



计算机辅助设计丛书

控制系统的 计算机辅助设计

孙增圻 袁曾任 编著

清华大学出版社

2
1/2

TP215.7
67

控制系统的计算机辅助设计

孙增圻 袁曾任 编著



清华大学出版社

内 容 简 介

本书从工程应用的角度出发,系统地介绍了控制系统的计算机辅助设计的各种算法,同时给出了部分实用的计算程序。

全书共九章,分别介绍了控制系统CAD常用算法基础、控制系统模型转换、仿真、分析和设计,以及系统辨识等主要内容。最后一章介绍了几个典型的控制系统CAD程序包。至于控制系统分析和设计的计算机方法,包括了古典和现代控制两个方面。同时,对于多变量系统设计的现代频域法也进行了专门的讨论。

本书可作为有关专业研究生、大学本科高年级学生的教材或参考书,也可供有关教师和工程技术人员学习参考。

15575/35

控制系统的计算机辅助设计

孙增圻 袁增任 编著

责任编辑 贾仲良

☆

清华大学出版社出版

北京 清华园

北京市昌平区印刷厂印装

新华书店北京发行所发行

☆

开本: 787 × 1092 1/16 印张: 34 $\frac{5}{8}$ 字数: 880千字

1988年6月第1版 1988年6月第1次印刷

印数: 00001~10000

定价: 8.10元

ISBN 7-302-00082-4/TP·17

出版说明

计算机辅助设计 (Computer Aided Design) 简称CAD, 它是近20年发展起来的一门新兴技术。随着计算机硬件、软件、图形及智能模拟等方面技术的巨大进步, CAD技术已成为工程设计及科学研究不可缺少的组成部分。CAD技术充分利用了计算机的高速运算和数据处理能力, 因此不仅可以缩短产品的设计周期, 减少设计人员的繁杂劳动, 而且能够提高产品质量, 降低成本。CAD技术与CAM (Computer Aided Manufacturing——计算机辅助制造) 以及工业机器人相结合, 是当今工业生产过程自动化的发展方向。同时, CAD技术也为科学研究的发展和教育的现代化提供了方便的工具。

对于不同的工程领域, CAD技术的具体内容有很大不同。例如, 电子电路主要用节点网络表示其拓扑结构; 微波电路较多地研究其数学模型及矩阵方程; 机械和建筑设计的关键在于图形技术; 控制系统则主要利用计算机进行动态系统的建模、分析、设计和仿真等。因此, 计算机辅助设计是专业理论、计算方法、计算机软件及图形学等多方面结合的综合技术。

为了普及和推广CAD技术, 我们编辑出版一套计算机丛书。其中包括微波电路、机械、建筑、控制系统以及图形学等领域的CAD技术的原理及应用。我们希望这套丛书能对我国CAD技术的发展及其在工程设计及科学研究中的应用起到促进作用。

前 言

控制系统的计算机辅助设计是控制理论和实际应用之间的桥梁。近二十多年来,控制理论发展很快,出现了许多分析和设计控制系统的新的理论和方法。它们只有借助于控制系统CAD技术才能真正在实践中获得应用。同时,由于利用计算机辅助设计控制系统具有设计速度快和修改参数容易等优点,从而使设计者可以对多种控制方案和不同的参数组合进行比较,因此不仅减轻了设计者的许多繁杂劳动,而且能够获得满意的设计效果。近年来,国内外已建立了不少控制系统CAD的专用程序包,它们被广泛地用于教学、科研和生产部门。

本书主要介绍控制系统CAD常用算法基础、控制系统模型转换、控制系统仿真、控制系统分析和设计以及系统模型辨识等内容。其中控制系统的分析和设计包括了古典和现代控制两个方面。同时,对于多变量系统设计的现代频域法也进行了专门的讨论。最后一章介绍了几个典型的控制系统CAD程序包。在介绍上述内容时,本书的重点在于给出控制系统CAD的各种算法和程序流程。同时给出了一部分实用的设计程序。

本书的内容曾作为清华大学计算机控制专业方面研究生的一门课程讲授过。同时,也曾在航天部二院、三院以及中国矿业学院研究生部讲授过其中的大部分内容。在几次讲课及所做实际工作的基础上,经加工、整理和充实而写成了本书。书中部分内容是编者研究工作的总结。但由于时间比较仓促,加上编者水平所限,因而本书一定存在不少缺点和错误。欢迎广大读者批评指正。

