

城市轨道交通供电系统能馈装置 无功协调控制方案研究

赵佳微¹ 汪 理² 邹大云¹ 陈根军¹ 解 凯¹

(1. 南京南瑞继保电气有限公司, 211102, 南京; 2. 南京地铁建设有限责任公司, 210017, 南京)

摘 要 [目的] 目前,城市轨道交通供电系统主要依赖于主变电所 SVG(静止无功补偿器)进行无功补偿,夜间非运营时分,城市轨道交通供电系统中压环网线路基本处于空载状态,线路充电无功功率大,使得 SVG 长期重负荷运行。为缓解 SVG 的补偿压力,提出了一种能馈装置无功协调控制方案,协调 SVG 与牵引变电所的能馈装置共同参与无功补偿。[方法] 分析了能馈装置的无功补偿容量计算方法,提出了 SVG 与能馈装置无功协调控制策略,最后通过某地铁线路现场试验来验证 SVG 与能馈装置无功协调控制策略的正确性。[结果及结论] 当某地铁线路全线的能馈装置全部投入无功补偿之后,SVG 无功补偿容量最大可以下降 2.6 Mvar,中压环网线路有功损耗功率可从 0.7 MW 下降至 0.5 MW。

关键词 城市轨道交通; 供电系统; 能馈装置; 无功补偿

中图分类号 U231.8

DOI:10.16037/j.1007-869x.2024.09.034

Research on Reactive Power Coordination Control Scheme of Energy Feedback Device in Urban Rail Transit Power Supply System

ZHAO Jiawei¹, WANG Li², ZOU Dayun¹, CHEN Genjun¹, XIE Kai¹

(1. Nanjing Nari-Relays Electric Co., Ltd., 211102, Nanjing, China; 2. Nanjing Metro Construction Co., Ltd., 210017, Nanjing, China)

Abstract [Objective] Currently, the urban rail transit power supply system mainly relies on the main substation SVG (static var compensator) for reactive power compensation. During non-operating hours at night, the medium voltage loop network lines of urban rail transit power supply system are basically unloaded, and the charging reactive power of the lines is high, causing SVG to operate under heavy load for a long time. To alleviate the compensation pressure of SVG, a reactive power coordination control scheme for energy feedback device is proposed, coordinating SVG and the energy feedback devices in the traction substation to jointly participate in reactive power compensation. [Method] The calculation method

of the energy feedback device reactive power compensation capacity is analyzed, and the reactive power coordination control strategy for the SVG and energy feedback device is proposed. Finally, on-site tests on a certain metro line are performed, verifying the correctness of the above strategy. [Result & Conclusion] When the energy feedback devices of a metro line are all put into use for reactive power compensation, the SVG reactive power compensation capacity can be reduced by 2.6 Mvar to the most, and the total active power loss of the medium voltage loop network line can be reduced from 0.7 MW to about 0.5 MW.

Key words urban rail transit; power supply; energy feedback device; reactive power compensation

为避免供电系统功率因数过低,引起电力部门罚款,城市轨道交通供电系统基本都装设了无功补偿设备。其中,SVG(静止无功补偿器)具备可实现容性、感性无功双向的动态连续调节的优点,因而受到青睐,主变电所 SVG 集中补偿也逐渐成为城市轨道交通供电系统最主要的无功补偿方式^[1-2]。

然而,仅依赖于主变电所 SVG 进行无功补偿也会产生新的问题,如夜间非运营时段 SVG 接近满负荷运行,SVG 停机维护或检修时城市轨道交通供电系统无法满足电力部门的功率因数考核要求^[3]。针对于此,可以考虑协调能馈装置参与无功补偿。文献[4]提出了基于能馈装置的夜间无功补偿的方案,并给出了定时定量的无功补偿策略;文献[5]提出了基于能馈装置的分区无功补偿策略,通过采集主变电所进线无功功率及功率因数来计算各区所需补偿的无功功率,并分配给能馈装置;文献[4-5]考虑仅采用能馈装置补偿无功,而文献[6]考虑 SVG 及能馈装置协同补偿,根据供电系统结构及行车计划推导出供电系统各分区无功功率补偿差额,最后平均分配给各分区能馈装置。

