

文章编号: 1672-3813(2004)02-0052-08

人工交通系统的基本思想与框架体系

王飞跃, 汤淑明

(中国科学院复杂系统与智能科学重点实验室, 北京 100080)



摘要:阐述了人工交通系统的基本思想。从分析人工交通系统与仿真交通系统的差异和关系入手,提出了人工交通系统的基本系统构成和框架、主要建模和研究方法,以及分析手段和可能的应用方式。人工交通系统的主要研究手段包括基于代理的方法与编程技术、Petri 网及其衍生模型、复杂系统的语言动力学描述、元胞自动机及其广义形式,以及模糊逻辑、神经元网、遗传演化程序和自然计算在内的计算智能方法。此外,还提出了将计算试验方法和并行系统方法用于交通研究的可能途径和效果,并讨论了有关人工交通系统研究中可能出现的问题和进一步的发展方向。

关键词:交通系统;人工交通系统;人工社会;代理方法;涌现;复杂系统

中图分类号: N94; U491; TP391

文献标识码: A

Concepts and Frameworks of Artificial Transportation Systems

WANG Fei-yue, TANG Shu-ming

(The Key Laboratory of Complex Systems and Intelligence Science, Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

Abstract: This paper introduces the basic concept, framework, and architecture, as well as major methods for modeling and analysis, and potential applications of artificial transportation systems. The relationship between artificial transportation systems and simulated transportation systems is addressed. The potential uses of agent-based modeling and object-oriented programming, Petri nets, linguistic dynamic systems, cellular automata and their generalization, and algorithms in computational intelligence in artificial transportation systems are investigated. In addition, applications of computational experiments and parallel systems methods in transportation research are also addressed. Finally, potential problems and future direction of research in artificial transportation systems are discussed.

Key words: transportation systems; artificial transportation systems; artificial societies; agents; emergence; complex systems

1 引言

交通问题是目前世界各国现代化城市发展与管理所面临的基本性关键复杂问题之一,影响广泛而且巨大。在美国,交通的经济总量已占其 GDP 的 11% 左右,而美国国会将要通过的 6 年联邦交通预算高达 2 750 亿美元^[1],这其中不包括各州独立的交通预算。在一些地方,包括我国的许多大城市,交通问题已成制约经济和社会发展的瓶颈,污染自然和生态环境的祸首之一。

收稿日期: 2004-03-24

基金项目: 国家杰出青年基金(60125310); 中国科学院海外杰出人才引进计划后续基金(0359); 国家自然科学基金委重点项目(60334020)

作者简介: 王飞跃(1961-),男,浙江东阳人,博士,教授,中国科学院自动化研究所研究员,中国科学院复杂系统和智能科学重点实验室主任,主要研究领域为智能系统和复杂系统的建模、分析和控制。

城市交通系统是一个“天然”的多学科、跨领域的复杂开放巨系统^[2,3],涉及几乎所有的工程学科,以及经济、人口、生态、资源和法律等社会科学知识,介于纯工程系统与纯社会系统之间,因此为复杂系统和复杂性研究提供了一个十分具体且具有科学和社会影响的案例。如果能够有效地解决城市交通问题,不但为一般复杂系统问题的解决提供思路,产生巨大的经济和社会效益,也为用全面、协调、可持续发展的科学发展观解决其它城市发展与管理问题奠定了基础。

然而,交通系统除了其多学科、跨领域、规模巨大等复杂特性之外,还具有实验试行成本极高甚至无法进行的特征。因此,很难对解决交通问题的方案事先进行较为全面和准确的评估和修正,这也是过去交通系统技术相对落后的原因之一。随着计算机和网络技术在交通中的广泛应用,智能交通系统的概念和方法不断成熟,交通系统的信息化、网络化、自动化和智能化要求不断提高,全面、准确、及时地评估和修正交通解决方案已成为交通研究所面临的迫切问题。

正是因为这一原因,国际上多种大规模的交通规划、管理、优化和控制计算机仿真模拟系统应运而生。经过10多年的不断改进,这些仿真系统日趋完善,已成为研究交通系统的重要工具和不可缺少的整体部分,并且在实际中得到了广泛有效的应用^[4,5]。然而,随着计算机容量和速度的提高,随着并行、分布和网格计算结构和方法的不断普及,目前的交通仿真模拟思想的局限性也日益明显,与计算机所能提供的性能脱节,没有最大可能地发挥计算的作用。