本书可作为与控制工程有关的各专业的研究生、大学高年级学生的教材或参考书。也可供有关教师、科研人员及工程技术人员学习参考。

全书由孙增圻主编。其中第二章的第八节和第九节、第四章的第七节以及第五章由袁曾任执笔。此外,钱宗华为第五章第一节、李卫为第九章第二节、第三节提供了宝贵素材。

张毓凯副教授审阅了全书,并提出了许多宝贵意见。同时,研究生李卫、韩民、马少平、朱新育及金亿创也对本书提出了有益的意见。在此,向以上提到的各位及对本书的工作提供过帮助的所有人员一并表示感谢。

编 者

于清华大学计算机系

目 录

前言

第一章 绪论

第一节 计算机辅助设计控制系统的形成和发展	1
第二节 控制系统CAD的一般步骤及主要内容	1
一、计算机辅助建立系统模型	1
二、数学模型表示方式之间的相互转换	2
三、计算机辅助分析和设计控制系统	3
四、控制系统的计算机仿真	4
第三节 控制系统CAD的主要特点及其应用	4

第二章 控制系统CAD常用算法基础

第一节 算法的基本概念	7
一、浮点数计算	7
二、算法的通用性、可靠性、精度和效率	9
三、算法的稳定性和问题的灵敏性	11
第二节 矩阵的奇异值分解及其应用	15
一、SVD的基本概念	15
二、SVD算法	19
三、SVD的应用	22
第三节 矩阵指数的计算	26
一、问题的提出	26
二、计算矩阵指数的几种方法	27
三、计算矩阵指数及其积分的级数求和法	31
四、截断误差上限估计及确定级数求和项数	32
五、折半-加倍措施	33
六、程序流程图	36
七、计算举例	36
第四节 李雅普诺夫方程的求解	37
一、连续李雅普诺夫方程	37
二、离散李雅普诺夫方程	44
三、连续与离散李雅普诺夫方程的相互转换	49
第五节 李卡蒂 (Riccati) 方程的求解	50
一、连续 Riccati 方程	50
二、离散 Riccati 方程	55
第六节 多项式矩阵的基本运算	59
一、多项式的基本运算	59
二、多项式矩阵的基本概念	61
三、多项式矩阵的初等变换	63

四、化多项式矩阵为标准形	64
五、多项式矩阵相乘	69
六、多项式矩阵的求逆	70
第七节 随机数的产生	72
一、均匀分布的随机数的产生	73
二、正态分布的随机数的产生	77
三、具有给定协方差的高斯白噪声向量的产生	78
第八节 离散傅里叶变换及其快速算法	79
一、离散傅里叶变换	80
二、离散傅里叶变换的快速算法 (FFT)	82
第九节 控制系统的参数最优化方法	85
一、间接寻优法	85
二、直接寻优法	87

第三章 控制系统模型表示方式的相互转换

第一节 连续与离散状态方程之间的转换	89
一、连续状态方程离散化的零阶近似	89
二、连续状态方程离散化的一阶近似	100
三、离散状态方程到连续状态方程的转换	102
四、具有延时的连续模型的离散化	106
第二节 传递函数与状态方程之间的转换	108
一、化传递函数为状态方程 (SISO)	108
二、化传递函数阵为状态方程 (SIMO和MISO)	112
三、化传递函数阵为状态方程 (MIMO)	115
四、化状态方程为传递函数——算法一	119
五、化状态方程为传递函数——算法二	121
第三节 连续与离散传递函数之间的转换	123
一、双线性变换法	123
二、零极点匹配法	131
三、冲激响应不变法	133
四、零阶保持器法	138
第四节 化一般状态方程为标准形	140
一、化状态方程为若尔当标准形	141
二、化状态方程为能控标准形	145
三、化状态方程为能观标准形	148
四、化离散状态方程为标准形	150
第五节 多项式系统矩阵与其他表示方式之间的转换	151
一、多项式系统矩阵	151
二、化多项式系统矩阵为传递函数	152
三、化多项式系统矩阵为状态方程	153
四、化状态方程及传递函数为多项式系统矩阵	154

