

系统建模与仿真及其军事应用系列丛书

系统建模

郭齐胜 杨秀月 王杏林 徐享忠 段 莉 编著



國防工業出版社

National Defense Industry Press

系统建模与仿真及其军事应用系列丛书

系统建模

郭齐胜 杨秀月 王杏林 徐享忠 段莉 编著

国防工业出版社

·北京·

内 容 简 介

本书主要介绍概念模型和数学模型的建模方法,重点放在数学模型的建模方法上,内容包括定量建模方法:理论建模(连续系统建模方法和离散事件系统建模方法)、实验建模(随机变量模型建模方法、基于系统辨识的建模方法、基于人工神经网络的建模方法和基于灰色系统理论的建模方法);定性建模方法(基于模糊数学的建模方法、基于 Kuipers 的建模方法和基于 SDG 的定性建模方法);定性定量结合的建模方法(基于系统动力学的建模方法、基于层次分析法的建模方法和基于 Agent 的行为建模方法)。

本书可供高等院校有关专业作为本科生和研究生教材或参考书,也可供科研人员和工程技术人员作为技术参考书使用。

图书在版编目(CIP)数据

系统建模 / 郭齐胜等编著. —北京:国防工业出版社,
2006.5
(系统建模与仿真及其军事应用系列丛书)
ISBN 7-118-04359-1

I. 系... II. 郭... III. 系统建模 IV. N945.12

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 008950 号

※

国防工业出版社 出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100044)

北京奥鑫印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 787×1092 1/16 印张 23¼ 字数 528 千字

2006 年 5 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—3000 册 定价 39.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)68428422

发行邮购:(010)68414474

发行传真:(010)68411535

发行业务:(010)68472764

总 序

仿真技术具有安全性、经济性和可重复性等特点,已成为继理论研究、科学实验之后第三种科学研究的有力手段。仿真科学是在现代科学技术发展的基础上形成的交叉科学。目前国内出版的仿真技术方面的著作较多,但系统的仿真科学与技术丛书还很少。郭齐胜教授主编的《系统建模与仿真及其军事应用系列丛书》在这方面作了有益的尝试。

该丛书分为基础、应用基础和应用三个层次,由《概念建模》、《系统建模》、《半实物仿真》、《系统仿真》、《战场环境仿真》、《C³I 系统建模与仿真》、《计算机生成兵力导论》、《分布交互仿真及其军事应用》、《装备效能评估概论》、《装备作战仿真概论》10 部组成,系统、全面地介绍了系统建模与仿真的理论、方法和应用,既有作者多年来的教学和科研成果,又反映了仿真科学与技术的前沿动态,体系完整,内容丰富,综合性强,注重实际应用。该丛书出版前已在装甲兵工程学院等高校的本科生和研究生中应用过多轮,适合作为仿真科学与技术方面的教材,也可作为广大科技和工程技术人员参考书。

相信该丛书的出版会对仿真科学与技术学科的发展起到积极的推动作用。

中国工程院院士



2008年3月27日

序 言

仿真科学与技术具有广阔的应用前景,正在向一级学科方向发展。仿真科技人才的需求也在日益增大。目前很多高校招收仿真方向的硕士和博士研究生,军队院校中还设立了仿真工程本科专业。仿真学科的发展和仿真专业人才的培养都在呼唤成体系的仿真技术丛书的出版。目前,仿真方面的图书较多,但成体系的丛书极少。因此,我们编写了《系统建模与仿真及其军事应用系列丛书》,旨在满足有关专业本科生和研究生的教学需要,同时也可供仿真科学与技术工作者和有关工程技术人员参考。

本丛书是作者在装甲兵工程学院及北京理工大学多年教学和科研的基础上,系统总结而写成的,绝大部分初稿已在装甲兵工程学院和北京理工大学相关专业本科生和研究生中试用过。作者注重丛书的系统性,在保持每本书相对独立的前提下,尽可能地减少不同书中内容的重复。

