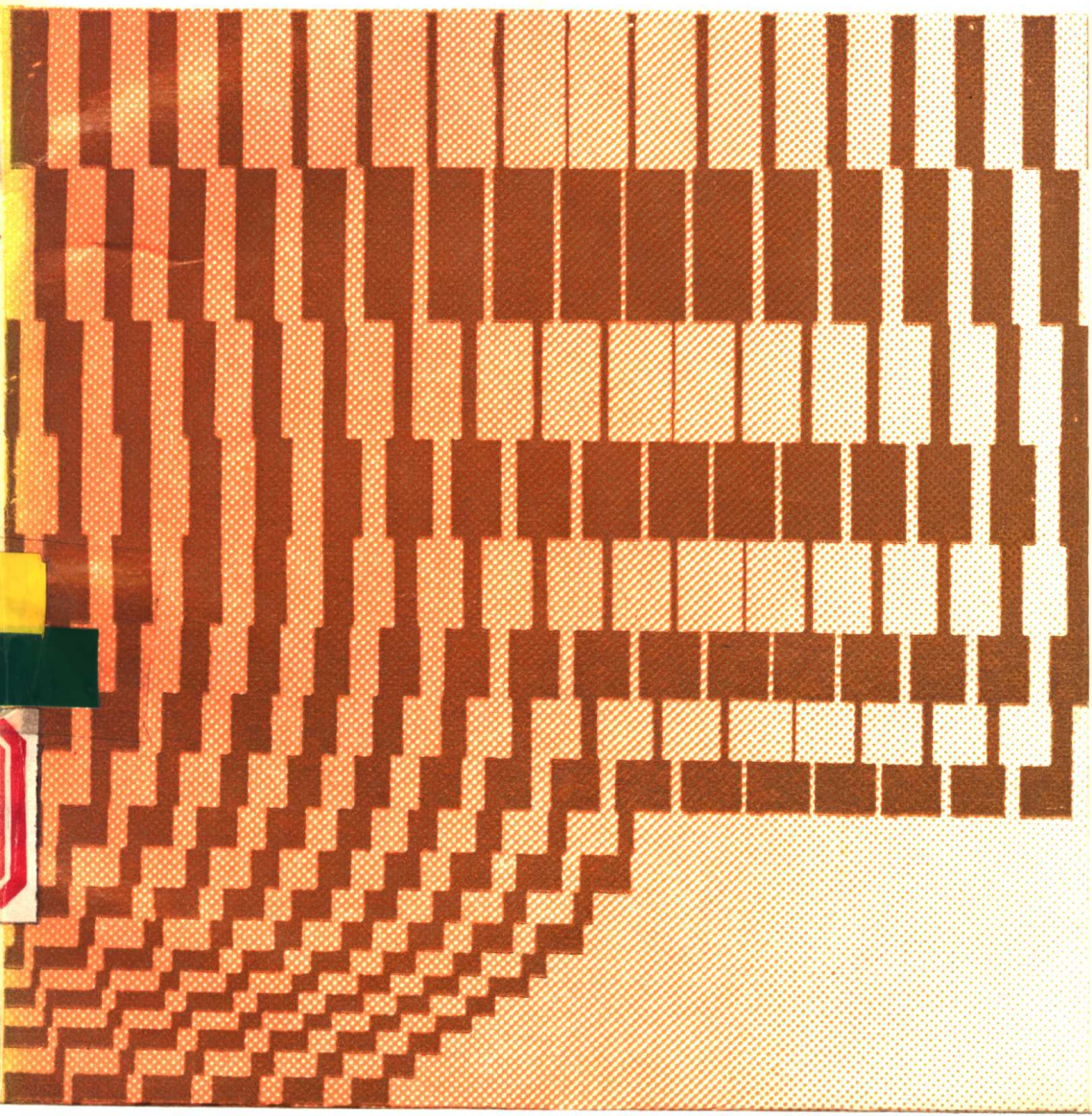


控制系统计算机 辅助设计

叶庆凯 编著

北京大学出版社



控制系统计算机辅助设计

叶庆凯 编著

北京大学出版社

内 容 简 介

本书共分十三章. 第一章讲述软件包的基本结构及要求. 第二章至第八章讲述控制系统计算机辅助设计的基础算法, 重点在第四章(优化计算)、第五章(线性代数)和第八章(代数矩阵方程). 第九章至第十三章讲述控制系统计算机辅助设计的功能算法, 重点在第十二章(多输入多输出系统的计算机辅助设计).

