

城市轨道交通系统运行仿真平台的设计与实现

李少伟^{1,2*}, 陈永生¹

(1. 同济大学 电子与信息工程学院, 上海 201804; 2. 上海海事大学 商船学院, 上海 201306)

(*通信作者电子邮箱 swli@shmtu.edu.cn)

摘要:为研究不同客流状况下轨道交通的运行效率和应急方案效率评估,以及突发事件下应急策略的仿真和定量分析,提出了一种城市轨道交通运行仿真平台。该系统从列车运动模型、自动列车控制(ATC)系统结构模型、轨旁设备对象功能模型和移动闭塞系统模型等4个方面对城市轨道交通运行仿真系统进行建模。在此基础上,以VC++作为开发平台,结合计算机网络以及数据库技术,设计并实现了完整的地铁运行仿真平台。在时刻表的驱动下,仿真平台可以实现列车的自动运行。该系统以轨道交通8号线数据进行验证,仿真结果与真实时刻表达一致。

关键词:轨道交通; 仿真平台; 建模; 面向对象; 自动列车控制

中图分类号: U29-39; TP391.98

文献标志码: A

Design and implement of simulation platform for urban rail transit system

LI Shaowei^{1,2*}, CHEN Yongsheng¹

(1. School of Electronics and Information Engineering, Tongji University, Shanghai 201804, China;

2. Merchant Marine College, Shanghai Maritime University, Shanghai 201306, China)

Abstract: To evaluate the operational efficiency and emergency strategies of the rail transit under different passenger flow conditions, also simulate and analyze the emergency strategies quantitatively, a simulation platform for urban rail transit was proposed. This system modeled four main objects that consisted of the kinetic model of train, the Automatic Train Control (ATC), the trackside equipment and the moving block system. On this basis, the whole simulation system was designed and implemented based on VC++ development platform combined with computer network and database technology. Finally, the operation of the train was able to be automatically implemented on this simulation platform driven by the train timetable. The system was assessed by using the data of the rail transit of Shanghai 8th line and the simulation results show good consistency with the real timetable.

Key words: rail transit; simulation platform; modeling; object oriented; Automatic Train Control (ATC)

0 引言

城市轨道交通在规划、建设以及运营过程中往往会碰到许多无法预料的突发事件。为了对轨道交通各阶段的实施方案进行评估论证,提高轨道的运行效率,增加轨道交通运行的安全系数以及在突发事件应急状态下,对应急策略进行仿真和定量分析,国内外各研究机构采用不同的手段,设计了轨道交通列车运行仿真平台。

谢蜀劲^[1]对目前国外使用较多的 RailSys、OpenTrack、STRESI 等列车仿真程序的功能进行了论述。由于现有的软件基本上都是针对某些特定功能而开发的,主要用于在现有的列车时刻表下,对列车的运行进行仿真,并检测其中的冲突,所以其通用性较差、不便于扩展;宗明等^[2]采用基于统一建模语言(Unified Modeling Language, UML)的方法,对自动列车运行(Automatic Train Operation, ATO)系统进行了仿真,并且采用建模工具集中的 Rose 工具进行了实现。但通常认为列车的控制由3部分组成,分别为ATO、自动列车控制

(Automatic Train Control, ATC)和自动列车监控(Automatic Train Supervision, ATS),这三者相互依托,互不可分,这种仿真方式属于对部分模块的仿真模拟,并未对整套轨道交通进行完整的仿真;Nunez等^[3]以管理学的手段,对轨道交通的运行进行了仿真研究。然而这种方法忽略了列车的实际运动模型,无法完成对故障状态的扩展以及对应急策略效率的定量分析;陈祥献等^[4]则着重研究了基于通信的列车控制(Communication-Based Train Control, CBTC)系统,并对CBTC下的联锁闭塞机制进行了研究仿真。CBTC主要应用于联锁闭塞机制中,若要建立完整的仿真平台还需建立相关的模型;除此以外,国内外许多研究人员均对轨道交通仿真平台中的部分模块进行了设计与实现,包括视景的仿真、运行图的自动生成以及分布式系统在仿真平台中的应用^[5-10]。列车运行视景的仿真主要用于培训列车操作人员,其针对性较强,不适宜实现平台的通用性;运行图的自动生成主要用于轨道交通的管理层面,它主要用于对仿真平台进行测试。

