

# 城市轨道交通牵引系统仿真技术研究

韦莉<sup>1</sup>, 张逸成<sup>1</sup>, 达世鹏<sup>2</sup>, 沈小军<sup>1</sup>

1. 同济大学 电子与信息工程学院, 上海 201804; 2. 上海申通地铁集团有限公司维护保障中心供电分公司, 上海 200031)

**摘要:** 回顾了国内外城市轨道交通系统仿真技术的发展现状, 详细阐述了现有仿真系统存在的模型建立不够精确、列车与供电系统间的相互影响考虑不全面等问题导致仿真结果与实际偏差较大的特点, 并从车辆与牵引供电网电气交互的角度仿真分析了列车的运行特性, 说明牵引网电压变化对车辆牵引性能的影响, 最后指出为研究城轨系统的实际运行特性, 应进行车网结合的多列车、多工况动态联合仿真, 同时还应开展通用仿真平台的研究, 并提出使用 PSCAD/EMTDC 与 MATLAB 集成作为仿真开发平台。

**关键词:** 城市轨道交通; 牵引供电; 车辆; 仿真软件; 系统模型; 联合仿真

**中图分类号:** U 239.5

**文献标识码:** A

## Study of Simulation Technology for Traction Power System of Urban Rail Transit

WEI Li<sup>1</sup>, ZHANG Yicheng<sup>1</sup>, DA Shipeng<sup>2</sup>, SHEN Xiaojun<sup>1</sup>

(1. College of Electronics and Information, Tongji University, Shanghai 201804, China; 2. The Power Supply Branch of Rail Traffic Maintenance Support Center of Shanghai Shentong Metro Group Co., Ltd., Shanghai 200031, China)

**Abstract:** This paper first reviews the development status of domestic and international simulation technology for urban rail transit system, and describes in detail the shortcomings of existing simulation systems such as less accurate models and incomprehensive consideration of the interaction between train and traction power system, leading to large deviation of simulation result compared with practical experiment. Simulation of electrical interaction between train and traction system shows that the traction performance of the train is influenced by the variation of overhead line's voltage. Finally, in order to have a full-scale reflection on the characteristics of urban rail transit system that dynamic simulation which

combines multi-train with multi-working mode is demanded, and the study of a general simulation platform should also be carried out. It is proposed that the integration of PSCAD/EMTDC and Matlab can be used for developing the platform.

**Key words:** urban rail transit; traction power; train; simulation software; system model; joint-simulation

随着城市建设规模的扩大和城市人口的增多, 交通拥挤、出行不便以及随之而来的环境污染等问题严重影响着城市生活质量. 城市轨道交通以其快速、安全、准时、无污染以及载客量大等特点而成为解决大中型城市交通问题的首选方案<sup>[1]</sup>. 近几年国家在轨道交通的投入大幅增加, 城市轨道交通大发展的时期已经到来. 截至 2008 年 9 月, 中国城市轨道交通运营里程已经达到 775.6 km. 全国“十一五”期间计划建设 1 500 km 左右轨道交通, 总投资额在 4 000~5 000 亿人民币, 全国 48 个百万人口以上的大城市中已有 30 多个城市开展了城市轨道交通的建设或筹建工作<sup>[2]</sup>.

在城市轨道交通飞速发展的同时, 一些问题也不断显现. 如随着客运量的激增, 地铁在高峰时段超负荷运行时变电站直流开关和车辆高速开关跳闸的问题时有发生, 严重影响了安全运营<sup>[3]</sup>. 要从根本上探明这些问题发生的原因, 须从整个牵引供电系统角度去深入研究. 然而由于城市轨道交通行业的特殊性, 采取大规模的试验研究方法不仅会消耗大量的财力和物力, 而且往往会受各方面因素的制约而难以实施. 计算机系统仿真技术不仅可以降低研究的危险性和开支, 还可以模拟实验无法进行的工况, 为研究整个系统提供了有力的支持. 而且, 仿真技术

收稿日期: 2010-07-01

基金项目: 国家自然科学基金(50877054); 上海市科委重大专项子课题(10dz1200205)

第一作者: 韦莉(1982—), 女, 工学博士, 主要研究方向为城市轨道交通供电与车辆系统建模与仿真、城轨供电安全与节能技术.

