

# 基于 LabVIEW 软件的城市轨道交通列车牵引制动试验平台的搭建及应用\*

董世昌<sup>1,2\*\*</sup> 宋彩云<sup>3,4</sup> 王俭朴<sup>1</sup> 屈敏<sup>1</sup> 毛元<sup>5</sup>

(1. 南京工程学院汽车与轨道交通学院, 211167, 南京; 2. 兰州交通大学机电技术研究所, 730070, 兰州;

3. 正德职业技术学院汽车与机电工程系, 211106, 南京; 4. 曼谷北部大学中文国际学院, 10220, 曼谷;

5. 国网南京市江北新区供电公司, 211899, 南京//第一作者, 博士研究生)

**摘要** 目的: 为了满足城市轨道交通方向各个专业教学与科研的要求, 搭建了由 2 台电机对拖为基础的城市轨道交通列车牵引制动试验平台, 以此来模拟真实的城市轨道交通列车的牵引、惰行和制动等工况。方法: 阐述了城市轨道交通列车牵引制动试验平台的构成及基本原理, 介绍了公共直流母线系统的技术选型、结构设计及硬件选择等方面的要求。以列车再生制动试验为例, 介绍了 LabVIEW 软件在该试验平台上的具体应用。结果及结论: 试验中可实时图形化显示直流母线电压和电流、牵引电机的转速和转矩的变化情况, 实现对电机的基本参数采集、记录和图形化展示等功能。该试验平台采用了更小尺寸电机模拟实际牵引电机, 节省了实验室空间, 但能够取得预期理想的应用效果。通过熟悉和使用该试验平台, 可以使城市轨道交通相关专业的学生加深对列车牵引传动和控制技术等理论知识理解程度。

**关键词** 城市轨道交通; 列车; LabVIEW 软件; 牵引制动; 试验平台

**中图分类号** TP391.9; U270; U231

**DOI:** 10.16037/j.1007-869x.2023.11.029

## Construction and Application of LabVIEW Software-based Test Platform for Urban Rail Transit Train Traction and Braking

DONG Shichang, SONG Caiyun, WANG Jianpu, QU Min, MAO Yuan

**Abstract** Objective: In order to meet the requirements of various professional teaching and research directions in urban rail transit, a test platform for traction and braking of urban rail transit trains based on 2 motor drive systems is constructed. This platform simulates the real working conditions of traction, coasting, and braking of urban rail transit trains. Method: The composition and basic principles of the test platform are e-

laborated, including the requirements for technical selection, structural design, and hardware selection of the common DC bus system. Taking the train regenerative braking test as an example, the application of LabVIEW software on this test platform is introduced. Result & Conclusion: Real-time graphical display of changes in DC bus voltage and current, traction motor speed and torque can be achieved during the test, and basic parameters of the motor can be collected, recorded and graphically displayed. The test platform uses smaller-sized motors to simulate actual traction motors, which saves laboratory space while achieving intended ideal results. By getting familiar with and using this test platform, students in related urban rail transit professions can deepen their understanding of theoretical knowledge such as train traction, transmission and control technology.

**Key words** urban rail transit; train; LabVIEW software; traction braking; test platform

**First-author's address** School of Automotive & Rail Transit, Nanjing Institute of Technology, 211167, Nanjing, China

目前, 几乎所有运行的城市轨道交通列车(以下简称“城轨列车”)均采用电力牵引<sup>[1]</sup>。以交流电机驱动的电力机车、高速列车及城轨列车在不同环境下成功运行, 表明交流电机牵引控制技术已日益成熟。城轨列车体型大, 其使用的牵引电机额定电压高, 不适宜在大学的实验室内搭建试验平台, 所以, 采用电机对拖来模拟列车牵引制动的过程, 是验证城轨列车牵引制动效果新的技术思路。

关于电机对拖试验平台的研究论文很多。有的论文根据现有公司开发的工具, 建立了可视化的

\* 国家自然科学基金项目(62063013, 72061021); 教育部产学研合作协同育人项目(202101263018); 南京工程学院校级科研基金项目(QKJ202202)

