

旅客捷运系统交流牵引供电系统仿真

张翠娥, 申 萍, 王 银, 夏顺盈

(北京交通大学 电气工程学院, 北京 100044)

摘 要: 目前国内对于旅客捷运系统 (Automated People Mover, 简称 APM) 牵引供电系统理论研究尚未成熟, 为辅助新建 APM 线, 在分析现有 APM 牵引供电系统的基础上, 利用 Simulink 软件对其外部电源、牵引变电所、三相接触轨及车辆等组成部件进行建模。对比分析列车正常运行和过负荷运行时接触轨上线电压分布情况, 验证所建立的 APM 交流牵引供电系统仿真模型的正确性。仿真分析两列车同时运行时, 不同追踪距离对系统电气特性的影响情况。分析单变电所退出运行时接触轨上电压分布情况, 验证系统供电的安全性和可靠性, 可为 APM 前期供电方案的设置及选择提供依据。

关键词: 旅客捷运系统; 牵引供电系统; 仿真模型; 电压分布

中图分类号: U239.5; U223.6

文献标识码: A

doi: 10.13890/j.issn.1000-128x.2019.03.007

Simulation of APM AC Traction Power Supply System

ZHANG Cuie, SHEN Ping, WANG Yin, XIA Shunying

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

Abstract: At present, the theoretical research on APM (Automated People Mover) traction power supply system is not mature in China. In order to assist in the design of new APM line, based on the analysis of the existing APM traction power supply system, Simulink was used to model the components of its external power supply, traction substation, three-phase contact rail and vehicle. The voltage distribution of contact rail during normal operation and overload operation of the train was compared and analyzed to verify the correctness of the established simulation model of APM AC traction power supply system. The simulation analyzed the influence of different tracking distances on the electrical characteristics of the system when two trains were running at the same time. The voltage distribution on the contact rail when the single substation was out of operation was analyzed, and the security and reliability of the system power supply were verified, which provided the basis for the setting and selection for the APM pre-power supply scheme.

Keywords: APM; traction power supply system; simulation model; voltage distribution

0 引言

旅客捷运系统 (APM) 广泛应用于大型枢纽机场, 主要承担机场航站楼间短距离内部旅客运输任务, 以减少旅客的步行距离; 也可应用于城市轨道交通系统, 与其他交通方式综合使用。

目前, 国外已有许多大型机场采用 APM 系统, 有比较成熟的理论体系, 但公开的研究成果主要集中在使用前规划、工程设计和运用维护等方面^[1]。国内

APM 系统应用较少, 迄今建成有 3 条 APM 线路, 分别是北京首都国际机场 APM, 广州珠江新城 APM 和上海浦江 APM 线。文献 [2] 对广州珠江新城 APM 牵引供电系统的系统构成, 中压网络运行方式和供电方式等进行了详细介绍; 文献 [3] 对 APM 交流牵引系统中的谐波抑制和无功补偿方法进行研究, 并提出了可行性的措施; 文献 [4-5] 对 APM 线路接触轨供电系统组成, 特性和现场安装技术等进行了研究, 简要概括了该系统的优缺点。但总体而言国内可借鉴的 APM 牵引供电系统仿真模型较少, 因此为辅助国内各大机场

新建 APM 线, 提供前期供电设计方案, 有必要对其进行研究。

本文在分析了现有 APM 系统的基础上, 借鉴干线铁路和城市轨道交通的仿真建模方法^[6], 采用 Simulink 软件建立了 APM 交流牵引供电系统的仿真模型, 对比分析了列车正常运行和过负荷运行时系统仿真结果, 验证所建立仿真模型的正确性。

