

全国计算机等级考试

题库及模拟考场

一级 B(DOS 环境)

主编 付鹏斌

编著 杨惠荣 于学军 刘东升



21世纪工程技术新型教程系列

系 统 工 程

〔日〕 田村坦之 编著
李 平 译
白 玉 林 校

科 学 出 版 社 OHM 社
2001

图字:01-2000-1519号

Original Japanese edition

Shinsedai Kougaku Shirizu; Shisutemu Kougaku

Edited by Hiroyuki Tamura

Written by Hiroyuki Tamura, Tatsuya Masuda, Kazuo Nose, Hirotaka Nakayama,

Yukiyoshi Inoue and Toyoo Fukuda

Copyright © 1999 by Hiroyuki Tamura

Published by Ohmsha, Ltd.

This Chinese language edition is co-published by Ohmsha, Ltd. and Science Press.

Copyright © 2000

All rights reserved.

本书中文版权为科学出版社和 OHM 社所共有

新世代工学シリーズ

システム工学

田村坦之 オーム社 1999 第1版 第1刷

图书在版编目(CIP)数据

系统工程/[日]田村坦之编著;李平译.-北京:科学出版社,2001.1

(21世纪工程技术新型教程系列)

ISBN 7-03-008863-8

I.系… II.①田…②李… III.系统工程-教材 IV.N94

中国版本图书馆CIP数据核字(2000)第70659号

北京东方科龙电脑图文制作有限公司 制作

科学出版社 OHM 社 出版

北京东黄城根北街16号 邮政编码:100717

中国科学院印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

2001年1月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2001年1月第一次印刷 印张:8

印数:1—5 000

字数:166 000

定 价:16.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈新欣〉)

前言

本书是面向本科生的、学时为一学期(半年)的《系统工程》教学用书。它以初学系统工程的学生为对象,目的在于使他们理解建模、仿真、最优化、可靠性、新的系统概念及方法。

工程技术科学对生产做出了很大贡献,促进了人类社会的发展,与此同时,生产的基本观念也逐渐转向合理化、自动化、系统化、智能化、综合化,在这一过程中系统工程提供了许多方法论。一方面生产技术的高技术化和智能化得到了发展,另一方面也出现了亟待解决的全球规模的环境问题和城市问题。要解决这些问题,不能只着眼于某一侧面,必须按系统工程的方法,把诸多现象和问题作为系统来研究,分析多个因素间的因果关系,否则难以真正理解及彻底解决问题。

那么,什么是系统?什么是系统工程的方法?本书将对这些问题进行介绍。

本书各章的执笔人员如下,其中第2章到第6章的作者都是相应研究领域的知名学者。编者对各位先生的执笔工作深表感谢。

第1章与全书的编辑 田村坦之

第2章 增田达也

第3章 能势和夫

第4章 中山弘隆

第5章 井上幸美

第6章 福田丰生

本书适用于电子信息工程专业的本科生,但若能对机械工程、电子工程、土木工程专业的本科学学生及经济学、社会科学、人文科学专业的本科生有所裨益,将不胜高兴。

最后,向给予本书出版机会的丛书主编樱井良文先生、编委井口征士先生、白井良明先生表示感谢,同时也向欧姆社的有关人士表示感谢!

