



SIMULATION SCIENCE

仿真科学与技术原理

王精业 等编著



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

<http://www.phei.com.cn>

仿真科学与技术原理

王精业 谭亚新 孙 明
徐豪华 黄俊卿 范 锐 编著
徐享忠 杨学会 梁 强

電子工業出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京 • BEIJING

内 容 简 介

本书是作者多年的教学和科研的经验总结。经近年来我国仿真界专家的多次研讨,仿真科学与技术的理论体系和方法论已有初步结构。本书对仿真科学与技术的理论及方法论进行了全面的描述。本书分为8章,先介绍相似理论和仿真科学与技术的方法论,之后对仿真科学与技术的理论包括建模理论、仿真系统理论和仿真应用理论进行详细的阐述。

本书可作为仿真领域的教师、本科学生和研究生的教学用书,也可作为从事仿真工作的广大工程技术人员参考用书。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。
版权所有,侵权必究。

图书在版编目(CIP)数据

仿真科学与技术原理/王精业等编著. —北京:电子工业出版社,2012.11

ISBN 978-7-121-18474-1

I. ①仿… II. ①王… III. ①计算机仿真 IV. ①TP391.9

中国版本图书馆CIP数据核字(2012)第213508号

责任编辑:曲昕

印 刷:北京天宇星印刷厂

装 订:三河市皇庄路通装订厂

出版发行:电子工业出版社

北京市海淀区万寿路173信箱 邮编 100036

开 本:787×1092 1/16 印张:21.25 字数:537千字

印 次:2012年11月第1次印刷

印 数:3500册 定价:56.00元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题,请向购买书店调换。若书店售缺,请与本社发行部联系,联系及邮购电话:(010)88254888。

质量投诉请发邮件至 zlts@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线:(010)88258888。

序

经过半个多世纪的不懈努力，仿真科学和技术已经发展为国家重要战略技术和服务于国家利益的关键技术。

多年来，广大读者渴望有一本理论方面的介绍“仿真科学和技术”的读物。今天，在王精业教授的带领下，这本书（《仿真科学与技术原理》）即将面世。

一个学科要发展，应该具备以下几个要素：

- 有自己的理论体系；
- 有自己的技术工具；
- 有自己的应用领域；
- 有自己的专业队伍；

本书的出版发行，标志着仿真科学的春天已来临，它对仿真事业是极大的促进和推动。在信息化时代，在建设创新型国家的进程中，奋力推进现代化的仿真技术，定将出色完成时代赋予的使命！

正如江泽民同志的题词：“发展我国仿真技术 勇攀世界科技高峰”。

中国系统仿真学会荣誉理事
《计算机仿真》主编

吴建伟

2012年7月3日

前 言

2004—2009年，中国系统仿真学会进行了一系列学术活动，目的是使“仿真科学与技术”能成为国家教育学科目录中的一级学科。而一级学科应有自己的学科理论体系，当时大家面临这样一个问题，“仿真科学与技术”作为一个学科，它的理论体系是什么？国际上的同行也在研究这个问题，如 Zeigler 教授在研究仿真的“Body of Knowledge”。由于国内从事仿真科学与技术的教学、科研、工程人员忙于建系统、做实验、出报告，忙于实践各领域相应的仿真实论，很少有机会来思考“仿真科学与技术”共同的理论体系是什么。而这之前的仿真类著作有数百种，涵盖能源、化工、交通、材料、艺术、经济、教育、医学、军事、航天、航空、武器装备等，涉及国防建设、国民经济和人民生活的各方面，其内容几乎都是以仿真所服务的专业为主导，描述本专业的仿真需求及应用，很少将“仿真科学与技术”作为一个独立的学科来描述，即仿真的共性研究少，而仿真的应用很丰富。

