

DOI: 10.19595/j.cnki.1000-6753.tces.L80532

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

杨晓峰 薛 皓 郑琼林

(北京交通大学电气工程学院 北京 100044)

摘要 现代城市轨道交通中,杂散电流与轨道电位带来的安全问题日益凸显,上述问题的防治措施在现场验证协调难度大,因此杂散电流与轨道电位模拟系统受到广泛关注。现有模拟系统缺乏对列车运行工况和牵引变电站接地方式的考虑,应用范围受限。为此,提出一种双向可变电阻模块,用以模拟列车的不同运行工况;在此基础上,结合牵引变电站接地方式,进一步提出了三种动态模拟系统,详细研究了其应用场合、演化规律、参数选择和控制策略。仿真和实验结果表明三种模拟系统不仅可用于研究杂散电流与轨道电位的动态分布规律,还可对相应的防治措施开展实验评估,因此具有良好的应用前景。

关键词: 城市轨道交通 杂散电流 轨道电位 动态模拟系统 双向可变电阻模块

中图分类号: TM922

Stray Current and Rail Potential Dynamic Simulation System Based on Bidirectional Variable Resistance Module

Yang Xiaofeng Xue Hao Trillion Q. Zheng

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

Abstract With the rapid development of urban rail transit, the safety problems caused by stray current and rail potential are increasingly serious. However, the stray current and rail potential solutions are difficult to verify in actual metro system. In recent years, the corresponding simulation systems have been extensively studied by researchers around the world. But the existing simulation systems lack the consideration of the train operation conditions and grounding schemes. Therefore, the applications of the simulation systems are limited. For these reasons, a novel bidirectional variable resistance module is firstly proposed to simulate the train movement under different operation conditions. Then three new dynamic simulation systems are further proposed in combination with the grounding schemes of the traction substation. The application scenarios, evolution laws, parameter selection and control strategies are analyzed in detail. The simulation and experimental results show that the above mentioned simulation systems can be employed not only to analyze the effects of stray current and rail potential, but also to hardware evaluations. It shows good application prospect in urban rail transit study.

Keywords: Urban rail transit, stray current, rail potential, dynamic simulation system, bidirectional variable resistance module

国家自然科学基金重点项目(51737001)和中央高校基本科研业务费(2019JBM058)资助。

收稿日期 2018-07-01 改稿日期 2018-10-23

0 引言

随着我国城市化进程的推进,轨道交通因为运力大、速度快、污染小以及安全性高等特点,近年来得到大力发展,其直流牵引系统中存在的杂散电流与轨道电位引起的安全问题受到广泛关注^[1-4]。图1为轨道交通直流牵引系统中杂散电流的产生机理示意图,出于经济运行的考虑,走行轨不仅用于列车运行,同时还作为列车牵引电流的回流轨。由于走行轨与大地之间不可能完全绝缘,一部分牵引电流泄漏进入大地,并沿着土壤或埋地金属管线流动,最后返回到走行轨和牵引变电站负极,这部分电流称为杂散电流,也称之为迷流^[5-6]。杂散电流会导致走行轨和牵引系统附近的金属结构遭到严重的电化学腐蚀,使用寿命大大缩短;长时间的腐蚀将导致管线破损,甚至引发火灾和爆炸事故。同时,由于走行轨纵向电阻的存在,牵引电流会在走行轨上产生几十伏甚至上百伏的电势差,称之为轨道电位^[7-8]。由于轨道电位的最大值出现在列车所在位置处,所以会对人体安全产生潜在危害。

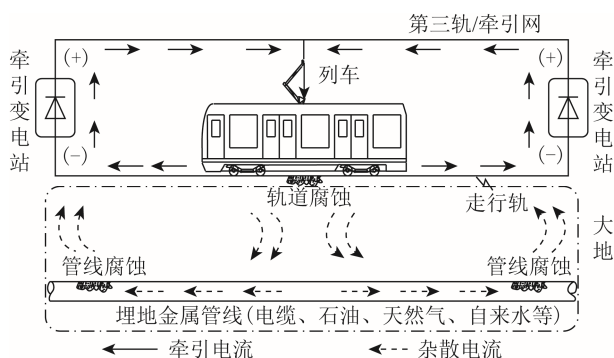


图1 直流牵引系统中杂散电流的产生机理

Fig.1 Stray current generation mechanism in DC traction system

由于杂散电流与轨道电位的防治措施在现场验证协调难度大,国内外学者提出了一系列模拟系统用于杂散电流与轨道电位的研究,主要分为三类:①多维空间模拟系统^[9-10];②定值电阻模拟系统^[11-12];③可变电阻模拟系统^[13]。多维空间模拟系统因为建模过程复杂且适用对象单一而较少使用。定值电阻模拟系统的模拟精度与系统使用的电阻数量呈正比,同时只能实现杂散电流和轨道电位的静态模拟。可变电阻模拟系统在定值电阻模拟系统的基础上,采用电力电子变换器替代电阻,在提高系统模拟精度的同时,实现了杂散电流与轨道电位的动态模拟。但已有的可变电阻模拟系统只适用于

牵引变电站负极直接接地的牵引系统,且只能模拟列车以单一工况运行时的杂散电流与轨道电位,无法适用于为抑制杂散电流和轨道电位提出的多区间牵引系统^[14-15]。

针对上述不足,本文首先研究了一种双向可变电阻模块(Bidirectional Variable Resistance Module, BVRM),通过改变列车左右两侧的走行轨纵向电阻,模拟列车的不同运行工况。在此基础上,结合牵引变电站接地方式和牵引系统特点,进一步提出三种动态模拟系统:基本型动态模拟系统(Basic Dynamic Simulation System, B-DSS)、多接地动态模拟系统(Multiple Grounding Dynamic Simulation System, MG-DSS)和多区间动态模拟系统(Multiple Interval Dynamic Simulation System, MI-DSS),分别讨论了其工作原理、参数选择和控制策略。最后对所提出模拟系统开展了详细的仿真和实验验证。

1 双向可变电阻模块

1.1 BVRM 电路拓扑

模拟列车运行的关键在于实现走行轨纵向电阻跟随列车运行轨迹及牵引电流曲线呈现规律性的动态调整。本文提出的BVRM拓扑如图2所示,其由两个直流电压源 U_1 和 U_2 、两个可控开关 S_1 和 S_2 、四个二极管 $VD_1 \sim VD_4$ 、一个滤波电感 L 、两个滤波电容 C_1 和 C_2 以及两个电阻 R_1 和 R_2 组成。