田村坦之

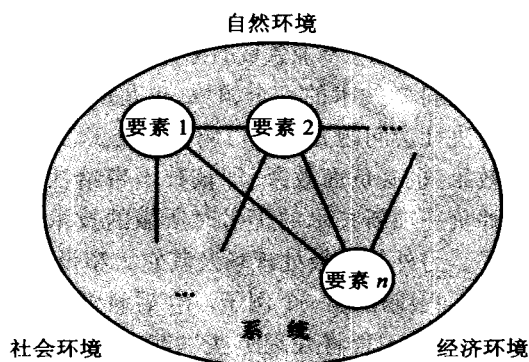
第 1 章

系统工程简介

本章介绍系统工程的定义及其在现实社会中的作用,并简要说明本书的内容及系统工程的学习方法。若需对本章内容做更详细的了解,请参阅书后的参考文献。

1.1 什么是系统工程

伴随着社会的迅速发展和日益复杂化,我们迎来了 21 世纪。系统工程在这一过程中起着越来越重要的作用。在定义系统工程之前,首先对系统作如下定义(见图 1.1)。所谓系统是指由多个要素(人、物、信息)组成的、具有某种目的的一个集合体,各要素与其它要素间具有相互的关系。若把系统作为一个整体来看,其系统的行为就是把各组成部分综合以后产生的行为。



- 系统具有的基本特性：
- 1) 多个要素组成的集合体
 - 2) 要素间具有相互关联性
 - 3) 系统整体具有目的性

图 1.1 系统的基本概念

系统工程是指借助计算机手段,对具有上述性质的系统进行合理地建模、分析、计划、设计、运用的技术。这时需要考虑系统的周边环境,即自然环境、社会环境、经济环境等。

系统工程处理的是生命、自然、人造物体、社会、经济等规模越来越大、越来越复杂的系统,如果在系统工程中仍采用以前科学及工程中常用的、把整体分解成组成要素后再进行分析的要素还原论法,已不能处理系统的整体情况。

本节第6章介绍的“复杂系统”和“复杂性科学”被称为开启21世纪的钥匙,而在系统工程界从很早以前就已开始探讨“大规模复杂系统”了。

1.2 系统工程的作用

——作为横向工程的系统工程

以前的工程学,如机械工程、电子工程、土木工程、化学工程、计算机科学等,是根据研究对象的不同而进行纵向分类的,而系统工程学则是在这些纵向分类的各个领域中规划与设计新系统,并对已有系统提供最佳利用的方法论。但是,由于纵向分类的工程领域无视领域间的横向关系,一味朝专业化、细分化方向发展,因此以产业化为中心的各种活动失去了总体的和谐,这无疑招致了资源能源问题、环境问题、大都市圈的交通问题等等。

系统工程在解决这些系统问题方面起着重要的作用。因此系统工程是与控制工程、运筹学、信息工程等平行的、横向分类的学科领域,它不仅适用于某个专业领域,也适用于专业领域的综合及学科交叉的研究。

系统工程不仅是科学技术的一个领域,也是解决各种复杂社会现象的一种手段。在解决社会问题方面也可应用系统工程的方法。例如一项新技术既有正面效果,也有负面效果,即该技术带给社会的负面影响,在评价这些效果及评价一项新技术的优劣时所做的技术评估,都是系统工程应用的典型例子。另外与垃圾处理场及其它大型设备的建设相关的环境评估等也是系统工程应用的一个例子。今后科学技术与社会、经济的结合将越来越密切,系统工程将处理那些以前不被看作是科学技术研究对象的現象或系统。

1.3 本书内容

把在计算机中产生描述系统的数学模型及基于图论的图形模型称为**建模**,第2章介绍有关建模的各种方法。对于那些难以在实验室里组装实物设备进行试验的对象,可用建模方法在计算机中生成模型来代替实物装置进行数值试验。

使用计算机中生成的模型模拟系统行为的过程称为**计算机仿真**,第3章介绍有关仿真的各种方法。计算机仿真不仅用于系统的分析和预测,也可通过改变模型中的参数进行数值试验,达到系统设计的最优化。

如果把作为系统具有的基本特性,即构成系统的多个要素间的相互关联性和目的性模型化,那么系统所应考虑约束条件就明确了。通常满足这一约束条件的解有多个(有时有无限多个),从中取目标函数值最大(或最小)的解的过程称为**最优化**。第4章针对各类实际系统,介绍了对这类最优化问题进行形式化描述的方法及有关最优化的数学方法。