E-mail: weili029@gmail.com

通讯作者: 张逸成(1951—), 男, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为新型智能电气设备及控制、电磁场理论及应用.

E-mail: kzjc@263.net

在电力系统、电气化铁路等领域的研究上已经广泛并可应用<sup>[4-5]</sup>.

因此,为保证城市轨道交通安全、节能、高效地运行,对运营中积累的大量实践经验和宝贵数据进行理论分析和验证,补充工程试验的空缺,将计算机系统仿真技术应用于城市轨道交通系统的研究,建立能反映真实运行情况的城市轨道交通供电系统和车辆的模型是很有必要的.在该系统仿真的基础上可以考证供电系统的安全性,编排更合理的列车运行图,指导新线路的规划设计和老线路的改造,验证节能设备的性能和制定合理的节能控制策略.这将有助于提高我国在城市轨道交通领域的研究深度和广度,缩小与发达国家的差距,降低对国外技术的依赖性,提升我国的核心竞争力.

## 1 国内外仿真研究现状

城市轨道交通系统是一个复杂而庞大的系统.它涉及电力系统、电力电子与电力传动、自动控制、信号、机械、动力学、材料等多个学科领域.要建立一个反映轨道交通系统各方面特性的模型是十分复杂的.目前国内外主流的仿真软件和研究方法一般是以牵引计算理论为基础,以实现列车的自动控制和自动驾驶为目的进行开发的,其主要研究内容是在保证行车安全的前提下,如何提高列车的运行速度和牵引重量,扩大运输能力、提高运输效率,实现列车安全、高效、节能地运行.

### 1.1 城市轨道交通仿真技术的研究

国内外对轨道交通仿真系统的研究比较多,一般而言,对城市轨道交通系统的建模和仿真主要涵盖牵引供电网、单车运行性能、多车运行性能仿真等,典型仿真系统架构如图 1 所示.即根据线路和车辆牵引特性仿真单车性能,然后再结合供电系统特性进行多车仿真.

首先,在仿真策略上一般是借鉴干线铁路的仿真方法,使用牵引供电网和车辆分离的迭代算法,也就是说先仿真单车运行性能,然后再将计算结果用于直流电网的仿真计算中,以得到整个系统的仿真数据.这种仿真方法的不足之处在于将列车性能仿真与交直流负载潮流分析分别进行,在列车性能仿真时没有考虑电力牵引中的供电问题,而是假设列车在运行时可以从供电网上取得所需的电压及电流.这样不能反映机车运行的状态、机车的数量对供电系统的影响,与实际系统相差较大.为得到更加精

确的仿真结果,有些文献提出了改进策略,如将牵引供电网和车辆同时迭代的仿真方法<sup>[6-7]</sup>,Y. Cai 提出的包括多车运行和牵引网波动在内的仿真方法<sup>[8]</sup>.

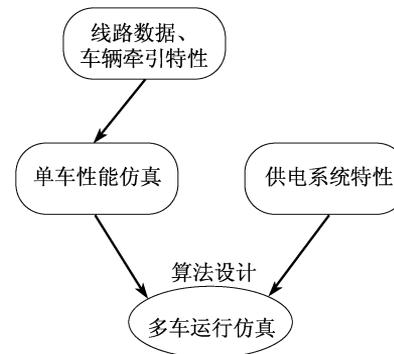


图 1 轨道交通仿真系统结构

Fig. 1 Structure simulation system for rail transit

其次,在仿真模型处理上,为了算法的可执行性、快速性和收敛性,通常会将系统模型进行简化处理.一般将直流供电系统看成简单的多源、多负载的直流电路,将变电所等效为简单的电流源或电压源形式,合并轨道与接触网的阻抗,将列车等效为功率源,对供电系统交流侧的影响也忽略不计.系统结构如图 2 所示,其中  $r$  表示接触网电阻,  $r_1$  表示牵引站的等效内阻,  $R$  表示轨道电阻.