在此背景下,我们提出了人工交通系统的概念^[6-8],其基本思想就是利用人工社会的理论与方法^[9],把交通仿真方法推向一个更高的层次和更广的视野,利用大型计算机和代理编程的建模技术,“生长”和“培育”交通系统,即“人工交通系统”。通过人工交通系统方法,我们就可以对具体的交通系统进行“试验”,而且可以在几乎无成本无风险的情况下“重复”试验,进而对具体的交通解决方案进行全面、准确、及时的评估和修正。同时,将人工交通系统与实际交通系统相结合,既可以对正在运行的交通管理与控制系统进行滚动式改进与优化,又可以对交通系统的管理者和用户进行“虚拟”培训,提高学习效率和操作可靠性。

本文将较为系统的阐述目前人工交通系统的基本思想和框架体系,以期更多的研究人员参与相关的研究工作,使人工交通系统的研究和应用不断深入。

2 从仿真交通系统到人工交通系统

首先,人工交通系统是仿真交通系统进一步演化的必然结果。两种方法的目的只有细微的不同,但在实现的手段、方法和技术上,尤其是方法认识上,二者之间具有较大的差别。特别要指出的是,一个仿真交通系统可以只模拟实际交通系统的一部分,但一个人工交通系统应当涉及全部交通行为和要素,从交通过程的产生到整个演化,也就是说人工交通系统应当是一个自我完备的系统。换言之,仿真交通系统可以只体现交通的局部特性,而人工交通系统必须体现交通的整体特性。

在目的上,仿真交通系统追求的是如何真实地模拟实际的交通系统,逼真程度是评估一个仿真交通系统的主要指标之一。一个仿真交通系统如果能够产生同实际相同或相近的交通状态,就是其最大的成功。但这不是人工交通系统唯一的,甚至主要的目的。对一个人工交通系统来说,它必须能够产生实际交通系统的替代版本才行,这一要求符合著名哲学家和社会学家 Adorno 对于有效的社会理论的认识:“只有通过它不是什么,才能揭示它本身到底是什么”^[10]。所谓的替代版本,包括但不局限于通过变化系统参数、初始或边界条件等所获得不同交通状况,然而更重要的是指那些与现实不同的,但有可能实现的交通状况。只有这样,才能够完成“计算交通试验”的要求,达到全面、准确、及时的评估并修正交通方案的目的。否则,有关工作就可能会落到研究“在裹小脚的情况下,如何跑得快”的境地。

在实现的手段或技术上,仿真交通系统往往采用普通计算工具和微分方程、差分方程、统计方法和随机过程等建模方法,不方便描述对象的直觉和经验知识及主动行为;而人工交通系统一般需要大型的计算工具,比如平行、分布和网格计算手段,除仿真所用的建模方法之外,最主要的就是基于代理的建模和相应的面向对象的编程技术,产生人工对象,从而很容易刻画对象的直觉和经验知识及主动行为,以及对象之间的相

互交往与影响。正是由于这些差别,导致了仿真交通系统往往是通过将研究对象分解为子系统,再利用对应数值技术建模集成,仿真并“回演”交通系统的各种状态和动态特性,所以是一种自上而下的被动还原型研究方式;而人工交通系统通过人工对象的相互作用,利用大型计算机和代理技术“培育生长”交通系统,模拟并“实播”人工交通系统的各种状态和动态特性,是一种自下而上的主动综合型研究方法。因而,人工交通系统的方法更容易全面综合地考虑不同因素对于交通系统的影响。

在方法认识上,仿真交通系统遵守实际交通系统是唯—现实存在的信念,并把实际交通系统作为检验仿真结果的唯—参照和标准,追求“真实”;而人工交通系统已迈向“多重现象”和“多重社会”的认识^[11,12],认为人工交通系统也是一种现实,是现实交通系统的一种可能的替代形式和另一种可能的实现方式。

