

交通系统建模与仿真

隽志才 © 著



科学出版社

交通系统建模与仿真

隽志才 著

科学出版社

北京

前 言

交通系统仿真技术是 20 世纪 60 年代以来随着计算机技术的进步而发展起来的运用计算机模型来再现和分析复杂交通现象的综合技术,是仿真科学与技术交通领域的应用分支。

社会经济和城市化的快速发展,机动车拥有量的不断增长,使得交通需求急剧增加,由此带来的交通拥堵、交通事故、环境污染和能源短缺等相关问题已成为世界各国共同面临的难题。经验表明,交通需求的增长速度总是大于交通基础设施建设的速度,这是形成城市交通拥堵的主要原因。解决需求与供给的矛盾需要有效的交通系统分析技术。交通系统仿真是通过建立模型模仿复杂的交通系统现象,帮助我们认识现实系统,对其进行规划、设计与运行管理的一种技术,也是分析复杂交通系统管理方案、充分发挥基础设施效能的重要手段和有力工具。近年来智能运输系统(intelligent transportation system, ITS)得到了快速发展,促进了交通系统仿真建模技术的开发与应用。

交通系统仿真可以动态地、逼真地模仿交通流和交通事故等各种交通现象,为交通问题解决方案的评估提供有效手段。交通仿真模型按其模仿车辆、人流在路网上的移动和处理信号灯的控制的精细程度,分为微观、中观和宏观模型。由于历史的原因,过去交通仿真模型的应用主要是在交通工程领域,偏重于小范围的交通工程和管理方案的比较,一般使用微观仿真模型,但近年来交通规划对仿真模型日益增长的需求,计算机和地理信息系统技术的发展,为新一代的交通仿真系统(软件)的开发提供了条件。市场上不仅涌现了更多不同尺度类型的交通仿真系统,也开始把三种尺度的模型融合在一个系统中,甚至将系统扩展到居民活动-出行决策过程的仿真。

作者从事系统仿真课程教学和交通系统仿真研究二十余年,完成了国家自然科学基金项目“交通流分布式并行微观模拟模型研究”(79870044)、“智能运输系统项目社会经济影响测度模型与方法”(50178033)、“城市路网动态交通管理与控制关键理论及其模拟技术研究”(50338030)、“交通网络分布式并行微观模拟算法研究与实现”(50378042)、“基于活动的出行行为分析模型与 TDM 策略仿真评价方法”(50578094),国家 863 计划课题“城市大规模综合交通网络仿真与评估技术”(2007AA11Z203),国家科技支撑计划项目子课题“城市交通出行行为特征与行为模型研究”(2006BAJ18B02-03),本书是这些项目和课题研究成果的凝练和总结。全书共 8 章,第 1 章和第 2 章介绍交通系统建模与仿真的基础理论和建模方法。

各类交通分析模型是仿真系统的基础和核心,第3章~第6章讨论交通系统建模与仿真的基础模型和算法,包括活动-出行决策过程的建模与仿真方法、微观交通仿真模型、动态路径选择建模、中微观一体化仿真建模方法。现代交通仿真系统开发的关键技术是模型的集成应用和大规模网络仿真速度的提高,开发集成技术是仿真试验系统功能实现的保障,第7章介绍交通网络分布式并行仿真算法。第8章介绍综合交通网络仿真系统开发与实现,重点讨论作者承担的国家863计划课题的研究成果之一——基于仿真的交通评估及预测系统。

仿真试验系统的应用可以降低备选方案实地现场试验的投资成本,也不会干扰实际交通系统的正常运行过程,是开展出行行为分析、交通规划方案及交通管理策略评价的有力工具。作者期望本书介绍的研究成果在城市综合交通规划与管理领域能够抛砖引玉,对于优化我国城市交通结构、实现我国城市交通的可持续发展,起到广泛积极的推动作用。