\*\* 通信作者

电机对拖试验平台,该平台可以实现开环和闭环 2 种不同的控制方式,也可通过改变串联到负载电机上的负载电阻值来调节负载的大小<sup>[2]</sup>。有的论文通过图形化编程 LabVIEW 软件的可视化输出结果,分析永磁同步电机的振动和波形<sup>[3]</sup>。

本文搭建的城轨列车牵引制动试验平台采用三相交流电机对拖和公共直流母线技术,结合 LabVIEW 软件,模拟城轨列车的运行状态,并展示从牵引到制动全过程牵引电机和直流母线各个参数的变化情况。

### 1 试验平台的构成及基本原理

本文搭建的城轨列车牵引制动试验平台由公共直流母线系统和测试控制(以下简称“测控”)系统 2 个部分组成,其结构如图 1 所示。其中:公共直流母线系统由若干个子系统组成,主要包括公共直流母线驱动型变频器、制动电阻单元、牵引电机、负载电机及 2 个对拖电机的变频控制器<sup>[4]</sup>;测控系统的硬件主要采用扭矩仪,通过阿尔泰数据采集卡(型号为 USB2831)完成数据采集并将数据传输给计算机,最后通过 LabVIEW 软件完成数据采集的可视化。测控系统不仅能够完成电机对拖系统的远程启动,对该系统进行参数设定,还能通过变频器通信机和数据采集卡实现系统参数在计算机上的实时显示。在此基础上,测控系统利用对牵引电机和负载电机的控制,实现了对列车起动加速到匀速行驶再到电制动等工况的模拟,并绘制相应的参数图形。

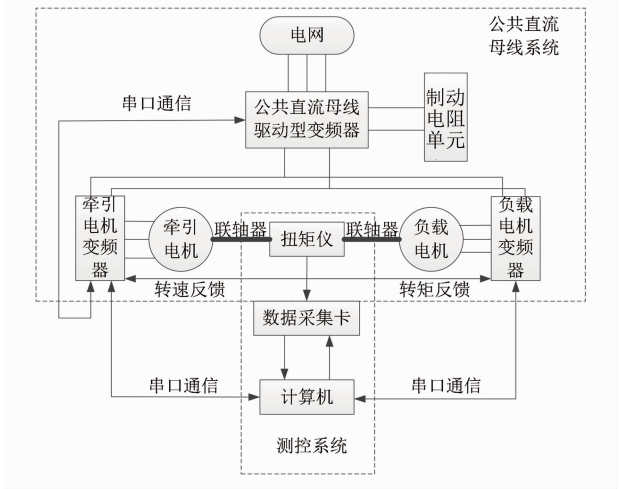


图 1 城轨列车牵引制动试验平台结构示意图

Fig. 1 Structure diagram of traction braking test platform for urban rail trains

## 2 公共直流母线系统设计

### 2.1 公共直流母线系统的技术选型

公共直流母线技术目前大部分应用于多电机交流调速,即使用 1 台单独的整流、回馈装置(如公共直流母线驱动型变频器)为电机系统提供一定功率的直流电压。由于驱动电机的逆变器(变频器)输入端直接与公共直流母线相连,所以直流电经过逆变器(变频器)后即可驱动交流电机工作。若逆变器(变频器)所驱动的交流电机工作在电动状态,则能量通过逆变器(变频器)传输至直流母线上,此时连接在直流母线上的回馈装置能够在一定条件下将能量回收至电网。

目前我国除了北京地铁 1 号线列车采用直流电机牵引外,其他城市轨道交通线路的列车均采用交流电机牵引。这是因为相较于使用直传动技术,交流传动在能量使用效率和能量输出功率上均具有明显优势。此外,公共直流母线系统将所有整流装置集中在 1 个装置内,该方式也使得公共直流母线系统相较于其他传统的交流传动系统具有明显的节能优势。公共直流母线系统中,所有直流母线上挂载的逆变器(变频器)输入电压均相同,且直流母线具有一定的储能功能,所以采用直传动技术的交流调速系统在性能上更为稳定。