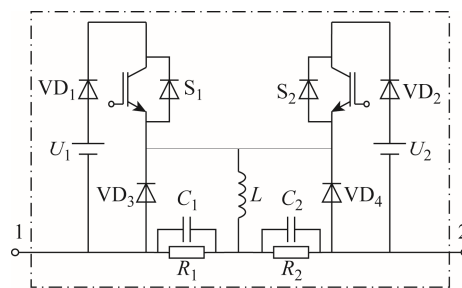


图2 BVRM 拓扑

Fig.2 Topology of BVRM

BVRM 采用对称的电路结构,当外部电流从端子1或端子2流入时,均能在端子1和端子2两端产生与外部电流极性相同的电压,对外呈现电阻特性。

1.2 BVRM 工作原理

根据外部电流的流向,BVRM 具有两种典型工作模式,如图3所示。

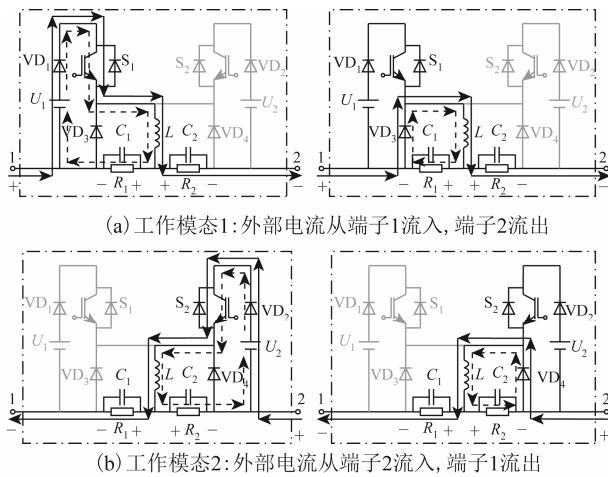


图 3 BVRM 的工作模式

Fig.3 The operation modes of BVRM

1) 模式 1: 如图 3a 所示, 外部电流 I 从端子 1 流入, 从端子 2 流出, S_2 和 VD_4 始终保持关断。 S_1 开通时, VD_1 导通, VD_3 反向截止; S_1 关断时, VD_1 关断, VD_3 导通续流。 VD_2 用以保证外部电流不会通过 S_2 的体二极管流过 U_2 。 R_1 两端电压为 $D_1 U_1$, R_2 两端电压为 $I R_2$, 其中 D_1 为 S_1 的触发脉冲占空比。BVRM 的等效输出电阻 R_{BVRM} 为

$$R_{BVRM} = \frac{I R_2 - D_1 U_1}{I} = R_2 - \frac{U_1}{I} D_1 \quad (1)$$

由此可见, 当 BVRM 工作在模式 1 时, 通过控制 D_1 , 即可控制 R_{BVRM} 在 $0 \sim R_2$ 变化。

2) 模式 2: 如图 3b 所示, 外部电流 I 从端子 2 流入, 从端子 1 流出, S_1 和 VD_3 始终保持关断。 S_2 开通时, VD_2 导通, VD_4 反向截止; S_2 关断时, VD_2 关断, VD_4 导通续流。 VD_1 用以保证外部电流不会通过 S_1 的体二极管流过 U_1 。 R_1 两端电压为 $I R_1$, R_2 两端电压为 $D_2 U_2$, 其中 D_2 为 S_2 的触发脉冲占空比。 R_{BVRM} 为

$$R_{BVRM} = \frac{I R_1 - D_2 U_2}{I} = R_1 - \frac{U_2}{I} D_2 \quad (2)$$

由此可见, 当 BVRM 工作在模式 2 时, 通过控制 D_2 , 即可控制 R_{BVRM} 在 $0 \sim R_1$ 变化。

1.3 BVRM 参数设计

为方便分析, 假定 BVRM 参数为

$$\begin{cases} R_1 = R_2 = R \\ C_1 = C_2 = C \\ U_1 = U_2 = U \\ T_{S1} = T_{S2} = T_s \end{cases} \quad (3)$$

式中, T_{S1} 为 S_1 的开关周期; T_{S2} 为 S_2 的开关周期。因为占空比 $0 < D_1 < 1$ 且 $0 < D_2 < 1$, 根据式 (1) 和式 (2) 可得直流电源电压需满足

$$U \geq IR \quad (4)$$

同时, 因式 (1) 与式 (2) 成立的前提是 BVRM 工作在电感电流连续模式下, 据此给出电感 L 的选取过程。首先引入无量纲系数 K_1 、 K_2 。

$$K_1 = \frac{2L}{RT_s} \quad (5)$$

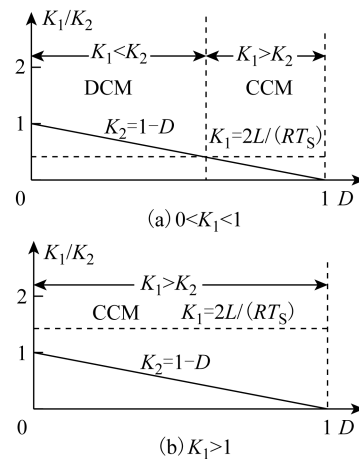
$$K_2 = 1 - D \quad (6)$$

对于某一固定占空比 D , 当 $K_1 > K_2$ 时 BVRM 工作在电感电流连续模式下; 当 $K_1 < K_2$ 时 BVRM 工作在电感电流断续模式下, 如图 4a 所示。因为 R_{BVRM} 需要可调, 所以 BVRM 必须在全占空比范围内工作在电感电流连续模式下, 即对任意占空比 D , 均满足 $K_1 > K_2$, 如图 4b 所示, 此时 K_1 应满足

$$K_1 > 1 \quad (7)$$

根据式 (7) 可得电感 L 为

$$L > \frac{RT_s}{2} \quad (8)$$

图 4 K_1 与 K_2 的曲线Fig.4 Comparison of K_1 with K_2

进一步, 根据系统设计要求的电容电压纹波 Δu_C , 电容 C 的值为

$$C \geq \frac{UT_s^2}{64L\Delta u_C} \quad (9)$$

2 杂散电流与轨道电位动态模拟系统

实际牵引系统中, 牵引变电站负极的接地方式共有四种, 如图 5 所示, 分别为直接接地^[1,3,12]、悬

浮接地^[1,3,8-12]、二极管接地^[1,3,4,7]和轨道电位限制装置接地^[1,2,6]。

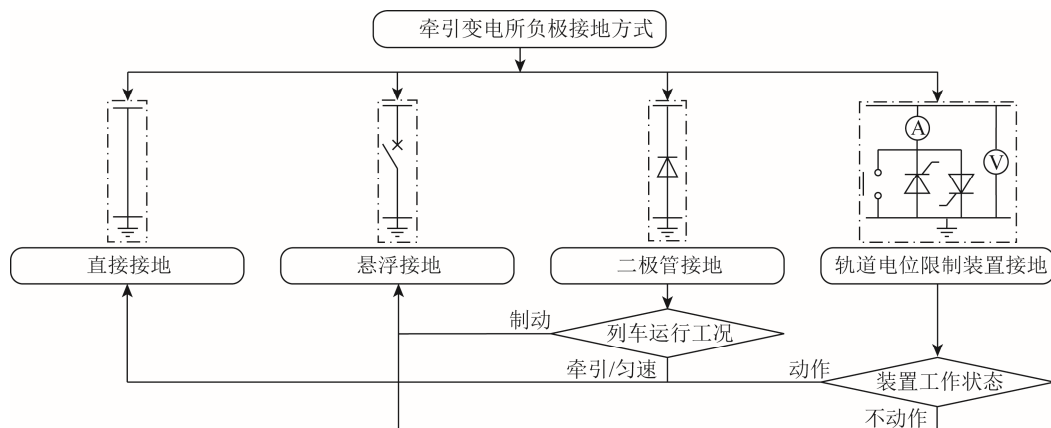


图5 牵引变电站负极接地方式

Fig.5 Grounding schemes of the traction substation

对于二极管接地方式，当列车以牵引或匀速工况运行时，等同于直接接地；以制动工况运行时，等同于悬浮接地。对于轨道电位限制装置接地方式，当直流接触器或晶闸管组动作时，等同于直接接地；不动作时，等同于悬浮接地。因此本文的讨论只针对直接接地和悬浮接地，对应的牵引系统简称为接地系统和浮地系统。

2.1 直流牵引系统阻抗模型

现有模拟系统均基于如图6所示的直流牵引系统阻抗模型提出。阻抗模型由四部分组成：交流电流源代表列车；两个直流电压源分别代表牵引区间左右两侧的牵引变电站；一部分电阻代表走行轨纵向电阻；另一部分电阻代表走行轨对地电阻。

