



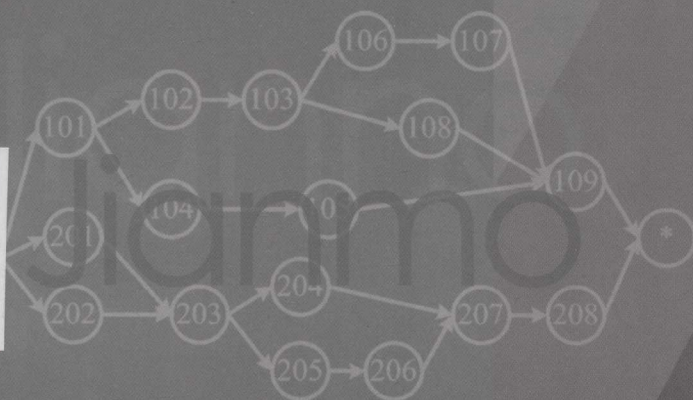
SHENGCHAN XITONG JIANMO YU

FANGZHEN

生产系统建模与仿真

罗亚波 / 著

3-39
1



华中科技大学出版社

<http://www.hustp.com>

880030310

内 容 简 介

“生产系统建模与仿真”是工业工程专业的一门主干课程,既涉及较深的数学理论知识,又涉及其在生产运作领域的应用问题。全书分为四大部分:第一章至第三章介绍了系统建模基础,阐述了系统建模的一般方法和步骤,以及系统建模中的概率问题;第四章和第五章介绍了复合形法和惩罚函数法两类典型的传统优化方法,及其在生产系统建模与优化方面的应用;第六章至第八章介绍了遗传算法、人工神经网络、蚁群算法等仿生优化方法,并以车间布局、单机作业调度、物流路径优化等生产系统中的典型问题为例,阐述了其在生产系统建模与优化方面的应用;第九章以自主研发的生产系统调度优化与仿真软件为例,阐述了生产系统仿真的基本原理与方法。

本书可以作为工业工程专业本科生和研究生教学用书,也可以作为管理学科相关专业的教材,并给企业生产管理人员提供参考。

图书在版编目(CIP)数据

生产系统建模与仿真/罗亚波著. —武汉:华中科技大学出版社,2014.3
ISBN 978-7-5609-9806-0

I. ①生… II. ①罗… III. ①生产管理-系统建模-高等学校-教材 ②生产管理-系统仿真-高等学校-教材 IV. ①F273-39

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 055750 号

生产系统建模与仿真

罗亚波 著

责任编辑:吴 晗

封面设计:刘 卉

责任校对:何 欢

责任监印:张正林

出版发行:华中科技大学出版社(中国·武汉)

武昌喻家山 邮编:430074 电话:(027)81321915

录 排:华中科技大学惠友文印中心

印 刷:武汉科源印刷设计有限公司

开 本:710mm×1000mm 1/16

印 张:7.75

字 数:167千字

版 次:2014年4月第1版第1次印刷

定 价:39.80元



本书若有印装质量问题,请向出版社营销中心调换
全国免费服务热线:400-6679-118 竭诚为您服务
版权所有 侵权必究

前言

工业工程(industrial engineering, IE)是从科学管理的基础上发展起来的一门应用型工程专业技术。工业工程学科的发展在发达国家已有悠久的历史,美国工业工程学会(AIIE)早在 1955 年就提出了对工业工程的定义:“工业工程是对人、物料、设备、能源和信息等所组成的集成系统,进行设计、改善和实施的一门学科,它综合运用数学、物理学和社会科学的专门知识和技术,结合工程分析和设计的原理与方法,对该系统所取得的成果进行确认、预测和评价。”

同时,工业工程专业的教育体系在发达国家也已比较成熟,已经依据不同的专业背景,形成了很多独具特色的工业工程专业,如:美国普度大学的以农业为背景的工业工程专业,一直处于世界领先地位;美国密歇根大学的工业工程专业则是以制造业为背景。总体而言,以美国、日本为代表的发达国家,已经形成了与其工业发展水平相应的成熟的工业工程教育体系。

相比较而言,工业工程教育在我国则还处于起步阶段。直至 20 世纪 90 年代末期,我国才有十多所大学建立了首批工业工程专业。随着我国工业的发展,企业对工业工程的专业需求也日趋急迫,早期的工业工程专业毕业生出现了供不应求的局面。相应的,近十余年来,国内大部分大学均已开设了工业工程专业,工业工程已经成为我国发展最快的专业之一。

然而,由于工业工程专业教育在我国尚处于起步阶段,教材的撰写缺乏借鉴和参考的资源;同时,一些课程涉及的理论问题较深,要以研究案例为基础,对工业工程专业教材的撰写,要以该领域长期的研究成果为依据。因此,与我国工业发展阶段相适应的专业教材,目前还比较欠缺。

