

单向导通装置和钢轨电位限制装置 对钢轨电位影响的仿真研究^{*}

唐靖坤 刘 炜^{**} 王沛沛 许嘉轩

(西南交通大学电气工程学院, 610031, 成都//第一作者, 硕士研究生)

摘 要 针对国内地铁运营时钢轨电位过高和钢轨电位限制装置频繁动作的问题,从直流牵引供电系统建模的角度出发,通过多种情况下钢轨电位的仿真计算,研究了单向导通装置和钢轨电位限制装置对正线钢轨电位的影响规律。仿真结果表明,单相导通装置的导通会使正线和车辆段的钢轨电位升高,钢轨电位限制装置的闭合会抬高其它较远处区间的钢轨电位。

关键词 直流牵引供电系统; 钢轨电位; 单向导通装置; 钢轨电位限制装置

中图分类号 U284.23⁺¹

DOI:10.16037/j.1007-869x.2020.01.021

Simulation of the Track Unilateral Connecting Device and Over-voltage Protection Device Influence on Rail Potential

TANG Jingkun, LIU Wei, WANG Peipei, XU Jiaxuan

Abstract Aiming at the high rail potential and frequent actions of rail over-voltage protection device during the metro operation in China, from the perspective of DC traction power supply system modeling, the influence of track unilateral connecting device and rail over-voltage protection devices on rail potential of main lines is studied through the simulative calculation of rail potential under different conditions. The results show that the rail potential on main lines is higher when the track unilateral connecting devices are reversely conducted, and the actions of rail over-voltage protection device will increase the rail potential in other distant regions.

Key words DC traction power supply system; rail potential; track unilateral connecting device; rail over-voltage protection device

Author's address School of Electrical Engineering, Southwest Jiaotong University, 610031, Chengdu, China

我国城市轨道交通多采用直流牵引供电系统。回流钢轨的电位过高将威胁到人员安全。所以在车站和停车场等处的钢轨均设有电位限制装置(OVPD),可在钢轨电位过高时动作,使钢轨接地。目前,城市轨道交通正常运营时,钢轨电位过高、OVPD频繁动作的问题普遍存在。

对于钢轨电位问题的产生原因和治理措施,国内外已有大量研究。文献[1-2]认为去除不同线路间的阻抗连接器可以降低钢轨电位;文献[3]指出不接地系统的杂散电流最小,但钢轨电位最高;文献[4]证实了列车在加速和制动工况下的钢轨电位高于其它工况,而且杂散电流会使钢轨电位超出限值;文献[5]提出了一种新型升压电路,可将部分牵引回流升压后反送回接触网,减小钢轨牵引回流,降低钢轨电位,但该装置目前仅停留在理论阶段;文献[6]证明了跨区间传输电流所占列车总牵引电流比例的增加,会使钢轨电位升高。文献[7-8]提出OVPD和排流柜配合可降低钢轨电位和杂散电流。目前普遍认为,牵引回流和回路阻抗是影响钢轨电位的主要因素^[9-10],但对牵引回流的流电路径认识不够,回路阻抗也很难确定,还需要进一步的研究。

本文从直流牵引供电系统建模的角度,建立了轨道回流系统计算模型,结合了国内某地铁的实际情况,分析了单向导通装置(以下简称“单导”)和OVPD对钢轨电位的影响。

1 问题的提出

1.1 单导对钢轨电位的影响

单导和绝缘节,并联安装于有砟轨道和无砟轨

^{*} 国家自然科学基金青年基金项目(51607168)

^{**} 通信作者

道的分界处(咽喉区),以及无砟轨道和列检库的分界处,其作用是防止正线列车牵引回流进入车辆段和列检库,从而泄漏杂散电流。图 1 是单导结构示意图。单导主要由 1 个隔离开关、多个并联二极管及多个反并联的 GTO(门极可关断晶闸管)组成。隔离开关在车辆段牵引所停电时闭合,保证在车辆段列车由正线牵引所支援供电时的回流通路畅通。二极管(正向支路)使流入车辆段的杂散电流可以通过钢轨返回正线。反并联 GTO(反向支路)在两侧钢轨电压差过大时导通,防止在列车车轮跨过单导时,因两侧钢轨电压差过大导致的打火现象。