公共直流母线系统按能量是否有回馈进行分类,可分为回馈型和无回馈型 2 个类别。其中:回馈型公共直流母线系统的前端单元能够将电能回馈至电网中,适合城轨列车频繁起动与制动的应用场景;无回馈型公共直流母线系统不能将电能反馈回电网,列车电制动时需要先将列车的动能转换为电能。无回馈型公共直流母线系统一般将制动能量通过电阻散热的方式消耗掉,这不仅浪费了能源,还需增加系统设备及列车负载。因此,本文搭建的城轨列车牵引制动试验平台采用回馈型公共直流母线系统。

### 2.2 公共直流母线系统的结构设计

图 2 为城轨列车牵引制动试验平台公共直流母线系统的结构框图。如图 2 所示,公共直流母线系统以 1 台 VACON 公司生产的 NXP0165 系列变频器作为其驱动单元,以 2 台 VACON 公司生产的 NX0125 系列变频器作为辅助。此外,该系统还结合了 2 台 ABB 系列的三相异步电机(分别用作牵引电机和负载电机),以及制动电阻单元、正弦滤波

器、直流母线预充单元、扭矩仪、交流接触器、热继电器及风冷电机等电气元件。

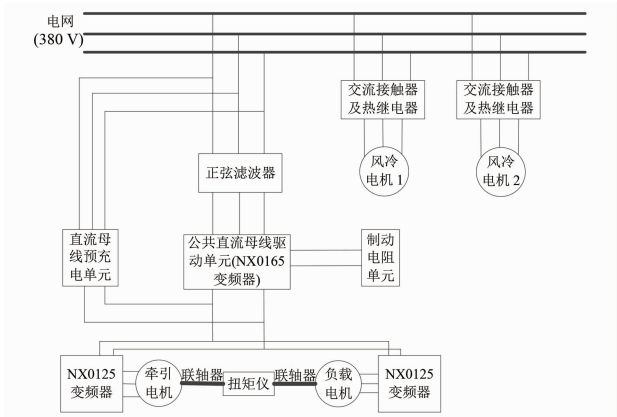


图 2 城轨列车牵引制动试验平台公共直流母线系统结构框图

Fig. 2 Structural block diagram of the common DC bus system of the traction braking test platform for urban rail trains

由图 2 可知:牵引电机、负载电机经由联轴器直接同轴相连,二者均由变频器驱动。牵引电机变频器与负载电机变频器均工作在 PID(比例、积分、微分)应用模式下,牵引电机的控制方法为速度闭环控制,负载电机的控制方法为转矩闭环控制。本文搭建的列车牵引制动试验系统中,牵引电机的调速控制设计选用回馈型公共直流母线形式。

### 2.3 公共直流母线系统的硬件选择

与常规干线铁路不同,城市轨道交通线路最主要的特点是站间距较短(0.8~3.0 km/站)、列车旅行速度较高(35~40 km/h),这就使得城轨列车需要频繁地起动和制动,进而要求城轨列车的牵引电机及其控制器均需具备优良的性能。基于南京地铁 1 号线在役列车上的牵引电机,结合现有实验室的条件,本文搭建的城轨列车牵引制动试验平台选用的电机型号为 ABB 系列变频调速三相异步电机,其主要技术参数如表 1 所示。

表 1 所选 ABB 系列变频调速三相异步电机的技术参数  
Tab. 1 Technical parameters of the selected ABB series variable frequency speed regulating three-phase asynchronous motor

参数名称	参数值	参数名称	参数值
额定电压/V	380	额定电流/A	8.32
额定功率/kW	4	额定频率/Hz	50
额定转速/(r/min)	2 860	额定转矩/(Nm)	23.7

由于本文搭建的城轨列车牵引制动试验平台

采用了公共直流母线技术,所以试验系统中需要选用 2 种类型的变频器(共计 3 台),即:将 1 台 VACON 公司公共直流母线型驱动产品 NXP0165 系列变频器作为主变频器,将 2 台 VACON 公司生产的 NX0125 系列变频器作为副变频器,用以控制牵引电机和负载电机。

