

# 铁路运输模拟系统的现状与发展

杨肇夏<sup>1</sup>, 毛保华<sup>1</sup>, 何天健<sup>2</sup>

(1. 北方交通大学 交通运输学院, 北京 100044; 2. 香港理工大学电机工程系, 香港)

**摘要:** 回顾了铁路运输系统模拟的发展现状和发展趋势, 简要分析并评述了几个国外常用的铁路仿真系统的特点、主要功能和应用领域, 探讨了铁路模拟研究中常用的模糊集理论与多智能体技术. 并从我国铁路运输的实践出发, 分析了铁路模拟器的基本结构和一些关键技术及其在铁路运输研究中的应用, 包括加强基础数据收集、注重专业知识与计算机技巧的集成、加强可持续模拟框架的论证、注意软件测试以及模拟系统在实际应用过程中的技术积累等问题.

**关键词:** 运营管理; 系统模拟; 多智能体技术; 铁路运输

中图分类号: U29; TP391.9 文献标识码: A

## Situation and Development of Railway Transportation System Simulators

YANG Zhao-xia<sup>1</sup>, MAO Bao-hua<sup>1</sup>, HE Tian-jian<sup>2</sup>

(1. School of Traffic and Transportation, Northern Jiaotong University, Beijing 100044, China;

2. Hong Kong Polytechnic University, Hong Kong)

**Abstract:** Reviewing the state-of-the-art and the trend of railway transport system simulation, this paper simply introduces the characteristics and analyzes their functions of several international railway simulators as well as their application areas. It also discusses the structure of a general railway simulator and reviews the methodology, such as fuzzy set theory, multi-agent system and agent-oriented technology in developing such simulators. Based on the practices of Chinese railway simulation researches, the paper advances the key points with their applications to develop a railway simulator from the viewpoint of technical aspect, including traffic data collection, better integration of professional knowledge and computer skills, sustainable framework of simulator, improving documentation and software validation, and more accumulation of technical content.

**Key words:** operational management; system simulation; multi-agent system; railway transport

早期的仿真技术主要应用于其它解析性定量方法难以奏效的领域<sup>[1]</sup>. 过去30年来, 随着计算机软硬件技术的发展, 数字计算机模拟在铁路规划、设计与管理领域得到了广泛应用.

国际上, 较早采用计算机模拟方法研究铁路运输问题的成果有: 20世纪70年代美国联邦铁路局与Peat, Marwick & Mitchell, Co. (PMM & CO)公司签约对线路能力与各种影响因素之间的统计关系的研究; Mellitt等人对快速铁路运输系统运营及供电系统的研究<sup>[2]</sup>; Mellitt与Goodman等人对伦敦Jubilee地铁线路节能问题的模拟研究<sup>[3]</sup>; Cury等人研究了地下铁路系统时刻表的编制及优化问题<sup>[4]</sup>; Cremonini等人研究了列车自动防护系统的模拟问题<sup>[5]</sup>; Booch曾将面向目标的规划方法应用于开发一个大型铁路网络的管理系统<sup>[6]</sup>, 功能包括列车径路选择、系统运行监督、交通规划、线路定位、碰撞避免、失效预测及设

备维护等方面,该系统涉及到4个子问题:通讯技术、线路诱导、车辆检测和设备实时控制;Okuda等人研究建立了西日本铁路干线列车间隔评价模拟系统<sup>[7]</sup>;1995年,加拿大国家铁路公司在Corporate Strategies, Inc., (CSI)的帮助下,开发了铁路分析与交互线路模拟(RAILS<sup>TM</sup>, Railway Analysis and Interactive Line Simulator)系统,研制了一个评价线路能力理论能力与实际能力的模拟工具,经过数百次运行,建立了设备与列车特性、信号等因素之间的统计关系。

