 可能对整车通信性能造成影响, 在每节Mp车中安装有一个MVB中继器。同时, 为保证系统可靠性, 对于一些关键设备采用硬线连接+网络连接方式^[6]。

2 TCMS组成

大连快轨3号线TCMS由中央控制单元CCU、远程输入输出模块RIOM、人机接口HMI、事件记录仪ERM和MVB中继器REP共5部分组成。整车网络拓扑如图1所示。

1) 中央控制单元CCU

1台CCU安装在Tc1车电气柜中, 为带诊断功能和控制功能的控制装置, 负责管理总线、处理接收的数据、向各子控制系统发出指令, 并完成诊断功能^[7]。



CCU—列车中央控制单元；ERM—事件记录仪；HMI—人机接口；DCU—牵引控制单元；SIV—辅助电源系统；EDCU—门控单元；RIOM—远程输入输出模块；PIS—乘客信息系统；HVAC—采暖通风与空调系统；FDCU—火灾探测控制单元；BCU—制动控制单元；REP—中继器

图 1 整车网络拓扑图

CCU 由 2 个处理器单元、1 个冗余的电源模块和 1 个冗余控制单元组成，安装于 6U、36TE 机箱中。其中，处理器单元采用主频 400 MHz 的 MPC5200 处理器，具有 256 MB RAM、32 MB FLASH 和 1 GB CF（可用于存储诊断信息），支持 Linux 多任务实时操作系统，2 个处理器单元互为硬件冗余；电源模块供电电压为 DC 110 V，电压波动范围符合 EN 50155；冗余控制单元负责处理器单元故障状态下实时冗余切换。

2) 事件记录仪 ERM

ERM 安装于 Tc2 车电气柜中，主要用于对列车运行过程中产生的重要数据信息进行记录。ERM 由 1 个处理器单元和 1 个电源模块组成，安装于 6U 机箱中。其中，处理器单元采用主频 400 MHz 的 MPC5200 处理器，具有 256 MB RAM、32 MB FLASH 和 2 GB CF（用于存储记录数据），支持 Linux 多任务实时操作系统；电源模块供电电压为 DC 110 V，电压波动范围符合 EN 50155 要求。ERM 配备便携式测试单元 PTU 可对记录数据进行下载，相应的 PTU 软件可将记录的数据以图表或统计曲线的方式显示。

3) 人机接口 HMI

HMI 安装在每节 Tc 车的司机操纵台上，为司机及维修人员提供监视及操作的人机接口，实时显示车辆参数、系统运行状态，并实时提示车辆故障信息。另外，HMI 还可以进行时间、列车车次、轮径等参数的设置。HMI 采用 307 mm（12.1 寸）触摸彩色显示屏，分辨率为 1 024 × 768，处理器为主频 400 MHz 的 ARM S3C2440A，支持 WinCE 操作系统，具有 64 MB RAM，128 MB NAND FLASH（用于存储历史故障）；供电电压为 DC 110 V，电压波动范围符合 EN 50155。

4) 远程输入输出模块 RIOM

RIOM 分布于各节车辆中，其由插接在同一背板上

的一系列模块组成，每个背板最多可插接 7 个 I/O 模块，用户可灵活配置，设计时预留部分余量，以便后续功能扩展，其结构如图 2 所示。其中，给 MVB 通信模块供电的电源模块具有宽电压范围，输入电压为 DC 16.8~143 V；MVB 通信模块负责 I/O 信号与 MVB 信号之间转换，为 MVB 1 类设备。所有 I/O 模块采用独立供电方式，供电电压为 DC 16.8~143 V；DI 具有 16 路 DC 信号采集通道，额定输入随着供电电压的不同可为 DC 16.8~143 V；DO 模块设计有 8 路继电器节点输出，每一单路输出可以提供 1 A 的驱动能力；AI 采集 0~50 mA 的电流信号或 0~10 V 的电压信号。

