



# 系统工程与控制导论

——控制走向社会系统

邓三瑞 编著

XTONG GONGCHENG YU KONGZHI DAOLUN

哈尔滨船舶工

版社

# 系统工程与控制导论

——控制走向社会系统

邓三瑞 编著

2011/168/01

哈尔滨船舶工程学院出版社

# (黑)新登字第9号

## 内 容 简 介

本书以动态系统的控制理论为框架,以社会系统、生态系统等实例的阐明构成其主要内容。首先介绍系统工程的概貌,继而讲述线性系统在时域与频域的基本性质,进而转入以状态空间模型表达的现代理论;阐述了基于投入产出分析的平衡理论及动态投入产出的建模问题;以人口、生态平衡、集团对抗等模型为例,讲述了时不变系统与时变系统,并对最优控制策略作了阐明;最后对“非因果性”的前瞻系统作了介绍。

本书可供从事系统分析、系统工程、管理科学、决策支持系统方面的理论工作者和工程技术人员使用。

### 系统工程与控制导论

——控制走向社会系统

邓三瑞 编著

责任编辑 杨东奇

\*

哈尔滨船舶工程学院出版社出版  
新华书店首都发行所发行  
毕升电脑排版有限公司排版  
哈尔滨船舶工程学院印刷厂印刷

\*

开本 850×1168 1/32 印张 9.75 字数 243 千字

1994年5月第1版 1994年5月第1次印刷

印数: 1—1000册

ISBN 7-81007-343-5

N·2 定价: 5.50元

# 目 录

引论——由控制到社会系统决策 .....	(1)
第一章 系统的输入输出特性 .....	(14)
第一节 因果关系的描写 .....	(15)
第二节 线性时不变系统的卷和(离散情况) .....	(18)
第三节 线性时不变系统的卷积(连续情况) .....	(22)
第四节 离散与连续两种情况之间的沟通 .....	(29)
第五节 系统对单位阶跃函数输入的响应 .....	(31)
第二章 以微分方程表示的系统 .....	(35)
第一节 以微分方程表示的系统 .....	(35)
第二节 齐次解与特解 .....	(37)
第三节 系统的传递函数 .....	(41)
第四节 一阶系统对阶跃输入的响应 .....	(43)
第五节 二阶系统对阶跃输入的响应 .....	(46)
第三章 系统的频域分析 .....	(48)
第一节 系统对正弦输入的稳态响应 .....	(48)
第二节 系统的单位脉冲响应 $h(t)$ 与其传递函数 $H(s)$ 之间的关系 .....	(49)
第三节 以微分方程表示的系统在频域中的形式 .....	(52)
第四节 Laplace 变换应用于系统分析 .....	(54)
第五节 子系统之间的连接 .....	(56)
第四章 系统的状态变量模型 .....	(60)
第一节 相变量典型形式 .....	(60)
第二节 系统的初始状态 .....	(66)
第三节 状态变量的连续性 .....	(68)

第四节	对角线形式的状态模型 .....	(69)
第五节	多输入多输出系统 .....	(71)
<b>第五章</b>	<b>系统的状态空间分析(连续情况) .....</b>	<b>(75)</b>
第一节	最简单情况,一阶状态模型 .....	(75)
第二节	一般状态空间模型的解 .....	(76)
第三节	预解矩阵与 $e^{At}$ .....	(77)
第四节	矩阵指数函数 $e^{At}$ 的一些性质 .....	(79)
第五节	一般状态方程的解 .....	(81)
第六节	关于状态的基本概念 .....	(82)
第七节	对单位奇异输入的状态空间解 .....	(83)
<b>第六章</b>	<b>离散时间的多输入多输出系统 .....</b>	<b>(87)</b>
第一节	一阶系统在离散时间上的仿真 .....	(87)
第二节	一般多输入多输出系统 .....	(91)
第三节	系统稳定性与 $A_r$ 的极点 .....	(92)
第四节	用离散状态模型计算离散脉冲响应 .....	(93)
第五节	系统的能控性概念的引入 .....	(95)
第六节	系统的能观性概念的引入 .....	(97)
第七节	系统的 Hankel 矩阵 .....	(98)
第八节	静态系统与动态系统 .....	(99)
第九节	Leontief 静态投入产出系统,嵌入静力学 .....	(101)
第十节	Leontief 动态投入产出系统 .....	(110)
<b>第七章</b>	<b>状态坐标变换与系统的模态表示 .....</b>	<b>(112)</b>
第一节	状态坐标变换 .....	(112)
第二节	利用能观、能控性矩阵求变换矩阵 .....	(117)
第三节	系统的特征向量与对角线化 .....	(118)
第四节	主导模态 .....	(123)
第五节	按年龄分布的人口模型,主特征向量 .....	(124)
第六节	系统的模态表示 .....	(129)