然而,无论仿真交通系统和人工交通系统在目的、方法和认识上有何差别,它们之间的不同都是阶段性的,本质都是一样的,即利用计算手段研究交通问题。

3 人工交通系统的基本框架

如上节所述,不同于仿真交通系统,一个人工交通系统相对于交通行为的产生和演化过程必须是自我完备的。因此,构造一个人工交通系统,将不仅涉及交通主体本身,还涉及交通与人、交通与自然、交通与社会的相互影响。

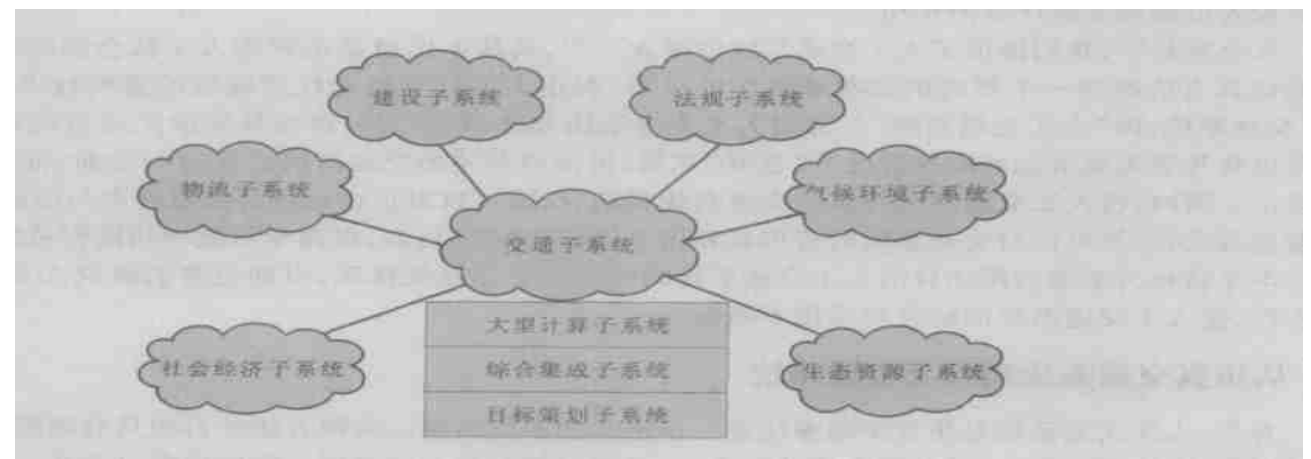


图1 人工交通系统的主要组成部分

图1给出了一个人工交通系统的主要组成部分,它们包括:

- 1) 交通子系统——交通基础设施、车辆、参与人员和管理使用规则等;
- 2) 物流子系统——货运仓储、网络、调度等;
- 3) 建设子系统——基础设施建设、新技术引入等;
- 4) 法规子系统——行政法规、交通法律等;
- 5) 气候环境子系统——自然气候、环境条件等;
- 6) 社会经济子系统——人口、经济、商业活动、大型社会群体活动等;
- 7) 生态资源子系统——环境污染、生态循环、资源消耗与再利用等;
- 8) 大型计算和计算试验子系统——并行、分布、网格计算,试验设计等;
- 9) 综合集成与决策分析子系统——数据挖掘、多因素综合、决策评估等;
- 10) 目标策划与任务规划子系统——目标设定、任务分配和调度等。

其中物流、建设和法规子系统与整个交通系统的运行密切相关,气候环境、社会经济、生态资源子系统对交通系统的状态有重大的影响,而大型计算和计算试验、综合集成与决策分析和目标策划与任务规划子系统是直

接为交通系统服务的,负责人工交通系统中的计算过程、综合分析和指标评估等等。应该指出的是,这些子系统除了与交通系统直接相关之外,它们自己之间也相互关联,但我们只考虑那些能够影响交通行为的相互关联。

图2进一步给出人工交通系统中交通子系统的基本结构,它直接采用了美国国家ITS(智能交通系统)的基本体系结构,主要包括:交通出行系统、管理中心系统、车辆系统,以及道路系统。

