

文章编号: 1674—8247(2022)03—0062—06
DOI:10.12098/j.issn.1674-8247.2022.03.012

基于 HLA/pRTI 的高速铁路供电系统车网耦合潮流计算方法

钟源¹ 蔡俊宇¹ 林轩²

(1. 中铁二院工程集团有限责任公司, 成都 610031; 2. 西华大学, 成都 610039)

摘要:随着高速铁路的速度、功率、行车密度的增加,过电压、欠电压、过电流等现象时有发生,但传统潮流计算忽略了网压对列车实际发挥功率的限制。为此,本文首先建立全并联 AT 供电网络的链式网状模型和列车牵引模型,针对网压对列车实际功率的影响,提出了一种基于 HLA/pRTI 的车网耦合牵引网潮流计算方法,并以京沪高速铁路枣庄-蚌埠区间某供电分区和 CRH380AL 动车组为算例,分别利用传统恒功率法和基于 HLA/pRTI 车网耦合迭代法进行解算,模拟仿真列车运行过程。计算结果表明:基于 HLA/pRTI 的车网耦合迭代法可较好地反映列车在欠电压时功率受限情况;列车在欠电压下限制输出功率,可以改善供电臂末端的欠电压现象;此方法会增加计算迭代次数,计算效率需进一步优化。

关键词:高速铁路;车网耦合;潮流计算;迭代算法

中图分类号:U223.1 文献标志码:A

Power Flow Calculation Method for HLA/pRTI-based High-speed Railway Power Supply System based on Locomotive-traction Network Coupling

ZHONG Yuan¹ CAI Junyu¹ LIN Xuan²

(1. China Railway Eryuan Engineering Group Co., Ltd., Chengdu 610031, China;
2. Xihua University, Chengdu 610039, China)

Abstract: With the increase of speed, power and traffic density of high-speed railway, overvoltage, undervoltage and overcurrent occur frequently. However, the traditional power flow calculation ignores the limitation of catenary voltage on the actual power of trains. To this end, in this paper, the chain network model and the train traction model of the all-parallel AT power supply network are established first. Then, a power flow calculation method for HLA/pRTI-based traction network based on locomotive-traction network coupling is proposed to study the influence of catenary voltage on the actual power of the train. Finally, a power supply section in Zaozhuang-Bengbu Section of Beijing-Shanghai High-speed Railway and CRH380AL EMU are taken as examples to simulate the train operation process by using the traditional constant power method and the HLA/pRTI-based locomotive-traction network coupling iteration method respectively for calculation. The calculation results show that the HLA/pRTI-based locomotive-traction network coupling iteration method can better reflect the power limitation of the train at undervoltage; limiting the output power of the train at undervoltage can better overcome the undervoltage phenomenon at the end of the feeding section. However, this

收稿日期:2021-03-19

作者简介:钟源(1989-),男,工程师。

引文格式:钟源,蔡俊宇,林轩. 基于 HLA/pRTI 的高速铁路供电系统车网耦合潮流计算方法[J]. 高速铁路技术,2022,13(3):62-67.

ZHONG Yuan, CAI Junyu, LIN Xuan. Power Flow Calculation Method for HLA/pRTI-based High-speed Railway Power Supply System based on Locomotive-traction Network Coupling[J]. High Speed Railway Technology, 2022, 13(3):62-67.

method will increase the number of calculation iterations, and the calculation efficiency needs to be further optimized.

Key words: high-speed railway; locomotive-traction network coupling; power flow calculation; iterative calculation method

为保障高速铁路列车的安全可靠运行,牵引供电系统在设计时需进行潮流计算,获取沿线接触网电压与电流的分布,为确定供电系统容量^[1]、行车组织^[2]提供参考。随着中国高速铁路的快速发展、速度等级的不断提高、牵引功率的逐步增大、行车密度的迅速增加,接触网过电压、欠电压、过电流等现象时有发生,理想工况下的传统潮流解算方法已不再适用。

