

# 考虑主变电所资源共享的城市轨道交通供电系统 无功补偿方案

李立颖<sup>1</sup> 周丹<sup>1</sup> 林珊<sup>1</sup> 邹大云<sup>2</sup> 金海奇<sup>2</sup> 解凯<sup>2</sup> 戚贺<sup>3</sup> 张戢<sup>3</sup>

(1. 广州地铁设计研究院股份有限公司, 510010, 广州; 2. 南京南瑞继保电气有限公司, 211102, 南京;

3. 西南交通大学电气工程学院, 611756, 成都)

**摘要** [目的] 当城市轨道交通供电系统的主变电所资源共享时, 能够节省供电系统的投资成本。在此背景下, 为使PCC(公共连接点)的功率因数达到标准, 需要对不同阶段的主变电所资源共享无功补偿方案进行研究。[方法] 以某城市地铁线路的供电系统为例, 根据行车计划和供电系统结构, 推算出PCC处在全日功率因数达标的情况下, 主变电所资源共享前后的最小无功功率补偿量。提出考虑主变电所资源共享的无功补偿设置方案, 以主变电所资源共享前后的最小无功功率补偿量满足补偿需求为基础, 以SVG(静止无功发生器)容量最小为目标, 确定SVG和电抗器或电容器的安装容量。[结果及结论] 在案例线路的供电系统中, 1<sup>#</sup>主变电所主变压器供电分区无功补偿装置的实际配置为: 电抗器容量为6.0 Mvar; SVG容量为1.0 Mvar; 2<sup>#</sup>主变压器供电分区无功补偿装置的配置为: 电抗器容量为3.0 Mvar; SVG容量为0.5 Mvar。所提供供电系统无功补偿方案将总容量为9.0 Mvar的SVG装置替换成电抗器, 在满足无功补偿需求的同时降低了投资成本。

**关键词** 城市轨道交通; 主变电所资源共享; 无功补偿方案

**中图分类号** U231.8

**DOI**: 10.16037/j.1007-869x.2024.02.010

## Reactive Power Compensation Scheme for Urban Rail Power Supply System Considering Main Substation Resource Sharing

LI Liying<sup>1</sup>, ZHOU Dan<sup>1</sup>, LIN Shan<sup>1</sup>, ZOU Dayun<sup>2</sup>, JIN Haiqi<sup>2</sup>, XIE Kai<sup>2</sup>, QI He<sup>3</sup>, ZHANG Jian<sup>3</sup>

(1. Guangzhou Metro Design & Research Institute Co., Ltd., 510010, Guangzhou, China; 2. NR Electric Co., Ltd., 211102, Nanjing, China; 3. School of Electrical Engineering, Southwest Jiaotong University, 611756, Chengdu, China)

**Abstract** [Objective] The resource sharing among main substations in urban rail transit power supply system can lead to significant cost savings. In this context, it is essential to investigate reactive power compensation schemes for different phases of main substation resource sharing to ensure that the power

factor at the PCC (point of common coupling) meets the standards. [Method] Taking the power supply system of a city's metro line as example, based on the train schedule and power supply system structure, the minimum reactive power compensation required at PCC before and after main substation resource sharing under daily power factor compliance is calculated. A reactive power compensation setting scheme considering main substation resource sharing is proposed, based on the minimum reactive power compensation that meets the compensation requirements before and after main substation resource sharing, with the goal to minimize SVG (static var generators) capacity, determining the installation capacity of SVG and reactor or capacitor. [Result & Conclusion] In the power supply system of the case study line, the actual configuration of the reactive power compensation devices for the 1<sup>#</sup> main substation main transformer power supply zone is as follows: reactor capacity is 6.0 Mvar, and SVG capacity is 1.0 Mvar. For the 2<sup>#</sup> main transformer power supply zone, the configuration is a reactor capacity of 3.0 Mvar and an SVG capacity of 0.5 Mvar. The proposed reactive power compensation scheme replaces a total capacity of 9.0 Mvar SVG devices with reactors, meeting the reactive power compensation requirements while reducing investment costs.