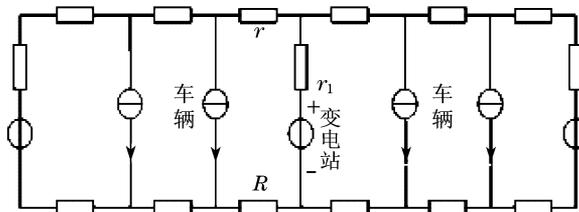


图 2 城市轨道交通直流牵引系统仿真模型

Fig. 2 DC traction system model of urban rail transit

再次,在对轨道交通牵引系统的仿真算法研究上,赵荣华等<sup>[9]</sup>介绍了双重线性迭代和牛顿迭代 2 种算法,并从收敛效果和快速性两方面进行了测试对比分析.刘学军等<sup>[10]</sup>提出了一种适用于城市轨道交通供电系统仿真的 RS 模型与算法.王晓东等<sup>[11]</sup>基于 CAD 技术、电路网络理论将牵引供电系统转化为一个周期性、定常数、固定拓扑的结构,采用牛顿-拉夫尔方法,进而得到线性化友网络模型,来求解相应采样时刻的电流、电压值.刘海东等<sup>[12]</sup>通过计算机生成导纳矩阵,采用高斯-约当消去法、高斯-塞德尔方法、LU 分解法等求解矩阵方程.

此外, MATLAB/Simulink, PSCAD 等大型动态仿真软件也逐渐用于轨道交通系统的仿真. 可利用其强大的电力系统库, 对变电站、机车、电网进行建模, 仿真系统的动态特性. 如郭东<sup>[13]</sup>利用 MATLAB/Simulink 中的 Power System 工具箱建立交流网络仿真模型, 通过 M 文件编写直流侧潮流算法, 实现牵引供电系统交直流的潮流计算. 英国的 Di Yu 等<sup>[14]</sup>使用 MATLAB/Simulink 建立了直流供电系统和多车运行的交互仿真模型, 实现直流电网连续动态过程和多车运行下的联合仿真. 日本的 T. Koseki 等<sup>[15]</sup>也将 MATLAB/Simulink 用于仿真多变电站和多车运行情况下的仿真, 用以研究再生制动的利用情况. 张小瑜等<sup>[16]</sup>和伊朗的 Farhad<sup>[17]</sup>则分别将 PSCAD 用于牵引供电系统和车辆模型的仿真中. 这些大型动态仿真软件的使用, 为解算精确的系统模型带来了可能性, 使轨道交通牵引供电仿真系统与实际系统更加贴近.

## 1.2 国内外主要仿真软件

国外在这个领域比较成熟的软件有美国 SYSTRA 公司的 RAILSIM 与 TPC (Train Performance Calculator) 系统; 由美国 Camegie-Mellon 大学轨道研究中心开发, 也被称为 TOM (The Train Operations Model) 软件; 美国铁路协会 (AAR) 开发的用于研究列车纵向运行仿真的 TOES (The Train Operation and Energy Simulator) 和 TEM (Train Energy Model) 仿真器; 英国 AEA 铁路技术公司开发的 VISION 系统; 欧洲 ORTHSTAR 公司的 TrainStar 系统; 日本的 UTRAS (Universal Train Simulator) 系统等<sup>[18-20]</sup>. 这其中通用性最广的是 TOM 系统和 RAILSIM 系统.

