

一种多区段地铁轨道电位动态模拟系统

徐 杰, 杨晓峰, 王慧康, 郑琼林

(北京交通大学 电气工程学院, 北京 100044)

摘 要:在地铁系统中开展轨道电位与杂散电流防治措施的现场验证协调难度大,因此亟需一种多区段地铁轨道电位硬件动模系统,再现地铁系统中列车运行时的轨道电位动态分布特征.首先分析了可控电阻模块(Controllable Resistance Module, CRM),用于模拟列车运行过程中的轨道电阻变化规律;在此基础上,结合地铁系统的阻抗模型,进一步提出了多区段地铁轨道电位动态模拟系统(Multi-section Rail Potential Dynamic Emulator, MRPDE).研究了CRM和MRPDE的工作原理、参数设计和控制策略,并搭建相应的数字仿真模型和原理样机.仿真和实验结果表明:MRPDE能正确再现地铁系统轨道电位动态分布,进而为分段接入型轨道电位与杂散电流防治措施提供可靠的地面型试验平台.

关键词:城市轨道交通;轨道电位;杂散电流;可控电阻模块;动态模拟系统;多区段

中图分类号:TM922

文献标志码:A

A multi-section metro rail potential dynamic emulator system

XU Jie, YANG Xiaofeng, WANG Huikang, ZHENG Trillion Q.

(School of Electrical Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract:It is difficult to carry out on-site verification of the rail potential and stray current solutions in subway. Thus it is urgent to develop a multi-section metro hardware dynamic emulation system, which is able to emulate the dynamic characteristics of rail potential during trains running. A Controllable Resistance Module (CRM) is firstly introduced to emulate the trail resistance changing law during train operation. Then, based on the impedance model of the metro system, the multi-section Metro Rail Potential Dynamic Emulator (MRPDE) system is further proposed. In this paper, the working principle, parameter selection and control strategies are analyzed in detail. Moreover, the digital simulation model and experimental prototype are built. Extensive simulation and experimental results show that MRPDE may correctly reproduce the rail potential distribution, and it provides a reliable ground-based test platform for rail potential and stray current solutions.

Keywords:urban rail transit; rail potential; stray current; controllable resistance module; dynamic emulator system; multi-section

收稿日期:2019-12-22

基金项目:国家自然科学基金(51737001);中央高校基本科研业务费专项资金(2019JBM058)

Foundation items: National Natural Science Foundation of China (51737001); Fundamental Research Funds for the Central Universities (2019JBM058)

第一作者:徐杰(1995—),男,河北秦皇岛人,硕士.研究方向为电力电子技术在轨道交通中的应用.email:17121516@bjtu.edu.cn.

通信作者:杨晓峰(1980—),男,河北石家庄人,副教授,博士,博士生导师.email:xfyang@bjtu.edu.cn.

引用格式:徐杰,杨晓峰,王慧康,等.一种多区段地铁轨道电位动态模拟系统[J].北京交通大学学报,2020,44(3):57-65.

XU Jie, YANG Xiaofeng, WANG Huikang, et al. A multi-section metro rail potential dynamic emulator system[J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2020, 44(3):57-65. (in Chinese)

随着城市化进程加快,以地铁为代表的城市轨道交通以其运量大、安全可靠、快速舒适等优点,成为解决大中城市交通拥堵的首选方案^[1-2].地铁普遍采用以钢轨回流的直流牵引供电系统,由于钢轨具有内阻,且钢轨与大地之间并非完全绝缘,牵引电流通过钢轨回流时,将在钢轨上产生轨道电位,同时部分牵引电流泄漏到大地中,形成杂散电流(也称之为“迷流”)^[3,6-7].杂散电流会加速钢轨附近的金属物体(如管道、电缆等)的电腐蚀,减少位于轨道附近的地下电缆和管道的寿命.同时,过高的轨道电位也会危及乘客安全,给轨道交通的正常运营带来严重风险^[8-9].

国内外学者围绕轨道电位与杂散电流问题开展了大量研究,先后提出一系列治理措施:提高供电电压等级、增大轨道对地电阻、减小轨道回流电阻、减小牵引变电所之间的距离、建立专用杂散电流收集网、阴极保护法等^[10-12].这些方法一定程度上减小了轨道电位和杂散电流,但随着时间的推移,治理效果往往有限.为此,文献^[13-14]在传统的直流牵引供电系统基础上多点分布接入电力电子补偿装置来实现杂散电流的分段动态治理,为解决轨道电位与杂散电流问题提供新思路.然而由于上述新方法在地铁现场开展实验验证协调难度大,亟须一种多区段硬件实验台模拟直流牵引供电系统的电气行为,为相关防治措施进行前期实验评估提供硬件试验平台.文献^[15]提出利用电力电子电路来模拟直流牵引系统轨道电位与杂散电流的方案,但其电阻模块仅能够流过单向单流,模拟工况单一,且无法多点接入电力电子补偿装置,在实际应用中受到局限.文献^[16-18]提出了双向可控电阻,实现了列车多工况下

的轨道电位动态模拟,但是双向可控电阻拓扑复杂,输出阻值与电流存在耦合,控制精度较低.同时,这些方案仅适用于直接接地方式的直流牵引供电系统,与我国直流牵引供电系统普遍采用悬浮接地的实际情况不符.

针对上述方案的不足,本文作者提出一种多区段的地铁轨道电位动态模拟系统(Multi-section Rail Potential Dynamic Emulator, MRPDE),适用于动态模拟悬浮接地的直流牵引供电系统在列车运行时的轨道电位动态分布规律,同时具有多个轨道电位沿线测量点,可实现电力电子补偿装置的分段接入需求.本文首先分析了可控电阻模块(Control-able Resistance Module, CRM),用于模拟列车运行过程中轨道电阻;在此基础上结合地铁系统的阻抗模型,进一步提出了 MRPDE,并研究其工作原理、参数设计,提出相应控制策略.最后对 MRPDE 开展了仿真和实验验证.