“生产系统建模与仿真”是工业工程专业的一门主干课程,既涉及较深的数学理论知识,如排队论、系统建模、优化理论、仿真方法等;又涉及其在生产运作领域的应用问题,如生产系统布局优化、作业车间调度问题等。目前,国内关于该课程的成熟教材还很少。

多年来,笔者主讲课程“生产系统建模与仿真”,并依托国家自然科学基金(NO. 51375357, NO. 50705072)、教育部属高校自主创新研究基金(中央高校基本科研业务费专项资金资助 NO. 2012-II-015)、湖北省青年杰出人才基金、武汉市青年科技晨光计划等基金项目,在相关领域开展了长期的研究工作。本书就是通过整理该课程的教案,并结合多年来在该领域的研究成果撰写而成的。

全书主要内容如下。

第一章,绪论。介绍了生产系统建模与仿真在国内外的研究进展、重点和难点,以及本书的体系结构。

第二章,生产系统建模基础。介绍了系统建模的基础理论,通过对作业车间系统

的详细解析,阐述了作业车间系统的建模理论与方法。

第三章,生产系统的概率分析方法。介绍了基础的概率理论,通过典型的例子,讲解了这些理论在生产系统分析中的应用,并初步介绍了求解排队问题的基本理论与方法。

第四章,基于复合形法的生产系统求解方法。介绍了复合形法的基本思想与步骤,通过分析作业系统的主要特征,针对作业调度优化这一复杂的组合优化问题,提出了复合形法的改进策略和求解步骤。

第五章,基于惩罚函数法的生产系统求解方法。介绍了惩罚函数法的一般原理和方法,并针对生产系统建模与优化问题,提出了针对性的改进策略,阐述了基于改进惩罚函数法求解作业调度问题的完整过程。

第六章,基于遗传算法的车间系统布局优化。介绍了遗传算法的基本原理和方法,并以生产系统布局优化问题为例,介绍了遗传算法的改进策略,以及基于改进遗传算法的生产系统数学建模、优化与仿真过程。

第七章,基于人工神经网络的单机作业调度。介绍了神经网络的基本原理,着重介绍了 Hopfield 神经网络及其改进算法。构造了作业系统单机调度模型,并以一个实例介绍了改进的 Hopfield 神经网络在单机调度中的应用方法。

第八章,基于蚁群算法的工序路径建模与优化方法。介绍了蚁群算法的基本原理,以经典的 TSP 为例,介绍了蚁群算法求解 TSP 的方法。从特殊 TSP 的视角,详细介绍了复杂关联作业调度问题的转换和求解方法。

第九章,优化与仿真系统的软件开发及实例分析。介绍了调度优化与仿真系统的开发及其功能的实现过程,并通过实例分别介绍了复合形法、惩罚函数法及基于拓扑排序的算法对求解调度优化问题的可行性及求解特征。

通过本书,既可以系统学习建模、优化与仿真实理论,又可以了解这些理论在生产系统设计中的应用方法。本书可以作为工业工程专业本科生和研究生的教学用书,也可以作为管理学科相关专业的教材,并为企业生产管理人员提供參考。

凌鹤、邹世伟、林鑫、唐铭春、陈冲、禹晓蕾、赵保华、袁慧萍等协助完成了本书中相关的软件研发与实验工作,邹淳、陈星汝、刘慧玲、张仕坤、夏燕、汪洋、孙权超等协助完成了相关章节的编辑工作。在此一并表示感谢!

当然,一本成熟的教科书,需要长时间的教學互动、磨合和积累,《生产系统建模与仿真》也不例外。我们将在今后的教學实践中,进一步完善本书,并恳請国内外同仁多提宝贵意見。

罗亚波

2014年3月1日

于武汉理工大学

第一目 绪 论

第一章 绪论	(1)
第二章 生产系统建模基础	(6)
第三章 生产系统的概率分析方法	(21)
第四章 基于复合形法的生产系统求解方法	(31)
第五章 基于惩罚函数法的生产系统求解方法	(43)
第六章 基于遗传算法的车间系统布局优化	(56)
第七章 基于人工神经网络的单机作业调度	(71)
第八章 基于蚁群算法的工序路径建模与优化方法	(91)
第九章 优化与仿真系统的软件开发及实例分析	(104)
参考文献	(117)

地运行,系统内将形成具有专有目标功能的子系统,以实现局部控制和独立控制。如资源规划系统、质量控制系统、物流控制系统、库存管理系统等。

(3) 生产系统是一个信息处理系统。生产系统包含各类信息流,如人工信息、原料信息、设备状态信息、生产计划信息。由于这些信息流之间具有关联特征,如何有效地处理这些信息流,这是生产系统的重要内容。