在撰写本书过程中参考了很多国内外仿真建模的教材和学术论文,主要参考文献列于章后,作者在此对所参考的已列出和未列出文献的相应作者表示敬意和感谢。感谢吉林大学、上海交通大学的同事和研究生,特别是协助作者撰写和整理书稿的贾洪飞教授、高林杰博士、倪安宁博士、张伟华博士以及博士研究生景鹏、吴文静、高晶鑫、刁阳。

限于作者水平,书中疏漏和不妥之处在所难免,敬请读者批评指正。

作者

2011年1月于上海

目 录

前言

第 1 章 交通系统仿真概论	1
1.1 交通系统仿真的基本概念	1
1.1.1 交通系统仿真及其特点	1
1.1.2 系统分类与系统模型	4
1.2 仿真建模的概念框架与基本步骤	8
1.2.1 系统建模与仿真的概念框架	8
1.2.2 系统仿真的类型	10
1.2.3 系统建模与仿真的基本步骤	12
1.3 交通仿真技术的应用与发展趋势	15
1.3.1 交通仿真技术的发展	15
1.3.2 交通仿真技术的应用	22
1.3.3 交通系统建模与仿真技术的发展趋势	22
本章小结	28
参考文献	29
第 2 章 仿真建模的原理与方法	30
2.1 仿真建模的基本原理	30
2.2 连续系统仿真建模方法	36
2.2.1 连续系统模型	37
2.2.2 连续系统仿真算法	39
2.3 离散事件系统仿真建模方法	42
2.3.1 离散事件系统模型的组成要素	42
2.3.2 仿真时钟推进机制	45
2.3.3 事件调度法模型的一般形式与应用	52
2.4 消息驱动的仿真机制	53
2.5 离散事件系统仿真的基本策略	58
2.6 混合系统仿真策略	65
2.6.1 混合系统的一般模型	66
2.6.2 混合系统的仿真算法	68
2.7 复杂适应系统的建模与仿真	69

2.7.1 复杂适应系统及其特性	69
2.7.2 基于 Agent 的建模仿真	71
本章小结	77
参考文献	77
第 3 章 出行行为分析建模与仿真	78
3.1 出行行为分析的基本概念	78
3.1.1 活动与出行的基本概念	78
3.1.2 出行决策类型与影响因素	79
3.2 出行行为分析的基本理论	81
3.2.1 消费者行为理论	81
3.2.2 时空约束理论	82
3.2.3 随机效用理论	83
3.3 出行行为分析的基本方法	83
3.3.1 基于出行的出行行为分析方法	83
3.3.2 基于活动的出行行为分析方法	84
3.4 出行行为仿真预测系统	86
3.4.1 仿真预测系统的结构设计	86
3.4.2 仿真预测系统的结构层次及模块功能分析	89
3.4.3 仿真预测系统的流程设计	97
3.4.4 仿真预测系统的时间约束	104
3.5 出行行为分析模型标定	110
3.5.1 仿真系统基础数据调查与分析	110
3.5.2 仿真系统输入与输出表	111
3.5.3 仿真系统的模型选择与标定	112
3.6 出行行为仿真结果分析	121
3.6.1 仿真结果的检验	121
3.6.2 仿真系统界面与结果分析	125
本章小结	132
参考文献	132
第 4 章 交通流理论与微观仿真建模	134
4.1 交通流理论概述	134
4.1.1 交通流理论分类	134
4.1.2 交通流特性	135
4.1.3 驾驶员的交通特性	140
4.1.4 车辆的交通特性	140

