

列车运行调整的优化与仿真

金炜东¹, 章优仕¹, 高四维²

1. 西南交通大学电气工程学院, 成都 610031

2. 西南交通大学峨眉校区交通运输系, 四川峨嵋 614202

[摘要] 列车运行调整是一类高度复杂的组合优化问题, 仿真技术是列车运行调整研究的重要技术手段。在建立了基于满意优化的列车运行调整智能化决策支持系统模型基础上, 介绍了仿真技术在列车运行调整优化中的应用, 以及用于铁路列车调度员技能培训的仿真系统。

[关键词] 仿真技术; 列车运行调整; 满意优化; 仿真培训系统

[中图分类号] TP391.9, U292.42

[文献标识码] A

[文章编号] 1000-7857(2007)12-0018-05

The Optimization and Simulation of Railway Rescheduling

JIN Weidong, ZHANG Youshi, GAO Siwei

1. School of Electrical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China;

2. Emei Campus Southwest Jiaotong University Department of Traffic and Transportation, Emei 614202, Sichuan Province, China

Abstract: Railway rescheduling is a very complicated combinatorial optimization problem, which can be solved by using the simulation technique. On the basis of a model for the intelligent decision support system for railway rescheduling and using the optimization method, this paper studies the applications of the simulation technique to railway rescheduling optimization and to the simulation system for training railway dispatchers.

Key Words: simulation technique; railway rescheduling; satisfactory optimization; simulated training system

CLC Numbers: TP391.9, U292.42

Document Code: A

Article ID: 1000-7857(2007)12-0018-05

0 引言

系统仿真是利用系统模型对实际系统进行实验研究的过程。基于安全性和经济性的考虑, 系统仿真可在不破坏真实系统环境的情况下, 构造模型代替实际系统进行实验, 并根据仿真结果推断、估计、评价真实系统的性能^[1]。作为一种行之有效的认知方法, 系统仿真技术已在铁路运输、航空航天、经济管理、决策优化、军事演习、安全软件测试评估等诸多领域得到了广泛的应用。我国从 20 世纪 80 年代开始进行铁路运输计算机仿真的研究, 近些年来有了较大进展。计算机仿真技术在铁路运输领域的应用包括列车运行、调度指挥、牵引操纵、铁路基建、站场作业、列车动力学、信号系统等方面^[2-7]。如刘海东^[4]等在介绍了城市轨道交通不同信号闭塞方式及其追踪列车间隔时间的计算方法的基础上建立了不同信号闭塞方式多列车追踪运行的仿真系统;

程瑞琪^[7]等在探讨了区间列车运行分布式仿真系统的构建方法及区间列车的运行动态基础上, 提出区间列车运行仿真系统分布式结构和模型等。

列车运行调整是对列车运行图阶段计划的优化, 即根据本调度台管辖范围内列车运行图、列车实时运行情况以及相邻调度台预报的列车到达情况, 规划 3~4 小时时间段的运行调整计划, 达到提高列车正点率、提高列车运行速度等综合目标。列车运行调整涉及因素众多, 它不仅与各国采用的行车组织方式有关, 还关系到列车密度、速度、线路通过能力等因素, 属于非确定多项式 (Non-deterministic Polynomial, NP) 难解的组合优化问题。仿真技术是进行列车运行调整模型与算法研究的重要技术手段, 国内学者已进行了大量的研究工作, 包括列车运行调整模型与算法的仿真实验和仿真计算等, 实现各种优化模型和调整算法^[8-10, 12-14]; 张莉

收稿日期: 2007-05-24

作者简介: 金炜东, 成都市二环路北一段 111 号西南交通大学电气工程学院, 教授, 主要从事优化与系统仿真、智能信息处理、控制与检测技术等领域的研究; E-mail: wdjin@home.swjtu.edu.cn

