

# Parallel Rail Transit System Based on ACP Approach

X.-S. Dong<sup>1</sup>, Gang Xiong<sup>1</sup>, Dong Fan<sup>1</sup>, Y.-S. Lv<sup>1</sup>, and X.-B. Sun<sup>2</sup>

<sup>1</sup>State Key Laboratory of Management and Control for Complex Systems, Institute of Automation, Chinese Academy of Science, Beijing, China (xisong.dong@ia.ac.cn, gang.xiong@ia.ac.cn, fanzixi@hotmail.com, yisheng.lv@ia.ac.cn)

<sup>2</sup>School of Electronics and Information Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing, China (xbsun@bjtu.edu.cn)

**Abstract**—This paper presents a novel parallel system for Rail Transit based on ACP approach (Artificial systems, Computational experiments, Parallel execution), which is proposed to address issues on safety, efficiency and reliability of their operation and optimization. Firstly, the construction of dynamic, overall and real Artificial Rail Transit Systems and their demonstration are provided. Then, based on these systems, the platform, content and analysis of computational experiments and comprehensive evaluation system are researched. Finally, parallel control and management of the actual systems via parallel execution can be achieved. By Parallel Rail Transit Systems, a set of recommendations and strategies of railway can be formed, which would improve the overall functionality of the rail transit system.

**Keywords**—Rail transit, ACP approach, parallel system, operation management, computational experiments

## 基于 ACP 方法的轨道交通平行系统

董西松<sup>1</sup> 熊刚<sup>1</sup> 范东<sup>1</sup> 吕宜生<sup>1</sup> 孙绪彬<sup>2</sup>

<sup>1</sup>中国科学院自动化研究所复杂系统管理与控制国家重点实验室, 北京, 中国

<sup>2</sup>北京交通大学电子信息工程学院, 北京, 中国

**摘要** 针对目前轨道交通中亟待解决的安全、高效、可靠运行等关键问题, 本文以复杂系统研究中的人工系统、计算实验和平行执行(ACP)方法, 对轨道交通平行系统体系进行研究: 给出了建立动态、整体、真实的城市轨道交通人工交通系统的构建方法、一致性验证方法和系统设计平台; 详细描述了轨道交通人工系统计算实验平台的设计方案及实验方案、内容及数据分析; 给出了综合评估体系; 最后, 通过平行执行对各种方案和应急计划进行综合评估与滚动优化, 制定合理的管理方案。通过轨道交通平行系统体系的研究, 可形成一套自下而上的轨道交通平行控制和管理方法, 提高轨道交通的安全运营与应急管理水平。

**关键词** 轨道交通, ACP 方法, 平行系统, 运营管理, 计算实验

### 1. 引言

轨道交通系统是一个复杂庞大的系统, 涉及到几乎所有工程学科, 以及经济、人口、资源、环境等社会科学学科<sup>[1]</sup>。轨道交通运营的安全、高效和应急管理, 始终是其研究重点, 有着重要的社会意义和经济意义。

然而, 到目前为止还没有一个公认的成熟理论与方法能够解决轨道交通系统的安全评估与应急处置。传统的评估方法主要评估局部系统的安全, 而没有考虑整个系统的安全性; 传统的应急处置方法大多是基于应急方案的实际演练, 成本太高, 可操作性不强。所以需要突破旧思路、

旧观念、旧方法, 利用新观点、新方法从系统的角度研究轨道交通问题。本项目拟采用复杂系统建模、管理、控制、评估的新方法——ACP 方法<sup>[2-4]</sup>, 研究轨道交通平行系统, 即: 建立轨道交通系统的人工系统, 在人工系统上可进行各类计算实验, 实现轨道交通的安全评估、应急培训与演练, 为轨道交通系统的规划、运营、优化、突发事件应急处置提供支持。

### 2. 轨道交通人工系统

ACP 方法, 包括人工系统 (Artificial Systems)、计算实验 (Computational Experiments) 和平行执行 (Parallel Execution) 三个部分<sup>[2-4]</sup>, 具体可以描述为: 综合考虑工程、社会、人为和环境等因素, 采用理论建模、经验建模和数