上述仿真系统虽然都对轨道交通仿真平台进行了研究,

收稿日期: 2013-07-22; 修回日期: 2013-09-16。

基金项目: 国家科技支撑计划项目(2009BAG18B04); 上海市重点学科建设项目(S30602)。

作者简介: 李少伟(1982-),男,湖北武汉人,工程师,博士研究生,主要研究方向:城市轨道交通应急处理策略、航海雷达信号采集与处理、船舶设备仿真; 陈永生(1966-),男,江苏扬中人,研究员,博士,主要研究方向:计算机系统结构、城市轨道交通效能评估与仿真、磁浮列车自动控制。

但基本都是侧重于对某一模块的设计,并且通用性及扩展性较差,并没有对系统进行整体的设计研发。本文在参考已有仿真系统的基础上,依托同济大学陈永生教授轨道交通研究平台,提出了一种较全面的城市轨道交通仿真平台,可以模拟整个轨道交通中大部分模块的运行。本文采用经典宏观物体运动学理论,对列车的运行建立运动模型,分析了列车运动过程中受到的牵引力和阻力的组成;对自动列车控制(ATC)系统的组成模块进行了划分,并对各个模块进行了属性赋值,用以限制列车的运行;将轨旁设备分为4个模块,分别为信号机类、道岔类、轨道类及站台类,根据功能的不同,赋予了功能属性;采用移动闭塞原理,结合列车运动模型,建立了轨道交通的运行控制方法;以VC++作为开发平台,结合计算机网络以及数据库技术,建立了完整的地铁仿真平台。最终,以上海地铁8号线作为研究对象,对仿真数据进行了验证。

1 轨道交通及仿真功能

1.1 轨道交通功能概述

城市轨道交通系统是一个由电气设备驱动的复杂、庞大的网络,其结构框图如图1^[11]所示。

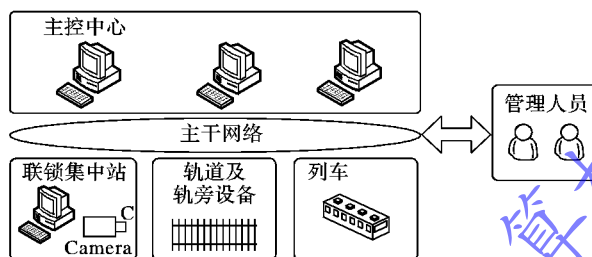


图1 城市轨道交通组成结构

从图1可以看到,轨道交通由控制中心、联锁集中站、轨旁设备、列车、主干通信网络以及管理人员所组成。其中管理人员作为整个轨道交通运行的决策者,是轨道交通安全、正常运行的核心保证;控制中心承担着列车调度、运行计划的制定以及系统监控的任务,并且在紧急状态下,还需要制定相应的应急预案;联锁集中站接收来自控制中心和列车的信息,并实现信息的转发,同时承担着轨道交通区域信息管理的工作;轨旁设备包括了轨道、信号机、道岔以及通信设备等,是列车进路畅通的硬件保障;列车则是运载旅客的载体,在ATC或人工的控制下,运送乘客;为了实现上述所有模块的信息交换,一条高速主干通信网络承担起了各部分模块信息交换的功能^[12]。

1.2 仿真平台模块划分

为了实现城市轨道交通仿真平台的设计,首先对上述真实轨道交通各组成模块以及其主要功能进行了分析,提出了需要仿真建模的部分;然后以面向对象的方式,对各模块赋予相应的属性,完成模块建模工作。仿真平台的主要组成模块如图2所示。