本书可供自动化、自动控制、力学等专业作教材, 也可供控制系统工程技术人员阅读.

控制系统计算机辅助设计

叶庆凯 编著

责任编辑: 李怀玺

*

北京大学出版社出版

(北京大学校内)

北京大学印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

850×1168 毫米 32 开本 15.875 印张 400 千字

1990 年 4 月第一版 1990 年 4 月第一次印刷

印数: 00001—4,000 册

ISBN 7-301-01012-5/P·032

定价: 8.40 元

前 言

随着计算机技术的迅速发展,使得控制系统的设计工作能够方便地利用计算机来进行.依赖于现代控制理论的控制系统设计方法的特点之一就在于一开始就考虑了充分利用计算机来辅助设计,创造了一套特别适用于计算机工作的设计方法.近年来,控制系统计算机辅助设计(CSCAD)的方法在处理各种控制问题时,都具有很大的适用性,并取得了明显的效益.尽快地熟悉和掌握CSCAD的先进技术,是我国自动控制科学工作者刻不容缓的任务.希望本书的出版,能在这方面发挥一定的作用.

本书的主要目的在于说明控制系统计算机辅助设计的各种算法的特点.至于现代控制理论本身,本书中只引用要用到的一些定理,除了个别特别重要的以外,基本上都不予证明.对这些定理的证明有兴趣的读者可参考其它有关的书籍.

在编写本书中的各种算法时,作者有意识地尽可能引用基础算法.这样做有两个目的,一方面,控制系统计算机辅助设计的效率往往主要依赖于某些基础算法的效率,所以对这些基础算法的性能,包括效率、可靠性等,有必要作单独的比较仔细的讨论.另一方面,把基础算法独立出来,也便于更换程序中所使用的基础算法,以便进行比较.当然,这里讨论的基础算法不仅可被本书中讲述的各种控制系统设计程序调用,也可被其它设计程序甚至将来发展的设计程序所调用.因而,本书花了比较大的篇幅来讨论各种基础算法.不但讲述算法本身,而且对主要算法作了误差分析,指出其适用范围,对同样功能的几种算法进行比较来说明各自的特点.

在本书的编写过程中,作者得到了西安交通大学李人厚教授的热情鼓励与支持.作者与北京航空学院毛剑琴博士的多次讨论给了作者不少有益的帮助.另外,中国控制系统计算机辅助设计软件包联合设计组各成员,特别是总体组的韩京清、王治宝等同志在很多方面给予了指导与帮助.在此对有关同志表示衷心的感谢.

本项目得到了国家自然科学基金的资助.

由于作者水平有限,书中一定有不少缺点、错误,诚恳地希望读者批评指正.

作 者

1987年2月于北京大学

目 录

前 言

第一章 引言.....	(1)
§ 1.1 历史发展概况	(1)
§ 1.2 硬件与软件要求	(3)
§ 1.3 人机对话	(6)
§ 1.4 数据传递	(16)
§ 1.5 数据处理与结果整理	(18)

第 一 部 分

控制系统计算机辅助设计中的基础算法

第二章 算法的评价准则.....	(21)
§ 2.1 问题的提出	(21)
§ 2.2 误差源	(23)
§ 2.3 问题的敏感性	(25)
§ 2.4 算法的数值稳定性	(27)
§ 2.5 算法的收敛性	(30)
§ 2.6 速度与内存要求	(32)
第三章 插值与数值积分.....	(35)
§ 3.1 插值	(35)
§ 3.2 数值积分	(47)
§ 3.3 数值微分	(58)
§ 3.4 数据平滑	(63)
第四章 函数最优化方法.....	(66)
§ 4.1 极值理论简介	(66)

