

DOI: 10.19595/j.cnki.1000-6753.tces.200203

排流装置对直流牵引供电系统杂散 电流分布的影响

刘 炜¹ 郑 杰² 李 田³ 李思文¹ 杨 龙¹

(1. 西南交通大学电气工程学院 成都 611756

2. 成都地铁运营有限公司 成都 610031

3. 国网湖南省电力有限公司益阳供电分公司 益阳 413000)

摘要 直流牵引供电系统中,排流装置投入后究竟是改善还是恶化杂散电流一直饱受争议。为此,该文建立了考虑排流装置的钢轨回流系统模型,并结合叠加原理推广应用于多牵引变电所时的杂散电流与钢轨电位计算。通过 CDEGS 仿真和排流装置的投退实验验证了模型在计算杂散电流和钢轨电位方面的准确性。并在此基础上,分析了一次杂散电流和排流网收集杂散电流效率的影响因素。研究结果表明,国内轨道交通工程排流网收集杂散电流的效率偏低,排流装置投入后,一次杂散电流增大为未排流的 4.87 倍、5.34 倍,二次杂散电流增大为未排流时的 5.41 倍和 4.63 倍。

关键词: 直流牵引供电系统 杂散电流 排流装置 排流网

中图分类号: TM922.3

The Influence of Drainage Device on Stray Current Distribution in DC Traction Power Supply System

Liu Wei¹ Zheng Jie² Li Tian³ Li Siwen¹ Yang Long¹

(1. School of Electrical Engineering Southwest Jiaotong University Chengdu 611756 China

2. Chengdu Metro Operation Co. Ltd Chengdu 610031 China

3. Hunan Yiyang Electric Power Bureau Yiyang 413000 China)

Abstract In the DC traction power supply system, whether the stray current is improved or worsened after the drain device is put into use has always been controversial. Therefore, this paper establishes a rail reflux system model considering the drainage device, and applies it to the calculation of stray current and rail potential in multi-traction substations combined with the superposition principle. The accuracy of the model in calculating the stray current and rail potential is verified by CDEGS simulation and the drop-out experiment of the drain device. On this basis, the influence factors of the primary stray current and the efficiency of collecting stray current in the drainage net are analyzed. The results show that the efficiency of collecting stray current by the drainage net of domestic rail transit projects is relatively low. After the drainage device is put into operation, the primary stray current increases by 4.87 times and 5.34 times, and the secondary stray current increases by 5.41 times and 4.63 times.

Keywords: DC traction power supply system, stray current, drainage device, drainage net

0 引言

在直流牵引供电系统中,较高的钢轨对地过渡电阻只在轨-地绝缘良好且轨道环境干燥的情况下存在。实际上,由于钢轨对地过渡电阻有限,总会有部分钢轨回流泄漏至大地,这部分电流称为杂散电流。杂散电流可引起金属结构腐蚀^[1],也能造成变电器主变压器直流偏磁^[2]等。

目前,对杂散电流的研究主要分为两类:一是通过对回流系统进行建模,仿真分析杂散电流与钢轨电位的分布规律,研究其影响因素;二是研究防护治理措施,以尽可能减少其造成的负面影响。文献[3]中,蔡智超等建立了地铁杂散电流和地铁车辆运行特性之间的动态分布模型,分析了线路坡度、隧道长度、曲线半径等相关阻力对杂散电流和钢轨电压分布的影响。文献[4]中,C. A. Charalambous等在建模时考虑了扣件、绝缘垫、轨枕、绝缘块等结构参数,仿真分析了其对杂散电流分布规律的影响。文献[5]中,朱峰等建立了“钢轨-排流网-大地”三层网络模型,并结合 CDEGS 仿真,讨论分析了不均匀过渡电阻对杂散电流的影响。研究表明,不均匀过渡电阻虽然不会影响钢轨上的压降,但是会改变其分布情况,并且某处的钢轨对地过渡电阻突然减小会导致杂散电流的总量增加。文献[6]搭建了基于双向可变电阻模块的杂散电流与钢轨电位的实验平台,为研究杂散电流与钢轨电位动态分布规律提供了新思路。文献[7]中,杜贵府等建立了多牵引变电所多列车的动态仿真模型,研究了系统功率分配对钢轨电位的影响,并指出优化系统功率分配可有效控制系统钢轨电位异常升高问题,从而减小杂散电流。

杂散电流防护措施主要包括缩短变电所距离、增大钢轨对地过渡电阻、减小回流系统单位长度电阻和增加均流线等^[8-9]。文献[10]中,刘炜等提出了一种计及城市轨道交通逆变回馈装置的交直流统一供电计算方法,其仿真结果指出,可通过逆变回馈装置调节系统功率分配,改善钢轨电位,进而减小杂散电流。文献[11-12]中,顾靖达和王淼等更是提出利用电力电子技术,改进传统的牵引供电系统,从源头上解决杂散电流与钢轨电位问题。国内的地铁设计规范中明确规定,在无砟道床中应当设置排流网,作为杂散电流腐蚀防护的重要部分^[13]。文献[14]中,牟龙华等推导了考虑排流网情况下的杂散电流计算公式,并指出安装排流网后,钢轨泄漏的杂散电流

总量虽然不会减小,但是流入结构钢筋的杂散电流会明显减小。文献[15]通过 CDEGS 软件仿真分析杂散电流分布规律,得出了排流网距钢轨越近其收集效果越好、排流网与钢轨之间电气连接会加速钢轨与排流网的腐蚀等结论。文献[16]利用 Matlab 与有限元软件,仿真分析了二极管接地系统中不同土壤结构与排流网结构对杂散电流的影响。研究结果表明,当混凝土层电阻率为 $1\,000\Omega\cdot\text{m}$ 、下层土壤电阻率为 $300\Omega\cdot\text{m}$ 时,排流网收集杂散电流效率可达 86.32%。在国内,每个牵引所均设置了杂散电流排流装置,排流装置通过二极管在排流网、地和负母排之间形成单向导通。文献[17]指出,回流系统等效电路模型时不应只考虑正线,也应当考虑段场以及回流设备的行为过程。文献[18]指出,在浮地系统中,使用杂散电流排流装置,将使钢轨电位和杂散电流增加,所以并不推荐把排流二极管作为防治杂散电流的措施。