中国高速铁路主要采用AT供电系统,国内外学者对其潮流解算方法开展了大量研究^[3-6];牵引供电系统模型多采用回路电流模型和节点电压模型;列车模型多采用电流源负荷模型和功率源负荷模型;解算方法一般采用代数法和潮流迭代法。但上述研究忽略了网压对列车实际发挥功率的限制。

鉴于此,本文将牵引网与列车模型耦合,考虑网压对列车的影响,基于牵引网的节点电压模型和列车的功率源负荷模型,利用HLA/pRTI(High Level Architecture/pitch Run Time Infrastructure)数据技术架构,提出了一种适用于列车实际发挥功率受网压限制工况的潮流解算方法,可实现列车全线运行时的牵引网潮流分布仿真计算。

1 计算模型

1.1 全并联AT牵引供电系统

全并联AT牵引供电系统主要由牵引变电所、AT所、分区所和传输线组成。上、下行线路在变电所、AT所及分区所通过横向连接线将接触线(T)、钢轨(R)、馈线(F)并联连接。

考虑到全线路的计算矩阵会随着线路距离的增加而增加,计算机内存负担增大,计算效率降低,且基于牵引变电所的牵引网潮流计算结果更接近实际^[7],本文以牵引变电所为单元建立仿真模型。为简化分析,实际牵引网中与钢轨并联的保护线与地线通过降阶的方法消除。

按牵引网上的横向并联元件的自然切割划分均匀段。被切割后的均匀线段长度有限,在AT供电方式中,最长为1个AT区间。因此,采用精度高、收敛快的矩阵级数算法计算多导体传输线II等值电路。以4根导线为例,建立平行多导体传输线II等值电路,如图1所示。

假设某平行多导体传输线长度为 l ,其II等值电

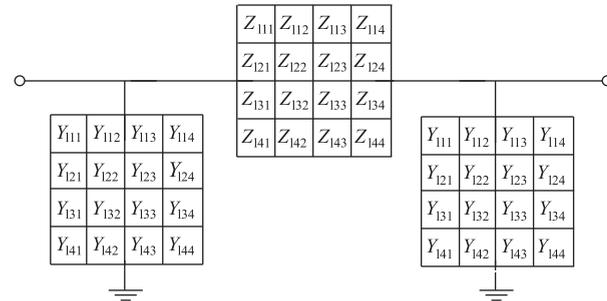


图1 多导体传输线II等值电路图

路串联阻抗参数矩阵为 Z_1 和并联导纳参数矩阵为 Y_1 分别表示为:

$$Z_1 = \left[\sum_{n=0}^{\infty} \frac{l^{2n+1}}{(2n+1)!} (ZY)^n \right] Z \quad (1)$$

$$Y_1 = Z_1^{-1} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{l^{2n}}{(2n)!} (ZY)^n$$

式中: Z 、 Y ——牵引网单位长度阻抗和导纳矩阵。

某段实际牵引网络的示意如图2所示。根据变电所、AT所、分区所的分布,该实际线路牵引网络可分割成7个切面。

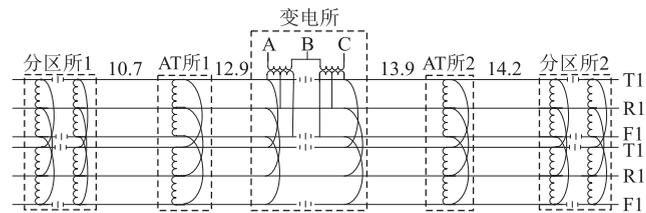


图2 全并联AT供电牵引网示意图(km)

各切面并联元件用导纳与电流源并联表示,若切面无电流源,则电流为0;相邻切面间传输线用II等值电路连接。那么,图2的牵引网可等效为链式网络结构,如图3所示,其中 Y_{sk} ($k=1,2,3\cdots 7$)为各切面并联元件导纳矩阵与相邻II等值电路并联导纳矩阵的叠加, Z_{sk} 为传输线II等值电路串联阻抗矩阵,牵引变电所串联阻抗为变电所分区连接阻抗。