在李伯虎院士领导下，系统仿真学会赵沁平教授、陈宗基教授、肖田元教授、黄柯棣教授、刘藻珍教授等为“仿真科学与技术”的学科体系做了大量工作。编著者是其中工作者之一，在理论体系方面做了一些工作，因此组织了部分老师和博士研究生撰写了本书，其中的很多成果是系统仿真学会各方面专家的建议和创新。

本书由王精业确定结构，组织分工，并校审全文。其中，第1章由谭亚新、李增华、王精业撰写，第2章由孙明撰写，第3章由徐豪华、朱敏洁撰写，第4章由黄俊卿、黄玺瑛撰写，第5章由范锐撰写，第6章由徐享忠、范锐撰写，第7章由杨学会撰写，第8章由谭亚新、梁强、李光辉、杨娜、杜君撰写，汇总由杨学会、李增华完成，张忠斌、汤再江、吴映虹、孙乐、刘硕、樊延平、潘丽君、王浩、梁宁等同志也为本书的出版作出了很多工作。

由于研究不够深入，工作还不细致，定会有不少问题，欢迎各位专家、读者批评指正，并希望借此书引发广大同行的研究热情和创造力，继续奋斗，为“仿真科学与技术”这门创新型的学科建设而努力。

王精业

2012年11月3日

目 录

第 1 章 相似理论	1
1.1 相似的基本理论	1
1.1.1 相似的基本概念	1
1.1.2 仿真系统和研究对象的内涵	2
1.1.3 仿真系统和研究对象的相似性	3
1.1.4 相似的性质	6
1.2 实物模型的相似理论	9
1.2.1 几何相似	9
1.2.2 运动学相似	10
1.2.3 动力学相似	10
1.2.4 量纲分析	11
1.2.5 实物模型相似原理	13
1.2.6 实物模型相似理论的应用举例	20
1.3 数学模型的相似理论	22
1.3.1 连续系统动力学的数学相似	23
1.3.2 离散系统动力学的数学相似	25
1.3.3 场的相似	26
1.3.4 概率、模糊集、粗糙集的数学规律相似	27
1.3.5 图的相似	27
1.4 简单系统的相似理论	28
1.4.1 系统的结构相似	28
1.4.2 系统功能、性能的相似	29
1.4.3 系统的人机界面的相似	30
1.4.4 系统的存在和演化的相似	30
1.5 复杂系统的相似理论	30
1.5.1 复杂系统的基本概念	30
1.5.2 复杂系统的主要特性及其相似	31
参考文献	36
第 2 章 仿真科学与技术的方法论	38
2.1 方法论概述	38
2.1.1 方法和方法论的基本概念	38
2.1.2 方法论在科学研究中的作用	41
2.1.3 方法和方法论的分类	41

2.1.4	方法论的发展历程	44
2.2	一般科学方法论	47
2.2.1	哲学方法论	47
2.2.2	思维方法论	48
2.2.3	心理学方法论	48
2.2.4	数学方法论	49
2.2.5	控制科学方法论	49
2.2.6	信息科学方法论	50
2.2.7	系统科学方法论	50
2.3	仿真方法论	52
2.3.1	仿真方法论的基本概念	52
2.3.2	仿真方法论的形成与发展	54
2.3.3	仿真方法论的研究范畴	55
2.3.4	仿真方法论的内容体系	56
2.3.5	仿真的全过程描述	62
	参考文献	64
第3章	建模理论	65
3.1	模型的基本理论	65
3.1.1	多分辨率建模理论	66
3.1.2	模型的重用理论	71
3.1.3	模型的互操作理论	74
3.1.4	模型的校核、验证、确认理论	76
3.2	仿真模型的特性、功能及分类	83
3.2.1	仿真模型的特性	83
3.2.2	仿真模型的功能	83
3.2.3	仿真模型的分类	84
3.3	仿真建模基本原理	84
3.3.1	仿真建模的本质	84
3.3.2	仿真建模的基本步骤	85
3.3.3	仿真建模的基本原则	86
3.4	常见的建模理论	87
3.4.1	一般系统建模理论	87
3.4.2	变结构建模理论	88
3.4.3	混合异构层次化建模理论	88
3.4.4	多范式建模理论	89
3.4.5	柔性仿真建模理论	89
3.4.6	综合性建模理论	94
3.5	概念模型建模理论	94
3.6	数学模型建模理论	95

