

高等学校教材

控制系统  
计算机辅助设计

吴智铭 编



电子工业出版社

# 控制系统计算机辅助设计

吴智铭 编

电子工业出版社

## 内 容 提 要

本教材以线性控制理论的体系为纲,系统地介绍了单变量与多变量,连续与离散等各种控制系统在频域与时域的数学模型变换、特性分析、设计和综合任务中相应的计算方法以及编程处理时的关键步骤。特别对多变量控制系统分析、设计中的理论基础、算法研究和当前的进展水平,本书给予了很大的关注。

本教材供自动控制专业高年级学生及硕士研究生选修,也可作为从事控制工程或系统工程方面工作的工程师和科技人员参考。

### 控制系统计算机辅助设计

吴智铭 编

责任编辑 路石

\*

电子工业出版社出版(北京海淀区万寿路)  
新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售  
北京科技印刷厂印刷

\*

开本: 787×1092毫米 1/16 印张: 17.5 字数: 426千字  
1986年12月第一版 1986年12月第一次印刷  
印数: 1—7000册 定价: 2.90元  
统一书号: 15290·416

## 出版说明

根据国务院关于高等学校教材工作分工的规定,我部承担了全国高等学校工科电子类专业课教材的编审、出版的组织工作。从一九七七年底到一九八二年初,由于各有关院校,特别是参与编审工作的广大教师的努力和有关出版社的紧密配合,共编审出版了教材159种。

为了使工科电子类专业教材能更好地适应社会主义现代化建设培养人才的需要,反映国内外电子科学技术水平,达到“打好基础、精选内容、逐步更新、利于教学”的要求,在总结第一轮教材编审出版工作经验的基础上,电子工业部于一九八二年先后成立了高等学校《无线电技术与信息系统》、《电磁场与微波技术》、《电子材料与固体器件》、《电子物理与器件》、《电子机械》、《计算机与自动控制》,中等专业学校《电子类专业》、《电子机械类专业》共八个教材编审委员会,作为教材工作方面的一个经常性的业务指导机构。并制定了一九八二到一九八五年教材编审出版规划,列入规划的教材、教学参考书、实验指导书等共217种选题。在努力提高教材质量,适当增加教材品种的思想指导下,这一批教材的编审工作由编审委员会直接组织进行。

这一批教材的书稿,主要是从通过教学实践、师生反映较好的讲义中评选择优和从第一轮较好的教材中修编产生出来的。广大编审者,各编审委员会和有关出版社都为保证和提高教材质量作出了努力。

这一批教材,分别由电子工业出版社、国防工业出版社、上海科学技术出版社、西北电讯工程学院出版社、湖南科学技术出版社、江苏科学技术出版社、黑龙江科学技术出版社和天津科学技术出版社承担出版工作。

限于水平和经验,这一批教材的编审出版工作肯定还会有许多缺点和不足之处,希望使用教材的单位、广大教师和同学积极提出批评建议,共同为提高工科电子类专业教材的质量而努力。

电子工业部教材办公室

## 前 言

本教材系由计算机与自动控制教材编审委员会自动控制编审小组评选审定并推荐出版的。

该教材由上海交通大学吴智铭编写，西安交通大学李人厚同志担任主审。编审者均是依据自动控制编审小组审定的编写大纲进行编写和审阅的。

全书主要讲述控制系统的计算方法问题。内容包括自动控制系统的数学模型变换、系统特性分析、系统综合和设计。对于传递函数模型的频率域方法和状态空间模型的时间域方法，本书都予以充分重视。在介绍和运用有关的算法程序时，本书注意由浅入深，由通用到专用，并将一些比较困难的任务分解为一系列可计算的基本问题，以利于逐步深化，融会贯通。书后附录中给出了一些有用而一般不易查到的基本程序，并给出了若干习题，供同学编制程序及上机练习。

本教材节前不带\*者，供本科高年级学生选用，参考教学时数为45学时。节前带\*者供研究生选用。全书总共教学时数约72学时(包括上机操作6~10学时)。

本教材的编写工作是在张钟俊教授的指导和督促下进行的，金钟骥、施颂椒、李静如、吴修敬等老师的观点和科研成果对于编者编写这本教材有很大的启示和影响，上海交大8103、8203、8303班硕士研究生在选学本课程时所编制的程序，有力地支持了本教材的编写工作，主审李人厚同志对全书内容的取舍安排提出了许多宝贵的意见，在此一并表示诚挚的感谢。由于编者水平有限，书中难免存在一些缺点和错误，殷切希望广大读者批评指正。