本丛书部分得到了总装备部“1153”人才工程和军队“2110工程”重点建设学科专业领域经费的资助。中国工程院院士、中国系统仿真学会副理事长、《系统仿真学报》编委会副主任、总装备部仿真技术专业组特邀专家、哈尔滨工业大学王子才教授在百忙之中为本丛书作序。丛书的编写和出版得到了中国系统仿真学会副秘书长、中国自动化学会系统仿真专业委员会副主任委员、《计算机仿真》杂志社社长兼主编吴连伟教授、装甲兵工程学院训练部副部长王树礼教授、学科学位处处长谢刚副教授、招生培养处处长钟孟春副教授、装备指挥与管理系主任王凯教授、政委范九廷大校和国防工业出版社的关心、支持和帮助。作者借鉴或直接引用了有关专家的论文和著作。在此一并表示衷心的感谢!

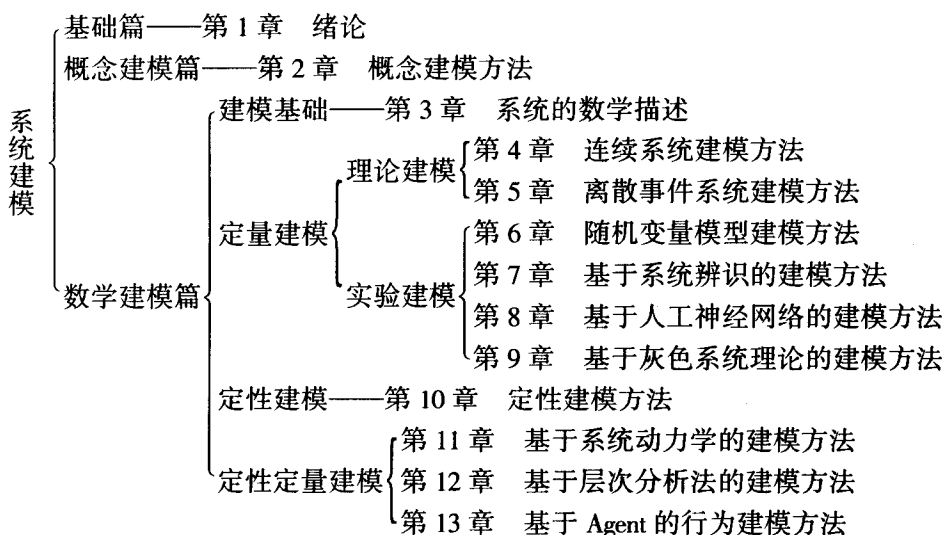
由于水平和时间所限,不妥之处在所难免,欢迎批评指正。

郭齐胜

2005年10月

前 言

系统建模是系统仿真的基础,系统建模方法很多,但比较全面、系统地介绍这方面方法的教材目前国内还不多。本书以《系统建模原理与方法》(国防科技大学出版社,2003年1月)为基础,增加了概念建模方法、定性建模方法、定性定量结合的建模方法和习题等内容,主体内容分为概念建模和数学建模两大块,其中数学建模是按照定量建模方法(理论建模方法和实验建模方法)、定性建模方法和定性定量结合建模方法的体系编写的。全书结构如下:



本书力图比较全面、系统地介绍简单系统的建模理论与方法。第1章简要介绍系统与模型、数学模型分类、数学建模的途径;第2章介绍概念建模的地位和作用、概念建模的过程、主要方法和建模语言以及概念模型在仿真中的应用;第3章介绍系统的抽象化与形式化描述、确定性和随机性数学模型以及线性模型的规范化;第4章重点介绍微分方程的机理建模法和非线性微分方程的线性化,状态空间模型的直接建模方法(机理建模法)和间接建模方法(由微分方程、传递函数建立状态空间模型);第5章介绍离散事件系统建模方法,内容随机数的产生、实体流图法、活动周期图法和 Petri 网法;第6章介绍有随机变量模型的建立,内容包括分布类型假设,分布参数估计和分布假设检验;第7章介绍系统辨识的基本方法,内容包括模型参数的辨识和模型阶次的估计;第8章重点介绍前馈网络中的 BP 网络和反馈网络中的 Hopfield 网络(包括连续型和离散型 Hopfield 网络)及其应用;第9章介绍 GM(1,1)、DGM(1,1)、GM(1,N)、GM(0,N)和 GM(2,1)模型;第10章介绍基于模糊数学和 SDG 的定性建模方法;第11章介绍系统动力学基础、系统动力学建模步骤和实例;第12章介绍基本层次分析法、群组层次分析法、模糊层次分析法和灰色层次分