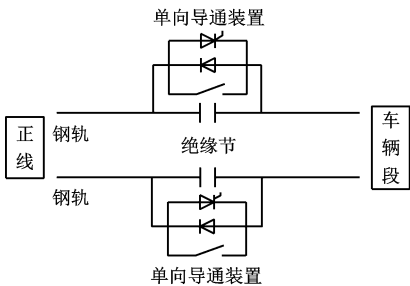


图 1 单导结构示意图

单导的正向导通支路能使杂散电流从列检库的接地电阻传导到车辆段钢轨,并通过单导回到正线牵引所负极^[11]。杂散电流 I_s 在车辆段的流路径如图 2 所示。车辆段钢轨电位被钳制为负值,当其幅值较大时,可引起车辆段 OVPD 钢轨电位负向动作。国内某地铁做过试验,断开车辆段内的单导,车辆段 OVPD 每小时动作次数由原来的 44 次大幅下降。

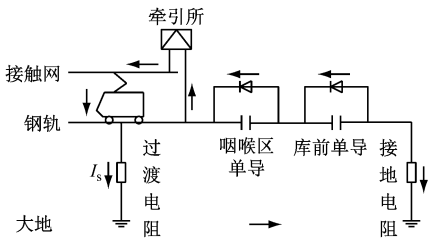
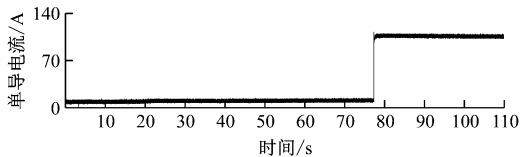


图 2 杂散电流在车辆段的流路径

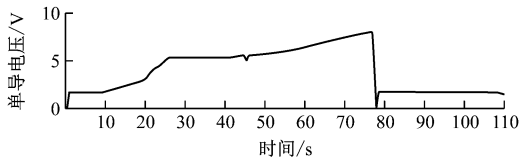
咽喉区单导在正线钢轨电位高于车辆段钢轨电位时承受反向电压。若反向电压大于单向导通装置反向导通整定值,单导将反向导通。

对某地铁线路咽喉区单导做反向导通试验。在确认车辆段 OVPD 分闸的情况下,给单导施加反向电压,用传感器检测单导两端的电压和流入单导的电流,得到的数据如图 3 所示。由图 3 可见,当单导两侧的反向电压达 8 V 时,咽喉区单导反向导通。

当然,不同地铁线路单导反向导通电压整定值可能不同。单导的反向导通支路使正线的牵引回流通过单导流向车辆段,并由列检库的接地电阻注入大地。如注入电流较大,则会引起车辆段 OVPD 钢轨电位正向动作。



a) 单导电流



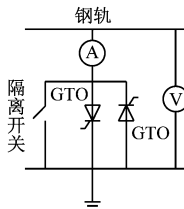
b) 单导电压

图 3 单导反向导通试验结果

可见,单导使正线电流可能进入车辆段,而回流通路的改变也会影响正线的钢轨电位。

1.2 OVPD 永久闭合对钢轨电位的影响

OVPD 安装于车站处,连接钢轨和大地,其在钢轨电位过高时闭合,使钢轨接地,以保证人员安全。OVPD 主要由隔离开关和 2 个反并联的 GTO 组成,如图 4 所示。隔离开关在检测到较高的钢轨电位(常为 120 ~ 500 V)时闭合。2 个反并联 GTO 在钢轨电位大于 500 V 时瞬时导通,可弥补隔离开关动作时间较长的缺点^[12]。



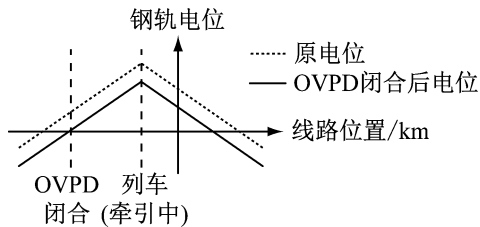
注: (A) 为电流传感器; (V) 为电压传感器

图 4 OVPD 结构示意图

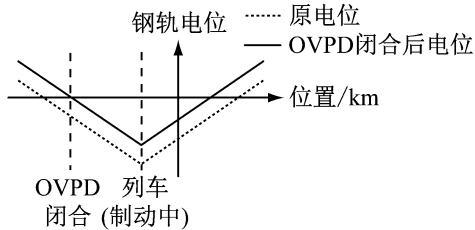
在某地铁线路初始运营阶段,部分车站钢轨电位偏高,OVPD 频繁动作。运营单位为限制钢轨电位,保证人员安全,将这些车站的 OVPD 永久闭合。之后发现,虽然 OVPD 闭合的车站钢轨电位被钳制为 0,其附近车站的钢轨电位也有所下降,但较远车站的钢轨电位反而升高,其 OVPD 动作更为频繁。目前,该线路共有 5 个车站的 OVPD 永久闭合。