编者 一九八五年八月于上海交通大学

# 目 录

<b>第一章 概论</b> .....	( 1 )
§ 1-1 发展背景和主要功能.....	( 1 )
§ 1-2 CSCAD 系统概貌.....	( 3 )
§ 1-3 CSCAD 的功能软件的组成.....	( 5 )
§ 1-4 技术上的展望.....	( 7 )
参考文献.....	( 9 )
<b>第二章 单输入单输出系统的模型转换和动态分析</b> .....	( 10 )
§ 2-1 控制系统的基本模型和转换方法.....	( 10 )
§ 2-2 状态空间模型的标准形式和换算.....	( 13 )
§ 2-3 能控性、能观性和矩阵秩的确定.....	( 17 )
§ 2-4 动态系统的分析和求解.....	( 19 )
§ 2-5 连续系统和离散系统的模型转换.....	( 29 )
参考文献.....	( 35 )
<b>第三章 控制系统特性的计算机辅助分析</b> .....	( 37 )
§ 3-1 连续系统的稳定性判据.....	( 37 )
§ 3-2 离散系统的稳定性判据.....	( 45 )
§ 3-3 根轨迹图及动态时域指标.....	( 50 )
§ 3-4 幅相特性和频域指标.....	( 55 )
§ 3-5 控制系统的灵敏度.....	( 60 )
参考文献.....	( 65 )
<b>第四章 单变量控制系统的计算机辅助设计</b> .....	( 66 )
§ 4-1 系统设计的基本概念.....	( 66 )
§ 4-2 连续系统的频率特性设计法.....	( 67 )
§ 4-3 连续系统的根轨迹设计法.....	( 71 )
§ 4-4 离散系统控制器的设计.....	( 74 )
§ 4-5 控制器的优化设计法.....	( 82 )
参考文献.....	( 87 )
<b>第五章 控制系统计算机辅助综合方法</b> .....	( 88 )
§ 5-1 状态反馈和极点配置.....	( 88 )
§ 5-2 观察器的设计计算.....	( 98 )
*§ 5-3 动态最优控制规律和调节器的设计.....	( 104 )
*§ 5-4 线性离散最优控制器.....	( 116 )
*§ 5-5 低灵敏度控制器和次优控制器.....	( 121 )
参考文献.....	( 130 )

<b>第六章 多变量系统的模型转换和标准型</b> .....	(131)
§ 6-1 多变量系统的数学模型.....	(131)
§ 6-2 多变量系统的能控性和能观性.....	(137)
§ 6-3 多变量系统的等价变换.....	(140)
*§ 6-4 系统的能控和能观性分解.....	(142)
*§ 6-5 系统的最小实现和重构.....	(150)
参考文献.....	(164)
<b>第七章 多变量系统的频域分析</b> .....	(165)
§ 7-1 多变量系统的闭环模型.....	(165)
§ 7-2 多变量系统的零点和极点分析.....	(168)
§ 7-3 对角优势分析法.....	(171)
*§ 7-4 特征轨迹分析法.....	(180)
*§ 7-5 奇异值分析法.....	(196)
*§ 7-6 系统的灵敏度和强壮性分析.....	(200)
参考文献.....	(204)
<b>第八章 多变量系统的频域设计</b> .....	(205)
§ 8-1 多变量系统的设计要求.....	(205)
§ 8-2 解耦系统的分析设计.....	(206)
§ 8-3 非完全解耦系统——对角元优势系统的分析设计.....	(208)
*§ 8-4 特征轨迹设计法.....	(220)
*§ 8-5 系统设计的奇异值分解(SVD)法.....	(231)
参考文献.....	(238)
<b>第九章 多变量控制系统的优化设计</b> .....	(240)
§ 9-1 多变量系统优化设计中的基本问题.....	(240)
§ 9-2 移动边界法(普通约束).....	(245)
*§ 9-3 泛函约束下的系统设计计算.....	(247)
参考文献.....	(255)
<b>附录一 几个常用程序</b> .....	(257)
<b>附录二 矩阵代数中的几种基本变换</b> .....	(268)
<b>附录三 习题</b> .....	(270)

# 第一章 概 论

## § 1-1 发展背景和主要功能

自动控制学科的起源,虽然可以追溯到十九世纪麦克斯韦(Maxwell)和劳思(Routh)所解决的系统稳定性的研究工作,但是长期以来,控制技术一直处于从属的地位,理论上也只侧重于单个输入和单个输出的简单系统。

本世纪五十年代以后,由于数字计算机的飞速发展和广泛应用,人们得以摆脱繁复的冗长的数字运算。许多以前使人望而生畏的计算任务(常常以人月或人年来进行估量),可以在瞬息之间求出解答。它为许多要求精密定量计算的学科的发展,创造了极为有利的物质条件。

随着工业的发展,特别是航空和宇航工业的发展,对飞行器的导航、姿态控制、燃料消耗都提出了很高的要求。客观实践中取得的新成就和提出的新课题,促使控制理论学科吸收、运用了应用数学和计算数学中许多新的方法和成果,形成了本学科发展中的一个新阶段,这就是现代控制理论。它的出现,表明了控制理论的成熟,即成为一门既是高度抽象的、又是能精确定量的“方法论”学科,它适用于分析、处理各类实践背景完全不同的系统。