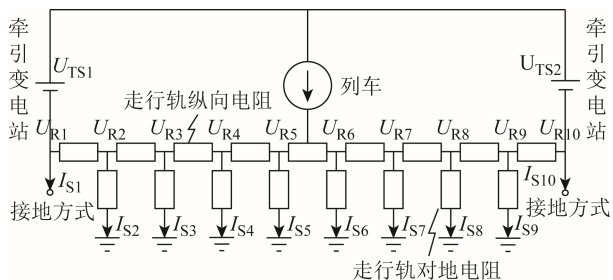


图6 直流牵引系统阻抗模型

Fig.6 The impedance model of DC traction system

总杂散电流可以有效表现金属结构的整体腐蚀效应，因此本文将其作为模拟系统的模拟对象之一。对于接地系统，总杂散电流 I_{TS-G} 的计算公式为

$$I_{TS-G} = \sum_{j=2}^{N-1} I_{Sj} = \sum_{j=2}^{N-1} \frac{U_{Rj}}{(N-2) \frac{R_G}{l}} \quad (10)$$

式中， I_{Sj} 为泄漏路径 j 处的杂散电流； U_{Rj} 为泄漏路径 j 处的轨道电位； N 为泄漏路径数量； R_G 为单位走行轨对地电阻值， $\Omega \cdot \text{km}$ ； l 为供电区间长度， km 。对于浮地系统，只考虑从走行轨泄漏至大地的杂散电流，总杂散电流 I_{TS-F} 的计算公式为

$$I_{TS-F} = \frac{1}{2} \sum_{j=2}^{N-1} I_{Sj} = \frac{1}{2} \sum_{j=2}^{N-1} \frac{|U_{Rj}|}{(N-2) \frac{R_G}{l}} \quad (11)$$

同时，因轨道电位的最大值出现在列车所在位置处，本文选择列车位置处的轨道电位 U_{RT} 作为模拟系统的另一个模拟对象。

2.2 基本型动态模拟系统 B-DSS

本文提出的 B-DSS 适用于接地系统，拓扑结构如图7所示，在阻抗模型的基础上，走行轨纵向电阻和走行轨对地电阻两部分发生了变化。BVRM1代表列车左侧走行轨纵向电阻，BVRM2代表列车右侧走行轨纵向电阻，电阻 r 代表走行轨对地电阻。

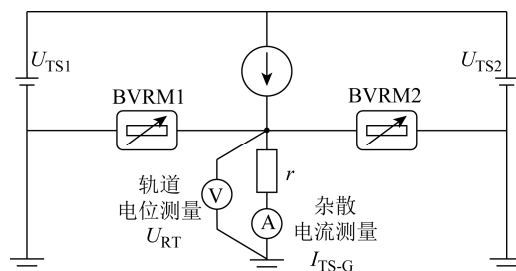


图7 B-DSS 拓扑

Fig.7 The topology of proposed B-DSS

图8为列车从左至右运行时， R_{BVRM} 随列车运

行距离变化的目标控制曲线, R_{BVRM1} 从 0 线性增加至 $R_S l$, R_{BVRM2} 从 $R_S l$ 线性减小至 0, 其中 R_S 为单位走行轨纵向电阻, Ω/km 。

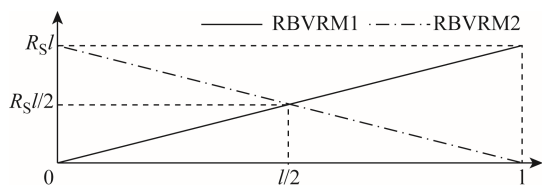


图 8 B-DSS 中 R_{BVRM} 的目标控制曲线

Fig.8 The target control curve of R_{BVRM} in B-DSS

由于走行轨对地电阻只用一个电阻表示, 所以流过电阻 r 的电流即总杂散电流, 取 $N \rightarrow \infty$, 对式 (10) 做积分变换, 得到列车位置处轨道电位 U_{RT} 与总杂散泄露电流 I_{TS-G} 的关系为

$$I_{TS-G} = \frac{1}{R_G} \cdot S(O_G A_G B_G) = \frac{U_{RT} - 0}{2R_G / l} \quad (12)$$

式中, $S(O_G A_G B_G)$ 为接地系统的轨道电位静态曲线 $U_{R-G}(x)$ 与距离轴 x 轴在第一象限内围成的面积, 即图 9 中三角形 $O_G A_G B_G$ 的面积。故电阻 r 取值为

$$r = 2R_G / l \quad (13)$$

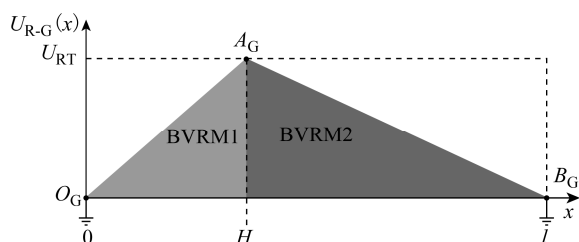


图 9 B-DSS 中轨道电位静态曲线

Fig.9 Rail potential static curve in B-DSS

2.3 多接地动态模拟系统 MG-DSS

本文提出的 MG-DSS 通过不同的连接方式, 适用于接地系统和浮地系统, 拓扑结构如图 10 所示。

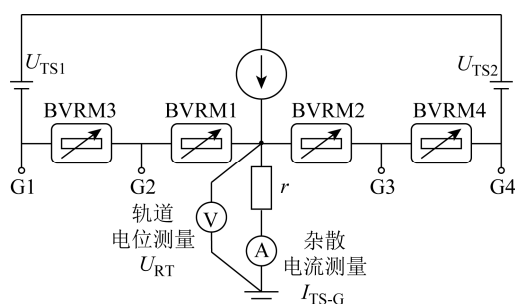


图 10 MG-DSS 拓扑

Fig.10 The topology of proposed MG-DSS

在 B-DSS 的基础上, 列车与牵引变电站中点处设置了新的零电位参考点 G2 和 G3; G1 和 G4 为保留的零电位参考点; BVRM1 和 BVRM3 代表列车左侧走行轨纵向电阻; BVRM2 和 BVRM4 代表列车右侧走行轨纵向电阻。

当 MG-DSS 应用于接地系统, G1 和 G4 接地, 成为零电位参考点; G2 和 G3 悬空。此时 MG-DSS 的拓扑结构和工作方式与 B-DSS 相似, 电阻 r 的取值参见式 (13)。

当 MG-DSS 应用于浮地系统, G1 和 G4 悬空; G2 和 G3 接地, 成为新的零电位参考点。图 11 为列车从左至右运行时, R_{BVRM} 随列车运行距离变化的目标控制曲线, R_{BVRM1} 和 R_{BVRM3} 从 0 线性增加至 $R_S l/2$, R_{BVRM2} 和 R_{BVRM4} 从 $R_S l/2$ 线性减小至 0。

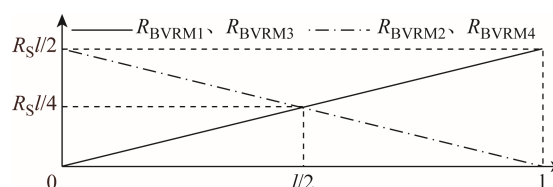


图 11 MG-DSS 中 R_{BVRM} 的目标控制曲线

Fig.11 The target control curve of R_{BVRM} in MG-DSS

同样取 $N \rightarrow \infty$, 对式 (11) 做积分变换, 得到 U_{RT} 与总杂散泄露电流 I_{TS-F} 的关系

$$I_{TS-F} = \frac{1}{R_G} \cdot S(O_F A_F B_F) = \frac{U_{RT} - 0}{4R_G / l} \quad (14)$$