1 APM 牵引供电系统

APM 牵引供电系统主要负责车辆系统和各电气设备的电力供应, 一般包括外部电源、牵引变电所、牵引网及车辆系统等。其基本结构如图 1 所示。

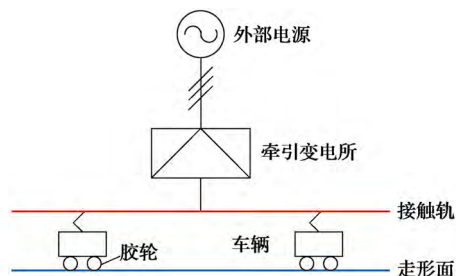


图 1 APM 交流牵引供电系统基本结构

外部电源主要负责向 APM 系统提供高压电源, 其供电电压等级有 35 kV 和 10 kV。目前大多数采用 10 kV 电源, 这是由于 APM 本身运输距离较短 (一般为 1~3 km 左右), 10 kV 电源虽然输电容量和输电范围较小, 但可满足短距离供电的要求, 同时降低运营成本。

牵引变电所主要功能是将电力系统引入的交流电经降压或整流转变为适合 APM 车辆使用的电能。与城市轨道交通和电气化铁路不同, APM 牵引供电系统多数采用三相交流供电制式, 部分采用直流供电制式, 供电电压等级有三相 AC 480 V 或 600 V 和 DC 750 V。

APM 牵引网的作用是将电能输送给车辆系统, 根据供电制式不同, 其组成部分略有差异。采用直流供电方式时, 牵引网包括供电轨和接地轨, 车辆从供电轨上取直流电, 经接地轨回流至牵引变电所; 采用三相交流供电方式时, 牵引网即为三相接触轨, 车辆从接触轨上获得三相交流电, 无需接地轨回流。

2 APM 交流牵引供电系统仿真模型

2.1 外部电源模型

外部电源为 APM 提供系统正常运行所需的电能, 其仿真模型采用带内阻抗的三相交流电源等效代替^[6], 为牵引变电所提供 10 kV 或 35 kV 工频电压。

根据规定, 用电设备允许的电压偏移为额定值的 $\pm 5\%$, 而输电线路的电压降一般为 10%, 因此始端外部电源的额定电压 (指线电压) 应设为额定值的 105%, 即

$$U_s = 1.05U_N \quad (1)$$

式中: U_s 为外部电源额定电压; U_N 为线路额定电压。

系统电源的内阻抗 X_s 计算如下:

$$\left. \begin{aligned} X_s &= \frac{U_k^2}{S_k} \\ S_{oc} &= \sqrt{3}U_c I_c \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式中: U_k 为短路计算点的平均电压, kV; U_c 为断路器在系统短路时的工作电压, 一般取值比电网额定电压高 5%; S_k 为电源母线上的短路容量, 通常用断路器的额定开断容量 S_{oc} 代替, MVA; I_c 为断路器的额定短路开断电流, kA。

2.2 牵引变电所模型

由于 APM 牵引供电系统采用直流供电制式时, 其牵引变电所与城轨变电所的整流机组结构类似, 因此仅建立三相交流供电制式下的牵引变电所仿真模型。

在 APM 交流牵引供电系统中, 牵引变电所中主要设备为双绕组牵引变压器, 采用 Δ/Y 联结方式。为保证系统供电可靠性, 通常牵引变电所中设置 2 台变压器, 互为备用。

由于牵引变电所的容量应满足远期高峰时刻运量的要求, 且当任意一座牵引变电所故障退出运行时, 依靠相邻牵引变电所的过负荷能力, 可使列车正常运行, 因此在忽略供电轨产生能耗的情况下, 变电所中牵引变压器容量不仅要满足高峰时期 APM 线路上所有列车的供电需求, 还应该考虑一定的过负荷能力^[7]。

