

高速动车组轴箱轴承可靠性试验台动态加载系统设计研究^{*}

杜洪军¹ 梁娜² 郑晓波³ 刘冠男¹ 卢秉正¹

(1. 中车长春轨道客车股份有限公司, 130062, 长春;

2. 国家铁路局安全技术中心安全评价研究所, 100891, 北京; 3. 中国国家铁路集团有限公司, 100844, 北京)

摘要 [目的] 台架试验是研究高速动车组轴箱轴承性能的主要技术手段, 而准确模拟轴箱轴承的实际运行载荷工况是获取真实、可靠的轴箱轴承性能数据的必要前提。合理设计轴箱轴承试验台, 以模拟轴箱轴承高速重载的运转工况; 设计径向加载机构和轴向加载机构控制策略, 以满足加载系统控制精度和响应速度的要求。[方法] 设计了一套高速动车组轴箱轴承可靠性试验台电液伺服动态加载系统。介绍了该系统中轴向加载系统和径向加载系统的结构组成及工作原理, 并提出了一种模糊 PID (比例-积分-微分) 控制算法。搭建轴箱轴承可靠性分析试验台, 进行加载性能测试和轴箱轴承可靠性测试试验, 用以验证动态加载系统的合理性。[结果及结论] 所设计的电液伺服动态加载系统能够满足轴箱轴承可靠性试验的加载要求; 轴向加载响应时间为 0.276 s, 轴向加载稳态误差为 0.339 kN, 径向加载稳态误差为 1.742 kN, 满足 EN 12082:2017 标准要求。

关键词 高速动车组; 轴箱轴承; 可靠性试验台; 动态加载系统

中图分类号 U270.1⁺4

DOI:10.16037/j.1007-869x.2024.08.052

Design and Research of Dynamic Loading System for High-speed EMU Axle Box Bearing Reliability Test Bench

DU Hongjun¹, LIANG Na², ZHENG Xiaobo³, LIU Guannan¹, LU Bingzheng¹

(1. CRRC Changchun Railway Vehicles Co., Ltd., 130062, Changchun, China; 2. Safety Evaluation Research Institute, Safety Technology Center, National Railway Administration of the People's Republic of China, 100891, Beijing, China; 3. China State Railway Group Co., Ltd., 100844, Beijing, China)

Abstract [Objective] Bench test is a primary technical means for studying the performance of high-speed EMU (electric multiple units) axle box bearings. Accurately simulating the practical operational load conditions of axle box bearings is

essential for obtaining authentic and reliable performance data. A test bench for axle box bearings is reasonably designed to simulate the high-speed, heavy-load operational conditions. Control strategies for radial and axial loading mechanisms are developed to meet the requirements for control precision and response speed of the loading system. [Method] A dynamic loading system with electro-hydraulic servo is designed for the high-speed EMU axle box bearing reliability test bench. The structural composition and working principles of the axial and radial loading systems within this setup are introduced and a fuzzy-PID (proportional-integral-derivative) control algorithm is proposed. The axle box bearing reliability analysis test bench is constructed to conduct loading performance tests and axle box bearing reliability testing, thereby validating the rationality of the dynamic loading system. [Result & Conclusion] Test results indicate that the designed electro-hydraulic servo dynamic loading system meets the loading requirements for axle box bearing reliability test. The axial loading response time is 0.276 s, the axial loading steady-state error is 0.339 kN, and the radial loading steady-state error is 1.742 kN, all of which satisfy requirements specified in the EN 12082:2017 standards.

Key words high-speed EMU; axle box bearing; reliability test bench; dynamic loading system

轴箱轴承是高速动车组的关键机械部件之一, 其性能对列车的安全平稳运行至关重要。据统计, 近年来因轴类故障引起的铁路行车事故频发, 其故障根源大多出自轴箱轴承^[1-2]。目前, 台架试验是研究轴箱轴承性能的主要技术手段, 国外主要轴承制造厂商 (NTN、FAG、SKF 等) 都拥有先进的轴箱轴承可靠性试验技术和试验装备^[3-4]。随着我国高铁动车组运行速度的不断提高, 对轴箱轴承的运行