式中, $S(O_F A_F B_F)$ 为浮地系统的轨道电位静态曲线 $U_{R-F}(x)$ 与距离轴 x 轴在第一象限内围成的面积, 即图 12 中三角形 $O_F A_F B_F$ 的面积。故电阻 r 取值为

$$r = 4R_G / l \quad (15)$$

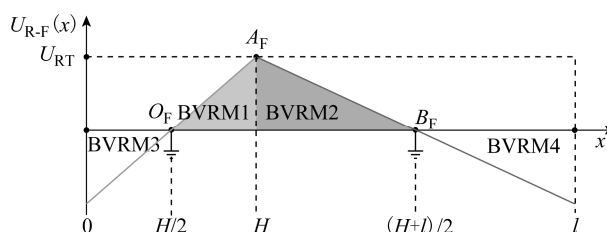


图 12 MG-DSS 中轨道电位静态曲线

Fig.12 Rail potential static curve in MG-DSS

2.4 多区间动态模拟系统 MI-DSS

相比于传统牵引系统, 多区间牵引系统在供电

区间内增设若干新的“牵引变电站”，将一个供电区间分成若干子区间。由 B-DSS 可知，每个供电区间至少需要两个 BVRM 模拟列车运行。因此在 B-DSS 的基础上，增设若干区间切换模块（Interval Switching Module, ISM），如图 13 所示，用于将两个 BVRM 在各子区间之间切换，模拟列车在整个供电区间内运行，提出 MI-DSS。

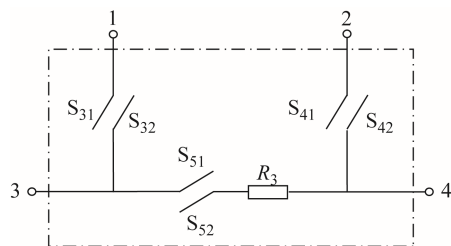


图 13 ISM 拓扑

Fig.13 The topology of proposed ISM

ISM 的拓扑由 3 个双向开关 S_3 （ S_{31} 和 S_{32} ）、 S_4 （ S_{41} 和 S_{42} ）、 S_5 （ S_{51} 和 S_{52} ）以及 1 个电阻 R_3 组成。根据 BVRM 是否接入子区间，ISM 可分为两种工作模式，如图 14 所示。

1) 模式 1: 如图 14a 所示。双向开关 S_3 和双向开关 S_4 导通，双向开关 S_5 关断，BVRM1 和 BVRM2

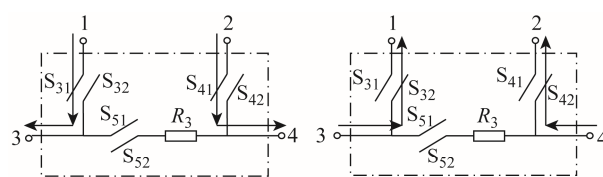
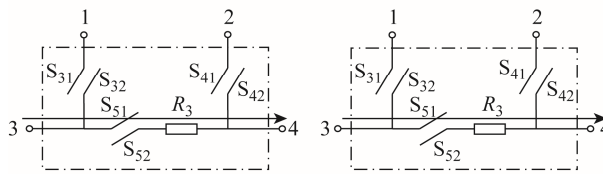
(a) 工作模式1: BVRM被接入子区间, R_3 从子区间切除(b) 工作模式2: BVRM从子区间切除, R_3 被接入子区间

图 14 ISM 的工作模式

Fig.14 The operation modes of ISM

接入子区间，电阻 R_3 从子区间切除。

2) 模式 2: 如图 14b 所示。 S_3 和 S_4 关断， S_5 导通，BVRM1 和 BVRM2 从子区间切除， R_3 接入子区间。

图 15 以子区间数 $M=3$ 为例，给出了 MI-DSS 的拓扑结构示意图，图中相同序号的端子连接在一起。由于新增“牵引变电站”拓扑众多，图 15 仅就其中一种给出等效示意图。

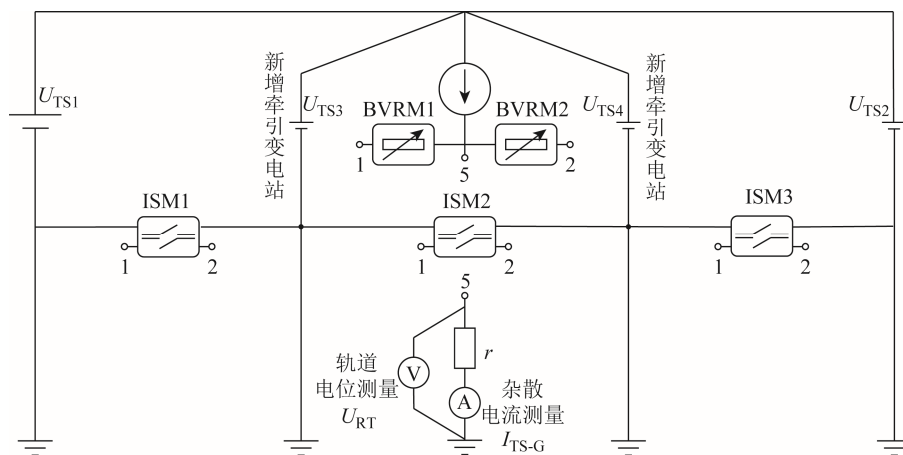
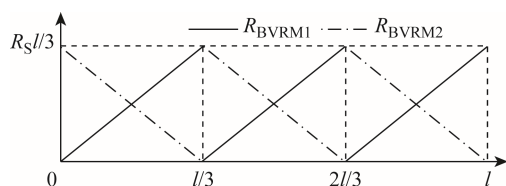


图 15 MI-DSS 拓扑 (以三区间为例)

Fig.15 The topology of proposed MI-DSS (take three intervals as an example)

图 16 为列车从左至右运行时， R_{BVRM} 随列车运行距离变化的目标控制曲线， R_{BVRM1} 依次在每个子

图 16 MI-DSS 中 R_{BVRM} 的目标控制曲线Fig.16 The target control curve of R_{BVRM} in MI-DSS

区间内从 0 线性增加至 $R_S l/M$ ， R_{BVRM2} 从 $R_S l/M$ 线性减小至 0。

每一个 ISM 中电阻 R_3 的值为

$$R_{3-ISM1} = R_{3-ISM2} = R_{3-ISM3} = R_S l/M \quad (16)$$

电阻 r 的选取过程与 B-DSS 类似，得到 U_{RT} 与 I_{TS-G} 的关系

$$I_{TS-G} = \frac{1}{R_G} S_{C_G D_G E_G} = \frac{U_{RT} - 0}{2MR_G/l} \quad (17)$$

式中, $S_{C_G D_G E_G}$ 为多区间系统的轨道电位静态曲线 $U_{R-M}(x)$ 与距离轴 x 轴在第一象限内围成的面积, 即图 17 中三角形 $C_G D_G E_G$ 的面积。故电阻 r 取值为

$$r = 2MR_G / l \quad (18)$$

2.5 各类可变电阻模拟系统比较与总结

针对现有可变电阻模拟系统与本文提出的 B-DSS、MG-DSS 和 MI-DSS 三种动态模拟系统, 从结构组成、参数选取以及应用场合等方面进行对比和总结, 结果见表 1。可以看出, 提出的模拟系统较现有可变电阻模拟系统, 减少了电力电子变换器的使用数量, 系统复杂程度得到降低; 走行轨对地电阻部分由多个变换器变为单个电阻, 相应的控制难度以及