§ 4.2	一元函数的极值搜索方法	(72)
§ 4.3	多元函数的极值搜索方法——不计算导数的情况	(81)
§ 4.4	多元函数的极值搜索方法——Newton 方法	(88)
§ 4.5	多元函数的极值搜索方法——共轭梯度方法	(95)
§ 4.6	多元函数的极值搜索方法——变尺度方法	(105)
§ 4.7	有约束的极值搜索方法	(109)
第五章	线性代数方程组求解与矩阵计算	(120)
§ 5.1	特征值与特征向量的基本性质	(121)
§ 5.2	解线性代数方程组的直接方法	(126)
§ 5.3	解线性代数方程组的迭代方法	(148)
§ 5.4	代数特征值问题	(154)
§ 5.5	矩阵的奇异值问题	(173)
§ 5.6	矩阵的乘法与求逆	(184)
§ 5.7	快速富氏变换(FFT)	(188)
第六章	常微分方程初值问题的数值解法	(196)
§ 6.1	引言	(196)
§ 6.2	定常线性系统的离散相似法	(203)
§ 6.3	基于幂级数展开的单步方法	(204)
§ 6.4	基于数值积分的线性多步法	(215)
§ 6.5	预测-校正法	(220)
§ 6.6	Gear 方法	(224)
第七章	多项式与多项式矩阵	(234)
§ 7.1	多项式的定义与运算	(234)
§ 7.2	求多项式的根的方法	(236)
§ 7.3	多项式矩阵的基本性质与 Smith 标准形	(243)
§ 7.4	多项式矩阵的互素	(248)
§ 7.5	多项式矩阵的运算	(250)
§ 7.6	有理分式矩阵的 McMillan 形	(253)
第八章	代数矩阵方程的数值解法	(255)
§ 8.1	线性矩阵方程的基本性质	(255)

§ 8.2	线性矩阵方程的数值解法	(258)
§ 8.3	矩阵 Riccati 方程的基本性质	(273)
§ 8.4	矩阵 Riccati 方程的数值解法	(275)

第 二 部 分

控制系统计算机辅助设计的功能算法

第九章	系统的辨识与建模	(300)
§ 9.1	时间域中的建模过程	(302)
§ 9.2	频率域中的建模过程	(308)
第十章	模型变换与仿真	(317)
§ 10.1	面向传递函数的数字仿真	(317)
§ 10.2	面向结构图的数字仿真	(325)
§ 10.3	连续系统离散化的数字仿真	(331)
第十一章	单输入-单输出系统的计算机辅助设计	(336)
§ 11.1	Bode 设计方法	(337)
§ 11.2	Nyquist 和逆 Nyquist 设计方法	(347)
§ 11.3	根轨迹设计方法	(354)
§ 11.4	不等式设计方法	(360)
第十二章	多输入-多输出系统的计算机辅助设计	(366)
§ 12.1	系统描述及相互转换	(366)
§ 12.2	系统矩阵的性质	(373)
§ 12.3	系统的标准形	(389)
§ 12.4	用状态反馈进行极点配置	(397)
§ 12.5	用输出反馈进行极点配置	(405)
§ 12.6	二次指标下的最优控制	(416)
§ 12.7	解耦理论	(423)
§ 12.8	逆 Nyquist 阵方法	(430)
§ 12.9	特征轨迹设计	(444)
§ 12.10	并矢展开设计	(451)

§ 12.11	逆标架正规化设计	(456)
§ 12.12	不等式设计方法	(468)
第十三章	非线性系统的计算机辅助设计	(472)
§ 13.1	建模与仿真	(472)
§ 13.2	最优程序控制设计	(478)
§ 13.3	弱双线性系统的次最优反馈控制设计	(489)

算 法 目 录

算法 3.1	三次样条函数插值	(46)
算法 3.2	Simpson 公式求积	(53)
算法 3.3	用三次样条函数求积	(57)
算法 4.1	不求导数时确定区间括号	(73)
算法 4.2	计算导数时确定区间括号	(74)
算法 4.3	内插抛物线法	(75)
算法 4.4	计算导数时的抛物线法	(77)
算法 4.5	立方近似法	(79)
算法 4.6	Rosenbrock 方法	(84)
算法 4.7	修改搜索方向	(84)
算法 4.8	DSC 方法	(85)
算法 4.9	用于 DSC 方法的单维搜索	(86)
算法 4.10	改进的 Newton 方法	(90)
算法 4.11	改进的 Marquardt 方法	(93)
算法 4.12	Schininger 方法	(96)
算法 4.13	可求梯度时的单维搜索	(97)
算法 4.14	FR 和 PR 共轭梯度方法	(102)
算法 4.15	BP 共轭梯度方法	(104)
算法 4.16	变尺度方法	(108)
算法 4.17	SUMT 方法	(114)
算法 4.18	SWIFT 方法	(117)