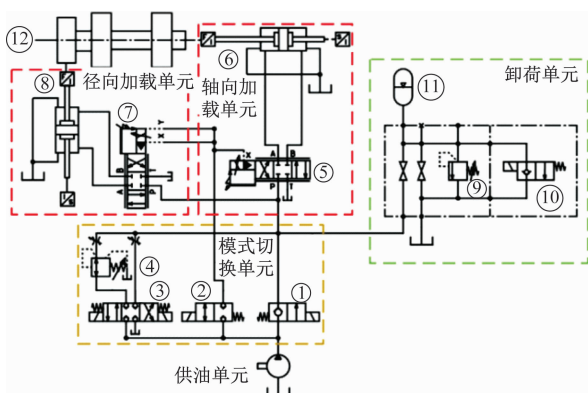
^{*} 中车长春轨道客车股份有限公司科技开发项目 (2022JC0102)

品质提出了更高的要求,需要更加有效、可靠的试验技术来准确验证轴箱轴承的设计性能指标,在保障行车安全的同时,为国产轴箱轴承技术的发展积累可靠的试验数据。

准确模拟轴箱轴承的实际运行载荷工况是开发轴箱轴承可靠性试验台的关键,也是获取真实、可靠的轴箱轴承性能数据的必要前提^[5-6]。因此,本文以轨道交通车辆轴箱轴承可靠性试验台为研究对象,设计了一种电液伺服动态加载系统,提出了一种模糊 PID(比例-积分-微分)控制算法,并通过现场试验验证了所提出的动态加载系统满足 EN 12082:2017《铁路应用轴箱性能测试》标准规定的加载速度和精度要求。

1 动态加载系统原理

电液伺服动态加载系统原理如图 1 所示。



注:①为二位二通电磁阀 S1;②为二位二通电磁阀 S2;③为三位四通阀;④为减压阀;⑤为伺服阀(轴向);⑥为液压缸(轴向);⑦为伺服阀(径向);⑧为液压缸(径向);⑨为溢流阀;⑩为卸荷阀;⑪为蓄能器;⑫为被测轴承。

图 1 动态加载系统原理图

Fig. 1 Diagram of dynamic loading system principle

该系统主要包括模式切换单元、轴向加载单元、径向加载单元和卸荷单元。模式切换单元提供了预充液模式、高压模式和低压模式 3 种不同的工作模式,轴向和径向加载单元由伺服阀驱动作动器模拟轴箱轴承的实际运行载荷工况,卸荷单元负责保护试验台架。动态加载系统具体工作原理如下。

1) 预充液模式下,模式切换单元的电磁阀打开,为轴向伺服阀和径向伺服阀提供控制油,电磁阀关闭,高压油流经三位四通阀的右位和节流阀后流入系统。此模式是试验开始前的准备阶段,目的在于初始化伺服加载单元,并使高压油以较低的流

量逐渐充满管路,检查系统管路状态,排除潜在风险,为正式试验作好准备。

2) 高压模式下,模式切换单元的电磁阀和换向阀打开,三位四通阀关闭,高压油经电磁阀的右位全功率流入系统。此时,轴向和径向加载伺服阀接收控制器指令,调节阀口开度和作动器输出力,对轴箱轴承进行加载。此模式是轴箱轴承可靠性试验的工作阶段,是实现动态加载的主要模式。

3) 低压模式下,模式切换单元的电磁阀打开,电磁阀关闭,三位四通阀工作在左位,高压油经减压、节流后流入系统。此模式下高压油以最小功率输出,允许手动控制轴向及径向伺服阀开度,进而调整台架工装位置,更换试件轴承。

2 模糊 PID 控制算法

为使实际加载力快速稳定达到目标值,采用模糊 PID 算法对电液伺服加载系统进行控制^[7]。根据系统实际工况,模糊 PID 的原理如图 2 所示。其中: F_d 为目标加载力; F_c 为实际加载力; e 为目标加载力与实际加载力之间的偏差; e_c 为偏差的变化率,即 $e_c = de/dt$; ΔK_p 、 ΔK_i 和 ΔK_d 分别为比例、积分和微分系数的修正量; ξ 为控制器输出的伺服阀阀芯位移。