**Key words** urban rail transit; main substation resource sharing; reactive power compensation strategy

为了满足城市轨道交通(以下简称“城轨”)网络化建设的要求, 城轨供电系统的资源网络共享及其衍生问题具有十分重要的研究意义。目前, 针对集中式供电方式, 大多数城市已经实施不同线路主变电所的资源共享工程, 但当某条线路的主变电所对其他线路进行支援供电时, 其PCC(公共连接点)处的功率因数会发生变化。若其功率因数没有达到供电部门的标准, 城轨企业将会收到罚款。因此, 在主变电所资源共享的背景下, 需研究城轨供

电系统无功补偿方案。

目前,城轨供电系统的供电方式主要分为分散式供电和集中式供电。文献[1]分析了分散式和集中式供电方式的功率因数,并指出集中式供电方式需在主变电所 35 kV 侧进行无功补偿。文献[2]根据主变电所进线处的负荷数据推导出了 PCC 处的功率因数,并获得了 SVG(静止无功发生器)的安装容量。文献[3]分析了集中式供电情况下,采用集中式补偿方式的功率因数,研究了其无功补偿方案,并提出了无功补偿装置的定容原则。文献[4]利用逆变回馈装置在城轨非运营时段进行了分散式无功补偿,以减少或取消集中式无功补偿装置的安装,节省了投资成本。但以上文献均未考虑主变电所资源共享背景下,城轨供电系统的无功补偿方案。

考虑城轨主变电所资源共享的背景下,本文利用 SVG 和电抗器或电容器对供电系统 35 kV 侧进行补偿,在降低 SVG 安装容量的同时避免供电部门的罚款,以节约地铁系统的投资成本和运营成本。本文研究可为主变电所资源共享背景下的城轨供电系统设计提供一定的指导。

## 1 供电系统功率分布

对城轨供电系统中某一主变电所和其供电分区的某一时段进行功率分析。在该主变压器共有  $j$  个供电分区。根据城轨运营特点,将全天分为  $i$  个时段,其中: $i=1$  为高峰运营时段; $i=2$  为低谷运营时段; $i=3$  为非运营时段。第  $j$  个供电分区中共有  $M_j$  个牵引降压混合所(以下简称“牵混所”)和  $N_j$  个降压变电所(以下简称“降压所”)。 $V_{j,m}$  为第  $j$  个供电分区中与主变电所 35 kV 母线相连的第  $m$  个牵混所。 $W_{j,n}$  为第  $j$  个供电分区中与主变电所 35 kV 母线相连的第  $n$  个降压所。

根据列车的发车对数、车辆基本属性、供电系统结构图、动力负荷的设计规划等信息,通过城轨供电系统交直流潮流计算出第  $i$  个时段第  $j$  个供电分区中与主变电所 35 kV 母线相连的第  $m$  个牵混所的有功功率  $P_{Vj,m}(i)$  和无功功率  $Q_{Vj,m}(i)$ ,以及第  $i$  个时段第  $j$  个供电分区中与主变电所 35 kV 母线相连的第  $n$  个降压所的有功功率  $P_{Wj,n}(i)$  和无功功率  $Q_{Wj,n}(i)$ 。

城轨供电系统中某主变电所及其供电分区的功率分布示意图如图 1 所示。其中: $P_{C35}(i)$  和

$P_{C110}(i)$  为第  $i$  个时段 35 kV 和 110 kV 电缆的有功功率; $Q_{C35}(i)$  和  $Q_{C110}(i)$  为第  $i$  个时段 35 kV 和 110 kV 电缆的无功功率; $P_b(i)$  为第  $i$  个时段主变电所变压器上消耗的有功功率; $Q_b(i)$  为第  $i$  个时段主变电所变压器上消耗的无功功率; $P_{PCC}(i)$  和  $Q_{PCC}(i)$  为第  $i$  个时段 PCC 处的有功功率和无功功率。

