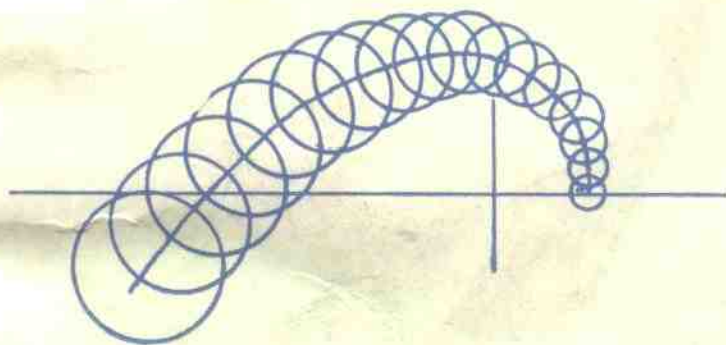


CSCAD

控制系统的计算机辅助设计

毛剑琴 姜长生 金西岳 编著

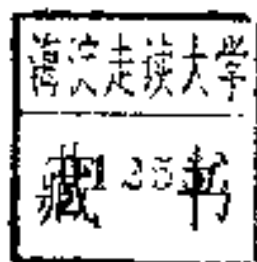


北京航空学院出版社

V P391.72
1976/1

控制系统的计算机 辅助设计

毛剑野 蔡长生 金西番 编著



北京航空学院出版社

内 容 简 介

本书介绍控制系统计算机辅助设计(CSCAD)的主要理论和算法。全书共十章,内容包括:控制系统计算机辅助设计的产生和概貌;关于CSCAD的算法基础—矩阵的奇异值分解、矩阵方程的解及多项式矩阵等;CSCAD的频域方法—逆奈氏阵列法、序列回推法、特征轨迹法、并矢展开法及反标架方法等;CSCAD的时域方法—极点配置法、二次型最优设计、观测器设计及动态补偿器设计等方法;关于CSCAD的其它方法—代数方法的简介等。除了理论与算法,书中还附有程序与算例。

本书可作为工学院自动控制专业的研究生教材,也可供自动化技术,计算机技术,工程控制技术等有关领域内从事教学和研究的师生以及工程技术人员参考。

控制系统的计算机辅助设计

毛剑琴 姜长生 金西岳 编著

责任编辑 郭绘烈

北京航空学院出版社出版

新华书店北京发行所发行,各地新华书店经销

北京市怀柔县黄坎印刷厂印装

850×1168 1/32 印张:18 字数:468千字

1988年2月第一版 1988年2月第一次印刷 印数:4000册

ISBN 7-81012-025-6/TP·003 定价:8.40元

前 言

控制系统的计算机辅助设计是一门年轻的边缘学科，是将控制理论、计算数学和计算机应用技术用于工程设计的一门应用学科。它是计算技术在控制理论和设计方面引起深刻变革的结果，也是控制理论，特别是现代控制理论联系实际的必不可少的桥梁。它越来越受到控制界科技工作者们的广泛重视和研究，也是一切将要从事控制或与控制有关的科技工作者们应与掌握的重要知识之一。

本书是遵照航空工业部所属高等院校统编教材第一编审委员会1984年春南京会议的决定和会议通过的基本要求编写的，它的目的主要是为自动控制系统的研究生，其次是为本科生提供一本控制系统的计算机辅助设计课程的教材，或教学参考书。

在编写过程中，编者认真地总结了自1983年以来北京航空学院，南京航空学院，西北工业大学关于本课程的教学经验，讨论了本课程的教学要求，并在此基础上制定了教学大纲，拟定了编写内容。这些内容是

第一章 概论简要地介绍了本学科的产生、发展和当前概况，扼要地论述了数值计算在本课程中的地位和作用。

第二章 矩阵的奇异值分解详细地阐述了在系统分析和设计中越来越起重要作用和占据重要地位的现代奇异值理论和应用，该章是本课程的重要的教学基础之一。

第三章 矩阵方程的解主要地介绍了连续和高阶系统中黎卡提 (Riccati) 和李雅普诺夫 (Lyapunov) 矩阵方程的各种典型解法，它是系统分析和设计，特别是最优控制设计的关键之一。