本文提出一种主变电所 SVG 及牵引变电所能

馈装置无功协调控制方案。首先,建立供电系统的模型^[7],基于供电系统拓扑分析结果实现无功补偿动态分区;然后,基于经济压差策略计算能馈装置实时无功补偿值;最后根据现场试验验证本文方案的正确性。

1 城市轨道交通供电系统无功概述

城市轨道交通供电系统的无功功率主要来源于中压环网,变压器及负荷等^[8]。

1.1 输电线路无功计算^[9]

输电线路产生的无功功率包括两部分:一部分是线路电抗产生的感性无功 Q_L ,另一部分是线路对地电容产生的充电无功 Q_C 。

$$Q_L = 3I^2xL \quad (1)$$

式中:

I ——流过线路的电流;

x ——线路单位长度的电抗;

L ——线路的长度。

$$Q_C = U^2 2\pi fCL \quad (2)$$

式中:

U ——线路两侧电压的平均值;

f ——供电系统的频率,取 50 Hz;

C ——单位长度线路的单相对地电容。

1.2 变压器无功计算

变压器无功 Q_T 的计算公式如下:

$$Q_T = \left(\frac{\alpha}{100} \cdot \frac{S^2}{S_N^2} + \frac{\beta}{100} \right) S_N \quad (3)$$

式中:

α ——变压器的短路电压相对于额定电压的百分数;

β ——变压器的空载电流相对于额定电流的百分数;

S ——变压器的视在功率;

S_N ——变压器的额定容量。

1.3 供电系统无功特性

供电线路的充电无功在一天之内基本保持恒定,而感性无功会随着负荷的变化而变化。变压器的无功损耗主要与变压器的负载率相关,随着负载率的变化而变化。城市轨道交通供电系统牵引负荷产生的无功功率很小,一般不需要补偿,而动力照明负荷中包括大量的感性负荷,功率因数较低。

白天运营时分城市轨道交通供电系统内感性无功很大,可以将系统内的容性无功抵消,供电系

统的负荷整体呈感性,功率因数较高;而夜间非运营时段,供电系统的牵引负荷为零,动力照明负荷大幅下降,整个供电系统感性无功大幅下降,而容性无功基本保持恒定,供电系统的负荷呈容性,功率因数较低。

2 基于经济压差的能馈无功出力计算

2.1 经济压差原理

能馈装置在白天运营时分需要进行有功功率的反馈,只能在夜间列车停运时分才能进行无功功率的补偿。夜间供电系统的无功主要是中压环网线路的充电无功,为了实现中压环网线路的无功就地平衡,可以考虑基于经济压差法计算能馈无功出力^[10]。

经济压差是指,当线路的无功功率分点位于线路中点时线路首末端电压之差。当线路在经济压差条件下运行时,线路只有有功功率在电阻上产生电压损耗,电压损耗 ΔU 为:

$$\Delta U = \frac{PR + QX}{U} = \frac{PR}{U} \quad (4)$$

式中:

U ——线路的电压;

R ——线路的电阻;

X ——线路的电抗;

P ——线路上流过的有功功率;

Q ——线路上流过的无功功率。

线路运行在经济压差工况下,线路传输无功功率引起的有功功率损耗 ΔP_{\min} 也最小。

$$\Delta P_{\min} = \frac{1}{12} B_1^2 R_1 U^2 L^3 \quad (5)$$

式中:

B_1 ——线路单位长度的电纳;

R_1 ——线路单位长度的电阻。

2.2 母线剩余无功模型

计算能馈的无功补偿功率,首先需计算中压环网上各母线上的剩余无功,中压环网第 i 条交流母线的剩余无功 $Q_{\text{bus},i,\text{loss}}$:

$$Q_{\text{bus},i,\text{loss}} = Q_{\text{bus},i,l} + \Delta Q_{\text{bus},i,t} = \frac{1}{2} \sum_{r=1}^m \Delta Q_{\text{bus},i,l,r} + \sum_{j=1}^k \Delta Q_{\text{bus},i,t,j} \quad (6)$$

式中:

$Q_{\text{bus},i,l}$ ——第 i 条交流母线所连接线路的剩余无功之和;

$Q_{\text{bus},i,t}$ ——第 i 条交流母线所连接变压器的剩余无功之和;