假设 APM 线路长度为 l km, 远期高峰时刻发车间隔为 Δt min/列, 列车平均运行速度为 v_m km/h, 故上行或下行线路上的列车数量 m 最多为

$$m = \frac{l}{v_m \cdot \Delta t / 60} \quad (3)$$

若高峰时期列车的运行模式为 n 节车编组运行, 每节车中有 x 台牵引电机, 其单台牵引电机最大运行功率为 P kW, 可得线路上所有列车的最大能耗为

$$P_{\max} = m \cdot n \cdot x \cdot P \quad (4)$$

由于上下行所有列车消耗的电能均来自供电轨侧的牵引变电所, 设变电所数量为 N 个, 则单个变电所容量应设置为

$$S_T = \frac{P_{\max}}{N \cdot \cos \phi} \cdot k_c k_\delta \quad (5)$$

式中: $\cos \phi$ 为变压器二次侧功率因数; k_c 为牵引网损耗加大系数; k_δ 为列车用电加大系数。

牵引变压器的电阻和电抗参数由短路试验可以得到。由于其短路损耗近似等于一次侧和二次侧绕组电阻的总损耗 (即铜损耗), 因此牵引变压器电阻为

$$R_T = \frac{\Delta P_s}{3I_{IN}^2} \times 10^3 = \frac{\Delta P_s U_{IN}^2}{S_N^2} \times 10^3 \quad (6)$$

式中: ΔP_s 为变压器的短路损耗, kW; I_{IN} 为变压器一次侧额定电流, A; S_N 为变压器三相额定容量, kV·A; U_{IN} 为变压器一次侧额定线电压, kV。

牵引变压器电抗 X_T 可由变压器一次侧通过额定电

流时电抗上产生的电压降 U_x 计算得到, 即

$$U_x \% = \frac{I_{IN} X_T}{10^3 U_{IN} / \sqrt{3}} \times 100\% \quad (7)$$

因此得到

$$X_T = \frac{U_x \%}{100\%} \times \frac{10^3 U_{IN}}{\sqrt{3} I_{IN}} = \frac{U_x \%}{100\%} \times \frac{U_{IN}^2}{S_N} \times 10^3 \quad (8)$$

式中: $U_s\%$ 为变压器短路电压百分数; $U_x \% \approx U_s\%$ 。

2.3 接触轨模型

APM 系统采用水泥走行面, 两条水泥路面中间有受电的接触轨。APM 接触轨有别于其他线路, 它是由 5 条钢铝复合轨组合而成, 其中上侧 3 根为三相交流供电轨, 下侧 2 根分别为信号轨和信号接地轨, 如图 2 所示。接触轨下方有工字型的钢梁, 车体下方有 2 排轮子卡在工字型钢梁的两边, 起导向作用。

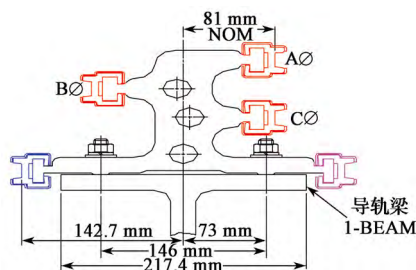


图 2 接触轨道断面图

与城轨和大铁路的受流方式不同, APM 接触轨为三相交流供电, 不会造成三相线路电压不平衡, 也无需接地轨回流。当系统发生单相接地时可一定时间内维持正常运行, 提高了供电系统的可靠性。APM, 铁路和地铁的供电方式比较如表 1 所示。

表 1 APM, 铁路及地铁供电方式比较

项目	APM	铁路	地铁
供电制式	三相交流供电	单相交流供电	直流供电
三相对称性	不影响电力系统	易造成电网	-
	三相对称性	三相不平衡	
谐波	三相负载可削弱电压变换中的 3 的倍数次谐波	高次谐波含量较多	整流装置易产生谐波, 系统高次谐波含量较大
特点	短距离运行, 中等客运量; 供电质量要求一般	长距离运行, 客运量大; 供电质量要求高	较长距离运行, 中等客运量; 供电质量要求高
设备结构及投资费用	无需整流装置, 变电所结构简单, 设备投资较少, 占地面积较小	变电所结构复杂, 基本建设投资较大	变电所结构复杂, 设备投资较高

由于 APM 接触轨供电距离较短, 一般为 1~3 km 左右, 集中参数模型足够描述其暂态特性, 因此采用短电力线路的集中参数模型对接触轨进行建模仿真^[8]。