据建模有机结合的方法，建立与实际系统“等价”的人工系统，解决实际系统难以进行传统建模的难题；在人工系统上通过计算实验或“试验”来认识实际系统各要素间正常和非正常状态下的演化规律和相互作用关系；通过二者的相互连接，对其行为进行对比和分析，研究对各自未来状况的“借鉴”和“预估”，相应地调节各自的控制与管理方式；最后利用计算实验所认识的规律实现平行执行：正常情况下，利用人工系统认识实际系统千变万化的演化规律，不断优化实际系统的控制目标和减少非正常情况的发生；非正常情况下，利用人工系统帮助找到让实际系统迅速恢复正常的应急控制方法，从而减少损失。

目前，ACP 方法体系基本成型，相关理论、技术正在丰富和完善中，ACP 方法已经先后成功应用到乙烯生产、城市道路交通、城市公共交通等方面，并正在应用到农业、军事、物流、经济、安全、管理等领域<sup>[5-10]</sup>。

基于 ACP 方法，将人工交通系统与实际交通系统相结合构成平行交通系统<sup>[4]</sup>。它可以用于：对正在运行的交通运营管理系统进行滚动式改进与优化；对实施的交通控制与管理措施通过计算实验进行评估；对交通系统管理者和用户进行“虚拟”培训，提高学习效率和操作可靠性；非正常情况下找到让实际系统迅速恢复正常的应急控制方法从而减少损失；等等。

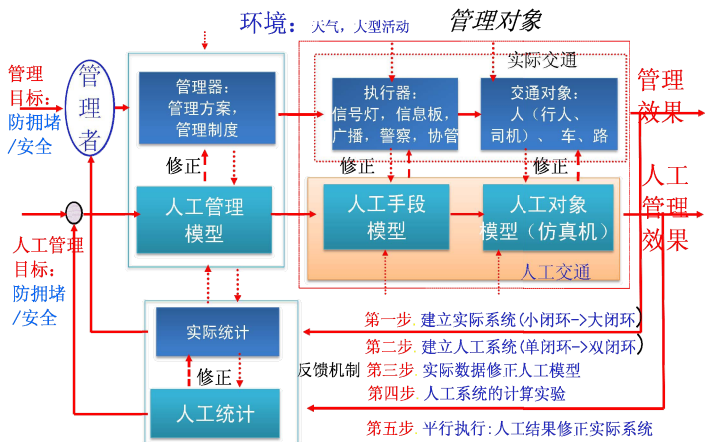


图 1 平行系统原理图

轨道交通平行系统，可以为研究人员提供一个可以自由、易用的研究实验平台，为工程人员提供一个决策支持平台。研究人员利用该平台，可以研究轨道交通中人、车、轨道、车站和环境等要素的建模新方法，包括基于代理技术的建模方法、基于数据的建模方法、基于专家经验的建模方法、集成建模方法等；研究轨道交通计算实验方法，包括滚动优化、应急处置方法等。工程人员利用该平台，可以进行轨道交通需求预测和规划、应急预案演练、应急

处置评估和应急培训。

轨道交通平行系统搭建了一个轨道交通平行控制和管理平台，可应用于轨道交通规划、建设、运营、应急管理等方面，为科研、教学和工程服务。具体包括：

- (1) 能够进行一个城市轨道交通枢纽车站及周边交通的安全换乘、应急平行系统的演示。内容包括：城市轨道不同线路之间的换乘；不同交通工具（自行车、行人、公共交通、BRT、出租车、火车站、私家车）和城市轨道之间的换乘；城市轨道线路和周边公交的协同优化；车站发生火灾、爆炸等安全事件的人员疏散等应急管理方案的评估、优化及 3D 演示；安全应急培训与演练；
- (2) 能够进行一条城市轨道线路平行系统的计算实验。内容包括：线路客流预测、线路的运营优化、线路应急方案评估、线路承载能力评估、线路的安全可靠性评估、安全应急培训与演练；
- (3) 能够进行城市轨道交通网平行系统的计算实验。内容包括：自动闭塞和人工闭塞之间的切换；各种闭塞模式的切换；线网应急方案评估；安全应急培训与演练；全线路综合运营演练。