排流装置投入后究竟是改善还是恶化杂散电流一直存在争论,绝大部分国内地铁供电系统的排流装置都是“设而不投”。为此,本文首先建立包括排流装置在内的钢轨回流系统模型,综合分析排流装置对杂散电流分布的影响,并通过 CDEGS 仿真验证模型的可靠性;然后分析杂散电流排流系统各参数对一次杂散电流与排流网效率的影响;最后在地铁进行了单列车运行的排流装置投退实验,对比排流装置不投与投入情况下的钢轨电位分布与排流装置电流分布情况,分析排流装置对杂散电流分布的影响。

1 考虑排流装置的钢轨回流系统模型

为研究排流装置对杂散电流的影响,本文建立了以单边供电为基础的三层钢轨回流系统模型,如图 1 所示。线路的起点坐标为 0;牵引变电所距起

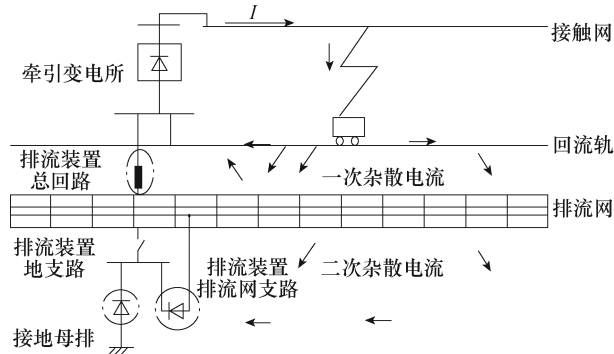


图 1 单边供电示意图

Fig.1 Schematic diagram of unilateral power supply

点的距离为 L_A ；忽略列车的长度，将其视作节点，列车距起点距离为 L_B ；正线全长为 L ；列车从该牵引变电所取流为 I 。在牵引变电所安装排流装置，其中地支路回流与排流网连接的支路回流之和为排流装置总回路电流。从钢轨泄漏至排流网或大地的总电流称为一次杂散电流，部分一次杂散电流通过排流网回到钢轨，另一部分从排流网泄漏至大地，此部分杂散电流称为二次杂散电流。

假设全线钢轨对排流网过渡电阻、排流网对地过渡电阻、钢轨纵向电阻、混凝土电阻率与土壤电阻率为等效均匀参数^[19]，且在符合实际情况下的可容许范围内变化^[20]。钢轨-排流网-大地回流系统微元结构如图 2 所示，取电流向右为正方向。

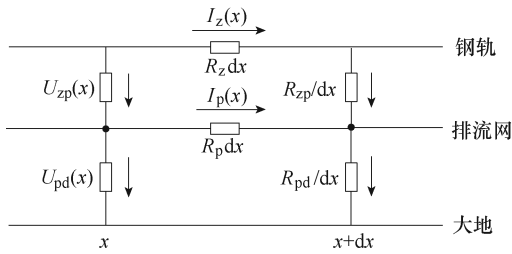


图 2 钢轨回流系统模型

Fig.2 Rail reflux system model

图 2 中， $I_z(x)$ 为位置 x 处的钢轨电流 (A)； $I_p(x)$ 为位置 x 处的排流网电流 (A)； $U_{zp}(x)$ 为位置 x 处的钢轨对排流网电压 (V)； $U_{pd}(x)$ 为位置 x 处的排流网对地电压 (V)； R_z 为钢轨纵向电阻 ($\text{m}\Omega/\text{km}$)； R_p 为排流网纵向电阻 (Ω/km)； R_{zp} 为钢轨对排流网过渡电阻 ($\Omega \cdot \text{km}$)； R_{pd} 为排流网对地过渡电阻 ($\Omega \cdot \text{km}$)。

由基尔霍夫定律有

$$\begin{cases} I_z(x) = C_1 e^{\lambda_1 x} + C_2 e^{-\lambda_1 x} + C_3 e^{\lambda_2 x} + C_4 e^{-\lambda_2 x} \\ I_p(x) = \frac{1}{R_p} \left[C_1 (R_z - R_{zp} \lambda_1^2) e^{\lambda_1 x} + \right. \\ \quad C_2 (R_z - R_{zp} \lambda_1^2) e^{-\lambda_1 x} + C_3 (R_z - R_{zp} \lambda_2^2) e^{\lambda_2 x} + \\ \quad \left. C_4 (R_z - R_{zp} \lambda_2^2) e^{-\lambda_2 x} \right] \\ U_{zp}(x) = -R_{zp} \cdot \\ \quad (C_1 \lambda_1 e^{\lambda_1 x} - C_2 \lambda_1 e^{-\lambda_1 x} + C_3 \lambda_2 e^{\lambda_2 x} - C_4 \lambda_2 e^{-\lambda_2 x}) \\ U_{pd}(x) = \frac{R_{pd}}{R_p} \left(-C_1 \lambda_1 a_1 e^{\lambda_1 x} + C_2 \lambda_1 a_1 e^{-\lambda_1 x} - \right. \\ \quad \left. C_3 \lambda_2 a_2 e^{\lambda_2 x} + C_4 \lambda_2 a_2 e^{-\lambda_2 x} \right) \end{cases} \quad (1)$$

其中

$$\begin{aligned} \lambda_1 &= -b + \sqrt{b^2 - 4R_z \frac{R_p}{R_{zp}} R_{pd}} \\ a_1 &= R_p + R_z - R_{zp} \lambda_1^2 \\ \lambda_2 &= -b - \sqrt{b^2 - 4R_z \frac{R_p}{R_{zp}} R_{pd}} \\ a_2 &= R_p + R_z - R_{zp} \lambda_2^2 \\ b &= \frac{R_z R_{pd} + R_p R_{zp} + R_p R_{pd}}{R_{zp}} R_{pd} \end{aligned}$$