3.7 计算机模型建模理论	96
3.8 评估模型建模理论	97
参考文献	98
第4章 建模方法	100
4.1 理论建模方法	100
4.1.1 白箱建模法	100
4.1.2 机理分析法	101
4.1.3 模糊理论法	102
4.1.4 连续系统建模法	103
4.1.5 离散系统建模法	104
4.1.6 基于关系描述的建模方法	105
4.1.7 量纲分析法	114
4.2 实验建模方法	115
4.2.1 实验归纳法	116
4.2.2 实验辨识法	116
4.3 混合建模方法	118
4.3.1 灰箱建模法	118
4.3.2 分析-统计法	119
4.3.3 模糊辨识法	120
4.4 概念模型抽象表述方法	121
4.4.1 面向过程的抽象表述	121
4.4.2 面向结构的抽象表述	123
4.4.3 面向整体的抽象表述	131
4.5 计算机模型实现方法	140
4.5.1 计算机模型的概念和分类	140
4.5.2 并行计算机模型的实现方法	141
4.5.3 计算机模型的组织与管理方法	143
4.5.4 类库级计算机模型的实现	144
4.5.5 组件级计算机模型的实现	146
参考文献	151
第5章 仿真模型的算法	152
5.1 连续系统仿真模型的算法	152
5.1.1 连续系统仿真算法分类	152
5.1.2 高阶常微分方程数值解法	152
5.2 离散系统仿真模型算法	157
5.2.1 离散系统仿真模型	157
5.2.2 离散事件仿真模型的部件与结构	158
5.2.3 随机模型概述	158

5.3 随机变量的实现	159
5.3.1 概述	159
5.3.2 随机数发生器设计	161
5.3.3 随机变量实现的原理	164
5.4 优化算法	169
5.4.1 遗传算法	169
5.4.2 粒子群算法	169
5.4.3 神经网络算法	170
5.4.4 模拟退火算法	170
5.4.5 蚁群算法	171
5.5 定性仿真算法	171
5.5.1 定性仿真概论	171
5.5.2 定性线性代数方程及其求解方法	171
5.5.3 定性常微分方程及求解	173
5.6 并行仿真算法	174
5.6.1 并行算法的设计过程	174
5.6.2 并行计算模型	176
5.6.3 并行计算算法	177
参考文献	181
第 6 章 仿真系统理论	182
6.1 仿真系统基本概念	182
6.1.1 仿真系统的定义与分类	182
6.1.2 仿真系统体系结构	185
6.1.3 仿真系统全寿命管理理论	188
6.2 仿真系统基础理论	188
6.2.1 仿真系统超现实性理论	188
6.2.2 仿真运行时空一致性理论	189
6.2.3 实时仿真实论	194
6.2.4 分布式交互仿真实论	196
6.3 仿真系统的设计	200
6.3.1 仿真系统需求设计	200
6.3.2 仿真系统功能设计	204
6.3.3 仿真系统结构设计	208
6.3.4 仿真系统的实现	215
参考文献	217
第 7 章 支撑技术与工具	219
7.1 仿真模型构建支撑技术与工具	219
7.1.1 建模语言	219