4.1.5 道路的交通特性	141
4.2 交通仿真模型分类	141
4.2.1 交通仿真模型的类型	141
4.2.2 微观交通仿真模型	142
4.3 车辆跟驰模型	143
4.3.1 车辆跟驰模型基本原理	143
4.3.2 典型车辆跟驰模型	144
4.3.3 STEPS 系统目前采用的车辆跟驰模型	153
4.4 车道变换模型	156
4.4.1 车道变换的类型	157
4.4.2 车道变换模型的建立	158
本章小结	167
参考文献	167
第 5 章 动态路径选择仿真建模	168
5.1 概述	168
5.1.1 交通分配概述	168
5.1.2 动态路径选择建模概述	169
5.1.3 动态路径选择仿真建模的基本思想	171
5.1.4 动态路径求解仿真框架	172
5.2 时变出行需求 OD 估计	173
5.3 路段阻抗模型研究	176
5.3.1 路段阻抗的构成	176
5.3.2 路段行程时间估计	176
5.3.3 路段行程时间预测	177
5.4 OD 对间可选路径集的确定	180
5.4.1 OD 对间路径的成本计算	180
5.4.2 OD 对间路径的搜索算法	180
5.4.3 OD 对间可选路径集的确定方法	182
5.5 动态路径选择模型与算法	184
5.5.1 多用户路径选择行为分析	184
5.5.2 OD 对间路径效用评价模型	184
5.5.3 多用户路径选择模型与算法	185
5.5.4 重叠路径的修正方法	186
5.6 动态路径选择仿真控制	187
5.6.1 迭代控制	187

5.6.2	收敛控制	188
5.6.3	路径搜索控制	188
5.7	基于活动模型与动态交通分配模型的集成	189
5.7.1	概述	189
5.7.2	中观活动/交通仿真器	189
5.7.3	基于出行链的动态随机分配	190
	本章小结	194
	参考文献	194
第6章	交通系统多分辨率仿真建模	195
6.1	多分辨率交通仿真概述	195
6.1.1	多分辨率仿真的概念	195
6.1.2	多分辨率仿真研究概况	195
6.2	宏观与中观交通系统仿真	197
6.2.1	宏观交通流的刻画方法	197
6.2.2	中观交通流的刻画方法	198
6.3	中观与微观一体化仿真	207
6.3.1	一体化仿真需要满足的一致性	207
6.3.2	一体化仿真的模型框架	208
6.3.3	中微观一体化的实施细节	209
	本章小结	213
	参考文献	213
第7章	交通网络分布式并行仿真算法	215
7.1	分布式并行仿真必要性与研究进展	215
7.1.1	并行交通仿真必要性分析	215
7.1.2	并行交通仿真研究进展	216
7.2	并行计算环境及交通仿真并行化策略	218
7.2.1	并行计算环境	218
7.2.2	交通仿真并行化策略	219
7.3	并行微观交通仿真关键算法	225
7.3.1	路网分割算法	227
7.3.2	并行仿真同步策略	232
7.3.3	动态负载均衡算法	236
7.4	分布式并行交通仿真系统实现	240
7.4.1	并行交通仿真系统功能设计	240
7.4.2	并行仿真平台总体框架设计	241

7.4.3	分布式并行计算平台搭建	243
7.4.4	并行交通仿真系统的数据流设计	244
7.4.5	并行交通仿真系统的实现	246
	本章小结	247
	参考文献	247
第 8 章	综合交通网络仿真系统开发与实现	250
8.1	综合交通网络仿真系统概述	250
8.1.1	仿真系统功能概述	250
8.1.2	STEPS 的主要特点	252
8.2	综合交通网络仿真系统需求分析	253
8.2.1	系统需求分析基本概念	253
8.2.2	交通网络仿真系统应用需求	254
8.2.3	基于 UML 的交通网络仿真系统需求分析	254
8.2.4	综合交通网络仿真系统总体框架	257
8.2.5	交通网络仿真系统的性能需求分析	257
8.3	综合交通网络仿真系统数据库需求分析及设计	258
8.3.1	综合交通网络仿真系统数据库需求	259
8.3.2	数据库总体结构设计	260
8.4	综合交通网络仿真输入系统的设计与实现	262
8.4.1	路网交通设施信息输入	262
8.4.2	交通需求信息输入	263
8.4.3	交通管理和控制信息输入	264
8.4.4	分层的地理信息组织与管理	265
8.5	中观交通网络仿真系统的构架与实现	266
8.5.1	中观仿真系统构架	266
8.5.2	中观动态路径库的生成	267
8.5.3	中观仿真实现	268
8.6	微观交通仿真系统的构架与实现	269
8.6.1	微观仿真系统构架	269
8.6.2	微观车辆系统构成	270
8.6.3	微观路径库的生成	271
8.7	中微观一体化交通仿真实现	272
8.7.1	中观道路向微观车道的转换	272
8.7.2	中微观车辆转换器	273
8.7.3	中微观一体化仿真实现	273