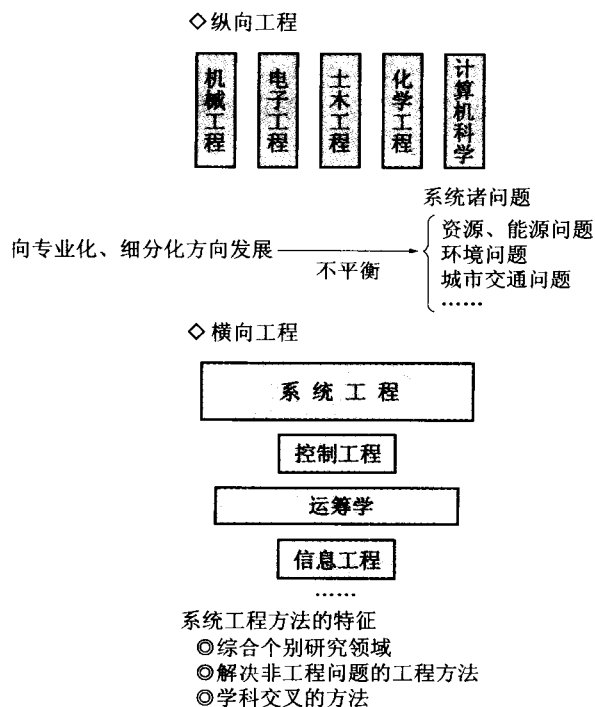


图 1.2 纵向工程与横向工程

随着包含人在内的系统的大规模化、复杂化,以及新技术、新材料的开发,系统的**可靠性、安全性、维修性**正成为越来越重要的课题。第5章系统地介绍解决这些问题的方法。

第6章介绍系统科学及系统工程中新出现的概念及今后的研究方向。其中心课题是在计算机中人工地实现生物体所具有的奇妙功能(生命现象)。遗传算法、自组织化、自律分散、人工生命、复杂系统等方面的研究正在积极开展。

1.4 系统工程的学习方法

在学习系统工程时如果只研究它的方法论是远远不够的,把本书中学到的各种方法应用到实际的具体系统中才能体现系统工程的作用。在把系统工程的方法应用于实际系统时,其前提是要借助于计算机手段,因此需要事先了解一些计算机硬件、软件方面的知识。另外,在对实际系统建模时还需要数学方面的知识,特别是线性代数、概率统计及模糊理论方面的基础知识。由于这些知识超越了本书的范围,因此暂不介绍。此外,学习系统工程还要求具备能把握全局、处理实际系统对象的能力。

随着实际系统的规模越来越大,同时越来越复杂,以及系统中融入了人与社会的相互关联,如果想把系统工程作为研究方向,建议给予社会科学及人文科学特别是经济学和心理学以适当的关注。

第2章

系统的描述方法

本章介绍系统的描述方法,即建模。首先在明确建模的目的、意义的基础上学习建模的一般注意事项。其次从系统的描述形式上把模型分为数学模型和图形模型两类。此外,还从系统具有的特性及建模的目的等方面对模型进行更详细的分类。最后通过几个具体例子学习建立数学模型、图形模型的典型方法。

2.1 建模的目的

在规划、分析、设计系统时,需要定性或定量地了解系统的功能和结构,并对系统的行为进行充分的探讨。例如在汽车、飞机、桥梁等领域的设计过程中,自古就有制作实物模型或缩尺模型来进行试验的方法。

但是,这种方法并不是总能实现的。例如研究的对象是社会系统等一类大规模、复杂的系统或者是正在运行的核电站、化工厂等系统时,这种方法在物理上、成本上都是不可行的。针对这类情况,产生了一种用数学模型或图形模型准确表达系统特征,并能用计算机进行试验的抽象模型方法。这种方法成本低,无危险,而且不必停止或破坏运行中的系统,可在极短时间内从某一角度研究系统的行为。