$Q_{\text{bus},i,l,r}$ ——第 i 条交流母线所连接的第 r 条线路上的无功功率,可由式(1)~(2)计算所得;

$Q_{\text{bus},i,t,j}$ ——第 i 条交流母线所连接的第 j 台变压器损耗的无功功率,可由式(3)计算所得。

当输电线路上的剩余无功在线路两侧等量补偿时,被补偿线路可运行在经济压差工况下。因此,线路的无功补偿考虑平均分配给线路两侧的无功补偿装置,而变压器的剩余无功补偿则根据拓扑分析结果判断是否具备就地补偿的条件,如果具备则就地补偿,否则,考虑分配给不同的无功补偿装置。

2.3 能馈装置补偿功率计算

对供电系统进行拓扑分析可以划分控制分区,如图1所示。图1中,MSS为主变电所,Bus1—Bus6为中压环网母线,NK1—NK2为能馈装置,T1—T5为变压器,其中Bus1和Bus3连接能馈装置和变压器,Bus2、Bus4和Bus5连接变压器,Bus6连接SVG和变压器。

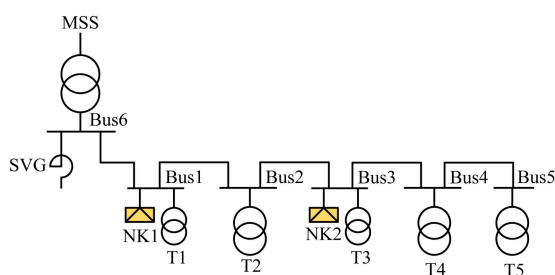


图1 城市轨道交通牵引供电系统某控制分区示意图

Fig.1 Schematic diagram of a control partition in the traction and power supply system of urban rail transit

对于变压器,考虑无功就地补偿,一台变压器的损耗无功全部由某能馈装置补偿,输电线路无功由两侧能馈装置平摊。能馈装置无功补偿功率的计算方法如下:

- 1) 初始化能馈装置无功补偿功率 $Q_N = 0$ 。
- 2) 对供电系统进行无功控制分区的划分。
- 3) 遍历分区内的中压环网母线,根据式(6)计算每条母线上的剩余无功 $Q_{\text{bus},i,\text{loss}}$ 。

4) 根据拓扑分析的结果,判断第 i 条母线是否连接能馈装置,如果是,则将 $Q_{\text{bus},i,\text{loss}}$ 分配给该能馈装置;如果否,则进一步判断第 i 条母线所在控制分区内,第 i 条母线两侧是否存在能馈装置,如果两侧

均存在能馈装置,那么将 $Q_{\text{bus},i,\text{loss}}$ 平均分配给两侧能馈装置,如果两侧仅有一侧存在能馈装置,则将 $Q_{\text{bus},i,\text{loss}}$ 全部分配给该能馈装置,如果两侧均不存在能馈装置,那么 $Q_{\text{bus},i,\text{loss}}$ 由主变电所 SVG 进行补偿。

5) 根据步骤4)的分配结果,计算各能馈装置的无功补偿功率 $Q_{\text{calc},\text{NK}i}$,判断各能馈装置无功补偿功率是否超出最大无功补偿功率 $Q_{\text{pen},\text{max}}$,如果超过,则能馈装置实际无功补偿功率为 $Q_{\text{pen},\text{max}}$,否则为 $Q_{\text{calc},\text{NK}i}$ 。

现结合图1,对母线剩余无功分配再做进一步描述:图1中Bus1的剩余无功 $Q_{\text{bus},1,\text{loss}}$ 全部分配给NK1,Bus2的剩余无功 $Q_{\text{bus},2,\text{loss}}$ 平均分配给NK1和NK2,而Bus3—Bus5的剩余无功则全部分配给NK2。所以NK1的无功补偿功率 $Q_{\text{calc},\text{NK}1}$ 为:

$$Q_{\text{calc},\text{NK}1} = Q_{\text{bus},1,\text{loss}} + 0.5Q_{\text{bus},2,\text{loss}} \quad (7)$$