7.1.2	模型库技术	223
7.1.3	建模支撑工具	225
7.2	仿真系统集成开发工具	227
7.2.1	Arena	228
7.2.2	MATLAB	229
7.2.3	ExtendSim	230
7.3	仿真运行支撑技术与工具	231
7.3.1	并行与分布式仿真支撑技术与工具	231
7.3.2	仿真数据库支撑技术	234
7.3.3	仿真可视化支撑技术与工具	236
7.4	仿真系统标准与标准化	243
7.4.1	仿真系统标准、规范与规程	244
7.4.2	仿真系统标准化	244
7.5	仿真系统标准化发展过程	245
7.6	仿真系统标准体系	247
7.6.1	仿真系统标准的种类	247
7.6.2	仿真系统标准的级别	247
7.6.3	仿真系统标准的属性	248
7.6.4	仿真系统标准体系框架	248
7.7	仿真系统体系结构标准	249
7.7.1	DIS 体系结构	249
7.7.2	ALSP 体系结构	250
7.7.3	HLA 体系结构	250
7.7.4	SBA 系统体系结构	252
7.7.5	TENA 体系结构	253
7.7.6	仿真网格体系结构	255
7.7.7	基于仿真网格的 SBA 体系结构	256
7.8	仿真系统数据标准	257
7.8.1	PDU	258
7.8.2	OMT	258
7.8.3	DIF	259
7.9	仿真系统 VV&A 标准	260
	参考文献	261

第 8 章 仿真应用理论 262

8.1	仿真应用的可信性理论	262
8.1.1	仿真可信性的理论体系	262
8.1.2	仿真可信性基本理论	263
8.1.3	仿真可信性的影响因素分析	269
8.1.4	仿真可信性的控制方法	273

8.2	仿真试验技术	274
8.2.1	仿真试验技术概述	274
8.2.2	仿真试验设计方法	277
8.2.3	仿真试验的前期准备	282
8.2.4	仿真试验的组织实施	284
8.2.5	仿真试验数据的分析方法	286
8.3	仿真的可视化原理与方法	291
8.3.1	数据可视化概述	291
8.3.2	仿真可视化的基本概念	293
8.3.3	仿真可视化的原理	296
8.3.4	仿真可视化的方法	299
8.3.5	仿真可视化的应用	304
8.4	仿真数据综合分析和评估的理论与方法	305
8.4.1	概述	305
8.4.2	系统仿真数据分析方法	308
8.4.3	仿真试验综合分析系统	310
8.4.4	仿真结果评估理论与方法	312
8.4.5	综合评估的结果分析	321
	参考文献	325

第1章 相似理论

人类在认识世界的过程中，发现很多事物有相近、类似的现象，称为相似现象。根据这种现象形成了人类对事物分类的一种方法。经过研究，人们不仅发现事物的外在表现相近、类似，更发现了它们内在规律的相近和类似，人们进而发现了事物自身在环境中的演化，演化事物之间的关系也有着很多相近、类似的现象。将这些现象抽象成理论，再用理论指导实践取得了预期的结果，从而产生了众多的学科知识，所以相似现象是客观世界的普适现象。相似也是仿真得以进行的基础，仿真科学与技术是用人造的仿真系统去研究事物，但首先遇到的问题是：用于研究它的仿真系统和客观的事物是否相似？因此出现了仿真科学与技术的相似理论。

1.1 相似的基本理论

相似现象是自然界和人类社会普遍存在的一种现象。相似理论认为，任何事物都客观存在一定的特征和属性，即特性。事物之间存在的相近、类似的特性为相似特性。当事物间存在相似特性时，简称为事物间存在相似性。相似理论是研究事物之间相似性的理论。其中，相似的基本原理是最重要的组成部分，可描述所有相似现象的基本概念、性质、规律。而建模与仿真的相似理论是限于为仿真而寻找事物、系统、信息之间的相似性的理论，是为建立仿真系统而涉及的相似性研究的理论，是使仿真成为现实的理论，在研究范围上比一般泛指相似理论有所缩小。