第四章 多项式矩阵阐述了多项矩阵的性质、变换、标准形、互质和求逆以及有理分式降的既约分解。本章是多变量频域法辅助设计的基础。

第五章 系统的描述和分析介绍了描述系统的各种方法及转换，叙述了系统可控性、可观性、稳定性、灵敏度和Robust稳定性的分析。

第六章 多变量频域法辅助设计介绍了现代频域法、多变量根迹法和代数方法设计理论与设计方法，其中重点介绍了逆奈氏降法。

第七章 控制系统设计的状态空间方法介绍了时域中的系统设计，其中包括极点配置、观测器设计，动态补偿器设计和解耦设计，还重点介绍了二次型控制器和跟踪系统的设计。

第八章 离散系统的分析和设计介绍了离散系统的状态方程及其求解，离散系统的传递函数分析，离散系统的稳定性分析，重点介绍了离散系统的二次型控制器设计。

第九章 随机控制系统设计介绍了卡尔曼滤波器，自适应控制器以及线性二次型高斯系统的设计。

第十章 反标架方法介绍了该法的数学基础-矩阵赋值函数的奇异值分解和该法的设计理论与设计方法。

书中还列入若干附录和实用的各种设计程序，供读者查阅和选用。

本书的编写分工是，毛剑琴同志编写一、二、四、十章以及 § 5.1, § 5.2, § 5.3, 和附录四、五；姜长生同志编写三、六、八、(除 § 8.2) 章以及 § 5.4, § 5.5和附录一、二、三；金西岳同志编写七、九章以及 § 5.6。编者为了力图使本书能反映本课程当前的现状，参考了三院校关于本课程原有的讲义、有关中外书籍、重要的中外文献和编者们近几年关于这方面的工作成果。在此，仅向本书引用的书籍、文献的作者们致以谢意。初稿完成后，编者进行了认真的讨论和修改，全书由毛剑

季同志负责主编工作。

编者感谢第一编审委员会和三院校有关领导对于出版本书所给予的支持，特别感谢北京航空学院出版社对于出版本书所给予的支持。

本课程的内容涉及面广，限于篇幅不能一一论述。由于编者水平有限，编进书中的内容一定还会存在错误或不当之处，敬请广大读者给予批评指正。

编者 1987.1

目 录

第一章 概 论

- § 1.1 控制系统计算机辅助设计的产生 (1)
- § 1.2 CAD系统概貌..... (2)
- § 1.3 问题的条件及算法的数值稳定性 (6)
- 参考文献..... (15)

第二章 矩阵的奇异值分解

- § 2.1 奇异值分解的定义及基本定理 (16)
- § 2.2 奇异值的性质 (19)
- § 2.3 奇异值分解的计算 (27)
- § 2.4 矩阵的条件数、数值秩及伪逆 (35)
- 参考文献..... (48)

第三章 矩阵方程的解

- § 3.1 黎卡提微分方程的解 (49)
- § 3.2 黎卡提代数方程的解 (55)
- § 3.3 李雅普诺夫代数方程的解 (74)
- § 3.4 离散黎卡提代数方程的解 (87)
- § 3.5 离散李雅普诺夫代数方程的解 (108)
- 参考文献..... (114)

第四章 多项式矩阵

- § 4.1 多项式..... (118)

§ 4.2	多项式矩阵的基本性质	(120)
§ 4.3	多项式矩阵的变换及标准形	(134)
§ 4.4	多项式矩阵的互质	(142)
§ 4.5	有理分式阵及既约分解	(154)
§ 4.6	多项式矩阵逆的计算	(162)
	参考文献	(169)

第五章 系统的描述和分析

§ 5.1	多变量系统的描述方法	(170)
§ 5.2	系统各种描述的相互转换	(178)
§ 5.3	可控性、可观测性分析	(191)
§ 5.4	系统的零点、极点和解耦零点	(195)
§ 5.5	系统的稳定性分析	(209)
§ 5.6	参数灵敏度和鲁棒稳定性分析	(220)
	参考文献	(227)

第六章 多变量系统设计的频域方法

§ 6.1	逆奈氏阵法	(229)
§ 6.2	序列同伦法	(261)
§ 6.3	特征轨迹法和多变量根迹法	(274)
§ 6.4	并矢展开法	(294)
§ 6.6	代数设计法	(307)
	参考文献	(326)

第七章 控制系统设计的状态空间方法

§ 7.1	状态反馈极点配置问题	(328)
§ 7.2	输出反馈极点配置问题	(338)
§ 7.3	动态补偿器设计	(347)
§ 7.4	二次型最优调节器设计	(352)

§7.5	状态观测器设计	(363)
§7.6	多输入多输出系统的解耦	(374)
§7.7	模型跟踪系统的构成方法	(382)
§7.8	Robust 控制系统设计	(393)
	参考文献	(397)

第八章 离散系统的分析和设计

§8.1	离散系统的动态方程及其求解	(399)
§8.2	离散系统的传递函数分析	(409)
§8.3	离散系统的稳定性分析	(418)
§8.4	离散系统二次型最优控制设计	(435)
	参考文献	(453)