第四章 计算机仿真控制系统

第一节 基于微分方程求解的连续系统仿真	155
一、化系统的模型表示为一阶微分方程组	155

二、连续控制系统仿真的四阶龙格-库塔法	157
三、连续控制系统仿真的多步法	159
四、关于计算步距的选择	161
第二节 基于矩阵指数运算的连续系统仿真	162
一、计算方法	163
二、计算程序	165
三、计算举例	174
四、增广矩阵法	175
第三节 面向环节的连续系统仿真	178
一、面向环节的线性连续系统的仿真	178
二、包含非线性环节的连续系统仿真	182
第四节 离散系统的仿真	190
一、面向系统的离散系统仿真	191
二、面向环节的离散系统仿真	193
第五节 采样控制系统的仿真	197
一、概述	197
二、控制系统的结构形式	197
三、参考输入的引入方式	201
四、连续受控对象的仿真	202
五、离散控制器、零阶保持器及采样器的仿真	203
六、程序框图	204
七、程序中有关符号说明	204
八、程序使用说明	206
九、计算举例	207
十、程序清单	208
第六节 随机控制系统的仿真	221
一、随机连续系统的仿真	221
二、随机采样控制系统的仿真	225
第七节 数字仿真语言	229
一、概述	229
二、仿真语言 CSS-F	231
三、仿真语言 ECSL	235

第五章 基于古典控制理论的计算机辅助分析和设计

第一节 利用代数判据判断系统的稳定性	242
一、计算劳斯表	242
二、平移虚轴的计算	245
三、实用程序框图及计算举例	247
第二节 频率特性的计算	250
一、调用基本多项式运算模块	250
二、利用多项式带余除法	251
三、直接计算多项式	252
第三节 根轨迹的计算	254

一、直接方法	254
二、区域搜索法	256
三、分支跟踪法	258
四、改进的求根法	261
五、数值积分法	270
六、多变量系统根轨迹简介	271
第四节 校正传递函数的计算	272
一、概述	272
二、基于频率法的串联校正传递函数的设计	274
三、基于参数寻优的串联校正传递函数的设计	279
第六章 多变量控制系统设计的现代频域法	
第一节 概述和数学基础	286
一、概述	286
二、矩阵的对角优势	287
三、多变量闭环系统的一般结构	291
第二节 稳定性判据	296
一、乃魁斯特判据的一般形式	296
二、正乃魁斯特判据	297
三、逆乃魁斯特判据	300
四、Ostrowski定理及其应用	302
五、采用 $\hat{Q}(s)$ 的理由	305
第三节 对角优势阵的实现	306
一、通过矩阵的初等运算实现对角优势	307
二、利用伪对角化方法实现对角优势	311
第四节 设计步骤和主要算法	316
一、设计步骤	316
二、主要算法	318
第七章 基于现代控制理论的计算机辅助分析和设计	
第一节 控制系统的稳定性、能控性和能观性的检验	321
一、稳定性检验	321
二、能控性和能观性的判断	322
三、离散系统稳定性、能控性和能观性的检验	324
第二节 按极点配置设计控制器	324
一、概述	324
二、按极点配置设计控制规律	325
三、按极点配置设计观测器	329
四、按极点配置设计控制器及设计举例	335
第三节 线性最优控制规律和状态估计器的设计	337
一、线性二次型最优控制规律的计算	337
二、状态最优估计	345
三、结合最优控制和最优估计的控制器的设计	353
第四节 确定性控制系统中性能指标函数的计算	353
一、连续系统	354