8.8 综合交通网络仿真输出系统的设计与实现	275
8.8.1 仿真系统构架	275
8.8.2 输出数据类型及说明	275
本章小结	276
参考文献	277

彩图

第 1 章 交通系统仿真概论

交通系统仿真技术是 20 世纪 60 年代以来随着计算机技术的进步而发展起来的运用计算机模型来再现和分析复杂交通现象的综合技术,是仿真科学与技术 在交通领域的应用分支。交通仿真以相似原理、信息技术、系统工程和交通工程领域的基本理论和专业技术为基础,以计算机为主要工具,利用系统仿真模型模拟交通系统的运行状态,采用数字方式或图形方式来描述动态交通系统,以便有效地规划、设计和控制该系统,是一门新兴的实用技术。

本章主要介绍系统仿真的一些基本概念、系统仿真建模的基本步骤、交通仿真技术的应用及其发展趋势。

1.1 交通系统仿真的基本概念

1.1.1 交通系统仿真及其特点

仿真(simulation)是对客观世界实际过程或系统在一段时间内运行的模仿。仿真要产生一个人为的系统的经历,然后观察这个人人为的经历,以便描绘推断出与实际系统有关的运行特征^[1]。交通系统仿真是通过模型模仿复杂的交通系统,帮助我们认识现实系统,对其进行规划、设计与运行管理的一种活动。交通系统仿真是计算机仿真技术在交通工程领域的重要应用。

交通系统仿真可以动态地、逼真地模仿交通流和交通事故等各种交通现象,在研究出行者出行行为和各种类型道路交通流运行机理的基础上,复现交通流的时空变化态势,深入地分析车辆、驾驶员和行人、道路交通要素的特征,有效地进行交通系统的规划、组织与管理、交通能源节约与物资运输合理化等方面的研究。同时,交通仿真系统通过虚拟现实技术手段,能够非常直观地表现出路网上车辆的运行情况,再现某个位置交通是否拥堵、道路是否畅通、有无出现交通事故等现象,为交通问题解决方案的评估提供有效手段。

交通仿真模型按其模仿车辆、人流在路网上的移动和处理信号灯的控制的精细程度,分为微观、中观和宏观模型。微观模型以跟车换道模型模仿车辆的运动并详细描述交通监测和信号控制的运作。宏观模型一般以流量函数表示的路段和路口延误来模仿车辆在一个路段行驶的时间和在路口等待的概率或时间。中观模型介于微观和宏观两者之间,它一般以车辆密度的函数来表示一个区段车辆行驶的

速度,并考虑车辆在路口的转向和排队现象。通常中观和宏观模型不直接模仿交通监测和信号控制的运作,不同控制系统对路网的影响以通行能力的形式表示。由于历史的原因,过去交通仿真模型的应用主要是在交通工程领域,偏重于小范围的交通工程和管理方案的比较,一般使用微观仿真模型,但近年来交通规划对仿真模型日益增长的需求,计算机和地理信息系统技术的发展,为新一代的交通仿真系统(软件)的开发提供了条件。市场上不仅涌现了更多不同尺度类型的交通仿真系统,也开始把三种尺度的模型融合在一个系统中,甚至将系统扩展到居民活动-出行决策过程的仿真。