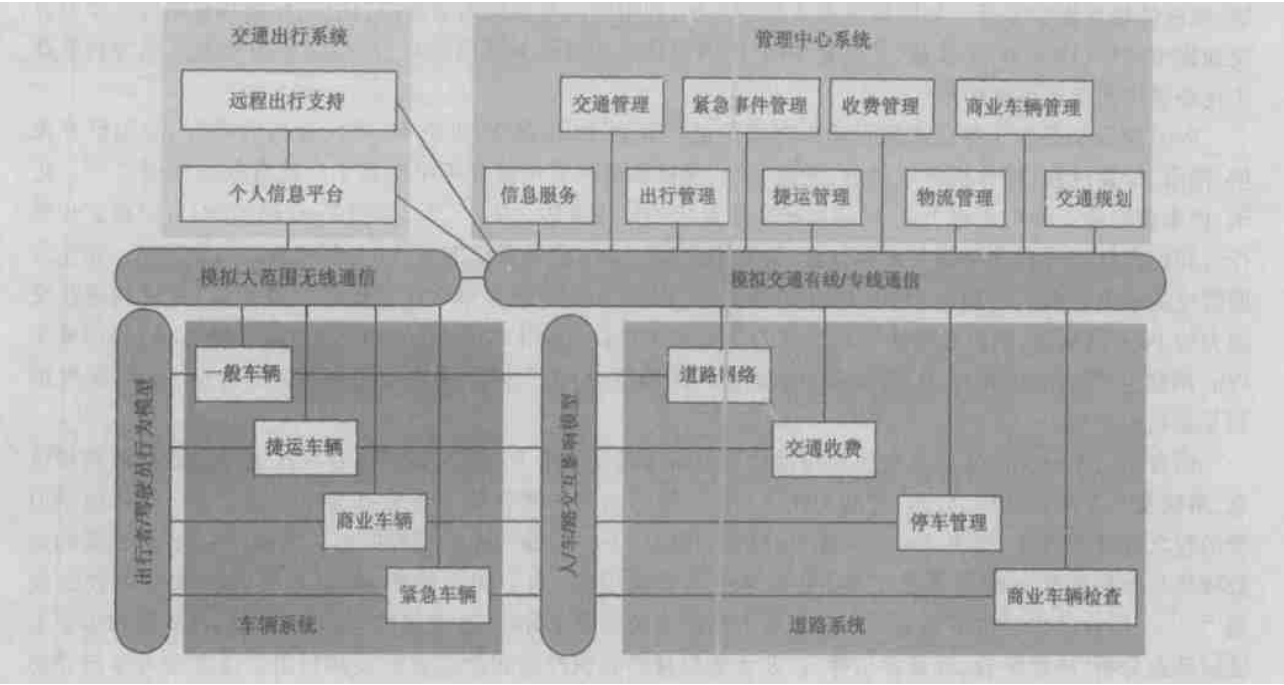


图2 人工交通系统交通子系统的体系结构

图1和图2的内容组成了一个人工交通系统的主要框架。目前,除了交通系统已有大量的交通仿真软件可以利用外,还不清楚其它子系统是否有现成的结果可直接利用。但是,美国SFI(Santa Fe Institute)关于人工社会、人工经济、人工生态等方面的工作,可以作为构造这些子系统的基础。

4 人工交通系统的主要方法

显然,目前用于交通仿真系统的各个子系统的已有方法都可以直接用于人工交通系统本身的建模与构造。尽管这些方法可能十分不同,且属于不同的学科和领域。但是,根据人工社会目前所采用的方法以及复杂系统和计算智能的最新进展,我们认为实现人工交通系统的新方法将主要由5部分组成:

- 1) 代理方法与编程技术;
- 2) Petri网及其衍生模型;
- 3) 复杂系统的语言动力学描述;
- 4) 元胞自动机及其广义形式;
- 5) 模糊逻辑、神经元网、遗传演化程序和自然计算在内的计算智能方法。

代理方法和对应的面向对象的编程(Object-Oriented Programming, OOP)技术是目前描述人工社会和许多其它复杂系统的主要手段^[13]。代理的主要特征是其自主性、社交能力、学习与进化自适应能力,以及移动能力。利用代理方法描述分析人工交通系统,可分为3个部分,即代理本身、代理的环境和社交规则。代理可以是人工交通系统中的各种人员、车辆、设备、法规,甚至植物等等,它们具有自己的内部状态、行为规则、思维方式、生长过程,并随着时间、交流和外部环境的变化而变化。代理的环境是各种代理们赖以生存和