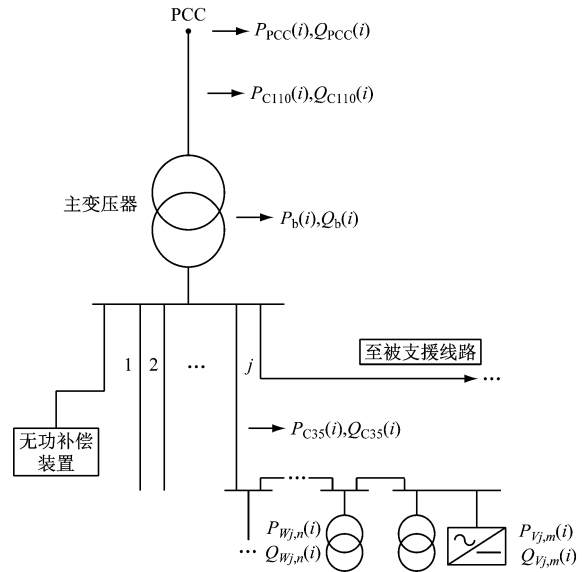


图 1 某主变电所及其供电分区的功率分布示意图

Fig. 1 Power distribution diagram of a main substation and its supply zones

$P_{PCC}(i)$  和  $Q_{PCC}(i)$  可以表示为:

$$P_{PCC}(i) = \sum_{j=1}^J \left( \sum_{m=1}^{M_j} P_{Vj,m}(i) \right) + \sum_{j=1}^J \left( \sum_{n=1}^{N_j} P_{Wj,n}(i) \right) + P_{C35}(i) + P_{C110}(i) + P_b(i) \quad (1)$$

$$Q_{PCC}(i) = \sum_{j=1}^J \left( \sum_{m=1}^{M_j} Q_{Vj,m}(i) \right) + \sum_{j=1}^J \left( \sum_{n=1}^{N_j} Q_{Wj,n}(i) \right) + Q_{C35}(i) + Q_{C110}(i) + Q_e(i) + Q_b(i) \quad (2)$$

式中:

$Q_e(i)$ ——第  $i$  个时段无功补偿装置补偿的无功功率, $Q_e(i)$  为正代表感性无功功率, $Q_e(i)$  为负代表容性无功功率。

PCC 处全日有功电度  $W_{PPCC}$  和无功电度  $W_{QPCC}$  可以表示为:

$$\begin{cases} W_{PPCC} = \sum_{i=1}^3 P_{PCC}(i) T_i \\ W_{QPCC} = \sum_{i=1}^3 Q_{PCC}(i) T_i \end{cases} \quad (3)$$

式中:

$T_i$ ——第  $i$  个时段的运营时长。

PCC 处的功率因数  $\lambda_{\text{PCC}}$  可以表示为:

$$\lambda_{\text{PCC}} = \frac{W_{\text{PPCC}}}{\sqrt{W_{\text{PPCC}}^2 + W_{\text{QPCC}}^2}} \quad (4)$$

## 2 考虑主变电所资源共享的无功补偿方案

城轨运营初期,列车发车对数较少,供电系统中电缆容性无功功率较大,PCC 处功率因数偏低。为了使 PCC 功率因数达标,城轨供电系统需考虑设计安装无功补偿装置进行无功补偿。当主变电所资源共享时,共享前后供电系统结构会发生变化,因此需综合考虑主变电所共享资源前后的供电系统功率分布,并结合不同类型的无功补偿设备,实现 PCC 处功率因数达标的同时,使供电系统投资成本最低。城轨供电系统中,运营初期列车发车对数最少,因此以下建立的模型仅考虑初期。

采用线性规划方法,将主变电所资源共享前无功补偿装置补偿的无功功率  $Q_e$  的绝对值  $|Q_e|$  作为无功补偿装置 SVG 加电抗器或电容器的补偿量,约束条件为 PCC 处功率因数的绝对值不小于 0.9。主变电所资源共享前的线性规划模型可以表示为:

$$\begin{aligned} \min & |Q_e| \\ \text{s. t.} & \left| \lambda_{\text{PCC}} = \frac{W_{\text{PPCC}}}{\sqrt{W_{\text{PPCC}}^2 + W_{\text{QPCC}}^2}} \right| \geq 0.9 \end{aligned} \quad (5)$$

在资源共享背景下,主变电所需对其他线路进行供电,则资源共享后 PCC 处的有功电度  $W_{\text{PPCC},1}$  和无功电度  $W_{\text{QPCC},1}$  会发生改变,根据式(1)一式(5)可以求得在主变电所资源共享后,无功补偿装置需要补偿的无功功率  $Q_{e,1}$ 。