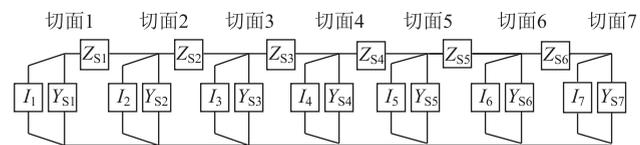


图3 AT供电牵引网链式网状结构图

由图3可知,链式网络结构可建立式(2)所示牵引网络节点导纳方程。当电流矩阵确定时,可计算各

切面节点电压。

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \\ I_4 \\ I_5 \\ I_6 \\ I_7 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{S1} + Z_{S1}^{-1} & -Z_{S1}^{-1} & & & & & \\ -Z_{S1}^{-1} & Z_{S1}^{-1} + Y_{S2} + Z_{S2}^{-1} & -Z_{S2}^{-1} & & & & \\ & -Z_{S2}^{-1} & Z_{S2}^{-1} + Y_{S3} + Z_{S3}^{-1} & -Z_{S3}^{-1} & & & \\ & & -Z_{S3}^{-1} & Z_{S3}^{-1} + Y_{S4} + Z_{S4}^{-1} & -Z_{S4}^{-1} & & \\ & & & -Z_{S4}^{-1} & Z_{S4}^{-1} + Y_{S5} + Z_{S5}^{-1} & -Z_{S5}^{-1} & \\ & & & & -Z_{S5}^{-1} & Z_{S5}^{-1} + Y_{S6} + Z_{S6}^{-1} & -Z_{S6}^{-1} \\ & & & & & -Z_{S6}^{-1} & Z_{S6}^{-1} + Y_{S7} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \\ U_3 \\ U_4 \\ U_5 \\ U_6 \\ U_7 \end{bmatrix} \quad (2)$$

1.2 高速列车牵引计算

单车牵引计算按照最大能力运行或定时节能运行操纵策略确定列车的工况序列,同时输出列车运行功率及速度模式曲线。在理想网压下,单车牵引可表示为^[8]:

$$\begin{aligned} \frac{dv}{ds} &= \frac{F_t(u_t, v) - F_b(u_b, v) - \omega(v) - \omega(s)}{Mv} \\ \frac{dt}{ds} &= \frac{1}{v} \end{aligned} \quad (3)$$

式中: v ——高速列车的运行速度;

s ——高速列车的运行距离;

t ——高速列车的运行时间;

M ——高速列车的总重量;

u_t ——高速列车牵引手柄的级位信息;

u_b ——高速列车制动手柄的级位信息;

$F_t(u_t, v)$ —— u_t 牵引级位下,速度为 v 时高速列车所发挥的牵引力;

$F_b(u_b, v)$ —— u_b 制动级位下,速度为 v 时高速列车所发挥的制动力;

$\omega(v)$ ——速度为 v 时高速列车的滚动运行阻力;

$\omega(s)$ ——距离为 s 处高速列车的线路附加阻力。

牵引和制动工况下,列车瞬时消耗功率可由牵引力与速度的乘积表示为:

$$P = \begin{cases} \frac{F_t v}{\eta} & u_t > 0 \\ \frac{F_b v}{\eta} & u_b > 0 \end{cases} \quad (4)$$

式中: η ——列车能量传递效率与功率因数的乘积。

2 网压对列车实际发挥功率的影响

为保证高速列车安全稳定运行,当网压波动超出

允许波动范围时,列车控制系统将限制列车实际输出的轮缘牵引力。

CRH3型动车组牵引力与网压关系如图4所示,当网压在25~29 kV之间波动时,列车实际输出轮缘牵引力等于其额定值(即需求牵引力);当网压低于25 kV或高于29 kV,列车实际输出轮缘牵引力开始减小,列车性能逐渐下降;当网压低于17.5 kV或高于31 kV,列车将丧失牵引力。