我国从20世纪80年代开始致力于铁路运输系统的模拟研究,初期的研究主要应用在铁路编组站及列车运行过程计算。1993年,北方交通大学<sup>[8]</sup>研究推出了可用于教学培训的铁路列车接发系统,并在1997年完成了产品化。1997年,香港理工大学与北方交通大学<sup>[9~11]</sup>共同致力于基于列车牵引计算的通用列车运行过程模拟系统,并在1999年开始应用于轨道交通系统的设计工作。

一般说来,仿真研究可以解决的主要问题包括<sup>[1]</sup>:①系统建成以后能否达到预期目标;②什么是最好的工程建设计划和运营计划;③系统投资及运营费用是否节省;④系统的效益分布在哪些部门。

从运营角度来看,铁路模拟的主要目标是给经营管理者提供一个更好地理解系统成本和运输能力的工具,辅助系统决策。

在过去,模拟方法被视为一种既费时、又费钱的过程,所用模型需要反复论证,基础数据又缺乏,输入参数质量不高,输出结果也难以保证。目前,铁路运营模拟目前已经被证实是有力的分析工具,并正在得到越来越多的采用<sup>[12~18]</sup>。

现代运输系统模拟是研究运用现代计算机技术再现实际交通系统的特性、分析交通系统在各种设定条件下的可能行为,以寻求现实交通问题最优解的一种手段,也是评价运输设施各类运用设计方案效果的有效方法。

总之,铁路模拟系统可以辅助铁路运营计划,加快铁路运输过程组织的现代化。模拟技术可以保证更准确地分析与评价新的铁路项目的效果,以及线路、机车车辆、列车服务及时刻表的改造效果。

## 1 国外铁路模拟系统简介

(1)VISION 系统<sup>[19]</sup>。VISION 是英国AEA铁路技术公司开发的铁路模拟软件,可在PC机上WindowsNT环境下运行。VISION的功能包括:①模拟简单或复杂路网上线列车、信号系统及基础设施之间的相互作用的效果;②研究铁路运输系统在各种假设条件下(即“如果一则”)的效果;③不同区域的分析。

VISION模拟系统可以快速、高效地分析列车间隔和线路能力,包括:①验证新项目的可行性;②对多设计方案进行论证以寻求最优解;③保证系统能够满足各种运营要求。

(2)LOGSIM 系统。LOGSIM 是美国开发的一个模拟系统。该系统已经在波士顿到纽约、纽约到华盛顿等线路的运营管理研究中被成功地应用于研究时刻表、列车运行实时调度等方面的问题。

该系统与TPC(Train Performance Calculator)系统结合,可以进行如下研究:①评价既有运输通道和枢纽中采取如下措施后列车运行的效果,包括增加新的列车服务种类、增加更高速度的列车、在既有速度服务水平下增加列车数量;②确定和检验设备改善的效率,包括侧线位置的确定、附加股道的确定、联锁设备的设置或改进以及信号设备改善等;③评价新时刻表的可行性。

该系统在以下两方面可以辅助决策:①采用同一逻辑的多列车运行过程时的调度决策;②发生随机延误时系统的应变能力。

(3)RAILSIM 与TPC系统<sup>[20]</sup>。RAILSIM 是北美铁路常用的一套铁路模拟软件。它以TPC为基础,可以精确地模拟任何铁路系统中的任何列车的运行。包括:①庞大的各类机车车辆参数库,有340余种北美机车模型,180余种世界机车模型,120种北美客车,70余种世界客车,70余种北美货车,110余种世界货车,210种北美快速轨道与轻型轨道车辆,400余种欧洲快速轨道与轻型轨道车辆(如Adtranz, Alston, Bombardier, Siemens等公司的车辆),50余种北美干线多单元动车(MU),280余种世界多单元动车;②支持自定义列车牵引力和阻力模型;③提供了多种列车运行计算模型;④高精度的列车运行模型;⑤支持复杂的列车制动算法;⑥用户界面友好;⑦提供各类输出报表。