交通系统仿真是一种用数值方法求解动态交通系统模型的过程。它从某个初始状态开始,按照时间的进程,一步一步地求解,最后得到系统模型的一个特解。每步计算的结果,都是实际系统在相应时点上的一种可能的状态。由于每次仿真的结果只是系统模型的一个特解,故要得到系统模型在可能的初始状态下的全部解答,就必须反复多次地运行模型。我们仿真的交通系统是一个随机系统,为了得到一个独立的样本观察值,以便对系统的某个性能测度指标进行估计,需要独立地重复运行模型。如果研究的目的是为了获取系统的一组最佳参数,则不仅需要通过独立重复运行模型以便对参数进行估计,还需要对设计方案的不同参数组合分别进行仿真,以便从中选优。由此可见,交通系统仿真是在计算机上用某个实际系统的模型进行试验的过程,是一种实验技术。

我们常常给出一系列关于系统如何工作的假设,采用数学公式或逻辑关系把这些假设构造成数学逻辑模型,用这种模型进行实验并取得对系统行为的某些了解。如果构成模型的关系简单,就可以用各种数学方法(代数微积分或概率论、运筹学中线性规划等方法)取得精确的解析解。由于大多数大系统,特别是交通运输系统太复杂,难以通过解析方法建模和计算模型的值,需要建立系统模型,通过仿真的方法来研究。在仿真中用计算机在所研究的时间区段里计算估量模型中的变量值,再经过反复计算得到其期望值。因此,系统仿真具有下列几个特点^[1]:

(1) 仿真是一种数值技术。对于大多数具有随机因素的复杂系统,往往很难甚至无法用准确的数学模型表述,从而也无法采用解析方法评价,于是系统仿真通常就成为解决这类问题的好方法。交通仿真具有强大路网动态交通状态描述能力,时间扫描技术为路网的动态交通状态描述提供了建模的最大的支持。微观交通仿真模型以交通系统最基本的要素如单个车辆、车道、信号灯等为建模单元,因而能准确、灵活地反映各种道路和交通条件的影响,而解析模型是很难做到的。系统仿真面向实际过程和系统问题,将不确定性作为随机变量纳入系统来处理,建立系统的内部结构关系模型,从而使我们对复杂的、带有多种随机因素的系统,可以方便地通过计算机仿真试验求解,避免了求解复杂的数学模型的困难。这也是目前系统仿真得到广泛应用的最根本的原因。

(2) 由于电子计算机可以加速仿真过程和减少仿真误差,因此计算机在系统仿真中占有十分重要的地位。系统仿真以问题导向方式来建模分析,并使用人机友好的计算机软件,使建模与仿真直接面向分析人员,他们可以集中精力研究问题的内部因素及其相互关系,而不是计算机编程、调试及实现,从而使系统仿真为广大科研人员及管理人员所接受。

(3) 仿真是一种“人工”的实验手段。通过仿真我们能够对所研究的系统进行类似物理实验、化学实验等那样的实验。它和现实系统实验的主要差别在于仿真实验所依据的不是现实系统本身及其所存在的实际环境,而是作为系统映像的系统模型以及相应的“人工”环境。显然,仿真结果的正确程度取决于仿真模型和输入数据是否客观地、正确地反映现实系统。系统仿真为分析人员和决策人员提供了一种有效的实验环境。例如,人为地固定一些变量为常数,只改变感兴趣的变量以考察它们对系统性能的影响;还可以事先对信号配时、几何形状等因素进行人为优化,采取特定的组合方案进行仿真,进而对不同方案进行比选、评价等。设想和方案可以通过直接调整模型的参数或结构来实现,并通过模型的仿真运行得到其实施结果,从而可以从中选择满意的方案。因此,系统仿真技术易用、可控,被看做是“政策实验室”。

(4) 仿真技术使用的经济性与安全性。有些用于交通系统分析的数据无法通过调研和试验得到,或者这一过程花费的人力、物力过大,这种情况下,这些数据可以通过交通仿真的方法得到。利用计算机进行仿真试验,可以避免实地调研和试验(如交通调查)中可能出现的意外伤害。