接触轨参数包括电阻、电感、电导及电容, 通常假设这些参数是沿全线均匀分布。由于供电线路距离较短且电压不高, 因此可忽略电导和电纳参数, 接触轨的阻抗描述可表示为

$$\left. \begin{aligned} Z &= R + jX \\ R &= R_0 l \\ X &= X_0 l \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

式中: R 和 X 分别为接触轨每相总的电阻和电抗; R_0 和 X_0 分别为三相接触轨单位长度的电阻值和电抗值, Ω/km 。

接触轨的仿真模型如

图 3 所示。

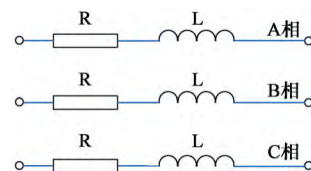


图 3 ABC 三相接触轨模型

2.4 车辆模型

在三相交流供电制式下, APM 车辆直接从接触轨上取能。车辆内部的整流装置把接收到的三相交流电转换为直流电, 再驱动直流电机。

目前, 在已有文献中通常将车辆系统等效为恒功率源、理想电流源或恒阻抗源来建模^[9]。本文根据实际情况对仿真的不同侧重点, 对 APM 车辆系统有 2 种建模方案: 一是根据 APM 车辆工作原理, 对车辆整体进行详细建模, 分析车辆运行时接触轨上的电气特性; 二是简化模型, 将车辆等效为三相交流电流源^[10], 分析 APM 车辆运行在最大电流时接触轨上的电压降是否满足要求。

1) 车辆整体建模

APM 单节车辆的牵引回路由整流电路, 控制电路和直流电动机 3 部分组成, 如图 4 所示^[11]。为减小接触轨上电压波动对电机转速的影响, 控制电路采用带转速负反馈的调速系统, 包括同步环节、转速给定、放大器、移相触发器及测速环节等。整流部分由整流变压器、三相晶闸管全控整流电路和平波电抗器等组成, 其中晶闸管的控制信号由触发器提供。当接触轨上电压发生变化时, 控制电路根据电机的转速偏差来自动调整触发器的控制角, 从而改变整流电路的输出电压, 保证转速稳定。

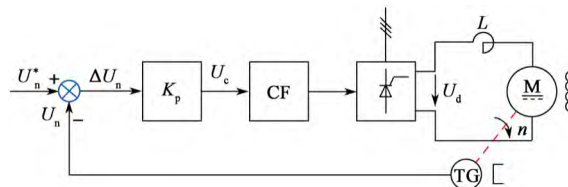


图 4 APM 单节车辆牵引回路工作原理图

直流电动机模型由励磁回路和电枢回路的电压方程确定, 其中

$$\left. \begin{aligned} u_f &= R_f i_f + L_f \frac{di_f}{dt} \\ u_a &= R_a i_a + L_a \frac{di_a}{dt} + E \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