### 1.2.1 TOM 系统

TOM 是一种多用途的轨道交通分析软件, 其架构如图 3 所示. 它可用于评估行车时刻表、车辆能耗、供电系统与列车控制系统性能等. 已经在干线铁路、轻重型轨道交通、高速铁路以及磁悬浮系统上成功应用. TOM 主要有列车性能仿真器 (TPS)、电网仿真器 (ENS)、列车运行仿真器 (TMS) 3 个主要功能模块. TPS 仿真特定网压下的单车性能, 它以列车的牵引力特性曲线、列车运行阻力、列车重量、线路数据等为输入量, 输出单列车从起点到终点的功率、时间相对于位置的变化情况. ENS 以 TPS 的输出为输入, 根据列车时刻表, 再结合牵引供电系统的参数仿真多车的运行工况, 其输出包括重要位置处的功率潮流、电压、电流、配电系统与牵引站的损耗等. 同

时, ENS 也可把再生制动能量和储能装置计算在内. TMS 与 ENS 的功能很相似, 所不同的是它可以仿真多列车在统一控制系统下运行的情况, 这有助于解决多车运行时的存在的冲突等问题. 与 RAILSIM 相比, TOM 没有强大的车辆参数数据库, 但是用户可以根据自己的需要通过戴维斯方程对列车的运行阻力进行计算.

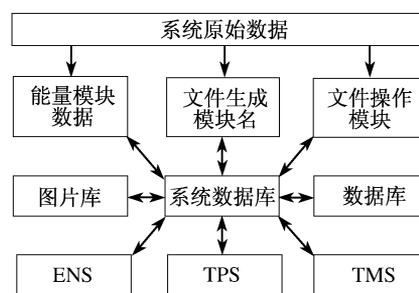


图3 TOM 仿真系统架构

Fig.3 Tom simulation system structure

### 1.2.2 RAILSIM 与 TPC 系统

RAILSIM 是北美铁路常用的一套牵引计算与运行模拟软件, 功能强大. TPC 根据线路条件、列车编组、计算列车运行时分, 评价机车牵引性能. RAILSIM 以 TPC 为基础, 可以精确模拟许多铁路系统中多种列车的运行. 它拥有庞大的各类机车车辆参数库; 支持自定义列车牵引力和阻力模型; 提供了多种列车运行计算模型; 提供高精度的列车运行模型; 支持复杂的列车制动算法; 用户界面友好; 提供各类输出报表. 目前的最新版本是 RAILSIM 8, 新增了负载流分析模块, 用于任意复杂程度的电气网络的建模, 并分析直流和交流系统的电器容量、功率需求、再生制动的影响等供电问题.

国内轨道交通领域的主要研究机构是西南交通大学、北京交通大学等单位. 另外, 上海申通集团、同济大学等单位也进行过列车牵引及运行等方面的研究<sup>[21]</sup>. 主要研究成果有: ① GTMSS 系统. 北京交通大学与香港理工大学合作研制的可用于铁路和城市轨道牵引计算与模拟的 GTMSS 系统. 可以模拟许多列车的运行, 计算列车运行时分、列车运行电流电压情况、列车能耗和闭塞等. ② UNTTCS 系统. X 西南交通大学的 UMTTCS 系统基于多质点列车模型, 并参考铁道科学研究院机车车辆所的牵引电算软件和北京交通大学的 GTMSS 系统, 在他人成果的基础上根据牵引计算的顺序设计的可以计算列车运行时分及能耗的牵引计算系统.

总之,这些仿真软件功能上有一定的相似性,但又偏向不同的应用领域.其相似之处表现在以干线铁路为主要应用对象,又可用于城市轨道交通仿真;仿真策略以单车仿真为基础,再拓展到多车仿真.与国外的仿真软件相比,国内的软件仍有一定的差距,但国外已有的仿真软件虽然功能全面,但是一般价格昂贵,或者未在中国发售,因此开发专用于中国城市轨道交通的仿真系统是必要的.

## 2 牵引供电系统仿真存在的问题

目前来看,对城市轨道交通的研究已经取得了一定的成果,但仍存在一些问题.

第一,将铁路干线的研究方法直接应用于城市轨道交通而忽视了其中的差别.虽然城市轨道交通的研究中可以借鉴干线铁路的研究方法,但两者在牵引供电方式、行车密度、区间间隔、起制动的快速性和准确性等方面有很大不同.