电抗器和电容器成本较低,但无功补偿出力为固定值,SVG 无功补偿出力可调但成本较高。为了节省设备投资,采用 SVG 加电抗器或电容器的补偿方式进行无功补偿。当  $Q_e$  和  $Q_{e,1}$  正负相同时,选取  $|Q_e|$  和  $|Q_{e,1}|$  中较小的值作为电抗器或电容器的安装容量,  $|Q_e|$  和  $|Q_{e,1}|$  的差值作为 SVG 的安装容量;当  $Q_e$  和  $Q_{e,1}$  正负不相同,选取  $|Q_e|$  和  $|Q_{e,1}|$  中较小的值作为 SVG 的安装容量,  $|Q_e|$  和  $|Q_{e,1}|$  的差值作为电抗器或电容器的安装容量。此时的无功补偿方案可以表示为:

$$S_{\text{svg}} = \begin{cases} \min(|Q_e|, |Q_{e,1}|), & Q_e Q_{e,1} < 0 \\ \max(|Q_e|, |Q_{e,1}|) - S_x, & Q_e Q_{e,1} > 0 \end{cases} \quad (6)$$

$$S_x = \begin{cases} \max(|Q_e|, |Q_{e,1}|) - S_{\text{svg}}, & Q_e Q_{e,1} < 0 \\ \min(|Q_e|, |Q_{e,1}|), & Q_e Q_{e,1} > 0 \end{cases} \quad (7)$$

式中:

$S_x$ ——电抗器或电容器的安装容量;

$S_{\text{svg}}$ ——SVG 的安装容量。

考虑主变电所资源共享的无功补偿方案设计流程图如图 2 所示。

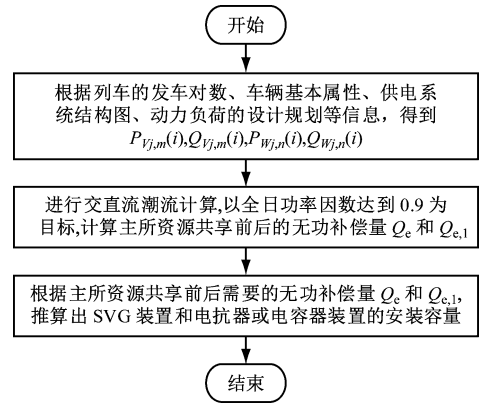
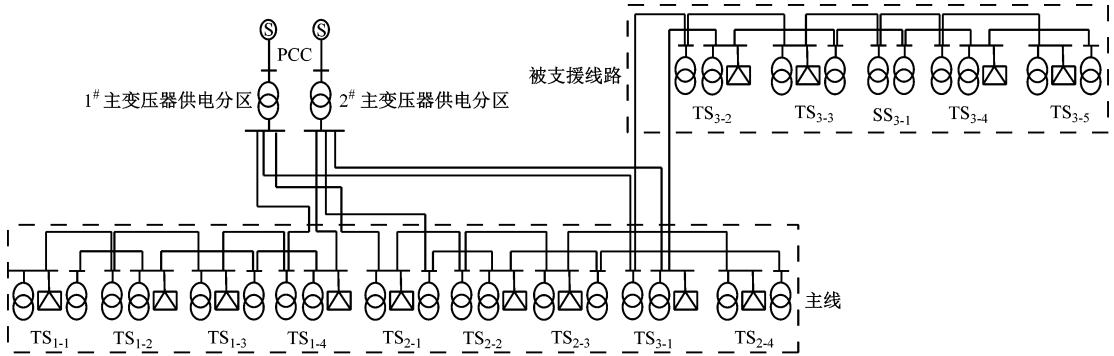


图 2 考虑主变电所资源共享的无功补偿方案设计流程图  
Fig. 2 Flow chart of reactive power compensation scheme design considering the main substation resource sharing

## 3 案例分析

某城市地铁线路的供电系统设置 3 座主变电所,参与主变电所资源共享的主变电所及其供电分区的供电系统示意图如图 3 所示。该主变电所为主线 9 个牵引所及支线(被支援线路)中 4 个牵引所和 1 个降压所供电。该主变电所 110 kV 侧的 I、II 段进线电缆长度分别为 8.580 km、3.393 km,主变压器安装容量为  $2 \times 40$  MVA,接线方式为 YNd11,变压器的短路百分比为 10.5%,短路损耗为 150 kW,空载损耗为 50 kW。所有牵混所整流机组容量为  $2 \times 2\,500$  kW,降压变压器容量均为 500 kVA。该供电系统中的接触网电阻为  $0.017 \, \Omega/\text{km}$ ,钢轨电阻为  $0.020 \, \Omega/\text{km}$ 。110 kV 电缆的电抗取为  $0.118 \, \Omega/\text{km}$ ,电纳为  $48.6 \times 10^{-6} \, \text{S}/\text{km}$ 。35 kV 电缆的电抗取为  $0.192 \, \Omega/\text{km}$ ,电纳为  $49.7 \times 10^{-6} \, \text{S}/\text{km}$ 。该线路初期全日列车运行计划如表 1 所示,其中主线快车仅在  $\text{TS}_{1-1}$  和  $\text{TS}_{2-2}$  停车,普通车每站均停车。