但是,在把航天技术中已经行之有效的现代控制理论的各项成果移植到一般工业生产实践中时,却遇到了很大的困难。除了装备、投资等技术经济问题之外,一个主要的困难是:要把几乎完全是由数学语言来表达的现代控制理论转化为大部分工程技术人员都能接受和运用的、工程化的分析和设计方法。控制系统的计算机辅助设计(Control System Computer Aided Design, 简称为 CSCAD)就是在这样的实践背景下出现的。虽然运用计算装置和显示设备来描绘控制系统幅相特性曲线的工作,早在五十年代已经出现,然而有意识地强调以 CSCAD 来填补现代控制理论和实践之间的鸿沟的,当推六十年代末期和七十年代初期在英国曼彻斯特大学理工学院(UMIST)工作的罗森布洛克(Rosenbrock)和麦克法兰(MacFarlane)两位教授。他们把传统的单变量系统的频率分析设计法和多变量的状态空间分析设计法联系起来,使熟悉经典频率法的工程技术人员能很快学会多变量系统的设计方法。与此同时,美国的梅尔萨(Melsa)教授和琼斯(Jones)博士收集了当时最常用的控制系统的计算程序,包括频率法和状态空间法等多方面的计算程序,编成教材出版。这对使用计算机来分析、设计自动控制系统的工作也起了一定的推进作用。

CSCAD 研究工作开发以后,显示出其极强的生命力。迄今为止,该项技术虽然还未成熟完美,然而却具备了许多优点。主要有以下几点:

(1) 作为一个“人-机”联合工作的系统,它既利用了计算机的高速度、高精度,又发挥了设计人员的分析、判断和决策作用。

(2) 加快了设计速度。便于人们进行多种设计方案的比较,以得到最有利的技术经济指标。



(3) 设计计算精度的提高,使系统的可靠性增加,明显缩短了系统实施时的现场调整时间。

(4) 系统的设计任务由原先要求一组高级研究人员协同进行工作降低为只要求经过短期培训,能理解系统性能指标和使用计算机软件的中级技术人员独立进行工作,这大大节约了智力投资。

(5) 对于具备计算机的部门,可以在不添置硬件设备、不增加操作维护人员的条件下,扩充计算机的应用软件系统,以期充分发挥计算机体系的功效。

由于 CSCAD 技术所具备的这些特点,许多高等院校、研究院、设计院和大型工业企业部门都愿意开发、研究和用它。

就当前世界各国发展的 CSCAD 软件包来看,它所包含的内容和应用的范围都非常广泛。自动控制系统中的各主要分支,例如模型辨识、分析、设计、综合和仿真等方面,都有相应的软件包建成。

软件包的研制和该部门的研究方向是紧密配合在一起的。软件包的水平事实上反映了研制者在理论、方法和应用等各方面的成果。

高校是发展 CSCAD 软件包中最活跃的力量。从下面例举的著名软件中,读者可以体会到这一点。

UMIST-CSCAD 英国曼彻斯特大学理工学院建立的多变量系统对角元优势设计法。

CLADP 英国剑桥大学建立的多变量系统复变函数设计法。

IDPACK 瑞典隆特大学建立的系统辨识方法。

DELIGHT 美国加州大学贝克莱分校和英国帝国理工学院建立的控制系统优化设计法。

此外,西德、荷兰等国的学校在过程控制、自适应系统等方面都建立了很有价值的软件包。

各国高校都积极开展 CSCAD 的研究工作决不是偶然的,它为学校带来的好处可归纳为以下几点:

(1) 配有人-机对话软件和图形终端的 CSCAD 系统是一种高效率的教学设备。

(2) 这是一种积累学校中各个教师和研究生从不同专题领域所得到的研究成果的最好形式,有利于应用前人的工作成果,提高研究效率。

(3) 是学校将研究成果转移给工厂及应用部门的良好形式。使理论上和方法上的改进,可以很快地在实际应用中推广。

工业企业设计部门所建立的程序包都是有其明确目标的,它主要是为了开发新产品方便。许多大型企业及研究机构都编制了能够完整地解决某一类问题的程序包,其中特别是宇航及飞行器的操纵及制造的程序包,例如NASA(美国国家航空及宇航局)的ORACL包。某些企业则归纳利用许多功能各异的程序包组成一个强有力的通用软件包,例如GE公司研究发展中心收集了英国的CLADP、美国的SSDP(状态空间设计包)、瑞典的IDPAC(辨识包)及SIMON(非线性包)、应用数据库及电子邮包(mailbox)技术来协调程序包之间的配合,使成为一个完整的系统。

在苏联和东欧国家,科学院和专业研究所常起着很好的组织作用。许多内容比较全的程序包都是他们着手集中编制的。

## § 1-2 CSCAD 系统概貌

### 1. 硬件部分

一般情况下, 承担 CSCAD 全部工作的硬件系统可由一台中型或小型计算机加一套外围设备组成。近年来, 由于微型计算机系统的迅速发展, 如果在功能范围和计算速度上略作牺牲, 一套良好的微型计算机系统也能支持整个辅助设计工作。