TPC提供了如下阻力方程:①基本Davis方程,适合功率大的通勤铁路,该模型阻力大于其他方程;②美国铁路协会模型(AAR),采用Davis模型的形式,但计算结果通常略小,比较适合现代北美铁路货车(总



率、重量、长度、风力与各种阻力等。这一层次是最基本的层次,比较有名的软件如 TPC 等。

(2)列车属性模块.线路与连接设备(如交叉口)的物理布局所决定的列车运行过程分析;由于列车具有一定长度,许多设备具有联锁特性,故该方面的处理比较麻烦。

(3)列车运行环境模块.包括各类交通控制信号系统下的列车运行过程;列车在干线的运行及其与车站运营过程的协调研究。

(4)列车运行与设备运用计划模块.提供各列车运行的时刻表、列车运行的偏好路径、必须的停靠站的定义,机车车辆及乘务组周转表定义。

(5)铁路运输模拟结果分析模型.在模拟系统对用户定义的铁路运输模拟完毕后,需要有专门的模块来对模拟结果进行分析、显示和输出。

在模拟过程开始以前,还需要对每一次模拟的计算条件进行设计和定义<sup>[23]</sup>。

按结构划分的铁路运输模拟模型的一般结构如图 2 所示。

运输计划包括列车所采用的各项基础设施的详细计划,它也是列车时刻表的扩展。

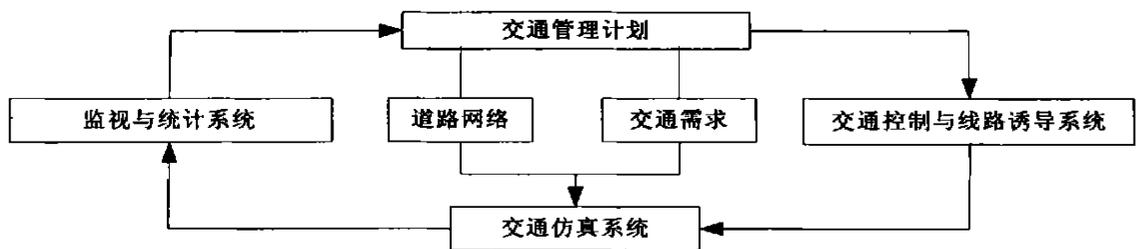


图 2 铁路运输模拟模型的结构

## 2.2 按应用领域分类

模拟模型划分的另一个方法是从应用角度出发将铁路模拟模型分为以下几种<sup>[24]</sup>。

(1)战略决策模拟模型.主要研究在不降低安全性能条件下铁路服务的最有效设计、资产的最有效利用以及费用控制策略。

(2)基于资源的模拟.包括机车模型、车辆模型及线路维护模型。

(3)列车运营模拟.该领域内的模拟主要集中在获得量化的线路/列车动力学数据,模拟考虑的条件包括线路与列车条件.列车运营模拟的典型用途是研究最小运营时间标准,评价区域列车速度与投资之间的关系,预测燃料消耗并检查与信号系统容量相关的制动距离.其结果可以作为列车的经济性设计、机车车辆设备的选型、运行安全论证等。

(4)干线与枢纽能力模拟.该类模拟重点研究不同条件下轨道网络的运营行为,分析线路能力.线路模拟中需要考虑网络上各车站站线配置、复线状况、信号参数等.模拟结果可以确定网络运输能力及各列车运行延误.它在研究列车运行调整、评价瓶颈地段能力时特别有用。

(5)交通/服务模拟.包括重、空车路径选择、运输服务与费用优化策略研究等。

(6)铁路交叉口及干扰模拟.研究铁路受其他方式干扰的后果,寻找最佳抗干扰途径。

(7)最低效益与风险分析.从复杂的铁路运营中搞清楚底线效益,以便在实施前充分评价、规划和优化设备配置.这类模拟通常用于判断项目投资效果,确定网络设备的增删,评估部分设施的可合并性。