艳^[1]等对移动闭塞与固定闭塞差异进行简要分析的基础上, 基于专家系统技术建立了移动闭塞条件下的列车运行调整仿真系统。

1 列车运行调整智能化决策支持系统

列车运行调整的优化问题, 涉及诸多复杂因素。目前我国列车运行调整主要是依靠值班员, 在考虑晚点列车对数、列车晚点时间、列车等级、列车旅行速度等因素的同时, 结合车站到发线既有数量、线路天窗时间等约束条件, 采用延迟发车、提高区间速度、减少车站停车时间、交换占用区间顺序、列车停运等措施手工调整运行图, 以达到在既定调整目标下较满意的调整效果。但是, 由于调度手段落后, 对列车运行状况能见度差、预见性差、获得的信息不够准确等各种不利因素, 手工调整的难度较大; 同时由于列车运行调整实时性强, 调度人员在有限时间内制定一个优化的调整方案十分不易, 加之可能花费大量时间制订了列车运行调整计划而疏于对列车运行的监控指挥, 致使编制的列车运行调整计划兑现率低, 列车运行计划变动频繁, 调度人员劳动强度过大。当前, 高速铁路的发展, 列车速度的提高, 意味着相应允许用于调整的时间更短、实时性更强, 手工调整的难度也就更大。所以目前这种落后的手工调整作业方式严重影响了铁路运输能力的充分发挥, 也给行车安全带来隐患。为提高列车运行调整的效率, 降低手工调整难度和调度人员的劳动强度, 减少行车安全隐患, 提高列车调整的智能水平, 适应高速铁路发展的需求, 列车运行调整智能化决策支持系统的研究和开发势在必行。列车运行调整智能化决策支持系统也是实现智能化列车运行调度指挥系统的关键技术之一。

列车运行调整智能化决策支持系统中, 较充分地体现了系统仿真技术在列车运行调整问题中的应用, 包括行车组织行为的仿真、运行调整计划的仿真优选和仿真实验等。该系统具有以下功能: 提供接收调度命令和列车运行实绩数据的仿真接口, 通过仿真计算的方法实现运行调整算法, 产生不同的调整策略; 将不同的调整策略应用于运行调整的仿真模型, 产生调整后的列车运行图, 与车站(区间)固定(移动)设备的仿真系统相结合; 仿真相关调度命令的执行, 验证调度结果, 并对调整后的列车运行图进行动态指标计算, 给调度人员的调整工作提供智能化的决策支持等。

本文以我们研究的一个单线列车运行调整智能化决策系统为例, 介绍列车运行调整智能化决策支持系统的具体架构。该系统的核心部分是单线列车运行调整满意优化模型与仿真模型, 还包括与外部系统交换数据的接口仿真模块、运行图仿真模块、运行图输出存储模块、运行图调整执行接口仿真模块等部分。系统模

型结构如图 1 所示。

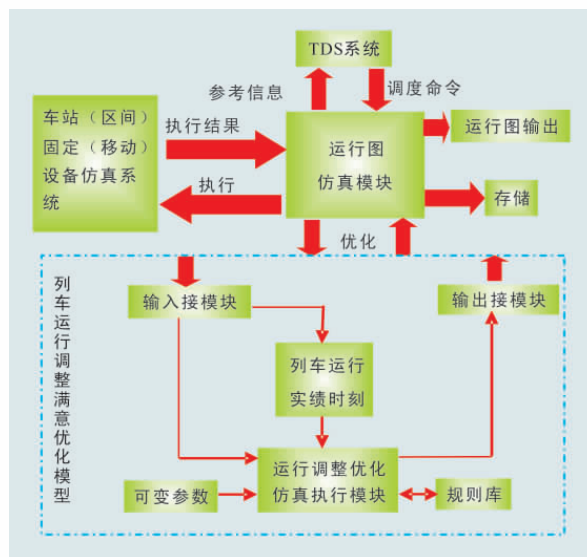


图 1 列车运行调整智能化决策支持系统结构

Fig. 1 Structure of intelligent decision support system for railway rescheduling

图 1 中, 单线列车运行调整智能化决策支持系统作为运输决策支持 (Transportation Decision Support, TDS) 系统的一个子系统, 可与 TDS 系统进行无缝接入。该系统可从 TDS 系统接收调度命令和以列车运行实绩时刻数据作为运行调整依据, 并将调整结果作为参考信息返回 TDS 系统。运行图仿真模块具有基本图数据读入、列车运行实绩时刻接收、基本图经调整后所铺画的新图数据的接收、根据运行调整计划向车站(区间)的固定(移动)设备仿真系统发送相关执行命令, 并接收命令执行结果、驱动运行图输出设备(显示终端或图形打印机)实时显示运行图、将运行图相关数据存储等功能。列车运行调整满意优化模型负责调整计划的自动生成, 它根据接收的列车运行实绩信息, 按照一定的算法自动产生列车运行调整计划。调度员可通过改变可变参数的设置和手动设置修改规则库, 从而调整优化结果, 获得既定满意度, 即可输出调整后的运行图。