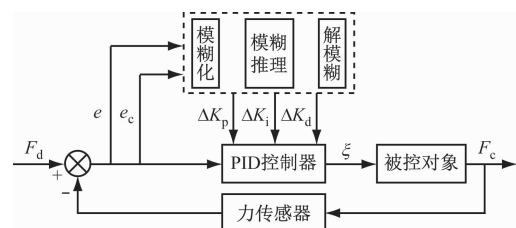


图 2 模糊 PID 原理图

Fig. 2 Diagram of fuzzy-PID principle

根据 EN 12082:2017 标准和实际列车载荷参数,求得试验过程中轴向力和径向力的加载范围分别为 $-25 \sim 25$ kN 和 $0 \sim 125$ kN,加载响应时间为 (0.2 ± 0.1) s,所以轴向和径向加载偏差 e 的基本论域分别设为 $[-25, 25]$ 和 $[0, 125]$,偏差变化率 e_c 的基本论域分别为 $[-250, 250]$ 和 $[416, 1250]$,两者的模糊集论域均为 $[-6, 6]$,由此可将基本论域离散化转换到模糊论域。模拟输出量 ΔK_p 基本论域为 $[-1.2, 1.2]$, ΔK_i 的基本论域为 $[-0.3, 0.3]$ 和 $[-0.06, 0.06]$, ΔK_d 的基本论域为 $[-0.015, 0.015]$ 和 $[-0.001, 0.001]$,三者的模糊集论域均选取 $[-6, 6]$,模糊子集取为 $\{NB$ (负

大), NM(负中), NS(负小), ZO(零), PS(正小), PM(正中), PB(正大)} ,隶属函数选择三角函数,如图 3 所示。 ΔK_p 模糊规则如表 1 所示,此外 ΔK_i 和 ΔK_d 模糊规则与 ΔK_p 相似。通过解模糊可得到 ΔK_p 、 ΔK_i 及 ΔK_d ,具体计算公式为:

$$\Delta K_p = \frac{\sum_{n=1}^7 (T_p \Delta K_{p2})}{\sum_{n=1}^7 T_p} \quad (1)$$

$$\Delta K_i = \frac{\sum_{n=1}^7 (T_i \Delta K_{i2})}{\sum_{n=1}^7 T_i} \quad (2)$$

$$\Delta K_d = \frac{\sum_{n=1}^7 (T_d \Delta K_{d2})}{\sum_{n=1}^7 T_d} \quad (3)$$

式中:

T_p 、 T_i 、 T_d —— ΔK_p 、 ΔK_i 和 ΔK_d 的隶属值;

ΔK_{p2} 、 ΔK_{i2} 、 ΔK_{d2} —— ΔK_p 、 ΔK_i 和 ΔK_d 的模糊量化值;

n ——模糊离散个数。

由此可得 PID 参数值,具体计算公式为:

$$K_p = K_p^* + \Delta K_p \quad (4)$$

$$K_i = K_i^* + \Delta K_i \quad (5)$$

$$K_d = K_d^* + \Delta K_d \quad (6)$$

式中:

K_p 、 K_i 、 K_d ——模糊控制器的比例、积分和微分系数;