NK2的无功补偿功率 $Q_{\text{calc},\text{NK}2}$ 为:

$$Q_{\text{calc},\text{NK}2} = 0.5Q_{\text{bus},2,\text{loss}} + Q_{\text{bus},3,\text{loss}} + Q_{\text{bus},4,\text{loss}} + Q_{\text{bus},5,\text{loss}} \quad (8)$$

式中:

$Q_{\text{bus},3,\text{loss}}, Q_{\text{bus},4,\text{loss}}, Q_{\text{bus},5,\text{loss}}$ ——分别为Bus3、Bus4和Bus5的剩余无功;

判断 $Q_{\text{calc},\text{NK}1}$ 和 $Q_{\text{calc},\text{NK}2}$ 是否超过 $Q_{\text{pen},\text{max}}$,从而计算出NK1和NK2的实际无功补偿功率。

3 现场试验

为验证本文所述算法的正确性,选取国内某地铁线路进行无功补偿试验。该地铁线路供电系统示意图如图2所示,其供电系统包含2个主变电所MSS和18个35 kV变电所TSS(牵引变电所或降压变电所)。其中:每个主变电所内安装2台SVG;在35 kV变电所中,TSS2、TSS9、TSS15、TSS17和TSS18的I段母线上安装有能馈装置,而TSS1、TSS4、TSS6、TSS8、TSS10、TSS12、TSS14、TSS16的II段母线上安装有能馈装置。

根据上述的原理计算各能馈装置的无功补偿功率,结果如表1所示。

现场试验选在夜间停运时分进行,首先在SVG集中补偿的方式下运行一段时间,然后在主站后台操作,将能馈装置的运行模式从有功反馈切换至无功补偿;接着按表1中的计算结果陆续对能馈装置下发遥调值,使能馈装置陆续投入无功补偿,等待一段时间至供电系统运行数据稳定。然而,比较能

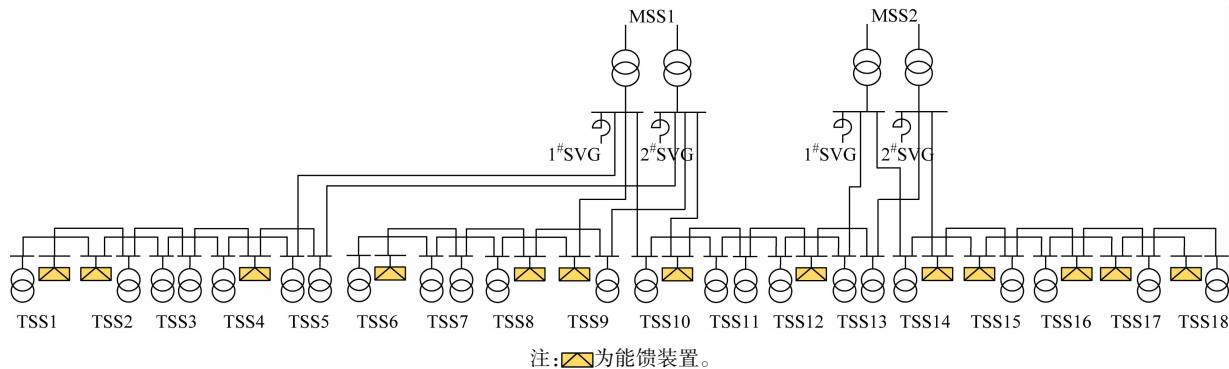


图2 某地铁线路供电系统示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the power supply system for a metro line

表1 能馈装置无功补偿功率

Tab. 1 Reactive power compensation power of the energy feedback devices

变电所	能馈无功补偿功率/Mvar	变电所	能馈无功补偿功率/Mvar
TSS1	0.325	TSS12	0.200
TSS2	0.915	TSS14	0.380
TSS4	0.950	TSS15	0.465
TSS6	0.155	TSS16	0.595
TSS8	0.385	TSS17	0.355
TSS9	0.645	TSS18	0.105
TSS10	0.685		

馈装置投入前后全线中压环网的功率损耗。

全线环网有功损耗功率如图3所示。从图3中可以看出,凌晨02:14分左右开始陆续投入能馈装置,到凌晨02:26分左右,能馈装置全部投入,能馈装置投入补偿前后,全线中压环网有功损耗功率之和从0.7 MW下降至0.5 MW左右。