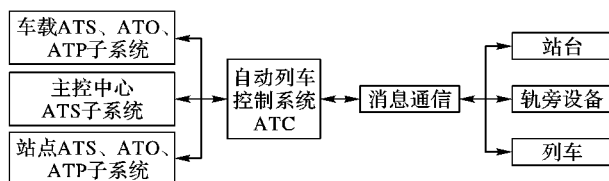


图2 仿真平台组成模块

2 轨道交通仿真运行平台建模

2.1 列车运动模型

根据宏观物体运动的物理规律,列车的运动路程、运动速度以及加速度之间有如式(1)所表达的关系:

$$s(t) = v_0 t + \int_0^t a(t) dt \quad (1)$$

其中: $s(t)$ 为列车的运行路程, $v(t)$ 为列车的运行速度, $a(t)$ 为列车的加速度。

根据基本物理定律,列车的加速度与列车所受到的外力作用成正比关系:

$$a(t) \propto F \quad (2)$$

其中: F 为列车受到的合力,它由列车所受到的牵引力 F_1 以及列车所受到的阻力 F_2 组成。其中列车所受到的牵引力由列车的牵引功率、列车当前速度共同决定,其关系如式(3)所示:

$$P = FV \quad (3)$$

其中: P 为列车牵引功率, V 表示列车的当前速度。列车所受到的阻力则是由机械摩擦力、坡道阻力以及风阻等多项因素构成。为简化列车运动模型的计算,本文忽略列车在运行过程中受到的启动阻力、隧道空气附加阻力等影响较小,但计算较为复杂的因素。并假设在仿真平台中,列车的阻力仅由基本阻力、坡道阻力以及转向阻力三个主要部分组成。其计算方法^[13]如下:

1)当列车在平直轨道上运行时,受到的单位基本阻力(单位为 $N \cdot KN^{-1}$)如式(4)所示:

$$w_1 = A + Bv(t) + Cv^2(t) \quad (4)$$

其中: v 为车辆的运行速度,单位为 km/h ; A 、 B 、 C 为常数,其具体数值由列车生产后经过实际测量获得。

2)当列车运行于坡道上时,其受到的单位坡道附加阻力(单位为 $N \cdot KN^{-1}$)表达式如式(5)所示:

$$w_2 = i \quad (5)$$

其中: i 表示车厢所在坡的坡度千分数,上坡时取值为正,下坡时为负。

3)列车在曲线线路上运行时,各节车厢车轮轮缘与钢轨侧面产生的曲线附加阻力(单位为 $N \cdot KN^{-1}$)如式(6)所示:

$$w_3 = \frac{A}{R} \quad (6)$$

其中:系数 A 为常数,其取值通常与列车与轨道的制造工艺相关。根据实验,系数 A 的取值一般为600,700或800。 R 为曲线半径,单位为 m 。

根据式(4)、(5)和(6)可以得到列车运行过程中受到的单位阻力(单位为 N)为:

$$F_2 = \sum_{i=1}^n \left[\frac{(w_{1i} + w_2 + w_3) m_i g}{1000} \right] (N) \quad (7)$$

式(7)表示有 n 节车厢的列车,在运动过程中受到的阻力的合力。其中: m_i 为第 i 节车厢的质量,单位为 kg ; g 为重力加速度,通常取值为 $9.8 N/kg$ 。

将式(7)代入式(1)中,并结合物体运动规律,得到如下方程:

$$s(t) = v_0 t + \iint_t \frac{(F_1 - F_2)}{M} dt \quad (8)$$

式(8)经过变形后,可以得到关于列车运动模型的非线性常微分方程。为了便于计算机对上述方程的处理,同时避免求解复杂的微分方程,本文采用数值计算的方式对式(8)进行求解,步骤如下。

1) 设列车当前速度为 v_0 。

2) 取时间间隔 $\Delta t = 0.01 \text{ s}$ 。

3) 在 Δt 时间间隔内,假设列车受到的阻力为常数。

4) 根据方程(1)、(9)、(10),求得 Δt 时间间隔内,列车的末速度与运动路程:

$$a = \frac{F_1 - F_2}{M} \quad (9)$$

$$v = a\Delta t \quad (10)$$

5) 以列车末速度 v 作为列车当前速度 v_0 , 返回步骤4), 直到列车运行速度达到限定要求。

根据上述求解步骤,结合上海轨道交通8号线AC07型电力机车的运行参数^[14],取 $A = 1.4, B = 0.0038, C = 0.000348$,最大牵引功率2960 kW,最大牵引力210 kN,车辆编组总质量 $M = 225 \times 103 \text{ kg}$,当列车在平直轨道上运行时,列车的运行曲线如图3~4所示。