BRT 平行系统，主要包括人工轨道交通系统及其计算实验平台、综合评估系统和平行执行平台等部分。

## 2.1 轨道交通人工系统

采用中国科学院自动化研究所研制开发的人工交通系统的内核（Transworld）为基础，添加轨道交通的相关要素，开发人工轨道交通系统，并通过计算实验平台、综合评估系统和平行执行平台，与实际系统共同构建轨道交通平行系统。

通过对实际轨道交通系统的分析，基于 Agent 进行轨道交通人工系统的建模，并对其可信度进行验证。人工轨道交通的建立不以逼近实际轨道交通系统作为建模的唯一衡量标准，把人工系统模型视为实际系统可能演变的形式之一。如轨道交通系统对于突发事件不可预测性其危害与影响更无法精确描述；针对不同的突发事件，一个方案的可行性并不能保证适用于全部情况，同样也不能预见事件发展的某个阶段也完全适用。在轨道交通人工系统中通过构建合理的场景库、数据库等以适用各类事件的发生。

根据功能与服务架构，轨道交通平行控制和管理系统可以划分为基础设施层、逻辑关系层、运行层、业务应用层四个层次。

轨道交通人工系统根据 Agent 自主性、社会性、学习性、反应性、主动性和移动性等特征，在复杂轨道交通环

境的建模分析中基于 Agent 方法进行轨道交通人工系统的建模, 建成与轨道交通复杂的实际系统相对应的人工系统, 用于平行控制和管理。

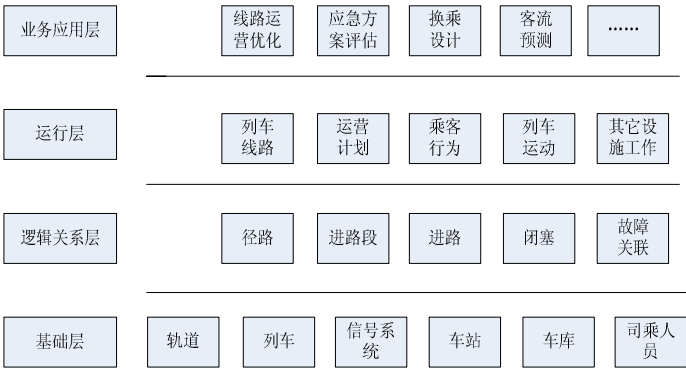


图2 轨道交通人工系统总体框架

2.1.1 基于 Agent 的人工系统建模

城市轨道交通人工交通系统的建模, 遵循简单的一致原则, 不以逼近实际系统为唯一目的, 不会受到精确数学模型的限制, 只需系统功能和行为的“等价”。城市轨道交通人工交通系统综合考虑人员、设备和环境等多方面因素, 分为七个模块。每个模块根据研究目标的要求可细分为更小的组件, 由这些不同的组件和模块在其对应的规则和环境下, 由下而上的自主涌现出实际轨道交通系统的行为。基于各组件和模块需具备自主性、交互性、学习与自适应等能力的要求, Agent 方法与编程技术成为建模手段的首选。

- (1) **轨道交通系统组成部件:** 车辆单元、线路单元、车站单元、行车调度单元等;
- (2) **客运服务系统:** 车站枢纽、自动售检票系统以及导向标识系统等。
- (3) **检修保障系统:** 环境监测系统、通风空调系统、火灾防控系统、给排水系统以及安全防护系统等。
- (4) **运行环境:** 行车地下环境、行车地上环境和站点周边环境等
- (5) **人员:** 乘客、客服人员、调度人员、司机等。
- (6) **社会环境:** 社会活动、经济、物流、政策规划等。
- (7) **数据规则库:** 相关历史数据、操作规则和专家经验等信息, 代理、环境自身以及相互之间作用影响的准则或方法等。

依照以上分类构建轨道交通人工系统的整体模型, 每个 Agent 在各自的运行环境下, 遵循相应的标准和规则制度, 不仅可再现实际系统发生过的事件, 还可以“生长培育”出实际系统有可能会发生的行为和状况。系统规模、