(4) 生产系统是劳动转换系统。无论是体力密集型,还是科技密集型生产系统,其内容都是将人类的脑力或体力劳动融入生产系统,通过产品体现出其价值。

(5) 生产系统是知识转化系统。无论是简单生产系统,还是复杂生产系统,其运作过程都是以人类的知识为基础的。没有知识作为基础,原料无法最终转换为有使用价值的产品。

随着人类社会的发展、科技水平的进步,生产系统包含了越来越多的科技知识和越来越复杂的信息流。当生产系统复杂到一定程度的时候,对生产系统进行合理的优化,就成了提升生产系统效率的必然途径。对生产系统进行建模与仿真的目的,就是实现生产系统的优化。

二、生产系统的分类

按生产系统的组织形式来分类,可以将生产系统分为作业车间系统、流水车间系统、生产线三大类。

(1) 作业车间系统(job shop system)。作业车间系统是通用加工系统,没有固定的流程和专业化产品生产的目标,其运作过程以作业任务为对象。一般的普加工车间就是典型的作业加工系统,可以描述为,有 n 个待加工工件,每个工件的加工任

第一章 绪 论

一、生产系统的特征

生产系统是指由人、生产原料、生产工具共同组成的、能将生产原料转换为产品的系统。由一个人、简单工具和原料可以组成一个手工作坊式的简单生产系统；包含复杂 workflow、物质流、信息流和复杂约束关系的大型现代化车间，则是复杂生产系统。无论是简单系统还是复杂系统，生产系统都具有以下典型特征。

(1) 生产系统具备人、生产原料、生产工具三要素。人是生产系统的主导要素，通过劳动来控制或操作生产原料或生产工具，从而达到将生产原料转换为产品的目标。

(2) 生产系统具有层次性。当生产系统达到一定的复杂度，为了使系统更有效地运作，系统内将形成具有专有目标功能的子系统，以实现逐层控制和独立控制。如资源规划系统、质量控制系统、物流控制系统、库存管理系统等。

(3) 生产系统是一个信息处理系统。生产系统包含各类信息流，如人工信息、原料信息、设备状态信息、生产计划信息。由于这些信息流之间具有关联特征，如何有效地处理这些信息流，这是生产系统的重要内容。

(4) 生产系统是劳动转换系统。无论是体力密集型、还是科技密集型生产系统，其内容都是将人类的脑力或体力劳动融入生产系统，通过产品体现出其价值。

(5) 生产系统是知识转化系统。无论是简单生产系统，还是复杂生产系统，其运作过程都是以人类的知识为基础的。没有知识作为基础，原料无法最终转换为有使用价值的产品。

随着人类社会的发展、科技水平的进步，生产系统包含了越来越多的科技知识和越来越复杂的信息流。当生产系统复杂到一定程度的时候，对生产系统进行合理的优化，就成了提升生产系统效率的必然途径。对生产系统进行建模与仿真的目的，就是实现生产系统的优化。

二、生产系统的分类

按生产系统的组织形式来分类，可以将生产系统分为作业车间系统、流水车间系统、生产线三大类。

(1) 作业车间系统(job shop system)。作业车间系统是通用加工系统，没有固定的流程和专业化产品生产的目标，其运作过程以作业任务为对象。一般的普加工车间就是典型的作业加工系统，可以描述为：有 i 个待加工工件，每个工件的加工任

务由若干相互关联的工序组成,将这些工序分配到 m 类 n 台设备进行加工,并在满足工序之间的复杂关联约束关系的前提下,使作业系统效率最大。

(2) 流水车间系统(flow shop system)。流水车间系统一般是专用制造系统,主要用于处理标准化、流程化、连续的物流。作业人员 and 作业工具对每批生产任务进行同样的操作,生产固定的产品。流水车间一般是大批量生产车间或具有连续生产布局的车间,车间以标准化生产流程为依据进行布局。流程标准化的工业,如装配、喷涂和化工生产等,这些是流水车间系统的典型例子。

(3) 生产线(production line)。生产线是以生产固定产品或零部件为目标,并围绕目标而组织形成的固定的设备和专业人员。生产线的种类较多:按范围大小分为产品生产线和零部件生产线,按节奏快慢分为流水生产线和非流水生产线,按自动化程度分为自动化生产线和非自动化生产线。与流水车间相比,生产线具有更高的专业化程度,更明确的产品生产特征。

相比较而言,作业车间系统具有更显著的约束松散性和关联复杂性,而流水车间系统和生产线都可以看作是特殊约束条件下的作业系统。因此,本书将主要以作业车间系统作为对象,来阐述生产系统建模与仿真的一般理论与方法。