故可得电机参数计算方法如表 2 所示。

根据以上计算, 搭建了单节 APM 车辆仿真模型, 如图 5 所示。

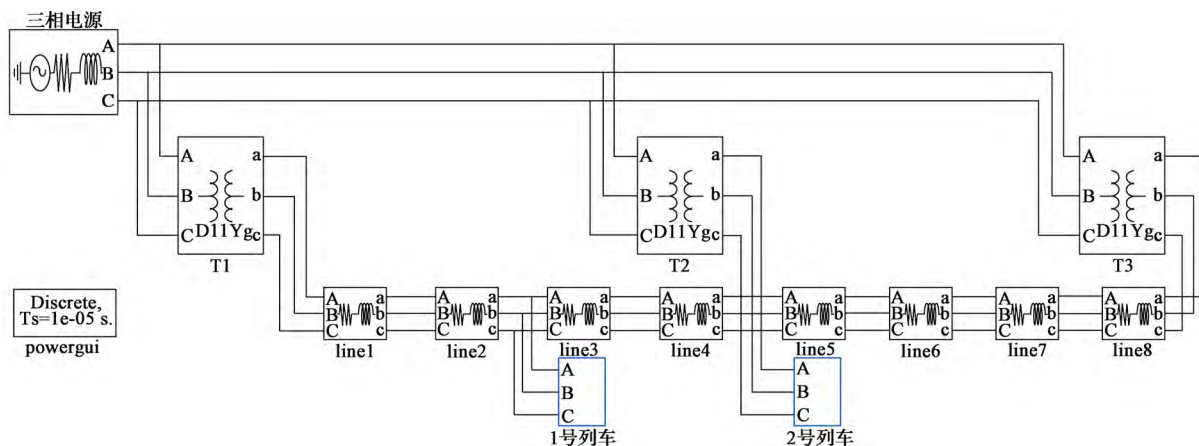


图7 APM交流牵引供电系统仿真模型

车运行在1 km时其端电压变化基本一致;当列车运行到0.5 km或1.5 km时端电压的压降最大;越靠近变电所时其端电压水平越高。以上电压参数变化均与实际情况相符。

当1列车运行在0.5 km处时,整个接触轨上的电压分布情况如图9所示。其中车辆采用整体建模方法,模拟列车正常运行时的情况;车辆采用三相电流源等效,模拟列车过负荷运行时的情况,因此图9中接触轨上的线电压相比列车正常运行时要低。系统规定线路允许电压波动范围为510~615 V,对比可知,2种方法的仿真结果趋势基本一致,并且均满足电压波动要求。

高峰时期列车发车间隔为3 min/列,平均运行速度为18.49 km/h,计算可知高峰时期线路上最多有2列车同时运行。为检验此时接触轨上线电压是否满足要求,故对2列车运行时相距250 m,500 m和1 km的情况进行仿真,如图10所示。图10中虚线代表列车正常运行,实线代

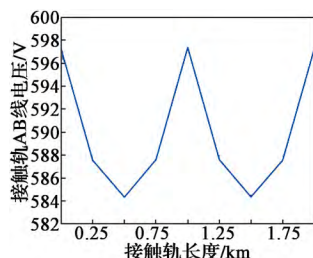


图8 列车端电压变化曲线

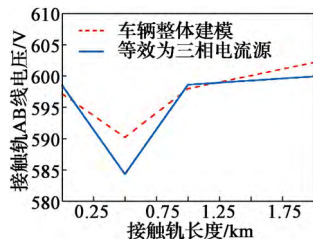
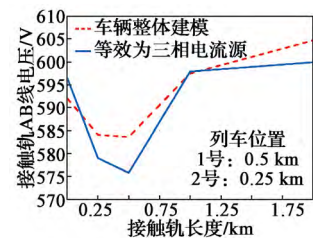
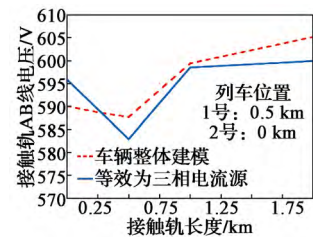


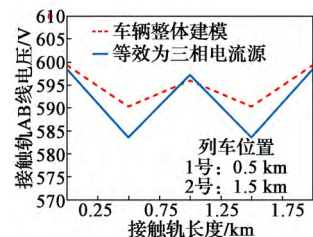
图9 接触轨线电压分布曲线(单列车运行在0.5 km处)



(a) 追踪距离 250 m



(b) 追踪距离 500 m



(c) 追踪距离 1 km

图10 接触轨线电压分布曲线(两列车运行)

表列车过负荷运行,由图可知列车过负荷运行时接触轨的压降更大。对比图10可知,2列车同时运行时,追踪距离越短,接触轨上线电压分布越不均衡,压降越大,但均满足线路允许的电压波动要求。