<b>第八章 正线性系统</b> .....	(133)
第一节 正矩阵及 Frobenius - Perron 定理 .....	(133)
第二节 离散的正系统.....	(136)
第三节 连续的正系统.....	(137)
第四节 正变化.....	(138)
第五节 军备竞赛的 Richardson 模型 .....	(140)
第六节 集团相互作用的 Homans - Simon 模型 .....	(142)
<b>第九章 系统的能控性与能观性</b> .....	(145)
第一节 系统的能控性.....	(146)
第二节 系统的能观性.....	(150)
第三节 能控性、能观性及系统的传递函数 .....	(153)
第四节 在对角线状态坐标系中讨论能控性、 能观性.....	(154)
第五节 Hankel 矩阵与系统的阶数 .....	(155)
第六节 特征值配置定理.....	(157)
第七节 观测器设计.....	(159)
<b>第十章 时变系统</b> .....	(166)
第一节 离散时变系统.....	(166)
第二节 连续时变系统.....	(172)
<b>第十一章 Markov 链式动态系统</b> .....	(179)
第一节 有限 Markov 链 .....	(179)
第二节 Markov 链表达为线性系统形式 .....	(182)
第三节 正则 Markov 链的极限分布 .....	(185)
第四节 过渡状态分析.....	(190)
<b>第十二章 最优控制策略</b> .....	(195)
第一节 基本的最优控制问题.....	(195)
第二节 变分法与 Hamilton 函数 .....	(196)
第三节 极大值原理.....	(202)

第四节	昆虫生殖优化的例子.....	(206)
第五节	终端受约束的最优控制.....	(208)
第六节	自由终端时间问题.....	(212)
第七节	Zermelo 问题 .....	(215)
第八节	目标函数为二次型的线性系统 Riccati 方程 .....	(217)
第九节	离散时间问题.....	(220)
第十节	Bellman 最优化原理 .....	(222)
第十一节	系统的稳定性与最优控制.....	(229)
<b>第十三章</b>	<b>非线性系统分析.....</b>	<b>(231)</b>
第一节	平衡点与稳定性.....	(233)
第二节	非线性系统的线性化.....	(236)
第三节	投资函数与动态 Leontief 投入产出系统.....	(240)
第四节	Lyapunov 函数 .....	(245)
第五节	关于 Lyapunov 函数的例题 .....	(251)
第六节	不变集.....	(256)
第七节	正系统的 Lyapunov 函数 .....	(258)
第八节	积分 Lyapunov 函数 .....	(259)
第九节	线性系统的二次型 Lyapunov 函数 .....	(260)
第十节	组合 Lyapunov 函数 .....	(262)
第十一节	概括函数.....	(262)
第十二节	力学与热力学系统.....	(264)
第十三节	捕猎·牺牲模型.....	(266)
第十四节	传染病学.....	(270)
第十五节	市场价格平衡的稳定性.....	(273)
第十六节	模型参考控制系统.....	(276)
第十七节	非线性系统的研究趋向.....	(278)

<b>第十四章 前瞻系统</b> .....	(281)
<b>第一节 何谓前瞻系统</b> .....	(281)
<b>第二节 科学史上对因果性的看法</b> .....	(281)
<b>第三节 目的性与因果性及 Hamilton 问题</b> .....	(287)
<b>第四节 前瞻系统的构造</b> .....	(288)
<b>第五节 前瞻系统与通常的反馈系统的对比</b> .....	(291)
<b>第六节 前瞻系统与最优控制问题</b> .....	(291)
<b>第七节 前瞻系统与智能机器人</b> .....	(293)
<b>第八节 前瞻系统与社会系统的建模</b> .....	(295)
<b>参考文献</b> .....	(298)