三、作业车间系统基本数学模型

1. 整数规划模型

作业车间调度问题(JSP: job shop scheduling problem)往往作为整数规划模型来建模,下面简单给出一个 $n/m/G/c_{\max}$ 调度问题的常用数学描述。

$$\min \max_{1 \leq k \leq m} \{ \max_{1 \leq i \leq n} c_{ik} \} \quad (1-1)$$

$$\text{s.t. } c_{ik} - p_{ik} + M(1 - a_{ihk}) \geq c_{ih}, \quad i = 1, 2, \dots, n, \quad h, k = 1, 2, \dots, m$$

$$c_{jk} - c_{ik} + M(1 - x_{ijk}) \geq p_{ik}, \quad i, j = 1, 2, \dots, n, \quad k = 1, 2, \dots, m$$

$$c_{ik} \geq 0, \quad i = 1, 2, \dots, n, \quad k = 1, 2, \dots, m \quad (1-2)$$

$$x_{ijk} = 0 \text{ 或 } 1, \quad i, j = 1, 2, \dots, n, \quad k = 1, 2, \dots, m$$

式(1-1)表示目标函数(makespan);式(1-2)表示工艺约束条件决定的每个工件的操作先后顺序,以及加工每个工件的每台机器的先后顺序。式中,符号 c_{ik} 和 p_{ik} 分别为 i 工件在机器 k 上的完成时间和加工时间; M 是一个足够大的正数; a_{ihk} 和 x_{ijk} 分别为指示系数和指示变量,其意义为

$$a_{ihk} = \begin{cases} 1, & \text{若机器 } h \text{ 先于机器 } k \text{ 加工工件 } i \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (1-3)$$

$$x_{ijk} = \begin{cases} 1, & \text{若工件 } i \text{ 先于工件 } j \text{ 在机器 } k \text{ 上加工} \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (1-4)$$

2. 线性规划模型

作业车间调度问题必须要满足以下约束条件:

(1) 每个作业在机器上的加工次序给定;

假设(2) 每台机器在任何时刻最多只能加工一个作业。

由线性规划模型一般有如下假定: $J = \{1, 2, \dots, n\}$ 代表工件集合; $M = \{1, 2, \dots, m\}$ 代表机器集合; $V = \{0, 1, \dots, r+1\}$ 表示工序集合, 其中, 0 和 $r+1$ 是“开始”和“结束”哑元工序; A 为受约束条件(1) 优先关系限制的工序对的集合; V_k 为在机器 $k(k \in M)$ 上加工的约束工序对的集合, $E_k \subset V_k \times V_k$, 因此要受约束条件(2) 限制; d_i 和 $t_i(i \in V)$ 分别代表工序 v 的加工时间(固定)和开工时间(可变), 工序 0 和工序 $r+1$ 的加工时间都为 0, 即 $d_0 = d_{r+1} = 0$ 。则作业车间调度问题可以描述为

$$\min t_{r+1}$$

$$t_j - t_i \geq d_i \quad (i, j \in A) \quad (1-5)$$

$$t_j - t_i \geq d_i \vee t_i - t_j \geq d_j \quad (i, j \in E_k, k \in M) \quad (1-6)$$

$$t_i \geq 0 \quad (i \in V) \quad (1-7)$$

从式(1-7)可以得出, 当 $t=0$ 时表示工序的初始运行时间为 0。任何满足以上约束条件的一组 $t_i(i=0, 1, \dots, r+1)$ 都称为一个调度, 问题的目标就是需要找出一个 t_{r+1} 尽可能小的调度。

3. 析取图模型

析取图是描述 JSP 的常用工具。对于 n 个工件、 m 台机器(共 N 个操作)的 JSP, 所对应的析取图 $G=(V, A, E)$ 如图 1-1 所示。其中, V 为所有操作构成的顶点集; A 为通常的连接边的集合; E 为 m 条子边构成的弧集, 子弧(虚线)表示同一机器上加工各操作的连接。

图 1-1 给出了一个四个工件在四台机器上加工, 共有 12 个工序的实例。工件 1 的加工顺序为(1, 2, 3, 4), 工件 2 的为(5, 6, 7), 工件 3 的为(8, 9), 工件 4 的为(10, 11, 12)。图中节点对应工序, 有向边对应工件中的工序约束关系, 边上的数字为加工时间, 分离边对应在相同机器上执行的工序对。

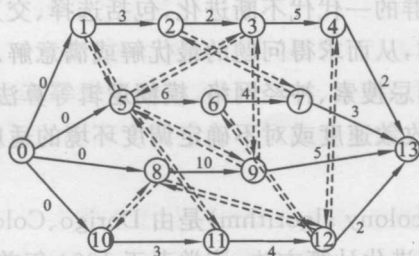


图 1-1 四个工件、四台机器的 JSP 析取图

四、作业车间调度问题的研究现状

对 JSP 的研究已经有几十年的历史, 它是一个非常复杂的问题, 学者的研究只集中在某些特定方面, 至今尚未形成一套系统的理论与方法。一般而言, 作业车间调度方法大致分为两类: 一类是传统的最优化方法, 另一类是仿生算法。