1 CRM 的拓扑及工作原理

图 1(a) 为 CRM 拓扑,由基准电阻 R_0 、两个 MOSFET (S_1, S_2)、 R_C - C 串联支路和电感 L 构成.通过控制反向串联的 MOSFET (S_1, S_2) 同时开通关断,使 CRM 能够在双向电流下正常工作.在地铁轨道电位动态模拟系统中,用可控电阻模块 CRM 替代钢轨电阻,可控电阻模块输出阻值要跟随列车运行位置动态连续变化.当 CRM 中流过的电流方向不同时,工作模式如图 1(b)、图 1(c) 所示,CRM 在两种工作模式下等效电路相同,因此以电流自端口 1 流向端口 2 为例,对其工作原理进行分析.

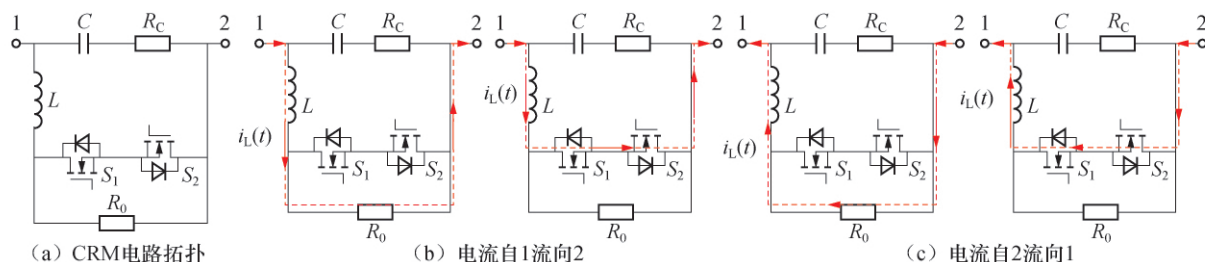


图 1 CRM 拓扑和工作模式

Fig.1 CRM circuit topology and operation modes

CRM 稳态工作波形如图 2(a) 所示,其中 v_g 为双向开关驱动信号, v_L, i_L 分别为电感 L 的端电压和电流.每个开关周期可分为 2 个工作阶段:

阶段 1($t_0 \sim t_1$): 开关管 S_1, S_2 同时导通,假定 d 和 T_s 为 CRM 的占空比和开关周期,则导通时间为 dT_s . 图 2(b) 为 CRM 在 $t_0 \sim t_1$ 时刻的等效电路,电感 L 和 R_C - C 串联支路并联.在这个阶段,当电

容 C 足够大时,采用小纹波近似方法^[19], R_C - C 串联支路两端电压可视为恒值 V_C ,根据图 2(b) 的等效电路,可得电感电压、电感电流表达式为

$$\begin{cases} i_L(t) = i_L(t_0) + (1/L) \int_{t_0}^t v_L(t) dt \\ v_L(t) = V_C \\ i_L(t_1) = i_L(t_0) + dT_s V_C / L \end{cases} \quad (1)$$

阶段 $2(t_1 \sim t_2)$: 开关管 S_1, S_2 同时关断, 关断时间为 $(1-d)T_s$, 图 2(c) 为 CRM 在 $t_1 \sim t_2$ 时刻的等效电路, 由于电感电流纹波很小, 采用小纹波近似方法, 近似认为流过基准电阻 R_0 的电流为 I . 在这个阶段, 根据图 2(c) 的等效电路, 可得此时的电感电压、电感电流表达式为

$$\begin{cases} i_L(t) = i_L(t_1) + \frac{1}{L} \int_{t_1}^t v_L(t) dt \\ v_L(t) = V_C - IR_0 \\ i_L(t_2) = i_L(t_1) + \frac{(1-d)T_s(V_C - IR_0)}{L} \end{cases} \quad (2)$$

(a) 工作波形

(b) $t_0 \sim t_1$ 时刻

(c) $t_1 \sim t_2$ 时刻

图 2 CRM 工作波形和等效电路
Fig.2 CRM steady state waveform and equivalent circuit

根据伏秒平衡原则, 联立式 (1)、式 (2) 可得 CRM 的等效输出阻值为

$$R_{eq} = (1-d)R_0 \quad (3)$$

由式 (3) 可知, CRM 输出阻值仅由控制占空比决定, 与输入电流无关. CRM 中器件数量少, 控制简单, 适用于动态模拟钢轨电阻.

2 地铁系统模拟方案

2.1 地铁系统阻抗模型

地铁系统目前广泛采用双边集中式供电^[12], 在系统正常工作时采用悬浮接地, 典型的轨道-大地电阻分布示意图见图 3. 为简化分析, 作如下假设: 1) 轨

道纵向电阻 R_r 与轨道对地过渡电阻 R_g 沿轨道方向均匀分布; 2) 牵引供电系统采用双边供电方式; 3) 列车牵引电流用电流源; 4) 仅考虑列车左右两个牵引变电所. 其中: l_1 为列车距牵引变电所 TS_1 的距离; l 为两牵引变电所之间的距离; i 为列车电流; i_1, i_2 分别为 TS_1 和 TS_2 为列车提供的电流.

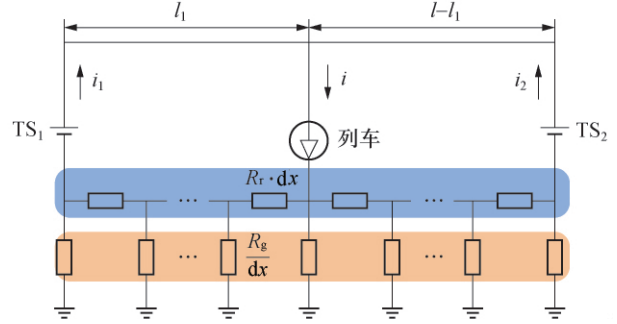


图 3 双边供电“钢轨-大地”电阻分布示意图

Fig.3 Bilateral power supply "rail-earth" resistance distribution diagram

由图 3 可得两牵引变电所输出电流为

$$\begin{cases} i_1 = \frac{l-l_1}{l}i \\ i_2 = \frac{l_1}{l}i \end{cases} \quad (4)$$