## 引论——由控制到社会系统决策

系统这个概念很古老,但又非常新。特别是自 20 世纪中叶以来,由于信息这一概念的科学化,人们从信息与控制的角度,从物理学、生物学、数学、社会学等角度,对系统的概念进行了更深入的探索。各种学说与观点,见仁见智,不好说孰优孰劣,而是各有独到之处,可以相互借鉴、可以相互启发而取得进步。不过从学习系统工程的应用目的来看,应当说,运用自动控制工程的观点对系统进行分析与综合,对于打好系统工程的学科基础,是较为合适的。在实际的教学经验中也显示出了这一点。事实上,按我国现行的学科分类(按国务院学位委员会《授予博士、硕士学位和培养研究生的学科、专业目录》),系统工程作为二级学科,它属于工学中作为一级学科的自动控制学科(自动控制之下有自动控制理论及应用、工业自动化、自动化仪表及装置、系统工程、模式识别与智能控制等共五个二级学科)。所以本书按控制工程与社会系统相结合的指导思想安排内容,也是符合学科体系的。顺便提一下,与系统工程相关的学科尚有属于理学的“系统科学”[下设系统理论、非线性系统(实验与理论)、科学学与科学管理、控制与智能系统科学等四个二级学科]。此外,数学中的“运筹学与控制论”也是系统工程的相关学科。

关于系统工程的学科体系,在 70 年代末及 80 年代初,钱学森倡导在我国开展系统工程的研究和应用的时候曾指出:系统工程的理论基础是运筹学。1982 年他曾提出系统工程学科体系如图 0-1 所示。其后,在他的“系统科学体系图”中,略有改变,见图 0-2,似与学科目录有别,但也是重要的一家之言。

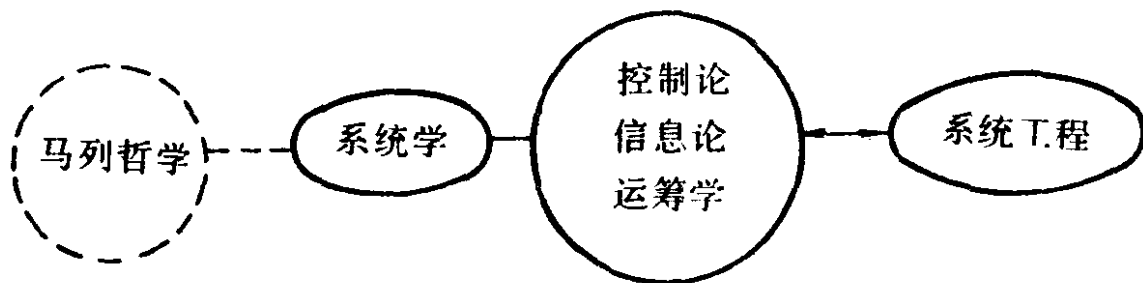


图 0-1 系统工程学科体系

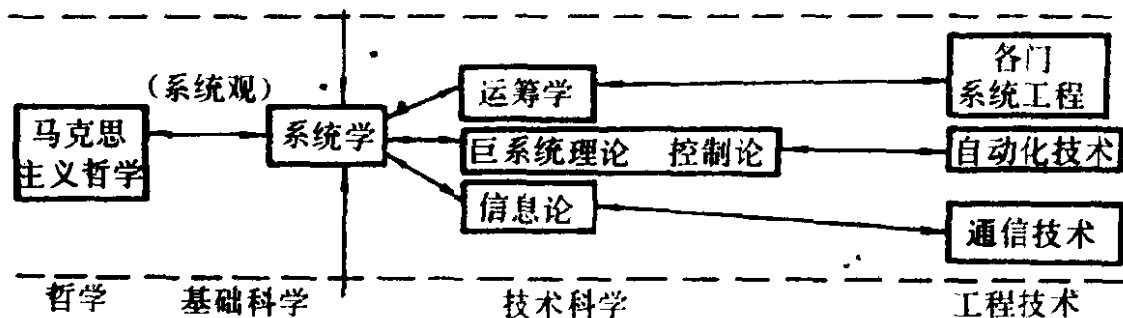


图 0-2 系统科学体系

系统工程多以大型的技术系统、公用系统、社会系统为对象，对它们进行研究、设计、建造和管理，如有必要也对系统进行扩充或更新直到最后合理地废弃，完成其“全寿期”，涵盖军事与民用诸多方面。以现代海军系统工程管理技术为例，它体现在 4 个方面：