传统最优化方法主要包括线性规划(LP: linear programming)、非线性规划(NLP: nonlinear programming)、动态规划、拉格朗日乘子法以及分枝定界法等。由于很多实际问题不能以简单的线性关系精确表达,LP的应用范围还很有限。在JSP中,分枝定界法的研究主要集中在分枝方法和上下界确定方法上。动态规划是由Bellman等于1952年提出的求解多阶段决策过程优化问题的一种最优化方法,在JSP中动态规划方法研究主要涉及步长改进方法和状态变量维数化简方法等。拉格朗日松弛法是一种求解约束优化问题的近似优化方法,近年来受到学术界的广泛重视。

尽管传统的最优化方法比较成熟,但只能有效地解决小规模优化问题。对于复杂的大规模生产调度问题,随着任务数的增加,其解析模型的复杂度呈几何级数增加,最优化算法难以满足求解的要求。

与传统优化方法相比,仿生方法对于求解复杂系统有显著的优势,也成为近年来研究的热点。仿生方法是从对生物界的优化机制的模拟出发,来解决复杂系统的优化问题。常见的仿生算法包括以下几类。

1. 人工神经网络

神经网络(NN: neural network)具有自组织、自学习、鲁棒性强等优点,可作为联想记忆和优化计算工具。Y. P. S. Foo和Y. Takefuji最早提出用Hopfield网求解JSP,是一个比较有影响的方法。2000年,Yang, S. X等采用了满足约束条件的神经网络和启发式算法用于通用车间的调度。将神经网络与其他启发式方法相结合仍然是当前研究的热点。

2. 遗传算法

遗传算法(GA: genetic algorithm)是由Holland在1975年提出的一类基于自然遗传和进化过程的随机搜索算法。它在JSP中将问题的求解表示成染色体的适者生存过程,通过染色体种群的一代代不断进化,包括选择、交叉和变异等操作,最终收敛到“最适应环境”的个体,从而求得问题的最优解或满意解。近年来,一些学者尝试将免疫方法、模拟退火、禁忌搜索、神经网络、模糊逻辑等算法融合到遗传算法的各个环节中去,以提高算法的收敛速度或对不确定调度环境的适应性。

3. 蚁群算法

蚁群算法(ACC: ant colony algorithm)是由Dorigo、Colorni等于1991年提出的一种模拟蚁群觅食行为的进化计算方法,该学者于1994年首先将蚁群算法应用于求解JSP,在JSP中蚁群算法研究主要涉及状态转移策略、信息素更新方法、邻域拓扑结构设计方法以及算法参数确定方法等。另外,一些学者针对不同类型的生产过程调度问题,将遗传算法、免疫算法、禁忌搜索等方法与蚁群算法相融合,以提高算法的搜索效率和解的性能。

五、小结

随着生产系统的日益复杂,对生产系统进行设计与优化,从而提升生产系统的运作效率,已经越来越得到生产管理者的重视。生产系统的建模与仿真,是对生产系统进行优化的重要手段。本书将以作业车间系统为对象,从系统建模、系统优化、系统仿真三个方面,由浅入深地阐述生产系统建模与仿真的基础理论和一般方法。

1. 系统概念的理解

系统是由相互作用和相互依赖的若干组成部分结合而成的、具有特定功能的有机整体,且这个整体具有其本身的功能,它的功能不是组成它的那些部分的功能的简单相加,而是它们的有机结合。系统内部各要素之间相对稳定的联系方式或结合方式,就是系统的结构。例如钟表是由齿轮、发条、指针等零件按一定的方式装配而成的,但各零件简单拼凑在一起不能成为一个有行实施功能的整体。系统内部各要素之间相对稳定的联系方式或结合方式,就是系统的结构。例如钟表是由齿轮、发条、指针等零件按一定的方式装配而成的,但各零件简单拼凑在一起不能成为一个有行实施功能的整体。

系统有一定的功能,或者说系统都有特定的功能。系统的功能是指系统在与外部环境相互联系和相互作用时所表现出来的、可区别于其他系统的功能。系统的功能是实现信息的收集、传递、储存、加工、维护和使用,辅助决策和进行控制,帮助企业实现目标。

2. 系统建模基础

系统建模是指根据系统的实际情况,抽象出可以通过数学或软件方法求解的仿真与优化模型。凡是用模型描述描述到的因果关系或相互关系的过程都属于建模。建模的方法有多种,可以根据系统的机理来建模,也可以通过系统的实验或统计数据的处理,并根据关于系统的知识和经验来建模。

系统建模主要用于三个方面:一是用于系统的分析和设计,二是用于系统的仿真,三是用于系统的优化。系统建模是系统工程的重要组成部分,也是系统工程的核心。系统建模的目的是为了建立系统的模型,以便对系统进行分析和设计。系统建模的方法有多种,可以根据系统的实际情况,抽象出可以通过数学或软件方法求解的仿真与优化模型。系统建模的方法有多种,可以根据系统的实际情况,抽象出可以通过数学或软件方法求解的仿真与优化模型。