式中， $C_1 \sim C_4$ 为根据边界条件确定的系数。

以一个牵引所单独作用为例，将线路始点、牵引所位置、列车位置、线路终点视为分割节点，全线划分为三个部分。Case1 为不投入排流装置的情况，三个部分的边界条件满足式 (2) ~ 式 (5)。

在线路始点有

$$\begin{cases} I_z(0) = 0 \\ I_p(0) = 0 \end{cases} \quad (2)$$

在牵引所 L_A 处有

$$\begin{cases} I_z(L_A^-) - I_z(L_A^+) = I \\ I_p(L_A^-) = I_p(L_A^+) \\ U_{zp}(L_A^-) = U_{zp}(L_A^+) \\ U_{pd}(L_A^-) = U_{pd}(L_A^+) \end{cases} \quad (3)$$

在列车 L_B 处有

$$\begin{cases} I_z(L_B^-) - I_z(L_B^+) = -I \\ I_p(L_B^-) = I_p(L_B^+) \\ U_{zp}(L_B^-) = U_{zp}(L_B^+) \\ U_{pd}(L_B^-) = U_{pd}(L_B^+) \end{cases} \quad (4)$$

在线路终点 L 处有

$$\begin{cases} I_z(L) = 0 \\ I_p(L) = 0 \end{cases} \quad (5)$$

Case2 为排流装置投入且导通的情况，考虑了排流装置限流电阻 R_{pai} 后，边界条件满足式 (2)、式 (4) ~ 式 (6)。

在牵引所 L_A 处有

$$\begin{cases} -\frac{U_{zp}(L_A^-)}{R_{pai}} + I_z(L_A^-) - I_z(L_A^+) = I \\ U_{zp}(L_A^-) = U_{zp}(L_A^+) \\ U_{pd}(L_A^-) = 0 \\ U_{pd}(L_A^+) = 0 \end{cases} \quad (6)$$

将不同情况下的边界条件代入式(1),解包含三组未知系数的方程组,即可求得各部分系数,进而求得全线电压与电流分布。

计及全线阳极区的泄漏电流,一次杂散电流 I_{s-zp} 和二次杂散电流 I_{s-pd} 分别为

$$I_{s-zp} = \int_{U_{zp}(x)>0} \frac{U_{zp}(x)}{R_{zp}} dx \quad (7)$$

$$I_{s-pd} = \int_{U_{pd}(x)>0} \frac{U_{pd}(x)}{R_{pd}} dx \quad (8)$$

定义排流网收集杂散电流的效率为

$$\eta = \frac{I_{s-zp} - I_{s-pd}}{I_{s-zp}} \times 100\% \quad (9)$$

当考虑多个牵引变电所的复杂供电情况时,可参考文献[21],将回流区间的“钢轨-排流网-地”分布式参数电路模型等效为集中参数模型,并把各牵引变电所看作电源单独作用,应用叠加原理计算集中参数模型中钢轨各节点的电位,进而获得杂散电流随时间变化的动态分布结果。

2 排流装置对杂散电流分布的影响

2.1 解析计算模型与 CDEGS 仿真模型参数设置

为验证模型在计算杂散电流与钢轨电位方面的有效性,本文利用 CDEGS 软件搭建了仿真模型,并将其仿真结果与本文模型的解析计算结果进行比较。CDEGS 仿真模型示意图如图 3 所示,模型中以半径为 48.00mm 的实心导体等效替代 P60 型钢轨^[22],并且以均匀布置的 10.00mm 涂层等效模拟钢轨绝缘垫等。当导体的涂层电阻率设置为 100.00kΩ·m、土壤层电阻率设置为 38.00Ω·m、混凝土层电阻率设置为 250.00Ω·m 时,利用文献[23]中钢轨对地过渡电阻测量方法,可以在 CDEGS 仿真模型中测试得到 R_{zp} 、 R_{pd} ,模型参数设置见表 1。

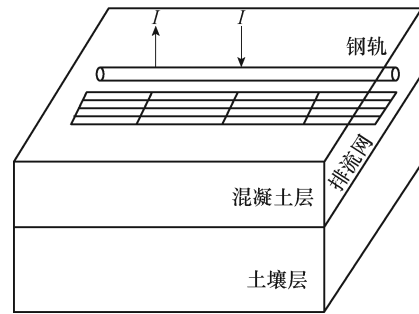


图 3 CDEGS 仿真模型示意图

Fig.3 CDEGS simulation schematic diagram

表 1 模型参数设置

Tab.1 Parameter setting of the models

参 数	数 值
I/A	600.00
L/km	20.00
L_A/km	1.00
L_B/km	2.00
$R_z/(m\Omega/km)$	18.25
$R_{zp}/(\Omega \cdot km)$	4.10
$R_{pd}/(\Omega \cdot km)$	0.50
R_{pai}/Ω	0.01
$R_p/(\Omega/km)$	0.10

2.2 排流装置投入前后杂散电流分布情况

对比分析 Case1 与 Case2 两种情况下,不同位置处的钢轨对排流网电压分布情况如图 4 所示;排流网对地电压分布情况如图 5 所示;钢轨电流分布情况如图 6 所示。图中,Case1-A 和 Case2-A 表示 CDEGS 仿真结果,Case1-B 和 Case2-B 表示模型的解析计算结果。