图 1.1 给出了 CSCAD 硬件系统的基本结构。

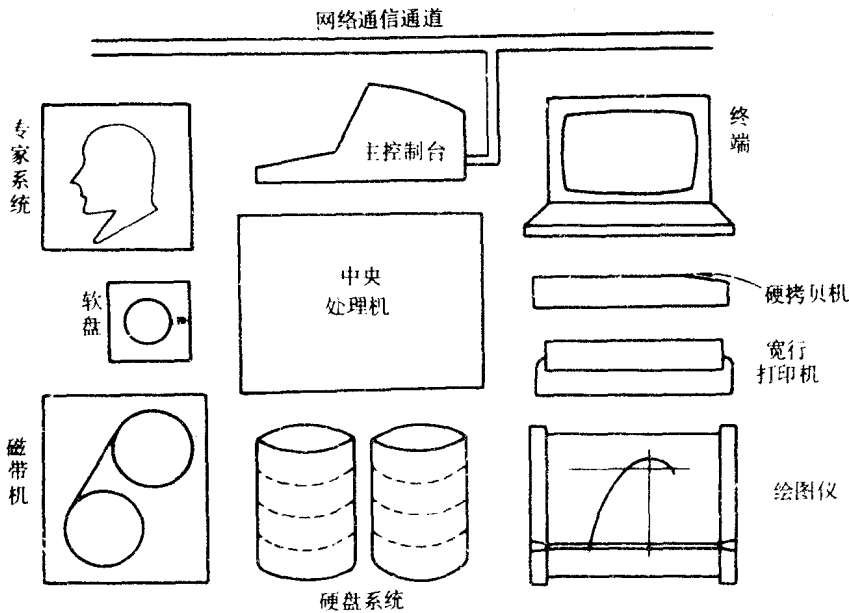


图 1.1 CSCAD 硬件系统结构

考虑计算机的多个终端同时使用的情况, 对小型系统而言, 内存至少应在 0.5M 以上, 字长 16 位或 32 位。主外存以磁盘为宜, 容量应在 10M 以上, 用户程序可以存放在磁盘的指定区域内。但也有某些系统, 以软盘存放用户程序, 以便于更迭。一般的外围设备, 如软盘驱动器、磁带机、字符终端、宽打及 X-Y 绘图仪均可按常规选用。值得特别注意的硬件设备有下列几种:

(1) 接口。为了从连续系统的输出端或者它的一个记录(例如磁带)中直接采集样本数据, 应具备有模拟/数字转换装置 (A/D) 作为计算机的输入接口。一般 CSCAD 系统不考虑设计结果的实时执行, 其输出端不需要配备数字/模拟 (D/A) 接口, 当然配备了更灵活。

(2) 图象终端。除了一般的电传终端或 CRT 字符终端外, 若配有一定数量的图象终端, 对 CSCAD 极为有利。在图象终端内, 以缓冲存储器暂存需要显示的字符和图形, 并在 CRT 屏幕上显示这些字符和图形, 其反应速度远比电传机打印快, 而且没有噪声干扰。更重要的是, 图象的信息密度高, 容易使设计人员对一个复杂的过程建立直观的概念,

便于他们判断和决策。图象终端的品种较多，CSCAD 中常使用静电存储管型 (Storage Tube)，这是一种量化精度高、包含信息密度大、处理画面速度快的图象显示终端，只是没有彩色和灰度选择，不宜绘制可动画面，但这对 CSCAD 工作并无明显影响。当然，随着电视式图象终端的价格降低、量化精度的提高，选用电视式彩色终端，效果会更好。

(3) 屏幕复印机 (Hard Copy 或硬拷贝机)。图象终端上显示的结果是无法保存的。采用屏幕复印机，可按指令将图象终端屏幕上的字符和图形复制下来，以便日后查对和分析用。

## 2. 软件部分

软件部分的基本结构层次如图 1.2 所表示。它主要包括操作系统、数据库、应用程序、高级语言和用户语言等层次。其中相当一部分和通用计算机中的软件是一致的。这里仅选择与 CSCAD 软件包的编制和工作方式直接有关的部分作一些简略的分析讨论。