根据“钢轨-大地”模型, 可求得在双边牵引供电系统中, 当列车位于 l_1 处时, 距 TS_1 距离为 x 处的轨道电位和杂散电流为

$$u(x, l_1) = \begin{cases} \frac{\sqrt{R_r R_g} i_1 (e^{\alpha x_1} - e^{-\alpha x_1})}{e^{\alpha l_1/2} + e^{-\alpha l_1/2}}, & 0 \leq x \leq l_1 \\ \frac{\sqrt{R_r R_g} i_2 (e^{\alpha x_2} - e^{-\alpha x_2})}{e^{\alpha(l-l_1)/2} + e^{-\alpha(l-l_1)/2}}, & l_1 < x \leq l \end{cases} \quad (5)$$

$$i_s(x, l_1) = \begin{cases} i_1 \left(1 - \frac{e^{\alpha x_1} + e^{-\alpha x_1}}{e^{\alpha l_1/2} + e^{-\alpha l_1/2}}\right), & 0 \leq x \leq l_1 \\ i_2 - \frac{i_2 (e^{\alpha x_2} + e^{-\alpha x_2})}{e^{\alpha(l-l_1)/2} + e^{-\alpha(l-l_1)/2}}, & l_1 < x \leq l \end{cases} \quad (6)$$

其中

$$\begin{cases} \alpha = \sqrt{R_r/R_g} \\ x_1 = x - \frac{l_1}{2} \\ x_2 = \frac{l+l_1}{2} - x \end{cases} \quad (7)$$

当 l_1 为定值, x 为变量时, $u(x, l_1)$ 和 $i_s(x, l_1)$ 表示列车运行到 l_1 处时, 整个轨道区间上轨道电位和杂散电流的分布规律. 当 x 为定值, l_1 为变量时, $u(x, l_1)$ 和 $i_s(x, l_1)$ 表示轨道上 x 处的轨道电位和

杂散电流随列车运行的变化规律。

2.2 轨道电位模拟方案

根据上述地铁系统阻抗模型的数学分析可知,当列车位于 l_1 处, $x \in (l_1/2, (l+l_1)/2)$ 时,电流从钢轨泄漏到大地;当 $x \in [0, l_1/2] \cup [(l+l_1)/2, l]$ 时,杂散电流从大地流回到钢轨。由于电流并非从轨道特定点泄漏和回流,而是在整个轨道上完成,因此等效为无数条与地连接的通路,导致难以用物理电路实现对它们的模拟。

为解决上述问题,本文提出了如图4所示的悬浮接地等效拓扑。双边供电系统泄漏的等效杂散电流总量为

$$i_{\text{Sum}}(l_1) = i_s(\frac{l_1}{2}, l_1) + i_s(\frac{l+l_1}{2}, l_1) \quad (8)$$

鉴于实际地铁系统中 $R_r \ll R_g$, 将式(5)带入式(8)后,将其中的指数函数采用二次泰勒多项式表示。化简得

$$i_{\text{Sum}}(l_1) = \frac{iR_r l_1 (l-l_1)}{8R_g} \quad (9)$$

$$u(x, l_1) = \begin{cases} -\frac{iR_r (l-l_1)}{l} (\frac{l_1}{2} - x), & 0 \leq x \leq l_1 \\ \frac{iR_r l_1}{l} (\frac{l+l_1}{2} - x), & l_1 < x \leq l \end{cases} \quad (10)$$

由式(10)可知,列车处的轨道电位为

$$u(l_1, l_1) = \frac{iR_r l_1 (l-l_1)}{2l} \quad (11)$$

根据式(9)、式(11)可得列车处轨道电位和泄漏杂散电流的比值为

$$R_s = \frac{4R_g}{l} \quad (12)$$

由式(12)可知,列车处轨道电位和泄漏杂散电流总量的比值为固定值,与列车位置、列车电流均无关。因此可以在列车处测量点串联电阻 R_s 接地来实现对泄漏杂散电流总量的模拟,如图4所示。

由式(10)可知, TS_1 处轨道电位 $u(0, l_1)$ 、 TS_2 处轨道电位 $u(l, l_1)$ 和列车处轨道电位 $u(l_1, l_1)$ 对任意列车位置 l_1 均满足数学关系为

$$\begin{cases} u(0, l_1) = u(l, l_1) \\ u(0, l_1) + u(l_1, l_1) = 0 \end{cases} \quad (13)$$

为正确再现轨道电位,泄漏的杂散电流返回至牵引变电所后,牵引变电所和列车处的轨道电位电气关系应满足式(13)。

根据图4电路结构,可求得其轨道电位分布为

$$u(l_1, l_1) = i_{\text{Sum}}(l_1) R_s \quad (14a)$$

$$u(0, l_1) = -i_{g1}(l_1) R_{g1} \quad (14b)$$

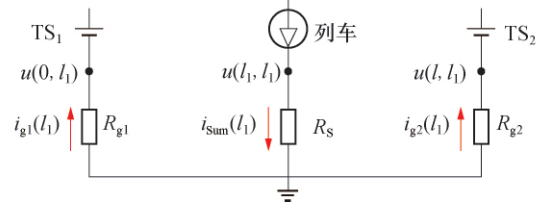


图4 悬浮接地等效电路

Fig.4 Ungrounded equivalent circuit

$$u(l, l_1) = -i_{g2}(l_1) R_{g2} \quad (14c)$$

$$i_{\text{Sum}}(l_1) = i_{g1}(l_1) + i_{g2}(l_1) \quad (14d)$$

为正确模拟轨道电位,应令式(14)满足式(13),联立可解得电阻 R_{g1} 、 R_{g2} 应满足

$$\frac{1}{R_{g1}} + \frac{1}{R_{g2}} = \frac{1}{R_s} \quad (15)$$

3 多区段轨道电位动态模拟系统

3.1 MRPDE 拓扑

基于上述分析,本文提出了如图5所示的四区间MRPDE拓扑,由1个列车运行单元A、1个首端单元B和3个扩展单元C,即 C_1 、 C_2 和 C_3 构成。其中列车运行单元A由两个CRM,即CRM1、CRM2和一个接地电阻 R_s 构成,可用于模拟列车运行过程中的轨道阻值变化规律。首端单元B由3个双向开关 S_{11} 、 S_{12} 、 S_{13} 和一个固定电阻 R_1 构成,而扩展单元C由2个双向开关 S_{21} 、 S_{22} 和一个固定电阻 R_2 构成。通过增减扩展单元C的数量,可以将两牵引变电所等分为多个区间,并获得多个轨道电位的沿线测量点,用于轨道电位治理装置接入。首端单元B和扩展单元C中的双向开关均由两个可控元件反向串联构成。