## 2.3 常用的模拟模型

在铁路运营管理过程中,常用的铁路运营模拟模型有以下 4 类。

(1)线路搜索模型.线路搜索模型是以网络上空余/可用时间/路段概念为基础的.列车按照优先级从高到低在网络上搜索可行路径.低级别的列车只能在高等级列车未被占用的时间与空间上运行.这种模型在级别不多、能力约束不严重、也没有特别的限制的情况下运行很好。

线路搜索模型一般不适合调度模拟,调度模拟中列车等级较多,相互作用较大.线路搜索模型在随机因素较多、能力接近满负荷的场合也不太适用,这些模型运行时间长,建立也不容易。

(2)优化模型.优化模型可以是事件驱动的,也可以不是.它们依靠复杂的数学算法来开发运营计划,使运行行为最佳化。

列车运行模拟的逻辑主要有以下几种: ①基于优先级的顺序排列模型. 按照列车优先级将每一列车长度全部插入, 目前还没有证明该方法在任何条件下均可靠, 但它比较简单, 速度快, 结果有较强的可预见性. ②经验延误应用. 不需要详细的列车运行监督系统, 该模型根据各列车产生的不利事件的数量和性质生成一个相应的延误值. 例如, 一列车每遭遇一列更低等级的列车, 将赋予 3 min 的延误, 每遭遇一列更高等级的列车, 将赋予 5 min 的延误, 每更换一次股道, 将产生 30 s 的延误等. 该方法的结果只能提供近似结果. ③参数模型. 该方法按照大量关键信息来描述运营特性、股道布局与交通流量, 这些关键信息包括速度、会让/越行点、不同级别列车的数量、单线与复线的比例等. 该方法的结果可以提供对能力的初步评估. ④基于事件表的优化算法模型<sup>[29]</sup>. 该方法是基于事件的, 它速度快, 采用周知的优化算法, 包括调度员想采用的列车优化运行算法, 并可以描述列车的每一移动过程. ⑤基于事件的布尔逻辑模型. 该方法与前类似, 采用用户提供的运营规则和基于经验的决策与推理模型.

(3) 计算机辅助调度模型. 计算机辅助调度模型需要用户事先对列车运行线路和调度决策进行描述. 在列车运营与控制系统中, 调度员应在出现非预期干扰情况下将干扰对时刻表的影响减少到最低, 以保证实现与时刻表相一致的最优列车运行行为. 这些干扰包括可以分为 3 类<sup>[26]</sup>: 一是计划失误造成的间隔或运行时间计算不准问题; 二是技术原因引起的发动机故障、信号故障、线路封闭等问题; 三是由于组织问题引起的问题, 如员工缺席或迟到, 紧急需求处理等.

这些干扰可能引起的冲突包括: ①旅客接续冲突; ②列车与乘务组周转冲突; ③区间线路冲突; ④运行延误, 通常伴随以上现象同时出现.

调度员可能采取的措施包括: ①增加停站次数或延长停站时间; ②增加列车越行或交会次数; ③合并列车; ④增删列车.

许多基于真实事件的模拟模型已经可以做出与一名优秀调度员相媲美的决策.

(4) 基于事件的模拟模型. 基于事件的模拟模型是最早的模拟模型之一, 它们在处理列车数量多、距离长、运行时间长的微观模拟问题(如微观的每公里到宏观的点到点等)时差异很大.

现代条件下, 模拟软件包的应用应当是直观、可交互的, 用户可以任意地加载调度逻辑. 单一的模拟系统必须要考虑不同的运营状态, 结果既可提供宏观层次的服务, 也可提供微观效率. 对模拟模型可信度的最有力检验来自对另一种已知的、验证过的线路或网络的历史行为进行良好的标定, 而其行为离基础案例并不遥远.

### 3 铁路系统模拟研究的技术关键及发展趋势

#### 3.1 模拟过程设计的技术关键

对铁路系统运营模拟来说, 一般模拟研究的主要关键点包括: ①定义模拟研究的目标; ②获得模拟所需要的准确而完备的数据; ③可能时采用真实的运营数据来标定基础案例数据; ④对基础案例进行调查(既有运营); ⑤定义要评价的方案; ⑥将行为数据表示为对服务、能力和经济性相关的指标.