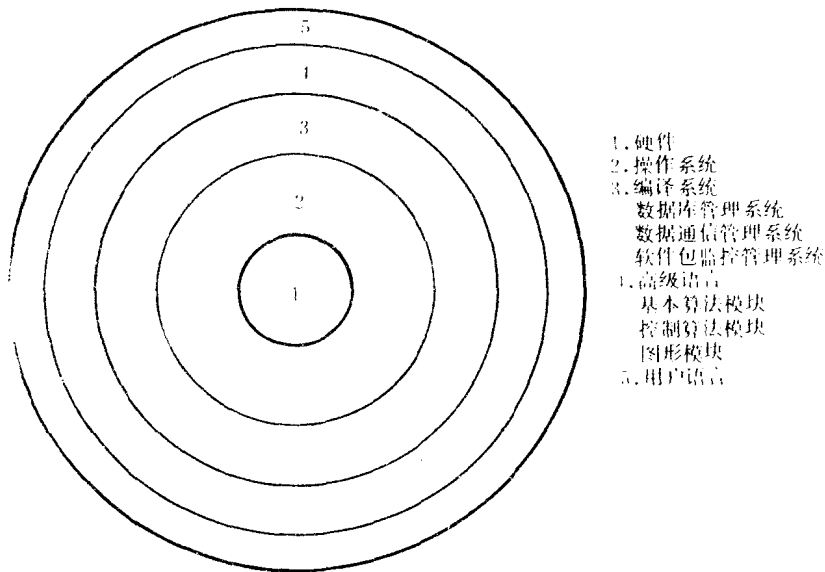


图 1.2 CSCAD 软件系统的结构层次

(1) 语言。绝大部分的 CSCAD 系统采用 FORTRAN-IV 语言，因为这种语言的通用性最广，运算速度快，适应于控制系统中计算量较大的情况，此外也有用 BASIC, PASCAL 或其他语言的。

(2) 监控。类同于一般计算机的监控软件。其功能包括：按优先级协调各项任务的上机次序；管理多用户分时运行中各项作业的执行；接受各个终端提出的中断请求；负责主机和外围设备之间的联系(文件和数据等信息的交换)；指挥各通道和外围设备工作。

(3) 管理文件。完整的 CSCAD 系统，除了操作软件外，还包括大量的功能软件，用以完成控制系统中的各种计算。由于作业任务的种类很多，又常共用一些基本的算法程序，因此对功能软件，以采用灵活的模块式结构为宜。初步估计，一个较完备的 CSCAD 系统，约有 500~600 个模块。每个模块都是独立可扩充的，由一组容易记忆的字符代码作名字。管理文件对模块进行分类、编制索引，以便在磁盘中存放和调用。管理文件还可对各模块施加隔离性的保护，既能维持专利权，又能防止使用时的轻率修改。

(4) 作业编制。CSCAD 的作业方式通常有程序包运行方式和人-机对话方式两种

程序包运行方式类同于一般用计算机解题的过程,适用于计算要求和计算方法非常明确的情况。在建立输入数据文件后,由程序包装配调用模块,执行计算,最后输出结果。这种运行方式的优点是:能够最充分地发挥机器的运算能力,一旦准备就绪,不需要设计人员的监督。缺点是:在作业执行前,设计人员必需完全了解程序包的结构、性能和规范;并且一旦计算开始直至计算完成,很难施加设计中常发生的临时性的修改要求。

人-机对话方式适用于工程人员不熟悉功能模块,希望在设计进程中修正指标或参数的情况。总管理程序在操作者选定任务前,对包的内容和功能给以介绍。整个设计任务常按其自然进程分为几个阶段。每执行一段时,系统提示使用者在键盘上输入必须的数据;若有疑问或操作错误时,还予以解释和指导。计算的结果(数据或曲线)在终端上显示,并允许修改、校正、重新计算以至更换方法,直至使用者满意为止。这种作业方式在设计进行中提供了人-机之间信息交换的机会,充分发挥了设计人员的经验和判断能力。

人-机对话软件在 CSCAD 中受到了用户的欢迎。但也暴露出一些缺点。如对话过程中,人的反应太慢,若不扩充终端的数量,计算机的能力无法充分利用。另外,任何一个高水平的熟练设计员,在使用中都必需自始至终守候在终端旁,随时准备输入每一阶段的原始数据,作出各种选择和回答,时间长了,容易产生厌烦情绪。因此,理想的作业方式,应该允许两类作业软件的特点并存,兼有上述两者的长处而避免其不足。当操作者无 CSCAD 经验或对所设计的对象把握不够时,可采用有人-机对话的键盘形式。一旦问题的求解过程清楚以后,就可选定包内的一系列规范化的作业模块,并编排好所需的输入数据文件,转向程序包的作业方式。

### § 1-3 CSCAD 的功能软件的组成

随着控制理论及其应用的发展, CSCAD 的功能软件迅速增加。当前,几乎各种常用的控制系统的分析、设计任务都可由计算机在 CSCAD 软件的帮助下,进行高效率的计算和研究。一个完整的 CSCAD 功能软件系统,将涉及大量作为其理论背景的专业文献和许多数值计算方法。下面对 CSCAD 功能软件的种类、应用范围和质量评价略作介绍。

首先简略地说明一下 CSCAD 应用软件系统中所包含的功能软件的类别。每一类功能软件中又包含了许多功能模块,内容极为丰富。对此,本教材中根本无法全部介绍,只是在这一节中略述一下它的全貌。