仿真，就是利用计算机等手段复现原型系统的过程。原型系统既可能是某种设备、自然环境，也可能是人，或者是这些事物的综合体。原型系统既可能是真实的，也可能是虚拟的，即人们想象、设计而未成为现实的事物，而仿真系统是人制造的真实的系统。仿真系统和原型系统在一般情况下是两个不同的系统，之所以能够用前者来复现和研究后者，其根本原因在于两者之间存在相似性。在仿真开发过程中不一定都有仿真系统与原型系统之间的相似性分析这一个明确的阶段，但是，人们已经在仿真实践的全过程中都必然应用和依托了相似理论。因此，相似理论是仿真科学与技术的基本理论之一。

相似的基本理论主要对相似的基本概念、基本性质、相似的分类等基本问题进行描述，是相似理论的基础部分。

1.1.1 相似的基本概念

我们在相似理论中，经常用到一些概念，在此对这些概念给出本学科的解释。

事物：指客观存在的一切物体和现象。

系统：指相互联系、相互作用的诸元素的综合体。

规律：指事物之间的必然联系。

特征：指可以作为事物特点的象征、标志，是事物内在特性、外在特性的表现。

特征域：指事物所有特征所组成的集合。

定义 1 相似

两个不同的事物 A 和 B 在某个特征域 T 上至少存在满足规则集 R 所约定的相近或类似的共性, 则称这两个事物在 T 上依规则 R 相似, 记为 $S(A, B, T, R)$, 简记为 $A \sim B$ 。

定义 2 相似域

有事物 A, B , 则这两个事物所有相似的特征组成的集合称为相似域。显然, 相似域为特征域的子集。若 A, B 的相似域为空集, 则 A 与 B 不相似。

定义 3 相似规则和相似规则集

相似规则也称相似规律、相似准则, 是对两事物相近、类似的共性的表述, 是判断它们是否相似的基本判据。依据这个原则可以说明事物之间的一种必然联系。事物的相似是在一定相似规则下的相似, 但两事物在某相似规则下相似, 在其他相似规则下不一定相似。

相似规则集指构成事物相似的所有规则的集合。

泛指相似理论是对事物之间相似规律和表现的描述, 也是研究事物之间相近、类似的理论描述。事物之间存在差异, 也存在共性, 共性表现之一为相似性。相似性既存在于相同的事物之间, 也存在于不同的事物之间, 近期研究表明还存在于事物的整体和部分之间, 即自相似性。整个科学中充满了相似性, 每一个学科都有着相似的概念和分析方法, 存在本学科的相似规则集。

1.1.2 仿真系统和研究对象的内涵

1. 研究对象的定义

仿真学科的研究对象是已有的系统或设想的事物。已有的系统是指客观存在着的世界万物, 其中有自然的系统, 如宇宙、太阳、地球、月亮, 地球上的江河湖海、平原、丘陵和各种生物, 也有人造的系统, 如社会、战争、城市、建筑、飞机、汽车、电话等, 这些都是真实存在的。设想的事物是指人的思维构造出目前还没有成为现实的各种构想, 如工程设计、产品设计、规划、方案等, 它们都是虚拟的。所以仿真的研究对象有真实对象和虚拟对象两大类。

对已有系统的仿真是对真实对象的仿真。对于已有的系统可以分为可观可控和不可观测两类, 在一个系统中, 这两种情况可以同时存在。一般一个系统中可观测部分对应于系统中所有能被辨别、理解、试验和测量的部分, 可控制部分则对应于系统中所有那些可用某种方式加以修改、转换、掌握和影响的部分, 余下部分对应于不可观测和不可控制的部分。当一个系统主要部分为不可观不可控时, 该系统被称为不可观测系统。对现实世界的系统的认识和仿真依赖于人们的理解力和研究事物的方法、手段的进步, 随着科学的发展和仿真技术的运用, 客观世界某些不可观测和不可控制的部分有可能转变成可观测和可控制的部分。因而, 仿真是认识和改造客观世界的一种有力方法。