K_p^* 、 K_i^* 、 K_d^* ——模糊控制器经验比例、积分和微分系数。

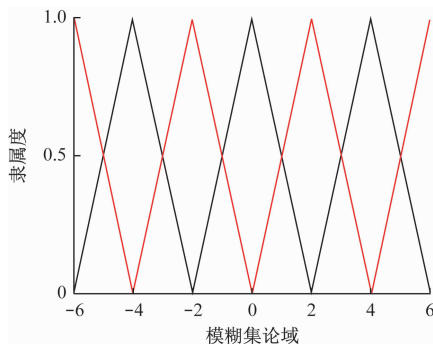


图 3 隶属函数

Fig. 3 Membership function

3 试验验证

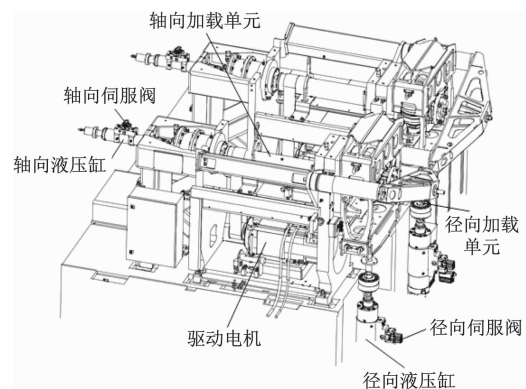
3.1 试验平台的搭建和参数设置

轴箱轴承可靠性分析试验台如图 4 所示。为实

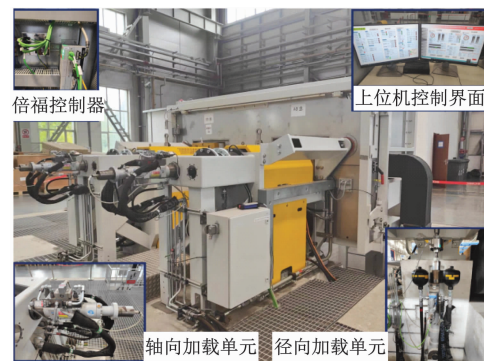
表 1 ΔK_p 模糊规则

Tab.1 Fuzzy rules of ΔK_p

ΔK_p	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	PB	PB	PM	PM	PS	ZO	ZO
NM	PB	PB	PM	PS	PS	ZO	NS
NS	PM	PM	PM	PS	ZO	NS	NS
ZO	PM	PM	PS	ZO	NS	NM	NM
PS	PS	PS	ZO	NS	NS	NM	NM
PM	PS	ZO	NS	NM	NM	NM	NB
PB	ZO	ZO	NM	NM	NM	NB	NB



a) 轴箱可靠性分析试验平台示意图



b) 轴箱可靠性分析试验平台实物图

图 4 轴箱轴承可靠性分析试验平台

Fig. 4 Axle box bearing reliability analysis test bench

现动态加载的稳定控制,采用倍福 C6930 控制器作为试验台控制核心,此控制器为控制柜安装式工业 PC,配备 Intel 处理器、3.5 英寸(8.89 cm)主板及一个 SATA RAID 控制器,性能良好,稳定性强。采用 Moog G761 系列伺服阀作为轴向加载伺服阀,采用 Moog D671 系列伺服阀作为径向加载伺服阀,两者均为高性能的二级电液伺服阀,静态和动态特性良好,工作可靠,使用寿命长。采用 U10M/125 kN 和 U10M/40 kN 力传感器测量轴向和径向加载力。

3.2 加载性能测试

根据 EN 12082:2017 标准和实际列车载荷参

数,求得试验过程中轴向力和径向力的设定值分别为 ± 12.5 kN 交变和 75.0 kN 恒定,试验结果如图 5 所示。由图 5 可知,轴向力在设定值范围内交替变换,响应时间为 0.276 s,稳态误差为 0.339 kN;径