在系统工程中,把建立准确描述系统特征和行为的数学模型或图形模型等抽象模型的过程称为**建模**;而针对该模型使用计算机等手段详细分析系统行为的模拟试验则称为**仿真**。

随着系统的规模和复杂程度的不同,建模的难易程度及采用的模型也有所不同。例如,电力电子系统及机械系统等,由于各构成要素间的关系在物理上明确可知,因此用数学式子很容易得到与实际系统几乎一致的数学模型。

但是社会系统、经济系统等一类系统,因其大规模化和复杂化,仅用数学模型则难以表达整个系统。这时就要结合使用数学模型和图形模型,即把整个系统分成若干个子系统,用图形模型表示子系统间的联系

(系统的结构、信息流等),用数学模型表示每个子系统中可用数学形式描述的部分。但是图形模型不如数学模型严密。

下面介绍建模时的一般注意事项:

(1) 明确目的

首先要明确建模的目的,即使是同一个系统,研究目的不同,建立的模型也不同。例如设计飞机时,如果目的在于研究飞行性能,那么建模时需要选择适于流体力学计算的外形。而以结构强度为研究目的时,则需要选择适于结构力学计算的模型。

(2) 确定组成要素

必须确定与研究目的相应的、模型中所采纳的对象系统中最小单位的组成要素。根据所采纳组成要素的数量,模型可以简单也可以复杂。通常模型的精度和模型的简单程度互为矛盾。不论精度多高,如果模型过于复杂也难以使用,反之虽然模型简单但精度差也不能采用。这就需要在确定组成要素时兼顾这两方面的要求。

(3) 验证模型

模型建立后需验证其精度。只满足建模时所用数据的模型是毫无意义的。模型必须高精度地满足其它各种试验数据。当验证结果不理想时,要重新探讨建模时确定的假设和假说,修改模型中采纳的组成要素和模型结构,调整模型的参数,通过这些手段来修正模型。另外在验证模型时,除了验证精度之外还要注意确定模型的适用范围。

2.2 模型的分类

从模型的描述形式、对象系统所具备的特性以及建模的目的等方面,可把建立的各种模型(如图2.1所示)进行分类。下面依照图2.1对各个模型进行简单描述。

2.2.1 数学模型

数学模型是用代数方程、差分方程、微分方程、逻辑表达式等数学形式描述系统行为的模型。从对象系统的特性角度,可对数学模型进行如下细分:

(1) 静态模型和动态模型

某一时刻模型的输出不依赖于过去的输入,只取决于当前输入的模型称为**静态模型**。反之,模型的输出不仅依赖于当前输入,而且依赖于过去的输入,则把这种模型称为**动态模型**。通常静态模型用代数方程、逻辑表达式等描述,动态模型用微分方程、积分方程、差分方程等描述。



图 2.1 模型的种类(浅居喜代治:现代系统工程基础,在欧姆社版的基础上做了部分改动)

(2) 确定性模型和随机性模型

模型的输入输出数据和参数确定的模型称为**确定性模型**。而输入输出数据和参数随着未知因素而不规则地、随机地变化的模型称为**随机性模型**。确定性模型用微分方程、差分方程等描述,随机性模型用概率微分方程、马尔可夫链等描述。

(3) 线性模型和非线性模型

输入、输出关系为线性的模型称为**线性模型**,反之输入、输出关系为非线性的模型则称为**非线性模型**。通常线性模型用线性微分方程等描述,非线性模型用非线性微分方程等描述。实际分析系统时线性模型便于处理,因此对包含非线性特性的系统一般用线性近似方法转化为线性模型来分析。

(4) 连续时间模型和离散时间模型

输入输出随时间连续变化的模型称为**连续时间模型**,而输入输出每隔一定的时间间隔才发生变化的模型称为**离散时间模型**。连续时间模型用微分方程等描述,离散时间模型用差分方程等描述。