算法 5.1	选列主元素消去法解线性代数方程组	(128)
算法 5.2	直接分解法解线性代数方程组	(129)
算法 5.3	QR 分解法解线性代数方程组	(132)
算法 5.4	共轭梯度法解线性代数方程组 I	(134)
算法 5.4'	共轭梯度法解线性代数方程组 II	(135)
算法 5.5	Aitken δ^2 方法解线性代数方程组	(154)
算法 5.6	化矩阵为上 Hessenberg 形	(162)
算法 5.7	用带初始平衡的 QR 方法求特征值及特征向量	(166)
算法 5.8	计算实矩阵的奇异值和奇异向量	(179)
算法 6.1	离散相似法解定常线性系统	(204)
算法 6.2	Gill 方法解常微分方程组	(208)
算法 6.3	半隐式 Runge-Kutta 方法解常微分方程组	(212)
算法 6.4	Hamming 方法解常微分方程组	(223)
算法 6.5	Gear 方法解常微分方程组	(232)
算法 7.1	化多项式矩阵为三角标准形	(245)
算法 7.2	化多项式矩阵为 Smith 形	(247)
算法 7.3	求两个多项式矩阵的最大左公因式	(250)
算法 8.1	特征多项式法解线性矩阵方程	(262)
算法 8.2	Hoskins 方法解 Ляпунов 方程	(264)
算法 8.3	优化方法解 Ляпунов 方程	(268)
算法 8.4	Newton 迭代法解代数 Riccati 方程	(277)
算法 8.5	优化方法解代数 Riccati 方程——单输入情况	(279)
算法 8.6	Schur 向量法解代数 Riccati 方程	(290)
算法 8.7	化上 Hessenberg 矩阵为实 Schur 形	(290)
算法 8.8	符号函数法解代数 Riccati 方程	(293)
算法 8.9	计算 Hamilton 矩阵的符号函数	(295)
算法 9.1	一次完成最小二乘估计建模	(304)

算法 9.2	递推方法建模	(306)
算法 9.3	自动定阶的建模方法	(308)
算法 10.1	单个传递函数的仿真模型	(321)
算法 10.2	定常系统的离散相似法仿真	(334)
算法 11.1	计算幅频和相频特性 I	(339)
算法 11.2	计算幅频和相频特性 II	(340)
算法 11.3	确定截止频率 ω_c 的区间	(340)
算法 11.4	超前-滞后串联校正装置设计	(344)
算法 11.5	计算系统的根轨迹	(354)
算法 12.1	用严格系统等价把多项式形系统矩阵 转化为状态空间形系统矩阵	(369)
算法 12.2	计算系统的传递函数阵	(370)
算法 12.3	化多项式形系统矩阵为最小阶	(380)
算法 12.4	在状态空间形系统矩阵中产生尽可能多的 线性无关行	(381)
算法 12.4	(续)状态空间的分解	(383)
算法 12.5	可控性与可观测性判断 I	(386)
算法 12.6	可控性判断 II	(388)
算法 12.7	计算可控标准形	(391)
算法 12.8	计算严格系统等价下的标准形	(395)
算法 12.9	由状态反馈进行极点配置	(399)
算法 12.10	观测器设计	(402)
算法 12.11	由输出反馈进行极点配置	(412)
算法 12.12	定常线性系统的最优状态反馈设计	(419)
算法 12.13	定常线性系统的最优输出反馈设计	(422)
算法 12.14	绘制 Gerschgorin 带	(435)
算法 12.15	实现对角优势的补偿器设计	(443)
算法 12.16	逆 Nyquist 阵设计方法	(443)

算法 12.17	特征轨迹设计方法	(449)
算法 12.18	计算传递函数阵的并矢展开	(452)
算法 12.19	并矢展开设计方法	(454)
算法 12.20	绘制拟 Nyquist 带	(460)
算法 12.21	拟经典设计方法	(464)
算法 12.22	不等式设计方法	(468)
算法 13.1	计算 TAR 模型的 AIC	(473)
算法 13.2	计算最优程序控制的 PR 共轭梯度法	(479)
算法 13.3	弱双线性系统的最优反馈控制	(489)

第一章 引 言

§ 1.1 历史发展概况

自动控制作为一门学科出现于本世纪 40 年代. 开始主要研究单输入、单输出系统的分析与设计, 所应用的数学工具主要是传递函数和频率特性. 这时的设计方法, 无论是绘制 Nyquist 图, Bode 图或根分布图, 其基本设想均在于可以通过手工计算来绘制这些图表, 并通过它们来进行系统设计.