从采集控制系统中的各种类型的信号开始,经过信号分析,系统工作机理分析,建立一定的数学模型。如果这一模型是能反映系统本质的。在这基础上对模型的变换、分析和为了实现某一工作要求而作的设计、综合都是比较可靠的。为了增加对以上计算结果的信赖程度,在实际系统构成以前,可以用原系统的模型和控制器的模型组成数字仿真系统,以检验设计计算的效果。

按照以上所述,在计算机上分析和设计一个控制系统的功能软件将有:

- (1) 信号处理和分析。
- (2) 系统辨识和参数估计。
- (3) 数学模型变换。

- (4) 系统特性分析。
- (5) 单变量系统的设计。
- (6) 多变量系统的设计。
- (7) 多变量系统的综合。
- (8) 系统仿真。

其中(3)~(7)各项中所对应的功能软件,将是本教材所叙述的重点。(1)、(2)、(8)等部分,读者可参阅已出版的相应教材[1][2][3],本书中不再复述。

除了上面列出的八种功能软件之外,控制系统计算机辅助设计中还大量使用许多标准化的功能软件,例如:

- (9) 数值计算软件,特别重要的是线性代数、微分方程、概率统计和优化法等四种。
- (10) 各种图形软件。

随了控制理论研究的深化、方法的推进和实践开发的要求,下面几类功能软件已相继在不同的研究环境中形成。这些功能软件目前虽未成熟化,却是今后控制系统计算机辅助设计中应该重视的一类研究项目。它们是:

- (11) 自适应和自校正控制系统。
- (12) 分布参数控制系统。
- (13) 非线性控制系统。
- (14) 各种不同类型、不同对象的大型复杂系统。

CSCAD 软件包的运用过程中,一般都涉及到大量的程序和大量的数值计算。因此,应用软件的质量是十分重要的。然而,它的评价却非常复杂。

在长期使用计算机的过程中,在一些基本的数学问题上,例如矩阵的特征值问题、线性代数方程求解问题、常微分方程组的求解问题等方面,数值计算的技巧都获得了很大的发展,客观上逐步形成了判断应用软件质量的标准。对各不同专业领域中所解决的特殊计算问题,也可以引用这些标准的概念来评价。这些标准是:

**广泛性。**指程序所适用的数学问题的类别。

**可靠性。**不会因算法引起过分的误差,遇到坏条件下给出警告。

**稳定性。**在有扰动(特别是随机的舍入误差)的情况下,计算结果不会失去控制(特别是指随机的舍入误差的干扰)。稳定算法下得到的结果和准确解之间可能会有偏离,相反,某些不稳定的算法在数据条件好的良态条件下,也可能得到合理的结果。

**精确度。**主要取决于无穷级数的截取项数和运算中的迭代次数。在算法稳定的条件下,精度随这两个数值的提高而改善。

**效率。**即运算速度或算题中的机时消耗。这一指标的考核应该在同样的精度要求下作比较。

在强调算法本身质量的同时,也不可忽视下面两类主要客观条件的影响。其一是:被解问题本身的难度,如果问题本身是病态的、奇异的或高度灵敏的,就不可能用一般性的程序去求解,而是应该开拓新的算法。其二是:执行这一算法的硬件(计算机)和操作软件的影响,主要是选择合理的字长,才能得到经济而有效的结果。

在以后各章所讨论的功能软件和算法中,不可能全面引述这里所提到的评价标准。但是在问题比较明朗,软件编制人员能作出一定判断的情况下,应尽可能实现上述目标,

它将对今后的使用、修改、扩充都带来莫大的好处。

实际上最普遍的、用于保证功能软件有效性的方法是实例检验的方法。按照功能软件的工作对象、性能要求和它所包含的算法特征，提出一组难度不同的计算实例，编组成一个试验程序，对功能软件中的各个子块进行考核。各专用的 CSCAD 模块在编制完成后，也应该附有这类软件。它的主要功能是：确定功能软件的适用范围，特别是在功能软件作了修改、移植后，可以考察应用软件的能力是否发挥正常。某些情况下，校验模块中的一些算例也可以作为使用软件包的方法的说明。

## § 1-4 技术上的展望

过去的十年是 CSCAD 成长和迅猛发展的时期，这个势头在今后相当长一段阶段中还会保持下去。国际自动控制联合会 (IFAC) 已经建立了“控制系统的计算机辅助设计”专业会议组，每三年召开一次专业学术会议。内容包括：硬件和软件系统的发展，应用软件包的发展，专用程序，工业应用以及 CSCAD 和其他相邻的新技术领域之间的关系(例如：计算机辅助教学，计算机辅助制造)等，非常广泛<sup>[4],[5],[6]</sup>。

由于 CSCAD 技术是由许多学科和技术相互联系成的一个综合技术，其发展的主要因素将是：(1) 计算机技术，包括硬件和软件方面的新成就。(2) 控制系统、大系统和系统工程诸方面理论上的进展和方法的改善。(3) 计算数学、数值分析等学科在算法上的突破。(4) 实际应用上的需要。