OVPD 闭合不会改变钢轨电位沿线路的分布,而是将 OVPD 所在处的钢轨电位由原本的正值或

负值钳制为 0, 使其它区段的钢轨电位相应降低或升高(如图 5 所示)。钢轨电位过低(低于 -120 V)和过高(高于 120 V), 都会引起 OVPD 动作。本文从供电系统建模的角度, 研究单导和 OVPD 对钢轨电位的影响。



a) 牵引工况下的钢轨电位分布示意



b) 制动工况下钢轨电位分布示意

图 5 OVPD 对钢轨电位的影响

2 钢轨电位计算模型和仿真平台

2.1 钢轨电位计算模型

图 6 是城市轨道交通线路牵引电流回流系统结构示意图。正线采用无砟轨道, 轨道下埋有排流网, 而车辆段采用有砟轨道, 故正线和车辆段的轨地结构有较大区别, 需分别建模。

正线钢轨-排流网-地的钢轨电位计算模型如图 7 所示。 V_s 为等效直流电源电压, R_s 为电源内阻。钢轨纵向电阻为 r_g (根据现场测试结果, 取 $36.5\ \Omega/\text{km}$), 排流网纵向电阻为 r_p (根据现场测试结果, 取 $0.08 \sim 0.12\ \Omega/\text{km}$), 钢轨对排流网过渡电阻为 $r_{g,1}$, 排流网对地过渡电阻为 $r_{g,2}$ (新建线路的 $r_{g,1}$ 和 $r_{g,2}$ 不

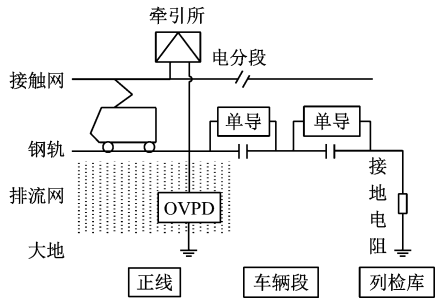


图 6 城市轨道交通线路牵引电流回流系统结构

低于 $15\ \Omega \cdot \text{km}$, 运行线路的 $r_{g,1}$ 和 $r_{g,2}$ 不低于 $3\ \Omega \cdot \text{km}$ [13]。列车等效为直流电流源, 电流 I 由牵引计算确定 [14]。

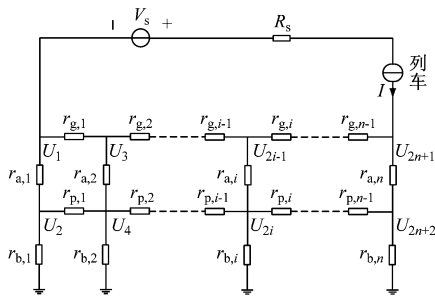


图 7 正线钢轨-排流网-地的钢轨电位计算模型

节点电压方程为:

$$\begin{cases} \left(\frac{1}{r_{g,1}} + \frac{1}{r_{a,1}} \right) U_1 - \frac{1}{r_{a,1}} U_2 - \frac{1}{r_{g,1}} U_3 = -I \\ -\frac{1}{r_{a,1}} U_1 + \left(\frac{1}{r_{a,1}} + \frac{1}{r_{b,1}} + \frac{1}{r_{p,1}} \right) U_2 - \frac{1}{r_{p,1}} U_4 = 0 \\ -\frac{1}{r_{g,1}} U_2 + \left(\frac{1}{r_{g,1}} + \frac{1}{r_{g,2}} + \frac{1}{r_{a,2}} \right) U_4 - \frac{1}{r_{a,2}} U_5 - \frac{1}{r_{g,2}} U_6 = 0 \\ -\frac{1}{r_{p,1}} U_3 - \frac{1}{r_{a,2}} U_4 + \left(\frac{1}{r_{a,2}} + \frac{1}{r_{b,2}} + \frac{1}{r_{p,1}} + \frac{1}{r_{p,2}} \right) U_5 - \frac{1}{r_{p,2}} U_7 = 0 \\ \vdots \\ -\frac{1}{r_{g,n-1}} U_{2n-1} + \left(\frac{1}{r_{g,n-1}} + \frac{1}{r_{a,n}} \right) U_{2n+1} - \frac{1}{r_{a,n}} U_{2n+2} = I \\ -\frac{1}{r_{p,n-1}} U_{2n} - \frac{1}{r_{a,n}} U_{2n+1} + \left(\frac{1}{r_{p,n-1}} + \frac{1}{r_{a,n}} + \frac{1}{r_{b,n}} \right) U_{2n+2} = 0 \end{cases}$$