(5) 仿真方法的快速真实性与可拓展性。模型机制与交通系统的实际运作机制紧密对应,交通仿真分析注重的是对系统运行全过程的描述,而要做到这一点首先必须在模型机制上与实际系统运作机制吻合,这与数学解析方法的重“结果”轻“过程”是有本质区别的,相对有很好的真实性。与实际交通调查相比,交通仿真可以快速获得结果,缩短了数据获取周期,还可以避免由于人为因素发生交通中断等干扰而造成的数据丢失或失真。由于利用计算机仿真是对一种设想方案进行验证,它可以使某些参数(如车速、交通量等)超出实际调查所能得到的范围。利用交通仿真进行预测还可以再现复杂交通环境条件下的车流运行特性,弥补观测数据的不足。

借助于计算机技术,通过良好的用户输入输出界面,模型的运算结果可方便地与用户交互,增强了模型应用的实用性和方便性。仿真结果的动画演示的直观性使得即使是非专业人员也能很容易理解。

然而,仿真技术也并非十全十美,它也有其自身固有的缺点:

(1) 开发仿真软件,建立运行仿真模型是一项艰巨的工作,它需要进行大量的编程、调试和重复运行试验,这要消耗大量的时间、人力和资金。

(2) 系统仿真只能得到问题的一个特解或可行解,不可能获得问题的通解或者最优解。仿真参数的调整往往具有极大的盲目性,寻找优化方案将消耗大量的人力、物力。

(3) 系统建模直接面向实际问题,对于同一问题,由于建模者的认识和看法有差异,往往会得到不同的模型,模型运行的结果也就不同。因此,系统建模常被称为非精确建模,或认为建模是一种“艺术”,而不是纯粹的技术。

虽然以上缺点是仿真本身的性质所造成的,但随着计算机科学(包括硬件和软件)的发展和系统仿真方法研究的深入,这些问题正在逐步得到解决。随着计算机软硬件性能的提高,出现了所谓的图形建模、可视建模方法和工具,从而使建模工作变得更加轻松、方便;由于智能化技术的引入,也产生了所谓的自动建模环境,使建模的科学性进一步得到提高。此外,仿真实理论的发展,也使模型的验证、确认、优化工作进一步自动化,仿真的精确性得以提高。计算机技术中的多媒体技术、虚拟现实技术、分布式网络技术的引入更使系统仿真如虎添翼,使系统仿真技术的研究与应用水平达到了新的高度。

交通系统仿真是一种崭新的辅助管理决策和系统设计的现代化技术。具体说,它起着以下几方面的作用:

(1) 现行运行系统的性能评价。对于现有的实际运行的系统,如果为了深入了解以及改进它而在实际系统中进行实验,往往要花费大量的人力、物力、财力和时间,有时甚至是不可能的,而通过计算机仿真可以使系统正常工作不受干扰,避免风险,经过分析仿真结果,对现有系统在拟订工作条件下的性能做出正确分析与评价,并预测其未来发展,提出改进方案。

(2) 新建系统的性能预测。对于所设计的新系统,在未能确定它的优劣情况下,可以不必花大量投资去建立它,而是采用计算机仿真对新系统的可行性和经济效益作出正确的评价,帮助人们选择最优或较优的设计方案。

(3) 决策方案评价与优化。在管理的宏观、微观决策中,通过收集、处理和有关信息,可能拟订多个不同的决策方案;它们具有不同的决策变量和参数组合。针对这些不同的决策方案,进行计算机仿真的多次运行,按照既定的目标函数对不同的决策方案进行分析比较,从中选择最优方案,辅助最优管理决策。

交通仿真模型的作用是作为解释手段去说明交通系统的问题;作为分析工具去确定系统的关键组成部分或项目;作为设计准绳综合分析和评价所建议的决策措施;作为预测方法去预报和辅助计划系统的未来发展。