(5) 微观模型和宏观模型

瞬时、微观地捕捉系统行为以把握系统的瞬时变化和微观结构的模型称为**微观模型**。反之长期、宏观地捕捉系统行为以把握系统的长期变

化和整体结构的模型称为宏观模型。两者都可用微分方程、差分方程、代数方程等描述。

下面以人口模型为例说明(1)~(5)所述模型的具体形式。假设现在的人口数量为 x ,其增长速度 dx/dt 与 x 成正比(比例系数 $a>0$),则人口模型描述如下

$$\frac{dx}{dt} = ax \quad (2.1)$$

该模型是用线性微分方程表示的动态、线性、连续时间模型。而且,该模型中参数 a 为常量,不会随机改变,因此也是确定性模型。另外该模型不考虑年龄、性别、国籍、出生率、死亡率等因素,故而也是非常笼统的宏观模型。

但是,在现在的生态系统中,人口少则可利用的资源多,人口增长速度就大,而随着人口数量的增加生态系统饱和,人口增长速度又将下降,因此在人口模型中,用 $a(1-bx)$ 代替 a 更合理。此时人口模型即为如下的非线性模型

$$\frac{dx}{dt} = a(1-bx)x \quad (2.2)$$

再把式(2.2)的 dx/dt 离散化为 $(x_{n+1} - x_n)/\Delta t$,于是人口模型又化为如下差分方程表示的离散时间模型

$$x_{n+1} = x_n + \Delta t \cdot a(1-bx_n)x_n \quad (2.3)$$

前面从系统所具有的特性方面对数学模型进行了分类。从建模的目的出发系统模型还可进行如下分类:

(1) 功能模型

为详细探讨系统的稳定性、可控性等动态特性,或系统的可靠性、安全性、持久性等特性和功能所建立的模型称为**功能模型**。功能模型包括传递函数模型、状态变量模型等。**传递函数模型**是用输入输出函数的拉普拉斯变换比来表示系统的输入输出关系,**状态变量模型**是用一阶联立微分方程组表示系统的内部状态。下一节介绍这些模型的建模方法,特别是控制系统中常用模型的建模方法。

(2) 预测模型

为了从过去及现在的数据尽量准确地预测系统的将来值而产生的模型称为**预测模型**。预测模型包括静态系统预测中常用的**多重回归模型**和动态系统预测中常用的**AR模型**(自回归模型)等。这些预测模型经常用于社会系统、经济系统等大规模、复杂系统的预测(例如,交通流量预测、股价波动预测、电力需求预测等)

(3) 规划模型

为最优编制生产计划、运输计划、工程管理、人员配置、调度等生成的模型称为**规划模型**。规划模型包括线性规划模型、非线性规划模型、多目标规划模型等。**线性规划模型**是指目标函数及约束条件全部用线性等式或不等式表达的模型。**非线性规划模型**是指目标函数及约束条件全部用非线性等式或不等式表达的模型。**多目标规划模型**是指有多个优化目标的规划模型。这些内容将在第4章进行详细探讨。

(4) 评价模型

用于综合评价系统的性能、成本、可靠性、安全性等指标的模型称为**评价模型**。评价模型包括关系矩阵模型、AHP模型(分析层次处理模型)、效用函数模型等。**关系矩阵模型**是用几个评价项目来评价替代方案,并用评价值的加权积的大小来评价替代方案的优劣。AHP模型是用层次结构描述评价项目,然后用对比法求各评价项目的重要程度,最后通过综合这些重要程度来评价替代方案。**效用函数模型**是把决策者对替代方案所持的主观尺度用效用函数的形式来表现,采用效用理论来评价替代方案。

2.2.2 图形模型

图形模型就是用图、图表、矩阵等图形描述系统内部的信号和信息流以及系统结构或系统内部的状态转移等情况。图形模型有以下几种:

(1) 信号模型

用图形表示系统内的信号流和信号间的输入输出关系的模型称为**信号模型**。信号模型包括**方块图**和**信号流图**等。

方块图是用枝表示信号流,用方块表示信号间的输入输出关系,用节点表示信号的求和、求差点的有向图。而信号流图是用节点表示信号,用枝表示信号流的方向,用枝的权重表示信号间输入输出关系的有向图。方块图和信号流图有对偶关系,这两个模型在控制工程领域中经常使用。

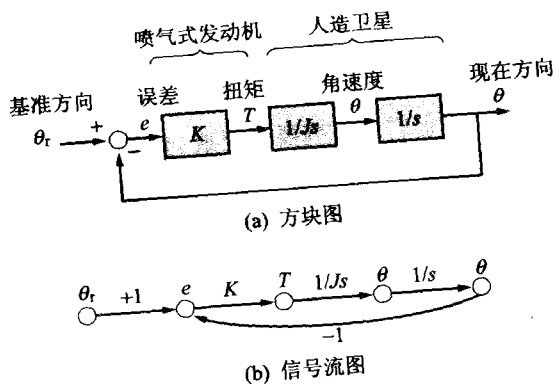


图 2.2 人造卫星的姿态控制

图 2.2 分别用方块图和信号流图表示了人造卫星的姿态控制系统的信号流和信号间的输入输出关系。姿态控制是指当人造卫星偏离基准方向时,启动喷气式发动机使之回到基准方向。

(2) 流模型

把系统的信号流概念延伸到不只是信号,还包括能量、物流、成本等的信息流,那么用图形表示信息流、作业过程、处理顺序等的模型就称为**流模型**。流模型包括**网络模型**和**流程图**等。

网络模型用节点和枝表示系统组成要素间的连接关系,用枝的权重表示流经系统的流量。在电力、煤气、自来水等工程系统、交通流量系统、作业工程等经常使用网络模型。图 2.3 是一个用网络模型表示配电系统的例子,图中用节点表示变压器、断路器、区分开关等,用枝表示连接它们的各个线路,用枝的权重表示各线路区间内的需要电功率。

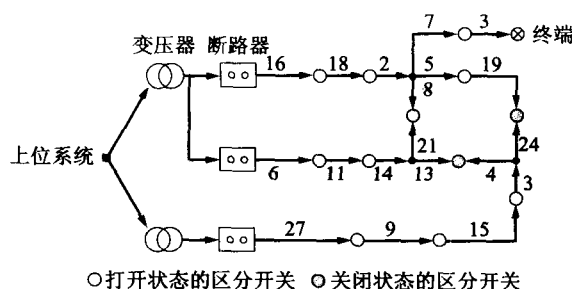


图 2.3 配电系统的网络模型

流程图主要是表示处理顺序的有向图,在称作处理块、分枝块的块中写入具体处理内容,用枝表示各个处理流程。流程图用于计算机程序和复杂加工过程的模型化。图 2.4 是求最小值处理过程的流程图。

(3) 结构模型

信号模型和流模型也可看作是结构模型的一种。这里所说的结构模型用于刻画那些像社会系统那样,由多个问题错综复杂地交互在一起的、大规模复杂系统,研究它们由哪些要素组成,要素之间怎样关联的整体结构及结构特征模型。结构模型是用节点表示组成要素、用枝表示组成要素间的关联(因果关系、优先关系等),用枝的权重表示关联度的有向图。其具体做法在 2.4 节讨论。

(4) 离散事件模型

用图形表示自动售货机、工厂生产线一类系统的状态由某一状态离散地转移到另一状态的情况的模型称为**离散事件模型**。离散事件模型包括**状态转移图**和**Petri 网**等。