第二,模型建立不够精确,造成仿真结果与实际情况偏差较大,仿真置信度低.这种将变电站等效为一个含有内阻电压源不能真实反映实际牵引变电站的伏安特性;列车模型等效为一个电流源或恒功率源与实际列车为变功率源不符;轨道与接触网采用集中参数,不能反映其时变阻抗特性,线路分布参数、回流等均没有作较为系统地考虑.因此不可避免会造成仿真误差.

第三,对车辆与供电系统之间的相互影响考虑不够全面.以国内设计为例,大多数是从列车自动驾驶和工程设计角度开发,列车牵引计算一般由行车部门提供,而供电部门则完成电气网络潮流计算方面工作.而实际上由于牵引网自身的损耗,列车运行过程中所获得的电压和电流也在不断变化.为说明网压变化对列车取流、实际输出牵引力的影响,笔者作了如下仿真:

(1) 仿真单车运行和 2 辆车同时运行工况,以说明网压变化对列车取流的影响.仿真条件如下,牵引变电站输出电压为 1.64 kV,牵引网的电阻为  $39.5 \text{ m}\Omega \cdot \text{km}^{-1}$ ,列车从变电站出发,行驶时间 30 s.仿真时,每辆车的功率一致.仿真结果如图 4 所示,可以看出,两车运行时列车获得的实际电压小于单车运行时的电压,而两车运行时列车受流大于单车运行时的受流.这说明当线路上多车运行时,列车获得的实际电压小于单车运行时的电压,而实际受流大于单车运行时的受流.因此,不能简单地认为多车运行工

况是单车运行工况的简单叠加.特别是目前普遍采用再生制动,车与车之间存在能量传递,实际工况更加复杂,在仿真时必须全面考虑供电系统和多辆车之间的影响.

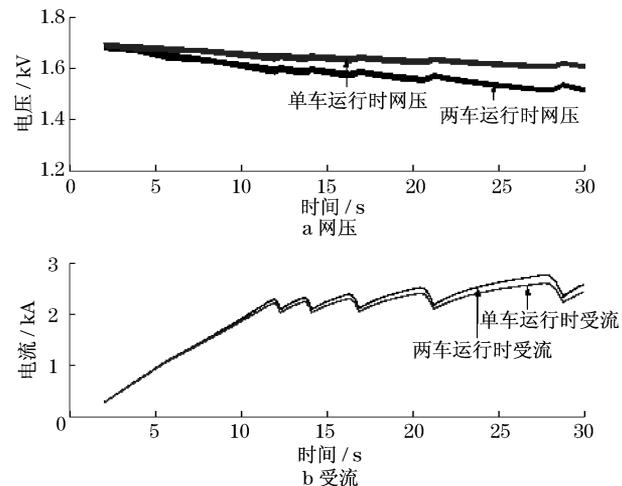


图 4 单车运行与两车运行时列车的网压和受流情况

Fig. 4 Comparison of contact line voltage and current

(2) 建立了基于实际牵引电机特性的列车模型说明网压对列车输出牵引力的影响.仿真条件为 6 节编组列车,AW2 负载,分别仿真了在 1.63 kV 和 1.43 kV 下的列车实际牵引力输出情况,给定牵引加速度依照 1.5 kV 下的牵引力特性曲线制定,数据来源为上海地铁 8 号线,仿真如图 5 所示.仿真结果显示,在 1.63 kV 网压下,列车输出牵引力可以满足加速需求;而在 1.43 kV 网压下,在加速后期,列车实际输出的牵引力出现一个下降转折区,无法满足加速需求.所以,当列车加速过程中,从接触网实际获取的电压是不断变化的,因此给定的牵引加速度要跟随网压变化,而不能按照某一特定网压下的牵引力特性曲线进行加速,否则牵引电机可能无法输出所需求的牵引力.