控制方式、行为方式和系统特性等与实际系统具有“近似一致性”, 而此正是决定整个平行控制过程控制效果的关键因素。因此建好人工系统各个 Agent 之后, 必须对轨道交通人工系统与实际系统的近似一致性进行可信度验证。

2.1.2 可信度验证

为了确保所建的轨道交通人工系统与实际系统在整体行为上保持一致, 模型等价的可信度验证是十分必要的。根据数据的来源不同, 城市轨道交通人工交通系统可信度验证分为两种方式: 根据轨道交通实际系统已有的历史数据, 进行离线学习; 分析研究目标, 选取实际正在运行的子系统数据作为人工系统的输入, 在线跟踪学习。通过这两种学习方式协调配合, 不断调整和优化人工系统。在这个过程中, 轨道交通实际系统对人工系统起指导作用。主要从结构合理性和行为一致性两个方面进行验证。

2.1.3 人工交通系统设计平台

设计平台对构成人工交通系统的各部分元素进行设置, 从而构建出符合设计者需要的人工系统。主要设置工具有:

- (1) 轨道交通系统组成部件构建工具;
- (2) 线路构建工具;
- (3) 人口构建工具;
- (4) 人口活动生成器
- (5) 信号控制构建工具;
- (6) 信息发布构建工具
- (7) 调度方案;
- (8) 交通管理构建工具;
- (9) 天气模型;
- (10) 事故模型;
- (11) 大型活动模型。

2.2 轨道交通人工系统的计算与实验平台

经过可信度验证的城市轨道交通人工交通系统构建之后, 作为试验平台引入计算实验, 可以实施计算实验来验证各种假设和可能的情况。通过在轨道交通人工系统中进行各种试验, 待仿真的事件作为场景库, 引入传统意义上可控或不可控因素进行大量实验并做出评估。实验平台中提供了多种实验设计方法, 辅助用户进行实验设计; 实验平台中提供了实验分析工具, 可以对实验构成因素进行分析, 分析哪些因素对交通影响较大; 可以将构成人工交通系统的不同分离出来, 进行设计, 从而可以应用常规实验方法对构成人工交通系统的不同因素进行计算与实验, 分析各



种因素的不同设定对交通的影响。统计各个阶段数据包括调用方案数据、仿真结果数据以及在城市轨道人工交通系统上的评估结果数据等，针对实际系统无法完成的工作，低成本高效率的完成方案可行性验证和评估，用于实际轨道交通系统的安全控制和有效管理。

通过实验设计、实验、实验分析的常规实验手段，按照传统实验设计的方式进行实验设计，进行人工轨道交通系统的计算实验，分析不同状态下各个交通影响因素对于交通质量的影响程度。内容可包括服务水平、事故率、等待时间、资源消耗、人口冲击，到针对各种规则及规章制度、法规的效应，调度优化，针对突发事件或大型活动等的应急管理预案等。流程如下：

- (1) 明确研究主体，明确研究对象，划分领域、目标内容，明确参与的部门，了解各岗位职能和职责等；
- (2) 根据所涉及的关键部门和主要参与人员，制定多种方案在计算实验平台中进行实验，建立方案模型：逻辑框架+物理框架；
- (3) 计算实验平台：数据采集、采集监测、数据库、数据管理服务器，轨道交通人工系统运行的大型计算机仿真平台，算法选择优化等软件、软硬件接口等；根据分析结果找到可控和不可控因素，对相应的人员和设备进行参数调整和设置；
- (4) 修改，并对方案不足之处进行改进；
- (5) 结果评估、分析、决策；
- (6) 重复上述过程，直至最优方案或实际系统能够承受的方案。并对运行结果进行数据存储和分析。