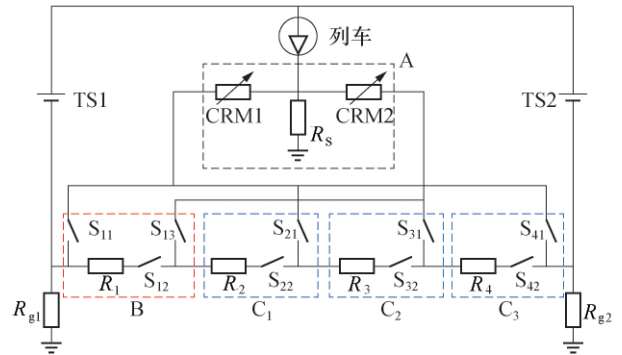


图5 四区间 MRPDE

Fig.5 Four-interval MRPDE topology

3.2 MRPDE 工作原理

以四区间 MRPDE 拓扑为例,假设 CRM1 和 CRM2 阻值变化范围为 $0 \sim R$, 首端单元 B 与扩展单元 C 中固定电阻阻值均为 R , 则四区间 MRPDE 中 R 可表示为

$$R = R_r l / 4 \quad (16)$$

四区间 MRPDE 可分为 4 种典型工作模式,当列车运行在加速与匀速工况时,工作模式如图 6 所示。

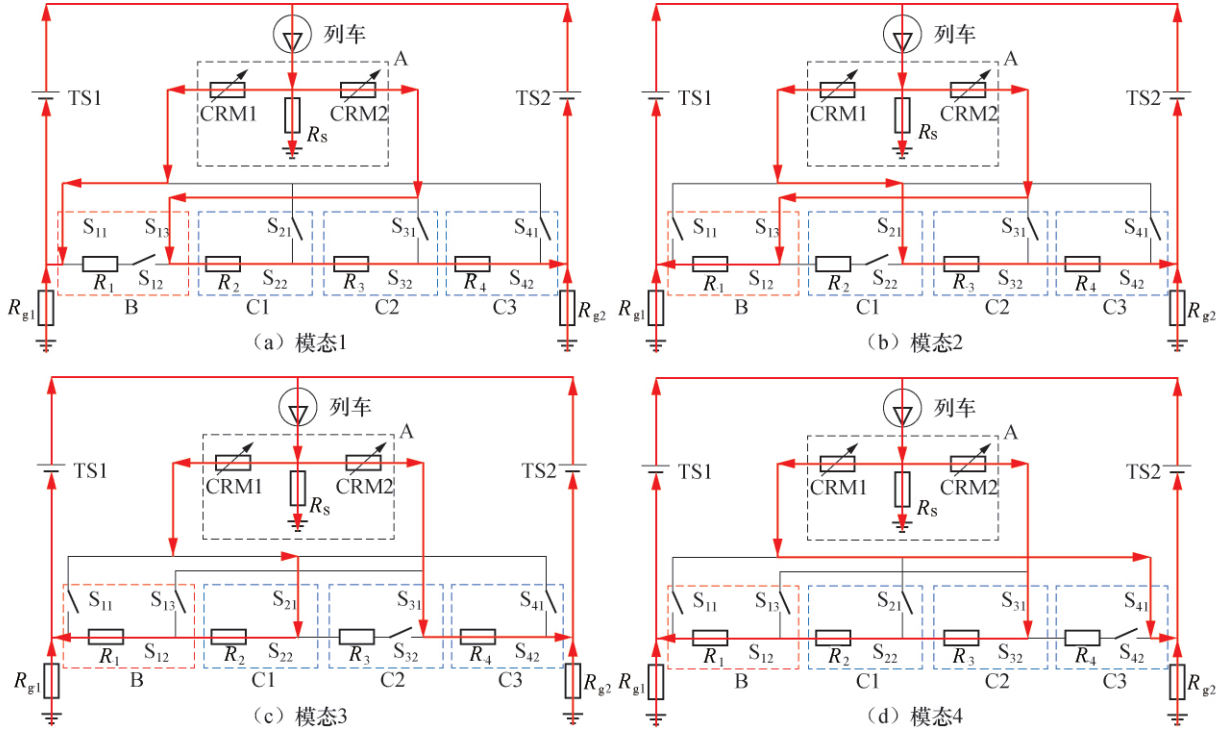


图 6 MRPDE 工作模式

Fig.6 Operation modes of MRPDE

表 1 开关状态
Tab.1 Switch status

开关	区间			
	模式 1	模式 2	模式 3	模式 4
S_{11}	1	0	0	0
S_{13}	1	1	0	0
S_{21}	0	1	1	0
S_{31}	0	0	1	1
S_{41}	0	0	0	1
S_{12}	0	1	1	1
S_{22}	1	0	1	1
S_{32}	1	1	0	1
S_{42}	1	1	1	0

其中“1”表示双向开关状态为导通,“0”表示双向开关状态为关断,0、 S_A 、 S_B 、 S_C 、 S 分别代表距离 TS_1 为 0、 $l/4$ 、 $l/2$ 、 $3l/4$ 、 l 的轨道位置.四区间 MRPDE 各模式的工作情况如下:

模式 1: $l_1 \in [0, S_A)$, 当列车在 TS_1 时,CRM1 的等效阻值为 0,CRM2 的等效阻值为 R . 模拟列车由 0 运行到 S_A , 控制 CRM1 阻值增大,CRM2 阻值减小,且始终保持 CRM1、CRM2 的阻值和为 R . 当列车运行至 S_A 时,CRM1 的阻值增大为 R ,CRM2 的阻值减小为 0.