随着我国铁路运输的列车密度增大、行车速度提高、线路通过能力紧张程度加剧, 人工调度方式在某种程度上已不能适应铁路运输调度指挥现代化的需求。实现用计算机辅助列车运行调整系统是我国铁路运输管理现代化的必然要求。但是, 由于我国铁路线路的衔接关系错综复杂, 列车种类及运行要求纷繁多变, 随机扰动频繁, 而我国铁路的行车指挥方式、运营模式等都有着自己的特点, 难以直接采用国外的研究成果, 使得开发适合我国铁路特点的计算机辅助行车调度指挥运行调整系统势在必行。因此, 以列车运行调整的满意优化模型为核心的列车运行调整优化决策支持系统的研

究具有十分重要的现实意义,可以看出,系统仿真正是该系统研究的重要技术手段。

2 列车运行调整的满意优化模型

列车运行调整问题涉及因素众多、计算规模巨大,属于 NP 难解的组合优化问题,尤其是对于单线铁路来说,由于在某一时间范围内只能有一列车占用某一闭塞区间,对向列车间的交会和同向列车间的越行等作业都只能在车站进行,使列车运行调整具有更大的难度。因此,要得到列车运行调整问题的最优解决方案,所需的代价过大,甚至是不可能的。近 10 年来,西南交通大学关于满意优化原理与应用的研究工作^[15]得到了同行专家的高度评价。这种“以合理的代价获取满意的结果”的满意优化思想,在具有实时性要求的控制与决策问题中有着广泛的代表性。对于列车运行调整这样一类约束条件复杂、指标模糊且又难以建立传统数学模型的复杂系统,应用满意优化原理将能够较好地兼顾实时性与有效性的要求。因此,我们应用满意优化原理研究单线列车运行调整的优化问题,提出了单线列车运行调整的满意优化模型。

单线列车运行调整的满意优化模型是单线列车运行调整智能化决策支持系统的核心部分。列车运行调整问题涉及列车等级、列车类型、列车晚点时间的长短、列车数量、运行线路的限速、车站接发车时间长短、车站到发线数目、线路维修等诸多因素^[16],涉及变量繁多,约束关系复杂,衡量调整结果的诸多静态和动态指标中存在各种矛盾因素,属于一类多目标满意优化问题。对此,应用“局部-全局”型满意优化结构模型^[15],对这类复杂的优化问题进行合适的分解,可将列车运行计划调整按列车运行的区间划分为若干个区间列车运行计划调整子问题,即将列车运行调整的全局优化问题划分为若干个局部优化子问题。而对于区间列车运行计划调整子问题来说,需调整的列车等级、类型、数量及晚点时间为可变因素,而其他因素可看作为给定的约束条件。于是,区间列车运行调整优化子问题的优化过程,即局部优化过程,就是在给定区间的运行时间、列车间隔、车站间隔、线路维修、车站到发线数量等约束条件下,研究不同等级、类型的列车在不同晚点时间与区间列车数量的情况下,按照不同的运行计划运行时,对总的晚点时间或总的晚点列车数的影响。这类局部优化过程可在离线状态下进行仿真优化,给出在不同模式下的满意调整措施,形成具体的满意调整规则库。而全局的列车运行调整的优化问题,就是根据所有列车的晚点状况,选择合适的运行计划,经过在线运算,使晚点列车数量或总的晚点时间达到既定的满意度水平。对于单线列车运行调整的满意优化模型,全局优化注重时效性,寻求满意解。而局部优化则可根据