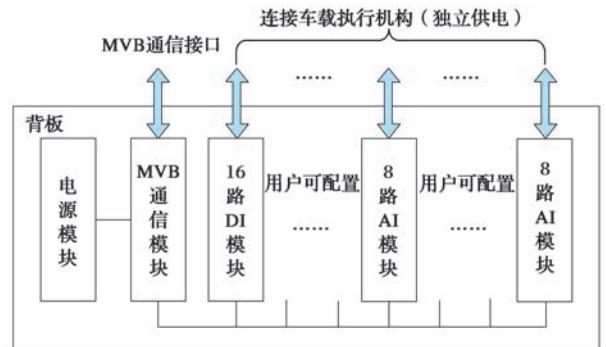


图 2 RIOM 结构图

5) MVB 中继器 REP

在每节 Mp 车中均安装有 1 个中继器 REP，可连接 2 个 MVB 总线段，用来实现信号的再生和放大传输，以保证长距离条件下的 MVB 通信质量，符合 EN 50155、EN 50121、EN 61373，适用于恶劣工况。

3 冗余设计

TCMS 采用设备冗余、线路冗余、关键信号冗余、备份模式等多种冗余设计技术，以保证系统的可靠性、可用性和安全性。

1) 中央控制单元冗余

系统提供了 CCU 故障情况下快速冗余切换功能。在正常工作情况下，只有一个处理器单元处于激活状态，而另一个处理器单元处于热备状态。2 个处理器单元之间通过背板以太网接口实时地进行数据同步，其冗余结构如图 3 所示。冗余控制单元监控处于激活状态的处理器单元，当检测到发生故障时，执行冗余切换动作，冗余切换时间小于 150 ms。

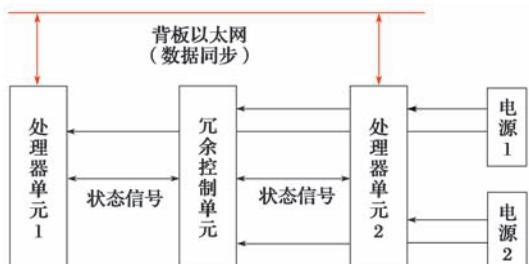


图 3 CCU 冗余结构示意图

2) 线路冗余

MVB 总线采用符合 IEC 61375 标准要求的 MVB

电缆,即具有A、B两路冗余通道,一个MVB通道故障不影响通信^[8]。控制网络上若单一设备发生故障,也不会影响其他设备正常工作。另外,对于与牵引、制动、方向等相关的重要信息,采用MVB总线和硬线冗余的策略。

3) 关键信号冗余

列车控制的关键I/O信号,如牵引/制动指令信号、运行方向信号、牵引/制动级位等,均由安装在Tc车2个相互冗余的I/O模块同时进行采集,2个互为冗余的I/O模块的电源和信号都是独立的。

4) 备用模式

备用模式是指当TCMS出现重大故障时,司机需要手动切除网络控制,将列车改为硬线控制。当下列1个或多个条件满足时,司机应采用备用模式:

- ①冗余的2个CCU处理器单元均故障;
- ②激活端司机室内的2个冗余I/O模块故障;
- ③激活端司机室的司控器模拟信号超出范围;
- ④列车级MVB通信故障或2个中继器REP均故障。

4 TCMS 功能设计

控制系统的软件设计采用图形化编程软件开发,编程方式符合IEC 61131国际标准。软件采用模块化结构设计,方便软件的开发、验证及维护。

4.1 CCU 控制功能设计

TCMS的主要控制和诊断功能均通过CCU控制软件实现,如方向控制、牵引/制动指令控制、牵引/制动力设定控制、母线高速断路器BHB控制、空压机单/双日管理、空调顺序启动控制、速度计算、乘车率计算、里程计算、轮径设定、系统时间同步等。由于篇幅有限,本文着重介绍以下几个主要控制功能。

1) 母线高速断路器BHB 闭合/断开控制

母线高速断路器与列车牵引密切相关,精确地控制其闭合时长、闭合次数和异常状态下的保护是保证列车正常运行的关键。其具体控制如下:

CCU检测到弓升到到位信号,且DCU没有接地故障后,先输出BHB继电器闭合信号,建立BHB接触器闭合条件。间隔0.5s后输出BHB接触器闭合信号。CCU采集到BHB接触器辅助触点闭合反馈信息后,再延时0.5s,断开BHB接触器,保持BHB继电器持续输出。此时,BHB接触器保持闭合状态。如果CCU在输出BHB接触器闭合信号一段时间(2s)内未检测到BHB接触器闭合反馈信号,则CCU输出指令断开BHB继电器和BHB接触器。之后,CCU连续重复2次上述输出动作(每次间隔60s),若仍无闭合反馈,则CCU禁止输出BHB接触器闭合指令,直至CCU断电复位。

2) 空压机单/双日管理

为了避免空压机频繁启/停,造成使用寿命缩短,

快轨3号线列车对空压机进行单/双日管理。将列车的2个空压机分为主/辅空压机。在列车初次上电或主风缸漏泄严重的情况下,为确保空气制动施加有效和行车安全,当CCU检测到主风缸压力小于700kPa时,主/辅空压机同时启动,进行快速打风;在列车处于正常运行时,当主风缸压力大于700kPa且小于750kPa,单日主空压机打风,双日辅空压机打风。2种情况下,均在主风缸压力大于900kPa时,空压机停止打风。

3) 空调顺序启动

为了避免多个大功率设备同时启动对辅助电源系统的冲击,4节车空调机组压缩机的启动顺序由CCU控制。空调的启动顺序分SIV正常工作和故障2种情况。

SIV正常工作时,CCU依次向各车发送“压缩机允许启动指令”信号,且持续25s,在此段时间内,该车空调的4个压缩机依次进行启动。25s后“压缩机允许启动指令”为0,未启动的压缩机不再允许启动,需等待下一个启动允许周期。间隔10s后,CCU向下一节车发送“压缩机允许启动指令”,依此类推,实现整列车空调机组压缩机顺序启动控制。正常工况下的启动时序如图4所示。

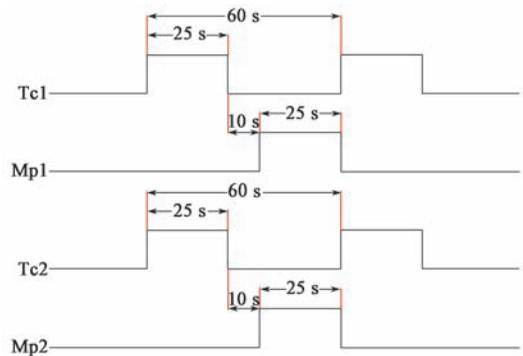


图4 压缩机启动时序(SIV正常工作)

当1个SIV故障时,CCU允许启动时序由SIV故障下的车辆开始发出。图5为SIV1故障时,空调压缩机启动时序。依此类推,可知SIV2故障时的启动时序。

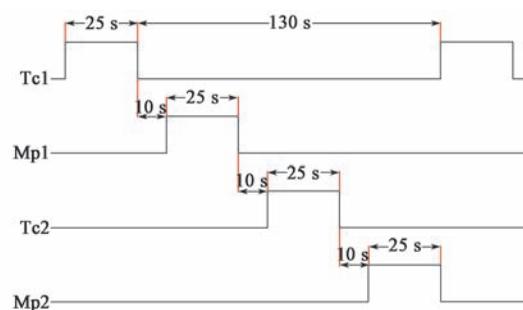


图5 压缩机启动时序(SIV1故障)

4.2 显示屏监控界面设计

大连快轨3号线TCMS人机界面采用精简的图形和文本布局,旨在便于使用人员快速适应操作环境、高效便捷地进入各个显示界面、方便用户设定^[9]。HMI采用5级界面的方式进行界面组态,如图6所示。显示屏上电启动后默认进入“网络界面”。限于篇幅,