析法;第 14 章介绍基于 Agent 的建模技术,内容包括 Agent 的基本概念、基于 Agent 的行为建模方法与建模实例以及 Agent 实现的技术途径。

本书由郭齐胜设计框架,郭齐胜、杨秀月、王杏林、徐享忠和段莉共同编写。编写过程中参考或直接引用了国内外有关论文和著作。在此一并表示感谢。

因水平所限,不妥之处在所难免,欢迎批评指正。

编 著 者
2006 年 3 月

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 系统与模型	1
1.1.1 系统	1
1.1.2 模型	4
1.2 概念模型	5
1.2.1 概念模型的定义	5
1.2.2 概念模型的分类	5
1.3 数学模型	7
1.3.1 数学模型的定义	7
1.3.2 数学模型的分类	7
1.4 数学建模方法学	11
1.4.1 建模过程的信息源	11
1.4.2 建模的途径	12
1.4.3 模型的可信度	13
1.4.4 建模的一般原则	14
1.4.5 建模的一般过程	15
1.4.6 模型文档	17
1.5 复杂系统建模基础	18
1.5.1 基本概念	18
1.5.2 复杂性问题	19
1.5.3 复杂系统建模的困难	21
1.5.4 复杂系统建模方法的研究重点	21
1.5.5 复杂系统建模方法的主要类型	22
1.5.6 系统模型的简化	23
第 2 章 概念建模方法	24
2.1 引言	24
2.2 概念建模现状	25
2.3 概念建模过程	26
2.4 概念建模方法	27
2.4.1 基于实体—关系的概念建模方法	27
2.4.2 基于面向对象的概念建模方法	28
2.4.3 基于本体的概念建模方法	31

2.5	常用概念建模语言	33
2.5.1	基于 UML 的概念建模	34
2.5.2	基于 XML 的概念建模	36
2.5.3	基于 IDEF 的概念建模	38
2.6	概念模型在仿真中的应用	40
第 3 章	系统的数学描述	43
3.1	引言	43
3.2	系统的抽象化与形式化描述	43
3.2.1	系统的形式化描述	44
3.2.2	系统模型的几种描述水平	45
3.2.3	特定的系统模型	46
3.2.4	系统研究中的基本假定	49
3.3	确定型数学模型	50
3.3.1	连续时间模型	50
3.3.2	离散时间模型	56
3.4	随机型数学模型	58
3.4.1	随机噪声及其数学模型	58
3.4.2	系统随机型数学模型	61
3.5	等价模型及模型的规范型	63
第 4 章	连续系统建模方法	66
4.1	引言	66
4.2	微分方程的机理建模方法	67
4.2.1	建模步骤	67
4.2.2	建模示例	67
4.2.3	非线性系统模型的线性化	73
4.3	状态空间模型的建模方法	79
4.3.1	根据物理学定律直接建立状态空间模型	79
4.3.2	由微分方程建立状态空间模型	82
4.3.3	由传递函数建立状态空间模型	87
4.3.4	状态方程的标准化	92
4.4	变分原理的建立方法	93
4.4.1	引言	93
4.4.2	变分原理建立与变换的系统途径	94
4.4.3	变分原理建模示例	97
第 5 章	离散事件系统建模方法	105
5.1	引言	105
5.1.1	离散事件系统建模术语	105
5.1.2	离散事件系统建模结构	107
5.2	随机数的产生	108