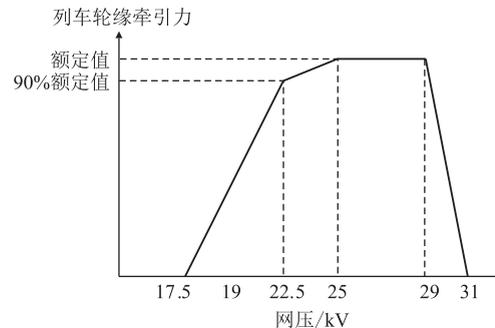


图4 网压对高速列车轮缘牵引力的影响图

若列车负荷过大或变电所容量过小,牵引工况下列车网压可能低于允许波动范围,而制动工况下列车网压可能高于允许波动范围。上述情况下,列车实际发挥牵引力或制动力会减少。由此,在式(3)中还需增加网压的影响。

在牵引网潮流计算时,列车实际发挥牵引力减小,一定速度下,列车实际消耗功率相应减小,参考式(4)。因此,参与牵引网潮流解算的列车功率将不应是理想网压下牵引计算输出的需求值,而应为网压影响下的实际发挥功率。

通过上述分析发现,在过低压或过高压工况下,网压将影响列车功率实际发挥。为更准确模拟列车运行过程,在牵引计算的同时需开展牵引网的潮流解算,根据网压判断列车的实际发挥功率。

3 供电系统的潮流解算

3.1 恒功率迭代法

高速列车采用交直交牵引传动系统,为保障列车的安全稳定运行,需提供恒定的功率。因此,在高速铁路供电系统潮流计算中常采用恒功率模型。采用恒功率模型时,利用高斯迭代法可解算牵引网潮流分布。列车初始等效电流源为列车功率与理想网压(27.5 kV)的比值。通过迭代计算,可得到不同功率列车在不同位置时,牵引网的潮流分布。

3.2 基于HLA/pRTI的耦合迭代法

但上述迭代过程无法将列车功率的实际发挥纳入计算。为此,本节将采用HLA仿真计算架构的pRTI处理仿真过程中的数据更新。pRTI采用单独线程对订阅对象数据循环监测:当对应通信模块更新对象数据时,将触发数据接收响应,对订阅对象数据实时更新。

利用HLA/pRTI耦合车网模型,可构建供电系统潮流解算平台,如图5所示。平台围绕HLA/pRTI进行数据交换:仿真计算时,基于数据库提供的电动车组网压-列车轮缘牵引力对应关系确定列车实际功率,由网压确定列车负荷电流,并通过HLA/pRTI传递至牵引网模拟单元,然后根据式(2)计算网络节点电压,通过HLA/pRTI更新列车网压、功率,再根据式(3)计算列车运行状态。

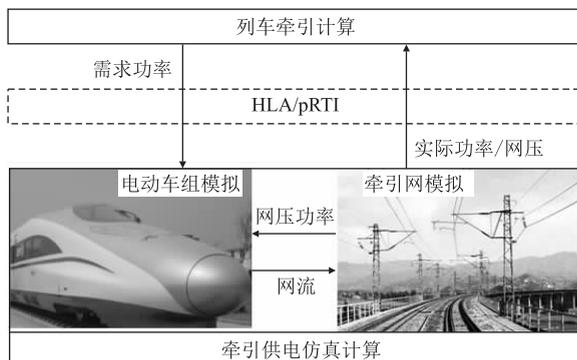


图5 车网耦合下供电系统潮流解算平台图

基于HLA/pRTI的耦合牵引网潮流计算过程如图6所示。首先,从任意时刻开始,利用列车模型,根据实际发挥功率和线路情况,计算得到列车的加速度和下一时刻列车需求功率。然后,将列车需求功率通过HLA/pRTI数据架构传递至牵引网侧,计算牵引网有功功率 P_m 和无功功率 Q_m 。接着根据列车端电压 U_{k-1} 确定列车实际有功功率 P 和无功功率 Q ,并更新节点电压矩阵得到新的车端电压 U_k 。通过迭代计算,

使相邻迭代计算次的电压差小于给定阈值 ε ,结束迭代计算。再次通过HLA/pRTI数据架构将牵引侧计算结果传递至车辆仿真模型,开始下一时间步的计算。根据上述流程,编写仿真软件进行算例验算。