本文仅给出了“运行界面”的监控效果，如图 7 所示。

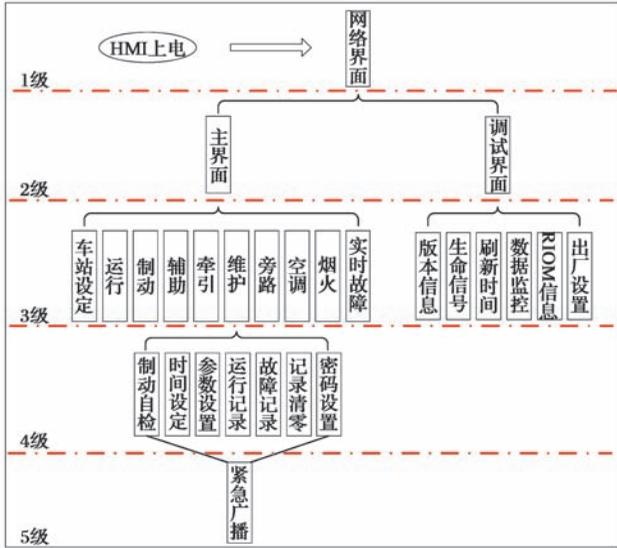


图 6 HMI 界面结构示意图



图 7 运行界面

4.3 事件记录

列车运行相关数据的记录功能由 ERM 完成，包括故障信息、运行数据、司机操作、参数设定等记录。

故障记录：记录容量大于 20 000 条/车，采用先进先出的方式，记录满后新的记录覆盖最早的记录。其不仅记录故障发生时间、故障排除时间、故障代码、故障等级，而且记录故障发生时 64 个环境数据^[10]，以反映故障发生前后列车的运行状态，如方向、司控器级位、电机电流、车速等，为故障的分析提供帮助。

运行数据记录：按固定周期（最小 20 ms，可配置）记录列车运行数据和司机操作，每个周期生成一条新的记录。记录容量大于 100 000 条，记录方式采用先进先出的方式，记录满后新的记录覆盖最早的记录，运行数据记录不少于 48 h。

参数和累计数据记录：此功能用于记录显示屏参数设定和运行累计数据，此记录只有 1 条。参数记录在执行参数设定时进行更新，如轮径、系统时间等。累计数据按 1 min（可选）更新，如空压机时间、当日

运行时间、当日运行里程、累计运行时间、检修里程、总里程等。

5 测试与试验

为了达到预期的设计目标，大连快轨 3 号线 TCMS 在集成开发过程中，根据相关要求做了充分的测试和试验，包括系统 MVB 设备一致性测试、通信接口测试、系统功能测试和装车试验。

5.1 MVB 一致性测试

测试的主要目的是验证 TCMS 各子设备是否遵循 IEC 61375-2 标准，是否满足 MVB-EMD 通信设备要求^[11]，主要包括 EMD 终端阻抗测试、插入损耗测量和传输过程中信号波形的测量。

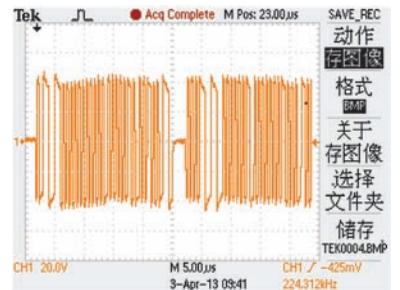
EMD 终端阻抗测试：被测设备断电，用数字万用表对被测设备 MVB 接口的针脚 6、7 和针脚 8、9 分别进行纯电阻测量，测得阻抗值为 $120(1 \pm 10\%) \Omega$ ，符合标准要求。

插入损耗测量：被测设备的一个 MVB 连接器通过 1 根 20 m 长的 MVB 电缆连接至端接电阻，另一个 MVB 连接器通过 1 根 20 m 长的 MVB 电缆接至正弦波发生器。将信号发生器产生的正弦波频率分别调整到 0.72 MHz 和 3 MHz，在接入被测设备和将被测设备上电 2 种情况下，计算得到插入损耗值均小于 0.15 dB，符合标准要求。