图 3 为本文搭建的城轨列车牵引制动试验平台现场图,图中包含了对拖交流电机的控制器,以及与电机相连的各种传感器。交流电机的各项参数经由对应的传感器测出,然后将数据传送至数据采集卡,最后将数据传至上位机。数据经过 LabVIEW 软件进行滤波、分析及拟合后,其结果可在上位机的面板上显示出来。

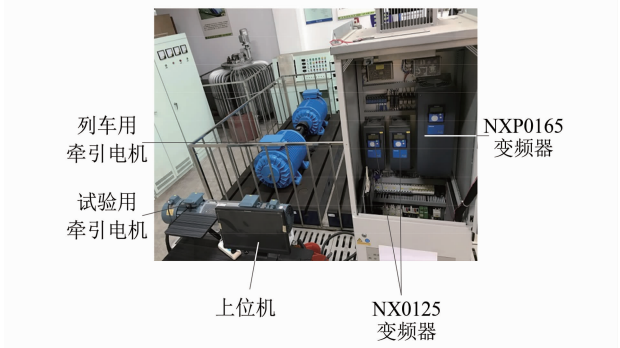


图 3 城轨列车牵引制动试验平台现场图  
Fig. 3 Picture of traction braking test platform for urban rail trains

本文以实际测得的南京地铁 1 号线列车运行数据为依据,所测数据主要包括不同站间的列车运行时间、牵引加速度、不同站间列车匀速行驶时间及速度、制动减速度等,设计出贴合列车运行实际状态的试验仿真程序。通过选择接入负载电机的电阻值来实现载客量大小的设定,列车满载时的电阻值最小,列车空载时的电阻值最大。由图 3 还可以明显看出,本试验采用牵引电机的体积要小于实际使用的列车牵引电机的体积。

## 3 试验平台测试结果分析

### 3.1 参数设定

本试验平台主要利用 USB2831 板卡来实现 LabVIEW 软件对电机及变频器的控制和监测。本文以再生制动试验为例,介绍 LabVIEW 软件的应用。图 4 是城市轨道交通列车再生制动试验程序的主界面截图,界面的左边是控制和显示按钮,右边是图像绘制及显示窗口。

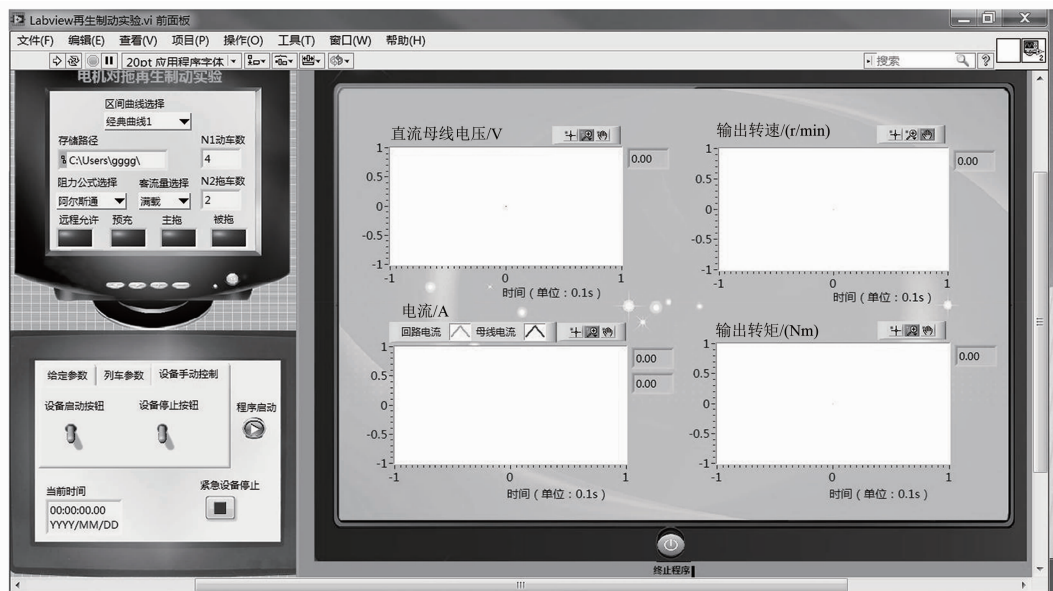


图4 城市轨道交通列车再生制动试验程序主界面截图

Fig. 4 Screenshot of the main interface of urban rail transit train regenerative braking test program