模式 2: $l_1 \in [S_A, S_B)$, 模拟列车由 S_A 运行到 S_B , 控制 CRM1 阻值减小,CRM2 阻值增大,且始终

保持 CRM1、CRM2 的阻值和为 R . 当列车运行至 S_B 时,CRM1 的阻值减小为 0,CRM2 的阻值增大为 R .

模式 3: $l_1 \in [S_B, S_C)$, 模拟列车由 S_B 运行到 S_C , 控制 CRM1 阻值增大,CRM2 阻值减小,且始终保持 CRM1、CRM2 的阻值和为 R . 当列车运行至 S_C 时,CRM1 的阻值增大为 R ,CRM2 的阻值减小为 0.

模式 4: $l_1 \in [S_C, S]$, 模拟列车由 S_C 运行到 S , 控制 CRM1 阻值减小,CRM2 阻值增大,且始终保持 CRM1、CRM2 的阻值和为 R . 当列车运行至 S 时,CRM1 的阻值减小为 0,CRM2 的阻值增大为 R ,此时列车到达 TS_2 .

对于任意列车位置 $l_1 \in [0, S]$ 时,四区间 MRPDE 的等效电路如图 7 所示,由此可求得四区间 MRPDE 的轨道电位和泄漏杂散电流为

$$i_{S_RPDE}(l_1) = \frac{iR_r l_1 (l - l_1)}{8R_g + R_r l_1 (l - l_1)} \quad (17)$$

$$u_{RPDE}(x, l_1) =$$

$$\begin{cases} -\frac{4iR_r R_g (l - l_1)(l_1 - 2x)}{l[8R_g + R_r l_1 (l - l_1)]}, & 0 \leq x \leq l_1 \\ \frac{4iR_r R_g l_1 (l + l_1 - 2x)}{l[8R_g + R_r l_1 (l - l_1)]}, & l_1 < x \leq l \end{cases} \quad (18)$$

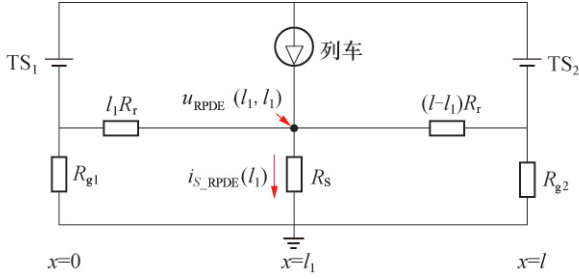


图7 MRPDE 等效电路

Fig.7 MRPDE equivalent circuit

由于 $R_r \ll R_g$, 化简得

$$i_{S_RPDE}(l_1) = \frac{iR_r l_1 (l - l_1)}{8R_g} \quad (19)$$

$$u_{RPDE}(x, l_1) = \begin{cases} -iR_r(l-l_1)(l_1-2x)/2l, & 0 \leq x \leq l_1 \\ iR_r l_1 (l+l_1-2x)/2l, & l_1 < x \leq l \end{cases} \quad (20)$$

对比式(9)、式(10)、式(19)、式(20)可知,MRPDE的轨道电位分布和泄漏杂散电流总量与地铁系统阻抗模型结果一致。

3.3 MRPDE 控制策略

MRPDE的控制系统框图如图8所示.假设MRPDE的区间数 N , 两牵引变电所间距离 l .

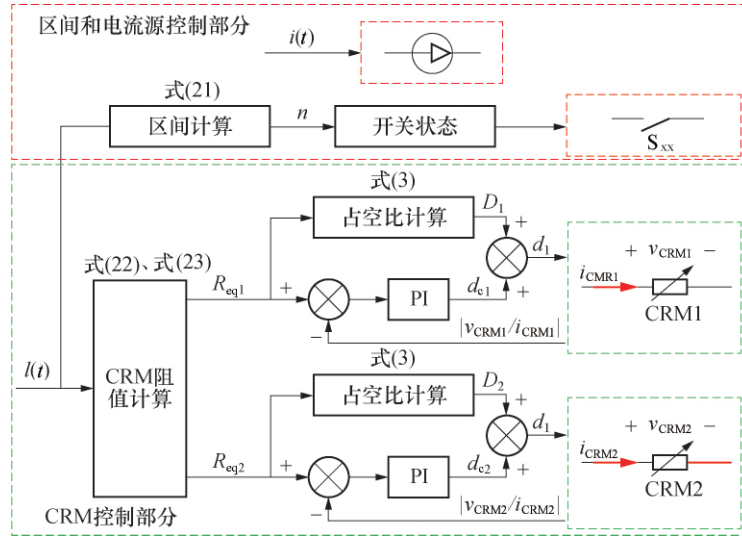


图8 MRPDE 控制框图

Fig.8 MRPDE control block diagram

4 仿真验证

为验证所提拓扑和控制策略的正确性和可行性,在 Matlab/Simulink 仿真平台中分别搭建了CRM和四区间MRPDE仿真模型。

4.1 动态模拟系统参数设计

实际的地铁系统中参数设置为:单位钢轨纵向

1)区间切换和电流源电流控制.电流源电流根据列车电流随时间变化的公式 $i(t)$ 控制.区间切换根据列车所在位置随时间变化的公式 $l(t)$ 计算出列车所在区间 n ,再根据开关状态表控制双向开关状态.区间计算公式为

$$n = \text{ceil}\left[\frac{Nl(t)}{l}\right] \quad (21)$$

式中:ceil(\cdot)为取整函数,即向上舍入最近的整数。

2)CRM控制.根据列车所在位置计算出 CRM1和CRM2的等效阻值分别为

$$R_{eq1}(t) = \begin{cases} kR_r \left[l(t) - (n-1) \frac{l}{N} \right], & n=1,3,5,\dots \\ kR_r \left[n \frac{l}{N} - l(t) \right], & n=2,4,6,\dots \end{cases} \quad (22)$$

$$R_{eq2}(t) = \frac{kR_r l}{N} - R_{eq1}(t) \quad (23)$$

因CRM等效输出阻值与控制脉冲占空比线性度较高,因此先根据式(3)计算出CRM理论占空比 $D_1(D_2)$ 作为预测值.将给定阻值 $R_{eq1}(R_{eq2})$ 分别和CRM采样计算得到的实际阻值作差,通过PI算法得到校正值 $d_{c1}(d_{c2})$.最后根据预测值和校正值得得CRM的控制占空比 $d_1(d_2)$.