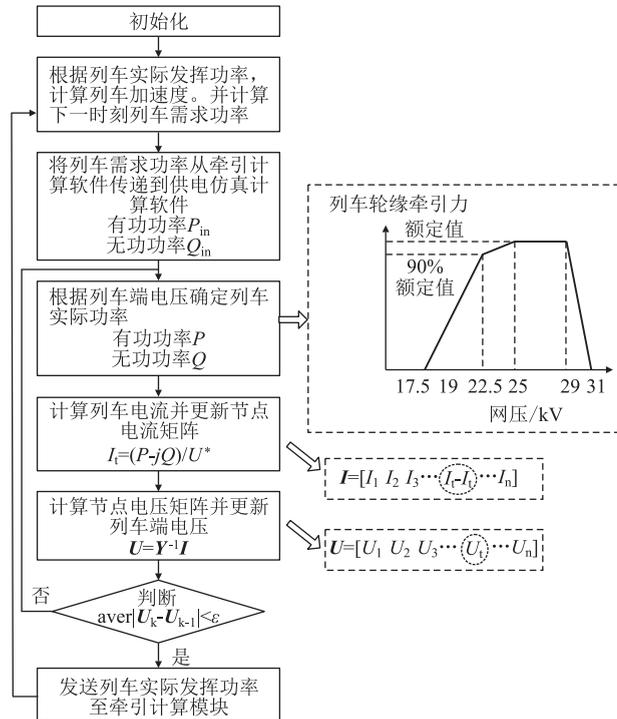


图6 基于HLA/pRTI的牵引网潮流耦合迭代计算流程图

4 算例与分析

以京沪高速铁路CRH380AL型动车组、枣庄—蚌埠区间公里标820~875 km区段为例进行计算分析。该段为全并联AT供电牵引网拓扑结构,在分区所和AT所内设置上、下行AT变压器,且AT变压器互为备用,AT变压器的阻抗参数为 $0.1 + j0.45\Omega$;变电所采用V/X牵引变压器,变压器参数如表1所示。假设列车额定功率为52.8 MVA,功率因数为0.97(滞后),忽略变电所分相中性区的影响。

表1 牵引变压器短路阻抗参数表

额定容量/MVA	额定电压/kV	短路阻抗/%		
		Z21	Z31	Z23-1
50/31.5/31.5	220/2(27.5)	10.5	10.5	13.69