5.2.1	均匀分布随机数的产生	108
5.2.2	非均匀分布随机数的产生	109
5.3	随机数性能检验	112
5.3.1	引言	112
5.3.2	均匀性检验	113
5.3.3	独立性检验	117
5.3.4	矩检验法	121
5.4	实体流图法	123
5.4.1	实体流图	123
5.4.2	模型的人工运行	126
5.5	活动周期图法	126
5.5.1	活动周期图	127
5.5.2	实体流图与活动周期图的比较	131
5.6	Petri 网法	132
5.6.1	Petri 网的基本概念	132
5.6.2	Petri 网的行为特性及其分析方法	141
5.6.3	高级 Petri 网	148
第 6 章	随机变量模型建模方法	156
6.1	引言	156
6.2	分布类型假设	156
6.3	分布参数估计	158
6.4	分布假设检验	159
第 7 章	基于系统辨识的建模方法	164
7.1	系统辨识概述	164
7.1.1	系统辨识的定义	164
7.1.2	系统辨识的有关概念	165
7.1.3	系统辨识的基本过程	165
7.1.4	系统辨识方法	167
7.2	模型参数的辨识方法	167
7.2.1	最小二乘法	167
7.2.2	广义最小二乘法	175
7.3	模型阶次的辨识方法	179
7.3.1	Hankel 矩阵法	180
7.3.2	行列式比(或积矩矩阵)法	181
7.3.3	残差平方和法	182
7.3.4	信息准则法	183
7.3.5	最终预报误差准则法	184
7.3.6	小结	185
7.4	闭环系统辨识	186

第8章 基于人工神经网络的建模方法	187
8.1 人工神经网络简介	187
8.1.1 人工神经元模型	187
8.1.2 人工神经网络的分类	189
8.1.3 人工神经网络的工作过程	190
8.1.4 人工神经网络的学习方式	191
8.1.5 人工神经网络的学习规则	191
8.1.6 人工神经网络的几何意义	193
8.1.7 人工神经网络建模的特点	194
8.2 BP网络	194
8.2.1 BP网络结构	194
8.2.2 BP学习算法	194
8.2.3 BP算法的计算步骤	197
8.2.4 BP算法示例	198
8.2.5 BP算法的不足及其改进	200
8.2.6 BP网络工程应用中的若干问题	202
8.3 反馈式神经网络	205
8.3.1 连续型 Hopfield 网络	205
8.3.2 离散型 Hopfield 网络	210
8.4 人工神经网络应用示例	214
8.4.1 人工神经网络用于 CGF 智能行为建模	214
8.4.2 人工神经网络用于规则搜索	217
8.4.3 人工神经网络用于火力分配	219
8.4.4 人工神经网络用于系统辨识	220
第9章 基于灰色系统理论的建模方法	223
9.1 引言	223
9.1.1 灰色系统的概念与基本原理	223
9.1.2 几种不确定性方法的比较	224
9.1.3 灰色系统理论在横断学科群中的地位	225
9.1.4 灰色系统建模基础	225
9.2 GM(1,1)模型	232
9.2.1 灰色微分方程	232
9.2.2 GM(1,1)模型的建立	233
9.2.3 模型精度的检验	234
9.2.4 GM(1,1)模型群	238
9.2.5 GM(1,1)模型的适应范围	239
9.3 GM(1,1)的修正模型	240
9.3.1 残差 GM(1,1)模型	240
9.3.2 残差均值修正 GM(1,1)模型	242