电阻 $R_r = 0.025 \Omega/\text{km}$;单位钢轨对地电阻 $R_g = 15 \Omega \cdot \text{km}$;供电区间长度 $l = 3 \text{ km}$;列车最大牵引电流为 2000 A .鉴于列车电流过大,因此将实验级MRPDE中列车电流较实际的地铁系统列车电流缩小 k 倍,实验级的MRPDE列车电流为 15 A ,因此 $k = 133.3$ 倍。

由式(20)可知,为保证MRPDE的轨道电位与

实际地铁系统轨道电位大小相同,应将钢轨电阻 R_r 扩大 k 倍.同时为保持列车电流与泄漏杂散电流比例不变,应将钢轨对地的过渡电阻 R_g 也扩大 k 倍.根据上述分析,由式(16)可知,四区间 MRPDE 中每个区间的电阻 R 为 2.5Ω .

4.2 CRM 仿真模型

首先搭建如图 1(a)所示仿真模型,根据上述分析设计 CRM 的最大等效输出阻值为 2.5Ω ,CRM 参数设置为: $C = 650 \mu\text{F}$; $R_0 = 2.5 \Omega$; $L = 500 \mu\text{H}$; $R_c = 0.5 \Omega$.CRM 在恒流源输入下,仿真结果见图 9.

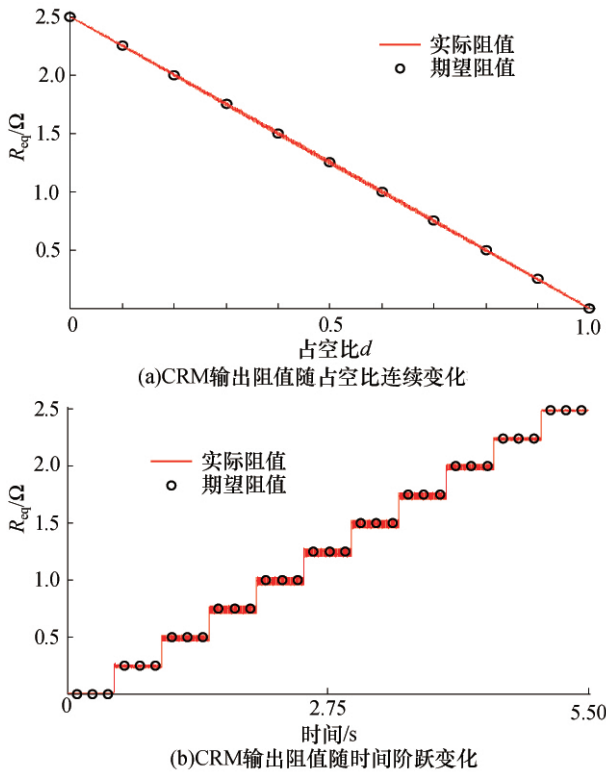


图 9 CRM 仿真波形

Fig.9 CRM simulation waveform

R_{eq} 与 d 之间有良好的线性关系,随着 d 的增大而减小,与理论分析一致.图 9(b)为 R_{eq} 随时间阶跃变化的波形, R_{eq} 阶跃变化暂态时间短,过冲小,CRM 动态响应性能良好.

4.3 四区间 MRPDE 仿真

搭建如图 5 所示四区间 MRPDE 仿真模型,参数设置为: $R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = 2.5 \Omega$, $R_s = 2\ 666.8 \Omega$; $R_{g1} = R_{g2} = 5\ 333.6 \Omega$.模拟列车匀速运行,列车电流恒定为 15 A .仿真结果见图 10.

可知,四区间 MRPDE 中轨道电位动态分布与数学模型计算结果基本一致.列车位于两牵引变电所中点时列车电位最大,MRPDE 中列车电位为 $18\ 742.2 \text{ V}$,数学模型中列车电位为 $18\ 744.1 \text{ V}$,相对偏差为 0.01% ,可忽略不计.

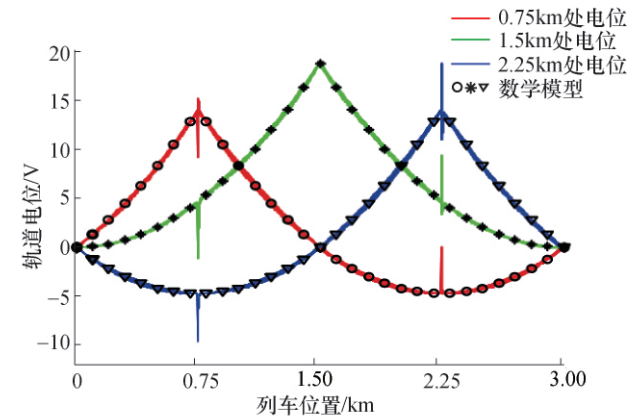
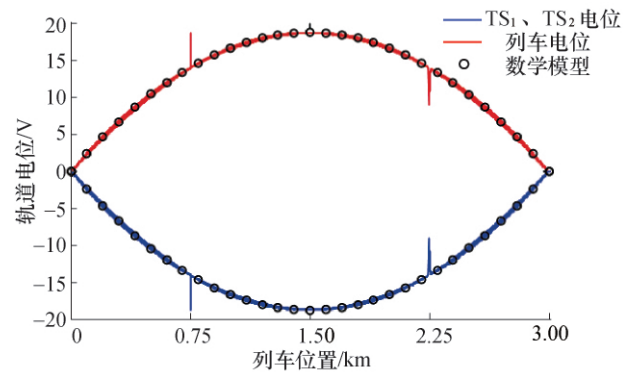


图 10 四区间 MRPDE 仿真波形

Fig.10 Four-interval MRPDE simulation waveforms

因泄漏杂散电流总量与列车电位比值固定,可通过列车处电位除以对地电阻 R_s 来获得泄漏的杂散电流.因此,MRPDE 能够准确地实现地铁系统在列车运行时的轨道电位和杂散电流动态模拟.