全局优化的需要,由离线仿真寻优完成,注重优化效果和数据处理的有效性。列车运行调整的满意优化模型结构如图 2 所示。

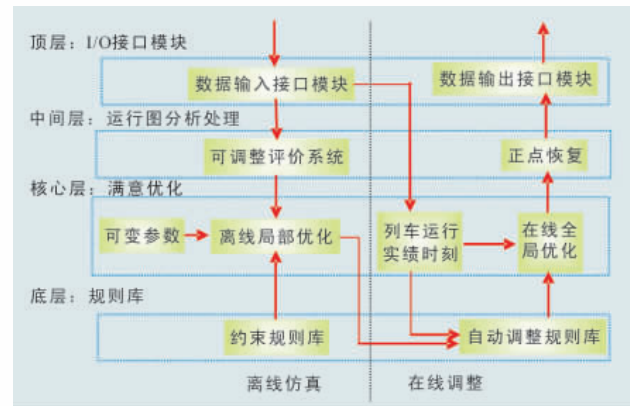


图 2 列车运行调整的满意优化模型结构

Fig. 2 Structure of satisfactory optimization model for railway rescheduling

列车运行调整的满意优化模型可分为 4 个层次：顶层、中间层、核心层与底层。顶层为 I/O 接口模块,包括数据输入接口模块和数据输出接口模块。数据输入接口模块主要是接收运行图仿真模块传递来的基本图数据和列车运行实绩时刻数据,并初始化基本图,将列车运行实绩时刻数据存入列车运行实绩时刻数据库。数据输出接口模块将调整所生成的新运行图及相关数据输出到运行图仿真模块,以便系统生成调整后运行图。中间层包括运行图可调整评价系统模块与正点恢复模块。其中,运行图可调整评价系统模块对基本图进行必要的分析与处理,如运行线或线群的密度分析、关键列车运行线和运行带的分析等,为离线局部优化提供参考数据。正点恢复模块则是根据在线实时的全局优化结果对运行图进行更新处理。核心层包括离线局部优化运算和在线全局优化运算,是整个系统的核心部分,应用了满意优化模型,对离线的可变参数输入数据及在线的列车运行实绩时刻数据进行优化处理。底层则是既定的约束规则库和由离线局部优化生成的自动调整规则库,为核心层的满意优化计算提供必要的规则库。

单线列车运行调整的满意优化模型的核心算法采用满意优化算法。列车运行调整问题涉及的变量繁多,约束关系复杂,衡量调整结果的静态和动态指标也很复杂,属于一类多目标满意优化计算模型。对于列车运行调整问题,其优化目标是获得满意的列车运行计划,各性能指标的满意度评价直接反映了调度员的优化意图。因此模型中将各性能指标,包括目标函数及约束条件,概括地都以满意度函数表示^[15,17]。我们关于单线列车满意优化模型的研究工作,取得了较理想的效果^[17]。

3 铁路列车调度员培训仿真系统

铁路运输业的发展历史悠久,形成了系统的实践性很强的行车组织理论。长期以来,我国铁路领域对列车调度员的培训没有一套成形的模式,一个调度员需要经过几年时间的培训才能逐步参与实际工作。列车调度员技能的培训需要实践环节的配合,然而,为了保证铁路行车安全,铁路运输生产部门难以为学生或员工提供直接参与实际运作的实习条件,车站相关教育部门在对列车调度员进行培训时也苦于没有好的教学系统,导致理论学习与实践脱节。滞后的铁路列车调度员技能培训手段,直接影响了铁路行车工作组织相关人员的培养^[18]。

针对这一问题,西南交通大学峨眉校区交通运输系研究开发了铁路列车调度员仿真系统。该系统运用仿真技术模拟铁路运输生产实际,进行仿真培训。利用该仿真系统,列车调度员可以根据班计划仿真绘制计划图;根据运行中出现的实际情况仿真实现 3~4 小时运行调整计划;向车站值班员下达各站列车到发、交会、运行计划;车站值班员可以向列车调度员报点(报告列车到、发、通过车站时刻);并且该仿真系统还可以实时仿真列车运行及各站接发列车情况。该铁路列车调度培训仿真系统为列车调度员的培训提供了不同环境、不同条件下的列车调度员技能培训平台,列车调度员通过该系统可以进行列车调度、接发列车等作业培训。列车调度员培训仿真系统的系统结构如图 3 所示。

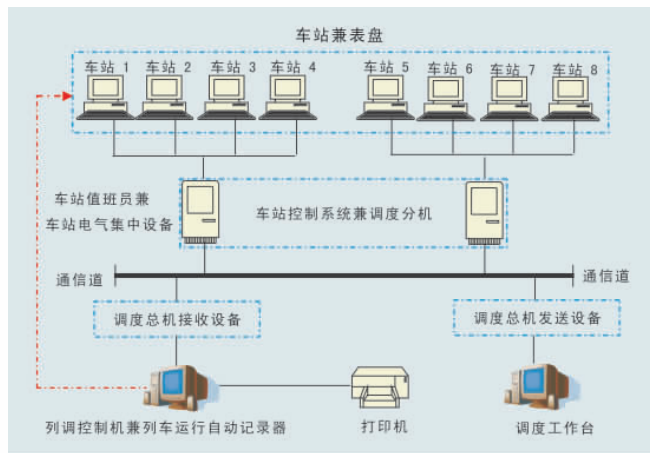


图 3 铁路列车调度员技能培训系统的结构

Fig. 3 Structure of the simulation system for training railway dispatchers

系统配置 8 台显示终端、2 台主机、2 台计算机和 1 台打印机,采用局域网技术互联,实现对分局列车调度员调度监督和调度集中两种工作环境的模拟。调度监督环境下,8 台显示器用于模拟 8 个车站、7 个区间,作为调度监督屏,并实时刷新相关数据;2 台主机各连接 4 台显示器,作为车站控制系统,模拟车站值班员;1 台