活动的空间,是它们“生命”的舞台,既可以是现实交通和社会环境的反映,也可以是虚拟的数学或计算过程。代理环境一般表现为存放社会物资,制定相关法规,以及涉及人和生物生存与活动的各种功能场所,以及它们所形成的网络或网格。当然,这些场所的取舍是以对交通行为的影响为标准而决定的。代理的社交规则是指代理本身、场所本身、代理之间、场所之间、代理与场所之间“行事处世”的准则和步骤,从简单的路口信号控制方式、人的驾驶行为,到复杂的区域交通流调控、物流规划、交通设施投资建设、交通物流与人口、环境、经济的相互影响等等。如同研究人工社会一样,利用面向对象的编程方法,代理、环境和规则可以十分方便地作为对象(Objects)来实施,尤其是 OOP 的内部状态和规则封装的特点,使得这种编程方式成为构造基于代理描述的交通系统的最佳工具。

Petri 网最初是为了描述有限自动机之间的通信而由 Petri 在 20 世纪 60 年代提出的^[14,15],目前已在通信、网络、计算过程、计算机集成制造、智能系统、项目管理和 workflow 分析中得到了广泛有效的利用^[16,17]。近来,许多研究者正致力于将 Petri 网应用于交通系统和代理方法之中^[18,19]。利用 Petri 网,我们可以建立代理行为和代理社交过程的解析表示和分析,为基于代理的人工交通系统的设计、实现和验证奠定基础。在这方面的主要研究方向应包括:1)利用 Petri 网翻译器(Transducers)建立单个代理的形式模型;2)建立代理社交能力的 Petri 网模型,解析地描述代理之间的交流和连接;3)利用 Petri 网描述代理的移动能力;4)利用概率 Petri 网建立代理的推理、学习、进化和自适应能力的模型;5)引入博弈论描述代理之间的合作、对抗、决策的相互影响和产生。

语言动力学研究的实质是如何利用词计算(Computing with Words),如在语言层次上动态地有效利用信息,解决复杂系统的建模、分析、控制和评估问题。语言动力学研究的主要思想是如何借助于一般数值动力学的行之有效的概念、框架、方法等,建立自己的相应体系。目前的主要研究内容是概念体系、计算框架和词数转换与数词转换方面的算法工作,主要方法是模糊逻辑、胞空间与胞映射、数论格点集和离散动态规划^[20-22]。语言动力学将主要应用于数值动力学系统的抽象化分析,基于词描述的经济、社会、管理和生态系统的动态分析,决策综合,政策评估等,以及大数据量的知识挖掘和动态表示及其利用。语言动力学研究的最终目的就是建立连接人类的语言知识表示与计算机的数字知识表示的桥梁,成为下一代智能化、语言化人机交互的理论基础之一。由于人工交通系统的建立和分析涉及许多语言表示的直觉和经验知识与相应的推理和规划,以及数据与知识的挖掘,因此,语言动力学可以在人工交通系统的研究中起重要作用。

元胞自动机以及 Neumann 最初提出的自我繁殖自动机,是实现代理的解析模型和计算过程的有效工具,人工社会的研究已经证明了这一点。最近 10 多年来,元胞自动机也在交通行为的研究中得到了广泛的利用,典型的工作包括 Nagel 等提出的针对高速公路交通的一维元胞自动机模型^[23]和 Biham 等提出的针对城市交通的二维元胞自动机模型^[24],最近有些学者提出的用于研究网络行为的广义元胞自动机模型在人工交通系统中可能也会有广泛的应用^[25]。

最后,关于计算智能方法,特别是模糊逻辑、神经网络、遗传进化算法等在交通、社会、计算中的应用已有大量的文献基础,故本文不予赘述。

5 人工交通系统的分析与应用

显然,一般交通系统和仿真交通系统研究中所有的分析手段和应用领域都可以直接纳入人工交通系统的分析与应用之中,只是人工交通系统具有更加灵活、方便和广泛的特性。

图 3 给出借助于人工交通系统进行计算试验,利用涌现方法及各种统计手段分析评估交通解决方案的有效性,并对其进行相应修改的粗略过程和步骤。涌现(Emergence)的概念将在人工交通系统的分析中起核心的作用,从本质上来说它是一个实验、观察和描述性的方法。通过涌现的方法,人工交通系统可以方便地“生长”出各种交通现象,包括拥塞、事故、滞后、相变、自组织等等,以及交通子系统与其它社会子系统的相互影响,包括人口的冲击、环境的污染、资源的消耗、法规的作用,以及来自经济的刺激和对经济的制约等等。