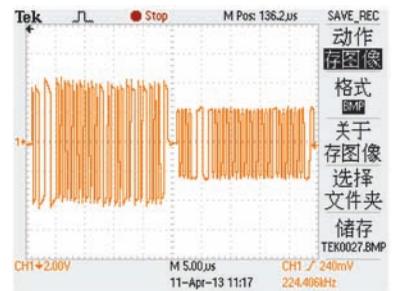
信号波形测量：主要测试被测设备数据传输过程中的信号波形^[12]。从图 8 (a) 可以看出 CCU/ERM/RIOM 的 MVB 帧的稳态幅值为 4.25 V 左右，图 8 (b) 表明 HMI 的 MVB 帧的稳态幅值为 2.4 V 左右；各被测设备输出信号的过冲（即最大幅值与稳态幅值之比）均小于 10%，且 2 个连续脉冲的稳态幅值差在 ± 100 mV 以内，符合标准要求。

5.2 通信接口测试

为了确保 CCU、HMI、ERM 与各子系统控制器之间的正常数据通信，在系统功能地面测试之前进行了通信接口测试，按照事先制定的通信接口规范，与各子系统控制器之间对所有变量逐个进行接收、发送测



(a) CCU/ERM/RIOM 信号波形



(b) HMI 信号波形

图 8 被测设备的信号波形

试。同时, 还对 MVB 总线负载率进行了合理性验证, 系统 MVB 宏周期为 1 024 ms, 端口最小特征周期为 16 ms, 基本周期为 1 ms, 系统计算出 MVB 总线负载率为 52.125%, 如图 9 所示, 负载率在 IEC 61375 标准规定范围内, 符合城轨列车通信应用要求。

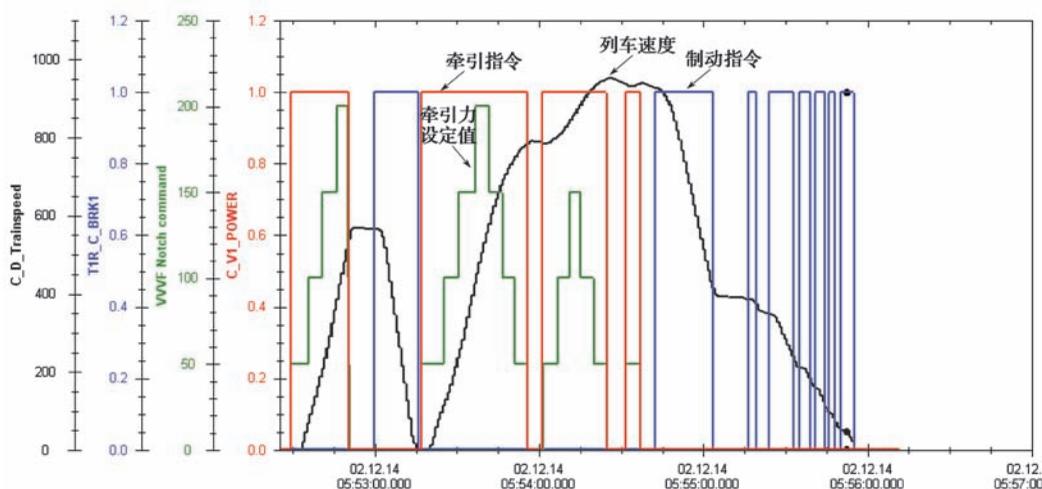


图10 运行数据曲线

设备选型、软件开发到试验, 均严格按照行业标准执行。在设备选型上, 选用成熟、稳定的产品, 所选硬件设备均符合 EN 50155 或等价标准, 且已通过国内外多个项目运营考验。在系统软件方面, 软件功能完善, 可靠性、稳定性均达到列车运行要求; 模块化的设计方法便于后期维护与升级。在试验方面, 各个试验流程均按照相关标准要求进行。目前, 大连快轨 3 号线 TCMS 已完成了厂内试验和车辆段线路试验, 并装车运用。

参考文献:

- [1] 邓小娟, 刘军良. 深圳地铁 5 号线国产化车辆网络控制和诊断系统 [J]. 电力机车与城轨车辆, 2011, 34(4): 15-16.
- [2] 赵磊. 北京地铁 7 号线列车网络控制系统 [J]. 城市轨道交通研究, 2014(5): 109-110.
- [3] 刘琦, 赵磊, 徐惠林, 等. 国产化列车控制及监控系统的监控设计改进 [J]. 城市轨道交通研究, 2013(10): 59-83.
- [4] 赵强, 常振臣, 李砾工, 等. 国产化列车网络控制系统安全完整性等级评估与认证 [J]. 机车电传动, 2011(6): 1-5.
- [5] IEC 61375-1:1999, Part 1: Train Communication Network [S].
- [6] 黄文灿. 广州地铁 3 号线列车网络控制系统及其故障诊断分析 [J]. 机车电传动, 2012(6): 54-56.
- [7] 肖家博, 黎福海, 杨卫峰, 等. 基于 TCN 的车辆控制单元 (VCU) 的研究与设计 [J]. 机车电传动, 2010(1): 30-32.
- [8] 徐红星, 张晓. 上海 13 号线列车网络控制系统设计与研究 [J]. 铁道机车车辆, 2012, 32(3): 84-86.
- [9] 龚军. MVB 接口彩色液晶显示诊断单元的应用软件设计 [J]. 机车电传动, 2001(3): 10-12.
- [10] 李小平. TM3 型机车微机网络控制系统 [J]. 机车电传动, 2011(2): 4.
- [11] 王克举, 朱琴跃, 李玲. 基于模型视图控制器框架的多功能车辆总线一致性测试的实现 [J]. 城市轨道交通研究, 2007(4): 109-110.
- [12] 王峰超, 申萍, 严翔, 等. MVB 协议一致性测试研究与基本互联测试的实现 [J]. 机车电传动, 2013(4): 21-24.

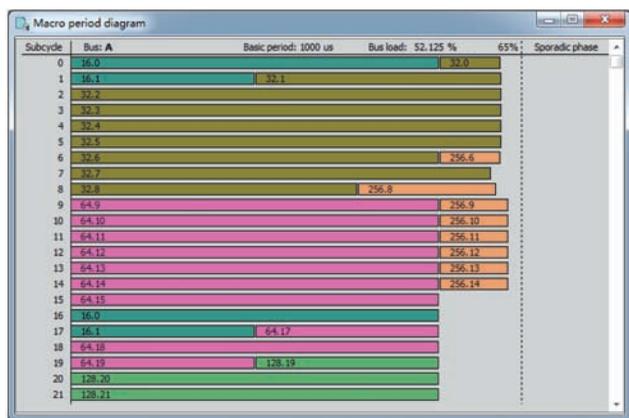


图9 MVB 总线负载率

5.3 装车试验

为了验证大连快轨 3 号线 TCMS 功能的有效性, 制定了详细的型式试验大纲, 并严格按照大纲要求逐条进行详细验证和记录。库内静态试验主要进行了整车网络通信测试、开关/继电器/接触器动作测试、门打开/关闭测试、HVAC 顺序启动测试、BCU 自检、空压机管理测试、HMI 站点和轮径设定等。

线路动态试验主要验证了牵引限速控制、电空联合制动控制、PIS 报站、乘车率计算、运行时间计算和记录、累计里程计算和记录、能耗计算和记录等功能。图 10 为加/减速度试验过程中, 利用 PTU 分析软件生成的牵引指令、牵引力设定值、制动指令和列车速度记录曲线。图中, C_VI_POWER 为 CCU 发给 DCU1 的牵引指令, VVVF Notch command 为 CCU 发给 DCU 的牵引力设定值, TRI_C_BRK1 为 Tc1 车 RIOM 采集的制动指令, C.D_Trainspeed 为 CCU 发给 HMI 的列车速度计算值, 该值需除以 10 换算为列车实际速度, 单位为 km/h。

6 结语

大连快轨 3 号线列车网络控制系统从方案设计、