节点导纳矩阵为:

$$Y = \begin{bmatrix} \frac{1}{r_{g,1}} + \frac{1}{r_{a,1}} & -\frac{1}{r_{a,1}} & -\frac{1}{r_{g,1}} & & & \\ -\frac{1}{r_{a,1}} & \frac{1}{r_{a,1}} + \frac{1}{r_{b,1}} + \frac{1}{r_{p,1}} & 0 & -\frac{1}{r_{p,1}} & & \\ & -\frac{1}{r_{g,1}} & 0 & \frac{1}{r_{g,1}} + \frac{1}{r_{g,2}} + \frac{1}{r_{a,2}} & -\frac{1}{r_{a,2}} & -\frac{1}{r_{g,2}} \\ & & -\frac{1}{r_{p,1}} & -\frac{1}{r_{a,2}} & \frac{1}{r_{a,2}} + \frac{1}{r_{b,2}} + \frac{1}{r_{p,1}} + \frac{1}{r_{p,2}} & 0 & -\frac{1}{r_{p,2}} \\ & & & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ & & & & -\frac{1}{r_{g,n-1}} & 0 & \frac{1}{r_{g,n-1}} + \frac{1}{r_{a,n}} & -\frac{1}{r_{a,n}} \\ & & & & -\frac{1}{r_{p,n-1}} & -\frac{1}{r_{a,n}} & \frac{1}{r_{p,n-1}} + \frac{1}{r_{a,n}} + \frac{1}{r_{b,n}} \end{bmatrix}$$

正线和车辆段的接触网由电分段分隔。当列车只在正线行驶时,可将车辆段和列检库等效为接地电阻支路(其电阻值等于列检库内的接地电阻值),将 OVPD 等效为钢轨直接接地支路。如图 8 所示, R_D 为车辆段等效电阻,独立接地极接地电阻不大于 $4\ \Omega$,共用接地极接地电阻不大于 $1\ \Omega$ 。

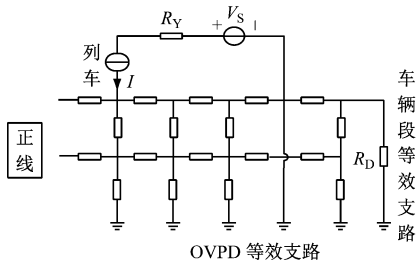


图8 OVPD和车辆段等效支路模型

如在节点 k 加入 OVPD 等效支路,则节点 k 变为地节点,节点导纳矩阵变为 $n-1$ 阶,相应去掉第 k 行和第 k 列。在节点 i 加入车辆段等效支路,节点数不变,节点导纳矩阵阶数不变,仅自导纳 Y_{ii} 发生变化,变化后的自导纳 $Y_{ii,后} = Y_{ii} + \frac{1}{R_D}$ 。

2.2 城市轨道交通牵引供电仿真平台

由西南交通大学开发的 DCTPS(城市轨道交通直流牵引供电仿真)平台^[15],可以完成包含钢轨电位计算在内的列车牵引计算、直流牵引供电计算和交直流一体化牵引供电计算,目前国内牵引供电仿真领域处于领先水平,已通过中国赛宝实验室鉴定测试。现国内有多家设计院采用 DCTPS 平台进行城市轨道交通供电系统的总体设计和初步设计工作。本文使用 DCTPS 平台,增加了 OVPD 支路和车辆段等效支路,并研究其对钢轨电位分布的影响。

3 仿真计算

3.1 仿真参数设定

某地铁线共 22 个车站,其中车站 1[#]、3[#]、6[#]、9[#]、12[#]、14[#]、17[#]、20[#]、22[#] 设置牵引所,在线路两端分别设有车辆段和停车场。线路图如图 9 所示。