#### 3.2 模拟方法的技术关键

交通控制是铁路运输系统的核心. 铁路运输模拟的成功与否很大程度上取决于是否采用了恰当的交通控制方法<sup>[27]</sup>. 交通控制的中心目标是减少延误, 要做到这一点, 就要处理好列车之间的接续, 制订科学合理的机车车辆与乘务组周转计划.

列车交通控制的两种主要方法是:

(1) 为了在资源最优利用范畴内优化列车运行系统, 交通规划中使用了越来越复杂的数学方法与模型. 实际上, 长期的铁路规划与短期的交通控制有一个类似的问题结构<sup>[29]</sup>, 因此, 希望在短期问题如交通控制中利用这些方法是很自然的. 从规划中将方法转换过来的困难在于可以用来计算的时间资源太有限, 规划中开发的多数算法是非常费时的, 在交通控制问题时难以给出即时答案. 因此, 启发式算法得到使用和推行, 这些方法并非为了取代原有算法, 而是为了大幅度减少它们的求解范围.

(2) 为进一步改善交通安全、质量和效益, 列车、线路和信号控制的多数函数是自动的. 这些发展在交通运营和控制中同样可以使用. 不过, 这样做的难度更大, 因为在运营层次上技术与组织过程的规范性较差, 计算机辅助交通分析以及冲突解决建议的计算机辅助开发可以提供这类支持.

在解决交通规划与控制问题时有许多方法,目前国际上最主要的分支有两种:①算法优化方法,从数学、经典计算机科学和运筹学演化而来,可以求出目标函数对应的全局最优解;②启发式算法,试图尽快找出好的(不一定是最优的)解,一般采用 AI 方法及专家知识法。

算法优化方法在实时应用方面的例子有:①Zwaneveld 等人 1996 年研制的列车在各铁路车站通过的径路选择决策支持系统;②Nachtigall 1996 年研究的单线列车时刻表系统;③Fernandez 等人 1996 年研究解决了地铁线路的最优管制问题。

从运筹学中演化而来的多数优化方法具有 NP 完全性,一般难以在实际中应用<sup>[28]</sup>。启发式算法包含了调度专家的知识,可以直接得到调度决策解。目前开发的调度支持系统有:①Komaya 与 Fukuda 在 1989 年研制的列车运行控制专家系统 EST RAC-III;②Moirano 等人在 1989 年研制的地下铁路交通控制专家系统 PETRUS;③Adamski 在 1993 年研制的公共交通控制专家系统;④Schafer 与 Pferdmenges 在 1994 年研制的列车实时调度专家系统。

上述两种方法并不是互相排斥的,在实际研究中可以结合采用。实践表明,在调度专家系统中通过利用有经验的调度人员知识,可以改善交通质量,降低运营费用。

多数铁路模拟模型将重点放在列车动力学、铁路线路模型、信号系统的复杂特性等方面。当网络效应起主导作用时,这些模型难以提供准确结果<sup>[27]</sup>。

### 3.3 模拟技术的发展趋势

(1)模糊集理论。铁路运输系统中存在许多不确定因素,处理这些不确定性的一种方法是模糊集理论,参见“道路交通仿真技术与系统综述”一文,这里不再赘述。

(2)智能体技术。近年在铁路系统模拟领域研究较多的技术之一是多智能体技术<sup>[29~31]</sup>。智能体是基于分布式系统和目标技术,它们可以同时共享分布式系统的资源,但每一智能体本身具有更高的自动性;这种自动性决定于“预定目标”、“可用资源”及“可用方法”。在多智能体系统中,子系统之间不再通过中央智能体来协调,而是由活动本身来自行协调。