第二章 生产系统建模基础

一、系统建模的一般方法

1. 系统的概念

英文中系统(system)一词来源于古代希腊文(systema),意为部分组成的整体。一般系统论的创始人贝塔朗非将系统定义为:系统是相互联系、相互作用的诸元素的综合体。这个定义强调了元素间的相互作用,以及系统对元素的整合作用。中国科学家钱学森认为:系统是由相互作用、相互依赖的若干组成部分结合而成的具有特定功能的有机整体,而且这个有机整体又是它从属的更大系统的组成部分。可以说,一群有相互关联的个体组成的集合称为系统。

1) 系统定义的数学描述

可以这样对系统的定义进行数学描述:如果对象集 S 满足下列两个条件:

- (1) S 中至少包含两个不同元素;
- (2) S 中的元素按一定方式存在相互联系。

那么则称 S 为一个系统, S 的元素为系统的组成部分。

2) 系统的特点

系统具备以下三个特性。

- (1) 多元性:系统是多样性的统一,差异性的统一。

- (2) 相关性:系统不存在孤立元素组分,所有元素或组分间相互依存、相互作用、相互制约。

- (3) 整体性:系统是所有元素构成的复合统一整体。

满足以上数学描述,并具备以上三个特征的有机整体,就可以作为系统来进行建模和分析。

3) 系统的分类

按照形成和运行特征划分,系统可以分为以下三类。

- (1) 自然系统 系统内的个体按自然法则存在或演变,产生或形成一种群体的自然现象与特征。自然系统的典型特征是“自组织性”,即系统高度自治,并且通过自组织的方式协调运行,如生态平衡系统、生命机体系统、天体系统、物质微观结构系统等,就是典型的自然系统。人脑属于自然系统,是迄今我们所知道的最复杂的系统。

- (2) 人工系统 系统内的个体根据人为的、预先编排好的规则或计划好的方向运作,以实现或完成系统内每个个体不能单独实现的功能、性能与结果。人工系统的典型特征是“设计性”,即系统是以设计为基础而产生的,并且依据设计的规则协调运

行,如产品组件系统、自动控制系统、计算机系统、液压系统、教育系统、医疗系统等,都是典型的人工系统。

(3) 复合系统 复合系统是自然系统和人工系统的组合,它既具有一定的设计特征,又具有显著的自组织特征,如社会系统、交通系统、生产系统、经济系统等,这些系统在形成和运行过程中,经过了人为的设计,但是,由于系统所包含的元素存在复杂关联特征,使得系统在运行与演化过程中,并不能完全在人为设计的控制之内,而是具有自组织特征,这就形成了复合系统。

4) 系统概念的理解

我们可以从以下三个方面理解系统的概念。

(1) 系统是由若干要素组成的。这些要素可能是一些个体、元件、零件,也可能其本身就是一个系统。如运算器、控制器、存储器、输入设备和输出设备组成了计算机的硬件系统,而硬件系统又是计算机系统的一个子系统。

(2) 系统有一定的结构。一个系统是其构成要素的集合,这些要素相互联系、相互制约。系统内部各要素之间相对稳定的联系方式、组织秩序及失控关系的内在表现形式,就是系统的结构。例如钟表是由齿轮、发条、指针等零部件按一定的方式装配而成的,但一堆齿轮、发条、指针随意放在一起却不能构成钟表;人体由各个器官组成,但各器官简单拼凑在一起不能成为一个有行为能力的人。

(3) 系统有一定的功能,或者说系统要有一定的目的性。系统的功能是指系统在与外部环境相互联系和相互作用中表现出来的性质、能力和功能。如信息系统的功能是进行信息的收集、传递、储存、加工、维护和使用,辅助决策者进行决策,帮助企业实现目标。

2. 系统建模基础

系统建模,就是对现实世界中的某一特定系统,根据问题的求解目标和约束条件,抽象出可以通过数学或软件方法求解的仿真与优化模型。凡是用模型描述系统的因果关系或相互关系的过程都属于建模。因描述的关系各异,所以实现这一过程的手段和方法也是多种多样的。可以通过对系统本身运动规律的分析,根据事物的机理来建模,也可以通过对系统的实验或统计数据的处理,并根据关于系统的已有的知识和经验来建模。

系统建模主要用于三个方面。①分析和设计实际系统。例如,工程界在分析设计一个新系统时,通常先进行数学仿真和物理仿真实验,最后再到现场做实物实验。用数学仿真来分析和设计一个实际系统时,必须有一个描述系统特征的模型,对于许多复杂的工业控制过程,建模往往是最为关键和最为困难的任务。②预测或预报实际系统的某些状态的未来发展趋势。例如,根据以往的测量数据建立气象变化的数学模型,用于预报未来的气象。③对系统实行最优控制。只有先建立一个能表征系统特征的数学模型,才能在数学模型的基础上,根据极大值原理、动态规划、反馈、解耦、极点配置、自组织、自适应和智能控制等方法,设计各种各样的控制器或控制规