测量装置数量得到简化; 同时增加了适用列车运行工况以及适用牵引系统类型的范围, 因此具有更好的应用前景。

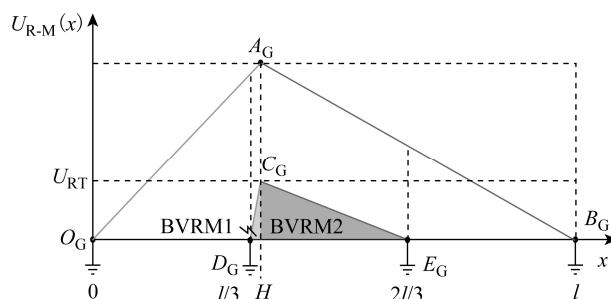


图 17 MI-DSS 中轨道电位静态曲线

Fig.17 Rail potential static curve in MI-DSS

表 1 不同类型可变电阻模拟系统工作性能对比

Tab.1 Characteristics of different simulation systems

模拟系统	走行轨纵向电阻 变换器数量	走行轨对地电阻 变换器数量	走行轨对地电阻取值	适用列车运行工况	适用牵引系统类型
现有模拟系统 ^[13]	4	2	—	单一工况	接地系统
B-DSS	2	0	$2R_G/l$	多种工况	接地系统
MG-DSS	4	0	接地系统 浮地系统 $2R_G/l$ $4R_G/l$	多种工况	接地系统/浮地系统
MI-DSS	$2+M$	0	$2MR_G/l$	多种工况	多区间系统

3 控制策略

动态模拟系统的控制目标是: 针对给定的列车电流和速度曲线, 输出合理的驱动信号, 控制 BVRM 和 ISM 中的开关器件, 模拟列车从供电区间左侧行驶至右侧, 再通过测量装置得到杂散电流和轨道电位的动态分布。三种动态模拟系统的控制策略存在相同部分, 因此将三者的控制框图合并在一起, 如图 18 所示。控制框图由三部分组成: 第一部分为牵引计算及控制参考值计算模块; 第二部分为电压电流双闭环控制模块; 第三部分为 PWM 硬件实现及反馈值测量模块。第一部分共分 7 个步骤, 其中步骤 2 和步骤 6 只用于 MI-DSS。

步骤 1) 初始化参数。对列车运行距离 $H(t)$, 流过左侧牵引变电站电流 $I_L(t)$, 流过右侧牵引变电站电流 $I_R(t)$ 、列车左侧走行轨纵向电阻 $R_L(t)$ 和列车右侧走行轨纵向电阻 $R_R(t)$ 进行初始化。

$$\begin{cases} H(t)=0 \\ I_L(t)=|I_T(t)|, I_R(t)=0 \\ R_L(t)=0, R_R(t)=R_S l \end{cases} \quad (19)$$

式中, $I_T(t)$ 为列车牵引电流。

步骤 2) 计算列车所在子区间 n 。

$$n = \text{ceil}\left(\frac{M \cdot H(t)}{l}\right) \quad (20)$$

步骤 3) 计算牵引电流分布。

$$\begin{cases} I_L(t) = |I(t)| \frac{l-H(t)}{l} \\ I_R(t) = |I(t)| \frac{H(t)}{l} \end{cases} \quad (21)$$

步骤 4) 计算走行轨纵向电阻分布。对于 B-DSS 和 MG-DSS

$$\begin{cases} R_L(t) = R_S l \frac{H(t)}{l} \\ R_R(t) = R_S l \frac{l-H(t)}{l} \end{cases} \quad (22)$$

对于 MI-DSS

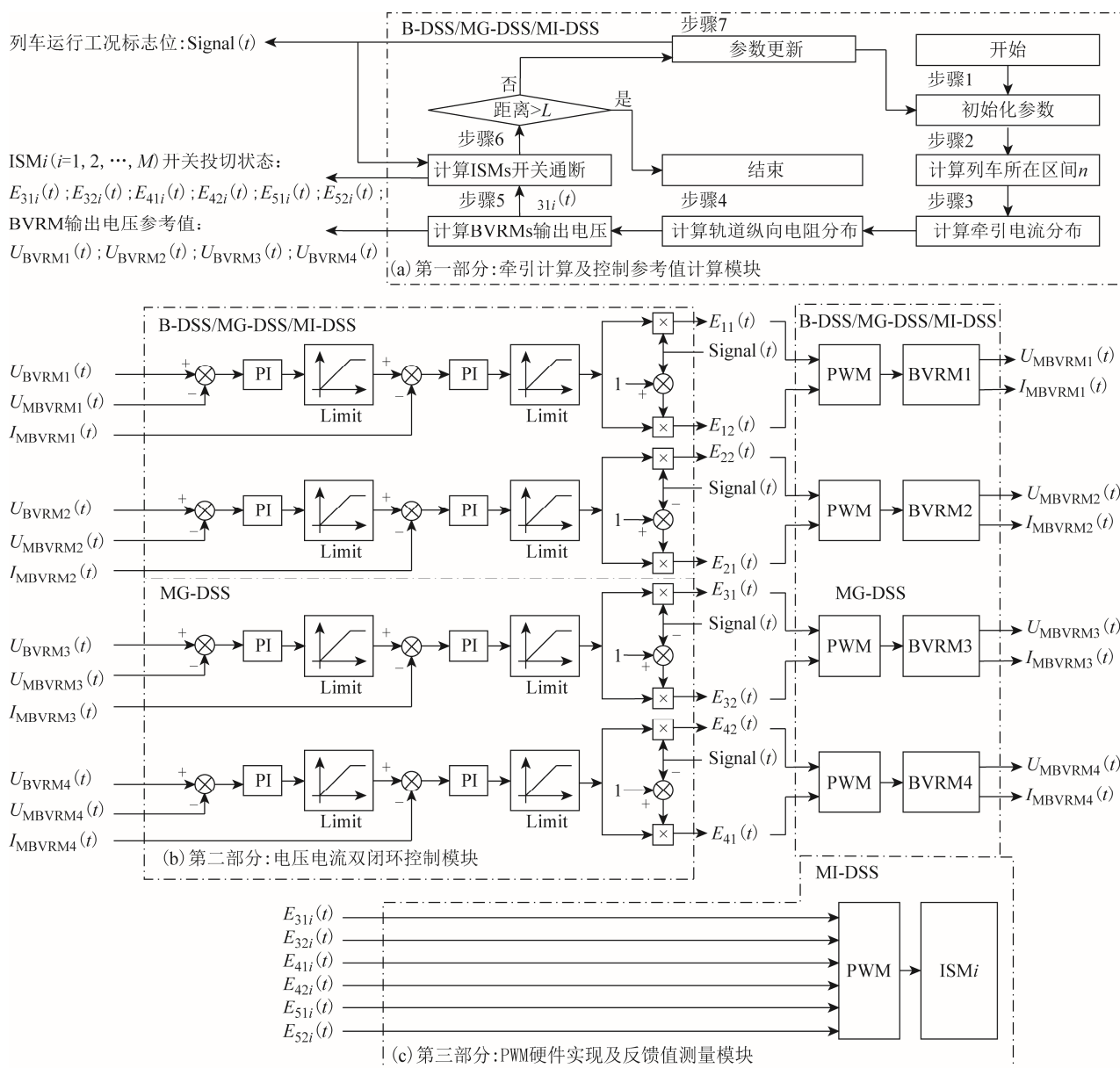


图 18 模拟系统控制框图

Fig.18 The control block diagram of the simulation systems

$$\begin{cases} R_L(t) = R_s l \frac{H(t)}{l} - \frac{n-1}{M} R_s l \\ R_R(t) = R_s l \frac{l-H(t)}{l} - \left(1 - \frac{n}{M}\right) R_s l \end{cases} \quad (23)$$