面向智能体的技术(AOT)可以被认为是分布式系统技术和面向目标系统技术的进一步发展,它在微观模拟领域可以较大幅度地改善既有技术。

智能体技术起源于多目标技术,它继承了以下几方面的特点:①模式化,复杂系统的数据与方法被分布到不同部分,目标间的界面被极小化;②绝缘化,内部数据对外部来说是不可视的,只能通过定义好的界面来接近;③类结构,相似目标被并入各类中。

一般来说,一个智能体不仅包括一个数据集,还包括这些数据的操作与运用方法以及与环境(即其他智能体)通讯的方法。多智能体系统由数个能互相通讯的智能体组成。

智能体技术可借助于意图与行为来扩展到目标定位思想。这里的意图可分为战略意图和战术意图,后者服务于前者并能确定某智能体的具体行动。行为的序列与智能体环境的状态可确定智能体的行为。

某种程度上,智能体可以被认为是一些小的专家系统,其行为由意图决定,这些意图通常体现为规则的形式。专家系统之间可以互相交流,并通过“传感器”与“实施器”与环境交流。另一方面,智能体的自动性对智能体本身来说意味着自由,这种自由需要具有智能。因此,智能体本身应当具备以下条件:①可以从环境中获取信息;②解释或理解所获得的信息;③从意图中解释出需要采取的行为;④根据环境状况确定采取的行动;⑤可以探讨各种行动是否成功以及目标实现的程度;⑥采取相应的战术意图及行动。

智能体技术比较适用的领域为:①需要解决的问题是按功能或按地区分布到各子系统的;②子系统之间的沟通非常频繁;③目标(环境)是动态变化的。

智能体技术应用的优点包括:①通过自然分解和分别分解使系统的复杂性降低;②可以同时处理多类不同需求,包括耽搁的、短期的需求;③子系统更强壮,更容易适应环境的变化。例如,当战略意图或目标函数不同时,智能体(如列车、线路、信号系统等)之间就会发生冲突,这些冲突的协调通过智能体之间的谈判来解决。

一般认为:多智能体系统(MAS, Multi-agent system)是人工智能研究的一个子领域<sup>[30]</sup>。MAS 的主要思想是对复杂问题,通过将它们分解为自动问题求解器来产生一个近似解,这些智能体本身可以有能力强解决局部问题,在此基础上将这些智能体通过一个通讯环境集成后,它们可以通过协调求出整个问题的一个

近似解. 多智能系统在铁路运输中的应用案例是列车编组与摘挂系统(TCS)<sup>[29]</sup>.

铁路运输调度系统是一个典型的多智能体系统. 站段、分局、路局三级负责列车的日常运输组织工作. 当出现冲突时, 通过彼此的协调或者上级(直至铁道部调度)来协调. 整个过程主要是基于经验的, 协调的水平与调度员的性格、相互关系有很大关系.

我国铁路正在探讨网运分离改革, 网运分离将导致调度结构发生重大变化. 例如, 费用的计算不再单纯按线路建设费用来评价, 要考虑到供需市场, 即按需求市场来均分固定费用. 因此, 网运分离情况下更适合采用智能体结构来实施调度系统.

## 4 我国铁路运输系统模拟开发的要点

我国铁路运输系统的模拟研究有广泛的市场领域. 目前, 对我国铁路系统来说, 模拟研究的要点包括:

(1)关于模拟的基础数据. 多数发展中国家的基础交通数据统计不完备, 我国也不能例外. 不过, 经过80年代以来TMIS的建设, 关于铁路运输基础数据系统收集的框架已经大致建立, 需要进一步开展的研究是如何充分利用这些系统来积累所需要的数据.

(2)重视专业技术与计算机技术的有机结合. 在开发有效的研究型模拟系统之前, 要高度重视建模技术的研究. 经验表明, 对应用型软件系统来说, 编程实现问题在多数情况下不足以成为系统发展的瓶颈, 而关于系统设计与系统建模算法的研究是我国铁路模拟系统研究的薄弱环节.