计算机用于列调控制机,提供数据库平台和行车调度子系统;打印机作为列车运行实绩图的输出设备。调度集中环境下,8 台显示器作为车站表示盘;2 台主机模拟调度分机,表示车站电气集中设备;1 台计算机用于列调控制机兼列车运行自动记录器;1 台计算机作为调度操纵台;在列调控制机与调度分机之间,用线路模拟调度总机发送/接收设备;打印机作为列车运行实绩图的输出设备。

列车运行调整优化辅助教学系统的引用,为运行调整实践教学提供了一个有效逼真的仿真平台,有效地衔接了理论知识和实践内容,很好地解决了运行调度教学资源不足的问题,是仿真技术在列车运行调整方面的一个很好的应用案例。

4 结论

我国铁路运输的列车行车密度大、行车速度在不断提高、线路通过能力紧张,目前采用的手工作业进行的列车运行调整方式已不能适应铁路运输调度指挥现代化的需要。仿真技术作为先进的研究方法和技术手段,已在列车运行调整的研究中获得了卓有成效的广泛应用。其中,列车运行调整智能化决策支持系统作为列车运行智能调度指挥系统的关键技术之一,是铁路运输自动化的研究热点。列车运行调整智能化决策支持系统的研究中,列车运行调整的优化模型与算法是其中的核心问题。根据列车运行调整优化问题的特点,应用满意优化原理建立列车运行调整的满意优化模型,取得了较好的效果^[17,19]。在列车运行调整问题的研究中也充分体现了仿真技术这一先进技术手段的重要作用。运用仿真技术研究开发的铁路调度员培训仿真系统,为突破我国铁路列车调度员技能培训理论学习与实践训练脱节的困难局面探索了一条有效途径。

列车运行调整问题,既是一个具有实时性要求的复杂的实际决策问题,又是一个 NP 难解的组合优化问题。对列车运行调整问题的研究,既有重要的理论意义更具有重要的实际应用价值。这一十分复杂的优化问题提出的具有挑战性的研究课题,还有待于我们综合应用现代信息处理技术去进行进一步的探索。列车运行调整满意优化模型和智能化决策系统研究成果,与铁路列车调度员培训仿真系统的结合,以及调度员培训仿真系统培训效果的评估等,也是值得关注的进一步的研究问题。

参考文献 (References)

- [1] AVERILL M L, KELTON W D. Simulation modeling and analysis [M]. 3rd ed. Beijing: Tsinghua University Press,