设想的事物是人的头脑中对未来的一种构想、预测。以设计、规划为例, 根据人们的需求和已有的知识, 给出未来拟建造的系统的各种结构、功能、性能, 但构想并不能证明其一定能实现。通过对设计的虚拟系统进行仿真实验, 给出其实现过程中的状态和过程。利用这一仿真结果, 指导目前的设计、规划, 从而避免在实现中产生错误, 使其具有实现的可能。因此, 仿真也是创新的一种重要手段。

2. 仿真系统的定义

仿真科学与技术是以建模与仿真实论为基础, 根据研究目标, 建立并利用模型, 以计算机系统、物理效应设备及仿真器为工具, 对研究对象进行分析、设计、运行和评估的一门综合性、交叉性学科。

模型是对研究对象的实体、现象、过程和工作环境等的数学、物理、逻辑或语义等的抽象描述, 是该研究对象的规范的知识集, 是该研究对象的仿真系统的核心。仿真是基于模型的活动, 它利用共性或专用支撑技术, 建立相似系统, 对研究对象进行抽象、映射、描述和试验、分析、评估。仿真包含三个基本的活动(如图 1-1 所示), 即: 建立研究对象模型, 构造与运行仿真系统, 分析与评估仿真结果。

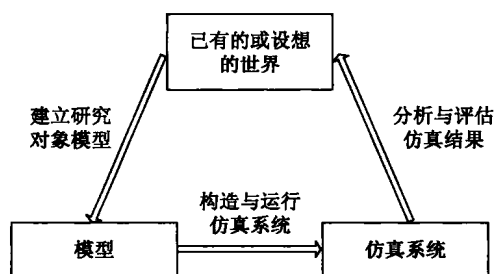


图 1-1 仿真三个基本活动示意图

通过以上分析可知, 仿真系统包括以下 3 个部分: 依照相似理论而建立的模型; 采用各种技术构建模型的运行环境; 在环境中运行模型, 进行有目的实验, 达到我们的目的。例如, 飞机驾驶模拟器就是一个仿真系统, 在其中的操作人员置身于飞行模拟器中, 在和真实的飞行状态极相似的情境中对飞机进行操作, 运行飞机仿真模型, 产生飞机的飞行效果, 从而达到飞行训练目的。

1.1.3 仿真系统和研究对象的相似性

研究对象和研究对象的仿真系统是两个相互独立的系统。要使仿真有科学性、实用性, 就要研究这两个系统的关系。其中, 相似关系十分重要, 它是仿真可信性的基础。除了掌握相似性外, 相异性也应当清楚, 以保证仿真结果的科学性。仿真系统和研究对象的相似理论只限于为仿真而寻找事物、系统之间的相似性, 它研究的是一个小范围内的相似性。按照不同的分类方式, 仿真系统和研究对象的相似性也有不同的分类。

1. 按仿真研究对象分类

按照仿真研究对象可将相似理论分为实物模型相似理论、数学模型相似理论、一般系统相似理论、复杂系统相似理论四部分。对应于相似理论的分类, 仿真系统和研究对象的相似性也可分为以下 4 种基本类型。

1) 实物相似

实物相似指实物和实物模型的相似。实物模型是实物几何、物理方面的参量按一定规律放大或缩小的模型。实物相似主要包括实物的几何相似、运动学相似、动力学相似三部分。

几何相似研究的是对象几何特征的相似，构建各种实物的模型，使模型和实物保持几何相似。原型和模型对应的线性长度均成固定比例系数关系。

运动学相似研究的是不同对象和模型的运动学相似性。原型和模型的速度场相似，即速度场中各对应点的速度大小成比例，方向相同。

动力学相似采用力学模型，进行动力学实验，并通过模型研究真实对象的动力学特征。原型和模型对应点所受的同名力方向相同，大小成比例。

例如，各种教学用的实物模型是按几何相似原则制作的，风洞试验中吹风试验是按实际空气动力学相似进行的，作战仿真系统中弹丸终点弹道是根据实际弹丸速度场相似模拟的。

2) 数学相似

两个系统的数学描述相同，则为数学相似。数学相似主要包括：

(1) 连续系统动力学的数学相似。连续系统的状态方程、传递函数等是对系统各个因素之间关系的数学描述，如果两个系统的状态方程、传递函数等数学模型一致，则这两个系统之间具有相似性。