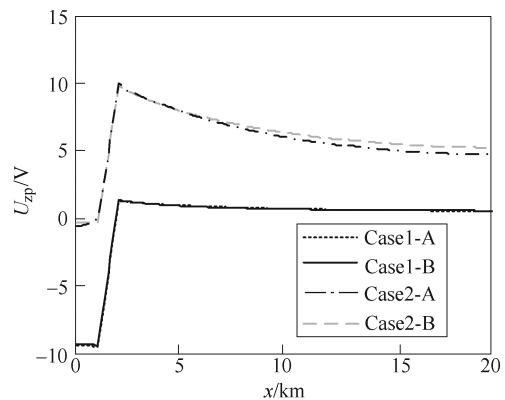


图 4 钢轨对排流网电压分布

Fig.4 Voltage of rail versus drainage net

由图 4 可知,全线钢轨电位的解析计算结果与 CDEGS 仿真结果在 Case1 中相差不超过 0.21V,在

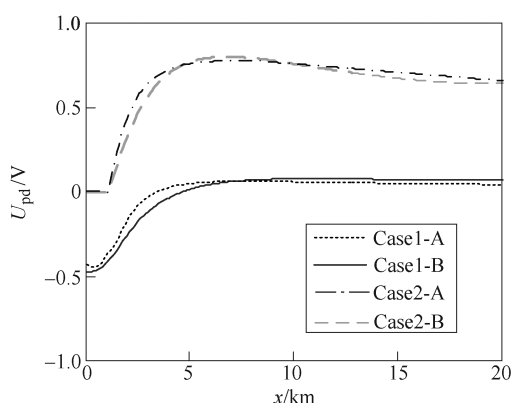


图 5 排流网对地电压分布

Fig.5 Voltage of drainage net versus the earth

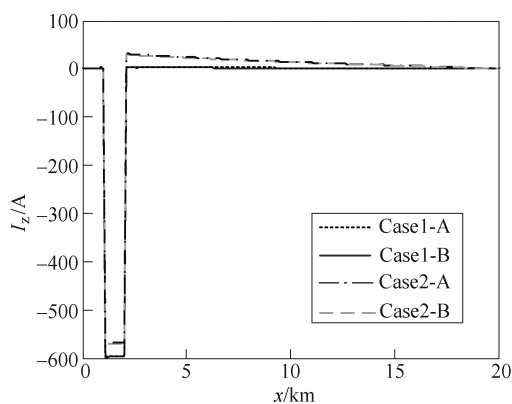


图 6 钢轨电流分布

Fig.6 Rail current distribution

Case2 中相差不超过 0.51V, 均不超过最高钢轨电位的 5.23%。由图 5 可知, 全线排流网电位的解析计算结果与 CDEGS 仿真结果在 Case1 与 Case2 中的差别均不超过 0.10V。由图 6 可知, 在 Case1、Case2 中, 钢轨电流的解析计算结果与 CDEGS 仿真结果的差别均不超过 2.58A, 仅占总回流的 0.43%。通过以上分析可知, 模型的解析计算结果误差较小, 可以用于计算杂散电流分布, 评估杂散电流大小。采用本模型计算的 I_{s-zp} 和 I_{s-pd} 以及 η 的计算结果见表 2。

表 2 杂散电流分布计算结果

Tab.2 Calculation results of stray current distribution

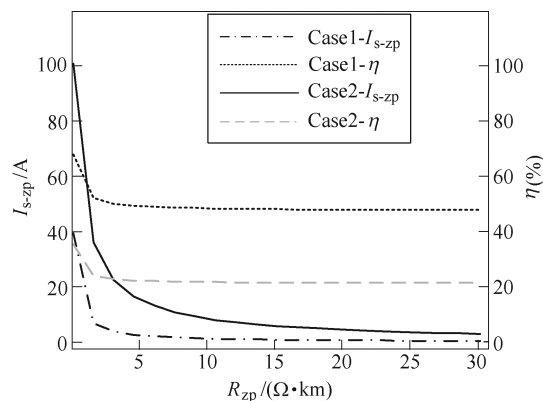
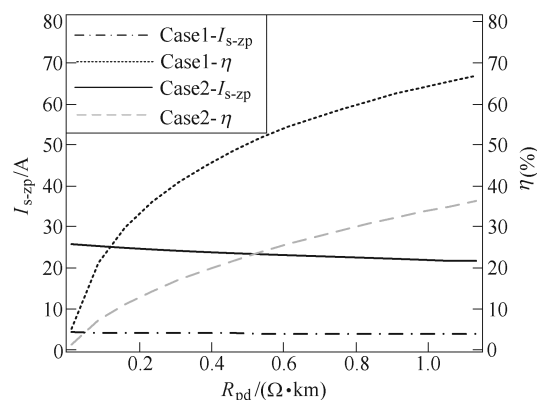
Case	I_{s-zp}/A	I_{s-pd}/A	$\eta(\%)$
1	3.28	2.10	35.98
2	29.86	26.08	12.66

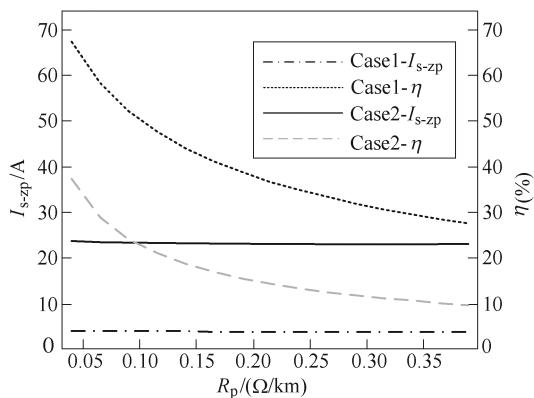
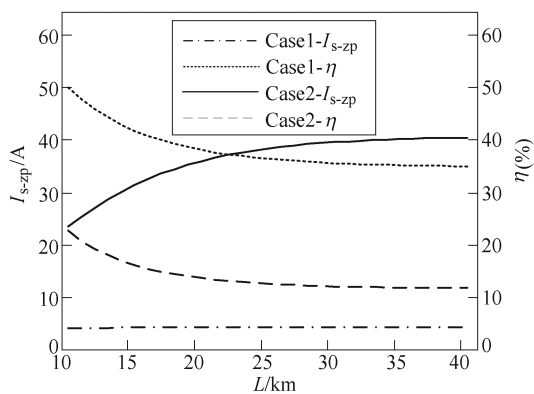
由图 4 可知, 在 Case1 中, 牵引变电所 $x=1.00\text{km}$ 处 U_{zp} 最低, 列车处的 U_{zp} 最高。在 Case2 中, $x=1.00\text{km}$ 处的 U_{zp} 抬升至 0 附近, 列车处的泄漏电流密度相比 Case1 增加, 全线的一次杂散电流相比