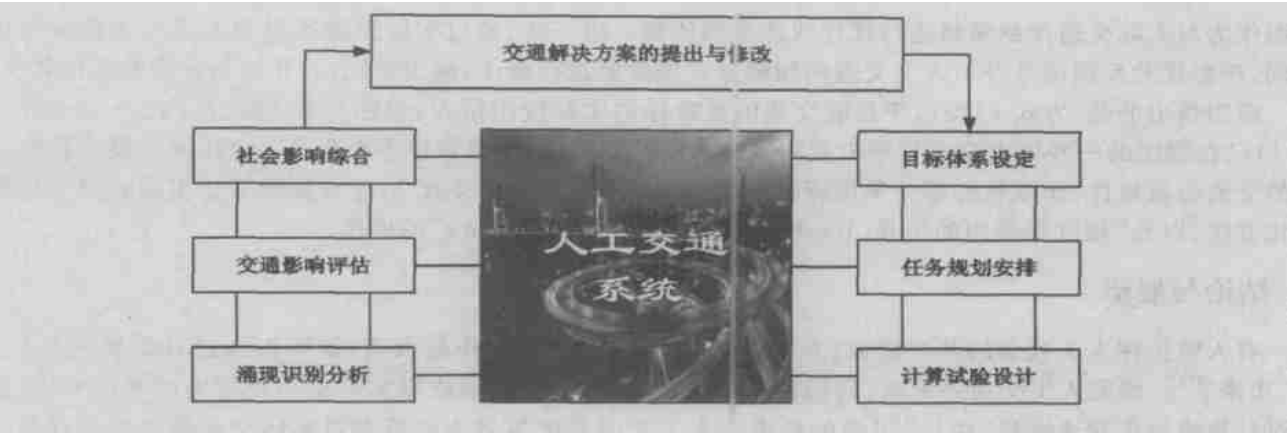


图 3 基于人工社会系统的计算试验与分析评估

通过对人工交通系统设计不同的“试验”方案,并在必要时进行多次大量的重复,我们就可以全面、准确、及时、量化地对各种交通解决方案按不同指标体系进行分析评估。许多指标,从简单的交通服务水平(LOS)、事故率、等待时间,到复杂的交通对经济的制约、环境的破坏、资源的消耗、人口的冲击、法规的效应。许多时候由于缺乏足够的观察时间和充裕的数据,很难对这些指标在现实的交通系统中进行准确可靠的量化分析与评估,但可以在人工交通系统里方便地完成。特别是,人工交通系统不但是对现实交通的仿真,而且还可以提供现实交通系统的替代版本,从而扩大了量化分析的适用范围及其结果的可靠性和鲁棒性。

此外,利用人工交通系统的“计算试验”之可设计性和可反复进行实验的特性,我们还可以对交通解决方案,进行各种关于性能可靠性和质量等的“加速”实验,“压力”实验以及“极限”实验等等,如同目前针对软件系统所进行的一样^[26]。对于交通问题,这些“实验”一般是无法用实际系统,特别是正在运行的实际系统进行实验的。