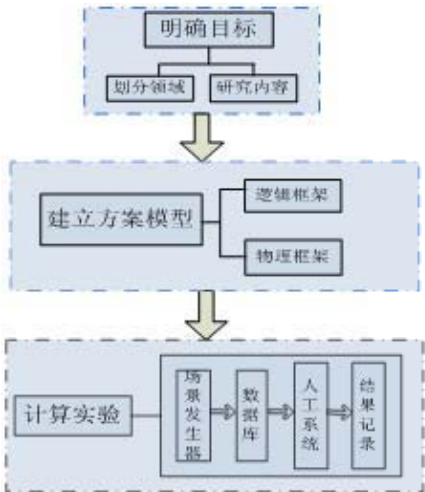


图 3 计算试验原理图

2.2.1 计算实验方案

在轨道交通人工系统实现实验方案的执行、多次修改和再执行过程，而计算实验过程的可重复执行具有低成本高效益的特点，可为实际系统提供强有力的经验指导，极大地提高了铁路系统管理高效性、列车运行安全性、服务高品质性和调度任务及时性等。根据铁路系统各子系统的不同特点，主要分为列车运行、调度、服务和应急四个方面的计算实验方案。

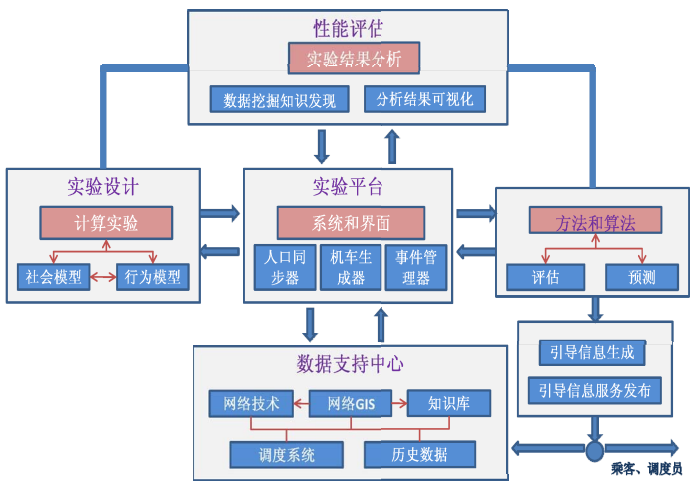


图 4 计算试验流程图

2.2.2 计算实验内容

计算实验层包括场景生成器、执行组态工具和算法分析工具，分别完成实验设计、实验执行和实验分析功能。

具体实验内容可包括：

- (1) 高峰期交通特征：
  - 1) 时间较为固定和集中；
  - 2) 运输压力突然增加；
  - 3) 乘车人数大幅增加；
  - 4) 排队等车人数增多。
- (2) 高峰期管理措施：
  - 1) 缩小发车间隔；
  - 2) 增加现场疏导人员；
  - 3) 异常事件快速处理；
  - 4) 及时发布引导信息。
- (3) 恶劣天气下的交通属性改变：
  - 1) 车辆运行受到一定影响；
  - 2) 异常事件发生的概率增加；
  - 3) 个体出行选择轨道交通的意愿增加；
  - 4) 出行者情绪受到影响，心理有波动。

#### (4) 恶劣天气应对措施:

- 1) 预先估计运输压力, 提前准备应对措施;
- 2) 合理安排现场设施, 对乘客进行积极地引导。

#### (5) 突发事件下交通属性的改变:

- 1) 机车、轨道发生故障造成线路无法通行;
- 2) 车站或周边发生突发事件, 临时关闭出入口。

#### (6) 突发事件的应对措施:

- 1) 启动应急预案, 实施相应管制措施;
- 2) 协调出租车、轨道交通等其他运输方式, 疏散滞留人群;
- 3) 及时发布引导疏散信息。

#### (7) 大型活动交通特征:

- 1) 短时间内运输压力突然增加, 安全事故风险增加;
- 2) 乘客数量相对固定, 可提前预知;
- 3) 交通压力持续时间短 (一般 1 个小时以内);
- 4) 人员流动方向相对固定, 活动开始主要是流入, 活动结束主要是流出。

#### (8) 大型活动调度管理手段:

- 1) 提前准备应对措施, 增加机动运力;
- 2) 估计可能发生的异常情况, 准备应对措施;
- 3) 增加临时通道, 增加通道指示标志。

### 2.2.3 计算实验平台设计

计算实验部分最重要的环节是计算实验平台的设计, 如人员操作的失误对设备运行可能造成的影响, 环境因素的变化对整个系统带来的后果等, 确定试验的可控因素和不可控因素对输出结果造成的影响。