步骤 5) 计算 BVRM 输出电压参考值。对于 B-DSS 和 MI-DSS

$$\begin{cases} U_{BVRM1}(t) = I_L(t) \cdot (R - R_L(t)) \\ U_{BVRM2}(t) = I_R(t) \cdot (R - R_R(t)) \end{cases} \quad (24)$$

对于 MG-DSS, 当应用于接地系统时

$$\begin{cases} U_{BVRM1}(t) + U_{BVRM3}(t) = I_L(t) \cdot (R - R_L(t)) \\ U_{BVRM2}(t) + U_{BVRM4}(t) = I_R(t) \cdot (R - R_R(t)) \end{cases} \quad (25)$$

当应用于浮地系统时

$$\begin{cases} U_{BVRM1}(t) = U_{BVRM3}(t) = \frac{1}{2} I_L(t) \cdot (R - R_L(t)) \\ U_{BVRM2}(t) = U_{BVRM4}(t) = \frac{1}{2} I_R(t) \cdot (R - R_R(t)) \end{cases} \quad (26)$$

步骤 6) 计算 ISM 开关状态。

当 $Signal(t)=0$

$$\left\{ \begin{array}{l} E_{31i}(t) = E_{41i}(t) = 1 \\ E_{32i}(t) = E_{42i}(t) = E_{51i}(t) = E_{52i}(t) = 0 \end{array} \right|_{i=n} \\ E_{52i}(t) = 1 \\ E_{31i}(t) = E_{32i}(t) = E_{41i}(t) = E_{42i}(t) = E_{51i}(t) = 0 \end{array} \right|_{i < n} \\ E_{51i}(t) = 1 \\ E_{31i}(t) = E_{32i}(t) = E_{41i}(t) = E_{42i}(t) = E_{52i}(t) = 0 \end{array} \right|_{i > n} \quad (27)$$

当 $\text{Signal}(t)=1$

$$\left\{ \begin{array}{l} E_{32i}(t) = E_{42i}(t) = 1 \\ E_{31i}(t) = E_{41i}(t) = E_{51i}(t) = E_{52i}(t) = 0 \end{array} \right|_{i=n} \\ E_{51i}(t) = 1 \\ E_{31i}(t) = E_{32i}(t) = E_{41i}(t) = E_{42i}(t) = E_{52i}(t) = 0 \end{array} \right|_{i < n} \\ E_{52i}(t) = 1 \\ E_{31i}(t) = E_{32i}(t) = E_{41i}(t) = E_{42i}(t) = E_{51i}(t) = 0 \end{array} \right|_{i > n} \quad (28)$$

步骤 7) 参数更新。更新的参数有加速度 $a(t)$ 、时间 t 、 $H(t)$ 、速度 $v(t)$ 、 $I_T(t)$ 以及列车运行工况标志位 $\text{Signal}(t)$ 。当列车处于牵引或匀速工况

$$\text{Signal}(t) = 0 \quad (29)$$

当列车处于制动工况

$$\text{Signal}(t) = 1 \quad (30)$$

第一部分计算完成后, 将第一部分的输出包括: $\text{signal}(t)$; $U_{\text{BVRM1}}(t)$ 、 $U_{\text{BVRM2}}(t)$ 、 $U_{\text{BVRM3}}(t)$ 和 $U_{\text{BVRM4}}(t)$; $E_{31i}(t)$ 、 $E_{32i}(t)$ 、 $E_{41i}(t)$ 、 $E_{42i}(t)$ 、 $E_{51i}(t)$ 和 $E_{52i}(t)$ 依次按照控制框图所示输入至第二部分和第三部分, 再将第三部分中传感器的测量值 $U_{\text{MBVRM1}}(t)$ 、 $I_{\text{MBVRM1}}(t)$ 、 $U_{\text{MBVRM2}}(t)$ 、 $I_{\text{MBVRM2}}(t)$ 、 $U_{\text{MBVRM3}}(t)$ 、 $I_{\text{MBVRM3}}(t)$ 、 $U_{\text{MBVRM4}}(t)$ 和 $I_{\text{MBVRM4}}(t)$ 作为反馈量输入至第二部分闭环控制模块中, 即完成了动态模拟系统的整个控制过程。

4 仿真验证

本节搭建 Matlab/Simulink 仿真模型, 对 BVRM

和三个动态模拟系统的工作原理及控制策略进行仿真实验验证。

4.1 双向可变电阻模块验证

按照表 2 设置的五组参数进行仿真, 得到 R_{BVRM} 与占空比 D 的关系曲线, 如图 19 所示。由图 19 可见, R_{BVRM} 与 D 之间具有良好的线性关系, 当 I 一定时, 随着 D 的增大, R_{BVRM} 逐渐减小。仿真结果验证了式 (1) 与式 (2) 的正确性, BVRM 可工作在电流双向流动模式下, 并通过控制 D 实现控制 R_{BVRM} 。

表 2 BVRM 仿真参数

Tab.2 The simulation parameters of BVRM					
参 数	数 值				
	一组	二组	三组	四组	五组
电阻 R_1/Ω	4	2	1.5	0.8	0.3
电阻 R_2/Ω	4	2	1.5	0.8	0.3
外部电流 I/A	1 000	1 000	1 000	1 000	1 000

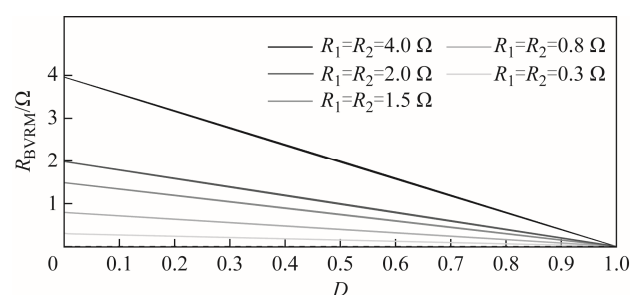


图 19 R_{BVRM} 仿真结果

Fig.19 Simulation results of R_{BVRM}

4.2 杂散电流与轨道电位动态模拟系统验证

按照实际牵引系统的参数, 见表 3, 同时结合列车的运行工况, 采用 B-DSS、MG-DSS 和 MI-DSS 分别对接地系统、接地系统和浮地系统、多区间系统进行仿真, 得到杂散电流和轨道电位的动态分布曲线如图 20~图 22 所示。

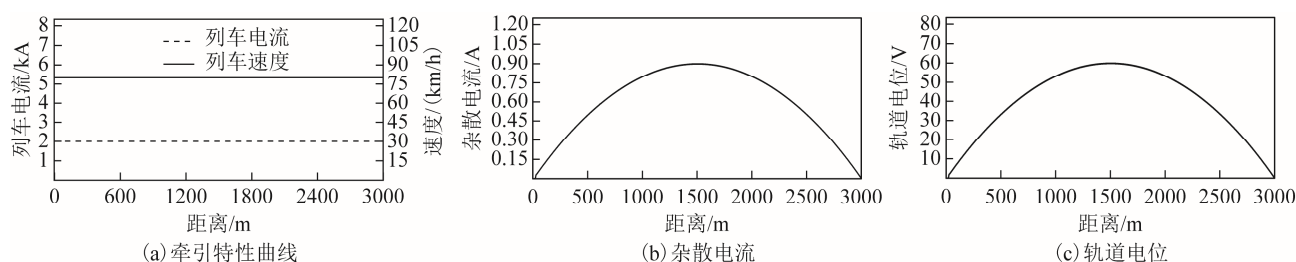


图 20 匀速工况下, B-DSS 模拟接地系统中的杂散电流与轨道电位

Fig.20 Stray current and rail potential in grounded traction system when the train movement under uniform-speed operation condition simulated by B-DSS