从五十年代末开始, 情况发生了变化. 由于航空和航天技术的发展, 需要对复杂的多变量系统进行研究和设计, 并由此产生了现代控制理论. 对于现代控制理论中所要处理的问题, 单靠手工计算几乎是无法解决的. 同一时期, 大型通用数字计算机得到了极其迅速的发展, 并逐渐被用于工程设计领域. 这样, 以计算机作为主要工具, 以现代控制理论为依据的控制系统计算机辅助设计(以下简称 CSCAD)这一新的分支也就应运而生了. CSCAD 是一门处于控制系统理论、计算数学和工程设计边缘的应用科学, 同时又是现代控制理论联系实际的桥梁.

二十多年来, CSCAD 这一分支获得了迅速的发展, 并为科研、生产、教学带来了效益. 与单靠手工计算及图表帮助的经典设计方法相比, 控制系统的计算机辅助设计有下述优点:

- 1) 计算机具有很强的计算和数据处理的能力, 而设计人员能够应用已有的经验及对系统的先验知识, 从而具有较强的分析、综合及决策能力. 因而, 具有人机对话功能的“人-计算机”系统可以将计算机和设计人员两者的长处有机地结合起来, 它不仅减轻了

设计者的繁杂劳动,缩短了设计周期,而且能够获得比较满意的设计结果.

2) 由于计算机的帮助,使得一些新的设计方法,例如极点配置的设计方法,多变量系统的频域设计方法以及最优控制设计中的共轭梯度方法等,才能在实际中得到应用.

3) 由于在计算机上很容易修改系统的参数,因而便于对各种控制方案及不同的参数组合进行充分的比较,并从中选出较好的控制方案,甚至可进行优化设计.这在一定程度上可减少为设计定型所必须进行的昂贵的试验,节约设计费用.

4) 借助于计算机输出的图形显示功能,可以对控制系统的动态特性获得更加深入和直观的理解.

由于控制系统的计算机辅助设计具有上述明显的优点,它已成为从事自动控制的研究人员必不可少的手段.借助于 CSCAD 软件包,研究人员不仅可以验证控制系统理论,而且可以进一步完善并发展控制系统的设计方法.另外,由于计算机图形显示的直观性,CSCAD 软件包已被广泛应用于控制系统教育中.它可以帮助学生加深对控制系统理论的理解.

从本世纪五十年代开始,就有人用计算机来绘制 Nyquist 图和 Bode 图并进行单变量系统的设计.但 CSCAD 的理论与实践方面的真正的开创性工作应归于英国学者 Rosenbrock 和 MacFarlane,他们在六十年代末和七十年代初在曼彻斯特理工学院(UMIST)的工作^[1]把经典的单变量系统的频域方法推广用于多变量系统设计,并与多变量系统的状态空间法建立了联系,为控制系统的计算机辅助设计打下了理论基础.他们还在英国科学研究委员会(SRC)的资助下建立了第一个可以实际使用的 CSCAD 软件包.这一软件包使熟悉经典频域法的工程设计人员可以较快地掌握多变量系统的设计,并用于生产实践收到较好的经济效益,因而在国际上受到工程技术界与控制理论界的充分重视.此后,英国的 Mayne 和

Owens 等在发展 CSCAD 方面相继作出了重要贡献^[2]. 瑞典的 Åström 和美国的 Melse 在这方面也有重要的著作. 近年来, 为了发展计算机辅助设计中的人-机对话能力, 作了很大努力来建立一套用于控制系统设计的专用语言. 由美国的 Polak 和英国的 Mayne 一起建立的 DELIGHT. MIMO 软件包^[3]就是这方面的一个代表作.

我国于七十年代后期开始了控制系统计算机辅助设计方面的研究工作. 从 1983 年开始, 由中国科学院科学基金资助, 全国十五个高等院校和科研机关参加, 成立了中国控制系统计算机辅助设计软件包(CCSCAD)联合设计组. 现已完成了软件包的第一版. 随着计算机在我国的普及, 生产过程中自动化程度的提高, 控制系统计算机辅助设计的研究与应用将越来越受到重视.

§ 1.2 硬件与软件要求

一、硬件要求

一般说来, 为进行控制系统的计算机辅助设计, 需要图 1.1 所示的硬件配备.