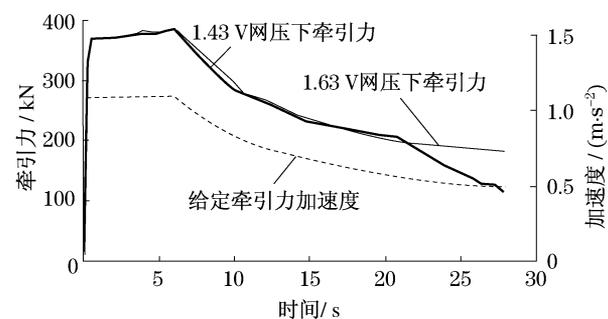


图 5 不同网压下的列车实际输出牵引力与加速度

Fig. 5 Train's output traction effort under different contact line voltages and accelerations

(3) 仿真在网压明显跌落时的牵引力输出情况以说明牵引加速度给定应该跟随网压变化. 列车加速过程中网压从 1.50 kV 跌落至 1.25 kV, 仿真条件同上述工况. 仿真结果如图 6 所示, 当给定牵引加速度随网压变化时列车可以正常输出牵引力; 而当给定牵引加速度不随网压变化时, 当加速到一定程度, 实际输出牵引力出现一个明显的下降区而无法加速要求.

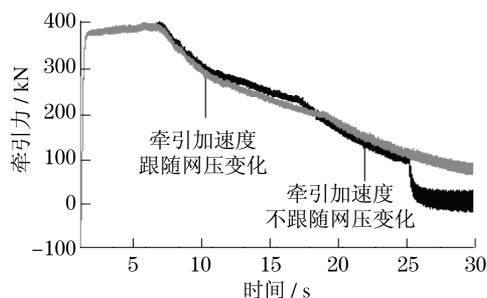


图6 网压变化时不同加速度给定下的实际输出牵引力  
Fig.6 Traction effort under different accelerate speeds when contact line voltage changes

第四, 需要深入仿真研究城市轨道交通牵引供电系统的动态特性. 目前轨道交通的车辆大都使用变频调速的交流传动系统, 电力电子器件的使用产生的谐波引起传动系统主电路的震荡是工程实际中碰到的难点. 图 7 所示为刘可安等人在国产地铁车辆项目的调试中遇到的主电路震荡问题, 当速度到达一定值的时候电压突然变化<sup>[22]</sup>. 此外, 笔者在对牵引供电系统的仿真研究中还发现, 由于牵引系统分布电感和电容的影响, 当列车运行到某一位置时, 牵引系统和列车主电路也会有谐振现象产生.

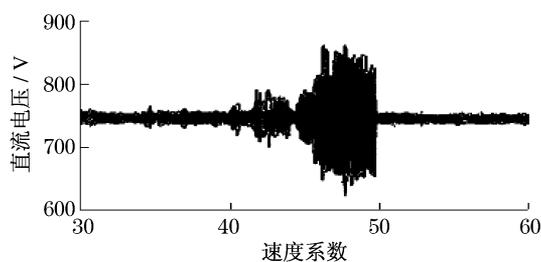


图7 传动主电路中的震荡  
Fig.7 The voltage resonance of traction circuit

### 3 牵引供电系统仿真展望

由于牵引供电网络是一个实时动态网络, 牵引系统的负荷大小随牵引重量、线路坡度、列车速度、

机车工作状态不断变化, 负荷的位置与数量也随时间不断改变, 因此对城市轨道交通牵引供电系统的仿真研究不止是单纯考虑交直流供电系统的潮流计算, 也不止是考虑行车舒适度、精确度以及能耗计算等列车自动驾驶仿真, 而是需要综合考虑供电特性与车辆运行的动态系统联合仿真.

牵引供电系统的仿真模型应该与实际运行情况相结合, 包含牵引变电站、触网与轨道的供电系统模型和能够完全反映车辆牵引、制动与惰行工况的车辆模型的多列车、多工况的联合动态系统仿真模型具体细节如下:

首先, 在供电模型上, 应该根据实际的交直流馈电系统参数、立变压器(工作状态、空载状态)模型、整流柜模型、接触网、轨道分布参数模型, 并基于上述单体模型根据轨道交通常用主变电站、牵引变电站、降压变电站的结构实现馈电系统的模块化.