5 实验验证与结果分析

为验证 CRM 和 MRPDE 的可行性和实用性,在实验室搭建了四区间 MRPDE 小容量实验平台,实验参数与仿真参数设置一致.

5.1 CRM 实验

CRM 在恒流源输入下,控制占空比 d 由 $0 \sim 1$ 线性变化,实验结果如图 11 所示,分别为输入电流.其中 I 为 CRM 的输入电流, V_R 为 CRM 的电压, R_{eq} 为通过示波器数学运算功能用 V_R 除以 I 得到的 CRM 等效输出阻值.

由图 11 可知, R_{eq} 与 d 之间有良好的线性关系,在不同电流下的实验结果基本一致,CRM 与输出电流无耦合, R_{eq} 基本不受流过电流大小的影响,并且能够在双向电流下正常工作.

CRM 在恒流源输入下,闭环控制 CRM 输出阻值 R_{eq} 阶跃变化,实验结果见图 12.可知, R_{eq} 阶跃

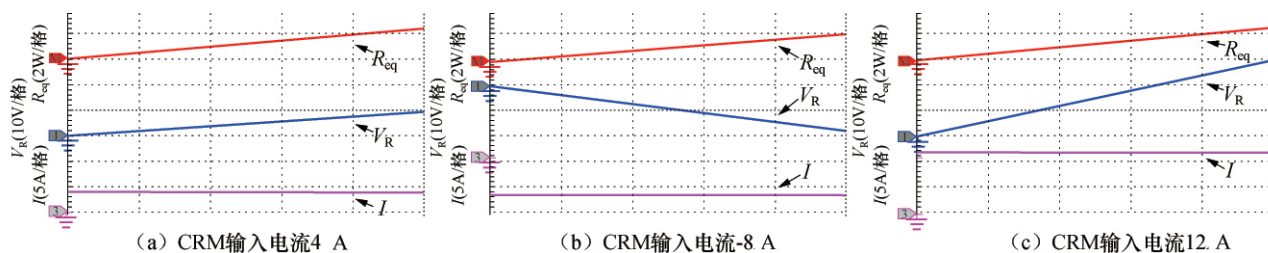


图 11 CRM 实验波形

Fig.11 CRM experimental waveforms

变化过程中稳态时间短,过冲小,CRM 动态响应良好.当 CRM 给定等效阻值为 2.5Ω 时,实验结果中等效阻值电阻近似为 2.50Ω ,由实验结果可以看出闭环控制下,CRM 等效输出阻值的控制精度高.

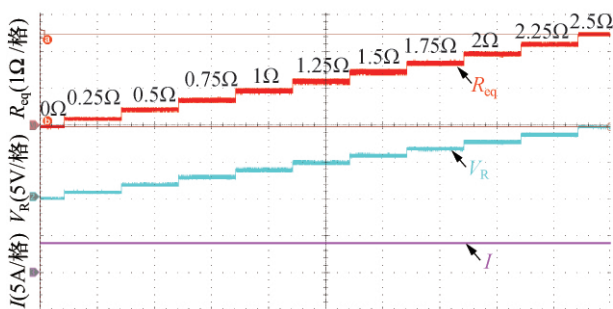


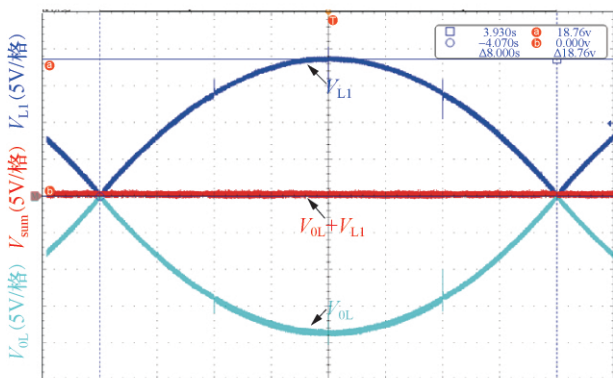
图 12 CRM 实验波形

Fig.12 CRM experimental waveforms

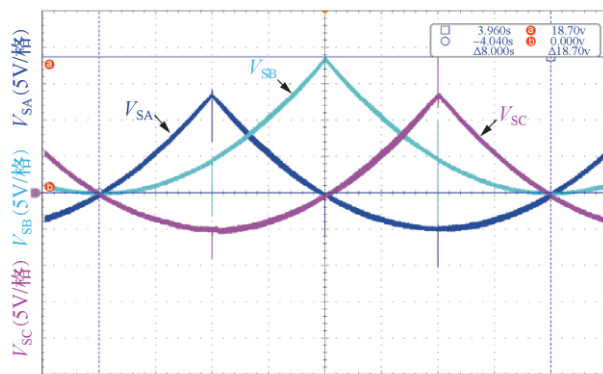
5.2 四区间 MRPDE 实验

模拟列车匀速运行,列车电流为 15 A .实验结果如图 13 所示.其中 V_{L1} 表示列车处轨道电位, V_{OL} 表示牵引变电所 TS_1 、 TS_2 处轨道电位, V_{sum} 表示 V_{L1} 和 V_{OL} 的相加值.可知,列车运行过程中 V_{L1} 和 V_{OL} 相加为零,与式(13)理论分析一致. V_{L1} 与 V_{OL} 随列车运行变化波形与理论分析基本一致,列车运行到两牵引变电所中点时, V_{L1} 为 18.76 V ,与理论分析结果 18.74 V 相对偏差 0.1% .