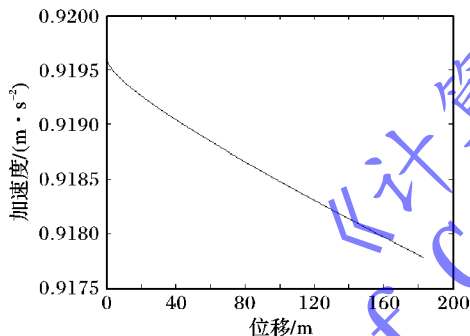


图3 列车位移-加速度曲线

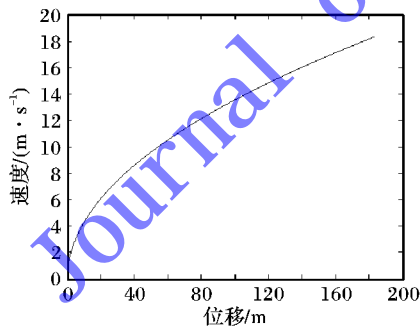


图4 列车位移-速度曲线

图3~4展示了随着列车在牵引力及阻力的共同作用下位移不断增加,速度不断增大的过程。在列车的加速过程中,其速度的变化逐渐减缓,也就意味着随着列车速度的增加,其获得的加速度不断减小,这一点与列车受到的阻力规律相符,表明了此算法可以模拟列车的速度控制。

2.2 自动列车控制 ATC 结构设计

自动列车控制系统 ATC 由三个子部分组成,分别为:自动列车监控系统 ATS、自动列车保护系统 ATP 以及自动列车

操作系统 ATO。其中控制中心仅存在 ATS 系统,并且通过 ATS 系统监控整个轨道交通的运行状态,同时控制着整个轨道交通的运行;联锁集中站中的 ATS 在控制中心的授权下完成进路控制等功能,同时也是控制中心与列车之间信息交换的中介。联锁集中站中的 ATP/ATO 系统确保仅有一条进路有效,并且对站台机电设备进行操作;车载 ATS 系统保存各种行车数据,并通过联锁集中站 ATS 系统接收来自中心 ATS 的信息;车载 ATP 系统实时监控列车的运行状态,并与 ATO 系统相互配合,实现列车的安全运行。图5列出了在基于面向对象建模思想下,ATC 各组件的属性以及方法。



图5 ATC 对象模型

根据对 ATC 系统的功能描述,设计出如图5所示的 ATC 对象模型。从图5中可以看到,这三个子系统既相对独立,又相互联系,组成了一套完整的管理、控制、监督系统。

2.3 轨旁设备

本文采用面向对象的建模方法,抽象出轨旁设备的共性,设计出设备类作为所有设备的基类。根据不同设备的特性,从而派生出各种设备子类。这样对将来系统的扩展留了空间,并且使得复杂系统标准化。图6展示了轨旁设备各对象的关系,以及各模块的属性。

2.4 移动闭塞

列车的闭塞系统实现方式可分为两大类,分别为固定闭塞和移动闭塞。传统的固定闭塞信号控制,采用阶梯式速度控制方式,对应每个闭塞分区只能传送一个该分区所规定的最大速度命令码。其特点是线路被划分为固定位置、某一长度的闭塞分区,一个分区只能被一列车占用。闭塞分区的长度按最长列车、满负载、最高速度、最不利制动率等不利条件设计。这种闭塞方式运行效率低,现在已逐渐被淘汰。在移动闭塞机制下,列车间隔为若干闭塞分区,而与列车在分区内的实际位置无关;制动的起点和终点总是某一分区的边界,列车的安全运行由 ATP/ATO 系统负责。本仿真平台中,采用移动闭塞的方式实现列车的操作与碰撞避免。

如图7所示为列车运行过程中的移动闭塞机制示意图。

在移动闭塞机制下,前后两列列车之间的闭塞区间长度一般为固定值,这段区间的长度由列车的制动性能决定。它必须保证在列车紧急制动状态下,前后两车的距离不得小于设定的安全距离,即图7中的后方保护距离;闭塞区间的边界则会