图11和图12为不同追踪距离下,列车牵引电机转速和电枢电流曲线。由图11可以看出,2列车追踪距离为250 m时,电机稳定运行时转速达不到额定转速2 200 r/min;追踪距离为1 km时,由于列车端电压水平较理想,电机转速更接近于额定转速值。在图12中,电机启动时电枢电流很大,但启动过程结束后均能稳定在额定电流250 A左右,受列车追踪距离影响不大。因此综合电压波动和牵引电机的运行情况,建议线路上2列车同时运行时,追踪距离最好设为1 km或以上。

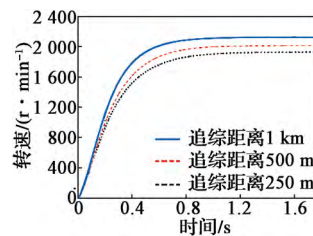


图11 牵引电机转速

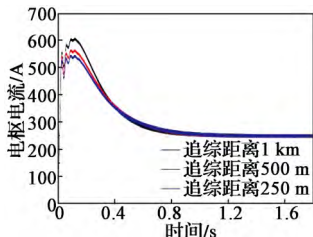


图12 牵引电机电枢电流

为验证系统供电的可靠性和安全性,需分析其中1个变电所退出运行,且2列车追踪距离最小时接触轨上线电压是否满足供电要求。其中车辆采用整体建模方法,仅考虑列车正常运行时的情况。

变电所退出运行,接触轨电压分布如表4和表5所示。由表4可以看出,变电所T2退出,两列车靠近线路中间运行时,接触轨上线电压降最大,最低处为570.7 V,满足波动要求;由表5可知,变电所T3退出,2列车运行在线路左侧时,线路右侧的电压基本没有变化;当2列车靠近线路末端运行时,接触轨上压降是最大的,电压最低为537.0 V,也满足电压波动要求。但相比表4可知,变电所T3退出并且列车靠近线路末端运行时,系统受到的影响更大,即接触轨上压降更大,电压畸变更严重且分布更不均衡。

表 4 变电所 T2 退出运行时接触轨不同长度位置处电压分布

1 号车 距离 /km	2 号车距 离 /km	接触轨长度 /km									
		0	0.25	0.5	0.75	1	1.25	1.5	1.75	2	
0	0.25	587.7	583.6	586.8	589.9	593.1	596.2	599.4	602.6	605.9	
0.5	0.25	590.4	579.8	577.1	581.5	585.8	590.2	594.5	598.9	603.3	
0.5	0.75	593.1	583.8	574.5	573.1	578.6	584.2	589.7	595.3	600.8	
1	0.75	595.6	587.6	579.5	571.5	570.7	577.6	584.4	591.3	598.1	
1	1.25	598.1	591.3	584.4	577.6	570.7	571.5	579.5	587.6	595.6	
1.5	1.25	600.8	595.3	589.7	584.2	578.6	573.1	574.5	583.8	593.1	
1.5	1.75	603.3	598.9	594.5	590.2	585.8	581.5	577.1	579.8	590.4	
2	1.75	605.9	602.6	599.4	596.2	593.1	589.9	586.8	583.6	587.7	

表 5 变电所 T3 退出运行时接触轨不同长度位置处电压分布

1 号车 距离 /km	2 号车距 离 /km	接触轨长度 /km									
		0	0.25	0.5	0.75	1	1.25	1.5	1.75	2	
0	0.25	590.7	588.1	593.1	598.2	603.2	603.2	603.2	603.2	603.2	
0.5	0.25	594.9	586.6	586.1	592.6	599.2	599.2	599.2	599.2	599.2	
0.5	0.75	599.2	592.6	586.0	586.6	594.8	594.8	594.8	594.8	594.8	
1	0.75	603.2	598.2	593.1	588.1	590.7	590.7	590.7	590.7	590.7	
1	1.25	605.3	601.1	596.8	592.5	588.3	580.9	580.9	580.9	580.9	
1.5	1.25	605.3	601.0	596.8	592.5	588.3	573.4	566.6	566.6	566.6	
2	1.75	605.4	601.1	596.9	592.6	588.5	573.4	559.0	544.4	537.0	