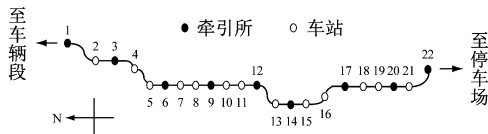


图9 某地铁线路

仿真参数设置:接触网纵向电阻取 $0.014\ 3\ \Omega/\text{km}$,

钢轨纵向电阻取 $0.02\ \Omega/\text{km}$,排流网纵向电阻取 $0.08\ \Omega/\text{km}$,钢轨对排流网过渡电阻取 $15\ \Omega \cdot \text{km}$,排流网对地过渡电阻取 $3\ \Omega \cdot \text{km}$,以上参数均为一行参数。整流机组额定容量为 $2 \times 2\ 000\ \text{kVA}$,额定空载电压为 $1\ 593\ \text{V}$ 。车辆段和停车场等效为接地电阻 $1\ \Omega$ 的接地支路。

3.2 不同单导工况下的仿真

先后去除、接入车辆段及停车场等效支路,仿真按照单导未投入工况(工况 1)和单导投入并导通工况(工况 2)分别计算全线的钢轨电位。仿真得到某一时刻钢轨电位数据如图 10 所见。由图 10 可见,两种工况的全线钢轨电位分布趋势相同,但工况 2 的钢轨电位更高。例如,相比工况 1,工况 2 中的 1[#] 车站钢轨电位升高了 $8.3\ \text{V}$,9[#] 车站升高了 $7.8\ \text{V}$,22[#] 车站升高了 $8.5\ \text{V}$ 。各车站钢轨电位变化量近似相等,各车站钢轨电位平均升高 $7.9\ \text{V}$ 。

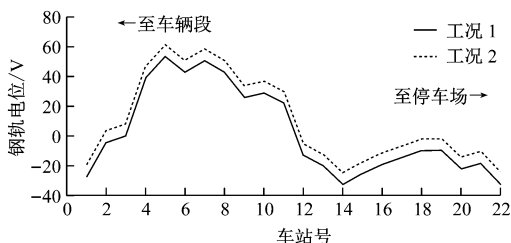


图10 单导对钢轨电位的影响

3.3 不同 OVPD 工况的仿真

单车运行时,全线 OVPD 断开(工况 3)和车站 2 处 OVPD 闭合(工况 4)时的线路钢轨电位分布仿真结果如图 11 所示。2[#] 车站处 OVPD 闭合后,2[#] 车站的钢轨电位由 $-6\ \text{V}$ 被钳制为 0 ,上升了 $6\ \text{V}$,其它区间的钢轨电位也相应上升 $6\ \text{V}$ 左右。OVPD 闭合前后,线路钢轨电位分布情况基本未改变。

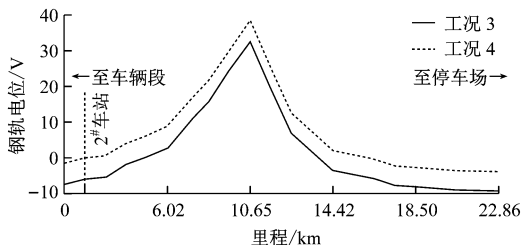


图11 单车运行时不同 OVPD 工况对钢轨电位的影响

多车运行时,OVPD 不闭合(工况 5)和 2[#] 车站处 OVPD 闭合(工况 6)时的线路钢轨电位分布仿真结果如图 12 所示。2[#] 车站处 OVPD 闭合后,2[#] 车站的钢轨电位由 $13.1\ \text{V}$ 被钳制为 0 ,下降了 $13.1\ \text{V}$,

其它区间的钢轨电位相应下降。OVPD 闭合前后,线路钢轨电位分布情况基本未改变。

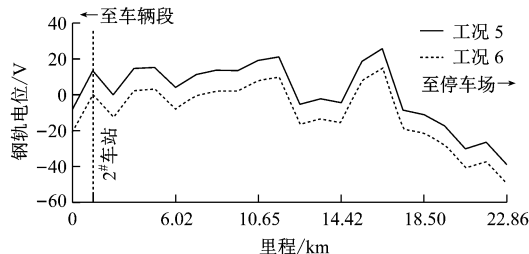


图 12 多车运行时不同 OVPD 工况对钢轨电位的影响

多车运行时的钢轨电位,是全线列车在不同位置运行产生的钢轨电位影响叠加的结果,所以多车运行时的钢轨电位分布是不断变化的,但从上述仿真结果可以看出,无论是单车运行还是多车运行,OVPD 闭合对钢轨电位的影响规律是一样的。OVPD 闭合,不会改变钢轨电位沿线路的分布曲线形状,而是使 OVPD 所在处的钢轨电位被钳制为 0,其它区间的钢轨电位相应发生变化,其变化量近似等于 OVPD 所在处钢轨电位的变化量。