1.1.2 系统分类与系统模型

为了理解交通系统建模与仿真的一些重要概念,本小节讨论系统分类和系统模型。系统的分类方法很多,按照不同的分类方法可以得到各种类型的系统。我

们仅从系统仿真建模研究的需要出发,对系统进行分类^[1]。

1. 确定性系统和随机系统

按照系统输入与输出之间的关系,可以将系统分为确定性系统和随机系统。

确定性系统是指输出完全由系统的输入以及相应的转换关系(包括决策、措施等)所决定的系统。这里,系统的输入、转换关系和输出都是确定的,只要知道输入,就可预先确定系统的输出。

随机系统是指在既定的输入下,系统的输出是非确定的,带有随机的性质。产生随机性的原因是由于在系统的输入和转换过程中存在多种难以预知的偶然因素的作用。然而,尽管随机系统的输出不能完全预知,但它们通常遵循一定的统计分布规律。确定系统输出(或输入)的统计分布以及对系统的输出进行估计,是系统仿真的主要任务之一。对于这类系统,当其复杂性超过一定限度时,运用数学解析方法建立系统模型并求解往往是很困难的,甚至是不可能的。在这种情况下,系统仿真方法就显示出其优越性。

需要指出的是,把一个实际的交通系统看做确定性系统还是看做随机系统,取决于研究的目的和手段。对于交通系统建模与仿真,若是采用宏观交通流模型描述交通特性,一般将其作为确定性系统来分析;若是采用微观交通流模型,分析车辆的到达、路径选择、车道变换等行为则将系统描述为随机的。

一般来说,如果是研究系统的结构、作用机理,就可以将系统看做是确定性的。而若是研究系统的参数优化、运营计划的合理安排以及预测等,通常应将系统看做是随机的。确定性假定的简化程度高,而随机性假定更接近真实情况。

2. 连续系统和离散系统

在系统仿真中最重要的一种分类方法是按系统中起主导作用的状态变量的变化是否连续分为连续系统和离散系统。我们把与特定时间和研究目的有关的描述系统所需变量的集合定义为系统的状态。例如,信号控制道路交叉口系统的研究中,状态变量可能是各车道上的车辆数、红绿灯的颜色等。

1) 连续系统

连续系统是指系统的状态变量随时间变化而发生连续变化。例如,高速公路上的连续流就是一个连续系统,因为表示车辆状态的位移、速度等都随时间的变化连续变化。这类系统的动态特性可以用微分方程或一组状态方程来描述,也可以用一组差分方程或一组离散状态方程来描述。究竟采用哪一种,这取决于研究者对系统状态随时间连续变化的整个过程感兴趣,还是仅对某些时间点感兴趣,或者是所能得到的数据资料仅仅限于某些时间点。不论它们是用微分方程还是用差分方程来描述,只要实际状态变化是连续的,都应该归为连续系统一类。有时为了区

别,差分方程描述的这一类系统,人们又称之为采样系统。

2) 离散系统

离散系统就是指系统的状态变量在某些离散的时间点瞬时变化。交通系统中车辆收费站和交叉口的排队系统就是一个离散系统,因为状态变量等待缴费和通行的车辆数只有当有车辆达到或者离开时才会发生变化。按照系统仿真的术语,称系统状态的瞬间变化为事件,将发生事件的时刻称为事件时间。如果事件时间是一些非均匀离散时点,这样的事件称为离散事件,相应的系统称为离散事件系统。在系统仿真中,凡提到离散系统时,如不特别说明,则是指离散事件系统。交通系统的很多部分可以描述为离散事件系统。这些系统一般规模庞大、结构复杂,很难用解析法求得结果,因此,一般用计算机仿真技术来进行系统分析和设计。

实际的交通系统是一个复合系统,系统中状态变量的变化既有连续的(如车辆位移、速度)又有离散的(如车辆选择哪条路径、是否换道)。但是可以根据系统起主导作用的状态变量的类型,而把系统简化成离散或连续系统。一个系统划分为连续系统还是离散系统,除了取决于系统中起主导作用的状态变量的变化是否连续之外,还取决于对系统的研究目的。对道路上的交通流模型化,如果对研究目的来说,单个车辆的运动和特性是重要的,交通流模型应当是离散的;如果汽车可以作为集合体来看待,交通流模型则可以用微分方程描述为连续模型,可见一个系统描述为连续还是离散的是相对的。