(3)注意模拟系统的可持续发展. 一个好的模拟系统需要长期不懈的努力才能初步完成, 同时还需要更长时间的运行维护才能走向成熟和商业化, 做到真正服务于铁路运输生产规划、设计和管理. 为实现这一点, 一个持续稳定的专家及研发队伍是非常必要的.

(4)加强测试及软件文档工作. 我国的铁路模拟软件多数是以专业技术人员为主开发的, 在多数场合下缺乏专业软件人员的介入. 软件测试是软件发展中不可忽视的环节, 而文档则是软件维护中必不可少的组成部分, 也是系统发展的必备文件, 需要引起开发研制人员的充分重视.

(5)注重软件系统技术含量的积累. 软件投产后, 其间包含大量的数据与案例积累. 模拟软件的发展包括两部分: 一是功能扩充; 二是案例与数据的积累. 前人的经验要成为后人的知识, 这需要软件研发组在整个软件发展过程中的努力.

## 5 小结

在简要回顾铁路运输系统模拟研究进展的基础上, 证明铁路模拟的研究正随着计算机技术的发展而方兴未艾. 作为具有良好可持续性特点的运输方式, 铁路系统模拟研究不仅是铁路运输业发展的需要, 也是节省社会资源、优化运输系统设计和过程管理的必然. 我国铁路模拟系统的研究总体上仍处于小作坊开发阶段. 低层次的重复研究较多, 缺乏具有世界水准的国际化模拟系统. 这些方面的研究需要后人的不断努力.

### 参考文献:

- [1] Leilich R H. Application of Simulation Models in Capacity Constrained Rail Corridor [A]. Proceedings of the 1998 Winter Simulation Conference [C]. New Jersey: Piscataway, 1998. 1125-1133.
- [2] Mellitt B, Goodman C J, Arthurton R I M. Simulator for Studying Operational and Power-Supply Conditions in Rapid-Transit Railways [J]. Proc. IEE, 1978, 125(4): 298-303.
- [3] Mellitt B, Goodman C J, Arthurton R I M. Simulation Studies of Energy Saving with Chopper Control on the Jubilee Line [J]. Proc. IEE, 1978, 125(4): 304-310.
- [4] Cury J E, Gomide F A C, Mendes M J. A Methodology for Generation of Optimal Schedules for an Underground Railway System [J]. IEEE Trans. On Automatic Control, 1980, AC-25(2): 217-222.
- [5] Cremonini R, Lamma E, Mella P. A Simulator for Automatic Train Protection system [C]. Proc. Of Simulation V Conference, 1988. 295-299.
- [6] Booch G. Object Oriented Design with Applications [M]. CA: Benjamin/Cumming, 1991.
- [7] Okuda T, Takashige T, Watanabe I. Simulation System Evaluating the Train Headway on Heavy Traffic Lines [J]. Quarter-