(1) 海军建设的统筹。以海军战略为指导，运用现代系统分析方法、多变量优化控制与决策技术等，对海军武器装备的发展与管理、战场准备与工程建设、兵力结构与部队编组及人员培训、后勤与技术保障等方面，进行科学预测、统筹部署、成套建设的科学管理。

(2) 海军装备全寿命管理技术。运用运筹学和系统工程控制理论，采用数学模型对海军武器装备从探索论证到退役报废的全

寿命期进行系统的效能和费用分析,以获取优化军事经济效益的科学管理。

(3) 海军武器装备全面质量控制技术。运用可靠性理论、全面质量管理原则、计算机辅助设计和评审、检验和鉴定方法等,在海军武器装备发展和相关的各个工作环节、层面,实施有效控制和管理。

(4) 海军人·机·环境系统综合技术。在舰艇、海军飞机等有限环境内进行科学设计、优化配置、合理布局,充分考虑密集狭窄空间的电磁兼容性、声光协调性和人机适应性,使之便于操作,易于管理,充分发挥效能,保证人员健康和安安全全,最大限度地达到人和物的优化组合。[44]

总之,系统工程作为工程,其主要对象是“人为系统”而非自然系统。然而人为系统不可能脱离自然系统而孤立存在。实际上,技术系统“嵌入”公用系统,而公用系统则嵌入社会系统,所有三者又都嵌入自然系统,密不可分。试观察现时的生态系统,现代地球上的生态系统与人为系统的关系,已完全不是古时的样子了。概括起来说,系统是处理信息、实行控制的实体。系统工程工作者一般从事:

- 决策分析与应用,如区域发展规划;
- 实现实时(在线)决策辅助机器,如“C<sup>3</sup>I”(指挥·控制·通讯·情报系统)、防汛、防火指挥系统等;
- 系统工程理论、方法学(模型、算法)的研究。

在系统工程发展初期 A. D. Hall 曾提出系统工程的“activity matrix”:

其中逻辑维包含:

- 明确问题
- 选择目标
- 系统综合

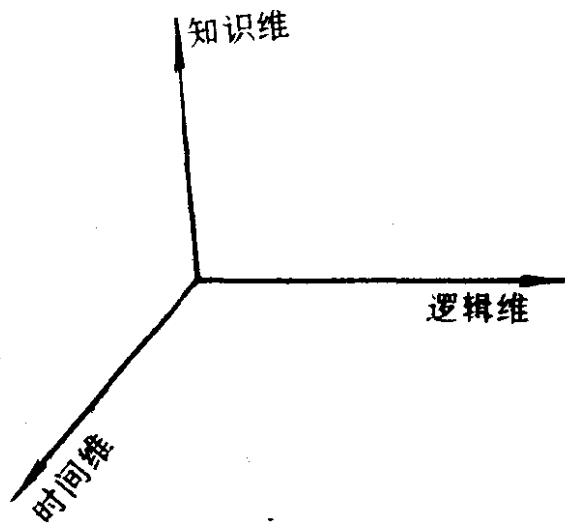


图 0-3 Hall 对系统工程活动的三维分析

- 系统分析
- 最优化
- 决策
- 实施

时间维包含：

- 概念设计
- 技术设计
- 工艺设计
- 系统生产
- 安装试验
- 系统运行
- 更新

知识维包含：

- 工程技术
- 法律
- 环境医学
- 社会学

这不失为是描述系统工程具体活动的一种合理的表达方式。

关于系统工程的定义，钱学森说：“系统工程是组织管理系统的规划、研究、设计、制造、试验和使用的科学方法。”[45] 根据此意，我们也可以将其在形式上写作：

〈非自然系统〉:=〈人工系统〉|〈社会系统〉;  
〈系统决策〉:=(非自然系统的)〈建立〉  
&〈运行〉&〈更新〉&〈废弃〉;  
〈系统工程〉:=〔优化〕〈非自然系统〉的〈系统决策〉的  
〈科学方法〉。

由以上对系统工程的描述中可见,系统工程离不开决策。日本学者高原康彦曾说:系统工程的核心概念是决策。其实何止系统工程如此,一切工程都离不开决策,系统工程只不过强调用系统的观点与方法而已。在实际工作中,有的对象系统的变化以年计即可,是缓动的。研究其决策,可在计算上进行系统的模型仿真而计算,可以与真实系统脱离,即所谓 Off-line Decision Making (离线决策),如人口系统的仿真与决策研究即如此。然而有些系统变化很快,例如军事上的 C<sup>3</sup>I 系统,可以利用现代计算机能快迅进行数据处理与决策的优点,构成 On-line (在线的)辅助决策系统,如图 0-5、0-6 所示。[9]