Case1 增加了 8.10 倍。由图 5 可知, 在 Case1 中, $x=4.60\text{km}$ 处为排流网正负电压分界点, 在 Case2 中, 全线的 U_{pd} 抬升, 阳极区的长度增加了 3.60km, I_{s-pd} 相比 Case1 增加了 11.42 倍, η 减小 23.32%。由图 6 可知, 由于全线钢轨通过焊接等方式相互连接, 全线钢轨实现电气连通, 部分牵引变电所的电流会从 2.00~20.00km 区间的阳极区钢轨泄漏。当投入排流装置后, 该部分的杂散电流将会增加 7.82 倍, 且线路长度影响一次杂散电流大小。

3 一次杂散电流与排流网效率的影响因素

不同情形下, R_{zp} 、 R_{pd} 、 R_p 、 L 对 I_{s-zp} 和 η 的影响如图 7 所示。钢轨扣件的绝缘性能、污垢等会影响钢轨对排流网过渡电阻值。当 $R_p=0.10\Omega/\text{km}$ 、 $R_{pd}=0.50\Omega\cdot\text{km}$ 、 $L=20.00\text{km}$ 时, R_{zp} 对 I_{s-zp} 与 η 的影响如图 7a 所示。在 Case1 和 Case2 中, 随着 R_{zp} 的增加, I_{s-zp} 显著减小, 而 η 逐渐减小并趋于稳定。其原因在于, I_{s-zp} 与 I_{s-pd} 虽然都有所增长, 但是 I_{s-zp} 增长的倍数较小。在 Case1 中, 当 $R_{zp}>15\Omega\cdot\text{km}$ 后, I_{s-zp} 不超过 1.00A, η 趋近于 48%, 由此可知, 当钢轨对排流网过渡电阻保持较高值时, 约一半的杂散电流可以通过排流网收集。而在 Case2 中, 即使

(a) R_{zp} 的影响(b) R_{pd} 的影响

(c) R_p 的影响(d) L 的影响图7 不同情形下, R_{zp} 、 R_{pd} 、 R_p 、 L 对 I_{s-zp} 和 η 的影响Fig.7 The effect of R_{zp} , R_{pd} , R_p , L on I_{s-zp} and η at different scenarios

保持较高的钢轨对排流网过渡电阻值时, η 仅为 21%。当 $R_{zp}=15\Omega\cdot\text{km}$ 时, I_{s-zp} 达 5.77A, 为不投排流装置时的 6.72 倍, I_{s-pd} 为不投排流装置时的 10.15 倍。

排流网混凝土电阻率、土壤类型、土壤湿度会改变排流网对地过渡电阻。当 $R_{zp}=3.00\Omega\cdot\text{km}$ 、 $R_p=0.10\Omega/\text{km}$ 、 $L=20.00\text{km}$ 时, R_{pd} 对 I_{s-zp} 与 η 的影响如图 7b 所示。在 Case1 和 Case2 中, I_{s-zp} 均随 R_{pd} 增大而缓慢减小, 而 η 随 R_{pd} 增加而显著递增。在 Case1 中, $R_{pd}>1.00\Omega\cdot\text{km}$ 后, 排流网效率可增加至 65.5%, 保持较高的排流网对地过渡电阻可减小二次杂散电流, 减小对管道腐蚀。而在 Case2 中, η 仍不超过 50.00%, R_{pd} 从 $1.00\Omega\cdot\text{km}$ 减小至 $0.30\Omega\cdot\text{km}$ 时对 η 的影响小于 $R_{pd}=1.00\Omega\cdot\text{km}$ 时投入排流装置的影响。

R_p 由道床钢筋电阻和道床块间的连接电缆电阻组成。道床之间连接端子采用两根 95mm^2 电缆连接, 可按照铜电阻率计算其电阻值。排流网截面大小、排流网施工质量、道床之间的电气连接都极大地影响了排流网纵向电阻。当 $R_{zp}=3.00\Omega\cdot\text{km}$ 、 $R_{pd}=$

$0.50\Omega\cdot\text{km}$ 、 $L=20.00\text{km}$ 时, R_p 对 I_{s-zp} 与 η 的影响如图 7c 所示。在 Case1 和 Case2 中, Case2 情况下排流网收集效率较低, η 约为 Case1 的一半。随着 R_p 的增加, I_{s-zp} 的变化分别不超过 0.30A 和 0.80A, 但是 η 随 R_p 的增加而显著递减。在 Case1 中, $R_p<0.10\Omega/\text{km}$ 后, η 可超过 50%, 保持排流网良好贯通能有效提高排流网收集杂散电流的效率。

由于钢轨全线电气连通, 线路长度也会对杂散电流产生影响。当 $R_{zp}=3.00\Omega\cdot\text{km}$, $R_{pd}=0.50\Omega\cdot\text{km}$, $R_p=0.10\Omega/\text{km}$ 时, L 对 I_{s-zp} 与 η 的影响如图 7d 所示。随着 L 的增大, I_{s-zp} 增大, η 逐渐减小, 减小趋势逐渐平缓。Case2 情况下的 L 对 I_{s-zp} 影响较大, 即在排流装置投入情况下, 一次杂散电流更易受线路长度影响, 相比不排流情况, I_{s-zp} 增加 7 倍以上。

4 单列车运行时的排流装置投退实验

4.1 单列车运行时的排流装置投退实验过程

课题组在非运营期间于某地铁线路进行了单列车运行时投入排流装置的验证实验。实验过程中, 直流牵引网切换至仅有 A、B 两牵引所供电, 列车于始所 A 出发, 途经 B 所, 到达 C 所, 后于同一行折返至 A 所, 每所停留数秒。A、B 两所相距 1.53km, 线路全长 $L=41.00\text{km}$ 。同时, 在 A、B 两所中采用 16 通道的同步采集装置监测各馈线电流、钢轨电位、排流装置总回路电流以及排流装置支路回流, 供电系统示意图如图 8 所示。流经列车的电流以及牵引网网压通过车载运行记录系统测量。不同位置处监测信号采用 4G 网络同步授时。