律,从而实现系统优化。

对于同一个实际系统,人们可以根据不同的用途和目的建立不同的模型。因为既不可能、也没必要把实际系统的所有细节都列举出来,所以建立的任何模型都只是实际系统原型的简化。如果在简化模型中能保留系统原型的一些本质特征,那么就可认为模型与系统原型是相似的,是可以用来描述原系统的。因此,实际建模时,必须在模型的简化与分析结果的准确性之间做出适当的折中。

1) 建模的方法

系统建模的一般方法如图 2-1 所示。



图 2-1 系统建模的一般方法

(1) 模型准备 首先要了解问题的实际背景,明确题目的要求,然后收集各种必要的信息。

(2) 模型假设 在明确建模目的、掌握必要资料的基础之上,通过对资料的分析与计算,找出起着主导作用的因素,经过必要的精炼、简化之后,提出若干符合客观实际的假设,使问题的主要特征凸显出来,忽略问题的次要方面。一般来说,一个实际问题不经过简化假设很难转换成数学问题。假设不合理或过于简单,会导致模型的失效;假设过分详细,则大幅度提升了建模复杂度,使建模和求解工作都很难进行。因此,模型假设是在简化与可行之间的折中,其目标是在求解正确性的前提下,尽可能简化模型、高效求解。

(3) 模型构成 根据所作的假设以及事物之间的联系,利用适当的数学工具去刻画各变量之间的关系,建立相应的数学结构,把问题转化为数学问题。

(4) 模型求解 利用已知的数学方法来求解上一步所得到的数学问题,这时往往还要做出进一步的简化或假设。在难以得出解析解时,可以借助计算机通过迭代搜索的方式求出数值解。

(5) 模型分析 对模型解答进行数学上的分析,有时要根据问题的性质分析变量间的依赖关系或稳定状况,有时根据所得结果给出数学上的预报,有时则可能要给出数学上的最优决策或控制,不论哪种情况,常常都需要进行误差分析、模型对数据的稳定性或灵敏性分析等。

(6) 模型检验 分析所得结果的实际意义,与实际情况进行比较,看是否符合实际。如果结果不够理想,应该修改、补充假设或重新建模,有些模型需要经过几次反

复的修改,才能不断完善。

(7) 模型应用 所建立的模型必须在实际中加以应用才能得到验证和产生效益,在应用中不断改进和完善,应用的方式取决于问题的性质和建模的目的。

2) 建模的步骤

系统建模的一般步骤如下。

(1) 抽象设计变量 通过调研,对所研究的系统有全面深入的了解,然后将问题进行抽象和分离,将错综复杂的问题转化为能反映问题特征的研究对象,对系统进行尽可能详细的描述。

(2) 构造目标函数 目标表示仿真要回答的问题以及系统方案的说明,明确系统的范围与环境。一般来说,仿真目标不同,所建立的模型以及所需采集的数据也不同。目标函数(objective function)是指所关心的目标(某一变量)与相关的因素(某些变量)的函数关系。

(3) 构造约束条件 从纯数学的角度讲,存在无约束问题,但是在工程实际中,任何一个模型几乎都是有限制条件的。这些限制条件在建模过程中称为约束条件。只有满足所有约束条件的建模方案才可以作为用于求解的模型。

(4) 设计求解方法 建立完整的数学模型,只是系统建模的第一步,更重要的是,采用何种方法来求解数学模型,从而得到满足约束条件的优化解。求解方法有传统优化方法和仿生方法,根据问题的特性,可以选择不同的方法进行模型求解。

二、系统建模实例

1. 第一类问题:填充问题

例 2-1 从 n 个装有面粉、大米、谷物等不同密度物质的布袋中,选择一部分装入容积为 V 的麻袋,其中,第 i 个布袋质量为 W_i ,体积为 V_i 。问:如何选装可使装入物质量总和最大?

解 求 X_i (设计变量)。

$$\max \sum_{i=1}^n W_i X_i$$

$$\text{s. t. } \sum_{i=1}^n V_i X_i \leq V, \quad X_i = 0 \text{ 或 } 1$$

物理意义: $X_i = 0$ 表示第 i 个布袋不被选装, $X_i = 1$ 表示第 i 个布袋被选装。求解得到 $X_i (i=1, 2, \dots, n)$ 即得到选装方案。

例 2-2 货运飞机有前舱、中舱、后舱,装载四类可任意形状包装的粉末状货物,为保持飞行平衡,货舱装入货物的分配必须与容许限重成比例如表 2-1 所示。各类货物的总质量、密度及单位利润如表 2-2 所示。

表 2-1 货舱质量配比与容积

	前 舱	中 舱	后 舱
限重/t	10	16	8
容积/m ³	6800	8700	5300

表 2-2 货物属性

	质量/t	密度/(m ³ /t)	利润/(元/吨)
A ₁	18	480	3100
A ₂	15	650	3800
A ₃	23	580	3500
A ₄	12	390	2850

问:如何设计装载方案,能使获利最大?