第九章 随机控制系统设计

§9.1	随机过程及随机状态模型	(454)
§9.2	卡尔曼滤波器设计	(466)
§9.3	线性随机系统的最优控制	(471)
§9.4	自适应控制器设计	(480)
	参考文献	(499)

第十章 反标架方法

§10.1	有关的数学基础	(501)
§10.2	拟奈奎斯特轨迹	(513)
§10.3	反标架设计方法	(517)
	参考文献	(524)

附录一

一	矩阵指数及其计算	(526)
二	林士玛-贝尔斯托方法求多项式解的程序	(535)

三 矩阵A特征多项式的计算.....	(535)
四 Householder变换及矩阵的QR分解.....	(537)
五 求矩阵特征值的QR方法.....	(542)
六 常微分方程式(9-123)和(9-124)的推导.....	(544)
参考文献.....	(546)

附录二

程序 1.....	(546)
程序 2.....	(550)
程序 3.....	(553)
程序 4.....	(558)
程序 5.....	(559)
程序 6.....	(562)
程序 7.....	(564)
程序 8.....	(566)

第一章 概 论

§ 1.1 控制系统计算机辅助设计的产生

计算机技术的发展在许多领域中引起了变革。不例外地，在控制系统的分析和设计方面也是如此。五十年代末开始，由于航空航天技术的发展，复杂的多变量系统需要进行研究和设计，于是多变量控制理论随之产生了。几乎同时，大型通用数字计算机也极为迅速地发展，并得到广泛应用。以计算机作为主要工具，以现代控制理论为依据的计算机辅助设计（以下简称CAD）这一学科分支也应运而生。CAD是一门处于控制系统理论、计算技术和工程设计边缘的应用科学，同时又是控制理论联系实际的一座桥梁。

用计算机在绘制奈奎斯特(Nyquist)图和伯德(Bode)图时进行辅助计算可追溯到五十年代，但CAD的理论与实践方面的开创性工作主要是由六十年代末和七十年代初在英国曼彻斯特理工学院(UMIST)工作的卢森布劳克(H. H. Rosenbrock)和麦克法兰(A. G. J. MacFarlane)两位学者作的。他们把经典的单变量系统的频域法推广到多变量系统，并与状态空间法联系起来，使熟悉经典频域法的工程设计人员较快地掌握多变量系统的设计。此后，英国的梅因(Mayne)和欧文斯(Owens)等教授、瑞典的奥斯特隆姆(Åström)、英国的梅尔萨(Melsa)、波拉克(Polak)、日本的古田胜久等教授在发展CAD方面相继作出了重要的贡献。

自70年代末以来，CAD这一新兴的分支在我国也得到了迅

速的发展。在国家自然科学基金的资助下，由中国科学院系统所、北京大学、清华大学、北京航空学院、西北工业大学等十七个院、所近百名学者共同研制完成的中国控制系统计算机辅助设计软件包(COSCAD)已于1988年6月通过国家鉴定。这一成果表明中国的学者们也正在为这一学科分支的发展作出贡献。^[1]

十多年来，CAD这一分支之所以获得迅速发展，能为科研、生产、教学带来效益，主要是由于它具备下述优点：

一、作为一个“人—计算机”的联合系统，既利用了计算机的高速、精确的运算能力，又发挥了设计人员的分析、判断和决策作用。可以预料，随着专家系统和人工智能技术与CAD的结合，这一联合系统将以更高的效率和质量来进行控制系统的分析和设计。

二、提高设计精度和可靠性，缩短设计周期。

三、能在大量的设计方案中选撷最佳方案，进行优化设计，从而减少设计定型的昂贵的实验，节约设计费用。

因此，CAD已成为控制系统设计与分析中必不可少的技术。

§ 1.2 CAD 系统概貌

控制系统的设计过程如下图所示。

在图1.1的七个步骤中，CAD将完成前五个步骤。每个步骤均由计算机完成，在每两个步骤之间或每个步骤执行的过程中均有人—机间的信息传递。

CAD的设备类似于数字计算机系统，分为硬件和软件两个部分。

一、硬件部分

硬件部分包括冯·诺依曼型计算机的五个基本组成部分即：运算器、控制器、存储器、输入设备、输出设备。如图1.2所

示。

与一般用作科学计算或管理的计算机系统比较，CAD的硬件对以下几个部件有特殊的要求。

1. 图形终端：图解分析在工程设计中占着重要的地位，它在CAD中也起着重要的作用。因此，一个完整的CAD系统必须具备图形终端。卢森布劳克在[2]中曾经指出：“…在没有图形终端时，只能作系统的分析和综合。只有具有了图形终端才能进行设计…”。这说明图形终端对CAD系统的重要性。