### 1. 计算机科学和技术的发展

计算机学科对 CSCAD 技术的推动和促进将体现于：

硬件系统的降价促进了应用的普及化，渗透到更多的行业。

硬件系统运算速度和存储密度的提高，高分辨率绘图终端的使用，多机通信和并行处理的实现将大大提高 CSCAD 系统的能力，并为软件体系的变革创造了条件。

软件系统将会在现有基础上总结已有经验，开展统一化、标准化的工作，并探索更合理的系统。其中将包括：用户语言的扩充，高级语言的选择比较，程序编制的结构化，算法的标准化以及进一步利用新发展起来的数据通信、数据库技术和局部网络以完善和扩大软件系统的功能，做到资源共享。图形软件的不断改进也是推广 CSCAD 的重要因素。

从较长远的发展进程来看，CSCAD 软件的工作方式，将由人-机对话方式和程序包方式向专家系统 (expert system) 的方式过渡。所谓专家系统，是计算机系统内除了存放程序库、数据库外，还存放了知识库，它具备了某一类专家处理系统分析和设计问题时的经验和能力。

在信息充分的条件下，专家系统的工作过程如图 1.3 所示。

专家系统中仍存在一定程度的人-机对话，人-机对话主要应用于：

- (1) 计算机能经过判断后主动向操作人员提出设计应补充的信息和条件。
- (2) 信息不足时，软件系统能主动提供若干种假设以深化分析。

(3) “智能软件”或“知识库”包括了定律、规则等代表知识和经验的内容，它们可通过对话不断补充、增加和更新以完善软件系统的决策功能。

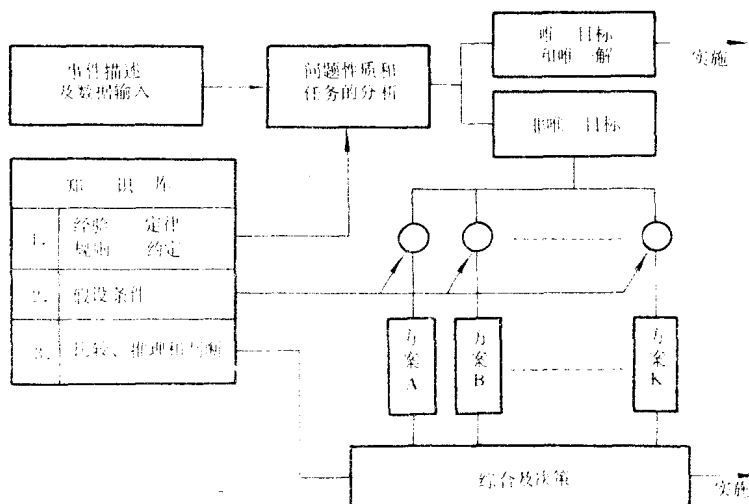


图 1.3 专家系统

## 2. 系统科学的发展

近十年来,线性控制系统的分析、设计理论大量地转化为 CSCAD 的软件包,这一工作目前仍在继续进展中。与此同时,许多实践中迫切要求解决的、难度较大的问题也在 CSCAD 中逐步得到了反映。

(1) 多变量系统的分析、设计、综合,虽有坚实基础,但仍是 CSCAD 工作的重点。它主要希望解决实际推广使用中遇到的困难,包括:计算的效率和结果的可靠性,特别是在系统辨识精度较低、对模型作了降阶简化处理、参数随工作环境漂移和外扰动作用下,所设计的系统的调节性能、跟踪性能的鲁棒性问题。

(2) 系统工程和大系统方面,理论研究、算法设计和应用开发方面都有大量工作要做。静态的宏观系统中常采用运筹学方法。虽然对象的分散性很大,但是在建模、数学规划、优化技术、可靠性分析、质量检验、决策和仿真等基本问题上,仍有逐渐统一为标准软件系统的可能。另一类动态大系统研究要求建立动态的随机模型,判断大系统的稳定性,按照系统的结构特征实现递阶优化控制或分散控制。由于理论上开拓较迟,实际应用的经验也不充分,因此还需要经过一段时间的积累,才能出现比较成熟的软件体系。

(3) 面向复杂的实际问题。随着应用上的需要和理论研究的深入,不断开发了经典体系中无法处理的领域。例如非线性系统、非平稳系统、时滞系统和分布参数系统等。其中有些系统的研究工作,多年来进展缓慢,也很难在短期内从理论上出现根本性突破。对于某些计算量特别繁重的系统,每当计算机的速度和能力出现新的跃进时,实现控制的前景也随之明朗化。这些设计软件,最终将充实到 CSCAD 系统中去。

## 3. 计算数学和数值分析方法

计算方法上的进步,对 CSCAD 体系有强大的推动作用。例如数值计算中的特征值求解、奇异值分解、最小二乘法、病态方程解、优值搜索、快速付里叶变换等,对系统的分析、设计和仿真等各方面水平的提高,具有重要意义。当前在非线性优化和多维偏微分方程数值求解问题上的研究,将对非线性系统和分布参数系统的分析、设计很有影响。随着