一般情况下, 控制系统的计算机辅助设计对计算机本身(中央处理机)的要求并不高. 只要有一台内存为 64K 的八位微计算机就可开始进行控制系统的计算机辅助设计. 即使使用 DELIGHT 这样的软件包(用 FORTRAN 语言写成, 共约五万条语句), 也只要一个小型机就可以了. 但是, 为了充分发挥计算机辅助设计的优点, 图形终端与 X-Y 绘图机则是不可缺少的. Rosenbrock 曾经指出^[4]: “……在没有图形终端时, 只能作系统的分析与综合, 只有具有了图形终端才能进行设计……”. 有了图形终端, 设计人员才能迅速、形象地了解他所设计的系统的性能并在必要时对它进行改进. 但是, 图形终端上所显示的结果一般说来比较粗糙且不能保存, 因而

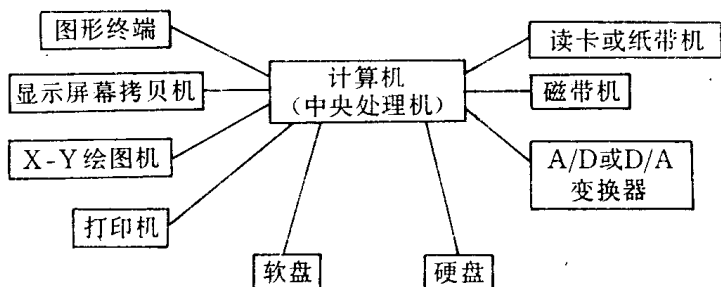


图 1.1

应在 X-Y 绘图机上画出一些重要的曲线,以便查对和保存.

二、软件要求

计算机技术中,软件是指记录在某种介质(卡片、磁带、纸带、软盘或硬盘等)上,可被计算机利用来实现某种功能的系统.没有软件的计算机(裸机)使用起来是极其困难的.使用者事实上是通过软件来指挥硬件的操作的.各种功能的软件不仅扩充了计算机的能力,而且方便了使用.

图 1.2 中示出了用户、软件和硬件之间的关系.

一个计算机的最基本的软件是操作系统.它直接控制计算机硬件的工作,因而是依赖于硬件结构的.不同的硬件需要配备不同的操作系统.一般的操作系统,由基本输入输出系统(BIOS)和磁盘操作系统(DOS)所组成.

由于操作系统是直接依赖于硬件的,对不同的机器有不同的操作系统,因而用户要直接通过操作系统来使用机器是很不方便的.所谓系统软件主要是指各种语言编译系统.它们是面向用户的,它把用户使用的统一的指令格式和计算机的各种功能建立了

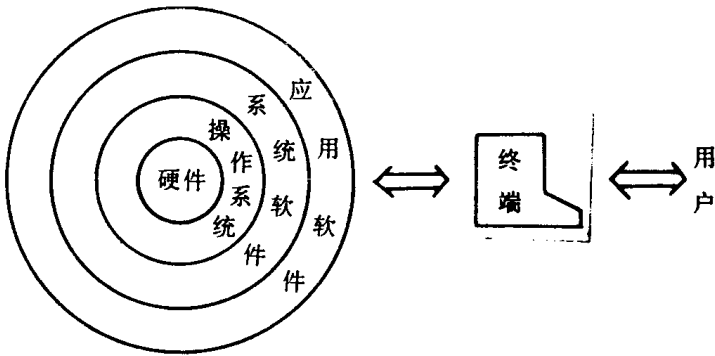


图 1.2

确定的联系. 通过系统软件, 用户就可以不必关心具体的硬件结构了. 这大大地简化了用户的使用并为应用软件的推广与移植提供了基础. 目前, 绝大部分控制系统计算机辅助设计软件包采用的系统软件是 BASIC 语言和 FORTRAN 语言. 但是, BASIC 语言速度慢, 对很多类型机器来说所使用的内存容量受很大限制, 而用 FORTRAN 语言实现人-机对话又很不方便. 当前有两种发展趋势: 一种是以 FORTRAN 语言为基础来编制适用于控制系统计算机辅助设计的独特的命令系统, 瑞典的 Åström 建立的 INTRAC 系统与美国的 Polak 建立的 DELIGHT 系统就是这一方向的代表; 另一种发展趋势是改用 PASCAL 语言或 C 语言, 和 FORTRAN 语言相比, 这两种语言大大增强了人-机对话的能力并便于用户使用结构程序设计方法进行程序设计.

应用软件是在系统软件的基础上建立起来的用于解决某种特定问题的软件系统. 应用软件通常具有两大类功能: 管理与数值计算. 控制系统计算机辅助设计软件包属于应用软件范畴, 它应同时具有管理与数值计算的功能. 优良的管理功能使用户可以相当容易地掌握软件包的使用方法, 而先进的数值计算方法使软件包可