随着列车的运行而动态改变,如图7所示,其边界点分别位于后车的车头与前车的车尾减去保护距离。在仿真平台中,本文采用如下算法分3阶段来实现在移动闭塞条件下,列车的运行状态控制。其中列车的制动采用一次连续式。

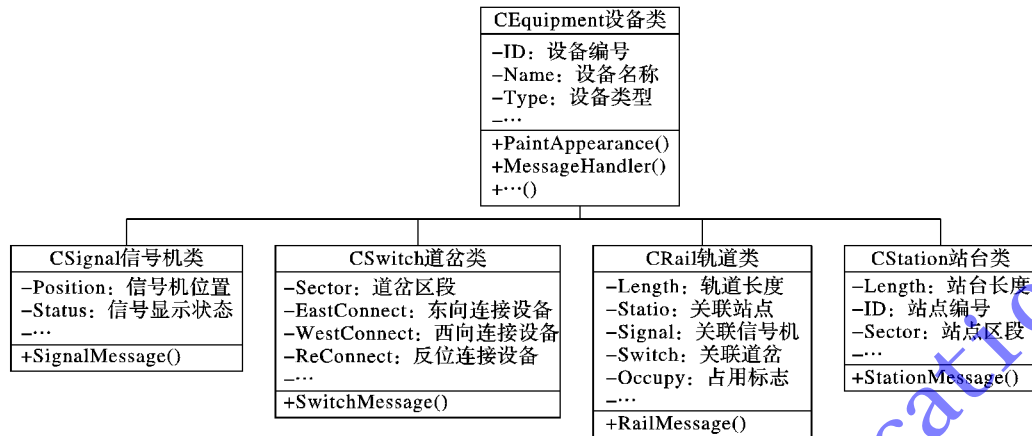


图6 轨旁设备对象模型

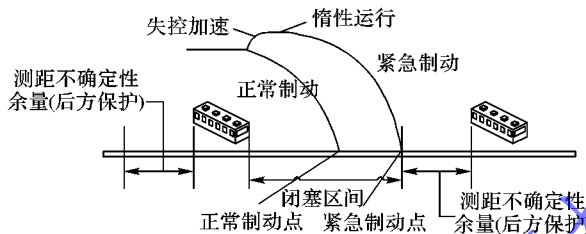


图7 移动闭塞原理示意图

1) 在列车切断牵引力后的惰性运行阶段。此时列车受到的外力 F_2 可由式(7)计算得到,其运动状态方程如式(11)、(12)所示:

$$v_1 = v_0 + \int_t \frac{F_2}{M} dt \quad (11)$$

$$s_1 = v_0 t + \int_t \frac{F_2}{M} dt \quad (12)$$

2) 在列车制动力建立及完全建立阶段。此时列车在制动力的作用下速度快速降低。假设刹车片与刹车盘之间的正向压力为 F_p ,彼此间的摩擦系数为 μ ,那么列车所受到的制动力为:

$$F_b = \mu F_p \quad (13)$$

将式(13)结合式(6),可以计算得到如式(14)、(15)所示的列车运动方程:

$$v_2 = v_1 + \int_t \frac{F_2 + F_b}{M} dt \quad (14)$$

$$s_2 = v_1 t + \int_t \frac{F_2 + F_b}{M} dt \quad (15)$$

3) 列车位置修正阶段。根据轨旁传感器信息,得到列车位置误差修正为:

$$\Delta s = E_1 + (0.03 * A) \quad (16)$$

其中: E_1 表示轨旁校正列车位置固定误差, A 表示轨旁校正列车位置动态系数。

根据上述计算,假设在紧急制动状态下,前车走过的路程为 S_1 ,后车走过的路程为 S_2 ,两车之间的距离为 L ,保护距离为 L_p ,那么可以得到移动闭塞条件如式(17)所示:

$$S_2 + L_p < S_1 + L \quad (17)$$

3 系统仿真结果

3.1 组建模块

仿真平台的组建模块如图8所示,图中展示了各模块的基本形状及状态。在列车运行仿真的过程中,组建模块会随着列车当前的运行状态改变其外观及属性,例如岔道方向的变换、信号机颜色的改变以及进路的建立等。