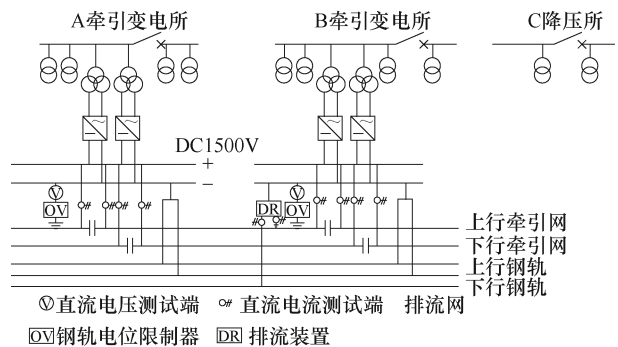


图8 供电系统示意图

Fig.8 Schematic diagram of power supply system

当列车在 B、C 两所之间, 按照同一运行工况共折返两次, 第一次运行条件为全线排流装置退出, 第二次运行条件为 B 所排流装置投入。比较两种情况下, A、B 所的钢轨电位和 B 所排流装置电流, 分别如图 9~图 11 所示。

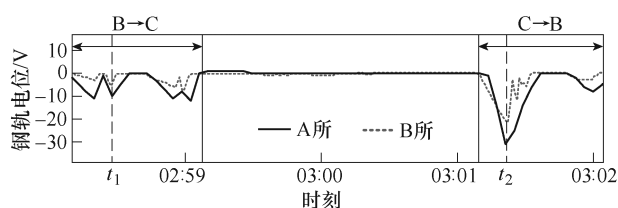


图 9 全线排流装置退出时, A、B 所钢轨电位分布

Fig.9 The rail potential of station A and station B when the drainage device of the whole line is withdrawn

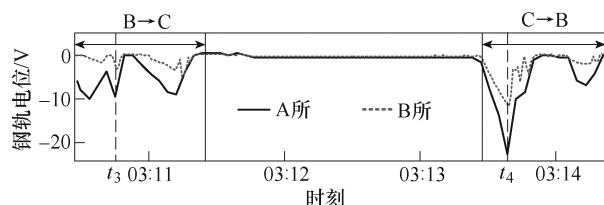


图 10 B 所排流装置投入, A、B 所钢轨电位分布

Fig.10 The rail potential distribution of station A and station B, when the drain device of B is put into operation



图 11 B 所排流装置投入时排流装置电流分布

Fig.11 The current distribution of the drainage device when the drainage device of station B is put into operation

由图 10 和图 11 可知, 排流装置总回流、地支路回流的尖峰时刻与 A、B 所钢轨电位峰谷时刻对应, 同时也位于列车牵引取流出现尖峰时刻附近。取时刻 $t_1 \sim t_4$ 的测试记录, 测量数据见表 3, 其中 t_1 、 t_3 时, 列车处于距 B 所 0.22km 处; t_2 、 t_4 时, 列车处于距 B 所 1.43km 处。

表 3 典型时刻测量数据

Tab.3 Typical moment measurement data

时刻	列车 取流/A	供电电流/A		钢轨电位/V		排流装置电流/A	
		A 所	B 所	A 所	B 所	总回流	地支路
t_1	1 131.2	249.5	881.7	-9.80	-4.10	—	—
t_2	1 076.6	296.2	780.4	-31.47	-23.51	—	—
t_3	1 150.2	344.5	805.7	-9.33	-1.10	11.97	11.25
t_4	1 178.2	448.5	729.7	-21.34	-10.16	66.38	64.03

由表 3 可知, 排流高峰时刻, 排流装置地支路回流占排流装置总回流的比例为 93.98%, 96.46%。由于司机操作的较小差别, 两种工况下, 列车处于

同一位置的取流略有差异。

4.2 排流装置投退实验杂散电流分析

课题组对该线路区段的 R_{zp} 进行实际测量, 其结果为 $4.10\Omega \cdot \text{km}$ 。同时, 对该线路区段的多块排流网 (12.5m 道床块) 纵向电阻进行抽检, 单块排流网道床块的纵向电阻在 $1 \sim 2.5\text{m}\Omega$ 之间分布, 道床块之间电缆的螺栓连接也会加大 R_p , 在本算例中 R_p 取 $0.20\Omega/\text{km}$ 。

排流装置投入后的杂散电流分布可以看作是 A 牵引所单独作用和 B 牵引所 (t_3 、 t_4 时刻考虑排流装置投入) 单独作用的杂散电流分布模型的计算结果进行叠加。

B 所单独作用时的杂散电流分布情况如图 12 所示。如果忽略 $0 \sim 1.53\text{km}$ 范围内的一次杂散电流和二次杂散电流, 则实验过程中排流装置总支路电流近似为 I_{s-zp} , 排流装置地支路电流可近似为 I_{s-pd} 。B 牵引所单独作用时, t_3 、 t_4 时刻, η 约为 6.02%、3.54%。 R_{pd} 变化情况下, 采用 Case2 的模型计算结果得到的排流网收集杂散电流的效率与测量值之间的误差 ρ 如图 13 所示。

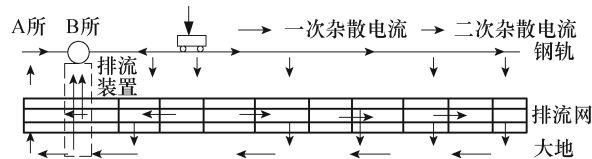
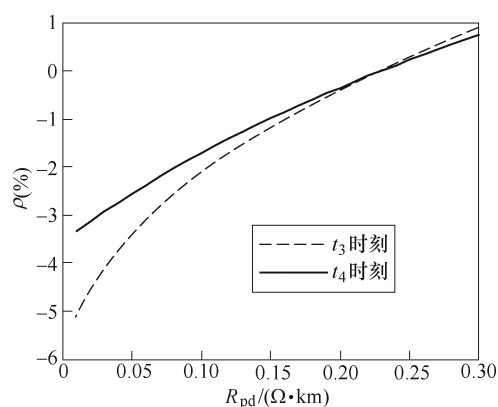