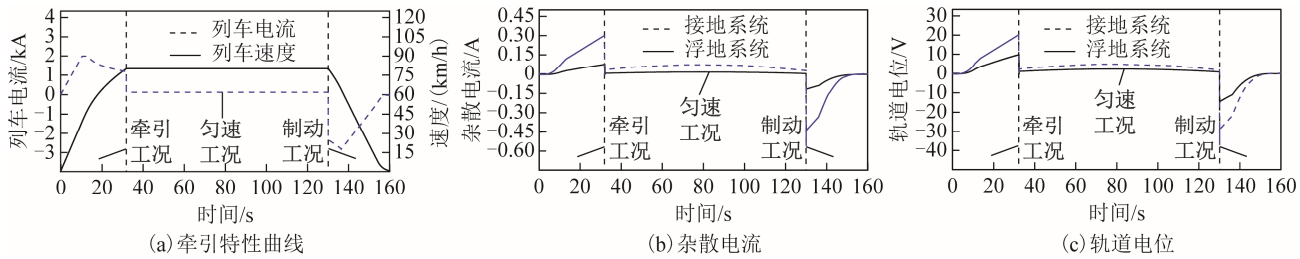


图 21 牵引-匀速-制动工况下，MG-DSS 模拟接地系统和浮地系统中的杂散电流与轨道电位

Fig.21 Stray current and rail potential in grounded and floating traction system when the train movement under different operation conditions simulated by MG-DSS

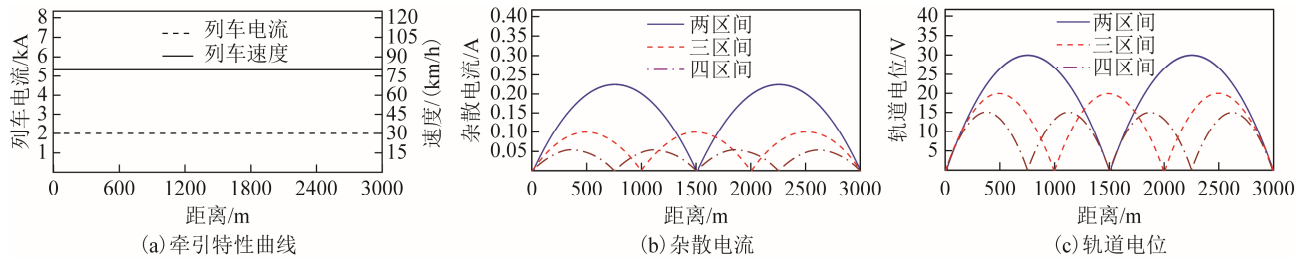


图 22 匀速工况下，MI-DSS 模拟多区间系统的杂散电流与轨道电位

Fig.22 Stray current and rail potential in multiple interval traction system when the train movement under uniform-speed operation condition simulated by MI-DSS

表 3 模拟系统仿真参数

Tab.3 The simulation parameters of simulation systems	
参 数	数 值
单位走行轨纵向电阻 $R_s/(\Omega/\text{km})$	0.04
单位走行轨对地电阻 $R_g/(\Omega\cdot\text{km})$	100
供电区间长度 l/km	3
区间数 M	2、3、4

图 20 为列车匀速工况（单一工况）运行下接地系统的杂散电流与轨道电位曲线，由 B-DSS 模拟得到，仿真结果与式（12）一致。

图 21 为列车以牵引-匀速-制动工况（多工况）运行下接地系统和浮地系统的杂散电流和轨道电位曲线，由 MG-DSS 模拟得到。对于接地系统，仿真结果与式（12）一致；对于浮地系统，仿真结果与式（14）一致。此外，由仿真结果可知接地系统的杂散电流是浮地系统的 4 倍，轨道电位是后者的 2 倍，且接地系统与浮地系统之间杂散电流、轨道电位的数学关系与列车运行工况无关。

图 22 为列车匀速工况（单一工况）运行下多区间系统（区间数 $M=2、3、4$ ）的杂散电流与轨道电位曲线，由 MI-DSS 模拟得到，仿真结果与式（17）一致。相比于传统牵引系统，多区间牵引系统的杂散电流降至传统系统的 $1/M^2$ ，轨道电位降至传统系统的 $1/M$ 。仿真结果表明多区间牵引系统对杂散电流和轨道电位起到了很好的抑制效果。

5 实验验证

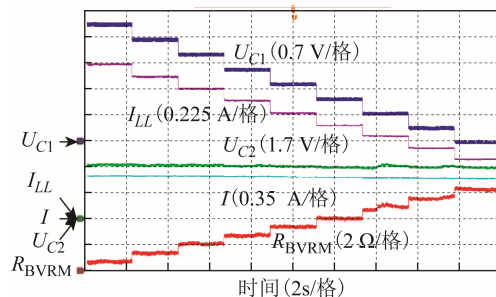
本节搭建小功率硬件实验平台，对 BVRM 进行实验验证。同时，选取三种模拟系统中最基本的一个，对 B-DSS 进行列车匀速工况下的实验验证。

5.1 双向可变电阻模块验证

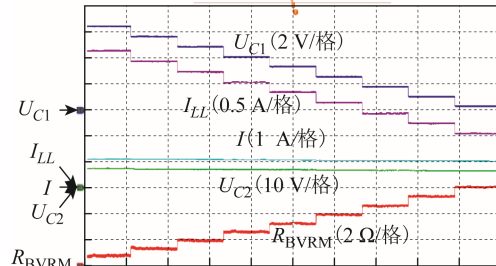
BVRM 的实验参数见表 4，由于 BVRM 的拓扑对称，以下仅给出模态 1 的实验结果。图 23 为外部电流 I 分别取 0.5 A、1 A、1.5 A 和 2 A 时的实验波形，其中 I_{LL} 为流过电感的电流， R_{BVRM} 为示波器通过不同通道间的数学运算得到的 BVRM 等效输出电阻，当占空比 D_1 从 90% 至 10% 依次阶跃递减时， R_{BVRM} 的值依次为 0.8 Ω 、1.6 Ω 、2.4 Ω 、3.2 Ω 、4.0 Ω 、4.8 Ω 、5.6 Ω 、6.4 Ω 和 7.2 Ω ，与式（1）计算结果一致。

表 4 BVRM 实验参数

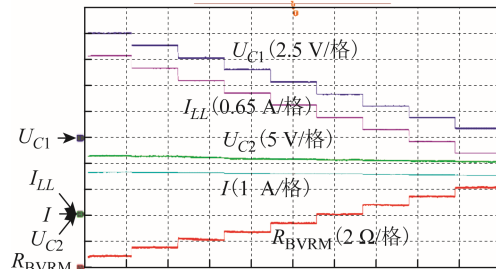
Tab.4 The experimental parameters of BVRM				
参 数	数 值			
	一组	二组	三组	四组
电阻 R_1/Ω	4	4	4	4
电阻 R_2/Ω	8	8	8	8
电感 L/mH	1	1	1	1
电容 $C_1/\mu\text{F}$	10	10	10	10
直流电压源 U_1/V	4	8	12	16
外部电流源 I/A	0.5	1	1.5	2