系统工程方面的工作者很自然地希望对系统学说有所了解。朴昌根曾对近数十年来国外系统理论诸家著文予以介绍,其概要略述如下,可视为近代系统学说之一瞥。

#### (1) 以生物学或心理学为背景的系统理论

• L. V. Bertalanffy 的 General Systems Theory. (一般系统论)

• J. G. Miller 的一般生命系统理论。认为高层次系统具有低层次系统所没有的一些性质,即系统具有“突现性”。然而此学说所强调的是不同层次之间的一致性,自细胞至超国家系统的跨层次一致性,即为了生存和传宗接代必须进行的一些关键性过程,共分 19 种。

• M. Eigen 的超循环说 (The Hypercycle)。由前生物的化学进化阶段→生物大分子的自组织阶段→达尔文生物进化阶段。

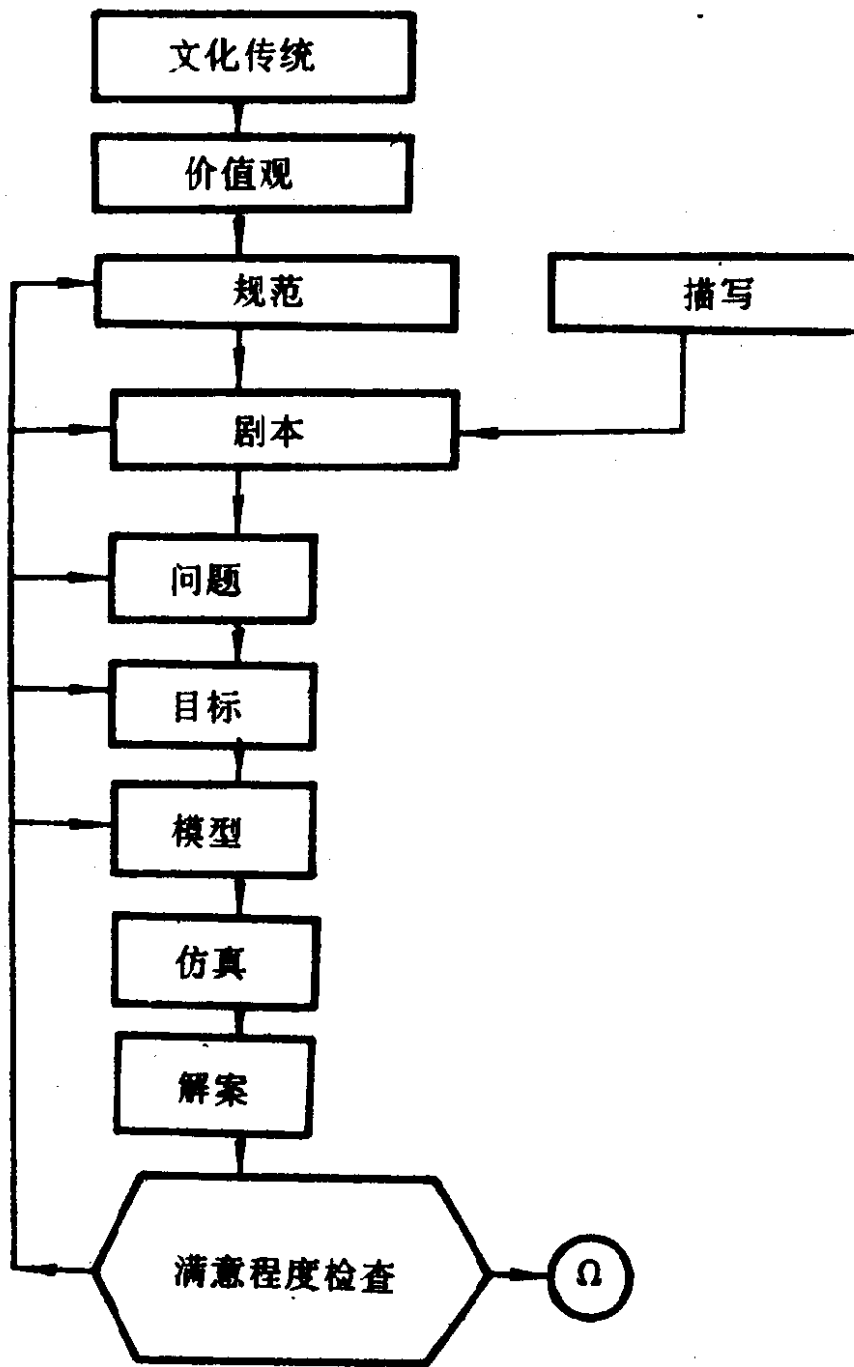


图 0-4 离线决策

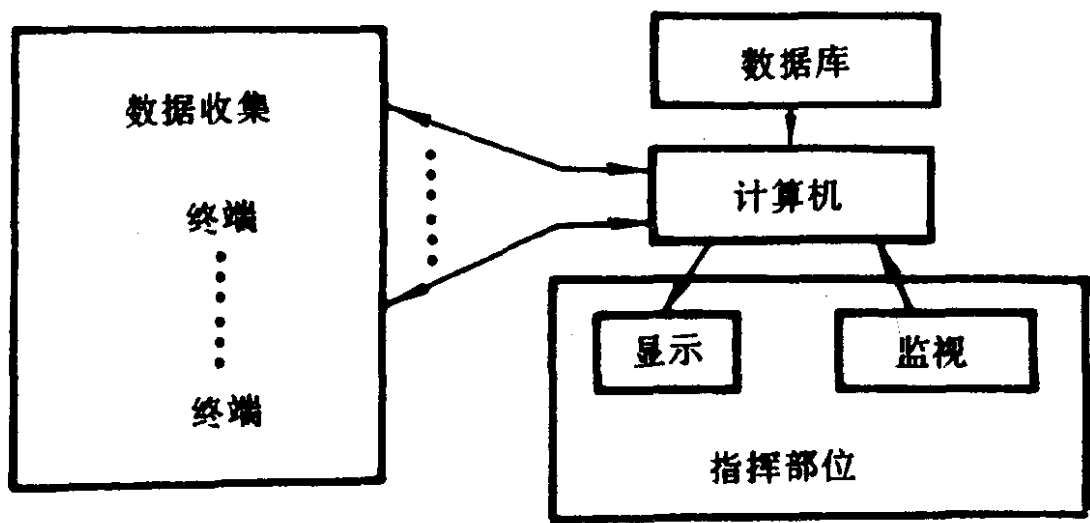


图 0-5 C<sup>3</sup>I 的体系结构

他把循环反应网络分成三个等级：第一是反应循环，作为整体就成为一个催化剂；第二是催化循环，如果一个反应循环中至少有一个中间物是催化剂，则形成催化循环，作为一个整体是一个自催化剂；第三是催化超循环，它是以循环联系各个自催化剂（或自复制单元）而形成的。

### (2) 以物理学为背景的系统学说

- Ilya. Prigogine 的耗散结构。他发现 Lyapunov 函数在平衡态热力学中是熵 (Entropy)，在线性非平衡热力学中是熵产生 (率)，在非线性非平衡热力学中是超熵产生。[47]