9.3.3 尾部数列 GM(1,1)修正模型	243
9.4 直接灰色模型 DGM(1,1)	245
9.4.1 模型描述	245
9.4.2 模型应用	246
9.5 其他灰色模型	247
9.5.1 GM(1,N)	247
9.5.2 GM(0,N)	249
9.5.3 GM(2,1)	251
第 10 章 定性建模方法	255
10.1 引言	255
10.2 模糊建模方法	255
10.2.1 模糊集合与隶属度函数	255
10.2.2 隶属度函数的表示形式	256
10.2.3 基本运算规则	258
10.2.4 模糊矩阵 $\tilde{R}$	258
10.2.5 模糊矩阵的运算	259
10.2.6 模糊推理	259
10.2.7 模糊建模实例	265
10.3 Kuipers 定性建模方法	270
10.3.1 可推理函数	270
10.3.2 约束的定义	270
10.3.3 定性微分方程	271
10.3.4 建模示例	271
10.4 基于 SDG 的定性建模方法	272
10.4.1 引言	272
10.4.2 SDG 描述	273
10.4.3 SDG 建模方法	275
10.4.4 SDG 的推理机制	275
10.4.5 SDG 方法的优缺点	275
10.4.6 SDG 方法应用	276
第 11 章 基于系统动力学的建模方法	280
11.1 引言	280
11.2 系统动力学建模基础	280
11.2.1 系统的因果关系	280
11.2.2 系统动力学模型的构造	282
11.2.3 系统流图的基本构成	284
11.2.4 系统流图设计中的几个问题	285
11.3 系统动力学建模方法	285
11.3.1 系统动力学建模的主要环节	285

11.3.2	系统动力学建模步骤	287
11.4	系统动力学建模实例	288
11.4.1	系统定义	289
11.4.2	因果关系图	289
11.4.3	系统流图	289
11.5	系统动力学建模总结	291
11.5.1	系统动力学建模方法的优势	291
11.5.2	系统动力学建模方法的不足	291
第 12 章	基于层次分析法的建模方法	292
12.1	引言	292
12.2	基本层次分析法	292
12.2.1	层次分析法的步骤	292
12.2.2	递阶层次结构的建立	292
12.2.3	构造两两比较的判断矩阵	294
12.2.4	单一准则下元素相对排序权重计算	294
12.2.5	判断矩阵的一致性检验	296
12.2.6	计算各层元素对目标层的总排序权重	296
12.3	群组层次分析法	298
12.3.1	引言	298
12.3.2	群组决策综合方法	299
12.4	灰色层次分析法	300
12.4.1	步骤	300
12.4.2	示例	302
12.5	模糊层次分析法	308
12.5.1	引言	308
12.5.2	方法描述	309
12.5.3	应用	310
第 13 章	基于 Agent 的行为建模方法	313
13.1	引言	313
13.2	Agent 的基本概念	313
13.2.1	Agent 的定义	313
13.2.2	Agent 与对象	315
13.2.3	多 Agent 系统	316
13.2.4	Agent 的作用	317
13.3	基于 Agent 的行为建模方法	318
13.3.1	基于 Agent 的建模思想	318
13.3.2	Agent 生命周期	319
13.3.3	基于 Agent 的行为建模方法的一般过程	319
13.3.4	多 Agent 系统的体系结构	324

13.4 建模实例——多 Agent 水面舰艇 CGF 系统	326
13.4.1 系统结构	326
13.4.2 主要 Agent 的模型结构及功能	328
13.4.3 通信与协作机制	331
13.4.4 模糊控制机理	332
13.5 Agent 的实现	339
13.5.1 采用面向对象技术实现 Agent	339
13.5.2 采用面向 Agent 的软件开发工具实现 Agent	340
13.5.3 水面舰艇 CGF 系统的运行	341
参考文献	354

第 1 章 绪 论

1.1 系统与模型

1.1.1 系统

“系统”是一个内涵十分丰富的概念,是关于“系统”研究的各个学科所共同使用的一个基本概念,是系统科学和系统论研究的一个重要内容。

G.戈登(G.Gordon)在《系统仿真》一书中写道:“系统这个术语在各个领域用得很广,很难给它下定义。一方面要使该定义足以概括它的各种作用,另一方面又要能简明地将定义应用于实际。”正因为很难用简明扼要的文字准确地对“系统”一词加以定义,故在国内外学术界出现了从不同角度对系统进行的种种不同定义。这里我们给出一种普遍能接受的定义:

系统是由互相联系、互相制约、互相依存的若干组成部分(要素)结合在一起形成的具有特定功能和运动规律的有机整体。

应当指出,这里的系统是广义的,大至无垠的宇宙世界,小至原子分子,我们都可以称之为系统。

图 1.1 所示的是一个电炉温度调节系统。在该系统中,给定温度值与温度计所测量到的实际温度进行比较,得到温度的偏差,该偏差信号被送到调节器中控制电炉的电压,从而实现控制电炉温度的目的。

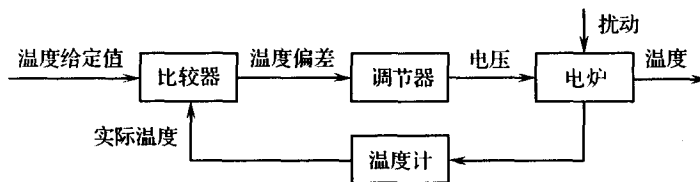


图 1.1 电炉温度调节系统

图 1.2 所示为商品销售系统。在这个系统中,各部门之间既互相独立,又互相联系,经理部负责各个部门之间的协调,并作出最终决策,以期使整个系统获得最大效益。

上述两个系统的物理性质、功能和构成截然不同,然而它们却具有以下共性:

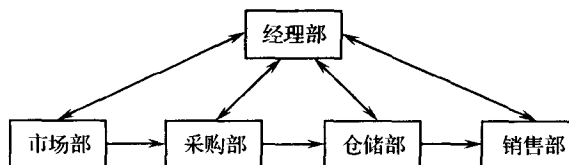


图 1.2 商品销售系统

(1) 系统是实体的集合

所谓实体是指组成系统的具体对象。例如电炉调节系统中的比较器、调节器、电炉、温度计,商品销售系统中的经理、部门、商品、货币、仓库等都是实体。系统中的各个实体既具有一定的相对独立性,又相互联系构成一个整体,即系统。

(2) 组成系统的实体具有一定的属性

所谓属性是指实体所具有的全部有效特性(如状态、参数等)。在电炉温度调节系统中,温度、温度偏差、电压等都是属性,商品销售系统中部门的属性有人员的数量、职能范围,商品的属性有生产日期、进货价格、销售日期、售价等。

(3) 系统处在活动之中

所谓活动是指实体随时间推移而发生的属性变化。例如,电炉温度调节系统中的主要活动是控制电压的变化,而商品销售系统中的主要活动有库存商品数量的变化、零售商品价格的生长等。

各种系统,不论是简单的还是复杂的,总是由一些实体组成的,而每一实体又有其属性,整个系统有其主要活动。因此,实体、属性和活动构成了系统的三大要素。

系统是在不断地运动、发展、变化的。由于组成系统的实体之间的相互作用而引起的属性的变化,使得在不同时刻,系统中实体与属性都可能会发生变化,这种变化通常用状态的概念来描述。在任意时刻,系统中实体、属性以及活动的信息总和称为系统在该时刻的状态,用于表示系统状态的变量称为状态变量。

系统并不是孤立存在的。自然界中的一切事物都存在着相互联系和相互影响。任何一个系统都将经常受到系统之外因素变化的影响,这种对系统的活动结果产生影响的外界因素称为系统的环境。对一个系统进行分析时,必须考虑系统所处的环境,而首要的便是划分系统与其所处的环境之间的界线,即系统的边界。系统的边界包含系统中的所有实体。

系统边界的划分在很大程度上取决于系统研究的目的。例如,在商品销售系统中,如果仅考虑商品库存量的变化情况,那么系统只需包含采购部门、仓库和销售部门即可。但如果要研究商品进货与销售的关系时,系统中还应包括市场调查部门,因为商品销售状况及对进货的影响这部分职能是由该部门完成的。