其次, 在列车模型上, 应该将列车的真实电气结构与车辆的外特性相结合, 考虑系统的特征参数、辅助用电设备、制动电阻, 建立能真实反映电制动特性的多工况列车模型, 并结合实际的行车控制策略、列车牵引特性曲线, 仿真并记录列车的功率、能耗、电流、电压等的动态变化情况.

再次, 在系统仿真上应整合供电系统模型和车辆模型, 实现交直流的潮流与车辆运行的同步解算和多车多工况的动态系统仿真, 且兼顾仿真的速度与精确性. 为了免去算法开发的繁琐工作, 把精力集中在系统模型上, 可以使用 PSCAD/EMTDC 与 MATLAB 集成作为软件的开发平台, 这样既能发挥 PSCAD/EMTDC 的电磁暂态分析功能, 又能发挥 MATLAB 的数学建模和系统仿真的功能. 通过它们之间的接口, 只要程序运行一次, 就能方便地获得多组不同工况下的数据, 从而有利于列车全系统动态仿真.

最终的模型应成为研究城市轨道交通牵引供电系统的理想平台. 该平台具有良好的通用性、扩展性和可操作性. 在该平台之上, 可以进行轨道交通牵引供电系统极限工况与故障状态模拟、评估供电系统的安全性、验证列车运营图, 为系统的扩容与改造、谐波治理、无功补偿、动态特性研究、保护整定值的调整以及新线设计方案提供理论依据.

### 4 结语

城市轨道交通系统是一个庞大的复杂系统, 由于系统的特殊性, 需要可靠、准确的工具来评估系统

多方面的性能. 对国内外城市轨道交通仿真的发展概况、存在问题进行了系统、详尽的分析. 为了提高仿真的可靠性和置信水平, 提出了应该进行与实际情况相结合的城市轨道交通牵引供电系统多车、多工况动态联合仿真, 可以使用电磁暂态仿真软件 PSCAD 作为平台对软件进行开发.