一般来说,若研究对象是宏观系统,或研究的目的是系统动态形为的模式及其结构原因,就适宜将系统看做连续系统;若研究对象是微观系统或研究的目的是处理过程的优化和参数的优化等,就适宜将系统作为离散系统来处理。

3. 线性系统和非线性系统

根据系统要素之间相互作用的性质,可以将系统分为线性系统和非线性系统。由于要素之间的关系最终会影响到系统输入与输出之间的依赖关系,所以,只要系统中含有非线性环节,就是非线性系统。

实际的系统大多是非线性系统,而将其看做线性系统不过是一种抽象和简化。线性系统模型比较简单,可以应用业已成熟的线性系统分析方法进行研究。由于线性模型在建模、分析和求解方面的优点,我们在构造系统模型时,总是尽可能地使之线性化,即使对于一些无法将其完全线性化的非线性关系,我们也设法使之分段线性化。但这种线性化的简化不应改变系统原有的主要特性,由此引入的误差不应超过允许的限度。

是否要作线性假设,主要取决于研究目的和可能采用的研究方法。

一般来说,构造系统的解析模型并试图求得解析解时,线性的假设是必不可少的,而采用系统仿真方法将不受这种限制。有时,在仿真模型中引入一些关键的非

线性关系,将使模型的输出更丰富和更接近实际系统,从而使得分析的结论更可靠。

要研究一个系统,可能的话最好直接对系统进行试验。但绝大多数情况是系统还未构造出来,或者对实际系统进行试验是代价昂贵的,甚至是不可能的,这时,就需要构造系统的模型,以便借助模型对系统进行研究。系统仿真,简单地说就是利用模型在计算机上做试验。

系统模型是对一个存在的系统或计划建立的系统的某种形式的表述。它是由那些与研究目的有关的因素构成的,它体现了诸因素之间的关系。建立和运用系统模型的目的是指明系统的主要组成部分以及它们的主要关系,以便系统的分析者和设计者对系统的行为和功能进行深入的分析研究。在绝大多数情况下,并不需要考虑系统的一切细节,因此,模型不只是对系统的描述,而且是对系统的抽象概括和简化。不使模型的复杂程度超过对模型的要求,应当作为构造模型的一般原则。

数学模型是用符号和方程式来表示一个系统。系统仿真模型一般是动态的、随机的和只能用数值方法求解的数学逻辑模型。

构造系统模型是一个对系统进行抽象的过程,要进行抽象总离不开一定的观点和概念,构造系统模型总要依据某种构模观点。所谓构模观点就是看问题的方法,它是构造模型的一套描述和分析问题的观点、概念和方法的总称。采用不同的构模观点,会将系统抽象为不同的形式,得出不同的模型。这里显然有一个选择的问题。在构造系统模型时,一定要注意所采用的构模观点是否适合研究对象的性质及研究目的的要求。

按照系统仿真的建模方法和过程对模型进行分类,包括:

(1) 描述模型。运用文字形式简明叙述系统构成、边界和主要功能,系统分析和设计的目的与任务等。

(2) 物理模型。又称实体模型,是根据系统之间的类似性而建立起来的模型。例如,电学系统与力学系统、水力学系统之间都有某些类似性,可用电学系统仿真它们;工业产品样机、建筑模型、军事作战沙盘模型、工厂生产线平面布置等都是物理模型。

(3) 数学逻辑模型。它们是系统各种变量的数学逻辑关系的抽象表述。通常是一些代数方程和微分方程的组合,用来描述系统的结构和性能。如果模型中不含时间因素,则称为静态模型,若模型与时间有关,则称为动态模型。

(4) 流程图和图解式模型。运用表格或图解形式比较直观、明确地说明系统各组成部分以及它们之间的基本逻辑关系。

(5) 计算机程序。在上述模型基础上,运用计算机语言编写计算机程序作为计算机仿真的工具。