2. 屏幕复印机：也称为硬拷贝机。由于图形终端上所显示的结果并不能象电传打印机上的打印记录那样可保存起来，因此，要用屏幕复印机将显示在屏幕上的一些重要的曲线和图形复制下来。所以，屏幕复印机也是CAD系统不可缺少的部件。

3. 在设计离散系统时，为从连续系统的输出端，或者它的一个记录中直接采集数据，需要A/D转换器。若需将

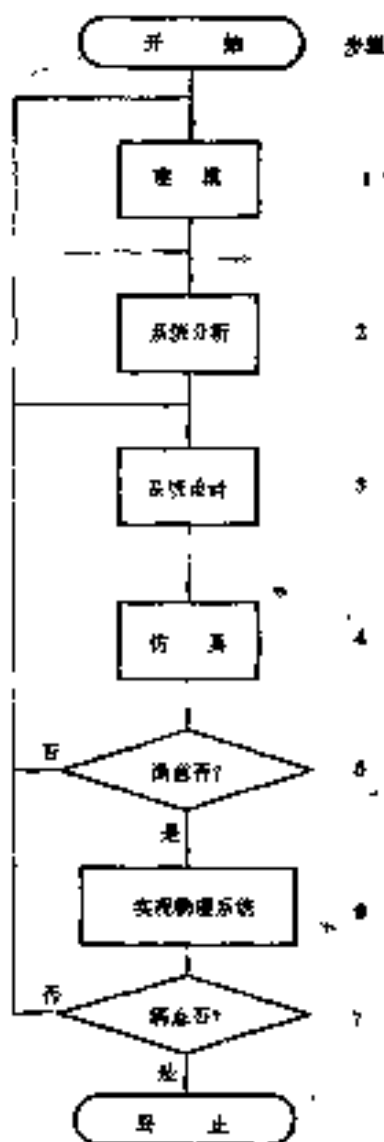


图1-1 控制系统的设计步骤

设计结果进行实时控制还需增加D/A转换器。

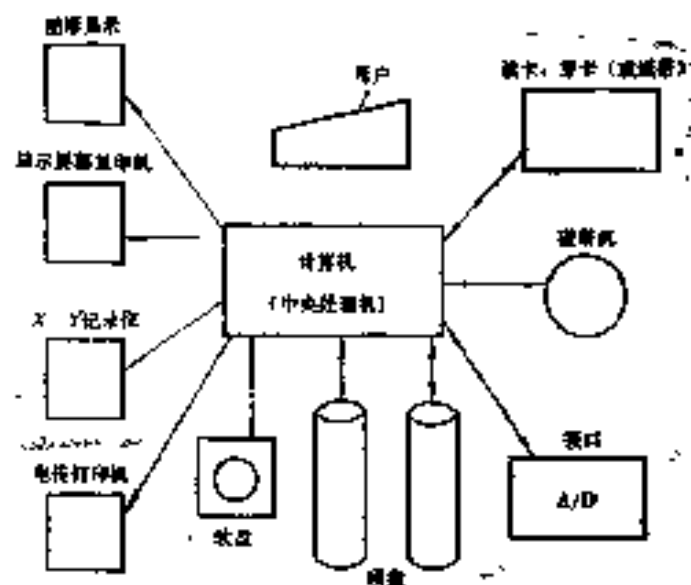


图1-2 CAD系统的硬件

二、软件部分

计算机技术中，软件是指记录在某种介质上，由计算机实现的具有某种功能的系统。所谓“介质”可以是卡片、磁带、纸带或软盘等。各种功能的软件不仅扩充了硬件的能力，也方便了用户使用。所以，软件是计算机系统必不可少的部分，也是CAD系统的重要组成部分。

图1.3和图1.4表示了用户和软件、硬件的关系及计算机软件的种类。

CAD系统软件属于应用系统软件的一种。它常常以软件包的形式工作。

CAD系统对各种软件，除了类似于一般计算机运行时的要素外，还具有一些特殊的要求。比如关于语言的要求。绝大多数的

CAD系统都采用FortranIV语言,但由于CAD系统在设计过程中要求人与计算机之间进行经常性的信息交换,即所谓“人机对话”,而Fortran语言是没有这一功能的。BASIC语言能进行人机对话,但其速度太慢。过去的十多年里,人们重视和研究了这一问题,其中有代表性的是瑞典隆德大学以奥斯特隆姆教授为首的工作。他们以Fortran语言为基