今后面临的复杂系统中的数学命题和计算任务, 控制系统的研究人员必须密切注意吸收计算数学方面的新成就, 也应该为充实这一方面的工作作出贡献。

#### 4. 应用实践的发展

CSCAD 建立之初, 是作为工厂企业、研究部门和大学进行控制系统的分析计算之用的。由于整个系统包含的应用软件具有很强的功能, 因此可以延伸到许多实际场合中使用。例如 CSCAD 中的软件经过适当修改后, 移植到中、小型机和微型机上, 直接为生产第一线中的简单的实时控制以至整套的过程控制服务。所作的工作包括生产对象的低阶数学模型递推辨识、优化参数寻求、相应调节器的设计等, 经济上能收到很大效益。

总的说来, CSCAD 类似于一座横跨于理论和实践之间的桥梁。它吸取了控制理论中的原理和方法, 通过计算机的配合运用, 推广到各行各业中去。随着理论研究的深入、计算机的普及和实践的深入, 它将发挥出巨大的威力。

我国的 CSCAD 工作, 虽然起步较迟, 但经过多次全国性专业会议的倡导和许多院校、科研单位的努力, 已建立了多种类型的软件<sup>[6]</sup>, 其中有些反映了我国控制理论研究的特色和独创性, 有些已在工业中推广应用。在中国科学院科学基金的支持下, 我国第一个 CSCAD 协作组在条件比较困难的情况下, 已建立了一组完整的 CSCAD 软件, 其规模和功能在当前的 CSCAD 软件包中是少有的, 这充分体现了社会主义大协作的优越性, 也为今后我国控制理论的研究、控制技术的普及应用创造了良好的条件。

#### 参 考 文 献

- [ 1 ] 徐俊荣、范懋基, 信号与线性系统, 电子工业出版社, (1985).
- [ 2 ] 徐南荣, 系统辨识导论, 电子工业出版社, (1986).
- [ 3 ] 韩毓君, 系统仿真, 国防工业出版社, (1985).
- [ 4 ] Cuenod, M., Computer Aided Design of Control System, 1st IFAC Symposium CADCS, 1979, Zurich.
- [ 5 ] Leininger, G. G., Computer Aided Design of Multivariable Technological System, 2nd IFAC Symposium, CADMTS, 1982, West Lafayette, U. S. A.
- [ 6 ] Hansen, N. E. and M. Larsen, Computer Aided Design in Control and Engineering System, 3rd IFAC Symposium, CADCE, 1985, Copenhagen, Denmark.
- [ 7 ] Computer Aided Control System Design, Special Issue, Proc. IEEE, 12 (1984).
- [ 8 ] 控制系统计算机辅助设计专辑, 信息与控制, 6, (1982).



## 第二章 单输入单输出系统的 模型转换和动态分析

本章讨论最基本的单变量控制系统的各类模型、它们的性能特征、转换方式和动态计算问题。本章所包含的内容对后面单变量系统、多变量系统的设计、综合都是十分重要的。

在自动控制系统的分析研究中,单变量系统的数学模型通常采用下面三种形式:

- (1) 高阶的动态方程式(包括微分方程式及差分方程式);
- (2) 输入输出传递函数;
- (3) 状态空间表示式(一阶动态方程组)。

按照控制系统的实际使用场合、运行要求和硬件设备的结构特点,系统的工作方式可能有以下两种:

- (1) 控制和输出信号都是随时间连续变化的过程;
- (2) 控制和输出信号都经过采样,其数值在时间上是离散出现的。

上面两种分类方法经过组合后,就得到六种不同的基本模型。本章将选择几种主要的形式进行分析。

在本章范围内,并不接触到控制系统的运行分析和设计问题。本章主要任务是对几种典型的系统模型进行一些基本的结构分析和数学计算。因此,它将使读者接触到许多“计算数学”中的常用算法,它是从通用的数值计算方法过渡到控制系统中专用算法的重要环节。以前没有机会系统地学习“数值计算”课程的读者,可从本章使用的程序和给出的一部分参考资料开始,逐步了解和掌握控制系统分析计算中最常用的基本运算方法和程序。

本章的重点是连续系统的模型分析法,以传递函数和状态空间两种形式为对象。离散系统的分析方法和它非常接近,因此仅对它的独特之处作较详细的解说。

### § 2-1 控制系统的基本模型和转换方法

本节讨论线性常系数动态方程组成的单输入单输出(Single Input Single Output, SISO)控制系统,常简称为单变量线性定常系统。

#### § 2-1-1 连续时间的 SISO 控制系统

时间上连续工作的控制系统,传统上用高阶微分方程来表示整个系统中的动态过程。如果对此一方程进行拉氏变换,并把系统的输入、输出变量进行归并,便可得到频率域中的传递函数表示式。若通过增添系统内部状态变量的方法,使高阶微分方程降低为一阶微分方程组,就得到了用矩阵形式表示的状态空间模型。