计算实验过程中, 轨道交通人工系统作为可重复的试验平台, 事件作为方案库, 引入各种传统意义上可控或不可控因素进行大量实验。所有的方案、计算结果、评价参数等都需要记录并备案, 相应建立方案库、数据库、数据库管理系统, 为后续重复试验和平行执行阶段提供方案库资源、计算实验数据和修改经验等。

### 2.2.4 计算实验分析

针对虚拟“实际”系统的各个代理行为构成的复杂社会现象, 进行数据的采集, 并对实验数据进行挖掘和融合。针对轨道交通人工系统计算实验数据, 可以分别从运营安全、运输效率、服务质量和经济指标四个方面对计算实验的输出数据进行分析。

计算实验过程中, 所有的方案、计算结果和评价参数等都进行记录和备案, 分别建立方案库、数据库和数据库

管理系统, 为之后的重复试验甚至平行执行阶段提供方案库资源、计算实验数据和修改经验等。

### 2.3 轨道交通综合评估系统

轨道交通综合评估系统提供了一套完整的交通评价因素, 并提供了一套评价指标体系设计工具, 并可设计评价指标 (相当于一套关键指标 KPI), 通过评价指标, 评估交通效果。

建立根据轨道交通点、线、面多目标多层次的综合评估体系, 采用层次分析法、分析法等处理各项指标, 最后采用模糊综合评价法, 对轨道交通的技术、经济、环境、社会和城市建设方面, 人、车、路、站协调方面, 政策、法规等规章制度, 应急管理预案评估进行综合评估, 以全面反映轨道交通运营主要方面的性能要求。该系统可以对实际轨道交通的运用效果和人工轨道交通系统的计算结果进行分析与评估。

通过采集人工实验的轨道交通数据, 根据地评估指标体系, 对轨道交通预案的效果进行事先及事后的分析与评估; 通过采集实际系统的轨道交通数据, 根据轨道交通评估指标, 对轨道交通方案的实际运行效果进行分析与评估; 通过比较人工实验及实际系统的轨道交通运行分析与评估结果, 可以发现方案中的优点及不足, 及时在后续工作中加以调整。

### 2.4 轨道交通人工系统的平行执行平台

在轨道交通人工系统计算实验或“试验”认识实际轨道交通系统的各要素间演化规律, 将实际和轨道交通人工系统进行相连形成轨道交通平行控制系统。由于实际轨道交通系统的行为预测和分析比较困难, 也无法在实际系统上进行实验, 那么挖掘轨道交通人工系统的潜力, 使其从被动到主动、静态到动态、离线到在线, 从属到相等的地位并充分发挥其作用, 轨道交通平行与管理系统必将对高速列车安全高效和低成本运营产生重要意义。

城市轨道交通人工系统与实际轨道交通系统两者之间的交互运行, 构成完备的轨道交通平行执行系统, 改变传统被动式维护到主动维护方式。轨道交通平行执行是建立问题、问题分析判断、获得结果逐层进行的过程, 基于计算各层次之间评价指标及其对总目标的组合权重, 综合分析出不同方案的评价指标。平行执行过程通过实时监控实际系统, 掌握实际系统的状态变化, 不断的在线调节城市轨道交通人工系统上运行的最优方案, 最终达到及时制定与实际轨道交通系统当前运行状态相应的控制管理方案的

目的, 有效提高实际轨道交通系统运营的可靠性、安全性、高效性等指标。

- (1) 平行管理系统 (Parallel Management Systems, PMS):  
排班、维修、KPI、优化调度;
  - 1) 轨道交通调度和管理;
  - 2) 轨道交通系统构成子系统的管理和控制;
  - 3) 子系统中独立单元的管理和控制。
- (2) 平行应急管理系统 (Parallel emergence Management Systems, PeMS): 突发事件情况下应急预案的评估、演练。