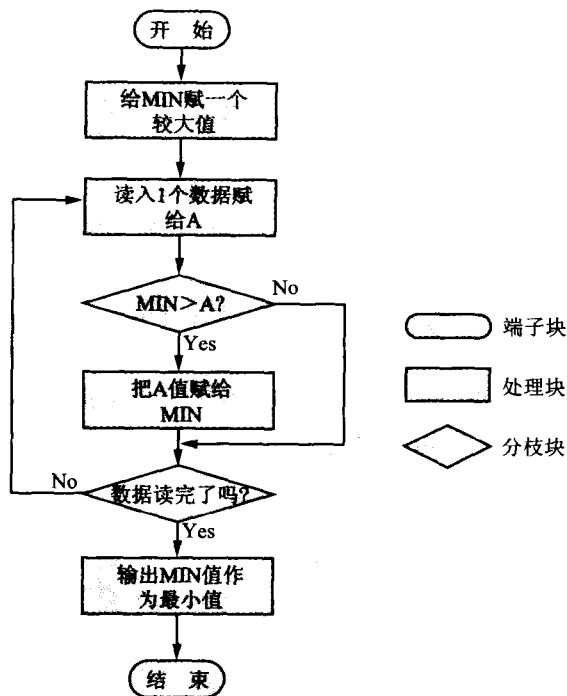


图 2.4 求最小值程序的流程图

状态转移图是用节点表示系统的有限个状态,用枝表示状态的转移方向,在枝的旁边标注状态转移的原因和条件的有向图。图 2.5 是把车站的自动检票机的基本动作模型化的状态转移图。该自动检票机有 5 种状态,例如若当前状态为“等待车票输入”,在无车票输入时保持该状态

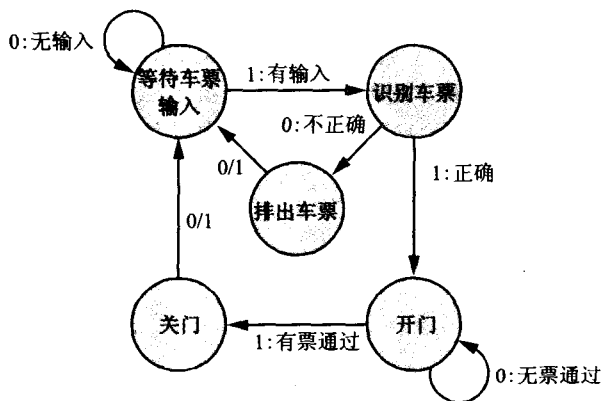


图 2.5 自动检票机的状态转移图(岸光量:系统工程,共立出版社)

不变,有车票输入时则转移到“识别车票”状态,图中明确地表示了这种情况。

Petri 网是用称作转移的竖线(1)表示系统各状态的发生及完成,用称作位置的白圈(○)表示某一状态发生的条件,用枝表示它们的关联的有向图。另外 Petri 网中,在条件成立的位置上插入称作令牌的黑点,如果某一状态转移的所有输入位置都插入了令牌,那么该状态发生(称之为转移点火)。令牌流向下方的输出位置。

如上所述,通过令牌的移动可表示 Petri 网中多个状态不同步或并行地发生及完成的情况。因此 Petri 网多用作生产系统及物流系统等的模型。图 2.6 是一个用 Petri 网模型化汽车生产线的例子,它用令牌位置表示了汽车随零件及设备的不同而不停地组装的情况和各设备工作的情况。