#### 参考文献:

- [1] 何宗华. 城市轨道交通发展方向的技术策略[J]. 城市轨道交通研究, 2001, 11(1): 1.  
HE Zonghua. Technical strategy of the development of Urban Rail Transit[J]. Urban Mass Transit, 2001, 11(1): 1.
- [2] 于松伟, 杨兴山. 城市轨道交通供电系统设计原理与应用[M]. 成都: 西南交通大学出版社, 2008.  
YU Songwei, YANG Xingshan. Design principle and application of power system for urban rail transit[M]. Chengdu: Southwest Jiaotong University Press, 2008.
- [3] 景建成. 上海轨道交通牵引直流开关跳闸故障分析[J]. 城市轨道交通研究, 2009, 12(6): 44.  
JING Jiancheng. Trip failure of traction dc switch in shanghai metro[J]. Urban Mass Transit, 2009, 12(6): 44.
- [4] 黄元亮, 严冬松. 系统仿真促进列车牵引供电技术的发展[J]. 系统仿真学报, 2008, 20(18): 5040.  
HUANG Yuanliang, YAN Dongsong. System simulation accelerates developing technology in power supply of train's traction [J]. Journal of System Simulation, 2008, 20(18): 5040.
- [5] 李广凯, 李庚银. 电力系统仿真软件综述[J]. 电气电子教学学报, 2005, 27(3): 61.  
LI Guangka i, LI Gengyin. The summary of power system simulation software [J]. Journal of Electrical and Electronics Education, 2005, 27(3): 61.
- [6] Martin P. Train performance and simulation [C] // Winter Simulation Conference Proceedings. Phoenix Az: IEEE Communications Society, 1999(2): 1287 - 1294.
- [7] Mellitt B, Goodman C. Simulation for studying operational and power-supply conditions in rapid-transit railways[C] // Proceedings of the Institution of Electrical Engineers. Birmingham: IEEE Communications Society, 1978, 125(4): 298 - 303.
- [8] Y. cai M RI. Modelling and numerical solution of multibranch DC rail traction power systems[J]. IEE Proc - Electr Power, 1995, 142(5): 323.
- [9] 赵荣华, 杨中平. 轨道交通牵引供电系统仿真中的算法研究[J]. 西部交通科技, 2007(6): 96.  
ZHAO Ronghua, YANG Zhongping. A study on the algorithm used in the simulation of transaction power system for rail transportation [J]. Western China Communication Science and Technology, 2007(6): 96.
- [10] 刘学军, 于松伟. 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): 128.  
LIU Xuejun, YU Songwei. Model and algorithm for traction power system simulation of urban rail - line [J]. Computer Simulation, 2004, 21(12): 128.
- [11] 王晓东, 张洪斌. 城市轨道交通直流牵引供电系统的仿真研究[J]. 系统仿真学报, 2002, 14(12): 1692.  
WANG Xiaodong, ZHANG Hongbin. Simulation study of dc traction power supply system for urban rail transportation[J]. Journal of System Simulation, 2002, 14(12): 1692.
- [12] 刘海东, 何天健. 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.  
LIU Haidong, HE Tianjian. Simulation of DC traction power for mass transit railway[J]. Journal of System Simulation, 2004, 16(9): 1944.
- [13] 郭东. 考虑再生制动的城市轨道交通牵引供电仿真的研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2005.  
GUO Dong. Research on the solution of simulation for urban traction power including regenerative braking [D]. Chengdu: Southwest Jiatong University, 2005.
- [14] DI Yu. MRTS traction power supply system simulation using MATLAB simulink [C] // Vehicular Technology Conference. [S. l]: IEEE Communication Society, 2002, 1: 308 - 312.
- [15] T koseki Y O. Dynamic calculation of a dc-electrification of an urban railway for studies on control of regenerative brakes and management of their electric power [EB/OL]. [2009 - 07 - 16]. <http://koseki.t.u-tokyo.ac.jp/report2006/065-070.pdf>.
- [16] 张小瑜, 吴俊勇. 基于 PSCAD 的牵引供电系统仿真研究[J]. 电气化铁道, 2007, 17(6): 17.  
ZHANG Xiaoyu, WU Junyong. Study on PSCAD-based traction power supply system simulation[J]. Electric Railway, 2007, 17(6): 17.
- [17] Farhad Shahnia M S. Induction motor characteristics and applications for dc electrified railway systems [EB/OL]. [2009 - 06 - 13]. <http://www.emo.org.tr/ekler/316e3fe33f1f754-ek.pdf>.
- [18] 彭其渊, 石红国, 魏德勇. 城市轨道交通列车牵引计算[M]. 成都: 西南交通大学出版社, 2005.  
PENG Qiyuan, SHI Hongguo, WEI Deyong. Calculation of urban rail transit train traction [M]. Chengdu: Southwest Jiaotong University Press, 2005.
- [19] Railsim Team. Introduction of Railsim [EB/OL]. [2009 - 06 - 13]. <http://www.railsim.com/modules/train-performance-calculation.html>.
- [20] TOM Company. What is TOM? [EB/OL]. [2009 - 06 - 12] [http://home.comcast.net/~rail\\_systems\\_center/tom.htm](http://home.comcast.net/~rail_systems_center/tom.htm).
- [21] 杜翔. 城市轨道交通牵引计算仿真系统的研究和开发[D]. 北京: 北京交通大学, 2008.  
DU Xiang. Research and development of urban rail transit traction calculation system [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2008.
- [22] 刘可安, 高首聪, 刘晨. 地铁车辆交流传动系统主电路振荡抑制研究[J]. 机车电传动, 2006, 17(3): 48.  
LIU Ke'an, GAO Shoucong, LIU Cheng. Study on main circuit oscillation impression of AC drive system for metro vehicles [J]. Electric Drive for Locomotives, 2006, 17(3): 48.