(2) 离散系统动力学的数学相似。系统的离散状态方程和离散传递函数是对离散系统的数学描述，当两个系统的离散数学模型一致时，则它们之间具有相似性。

(3) 场的相似。场是一种特殊的物质存在形式，如电磁场、能量场、引力场等。对不同场中的效应进行分析，建立其偏微分方程数学模型；当不同场效应的数学模型一致时，就出现了场的相似。

(4) 概率、模糊集、粗糙集的数学规律相似。在不确定性问题研究中，对随机事件的仿真由于引入大量统计分析工具，就形成了基于概率统计数学表达式的随机事件相似；模糊、粗糙集等数学工具揭示了与统计规律不同的不确定性事物的规律，出现了基于模糊集、粗糙集的相似。

(5) 图的相似。图是对事物的一种数学抽象，在建立各类事物的图的模型后，当模型一致时就可以建立图的相似关系。

3) 简单系统相似

简单系统的相似，是指两个系统的结构、功能、性能、人机界面、存在与演化等方面存在相似性。

(1) 系统的结构相似，指两个系统及其各子系统有着一定的对应关系，形成结构的相似。

(2) 系统性能、功能相似，指两个系统具有内在相似的特征，对外表现出相似的某些功能。

(3) 系统的人机界面相似，指两个系统中，人的软件操作界面环境、操作空间环境、操作件的手感，操作者的视觉、听觉、体感等一致或类似。

(4) 系统的存在和演化相似，指两个系统有着静态和动态过程的相似性。它们的初始状态是相似、一致的，且有各自的演化过程，而演化过程中的主要特点和主要参数存在相似关系。

4) 复杂系统相似

复杂系统是指不能用还原论来研究的系统。它具有非线性、涌现性、自治性、不确定性等复杂特性。

非线性是复杂系统的特性,由于元素之间的关系出现非线性,系统的表现才会复杂。系统涌现性是指系统整体具有而部分不具有的特性,在系统由低层到高层的聚合过程中可以产生新的属性、特征、行为和功能,有的涌现结果甚至令人始料不及。复杂系统的自治性是指复杂系统依靠与外界交换物质、能量、信息而使系统的结构和功能随着外界环境变化而“自动”改变,“自发地”向更有序的方向演化。复杂系统的不确定性指系统演化的过程和结果不确定、不可预知。

复杂系统相似不但表现在结构、功能、存在和演化等相似,更重要的是表现在上述非线性、涌现性、自治性、不确定性等特性上的相似。基于这些相似,复杂系统在其复杂性表现、系统内在要素的相互作用、整体与部分关系及演化的不同阶段等方面会出现不同的相似现象,有的复杂系统出现了系统的局部和系统全局的相似。

2. 按相似方式分类

按相似方式可将相似分为空间相似、时间相似、性能相似、功能相似、动态特性相似和信息相似等。

1) 空间相似

当系统空间结构存在共同性时,系统的演化经历就表现出相似性。空间相似是一种最基本的相似方式。例如,几何学里的相似多边形之间的相似就属于空间相似。

仿真系统中对外形结构的仿真就是一种空间相似。例如,在坦克驾驶模拟器中,驾驶座舱的外形尺寸要尽量与实车一致,各种仪表、开关、按钮的形状和空间位置也要尽量与实车一致。

2) 时间相似

当系统时间结构存在共同性时,系统之间表现出相似性。以坦克射击模拟器为例,实车在炮手按动发射按钮与观察到爆炸效果之间有一定的时间间隔,那么在仿真过程中这个时间间隔就要尽量与实车的一致,过长或过短都会导致仿真的逼真度下降。