- ly Report of Railway Transportation Research Institute, 1993, 34(2): 119—124.
- [ 8 ] 杨肇夏, 李菊, 孙晚华, 等. 铁路编组站技术作业模拟系统的研究[ J ]. 铁道学报, 1996, 18(增刊): 25—32.
- [ 9 ] Ho T K, Mao B H, Yang Z. A Multi-train Movement Simulator with Moving Block Signalling[ A ]. Proceedings of 6th International Conference on Computer Aided Design, Manufacture and Operation in the Railway and Other Advanced Mass Transit System[ C ]. WIT Press 1998. 783—792.
- [ 10 ] 毛保华, 何天健, 袁振洲, 等. 通用列车运行仿真系统研究[ J ]. 铁道学报, 2000, 22(1): 1—10.
- [ 11 ] Ho T K, Mao B H, Yuan Z Z, ed al. Computer Simulation and Modelling in Railway Applications[ J ]. Computer Physics Communications, 2002, 143: 1—10.
- [ 12 ] Mao B, Yang Z, Wang K C P. Statistical and Simulation-based Models for Progression Prediction of Train Delays on Busy Railway Lines[ A ]. Proceedings of the International Conference on Computing in Civil Engineerin[ C ]. Boston, ASCE, USA, 1998.
- [ 13 ] Goodman C J, Mellitt B, Rambukwella N B. CAE for the Electrical Design of Urban Rail Transit Systems[ A ]. Proceedings of International Conference COMPRAII[ C ]. 1978. 173—193.
- [ 14 ] Lesyna W R. Sizing Industrial Rail Car Fleets Using Discrete event Simulation[ A ]. Proceedings of the 1999 Winter Simulation Conference[ C ]. USA: Phoenix, 1999.
- [ 15 ] Ceric V. Visual Interactive Modeling and Simulation As a Decision support in Railway Transport Logistic Operations[ J ]. Mathematics and Computers in Simulation, 1997, 44: 251—261.
- [ 16 ] Ho T K. Optimal Control of Traffic Flow at a Conflict Area in Railway Network[ D ]. PhD Thesis, School of Electronic and Electrical Engineering, University of Birmingham, 1994.
- [ 17 ] Van Breusegem V, Campion G, Bastin G. Traffic Modelling and State Feedback Control for Metro Lines[ J ]. IEEE Trans. On Automatic Control, 1991, AC—36(7): 770—784.
- [ 18 ] 田长海, 梁洪忠, 黄民, 等. 列车动态模拟系统的研究[ J ]. 中国铁道科学, 1995, 16(1): 14—25.
- [ 19 ] VISION. Railway System Simaultion Software[ EB/OL ]. <http://www.aeat.co.uk/rail>. 2002.
- [ 20 ] STEP-BY-STEP Introduction to the Railsim TPC Using the Sample data[ EB/OL ]. <http://www.railsim.com/2002>.
- [ 21 ] RAILROAD AND TRANSIT SYSTEMS[ EB/OL ]. <http://www.orthstar.com/rail.htm>. 2002.
- [ 22 ] Hirao Y, Hasegawa Y. Development of a Universal Train Simulator(UTRAS) and Evaluation of Signaling Systems[ J ]. RTRI, 1995, 336(4): 180—185.
- [ 23 ] Goodman C, Siu L, Ho T. A Review of Simulation Models for Railway Systems[ A ]. ASPECT95[ C ]. London: UK, 1995.
- [ 24 ] Krueger H, et al. Simulation Within the Railroad Environment[ A ]. Joines et al eds. Proceedings of the 2000 Winter Simulation Conference[ C ]. 2000. 1191—1199.
- [ 25 ] Hill R, Bond L. Modelling Moving-block Railways Signaling Systems Using Discrete-event Simulation[ J ]. IEEE, 1995, 105—111.
- [ 26 ] Fay A. A Fuzzy Knowledge-based System for Railway Traffic Control[ J ]. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 2001, 13: 719—729.
- [ 27 ] Weits E A G. Simulation of Railway Traffic Control[ J ]. International Transactions in Operational Research, 1998, 5(6): 461—469.
- [ 28 ] Malavasi G, Ricci S. Simulation of Stochastic Elements in Railway Systems Using Self-learning Processes[ J ]. European Journal of Operational Research, 2001, 131: 262—272.
- [ 29 ] Bocker J, Lind J, Zirkler B. Using a Multi-agent Approach to Optimize the Train Coupling and Sharing System[ J ]. European Journal of Operational Research, 2001, 134: 242—252.
- [ 30 ] Burmeister B, Haddadi A, Matylis G. Application of Multi-agent Systems in Traffic and Transportation[ J ]. IEE Proc. Software Eng., 1997, 144(1): 51—60.
- [ 31 ] Fay A. Train Control by Multi-Agent Software Systems[ A ]. Seventh International Conf. on Computer Aided Design[ C ]. Manufacture and Operation in Railway and other Advanced Mass Transit System, 2000. 817—826.