整个仿真计算周期内,各车站钢轨电位最大值的绝对值如图 13。从图 13 中可以看出:当 2#车站的 OVPD 闭合后,2#车站及其附近车站的钢轨电位最大值降低,其中 2#车站下降了 65.48 V,1#车站下降了 22.49 V;其它车站钢轨电位最大值升高,其中 17#车站升高了 51.09 V,22#车站升高了 25.25 V。这也证明,2#车站处 OVPD 的闭合,使附近车站钢轨电位降低,使离 2#车站较远车站的钢轨电位显著升高。

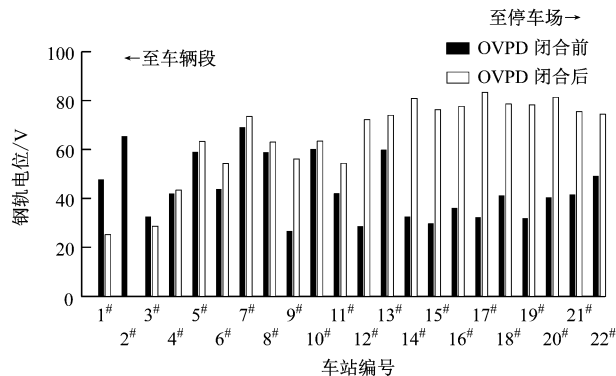


图 13 2#车站的 OVPD 闭合前后各车站的钢轨电位最大值

4 结语

针对城市轨道交通牵引电流回流系统的异常钢轨电位问题,本文建立了城市轨道交通牵引电流

回流系统的计算模型,包括钢轨-排流网-大地的三层网络模型,以及 OVPD 和车辆段的等效支路模型,基于国内某地铁线路的实际情况,进行了多种工况下的钢轨电位仿真计算,可得出以下结论:

1) 正常运营时,由于正线杂散电流较大,钢轨电位较高,单导正向导通和反向导通的频次较大。单导的导通会使正线和车辆段的钢轨电位升高。

2) OVPD 闭合,会使 OVPD 所在处的钢轨电位被钳制为 0,但不会改变钢轨电位沿线路的分布趋势,其他较远车站区间的钢轨电位有所抬升,其变化量近似等于 OVPD 所在处钢轨电位的变化量。

根据以上仿真结论,本文提出如下参考建议:

1) 提高单导反向导通的电压整定值,降低反向导通的频率,或用新装置代替现有单导。检测列车位置和列车到达信号,在列车通过绝缘节时单导完全导通,以防止车轮打火;在其它正常情况下单导断开,以阻断杂散电流在车辆段、停车场和出入段线的流通。这样可最大程度上减小车辆段和停车场的杂散电流和钢轨电位,并保证供电的灵活性^[16]。

2) 使 OVPD 长期闭合不是解决钢轨电位的有效手段,且由此带来的杂散电流问题不可忽视。必要时可增大 OVPD 动作整定值,以减少 OVPD 动作次数。

参考文献

- [1] CHEN S L, HSU S C, TSENG C T. Analysis of rail potential and stray current for Taipei Metro[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2006, 55(1):67.
- [2] TZENG Y S, LEE C H. Analysis of rail potential and stray currents in a direct-current transit system[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2010, 25(3):1516.
- [3] LEE C H, LU C J. Assessment of grounding schemes on rail potential and stray currents in a DC transit system[J]. Power Delivery IEEE Transactions on, 2006, 21(4):1941.
- [4] XU S Y, LI W, WANG Y Q. Effects of vehicle running mode on rail potential and stray current in DC mass transit systems[J]. Vehicular Technology IEEE Transactions on, 2013, 62(8):3569.
- [5] FOTOUHI R, FARSHAD S. A new novel DC booster circuit to reduce stray current and rail potential in DC railways[C]//6th International Conference-workshop. Ifeba, Spain; IEEE Compatibility and Power Electronics, 2009.
- [6] 杜贵府,张栋梁,王崇林,等. 直流牵引供电系统电流跨区间传输对钢轨电位影响[J]. 电工技术学报, 2016, 31(11):129.