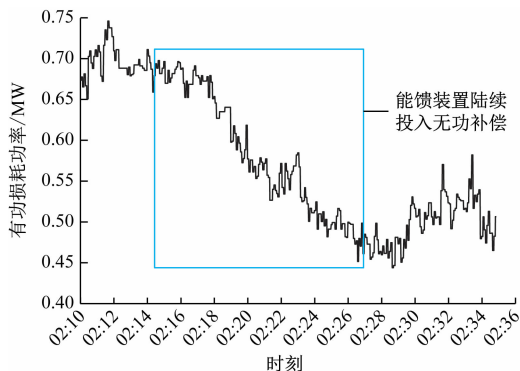


图3 现场试验的全线环网有功损耗功率变化趋势图

Fig. 3 Trend graph of active power loss change for the whole loop network in on-site test

图4和图5分别展示能馈装置投入补偿前后,主变电所MSS1和MSS2的SVG装置无功输出的

变化趋势。从图4中可以看出,能馈装置投入前MSS1的1#SVG无功出力为3.6 Mvar左右,2#SVG的无功出力在3.4 Mvar左右;能馈装置陆续投入无功补偿后,1#SVG的无功出力下降至2.2 Mvar左右,2#SVG的无功出力下降至0.8 Mvar左右。

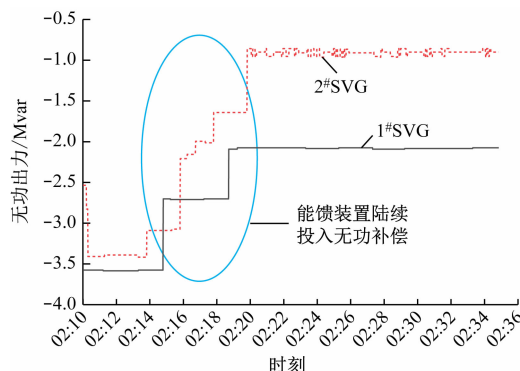


图4 MSS1的SVG装置容量变化趋势图

Fig. 4 Trend graph of SVG unit capacity change in MSS1

图5中,能馈装置投入前后,MSS2的1#SVG的无功出力从1.2 Mvar左右下降至0.3 Mvar左右,2#SVG的无功出力从1.5 Mvar左右下降至0.3 Mvar左右。

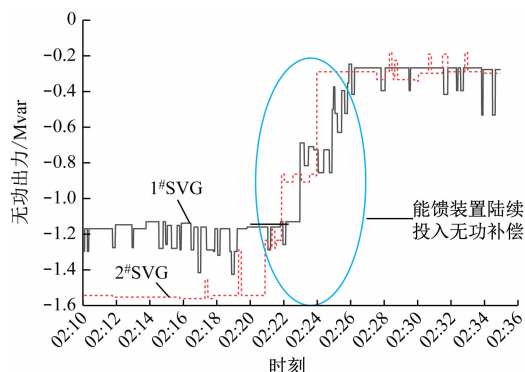


图5 MSS2的SVG装置容量变化趋势图

Fig. 5 Trend graph of SVG unit capacity change in MSS2

4 结语

城市轨道交通供电系统运营初期或夜间停运期间,系统的容性无功较大,如果仅依赖主变电所SVG进行无功补偿,会造成SVG的无功补偿压力大,且无法实现无功就地平衡,因而无功补偿不够经济。本文提出了一种城市轨道交通能馈装置无功协调控制方案,协调能馈装置共同参与供电系统的无功补偿,并提出基于经济压差理论的能馈无功出力计算方法。现场试验结果表明,本文所提方案能够实现缓解SVG无功补偿压力、降低供电系统中压环网的有功损耗,及无功达到就地平衡等目的,具有广泛的应用前景。