解 求 X_{ij} 。

物理含义:设计变量 X_{ij} 的值表示第 i 种货物装入第 j 舱的质量;

$$\max Z = 3100(x_{11} + x_{12} + x_{13}) + 3800(x_{21} + x_{22} + x_{23}) + 3500(x_{31} + x_{32} + x_{33}) + 2850(x_{41} + x_{42} + x_{43})$$

物理含义:目标函数 Z 值,表示方案的最大利润。

s. t. 货重约束

$$x_{11} + x_{12} + x_{13} \leq 18$$

$$x_{21} + x_{22} + x_{23} \leq 15$$

$$x_{31} + x_{32} + x_{33} \leq 23$$

$$x_{41} + x_{42} + x_{43} \leq 12$$

容量约束

$$x_{11} + x_{21} + x_{31} + x_{41} \leq 10$$

$$x_{12} + x_{22} + x_{32} + x_{42} \leq 16$$

$$x_{13} + x_{23} + x_{33} + x_{43} \leq 8$$

容积约束

$$480x_{11} + 650x_{21} + 580x_{31} + 390x_{41} \leq 6800$$

$$480x_{12} + 650x_{22} + 580x_{32} + 390x_{42} \leq 8700$$

$$480x_{13} + 650x_{23} + 580x_{33} + 390x_{43} \leq 5300$$

平衡约束

$$\frac{x_{11} + x_{21} + x_{31} + x_{41}}{10} = \frac{x_{12} + x_{22} + x_{32} + x_{42}}{16} = \frac{x_{13} + x_{23} + x_{33} + x_{43}}{8}$$

2. 第二类问题:配置问题

例 2-3 某车间每天可获得 50 个毛坯,车间里有两类加工设备,甲、乙分别可将

毛坯加工成零件 A_1 、 A_2 ，以 1 个毛坯为原料，所耗加工时间和加工数量如下。

甲：耗 12 h 加工 3 个 A_1 ，每个利润 24 元；

乙：耗 8 h 加工 4 个 A_2 ，每个利润 16 元。

即

甲：每小时获利 6 元，每毛坯获利 72 元；

乙：每小时获利 8 元，每毛坯获利 64 元。

所有工人每天总工作时间为 480 h，设备甲每天加工总数限制为 $A_1 \leq 100$ 。问：如何制定生产计划，使每天利润最大。

解 求 X_1 、 X_2 。

物理含义：设计变量 X_1 个毛坯生产 A_1 ， X_2 个毛坯生产 A_2 。

$$\max Z = 3 \times 24 \times x_1 + 4 \times 16 \times x_2$$

目标函数：使利润 Z 最大化。

$$\text{s. t. } x_1 + x_2 \leq 50$$

$$12x_1 + 8x_2 \leq 480$$

$$3x_1 \leq 100$$

$$x_1 \geq 0, x_2 \geq 0$$

例 2-4 有甲、乙、丙、丁四个居民区，A、B、C 三个水库。各居民区的基本用水量（单位：t）为 30, 70, 10, 10，必须得到保证。A、B、C 每天固定供水量（单位：t）为 50, 60, 50。除基本供水量外，四个居民区最多可额外申请用量（单位：t）为 50, 70, 20, 40。各水库与居民区之间的运输成本如表 2-3 所示。

表 2-3 水库与居民区之间的运输成本 (元/吨)

	甲	乙	丙	丁
A	160	130	220	170
B	140	130	190	150
C	190	200	230	—

问：怎样设计方案使供水获利最大。

解 由于水成本是相同的，不同的是运输成本，因此，可将获利最大的问题转化为运输成本最小的问题。

求 X_{ij} 。物理含义： X_{ij} 表示第 i 个水库向 j 居民区的送水量。

$$\min Z = 160x_{11} + 130x_{12} + 220x_{13} + 170x_{14} + 140x_{21} + 130x_{22} + 190x_{23}$$

$$+ 150x_{24} + 190x_{31} + 200x_{32} + 230x_{33}$$

$$\text{s. t. } x_{11} + x_{12} + x_{13} + x_{14} = 50$$

$$x_{21} + x_{22} + x_{23} + x_{24} = 60$$

$$x_{31} + x_{32} + x_{33} = 50$$

$$30 \leq x_{11} + x_{21} + x_{31} \leq 80$$