图4界面左上角的区间曲线选择选项中设了3条经典曲线以供选择,这3条曲线均为南京地铁某2个车站之间列车的实际运行曲线。不同公司生产的城市轨道交通列车有不同的阻力计算公式,本试验平台共有7个不同的阻力计算公式以供选择。客运量可以选择空载、轻载、满载和过载4种情况。动车数和拖车数有2种模式可供选择,分别为中国南车股份有限公司生产车辆的“4动2拖”模式和中国北车股份有限公司生产车辆的“3动3拖”模式。左下角的3个控制选项卡中:给定参数选项用以读取南京地铁某2个车站间列车运行的转速和转矩参数;列车参数选项用以显示列车单节车厢的动车质量和拖车质量;设备手动控制按钮用以在程序运行过程中启动/关闭程序。

图4界面右侧有4个图像输出窗口,其中:直流母线电压窗口为传感器实际测得的直流母线电压波形;电流(含回路电流和母线电流)窗口分别为传感器实际测得的制动电阻回路电流波形和母线电流波形;输出转速窗口为电机的实际转速波形;输出转矩窗口为电机的实际转矩波形。再以输出转矩窗口为例进一步说明图像输出的具体含义,其纵坐标是转矩(单位是Nm),横坐标是时间(单位是0.1s),右上角显示框内数字显示实时转矩值。

### 3.2 输出测试结果

设定好参数后,运行试验设备,可得到牵引电机和直流母线的实测参数结果,如图5所示。

由图5可知:

1)  $t_1-t_5$  为列车完整的牵引、匀速行驶、制动过程耗时,此过程中直流母线电压为恒定值。

2)  $t_1-t_3$  区段为列车的牵引起动过程。其中: $t_1-t_2$  区段为转矩迅速上升至恒定值的过程(又称为恒转矩加速过程),该时段转速匀加速增大,直流母线电流快速增大到最大值; $t_2-t_3$  区段为转矩以圆弧形式下降的过程(又称为恒功率加速过程),该时段电机转速仍在增大,但加速度开始逐渐减小,直流母线电流变化不大。

3)  $t_3-t_4$  区段为转矩以近似为0的正值运行的匀速过程。该时段电机转速以近似恒定值运行,直流母线电流保持稍大于0的值。

4)  $t_4-t_5$  区段为转矩为负的恒定值的反向制动过程。该时段电机转速匀减速小,直流母线电流绝对值逐渐减小。

### 3.3 平台应用效果分析

由上文可知:通过该试验平台可模拟城轨列车在空载和不同负载下的牵引力和制动力的变化情况,也可模拟列车不同运行区间下的运行状态。该平台基于LabVIEW软件对直流母线电流、制动电阻电流、直流母线电压、交流电机转矩及转速数据进行采集,将采集得到的数据进行拟合,生成转速特性曲线及转矩特性曲线,并以图形化形式展现在上位机上。展示的图形贴近城轨列车实际的牵引制动工况,能够清晰地展示列车加速、匀速和减速的过程。