3) 性能、功能相似

当系统性能、功能存在共同性时,系统之间表现出相似性。例如,计算机根据预先编制的程序,可以完成数学运算、逻辑推理等人脑的性能,在计算机与人脑之间就形成了一定的性能相似性。这种相似就是性能相似。而车辆、飞机、船舶都有输送物资的功能,因而具有运输的功能相似。

从本质上讲,仿真就是对原型系统的部分性能和功能的模拟。仿真系统与原型系统的数学模型是相似的,这种相似决定了二者性能和功能的相似性。

4) 动态特性相似

两种不同的物理系统,如果它们的动态方程相似,其运动规律就相似。例如,图 1-2 (a) 是一个由刚体、线性弹簧和阻尼器构成的简单机械系统,而图 1-2 (b) 是一个由集中参数元件 L、R、C 构成的电系统,尽管是两个截然不同的物理系统,但它们的动态方程是相似的,都可以用二阶线性微分方程的形式来描述:

$$a_0 \frac{d^2x}{dt^2} + a_1 \frac{dx}{dt} + a_2x = f(t) \quad (1-1-1)$$

则两个系统之间存在相似性，这种相似就是动态特性相似。

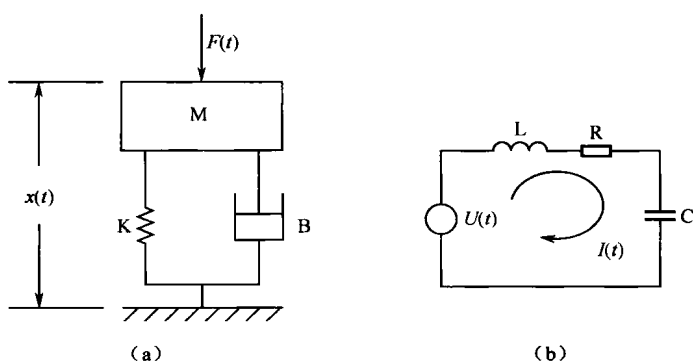


图 1-2 动态特性相似的机械系统和电系统

动态方程相似的系统，其动态特性就相似，这是控制系统仿真的理论基础。要对一个控制系统进行仿真，首先要建立该系统的数学模型，再通过算法将其转化为仿真模型，进行仿真试验，以此研究原型系统的运动规律。

5) 信息相似

当系统中信息的作用存在共同性时，不同系统之间的信息表现出相似性。例如，许多动物都靠发出特殊的叫声向同伴传递危险的信息，出现了声音信息的相似性。

仿真中最典型的信息相似，是仿真系统人机信息交互与原型系统人机信息交互之间的相似，包括各种感知信息的相似，如运动感觉信息、视觉信息、听觉信息、触觉信息等，它们是模拟器的构建基础。

1.1.4 相似的性质

根据相似的定义，相似是两事物之间的特性。但是相似还具有多元性、传递性、叠加性等性质。

1) 相似的多元性

相似不是事物的孤立性质，而是事物之间、事物整体和部分之间、事物部分与部分之间的性质，因而必然具备二元性，即存在两个事物，才存在相似，相似现象中至少存在两个事物（自己与自己相似除外）。多事物之间的相似研究，以两事物相似研究为基础；两事物之间的相似规律称为狭义的相似性，多事物之间的相似规律称为广义的相似性。

推论：

- (1) 自反性，即有事物 A ，则 $A \sim A$ ；
- (2) 对称性，即有两事物 A 、 B ，若 $A \sim B$ ，则 $B \sim A$ 。

2) 相似的传递性

相似的传递性，即有三个事物 A 、 B 、 C ，若 $A \sim B$ ， $B \sim C$ ， A 、 B 、 C 三者之间存在非空相似域，且有相同的相似规则 R ，则 $A \sim C$ 。

设事物 A 有 k 个特征 a_k ，组成特征域 A ，即 $A = (a_1, a_2, \dots, a_k)$ ；