分别以理想工况的恒功率和基于HLA/pRTI的实际功率耦合迭代解算列车从图2左分区所向右分区所运行的过程,迭代收敛误差为1V。

列车实际发挥功率、网压、网流、及变电所输出电压随列车位置的仿真计算结果分别如图7~图10所示。利用恒功率模型,会在867 km附近出现欠网压情

况。欠网压工况显著影响二者潮流计算的结果。

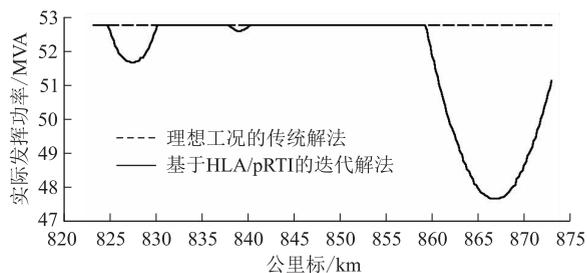


图7 列车实际发挥功率计算结果图

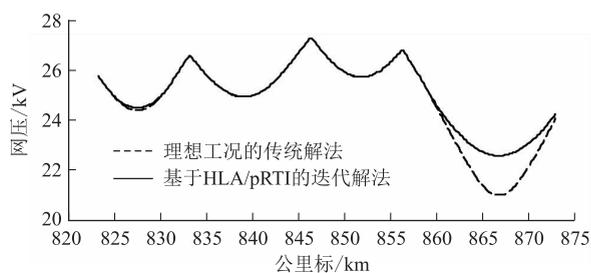


图8 列车网压计算结果图

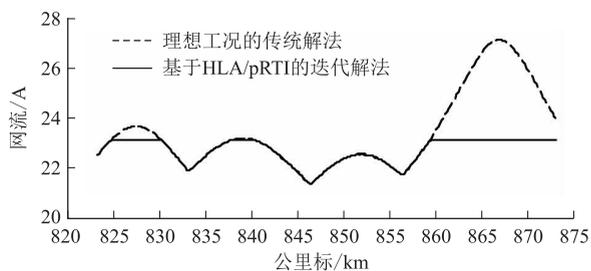


图9 列车网流计算结果图

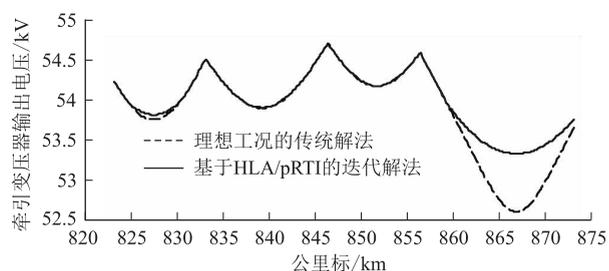


图10 变电所输出电压计算结果图

由图7可知,列车在运行至区段末端时,实际发挥功率出现显著的下降。此时,二者计算结果会出现较大的偏差,达到了5 MVA。在实际运行中,当列车网压低于25 kV时,考虑网压对功率的影响,列车实际发挥功率随电压降低而减小,此时列车网流保持恒定,抑制列车欠压工况下的过流现象。基于HLA/pRTI的车网耦合方法可更好地反映这一过程,二者的电流计算结果之差超过500 A(如图9所示)。基于列车实际功

率的计算得到的网压与牵引变压器输出电压均较恒功率计算结果更高(如图8和图10所示)。由于列车在欠网压时限制了功率,供电臂末端的欠电压现象会明显改善。考虑到网压对列车牵引功率的影响显著,对小容量变电所、大功率列车或多车运行工况,仿真分析应充分考虑网压对列车运行的影响。使用列车的恒功率模型会对设计方案产生较大的影响。

虽然,利用基于HLA/pRTI的车网耦合迭代法会得到更贴近于实际工况的结果,但在欠网压时计算迭代次数会明显增加:正常网压下,高斯潮流经过6次迭代即可实现收敛,这与传统方法计算软件速度相当;但在欠网压下,高斯潮流需经过12次以上迭代才能实现收敛;且随着电压误差的减小,收敛速度显著下降。从计算速度与效率来看,基于HLA/pRTI的耦合迭代解算方法还需进一步优化。

5 结论

本文在全并联AT供电网络的链式网状模型和列车牵引模型基础上,利用HLA/pRTI技术将车网耦合,实现了列车实际发挥功率受网压限制工况下的牵引网潮流分布计算。以京沪高速铁路枣庄—蚌埠区间某供电分区为算例,通过比较得到以下结论:

(1)基于HLA/pRTI的车网耦合迭代法可以在仿真计算中反映列车在欠电压时功率受限情况,相比利用列车的恒功率模型,能更贴近实际状况。

(2)列车在欠电压下限制输出功率,可改善供电臂末端的欠电压现象。

(3)基于HLA/pRTI的车网耦合迭代法在欠网压情况下会增加计算迭代次数,其计算效率需进一步的优化。

小容量变电所、大功率列车或多车运行工况更易出现欠网压情况,设计方案时应充分考虑网压变化的影响。

参考文献:

- [1] 张效楠, 严希. 埃塞亚吉铁路牵引变电所环进环出方案研究[J]. 高速铁路技术, 2018, 9(5): 65-68.
ZHANG Xiaonan, YAN Xi. A Study of Line in and Line out Proposal for the Traction Substation of Addis Ababa-Djibouti Railway in Ethiopia[J]. High Speed Railway Technology, 2018, 9(5): 65-68.
- [2] 崔衍渠. 长大坡度对高速铁路区间通过能力影响分析[J]. 高速铁路技术, 2017, 8(4): 19-23.
CUI Yanqu. Analysis on Impact of Long Steep Gradient on Passing Capacity in Section of High-speed Railway[J]. High Speed Railway