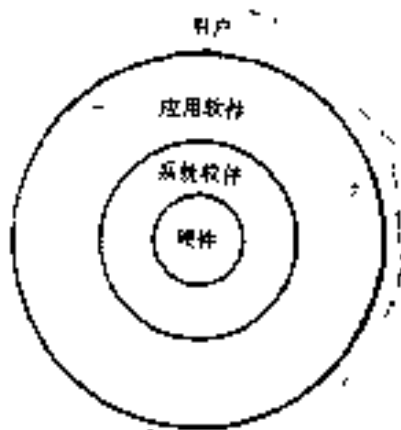


图1-3 用户和软件、硬件的关系



图1-4 软件的种类

础编制了适用于控制系统CAD系统的命令系统或称之为对话式语言—INTRAC。INTRAC已被一些CAD系统采用。许多国家的各种CAD软件包都具有各自的命令系统,虽然其形式不同,但

其目的都是为了更好地进行人机对话。

CAD系统除了需要综合性的数学库外，还需要有在一些方面功能较强的数学库作为它的基础库，比如在线性代数方面的基础库。在这方面典型的例子是美国七十年代生产的 *LINPACK* 和 *RISPACK*。许多CAD系统是建立在这两个数学库的基础上的。中国研制的 *CCSCAD* 也只有类似的基础库。

一个完整的CAD系统还应包含大量的功能程序。用以完成控制系统设计中所要求的各种复杂的计算。功能程序之间由命令系统联结。整个功能软件体系，常采用模块式结构。一个功能完备的CAD系统一般需要几百个模块，每个模块都是独立可扩充的，由一个字符串作为名字以便调用。

§ 1.3 问题的条件及算法的数值稳定性

CAD工作中一个重要的组成部分是算法的研究。如上所述，一个CAD系统具有大量的功能程序，而这些功能程序的核心则是算法。众所周知，有些在理论上已经解决的问题，使用计算机来求解时却仍属未解决的问题；有些理论上以为严格的方法，却不适用于计算机的计算。比如线性代数理论中的矩阵秩的判断问题和克莱姆法则等，在数值代数中得到了不同侧面的研究。类似地，有些控制理论中已解决的问题，在使用计算机来解时未能得到彻底的解决；有些控制理论中的方法，用计算机进行计算时也不可行。因而控制系统的CAD并不是象将控制理论中的方法编成程序在计算机中进行运行这么简单。如果说目前对控制系统分析与设计的问题有从几何观点、代数观点等等的研究，那么控制系统的CAD则是从数值观点对这一问题的重新研究。这就决定了控制系统的CAD是一门处于控制理论、计算机技术和工程设计边缘的应用科学。同时又是在使用计算机计算的条件下，控制理论联系实际的桥梁。同时也决定了CAD工作中一个

重要的部分是对问题进行正确的数值分析以及根据问题的条件选择好的算法。否则，有时即使用先进的数字计算机也不能使一个简单的问题得到正确的结果。

为了说明这一问题，需要了解数在计算机运算过程中的表现形式。

一、浮点数的表示和运算

目前几乎所有的数字计算机都采用浮点数的形式处理实数。一个实数 x ，在计算机中被表示成。

$$x = s d \beta^e$$

其中 s 为数符取 -1 或 $+1$ ； d 为小数部分； β 为基数； e 为指数。更详细些，可将此表达式写成：

$$x = \pm \left(\frac{d_1}{\beta} + \frac{d_2}{\beta^2} + \dots + \frac{d_t}{\beta^t} \right) \cdot \beta^e$$

其中 t 表示小数部分有效数字的位数，它是计算机精度的指标。 d_1, \dots, d_t 是整数，满足：

$$0 \leq d_i \leq \beta - 1 \quad (i = 1, \dots, t)$$

指数 e 为整数，满足：

$$L \leq e \leq U。$$

其中 U 、 L 分别表示计算机中所能表示的最大和最小指数。

若浮点数系统 P 中，每个非零 x 的 $d_1 \neq 0$ ，则称此浮点数系统 P 是“规范化”的。通常用 β^{1-t} 表示代数运算的相对精度。

由于浮点数系统是由有限个不连续的数组成的，一个十进数往往得不到合理的舍入，这时就产生“舍入误差”。以 0.1 为例，用二进制表示时是一个不尽的展开。

$$\frac{1}{10} = \frac{0}{2^1} + \frac{0}{2^2} + \frac{0}{2^3} + \frac{1}{2^4} + \frac{1}{2^6} + \frac{0}{2^8} + \frac{0}{2^7} + \dots$$

若用下标表示不同的底数，则有

$$(0.1)_{10} \approx (0.000110011001100\dots)_2$$