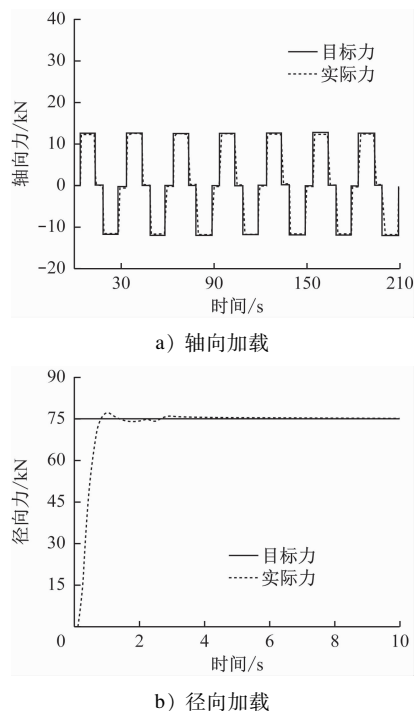


图 5 加载系统试验结果

Fig. 5 Test results of loading system

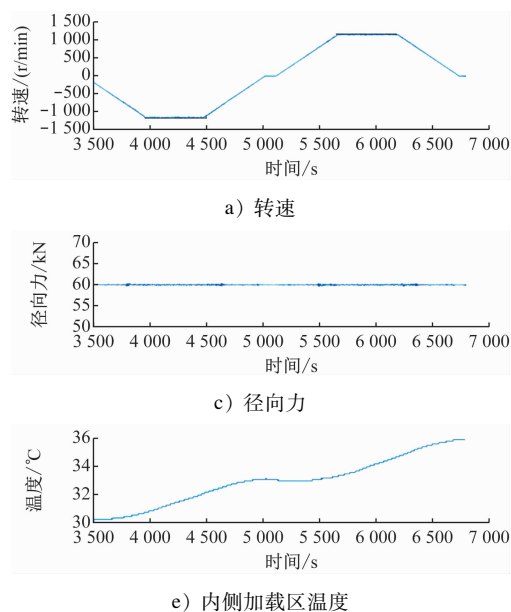


图 7 轴箱轴承可靠性测试结果

Fig. 7 Reliability test results of axle box bearings

4 结语

本文设计了一套电液伺服动态加载系统,并提

向力稳定在设定值附近,稳态误差为 1.742 kN。轴向和径向加载系统性能均满足 EN 12082:2017 标准要求,可以用于开展轴箱轴承可靠性试验。

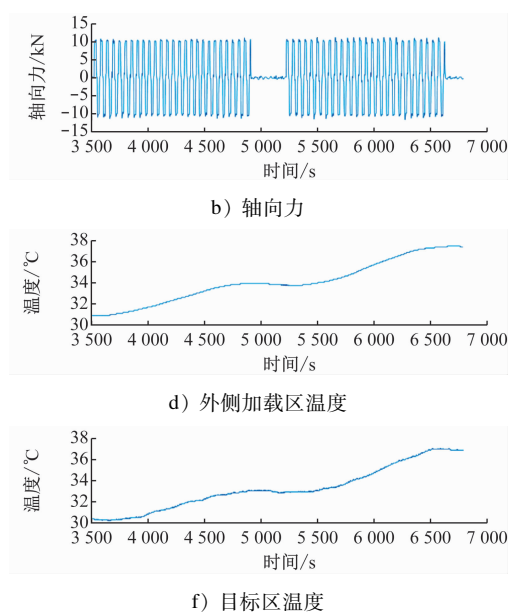
3.3 轴箱轴承可靠性测试

根据 EN 12082:2017 标准规定的轴箱轴承性能试验要求,对轴箱轴承的可靠性性能进行测试,试件轴承如图 6 所示。试验期间,台架重复相同的试验序列,直至达到要求的循环次数和试验距离。台架加载系统施加恒定的径向力和交变的轴向力,模拟轴箱轴承实际运行载荷工况。根据轴承的温度变化监测轴承性能。试验结果如图 7 所示。由图 7 可知,试验台能够准确模拟设定的试验转速和载荷工况,试件轴承温度稳定在温度判据正常范围内。



图 6 试件轴承

Fig. 6 Sample bearings



出了一种模糊 PID 控制算法,用于模拟轴箱轴承可靠性试验过程中的动态载荷。试验结果表明:所设计的电液伺服动态加载系统能够满足轴箱轴承的

加载要求;动态加载系统的响应时间和加载精度满足 EN 12082:2017《铁路应用轴箱性能测试》标准要求。本研究可为高性能轴箱轴承可靠性试验台的设计开发提供参考,为高速动车组轴箱轴承国产化和性能提升提供可靠的试验技术支持。

参考文献

- [1] 张铁志. 机车 JK430 走行部监测装置数据深度分析[J]. 中国铁路, 2021(3): 118.
ZHANG Tiezhi. In-depth data analysis of JK430 running gear monitoring device of locomotives [J]. China Railway, 2021(3): 118.
- [2] 刘志刚. 铁路轴箱轴承故障微弱特征信息提取及性能退化评估研究[D]. 南昌: 华东交通大学, 2023.
LIU Zhigang. Research on weak fault feature extraction and performance degradation evaluation of railway axle box bearing[D]. Nanchang: East China Jiaotong University, 2023.
- [3] MATHIAS S, 李德领. 日本 NSK 公司高速列车轴承研发历程[J]. 国外铁道车辆, 2020, 57(2): 17.
MATHIAS S, LI Deling. Development process of bearing of high-speed train of NSK [J]. Foreign Rolling Stock, 2020, 57(2): 17.
- [4] 陈之恒, 王诗航, 仲继生, 等. HXD1B 型机车轴箱轴承故障试验分析[J]. 电力机车与城轨车辆, 2023, 46(6): 93.
CHEN Zhiheng, WANG Shihang, ZHONG Jisheng, et al. Test a-

nalys of axle box bearing fault of HXD1B locomotive[J]. Electric Locomotives & Mass Transit Vehicles, 2023, 46(6): 93.