参考文献

- [1] 何洋阳, 黄康, 王涛, 等. 轨道交通牵引供电系统综述[J]. 铁道科学与工程学报, 2016, 13(2): 352.
HE Yangyang, HUANG Kang, WANG Tao, et al. Overview of traction power supply system for rail transportation[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2016, 13(2): 352.
- [2] 王沛沛, 刘炜, 廖钧, 等. 城市轨道主变电所无功补偿装置容量评估[J]. 铁道科学与工程学报, 2017, 14(5): 1063.
WANG Peipei, LIU Wei, LIAO Jun, et al. Capacity evaluation of reactive power compensation device in the main substation of urban rail transit[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2017, 14(5): 1063.
- [3] 程晋然, 马天文, 杨振宇, 等. 地铁再生能馈装置辅助无功补偿的可行性研究[J]. 电气技术, 2019, 20(3): 118.
CHENG Jinran, MA Tianwen, YANG Zhenyu, et al. Feasibility study on reactive power compensation by metro regeneration energy feeding device [J]. Electrical Engineering, 2019, 20(3): 118.
- [4] 桑福环, 张海龙, 王林, 等. 地铁能量回馈装置的无功补偿控制策略[J]. 城市轨道交通研究, 2016, 19(5): 117.
SANG Fuhuan, ZHANG Hailong, WANG Lin, et al. Control strategy of reactive power compensation applied in metro energy-feedback device[J]. Urban Mass Transit, 2016, 19(5): 117.
- [5] 朱士友, 阮白水, 全恒立, 等. 基于能馈式牵引供电装置的城市轨道交通无功补偿策略[J]. 电工电能新技术, 2013, 32(2): 16.
ZHU Shiyu, RUAN Baishui, QUAN Hengli, et al. Study of urban rail reactive power compensation strategy based on energy-fed traction power supply equipment[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2013, 32(2): 16.
- [6] 张戡, 刘炜, 谢文君, 等. 基于逆变回馈装置的城市轨道交通分布式无功补偿方案研究[J]. 电工电能新技术, 2020, 39(8): 75.
ZHANG Jian, LIU Wei, XIE Wenjun, et al. Research on distributed reactive power compensation scheme of urban rail based on inverter feedback device[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2020, 39(8): 75.
- [7] 解凯, 邹大云, 赵佳微, 等. 城市轨道交通供电系统的 CIM 拓展及应用[J]. 电测与仪表, 2020, 57(14): 63.
XIE Kai, ZOU Dayun, ZHAO Jiawei, et al. Extension and application of CIM for the urban railway traction power supply system [J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2020, 57(14): 63.
- [8] 付胜华, 李文. 城市轨道交通供电系统无功平衡分析[J]. 城市轨道交通研究, 2021, 24(3): 187.
FU Shenghua, LI Wen. Reactive power balance analysis of urban rail transit power supply system[J]. Urban Mass Transit, 2021, 24(3): 187.
- [9] 孟庆天, 李莉美. 光伏电站无功补偿容量分析与计算[J]. 电力电容器与无功补偿, 2012, 33(6): 53.
MENG Qingtian, LI Limei. Analysis and calculation on the reactive power compensation capacity for photovoltaic power station [J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2012, 33(6): 53.
- [10] 唐晓骏, 陈会员, 姚淑玲, 等. 基于改进经济压差的特高压电网无功电压控制策略[J]. 电网技术, 2013, 37(3): 673.
TANG Xiaojun, CHEN Huiyuan, YAO Shuling, et al. Reactive power and voltage control strategy for UHVAC power grid based on improved economic voltage difference[J]. Power System Technology, 2013, 37(3): 673.

· 收稿日期:2022-06-02 修回日期:2022-11-09 出版日期:2024-09-10
Received:2022-06-02 Revised:2022-11-09 Published:2024-09-10
· 通信作者:赵佳微,助理工程师,zhaojw@nrec.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 192 页)

- [5] 刘炜, 曾佳欣, 马庆安, 等. 含双向变流装置的城轨交通牵引供电系统协同供电潮流计算[J]. 西南交通大学学报, 2023, 58(5): 1145.
LIU Wei, ZENG Jiaxin, MA Qing'an, et al. Calculation of collaborative power flow for urban rail traction power supply system with bidirectional converter device [J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2023, 58(5): 1145.

· 收稿日期:2024-01-17 修回日期:2024-04-25 出版日期:2024-09-10
Received:2024-01-17 Revised:2024-04-25 Published:2024-09-10
· 第一作者:常雨欣,1975027567@qq.com
通信作者:沈世全,副教授,shiquan@kust.edu.cn
· ©《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