根据研究对象与目的的不同,系统可大可小,而且系统本身也可以由一系列相互作用的子系统构成,子系统又可以由更低一级的子系统构成,并且系统和它的部分环境又构成一个更大的系统,这就是所谓的系统等级结构。

系统研究包括系统分析、系统综合和系统预测的三个方面。研究系统,首先需要明确研究目的进而描述清楚所研究系统的三要素(实体、属性和活动)及环境。也只有在对实体、属性、活动和环境作了明确描述之后,系统才是确定的。

关于系统的描述将在“3.2 系统的抽象化和形式化描述”中还要作进一步的讨论。

系统的分类方法很多,按照不同的分类方法可以得到各种不同类型的系统。根据本课程的需要,这里只列出如下几种分类方法。

(1) 按系统的特性分类

可分为工程系统和非工程系统。

所谓工程系统是指人们为了满足某种需要或实现某个预定的功能,采用某种手段构

造而成的系统,如机械系统、电气系统、化工系统、武器系统等。工程系统有时也称作物理系统。

所谓非工程系统是指由自然和社会在发展过程中形成的,被人们在长期的生产劳动和社会实践中逐步认识的系统,例如社会系统、经济系统、管理系统、交通系统、生物系统等,非工程系统有时也称作非物理系统。

(2) 按照系统中起主要作用的状态随时间的变化分类

可分为连续系统和离散事件系统。

状态随时间连续变化的系统称作连续系统。

状态的变化在离散的时间点上发生,且往往又是随机的,这类系统称作离散事件系统。

(3) 按照对系统内部特性的了解程度分类

可分为白色系统、黑色系统和灰色系统。

内部特性全部已知的系统称作白色系统。

内部特性全部未知的系统称作黑色系统。

内部特性部分已知,部分未知的系统称作灰色系统。

(4) 按照系统的物理结构和数学性质分类

可分为线性系统和非线性系统、定常系统、时变系统、集中参数系统、分布参数系统、单输入单输出系统和多输入多输出系统等。

(5) 按系统内子系统的关联关系分类

根据系统的本质属性,从系统内子系统的关联关系角度分为简单系统与复杂系统。

简单系统是指组成系统数量较少,因而它们之间的关系也比较简单,或尽管子系统数量多或巨大,但它们之间关联关系比较简单,则称为简单系统。按照子系统的数量级,简单系统还可分为小系统(子系统数量为几个、十几个)、大系统(子系统数量为几十个、上百个),以及简单巨系统(子系统数量成千上万、上百亿、万亿)。对于某些非生命系统,例如一台测量仪器可视为一个小系统,这个类系统用传统的数学、物理学、化学可以很好地描述;一个仅考虑产品生产的普通工厂可视为一个大系统,可以用控制论、信息论和运筹学的部分内容加以研究。总之研究这些简单系统可以将各子系统之间的相互作用直接综合为整体系统的功能。简单巨系统的子系统数量巨大,但子系统差别较少,因而反映出此类系统的子系统种类少,关联关系比较简单。例如激光系统就是简单巨系统,中国的围棋也可视为简单巨系统。这类系统无法用研究简单小系统和大系统的方法解决,连巨型计算机也不够使用。对于这样的系统,由于子系统往往具有共同特点,因此可把亿万个分子组成的巨系统的功能略去细节,而用19世纪后半叶发展起来的统计力学进行概括处理。处理这种系统的理论近二十年来发展很快,如耗散结构理论和协同学。

另一类系统称为复杂系统。它们最主要的特征是系统具有众多的状态变量,反馈结构复杂,输入与输出呈现非线性特征,或将上述特点简单称为高阶次、多回路、非线性。如果复杂系统中的子系统数量极大,种类又很多,它们之间的关联关系又很复杂,就称为复杂巨系统,尽管这类系统有客观的确定规律,但子系统的差别造成了规律的多样化。目前研究复杂巨系统还处于探索阶段,方法还很不成熟。例如人体系统、地理系统、星系系统都是复杂巨系统。这些系统在结构、功能、行为、演化等方面,十分复杂,至今仍有大量问