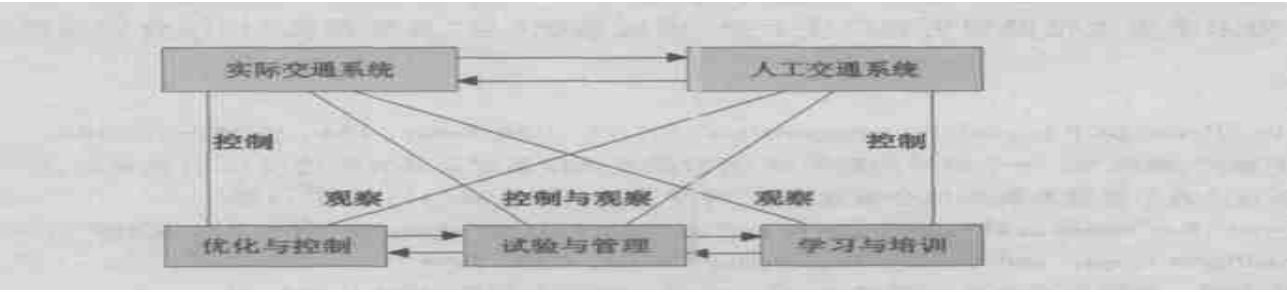


图 4 平行交通系统及其应用分类

如图 4 所示,利用人工交通系统,我们还可以进行各种“并行”系统分析和操作,即把实际系统与人工交通系统相连接,通过二者之间的对比和分析,对未来系统的状况进行预测,相应地调节管理控制的方式,达到优化和学习的效果。主要可以通过 3 种方式来实现:

1) 试验与管理型:在这种方式下,人工交通系统主要被用来进行试验,不同交通方案的试验结果被用来作为评估其效果的依据,并用于实际交通系统的管理中去。

2) 学习与培训型:在这种方式下,人工交通系统主要是被用来作为一个学习和培训中心。通过将实际与人工交通系统的适当连接组合,可以使交通系统管理人员迅速有效地掌握交通系统的各种情况和对应的操作。在条件许可的情况下,应以实际或备用的交通管理系统来控制人工交通系统,以期获得更佳更真实的效果。

3) 优化与控制型:在这种方式下,人工交通系统试图尽可能地模拟实际交通系统,对其行为进行预测,从而作为对实际交通控制策略进行优化或改进的依据。进一步,通过实际交通状况与人工交通预测的状态不同,产生误差反馈信号并对人工交通的预测方式或参数进行修正,减少差别,并开始新一轮的优化和预测。

应当指出的是,方式1)类似于目前交通仿真软件的实际应用情况,但在试验方面作了进一步展开。方式2)已在德国的一些城市交通管理中实际实施,即利用与实际交通管理中心几乎完全相同的设施控制大规模的交通仿真软件,而该软件部分采用即时的实际现场交通数据。方式3)十分类似基于滚动时间和仿真的优化方法,以及“硬件在环内的仿真(Hardware-in-the-Loop Simulation)”的思想。

6 结论与展望

有人曾批评人工社会的某些研究:几乎不需要实际社会中的任何东西,就可以通过计算机把它们“生长”出来^[27]。研究人工交通系统时,我们首先不能重蹈覆辙,出现不依靠实际交通系统中的具体知识,仅仅通过计算机就把交通现象“生长”出来的怪事。人工交通系统虽然不以追求对实际交通系统的逼真作为唯一的目的,允许并提倡产生实际交通系统的替代版本,但这决不是为任意假设、推论、扩大开放绿灯。研究人工交通系统,必须首先深刻了解实际交通系统的运行规律、方式、方法和各种约束条件等等,否则,将丧失科学意义和实用价值。

其次,在人工交通的建模过程中,系统的创造者必须避免带入其可能的、潜意识中的文化假设和社会偏见,同时还必须客观地考虑文化和社会环境对于交通行为的影响。人工交通系统的研究者,应从有人指责人工社会的实践者都是“读着牛仔科幻小说长大的白人”的指责中吸取教训。当然,在人工交通的研究中出现这类情况的可能性不大,毕竟交通系统是工程背景很强的一个领域,不像其它纯社会系统一样,有很大的主观发挥空间。

我们认为,人工交通系统是随着计算能力和计算方式的不断提高,仿真交通系统所必然迈上的另一个台阶,是全面、协调、综合地研究交通系统的重要手段,其结果将在交通系统的计算试验、仿真培训、优化控制方面得到广泛的应用。而且,作为介于工程与社会领域的一个范例,人工交通系统也是走向“平行系统”方法的重要一步,为未来更大范围和更宽广度上把“虚拟系统”与“真实系统”相结合提供经验、奠定基础。

参考文献:

- [1] Paul Leavitt. House GOP to push for transportation bill[N]. USA Today, 10A, 12 March, 2004.
- [2] 钱学森,于景元,戴汝为. 一个科学的新领域:开放的复杂巨系统及其方法论[J]. 自然杂志,1990,13(1):3—10.
- [3] 戴汝为,王珏. 关于智能系统的综合集成[J]. 科学通报,1993,38(4):1249—1256.
- [4] Wang Fei-yue. Key issues in ITS development and its application for olympics 2008[R]. ICSEC Technical Report 01—12—99. Beijing: Intelligent Control and Systems Engineering Center, CAS, 1999.
- [5] 邹智军,杨东援. 道路交通仿真研究综述[J]. 交通运输工程学报,2001,1(2):88—91.
- [6] Wang Fei-yue. Integrated intelligent control and management for urban traffic systems[C]. Shanghai: The Proceedings of the 2003 IEEE International Conference on Intelligent Transportation Systems, Oct. 2003. 1313—1317.
- [7] Wang Fei-yue, Tang Shu-ming, Sui Ya-gang, et al. Toward intelligent transportation systems for the 2008 olympics[J]. IEEE Intelligent Systems, 2003, 18 (6): 8—11.
- [8] 汤淑明,王飞跃,刘小明. 人工交通系统研究方法初探[J]. 系统仿真学报,2004,16.
- [9] 王飞跃,史帝夫·兰森. 从人工生命到人工社会:复杂社会系统研究的现状和展望[J]. 复杂系统与复杂性科学,2004,1(1):33—41.
- [10] Adorno T W, Dahrendorf R, Pilot R, et al. The positive dispute in german society sociology[M]. Translated by Glyn Adey and David Frisby. London: Heinemann, 1976. 296.
- [11] Emmeche C. Is life as a multiverse phenomenon? [A]. Artificial Life III, Vol. XVII[M]. Reading MA: Addison-Wesley Publishing Company, 1993. 553—568.

- [12] Tegmark M. Parallel universes[J]. Scientific American, 2003, 288 (5): 40—51.
- [13] Wang Fei-yue, Wang Cheng-hong. Agent-based control systems for operation and management of intelligent network-enabled devices[A]. Proceedings of IEEE Int'l Conf. on Systems, Man, and Cybernetics[C]. Washington DC. 2003.
- [14] Wang Fei-yue, Saridis G N. A Coordination theory for intelligent machines[J]. The IFAC Journal Automatica, 1990, 26 (5): 833—844.
- [15] Wang Fei-yue, Saridis G N. Task translation and integration specification in intelligent machines[J]. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 1993, RA-9 (3): 257—271; 1994, RA-10 (1): 81.
- [16] Wang Fei-yue, Gildea K, Jungnitz H, et al. Protocol design and performance analysis for manufacturing message specification: a petri net approach[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 1994, 41 (6): 641—653.
- [17] Zhou Meng-chu. Petri nets in flexible and agile automation[M]. Boston, MA: Kluwer, 1995.
- [18] Wang Fei-yue, Peter M. Fu. Analytical theory for agent systems and agent-based control: a petri net approach[M]. Singapore: World Scientific Publishing Co, 2004.
- [19] Peter M Fu. An analytic model for agent systems with petri nets[D]. Arizona: The University of Arizona, 2003.
- [20] Wang Fei-yue. Modeling, analysis and synthesis of linguistic dynamic systems: a computational theory[C]. Proc. of IEEE Int'l Workshop on Architecture for Semiotic Modeling and Situation Control in Large Complex Systems, Monterey, CA, 1995.
- [21] Wang Fei-yue. Outline of a computational theory for linguistic dynamic systems: toward computing with words[J]. International Journal of Intelligent Control and Systems, 1998, 2 (2): 211—224.
- [22] 王飞跃. 词计算和语言动力学系统的计算理论框架[J]. 人工智能与模式识别, 2001, 14(5): 377—384.
- [23] Kai Nagel, Steen Rasmussen. Traffic at the edge of chaos[J]. Artificial Life, 1994, (4): 222—235.
- [24] Biham O, Middleton A A, Levine D. Self organization and a dynamical transition in traffic flow models[J]. Physics Review A, 1992, 46: 6124—6127.
- [25] 帅典勋, 刘燕. 基于广义细胞自动机的网络信息自组织利用方法[J]. 计算机学报, 2003, 26(8): 897—905.
- [26] 王飞跃. 从一无所有到万象所归: 人工社会与复杂系统研究[N]. 科学时报(纵横版), 2003—03—17.
- [27] Smith J M. Review of “the origins of order”[J]. New York Review of Books, 1995, 1 (30).