- 1) 应急培训与演练

- a) 基于实验平台的培育情景, 对不同角色的受训人员进行培训, 培训其在正常情况和突发事件情况下的心理素质和反应能力, 熟悉各类突发事件的处理流程及其承担的责任;
- b) 通过重复性的情景再现, 提高受训人员应急处理水平。

- 2) 应急手段验证

在制定应急预案过程中, 不能直接验证应急手段的可行性和有效性, 而在人工系统通过情景设定可验证各类极端情况下应急手段的可行性和有效性, 为应急手段的选取提供参考。

- 3) 应急方案的评估

通过计算实验, 可以验证所指定的应急方案完整性、可操作性、有效性、经济性。

- 4) 应急管理 and 控制

- a) 通过平行执行的功能, 实现虚、实系统的交互与协同, 帮助应急指挥小组选择应急方案;
- b) 通过“透视”功能预测突发事件的动态演化过程, 对应急措施进行优化, 通过计算资源减低突发事件处置中生命和财产损失。

通过平行执行, 实现对轨道交通实际系统实时的有效管理和控制。整个平行执行过程综合考虑了运行系统框架和人为因素, 将管理规则库和人员进行关联实现一体化的管理, 从而使传统的技术控制上升到与管理结合的综合控制体系, 实现安全、高效的轨道交通运行体系。

### 3 结论

针对目前轨道交通中亟待解决的安全、高效、可靠运行等关键问题, 本文以 ACP 方法为基础, 对轨道交通平行系统体系进行研究: 给出了建立动态、整体、真实的城市轨道交通人工交通系统的构建方法以及其一致性验证方法和系统设计平台; 详细描述了轨道人工交通系统计算实验平台

的设计方案及实验方案、内容及数据分析; 给出了综合评估体系; 最后, 通过平行执行对各种方案和应急计划进行综合评估与滚动优化, 制定合理的管理方案, 并形成一套自下而上的轨道交通平行控制和管理方法。

### 参考文献

- [1] B. Ning, T. Tang, Z. Y. Gao, F. Yan, F. Y. Wang, and D. Zeng, “Intelligent railway system in China,” *IEEE Intelligent. System*, vol. 21, no. 5, pp. 80–83, 2006.
- [2] 王飞跃, 人工社会、计算实验、平行系统——关于复杂社会经济系统计算研究的讨论, *复杂系统与复杂性科学*, 第 1 卷第 4 期, 页码: 25-35, 2004.
- [3] F. Y. Wang, “Toward a paradigm shift in social computing: the ACP approach,” *IEEE Intelligent Systems*, vol. 22, no. 5, pp. 65-67, 2007.
- [4] F. Y. Wang, “Parallel system methods for management and control of complex systems,” *Control Decision*, vol. 19, no. 5, pp. 485–489, 2004.
- [5] F. Y. Wang, “Parallel control and management for intelligent transportation system: concepts, architectures and application,” *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, vol. 11, no. 3, pp. 630-638, 2010.
- [6] G. Xiong, K. F. Wang, F. H. Zhu, et al. “Parallel traffic management for 2010 Asian Games,” *IEEE Intelligent Systems*, vol. 24, no. 5, pp. 81-85, 2010.
- [7] Q. H. Miao, F. H. Zhu, Y. S. Lv, et al. “A Game-Engine-Based Platform for Modeling and Computing Artificial Transportation Systems,” *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, vol. 12, no. 2, pp. 343-353, 2011.
- [8] F. Y. Wang, L. Li, X. Huang, and Y. Zou, “A discussion of fundamental theory of long period continuous production emphasizing effectiveness, safety and energy saving,” *Computation Application of Chemistry*, vol. 24, no. 12, pp. 1711–1713, 2007.
- [9] B. Ning, T. Tang, H. R. Dong, D. Wen, D. R. Liu, S. G. Gao, and J. Wang, “An Introduction to Parallel Control and Management for High-Speed Railway Systems,” *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, vol. 12, no.4, pp.14734 - 1483, 2011.
- [10] B. Ning, H. R. Dong, D. Wen, L. F. Li, and C. J. Cheng, “ACP -Based Control and Management of Urban Rail Transportation Systems,” *Intelligent Transportation Systems*. Vol. 26, pp.84-88, 2011.