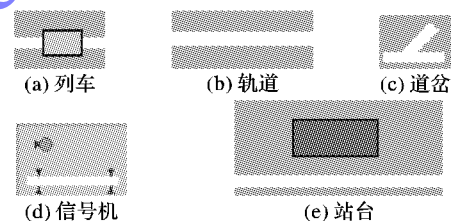


图8 组建模块

3.2 实验结果

系统以上海轨道交通8号线作为研究对象,将此条线路的时刻表作为仿真平台的驱动源,实现仿真平台对真实线路的模拟。

如图9所示为列车运行图,图中横坐标表示时间,纵坐标表示距离。从列车运行图中可以直观得到目标列车在任意时刻的位置。

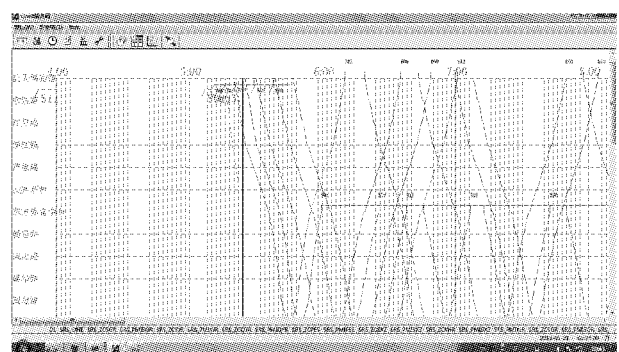


图9 列车运行图

如图10所示为在时刻表的驱动下,仿真程序的运行结果。

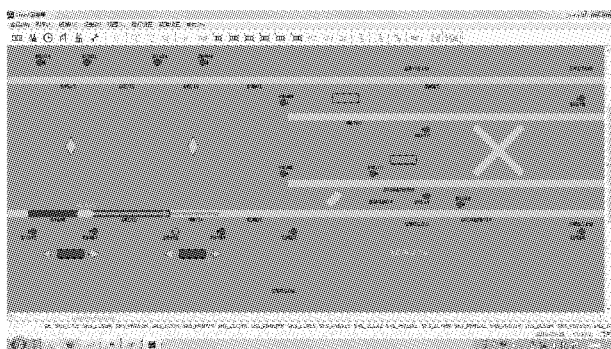


图10 仿真运行结果

4 结语

轨道交通运行仿真平台可以在一定程度上对轨道交通的运行进行模拟,实现列车的自动调度、运行、进路选择以及联锁闭塞的控制;此外,仿真平台还可以满足轨道交通运营管理机构对管理人员的培训需求,在降低培训成本的同时提高培训效率;同时,作为一种通用的地铁运行仿真平台,还可以作为轨道交通科学的研究工具,对新的理论以及算法进行定量分析。

在当前阶段,本系统仅设计和实现了轨道交通工作状态的一部分,即列车的运行仿真以及科研分析的相关接口。在下一阶段的研究中,可以在系统中加入更多的功能,包括:环控系统、火灾报警以及故障信息,以实现对真实轨道交通更全面、真实的仿真。

参考文献:

- [1] XIE S. Development and prospect of simulation programs for rail transit operation [J]. Urban Rail Transit, 2006, 9(10): 64-65. (谢蜀劲. 轨道交通运行仿真程序的发展现状与展望[J]. 城市轨道交通研究, 2006, 9(10): 64-65.)
- [2] ZONG M, ZHANG G. Development of automated driving simulation platform in rail transit [J]. Urban Rail Transit, 2012, 15(6): 52-55. (宗明, 张国侯. 轨道交通列车自动运行仿真平台的开发研究[J]. 城市轨道交通研究, 2012, 15(6): 52-55.)
- [3] NUNEZ F, REYES R, GRUBE P, et al. Simulating railway and metropolitan rail networks: from planning to on-line control [J]. IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine, 2010, 2(4): 18-30.
- [4] CHEN X, WANG D, HUANG H. Design of simulation platform for CBTC system [J]. Railway Computer Application, 2011, 20(8): 50-55. (陈祥献, 王东, 黄海. CBTC系统仿真测试平台设计[J]. 铁路计算机应用, 2011, 20(8): 50-55.)
- [5] LU C, CHEN Y. Simulation-based metro scheduling method [J]. Journal of Computer Applications, 2011, 31(S2): 187-189. (陆诚君, 陈永生. 基于仿真列车运行的时刻图编制方法[J]. 计算机应用, 2011, 31(S2): 187-189.)
- [6] LI S, CHEN Y. Dynamic schedule strategy for urban rail transit [J]. International Journal of Digital Content Technology and Its Applications, 2012, 6(3): 86-92.
- [7] JIANG Z, XIE C. Multi-Agent delay simulation model in mass rail transit system [C]// ICMTMA 2009: Proceedings of the 2009 International Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation. Piscataway, NJ: IEEE Press, 2009: 717-720.
- [8] ZHU X, LI C, XU Z, et al. Study on modeling simulation of locomotive dynamics for urban rail transit [C]// Proceedings of the 2011 International Conference on Modelling, Identification and Control. Piscataway, NJ: IEEE Press, 2011: 86-91.
- [9] LU B, NI S. Station operation simulating system in railway station based on .NET framework [J]. Railway Computer Application, 2010, 19(11): 1-4. (鲁斌, 倪少权. 基于.NET Framework的轨道交通车站作业仿真系统[J]. 铁路计算机应用, 2010, 19(11): 1-4.)
- [10] SUN J, SHU W, NING J. Research of Agent-based mass transit ATS simulation system [J]. Journal of the China Railway Society, 2004, 26(3): 123-126. (孙娟, 施卫忠, 宁建国. 基于Agent的轨道交通ATS系统仿真方法研究[J]. 铁道学报, 2004, 26(3): 123-126.)
- [11] LIU B, LI G. Urban rail transit signal [M]. Chengdu: Southwest Jiaotong University Press, 2011. (刘伯鸿, 李国宁. 城市轨道交通信号[M]. 成都: 西南交通大学出版社, 2011.)
- [12] SUN Z, PU Q. An introduction to urban rail transit [M]. Beijing: China Communications Press, 2010. (孙章, 蒲琪. 城市轨道交通概论[M]. 北京: 人民交通出版社, 2010.)
- [13] GU B, YE X. Urban rail transit engineering [M]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology Press, 2007. (顾保南, 叶霞飞. 城市轨道交通工程[M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2007.)
- [14] China Railway. Traction computation for train [EB/OL]. [2013-05-05]. http://www.chnrailway.com/news/200862/2008621615577794368_2.shtml. (中华铁道网. 列车牵引计算[EB/OL]. [2013-05-05]. http://www.chnrailway.com/news/200862/2008621615577794368_2.shtml.)

(上接第845页)

- [9] EDELMAN A, ARIAS T A, SMITH S T. The geometry of algorithms with orthogonality constraints [J]. SIAM Journal on Matrix Analysis and Applications, 1999, 20(2): 303-353.
- [10] ZHENG L, TSE D N C. Communication on the Grassmann manifold: a geometric approach to the noncoherent multiple-antenna channel [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2002, 48(2): 359-383.
- [11] LATECKI L J, LAKAMPER R, ECKHARDT T. Shape descriptors for non-rigid shapes with a single closed contour [C]// Proceedings of the 2000 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Washington, DC: IEEE Computer Society, 2000: 424-429.
- [12] ATTALLA E, SJY P. Robust shape similarity retrieval based on contour segmentation polygonal multiresolution and elastic matching [J]. Pattern Recognition, 2005, 38(12): 2229-2241.
- [13] DALIRI M R, TORRE V. Robust symbolic representation for shape recognition and retrieval [J]. Pattern Recognition, 2008, 41(5): 1782-1798.
- [14] THOUM K, KITJADURE Y, KONDO S. Affine invariant shape recognition based on multi-level of barycenter contour [C]// ISCT 2008: Proceedings of the 2008 International Symposium on Communications and Information Technologies. Washington, DC: IEEE Computer Society, 2008: 145-149.