图 12 B 所单独作用时杂散电流分布情况

Fig.12 Stray current distribution when B operates alone

图 13 B 所单独作用时, η 的模型计算结果与测量值的误差Fig.13 The error of the model calculation result and the measurement value of η when station B operates alone

钢轨电位与排流装置电流计算结果见表 4。由表 4 结果可知, 钢轨电位模型计算结果与表 3 中测量值误差最大为 1.03V, 为实际钢轨电位的 9.94%;

表 4 钢轨电位与排流装置电流计算结果

Tab.4 Calculation result of rail potential and drainage device

时刻	A 所单独作用				B 所单独作用						A、B 所共同作用			
	A 所钢轨 电位/V	B 所钢轨 电位/V	I_{s-zp}/A	$\eta(\%)$	A 所钢轨 电位/V	B 所钢轨 电位/V	排流装置 总回流/A	排流装置 地支路电流/A	I_{s-zp}/A	$\eta(\%)$	A 所钢轨 电位/V	B 所钢轨 电位/V	I_{s-zp}/A	$\eta(\%)$
t_1	-7.42	-0.58	1.44	16.77	-3.14	-3.15	—	—	1.20	17.65	-10.56	-3.73	2.64	16.92
t_2	-14.35	-6.30	4.53	12.34	-17.35	-17.43	—	—	8.75	13.02	-31.70	-23.74	13.28	12.77
t_3	-10.25	-0.80	2.00	16.77	-0.11	-0.11	10.82	10.19	10.86	6.02	-10.36	-0.91	12.86	7.75
t_4	-21.73	-9.46	6.86	12.34	-0.61	-0.61	61.17	59.15	61.39	3.54	-22.34	-10.07	70.90	7.96

排流装置总回流计算结果误差最大为 5.21A，为实际排流装置总回流的 7.85%；地支路电流误差最大为 7.62%。模型计算结果可信。

排流装置未投入时，列车取流较大的典型时刻 t_1 、 t_2 ，排流网收集杂散电流的效率 η 为 16.92%、12.77%。 η 较低的原因分析如下：单块道床块的纵向电阻较设计要求值偏大，采用螺栓连接短道床块钢筋笼，连接电阻也增大了 R_p 。国外的做法，排流网采用绝缘安装的贯通裸导线与道床钢筋笼焊接的形式，加强排流网的电气连通性能，值得国内考虑。另外，应加强排流网设计和施工时的绝缘安装性能，提高 R_{pd} 。

排流装置投入时， t_3 、 t_4 时刻，当 B 所单独作用时，排流装置总回流占到了一次杂散电流的 99.6%。当 A、B 所共同作用时，一次杂散电流显著增大为未排流时的 4.87 倍、5.34 倍。二次杂散电流增大为未排流时的 5.41 倍、4.63 倍。 η 降低至 7.75%、7.96%。排流装置投入后，一次杂散电流和二次杂散电流都显著增大。

5 结论

本文采用理论建模、CDEGS 仿真验证和现场实测验证的方法研究了排流装置对直流牵引供电系统杂散电流分布的影响，得出了以下结论：

1) 本文建立了考虑排流装置的钢轨回流系统模型，应用叠加原理计算钢轨电位与杂散电流分布，通过一次杂散电流 I_{s-zp} 、二次杂散电流 I_{s-pd} 和排流网收集杂散电流的效率 η 来分析排流装置的投入对杂散电流分布的影响。该模型的计算结果与 CDEGS 仿真模型分析结果吻合。

2) I_{s-zp} 主要受 R_{zp} 、 L 、排流装置是否排流的影响， η 主要受 R_p 、 R_{pd} 与排流装置是否排流的影响。当 η 较低时，可以通过减小排流网纵向电阻或增大排流网对地过渡电阻来提高。投入排流装置后 η 降

低，一次杂散电流显著增加。

3) 现场实验和分析表明，受 R_p 和 R_{pd} 影响，国内轨道交通工程排流网收集杂散电流的效率 η 偏低。排流装置投入后， I_{s-zp} 显著增大为未排流时的 4.87 倍、5.34 倍。 I_{s-pd} 增大为未排流时 5.41 倍、4.63 倍。

参考文献

- [1] 张宏亮, 金海, 张丝钰, 等. 纳米氧化石墨烯/环氧树脂复合材料的电极极化现象[J]. 电工技术学报, 2018, 33(23): 5591-5599.
Zhang Hongliang, Jin Hai, Zhang Siyu, et al. Electrode polarization in graphene oxide/epoxy resins nanocomposites[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(23): 5591-5599.
- [2] 李晓华, 褚福源, 时胜寒. 轨道交通对沿线 220kV 变电站中性点电流及振动影响[J]. 电工技术学报, 2021, 36(增刊 2): 423-429, 437.
Li Xiaohua, Chu Fuyuan, Shi Shenghan. Influence of rail transit on neutral current and vibration of 220kV substation along the line[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36(S2): 423-429, 437.
- [3] 蔡智超, 程浩, 林知明. 考虑地铁车辆牵引因素下杂散电流的规律研究[J]. 电工电能新技术, 2018, 37(8): 82-88.
Cai Zhichao, Cheng Hao, Lin Zhiming. Study of stray current considering traction factors of rail vehicles[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2018, 37(8): 82-88.
- [4] Charalambous C A. Comprehensive modeling to allow informed calculation of DC traction systems' stray current levels[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2017, 66(11): 9667-9677.
- [5] 朱峰, 李嘉成, 曾海波, 等. 城市轨道交通轨地过渡电阻对杂散电流分布特性的影响[J]. 高电压技术,