4 结论

本文利用 Simulink 建立了 APM 交流牵引供电系统模型, 仿真分析了单列车正常运行(车辆整体建模)和过负荷运行(三相电流源等效)时接触轨上电压分布情况, 对比得出 2 种车辆建模方法的仿真结果趋势基本一致, 验证了模型的正确性; 通过对比 2 列车同时运行时不同追踪距离下接触轨的电压分布和牵引电机特性, 可知追踪距离越长, 接触轨上电压水平越好, 电机运行更接近于额定情况; 仿真分析单个变电所退出运行时接触轨上电压分布情况, 验证了系统供电的安全性和可靠性。本文所建立的模型结构简单, 参数计算方便, 仿真结果对 APM 系统供电方案的设置及选

择具有一定的指导意义。

参考文献:

- [1] 蒋凤伟. APM 系统在大型枢纽机场中的应用研究 [D]. 天津: 中国民航大学, 2007: 5-7.
- [2] 赵云云. 广州市珠江新城旅客自动输送系统供电系统设计 [J]. 广东科技, 2014(14): 177-178.
- [3] 冯剑冰. 胶轮运载系统的交流牵引供电无功功率和谐波研究 [J]. 城市轨道交通研究, 2012, 15(6): 60-62.
- [4] 刘娟. APM 钢铝复合接触轨及配套零部件研制 [J]. 电气化铁道, 2015(1): 44-46.
- [5] 何小宝, 姜超, 苗春. 全自动旅客捷运系统供电轨安装技术 [J]. 轨道交通装备与技术, 2018(2): 21-23.
- [6] 王奇, 刘志刚, 白玮莉, 等. 基于 PSCAD/EMTDC 的牵引供电系统仿真模型研究 [J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(16): 35-40.
- [7] 黄德胜, 张巍. 地下铁道供电 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2010: 168-176.
- [8] 李会超. 城市轨道交通列车运行与供电联合仿真研究 [D]. 成都: 西南交通大学, 2008: 41-42.
- [9] 王雨竹. 基于 PSCAD/EMTDC 的牵引供电系统仿真分析 [J]. 科教文汇, 2015(1): 216-218.
- [10] 周福林, 李群湛, 刘炜, 等. 城市轨道交通供电系统仿真软件开发研究 [J]. 城市轨道交通研究, 2007(5): 25-27.
- [11] 洪乃刚. 电力电子、电机控制系统的建模和仿真 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2010: 147-153.
- [12] 刘海东, 何天健, 袁振洲, 等. 城市轨道交通直流牵引供电仿真系统的研究 [J]. 系统仿真学报, 2004, 16(9): 1944-1947.
- [13] 王兆安, 刘进军. 电力电子技术 [M]. 5 版. 北京: 机械工业出版社, 2009: 56-63.
- [14] 刘学军, 于松伟, 刘学. 轨道交通牵引供电仿真模型与算法的研究 [J]. 计算机仿真, 2004, 21(12): 213-218.
- [15] 刘炜, 李群湛, 李鲲鹏, 等. 城市轨道交通直流牵引供电系统模型及其仿真研究 [J]. 电气应用, 2009, 28(7): 60-64.

作者简介: 张翠娥 (1995—), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为 APM 牵引供电系统。

动态消息

《机车电传动》编辑部声明

为顺应网络环境下期刊出版的新要求, 推进期刊网络出版传播, 凡向本刊投稿并被本刊录用, 在著作权法的框架内, 该论文的复制权、发行权、信息网络传播权、

翻译权、汇编权等权利在全世界范围内转让给本刊及本刊授权的相关数据库。凡被本刊录用的稿件将同时通过因特网、手机等进行网络出版或提供信息服务, 根据本刊编辑部稿酬标准一次性支付作者著作权使用报酬(即稿费, 包含印刷版、光盘版和网络版等各种使用方式的报酬)。

《机车电传动》编辑部