(下转第 95 页)

范要求。

表 4 道床正截面受弯承载力验算表

部位	承载弯矩/ (kN·m)	配筋率/%	相对受压 区高度
纵向底部	164	0.39	0.095
纵向顶部	104	0.25	0.059
横向底部	28	0.29	0.075
横向顶部	28	0.29	0.075

表 5 正常使用极限状态道床板弯矩 kN·m

纵向正弯矩	纵向负弯矩	横向正弯矩	横向负弯矩
60.7	32.1	7.1	0.3

表 6 道床裂缝宽度验算表 mm

项目	纵向底部	纵向顶部	横向底部	横向顶部
裂缝宽度	0.190	0.180	0.125	0.005

5.3 容许应力强度验算

根据《铁路桥涵混凝土结构设计规范》进行道床结构容许应力强度验算。道床纵向作用组合为 1.5 倍静轮载 + 整体温度作用 + 路基不均匀沉降，纵向钢筋容许应力值为 315 MPa，混凝土纵向受压容许应力值为 20.25 MPa。道床横向作用组合按照 2 倍静轮载，横向钢筋容许应力值为 210 MPa，混凝土横向受压容许应力值为 13.5 MPa。计算结果如表 7 所示。由表 7 可知，道床强度验算结果满足规范要求。

表 7 道床强度验算表 MPa

部位	钢筋拉应力	混凝土压应力
纵向底部	236	8.78
纵向顶部	293	8.35
横向底部	93	3.02
横向顶部	3.71	0.12

6 结语

有轨电车土质路基段无砟轨道由于采用绿化铺装，道床板上下表面温差较小，不影响道床受力。关于无砟轨道可靠度缺乏统计数据，本文参照《铁路轨道极限状态法设计暂行规范》并结合有轨电车特点对各分项系数进行了适当的调整，并基于容许应力法进行了安全性复核，满足规范要求。本文对有轨电车土质路基段单元式无砟轨道结构设计等方面的阐述，希望能够为今后其他有轨电车无砟轨道设计提供参考。

参考文献

[1] 刘学毅,赵坪锐,杨荣山,等. 客运专线无砟轨道设计理论与方法[M]. 成都:西南交通大学出版社,2010.

[2] 中国铁路总公司. 铁路轨道极限状态法设计暂行规范: Q/CR 9130—2015[S]. 北京:中国铁道出版社,2016.

[3] 中华人民共和国住房和城乡建设部,中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 混凝土结构设计规范(2015 版): GB 50010—2010[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2015.

[4] 国家铁路局. 铁路桥涵混凝土结构设计规范: TB 10092—2017[S]. 北京:中国铁道出版社,2017.

(收稿日期:2018-04-10)

(上接第 91 页)

[7] 李国欣,吴培林. 钢轨电位与杂散电流综合抑制研究[J]. 城市轨道交通研究, 2017(12):56.

[8] 刘建华,刘旭. 地铁钢轨电位限制装置与排流柜配合研究[J]. 电测与仪表, 2014, 51(21):120.

[9] 周大林,庞开阳. 地铁直流牵引供电系统钢轨运行电位安全分析[J]. 城市轨道交通研究, 2015(6):46.

[10] 李鲲鹏,刘炜. 直流牵引回流系统钢轨电位的理论分析[J]. 都市快轨交通, 2015, 28(5):91.

[11] 刘建华,沈松伟. 单向导通装置对杂散电流的影响分析[J]. 都市快轨交通, 2016, 29(4):116.

[12] 刘建华,李艳. 框架保护与钢轨电位限制装置保护的研究

[J]. 城市轨道交通研究, 2015(10):53.

[13] 中华人民共和国建设部. 地铁杂散电流腐蚀防护技术规程: CJJ 49—1992[S]. 北京:中国计划出版社,1993.

[14] 刘炜. 城市轨道交通供电系统仿真[D]. 成都:西南交通大学,2006.

[15] 刘炜. 城市轨道交通列车运行过程优化及牵引供电系统动态仿真[D]. 成都:西南交通大学,2009.

[16] 唐靖坤,刘炜. 一种车辆段、停车场与正线之间的钢轨回流装置[C]//中国铁道学会电气化委员会 2017 年年会及新技术研讨会论文集. 保定:中国铁道学会电气化委员会,2017.

(收稿日期:2018-03-05)