- 2018, 44(8): 2738-2745.
- Zhu Feng, Li Jiacheng, Zeng Haibo, et al. Influence of rail-to-ground resistance of urban transit systems on distribution characteristics of stray current[J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(8): 2738-2745.
- [6] 杨晓峰, 薛皓, 郑琼林. 基于双向可变电阻模块的杂散电流与轨道电位动态模拟系统[J]. 电工技术学报, 2019, 34(13): 2793-2805.
- Yang Xiaofeng, Xue Hao, Trillion Q Zheng. Stray current and rail potential dynamic simulation system based on bidirectional variable resistance module[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(13): 2793-2805.
- [7] 杜贵府, 田静, 王玉琦, 等. 城轨供电系统功率分配影响下钢轨电位异常升高研究[J]. 铁道标准设计, 2020, 64(5): 137-143.
- Du Guifu, Tian Jing, Wang Yuqi, et al. Effect of power distribution on abnormal rise of rail potential in urban rail power supply system[J]. Railway Standard Design, 2020, 64(5): 137-143.
- [8] Lobo Pires C. What the IEC tells us about stray currents: guidance for a practical approach[J]. IEEE Electrification Magazine, 2016, 4(3): 23-29.
- [9] Sahil Bhagat, 杨晓峰, 王淼, 等. 城市轨道交通杂散电流治理的综述与评估[J]. 电工技术学报, 2021(23): 4851-4863.
- Sahil Bhagat, Yang Xiaofeng, Wang Miao, et al. Review and evaluation of stray current mitigation for urban rail transit[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021(23): 4851-4863.
- [10] 刘炜, 娄颖, 张戡, 等. 计及城市轨道交通逆变回馈装置的交直流统一供电计算[J]. 电工技术学报, 2019, 34(20): 4381-4391.
- Liu Wei, Lou Ying, Zhang Jian, et al. Unified AC/DC power supply calculation taking into account urban rail inverter feedback devices[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(20): 4381-4391.
- [11] 顾靖达, 杨晓峰, 郑琼林, 等. 基于不同接地方式与列车工况的负阻变换器牵引供电系统轨道电位与杂散电流[J]. 电工技术学报, 2021, 36(8): 1703-1717.
- Gu Jingda, Yang Xiaofeng, Trillion Q Zheng, et al. Rail potential and stray current on negative resistance converter traction power system under different grounding schemes and train conditions[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36(8): 1703-1717.
- [12] 王淼, 杨晓峰, 李世翔, 等. 城市轨道交通直流自耦变压器牵引供电系统故障保护研究[J]. 电工技术学报, 2022, 37(4): 976-989.
- Wang Miao, Yang Xiaofeng, Li Shixiang, et al. Fault protection of DC auto-transformer traction power supply system for urban rail transit[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(4): 976-989.
- [13] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 地铁设计规范: GB 50157-2013[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2014.
- [14] 牟龙华, 史万周, 张明锐. 排流网情况下地铁杂流分布规律的研究[J]. 铁道学报, 2007, 29(3): 45-49.
- Mu Longhua, Shi Wanzhou, Zhang Mingrui. Metro stray current distribution with current drainage net[J]. Journal of the China Railway Society, 2007, 29(3): 45-49.
- [15] Lin Yanhua, Li Kunpeng, Su Mengmeng, et al. Research on stray current distribution of metro based on numerical simulation[C]//2018 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility and 2018 IEEE Asia-Pacific Symposium on Electromagnetic Compatibility, Suntec City, Singapore, 2018: 36-40.
- [16] Zaboli A, Vahidi B, Yousefi S, et al. Evaluation and control of stray current in DC-electrified railway systems[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2017, 66(2): 974-980.
- [17] 刘炜, 杨龙, 李国玉, 等. 计及回流系统设备行为过程的钢轨电位动态仿真[J]. 电工技术学报, 2022, 37(4): 1000-1009.
- Liu Wei, Yang Long, Li Guoyu, et al. Dynamic simulation of rail potential considering the equipment behavior process of recirculation system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(4): 1000-1009.
- [18] (德)基布岭, 著. 电气化铁道接触网[M]. 中铁电气化局集团有限公司, 译. 北京: 中国电力出版社, 2004.
- [19] Charalambous C A, Aylott P, Buxton D. Stray current calculation and monitoring in DC mass-transit

- systems: interpreting calculations for real-life conditions and determining appropriate safety margins[J]. IEEE Vehicular Technology Magazine, 2016, 11(2): 24-31.
- [20] Bongiorno J, Boschetti G, Mariscotti A. Low-frequency coupling: phenomena in electric transportation systems[J]. IEEE Electrification Magazine, 2016, 4(3): 15-22.
- [21] 刘炜, 尹乙臣, 潘卫国, 等. 直流动态杂散电流在分层介质中的扩散模型[J]. 电工技术学报, 2021, 36(23): 4864-4873.
- Liu Wei, Yin Yichen, Pan Weiguo, et al. Diffusion model of DC dynamic stray current in layered soil[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36(23): 4864-4873.
- [22] 蔡力, 王建国, 樊亚东, 等. 地铁走行轨对地过渡电阻杂散电流分布的影响[J]. 高电压技术, 2015, 41(11): 3604-3610.
- Cai Li, Wang Jianguo, Fan Yadong, et al. Influence of the track-to-earth resistance of subway on stray current distribution[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(11): 3604-3610.
- [23] 国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. 轨道交通 地面装置 电气安全、接地和回流 第 2 部分: 直流牵引供电系统杂散电流的防护措施: GB/T 28026.2-2018[S]. 北京: 中国标准出版社, 2018.

作者简介

刘 炜 男, 1982 年生, 副教授, 研究方向为牵引供电系统理论与仿真、杂散电流与钢轨电位、再生制动能量利用。

E-mail: liuwei_8208@swjtu.cn (通信作者)

郑 杰 男, 1977 年生, 高级工程师, 研究方向为城市轨道交通供电系统运行与维保。

E-mail: 14629435@qq.com

(编辑 崔文静)