- Technology, 2017, 8(4): 19-23.
- [3] 何正友, 方雷, 郭东, 等. 基于AT等值电路的牵引网潮流计算方法[J]. 西南交通大学学报, 2008, 43(1): 1-7.
HE Zhengyou, FANG Lei, GUO Dong, et al. Algorithm for Power Flow of Electric Traction Network Based on Equivalent Circuit of AT-Fed System[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2008, 43(1): 1-7.
- [4] LEE Hanmin, LEE Changmu, JANG G, et al. Harmonic Analysis of the Korean High-speed Railway Using the Eight-Port Representation Model[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2006, 21(2): 979-986.
- [5] 吴命利. 电气化铁道牵引网的统一链式电路模型[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(28): 52-58.
WU Mingli. Uniform Chain Circuit Model for Traction Networks of Electric Railways[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(28): 52-58.
- [6] 刘志刚, 郝峰杰, 陈杰, 等. 城轨牵引供电系统车-地配合参数优化方法[J]. 北京交通大学学报, 2019, 43(1): 79-87.
LIU Zhigang, HAO Fengjie, CHEN Jie, et al. Optimization Method of Train-Ground Coordination Parameters for Urban Traction Power Supply System[J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2019, 43(1): 79-87.
- [7] 何俊文, 李群湛, 刘炜, 等. 交流牵引供电系统仿真通用数学模型及其应用[J]. 电网技术, 2010, 34(7): 25-29.
HE Junwen, LI Qunzhan, LIU Wei, et al. General Mathematical Model for Simulation of AC Traction Power Supply System and Its Application[J]. Power System Technology, 2010, 34(7): 25-29.
- [8] 崔恒斌, 冯晓云, 王青元, 等. 制动利用率对高速列车节能操纵策略的影响[J]. 铁道学报, 2012, 34(8): 13-19.
CUI Hengbin, FENG Xiaoyun, WANG Qingyuan, et al. Influence of Braking Efficiency on High-speed Train Energy-Saving Driving Strategies[J]. Journal of the China Railway Society, 2012, 34(8): 13-19.

(上接第11页)

- [8] 中铁第四勘察设计院集团有限公司. 鲁南高速铁路菏泽至曲阜段地面沉降专题研究报告[R]. 武汉: 中铁第四勘察设计院集团有限公司, 2019.
China Railway Siyuan Survey and Design Group Co., Ltd. Special Research Report on Land Subsidence from Heze to Qufu Section of South Shandong High-speed Railway [R]. Wuhan: China Railway Siyuan Survey And Design Group Co., Ltd., 2019.
- [9] 中铁第四勘察设计院集团有限公司. 古城煤矿采空区对鲁南高铁菏泽段安全影响评价[R]. 武汉: 中铁第四勘察设计院集团有限公司, 2019.
China Railway Siyuan Survey And Design Group Co., Ltd. Safety impact of Gucheng Coal Mine on from Heze to Qufu section of South Shandong High-speed Railway [R]. Wuhan: China Railway Siyuan Survey And Design Group Co., Ltd., 2019.
- [10] GB 51044-2014 煤矿采空区岩土工程勘察规范[S].
GB 51044-2014 Code for Investigation of Geotechnical Engineering in the Coal Mine Goaf[S].
- [11] GB 51044-2014 煤矿采空区岩土工程勘察规范[S].
GB 51044-2014 Code for Investigation of Geotechnical Engineering in the Coal Mine Goaf [S].
- [12] 穆文光, 韩广乐, 高雪莲, 等. 邻近深厚煤矿采空区对鲁南高速铁路的影响分析[J]. 铁道勘察, 2022, 48(1): 29-33.
MU Wenguang, HAN Guangle, GAO Xuelian, et al. Influence Analysis of Adjacent Deep Goaf of the Coal Mine on Rizhao-Lankao High-speed Railway[J]. Railway Investigation and Surveying, 2022, 48(1): 29-33.
- [13] 李睿. 铁路选线阶段采空区安全影响距离的研究[C]//2021年全国土木工程施工技术交流会论文集(下册), 2021: 70-73.
LI Run. Study on Safety Influence Distance of Goaf for Railway Route Selection [C]//Proceedings of 2021 National Civil Engineering Construction Technology Exchange Meeting (Volume II), 2021: 70-73.