- 2000.
- [2] 叶阳东, 贾利民. 基于对象 Petri 网的列车运行模型及仿真[J]. 系统仿真学报, 2002, 14(2): 132-139.
YE Yangdong, JIA Liming. Model and simulation of train operation Petri net with objects [J]. Journal of System Simulation, 2002, 14(2): 132-139.
- [3] 张勇, 赵明, 汪希时. 基于移动自动闭塞条件的列车运行仿真系统[J]. 系统仿真学报, 1999, 11(3): 198-204.
ZHANG Yong, ZHAO Ming, WANG Xishi. Research on a train operation simulation system under moving automatic block conditions [J]. Journal of System Simulation, 1999, 11(3): 198-204.
- [4] 刘海东, 毛保华, 何天健, 等. 不同闭塞方式下城轨列车追踪运行过程及其仿真系统的研究[J]. 铁道学报, 2005, 27(2): 120-125.
LIU Haidong, MAO Baohua, HE Tianjian, *et al.* Study on tracking operations between trains of different block modes and simulation system [J]. Journal of the China Railway Society, 2005, 27(2): 120-125.
- [5] 丁国富, 张卫华, 刘伯兴, 等. 列车运行动态仿真研究[J]. 系统仿真学报, 2004, 16(8): 1697-1700.
DING Guofu, ZHANG Weihua, LIU Boxing, *et al.* Study on dynamical simulation of running locomotive [J]. Journal of System Simulation, 2004, 16(8): 1697-1700.
- [6] 乐逸祥, 周磊山. 通用铁路大站技术作业仿真模型和方法的研究[J]. 系统仿真学报, 2003, 15(12): 1787-1795.
YUE Yixiang, ZHOU Leishan. Research on general simulation model and method for railway station technological operations[J]. Journal of System Simulation, 2003, 15(12): 1787-1795.
- [7] 程瑞琪, 蒋兆远, 高溥. 列车运行监控联机仿真系统研究[J]. 铁道学报, 2004, 26(2): 42-46.
CHENG Ruiqi, JIANG Zhaoyuan, GAO Pu. Research on the simulation system for train movement monitoring[J]. Journal of the China Railway Society, 2004, 26(2): 42-46.
- [8] 彭其渊, 杨明伦, 聂勋煌. 单线区段实用货物列车运行图的优化模型及算法[J]. 铁道学报, 1995, 17(3): 15-20.
PENG Qiyuan, YANG Minglun. Optimization model and its algorithm making wagon diagram on single track lines[J]. Journal of the China Railway Society, 1995, 17(3): 15-20.
- [9] 程宇, 秦作睿. 列车运行调整专家系统的研究[J]. 铁道学报, 1992, 14(2): 43-51.
CHEN Yu, QING Zuerui. Research on the expert system for the adjustment of the train diagram [J]. Journal of the China Railway Society, 1992, 14(2): 43-51.
- [10] KOMAYA K. A knowledge based approach railway scheduling[C]//Proceedings of IEEE Conference on Artificial Intelligence for Applications. Piscataway: IEEE Press, 1991: 404-411.
- [11] 张莉艳, 李平, 贾利民, 等. 在移动闭塞条件下列车运行调整的仿真研究[J]. 系统仿真学报, 2004, 16(10): 2257-2263.
ZHANG Liyan, LI Ping, JIA Liming, *et al.* Study on simulation for train operation adjustment under moving block [J]. Journal of System Simulation, 2004, 16(10): 2257-2263.
- [12] 李平. 面向对象遗传算法及其在铁路行车指挥中的应用[D]. 铁道部科学研究院, 2001.
LI Ping. Object-oriented genetic algorithm with application to railway traffic control [D]. Beijing: China Academy of Railway Sciences, 2001.
- [13] 曹家明. 单线铁路列车运行调整优化模型及算法[J]. 铁道学报, 1994, 16(3): 72-80.
CAO Jiaming. The optimization model and its algorithm adjusting train diagram on single track rail lines[J]. Journal of the China Railway Society, 1994, 16(3): 72-80.
- [14] TAYLOR M A P. Knowledge-based Systems for transport network analysis: A fifth generation perspective on transport network problems [J]. Transportation Research (Part A), 1990, 24(1): 3-14.
- [15] 金伟东. 满意优化问题与列车操纵优化方法的研究[D]. 成都: 西南交通大学, 1998.
JIN Weidong. Study on satisfactory optimization and train operation optimization method[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 1998.
- [16] RITCHIE S G. A Knowledge-based decision support architecture for advanced traffic management [J]. Transportation Research (Part A), 1990, 24(1): 27-37.
- [17] ZHANG Youshi, JIN Weidong. Study on the delay restoration of single-track railway rescheduling[J]. Journal of Southwest Jiaotong University (English ed), 2006, 14(2): 105-112.
- [18] 张殿业, 陈刚, 高四维, 等. 铁路运行——列车调度仿真系统[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2003.
ZHANG Dianye, CHEN Gang, GAO Siwei, *et al.* Rail transport: Train dispatch simulation system [M]. Beijing: China Railway Publishing House, 2003.
- [19] 程彦茹. ITS 指挥系统的满意优化理论及列车运行调整研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2003.
CHEN Yanru. Study on satisfactory optimization of ITS dispatch management system and adjusting train diagram[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2003.

(责任编辑 赵佳)

勘 误

本刊 2007 年第 10 期封二刊登的“中国科学院国家天文台兴隆观测基地”文字介绍中的倒数第 4 行“…研究生惊醒天文观测实习…”为“研究生进行天文观测实习…”之误, 特此更正。在此, 编辑部向广大读者及中国科学院国家天文台兴隆观测基地表示歉意。在今后工作中我们应更加细致、认真, 努力杜绝这类错误的发生。