- Haken 的 Synergetics (协同学) 也属此类。

- 槌田敦的资源物理学，提出流的概念。熵为流的基础，熵既是状态量又是迁移量。

### (3) 以数学为背景的系统学说

- 如 Mesarovic 体系，系统定义为

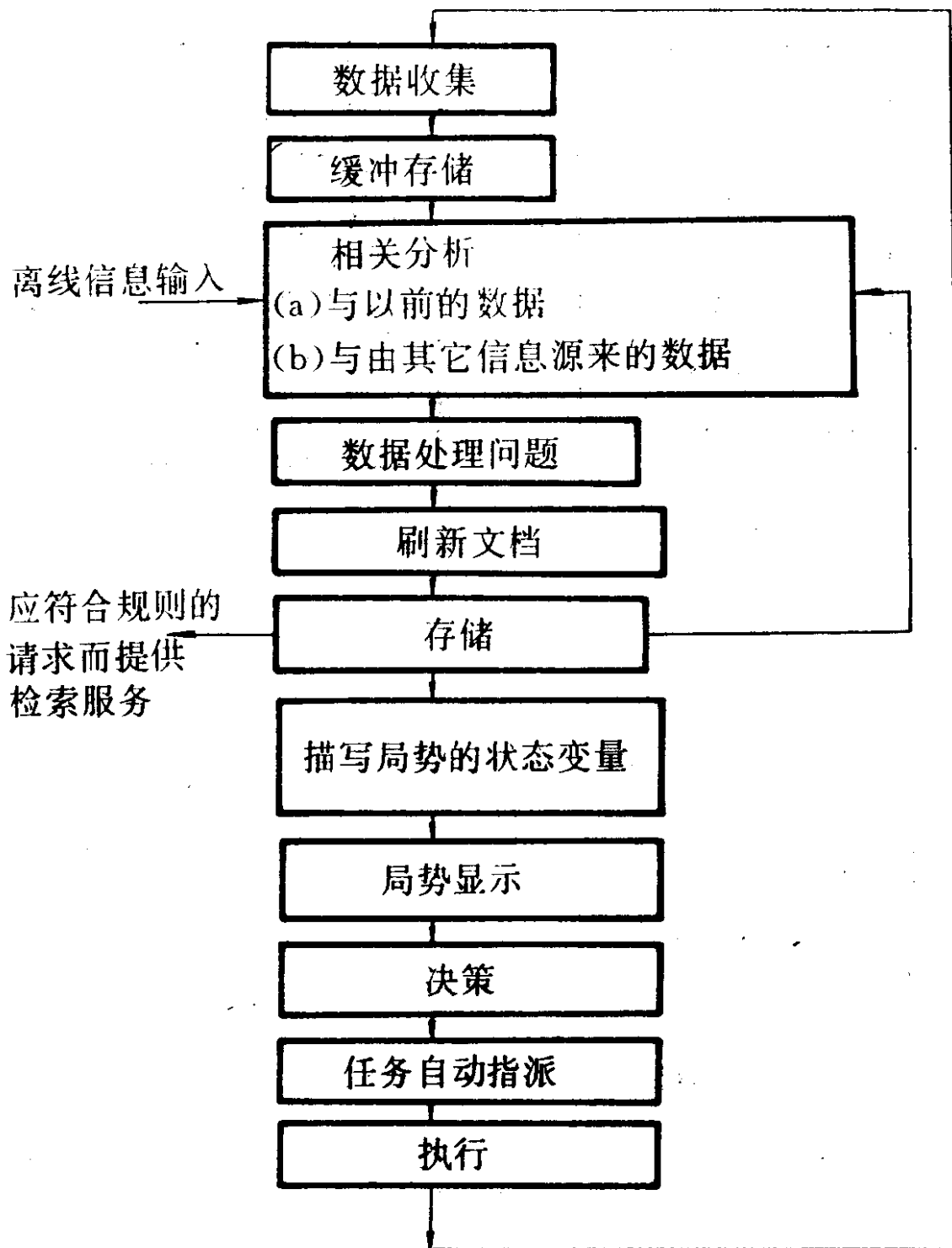


图 0-6 C'I 系统的理事程序



$$S \subset X \times \{V_i | i \in I\}$$

采用目标追求方法,定义

$$\text{过程函数} \quad P: X \times M \rightarrow Y$$

$$\text{性能函数} \quad G: M \times Y \rightarrow V$$

其中  $X$  表示输入集合,  $M$  表示判定客体,  $Y$  表示输出集合,  $V$  表示价值客体, 欲使  $G$  极小化。

• Wymore 体系, R. Thom 的 Catastrophe. [48] 及 Klir 体系。

(4) 以控制论、信息论为背景的系统学说

- 屈浦缪勒的系统理论, 以 Laplace 变换描述因果关系。
- P. Faure 及 M. Depeyrot 的动态系统。
- R. E. Kalman 的现代控制理论。
- Fleishman 的理论。
- J. Forrester 的“System Dynamics”。
- 其它如大系统理论、灰色系统等。

(5) 以社会科学为背景的系统学说

• 作为管理技术的系统论, 如 Operations Research, Leontief 矩阵, Keynes 乘数等。

- 经济学的熵理论。
- 以社会学为背景的系统理论, T. 帕森斯为社会学的结构、功能主义学派之创始人。

(6) 以哲学为背景的系统论

- Bertalanffy 系统的本体论、认识论、价值观与人本主义。
- Laszlo 的等级与共相原理。
- M. Bunge 反对个体主义、整体主义, 而主张系统主义。
- 以 Marxist 辩证唯物主义为基础的系统观。

目前学说甚多, 都是自成一家之言, 并无公认的统一理论。系