图 13(b)中 V_{SA} 、 V_{SB} 分别为 $l/4$ 处、 $l/2$ 处的轨道电位波形, V_{SC} 为 $3l/4$ 处的轨道电位波形,固定位置处轨道电位随列车运行变化波形与理论分析基本一致,列车运行到两牵引变电所中点时, V_{SB} 最大值



(a) 列车与变电所处轨道电位波形



(b) 固定位置处轨道电位波形

图 13 四区间 MRPDE 实验波形

Fig.13 Four-interval MRPDE experimental waveform

18.70 V ,与理论分析结果 18.74 V 相对偏差 0.2% .

综上,MRPDE 动态响应性能良好,模拟精度高,具有多个轨道电位测量点,并且能够准确地实现地铁系统轨道电位和杂散电流总量的动态模拟.有良好的可行性与实用性,可为杂散电流与轨道电位治理措施提供前期试验平台.

6 结论

1)CRM 拓扑简单,能够流过双向电流,动态响应性能良好,且阻值精度高,适用于模拟列车运行时的轨道阻值变化规律.

2)MRPDE 通过增加扩展单元 C 可将直流牵引供电系统划分为多个区间,区间数由扩展单元 C 的数量决定.

3)MRPDE 能够准确实现地铁系统的轨道电位和杂散电流的动态模拟,尤其适用于分段接入杂散电流治理措施的前期实验评估.

4)MRPDE 有良好的可行性与实用性,实验结果与理论分析基本一致.

参考文献 (References):

- [1] 朱卫国.城市轨道交通综述[J].城市车辆,2001(3):37—40.
ZHU Weiguo. Overview of urban rail transit[J]. Urban Vehicles, 2001(3): 37—40. (in Chinese)

- [2] 中国城市轨道交通协会.城市轨道交通 2017 年度统计和分析报告[J].城市轨道交通,2018(4):6—25.
China Urban Rail Transit Association. Statistics and analysis of urban rail transit in 2017[J]. China Metros, 2018(4):6—25. (in Chinese)
- [3] XU S, LI W, WANG Y. Effects of vehicle running mode on rail potential and stray current in DC mass transit systems [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2013, 62 (8):3569—3580.
- [4] CHARALAMBOUS C A, AYLOTT P. Dynamic stray current evaluations on cut-and-cover sections of DC metro systems[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2014, 63(8):3530—3538.
- [5] 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—139.
DU Guifu, ZHANG Dongliang, WANG Chonglin, et al. Effect of traction current transmission among power sections on rail potential in DC mass transit system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31 (11):129—139. (in Chinese)
- [6] TZENG Y, LEE C. Analysis of rail potential and stray currents in a direct-current transit system [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2010, 25 (3): 1516—1525.
- [7] 申宁, 李群湛, 刘炜. 不均匀过渡电阻下地铁杂散电流分析[J]. 都市轨道交通, 2010, 23(6): 98—100.
SHEN Ning, LI Qunzhan, LIU Wei. Analysis of stray current under non-uniform transition resistance in subway[J]. Urban Rapid Rail Transit, 2010, 23(6): 98—100. (in Chinese)
- [8] 周军峰, 谭海川, 张鑫, 等. 直流杂散电流对天然气管道干扰影响案例分析[J]. 腐蚀与防护, 2018, 39 (9): 713—718.
ZHOU Junfeng, TAN Haichuan, ZHANG Xin, et al. Case analysis of the influence of DC stray current on natural gas pipelines[J]. Corrosion and Protection, 2018, 39(9): 713—718. (in Chinese)
- [9] OGUNSOLA A, MARISCOTTI A, SANDROLINI L. Estimation of stray current from a DC-electrified railway and impressed potential on a buried pip[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2012, 27(4):2238—2246.
- [10] 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.
- [11] MEMON S A, FROMME P. Stray current corrosion and mitigation; A synopsis of the technical methods used in dc transit systems [J]. IEEE Electrification Magazine, 2014, 2(3):22—31.
- [12] 李威. 地铁杂散电流腐蚀监测及防护技术[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2004.
LI Wei. Subway stray current corrosion monitoring and protection technology[M]. Xuzhou: China University of Mining and Technology Press, 2004. (in Chinese)
- [13] 郑琼林, 杨晓峰, 游小杰. 城市轨道交通直流自耦变压器牵引供电系统[J]. 都市轨道交通, 2016, 29 (3): 91—97.
ZHENG Trillion Q, YANG Xiaofeng, YOU Xiaojie. DC auto-transformer based traction power supply system for urban rail transit[J]. Urban Rapid Rail Transit, 2016, 29(3):91—97. (in Chinese)
- [14] WANG M, YANG X F, WANG L L, et al. Resonant switched capacitor converter based DC auto-transformer for urban rail transit[C]//Proceedings of IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition, San Antonio, 2018:1441—1446.
- [15] IBRAHEM A, ELRAYYAH A, SOZER Y, et al. DC railway system emulator for stray current and touch voltage prediction[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2017, 53(1):439—446.
- [16] XUE H, YANG X F, ZHOU Y H, et al. Multi-interval DC traction system simulator for stray current and rail potential distribution[C]//Proceedings of IEEE Energy Conversion Congress and Exposition. Portland, 2018: 524—531.
- [17] YANG X F, XUE H, WANG L L, et al. Stray current and rail potential simulation system for urban rail transit[C]//Proceedings of IEEE International Power Electronics and Application Conference and Exposition. Shenzhen, 2018:1—6.
- [18] 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, ZHENG Trillion Q. 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. (in Chinese)
- [19] Ali Emadi, Alireza Khaligh, Zhong Nie, 等. 集成电力电子变换器及数字控制[M]. 连晓峰等, 译. 北京: 机械工业出版社, 2011:86—87.
EMADI A, KHALIGH A, NIE Z, et al. Integrated power electronic converter and digital control [M]. LIAN Xiaofeng et al, trans. Beijing: Mechanical Industry Press, 2011:86—87. (in Chinese)