根据列车牵引计算结果和供电系统结构,通过交直流潮流计算,可以分别得到主线和支线牵混所各时段整流机组每小时的平均功率。降压所的负载率在运营时段设置为 0.2,在非运营时段设置为 0.1,其功率因数均设置为 0.8。



注:TS 为牵混所;SS 为降压所;1-1 表示第 1 个供电分区的第 1 个牵混所或降压所,余类同。

图 3 参与资源共享的主变电所及其供电分区的供电系统示意图

Fig. 3 Diagram of power supply system for main substations and their supply zones involved in resource sharing

表 1 线路初期全日列车运行计划

Tab.1 Initial daily train operation schedule for the line

主线或支线	时段	列车类型	发车间隔
主线	高峰	普通车	8 min 15 s
		快车	33 min
	低谷	普通车	9 min 45 s
		快车	39 min
支线	高峰	普通车	9 min 59 s
	低谷	普通车	11 min 45 s

以 $|\lambda_{PCC}| \geq 0.9$ 为目标,根据现有各时段牵引负荷、降压负荷和供电系统结构,通过式(1)一式(5)可以推算出主变电所资源共享前后不同运营段 PCC 处的有功功率和无功功率,如表 2 所示。主变电所 35 kV 侧的无功补偿量如表 3 所示。

表 2 主变电所资源共享前后不同运营时段 PCC 处的有功功率和无功功率

Tab.2 Active and reactive power at PCC during different operation periods before and after the main substation resource sharing

不同运营时段	主变压器供电分区	主变电所资源共享前		主变电所资源共享后	
		有功功率/kW	无功功率/kvar	有功功率/kW	无功功率/kvar
高峰时段	1 <sup>#</sup>	2 577	-668	4 640	-1 707
	2 <sup>#</sup>	2 085	-611	3 921	-1 444
低峰时段	1 <sup>#</sup>	2 113	-629	3 990	-1 681
	2 <sup>#</sup>	1 635	-624	3 272	-1 474
非运营时段	1 <sup>#</sup>	523	-846	1 321	-2 088
	2 <sup>#</sup>	523	-551	1 321	-1 582

根据表 3、式(6)和式(7)对无功补偿装置容量进行配置,1<sup>#</sup>主变压器需配置 5.722 Mvar 的电抗器

和 0.552 Mvar 的 SVG,2<sup>#</sup>主变压器需配置 2.881 Mvar 的电抗器和 0.291 Mvar 的 SVG。考虑 SVG 和电抗器的实际容量规格,无功补偿装置配置方案如表 4 所示。该补偿方案将总计容量为 9 Mvar 的 SVG 装置替换成电抗器,在满足无功补偿需求的同时降低了投资成本。

表 3 主变电所 35 kV 侧的无功补偿量

Tab.3 Reactive power compensation on the 35 kV side of the main substation

主变压器供电分区	主变电所资源共享前无功补偿量 $ Q_c $ /kvar	主变电所资源共享后无功补偿量 $ Q_{c,1} $ /kvar
1 <sup>#</sup>	6 274	5 722
2 <sup>#</sup>	3 172	2 881

表 4 无功补偿装置配置方案

Tab.4 Configuration schemes for reactive power compensation devices

主变压器供电分区	电抗器容量/Mvar	SVG 容量/Mvar
1 <sup>#</sup>	6.0	1.0
2 <sup>#</sup>	3.0	0.5

4 结语

本文研究了在主变电所资源共享背景下,城轨供电系统的无功补偿方案,并对实际案例进行了分析研究,主要获得以下结论:

1) 根据行车计划和供电系统结构,推算出 PCC 全日功率因数达标情况下的主变电所资源共享前后的最小无功功率补偿量,并提出了包含多种无功补偿装置的无功补偿方案。所提方案以主变电所资源共享前后的最小无功功率补偿量满足补偿需求为基础,以 SVG 容量最小为目标,确定 SVG 和电



抗器或电容器的安装容量。

2) 对某城市地铁工程实例进行了仿真分析。根据所提无功补偿方案:1<sup>#</sup>主变电所主变压器供电分区无功补偿装置的实际配置为电抗器容量为 6.0 Mvar、SVG 容量为 1.0 Mvar;2<sup>#</sup>主变压器供电分区无功补偿装置的配置为电抗器容量为 3.0 Mvar、SVG 容量为 0.5 Mvar。与只采用 SVG 进行无功补偿的方案相比,所提方案减少了 9.0 Mvar 的 SVG 安装容量,减少了供电系统的投资成本。

## 参考文献

- [1] 李力鹏,方倜同,盛家川,等.城市轨道交通2种供电方式下供电系统功率因数分析[J].中国铁道科学,2009,30(6):67.
- LI Lipeng, FANG Youtong, SHENG Jiachuan, et al. The power factor analysis of the power supply system under two power supply modes in urban rail transit[J]. China Railway Science, 2009, 30(6): 67.
- [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] 陈飞.轨道交通供电系统功率因数分析及补偿方案研究[J].铁道工程学报,2012,29(4):100.
- CHEN Fei. Analysis of power factor for power supply system of urban rail transit and research on the method of compensation[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2012, 29(4): 100.
- [4] 张戢,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.

· 收稿日期:2021-07-25 修回日期:2021-09-08 出版日期:2024-02-10  
Received:2021-07-25 Revised:2021-09-08 Published:2024-02-10

· 通信作者:李立颖,高级工程师,liliying@dsjy.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52页)

- LIU Bo, ZHANG Jifeng. Catastrophe theory analysis on surge of foundation pit floor under action of confined water[J]. Yangtze River, 2020, 51(3): 107.
- [6] BENMEBAREK N, BENMEBAREK S, KASTNER R. Numerical studies of seepage failure of sand within a cofferdam[J]. Computers and Geotechnics, 2005, 32(4): 264.
- [7] 杨建民,郑刚.基坑降水中渗流破坏归类及抗突涌验算公式评价[J].岩土力学,2009,30(1):261.
- YANG Jianmin, ZHENG Gang. Classification of seepage failures and opinion to formula for check bursting instability in dewatering[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(1): 261.
- [8] 谭松林.考虑土体强度的建筑基坑突涌问题分析[J].地球科学,2002,27(2):209.
- TAN Songlin. Analyses of abrupt gush problem of soil and water based on strength of soil body in building foundation pit[J]. Earth Science, 2002, 27(2): 209.
- [9] 刘志荣,马淑芝,杨跃,等.考虑抗剪强度、渗流作用的基坑抗突涌公式分析[J].科学技术与工程,2013,13(35):10727.
- LIU Zhirong, MA Shuzhi, YANG Yue, et al. Consider soil shear strength, seepage pit formulas check bursting analysis[J]. Sci-

ence Technology and Engineering, 2013, 13(35): 10727.

- [10] 杨小礼.线性与非线性破坏准则下岩土极限分析方法及其应用[D].长沙:中南大学,2002.
- YANG Xiaoli. Limit analysis method and its application to geotechnical engineering with linear and nonlinear failure criteria[D]. Changsha: Central South University, 2002.
- [11] 邹金锋,李亮,杨小礼,等.基于非线性Mohr-Coulomb强度准则下锚索极限抗拔力研究[J].岩土工程学报,2007,29(1):107.
- ZOU Jinfeng, LI Liang, YANG Xiaoli, et al. Study on the ultimate pullout force of pre-stressed cable based on nonlinear Mohr-Coulomb failure criterion[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007, 29(1): 107.

· 收稿日期:2022-04-11 修回日期:2023-05-12 出版日期:2024-02-10  
Received:2022-04-11 Revised:2023-05-12 Published:2024-02-10

· 第一作者:于潇,高级工程师,MingzhuZhao150@126.com

通信作者:王洪涛,研究员,sdjyztgc918@163.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

欢迎投稿《城市轨道交通研究》

投稿网址:tougao. umt1998. com