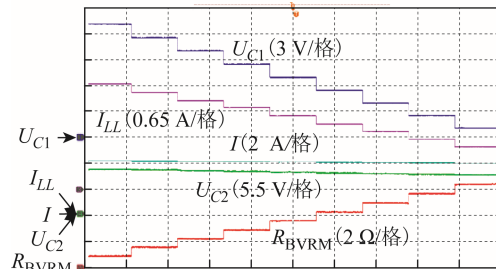
(a) 外部电流 $I=0.5\text{ A}$



(b) 外部电流 $I=1\text{ A}$



(c) 外部电流 $I=1.5\text{ A}$



(d) 外部电流 $I=2\text{ A}$

图 23 R_{BVRM} 实验结果

Fig.23 Experimental results of R_{BVRM}

5.2 基本型动态模拟系统验证

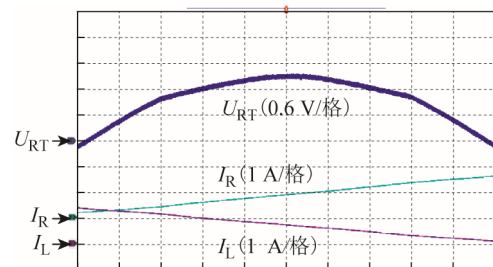
由于实际牵引系统中走行轨纵向电阻值过小，因此对实际牵引系统中的走行轨纵向电阻值和走行轨对地电阻值均等比例放大 33.3 倍，得到实验参数见表 5。搭建小功率实验平台，验证 B-DSS 模拟列车在匀速工况下运行时的杂散电流与轨道电位分布规律。

图 24 为列车牵引电流 $I_T=1.5\text{ A}$ 、 2 A 、 2.5 A 和 3 A 时的实验结果。实验结果表明 B-DSS 在不同牵引电流值下均可正常工作，对于不同的牵引电流，

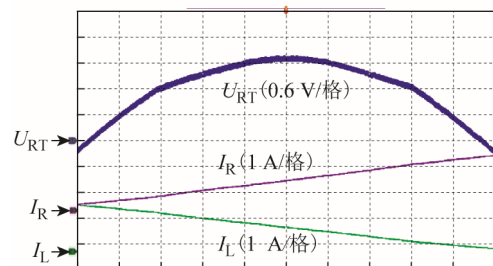
表 5 B-DSS 实验参数

Tab.5 The experimental parameters of B-DSS

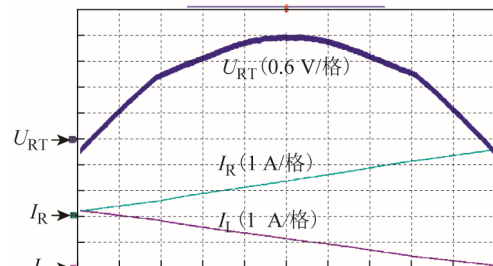
参 数	数 值			
	一组	二组	三组	四组
单位走行轨纵向电阻 $R_S/(\Omega/\text{km})$	1.33	1.33	1.33	1.33
单位走行轨对地电阻 $R_G/(\Omega\cdot\text{km})$	3 333	3 333	3 333	3 333
供电区间长度 l/km	3	3	3	3
牵引电流 I_T/A	1.5	2	2.5	3



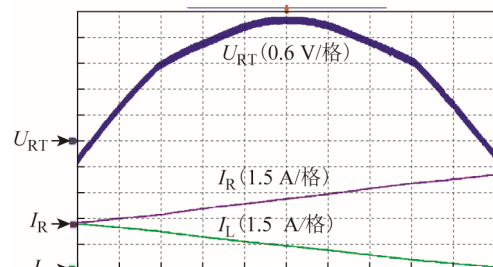
(a) 牵引电流 $I_T=1.5\text{ A}$



(b) 牵引电流 $I_T=2\text{ A}$



(c) 牵引电流 $I_T=2.5\text{ A}$



(d) 牵引电流 $I_T=3\text{ A}$

图 24 B-DSS 实验结果

Fig.24 Experimental results of B-DSS

列车所在位置处的轨道电位 U_{RT} 均在供电区间中点处达到最大值, U_{RT} 的最大值依次为 1.5 V、2 V、2.5 V 和 3 V。此外, 列车左右两侧的牵引电流呈对称分布, 列车左侧牵引电流 I_L 由 I_T 逐渐降至 0, 列车右侧牵引电流 I_R 由 0 逐渐升至 I_T 。

6 结论

本文在研究双向可变电阻模块 BVRM 的基础上, 提出三种动态模拟系统 B-DSS、MG-DSS 和 MI-DSS, 用于模拟城市轨道交通牵引系统中杂散电流和轨道电位的动态分布规律。本文对上述系统开展了详细的理论分析、仿真和实验验证工作, 得到以下结论:

1) BVRM 可工作在列车牵引电流双向流动模式下, 通过改变列车左右两侧的走行轨纵向电阻, 实现模拟列车以不同工况运行。

2) B-DSS 适用于接地系统。MG-DSS 在 B-DSS 的基础上增设零电位参考点, 通过不同的连接方式, 可分别适用于浮地系统和接地系统。MI-DSS 在 B-DSS 的基础上引入区间切换模块 ISM, 适用于多区间牵引系统。

3) B-DSS、MG-DSS 和 MI-DSS 均采用单电阻集中接地结构, 通过测量该电阻的电流及其对地电压, 即可方便得到杂散电流和轨道电位的分布。

综上所述, 本文提出的三种杂散电流和轨道电位动态模拟系统相比于现有模拟系统, 有效降低了系统的复杂程度, 并拓展了适用列车运行工况以及适用牵引系统类型范围, 因此具有良好的应用前景。

参考文献

- [1] Paul D. DC traction power system grounding[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2002, 38(3): 818-824.
- [2] 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.
- [3] Lee C H, Lu C J. Assessment of grounding schemes on rail potential and stray currents in a DC transit system[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2006, 21(4): 1941-1947.
- [4] 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): 1516-1525.
- [5] Dolara A, Foiadelli F, Leva S. Stray current effects mitigation in subway tunnels[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2012, 27(4): 2304-2311.
- [6] Xu Shaoyi, Li Wei, Wang Yuqiao. 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.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] Charalambous C A, Cotton I, Aylott P. A simulation tool to predict the impact of soil topologies on coupling between a light rail system and buried third-party infrastructure[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2008, 57(3): 1404-1416.
- [12] Cotton I, Charalambous C, Aylott P, et al. Stray current control in DC mass transit systems[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2005, 54(2): 722-730.
- [13] Ibrahim 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.

- [14] 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.

- [15] Wang Miao, Yang Xiaofeng, Wang Lulu, et al. Resonant switched capacitor converter based DC auto-transformer for urban rail transit[C]//IEEE Applied

Power Electronics Conference and Exposition (APEC), San Antonio, TX, 2018: 1441-1446.

作者简介

杨晓峰 男, 1980 年生, 副教授, 博士生导师, 研究方向为多电平变换器技术、柔性直流输电技术和电力电子技术在轨道交通中的应用。

E-mail: xfyang@bjtu.edu.cn (通信作者)

薛 皓 男, 1994 年生, 硕士研究生, 研究方向为电力电子技术在轨道交通中的应用。

E-mail: xuehao@bjtu.edu.cn

(编辑 赫蕾)