- [5] 李峥, 卢文秀, 褚福磊. 滚动轴承试验台动载荷加载装置[J]. 科技创新与应用, 2020(12): 24.
LI Zheng, LU Wenxiu, CHU Fulei. Device for loading dynamic load of rolling bearing test bench[J]. Technology Innovation and Application, 2020(12): 24.
- [6] 王野牧, 李奇, 张阳. 大推力轴承试验台液压加载力控制系统研究[J]. 机械工程与自动化, 2021(5): 88.
WANG Yemu, LI Qi, ZHANG Yang. Research on hydraulic loading force control system of large thrust bearing test-bed[J]. Mechanical Engineering & Automation, 2021(5): 88.
- [7] 侯定邦, 王建梅, 王宁, 等. 基于模糊-PID 的油膜轴承试验台调速系统设计[J]. 太原科技大学学报, 2019, 40(5): 348.
HOU Dingbang, WANG Jianmei, WANG Ning, et al. Simulation model on fuzzy-PID speed control system of journal bearing test rig [J]. Journal of Taiyuan University of Science and Technology, 2019, 40(5): 348.

• 收稿日期:2024-03-12 修回日期:2024-04-20 出版日期:2024-08-10
Received:2024-03-12 Revised:2024-04-20 Published:2024-08-10
• 第一作者:杜洪军,高级工程师,duhongjun123@163.com
通信作者:刘冠男,工程师,446765333@qq.com
• ©《城市轨道交通研究》杂志社,开放获取 CC BY-NC-ND 协议
© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license

(上接第 298 页)

为例,通过调整车载系统架构,在原系统设备基础上新增 VOBC 设备,同时调整设备间接口,以实现 CBTC 与 ATP/TD 两套系统制式兼容,为信号系统升级改造、互联互通提供参考。

参考文献

- [1] 臧一佩, 梁志国, 冯浩楠, 等. 普速铁路信号系统控车优化方案研究[J]. 铁道运输与经济, 2021, 43(12): 109.
ZANG Yipei, LIANG Zhiguo, FENG Haonan, et al. Optimization scheme of train control for the signal system of conventional railway [J]. Railway Transport and Economy, 2021, 43(12): 109.
- [2] 刘鑫, 罗运真. 深圳地铁 3 号线既有信号系统更新改造方案研究[J]. 现代城市轨道交通, 2021(增刊 1): 96.
LIU Xin, LUO Yunzhen. Research on renovation program for existing signal system of Shenzhen Metro Line 3 [J]. Modern Urban Transit, 2021(S1): 96.
- [3] 孙磊. 上海轨道交通 2 号线信号系统改造实施方案[J]. 城市轨道交通研究, 2021, 24(11): 138.
SUN Lei. Signaling system transformation scheme of Shanghai Rail Transit Line 2 [J]. Urban Mass Transit, 2021, 24(11): 138.
- [4] 石卫师, 赖治平. 南宁轨道交通 2 号线信号系统贯通技术方

案[J]. 铁道通信信号, 2021, 57(11): 86.

- SHI Weishi, LAI Zhiping. Research on interconnection scheme of signal system in Nanning Rail Transit's Line 2 [J]. Railway Signalling & Communication, 2021, 57(11): 86.
- [5] 赵博. 京张铁路 CTCS-3 + ATO 信号系统工程方案设计研究[J]. 铁道工程学报, 2021, 38(10): 79.
ZHAO Bo. Research on the engineering scheme design of CTCS-3 + ATO signal system for Beijing-Zhangjiakou railway [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2021, 38(10): 79.
- [6] 陈思维. 上海轨道交通 3、4 号线信号系统改造方案研究[J]. 城市轨道交通研究, 2021, 24(7): 148.
CHEN Siwei. Research on signaling system transformation scheme of Shanghai Urban Rail Transit Line 3/4 [J]. Urban Mass Transit, 2021, 24(7): 148.

• 收稿日期:2022-04-16 修回日期:2022-05-26 出版日期:2024-08-10
Received:2022-04-16 Revised:2022-05-26 Published:2024-08-10
• 通信作者:徐旦,讲师,1069642147@qq.com
• ©《城市轨道交通研究》杂志社,开放获取 CC BY-NC-ND 协议
© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license