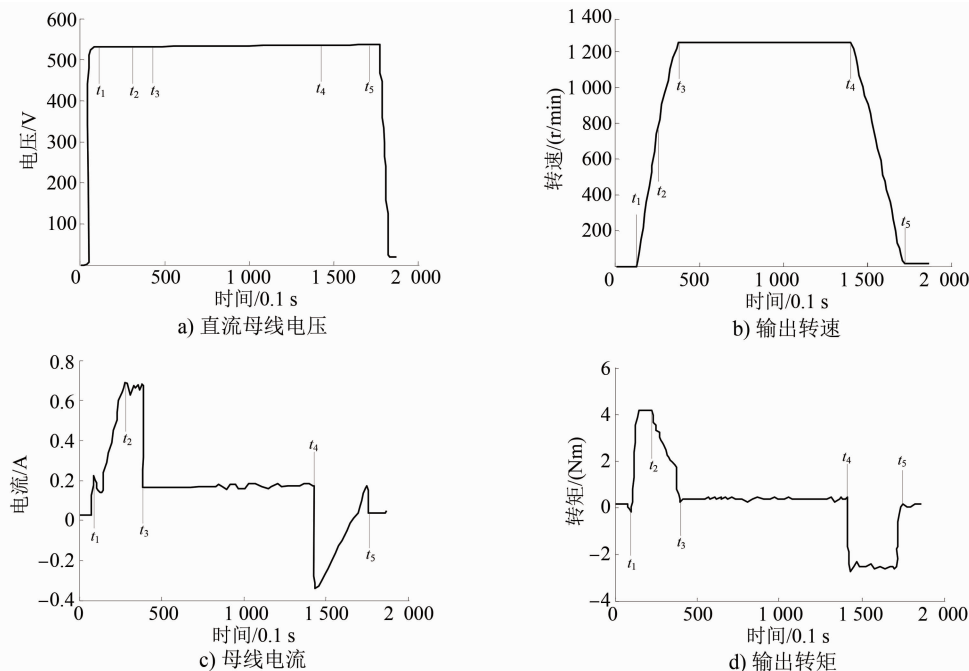


图 5 牵引电机和直流母线的实测参数结果

Fig. 5 Results of measured parameters of traction motor and DC bus

## 4 结语

本文基于 LabVIEW 图形化编程软件、交流电机对拖技术和公共直流母线技术,根据列车的实际运行参数,搭建了低成本的城轨列车牵引制动试验平台,建立了试验所需的数据采集系统,实现了对电机基本参数的采集、记录和图形化展示等功能。

通过熟悉和使用该试验平台,可以使城市轨道交通相关专业的学生加深对列车牵引传动和控制技术等理论知识的理解程度。城轨列车牵引制动试验平台没有采用实际列车上使用的电机,该做法可避免采购大型调压设备和各类控制柜,节省了实验室空间,但能够取得预想的应用效果。

## 参考文献

- [1] 方晓春,王婷婷,杨中平,等. 城轨列车永磁同步牵引电机全速域转矩闭环矢量控制研究[J]. 铁道学报, 2020, 42(11): 60.

FANG Xiaochun, WANG Tingting, YANG Zhongping, et al. Full speed range torque closed loop vector control of permanent magnet synchronous traction motor for urban rail train[J]. Journal of the China Railway Society, 2020, 42(11): 60.

- [2] 谢斌,张楠,武仲斌,等. 基于 Vehicle Spy3 的永磁同步电机对拖试验平台[J]. 实验技术与管理, 2019, 36(3): 251.  
XIE Bin, ZHANG Nan, WU Zhongbin, et al. Experimental platform for permanent magnet synchronous motor towing based on Vehicle Spy3[J]. Experimental Technology and Management, 2019, 36(3): 251.
- [3] 杜晨琛,梁永春. 基于 LabVIEW 的永磁直流电动机综合测试平台的研究[J]. 实验室研究与探索, 2017, 36(10): 65.  
DU Chenchen, LIANG Yongchun. Study on test platform of permanent magnet DC motor base on LabVIEW[J]. Research and Exploration in Laboratory, 2017, 36(10): 65.
- [4] SAMANTA S, MISHRA J P, ROY B K. AC load bus frequency control of a DC microgrid based on DC voltage regulation using inertia emulation and economic power management[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2019, 13(22): 5117.

(收稿日期:2021-06-17)

欢迎订阅《城市轨道交通研究》

服务热线 021—56830728