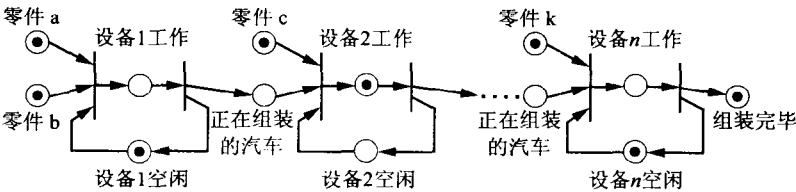


图 2.6 汽车生产线的 Petri 网模型

有向图和矩阵

用若干个节点及连接两个节点的枝表示的图称为图形。特别是所有的枝都带有方向的图称为有向图。

设矩阵 $A = [a_{ij}]$ 的行列数等于有向图的节点数,定义元素 a_{ij} 如下:若节点 i 到节点 j 间有枝存在则 $a_{ij} = 1$,反之 $a_{ij} = 0$,那么有向图就可以用矩阵表示。这样形成的矩阵 A 称为连接矩阵。如果枝上是带有权重的有向图,那么通过在连接矩阵的元素上赋予权重就可以表示有向图。以图 2.7 所示的有向图为例,图 2.8 则代表了与之对应的连接矩阵。

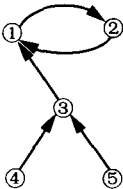


图 2.7 有向图

	①	②	③	④	⑤
①	0	1	0	0	0
②	1	0	0	0	0
③	1	0	0	0	0
④	0	0	1	0	0
⑤	0	0	1	0	0

图 2.8 连接矩阵 A

有向图中从某一节点出发经过 k 个枝连接到其它节点所构成的路径称为长度为 k 的有向路径。长度为 k 的有向路径可通过布尔代数运算(用 0,1 的逻辑和、逻辑积进行运算),把连接矩阵 A 自乘 k 次得到的矩阵 A^k 来求得。即矩阵 A^k 的 (i,j) 元素为 1 时,表示从节点 i 到节点 j 存在着长度为 k 的有向路径。例如图 2.7 所示的有向图中长度为 2 的有向路径由矩阵 A^2 给出,如图 2.9 所示。

$$A^2 = \begin{matrix} & \begin{matrix} \textcircled{1} & \textcircled{2} & \textcircled{3} & \textcircled{4} & \textcircled{5} \end{matrix} \\ \begin{matrix} \textcircled{1} \\ \textcircled{2} \\ \textcircled{3} \\ \textcircled{4} \\ \textcircled{5} \end{matrix} & \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \end{matrix}$$

图 2.9 矩阵 A^2

2.3 建立数学模型的方法

如前所述,数学模型包括着各种类型的模型,这些模型的建立方法不尽相同,而是因对象系统的特性和建模的目的不同而不同。在此介绍其中几种有代表性的建模方法。

2.3.1 使用高阶微分方程建模

用高阶微分方程建模是一种以动态系统为研究对象的建模方法。该方法经常用于系统的内部结构(组成要素间的关联关系)非常明确,且可应用物理法则及化学法则的情况。

现在以单输入单输出系统为对象,设输入为 u ,输出为 y ,则系统的输入输出关系可用如下形式的微分方程表示:

$$\begin{aligned} a_0 \frac{d^n y}{dt^n} + a_1 \frac{d^{n-1} y}{dt^{n-1}} + \cdots + a_{n-1} \frac{dy}{dt} + a_n y \\ = b_0 \frac{d^m u}{dt^m} + b_1 \frac{d^{m-1} u}{dt^{m-1}} + \cdots + b_{m-1} \frac{du}{dt} + b_m u \quad (n \geq m) \end{aligned} \quad (2.4)$$

这里举一个具体例子,对图 2.10 所示的电路系统(RLC 回路)进行建模。该系统的输入为电压源 u ,输出为电容器 C 的端电压 v_c 。设回路中流动的电流为 i ,则线圈 L ,电阻 R ,电容 C 的电压 v_L, v_R, v_C 分别为

$$v_L = L \frac{di}{dt}, v_R = Ri, v_C = \frac{1}{C} \int i dt \quad (2.5)$$

根据基尔霍夫法则有

$$v_L + v_R + v_C = L \frac{di}{dt} + Ri + \frac{1}{C} \int i dt = u \quad (2.6)$$

从式(2.5)中关于 v_C 的式子得出 $i = C dv_C / dt$,把它代入式(2.6),于是该系统的输入输出关系可用如下的二阶线性微分方程来表示。