二、离散系统	357
三、采样系统	357
四、应用举例	360
第五节 随机控制系统中平均性能指标函数的计算	364
一、连续系统	364
二、离散系统	367
三、采样系统	368
四、应用举例	377
第六节 部分状态反馈次最优控制器的计算	378
一、概述	378
二、离散系统中二次型指标函数对控制器参数的灵敏度	381
三、连续系统中二次型指标函数对控制器参数的灵敏度	388
四、采样系统中二次型指标函数对控制器参数的灵敏度	389
五、部分状态反馈次最优控制器的计算	390
六、计算举例	392
第七节 最小方差控制器的计算	395
一、问题的提法	395
二、最优预报估计	396
三、最小方差控制器的计算	397
第八章 计算机辅助建立系统模型	
第一节 时域法辨识系统模型	401
一、由飞升曲线确定一阶环节的参数	401
二、由飞升曲线确定二阶非振荡环节的参数	404
三、由飞升曲线确定二阶振荡环节的参数	406
第二节 频域法辨识系统模型	408
一、概述	408
二、根据频率特性拟合传递函数	410
第三节 随机数据分析	416
一、随机数据的预处理	416
二、概率密度函数的计算	418
三、相关函数的计算	420
第四节 相关分析法辨识系统模型	422
一、概述	422
二、相关辨识原理及方法	423
三、通过相关函数的计算进行辨识	425
四、直接计算离散傅里叶变换进行相关辨识	430
第五节 最小二乘估计辨识系统模型	433
一、最小二乘估计的批处理算法	433
二、最小二乘估计的递推算法	437
三、广义最小二乘估计算法	440
四、最小二乘估计的辅助变量法	443
五、最小二乘估计的增广矩阵法	445
第六节 极大似然估计辨识系统模型	446

一、概述	446
二、最大似然估计的批处理算法	448
三、最大似然估计的递推算法	451
第七节 非线性状态方程的工作点及其线性化的计算	453
一、问题	453
二、工作点的计算	454
三、线性化计算	457
第九章 控制系统CAD程序包	
第一节 概述	459
一、程序包的功能	459
二、程序包的组成	460
三、程序包对硬件的要求	460
第二节 清华大学控制系统CAD程序包THCADCS介绍	460
一、THCADCS的主要功能	460
二、THCADCS的基本原理与结构	465
三、THCADCS的基本特点	467
第三节 瑞典Lund大学控制系统CAD程序包介绍	468
一、程序包的主要设计思想	468
二、程序包的基本结构	469
三、程序包的功能	470
四、交互式管理程序子包Intrac	473
第四节 罗马尼亚控制系统CAD程序包SIPAC介绍	477
一、SIPAC程序包的主要特点	477
二、SIPAC程序包的主要功能	478
三、SIPAC程序包的管理程序及模块结构	480
附录 几个计算机辅助设计控制系统的实用程序	
一、矩阵的奇异值分解	483
二、矩阵指数及其积分的计算	492
三、利用ROUTH判据判断线性系统的稳定性	498
四、采样或离散系统中线性二次型最优控制规律的计算	502
五、Kalman滤波增益矩阵及状态估计误差协方差阵的计算	522
参考文献	537

第一章 绪 论

第一节 计算机辅助设计控制系统的形成和发展

自动控制作为一门学科出现在40年代。开始所采用的数学工具主要是传递函数和频率特性，而且主要针对单输入和单输出的系统。在六十年代以前，控制系统的分析和设计主要依靠手工计算和一些图表的帮助。因而在经典控制理论中，人们引入了各种各样的图表和曲线，如波特（Bode）图、奈魁斯特（Nyquist）图、尼柯尔斯（Nichols）图以及M圆图等。

到了六十年代，计算机逐渐引入到工程设计领域，其中也包括自动控制系统的设计。开始，计算机主要用于控制系统问题的单个题目的数值计算，采用的是批处理作业方式（Batch mode），即将所要解决的问题和原始数据编成程序一起送入计算机，计算机对它进行运算。最后输出计算结果。而在整个计算过程中，无人-机对话的功能。这种方法的缺点是，它不能将计算机和工程技术人员两者的特长有机地结合起来。计算机具有很强的计算和数据处理的能力，而工程技术人员能够充分应用已有的经验及对系统的先验知识，从而具有很好的决策能力。两者的结合将能对控制系统的设计发挥更大的效能。因此，计算机辅助设计控制系统的程序逐渐由单个题目的数值计算发展成为会话式的通用程序，每个程序解决一个独立的问题。近十多年来，国外陆续建立了不少的计算机辅助设计控制系统的程序包^{[1]—[10]}。它们已被广泛地用于教学、科学研究以及工业生产部门。这些程序包将许多解决单个问题的通用程序及数据进行统一管理，并且应用交互式工作方式（Interactive mode），从而使控制系统的计算机辅助设计变得更加简单和灵活。我国也从国外引进了一些这样的软件包，如罗马尼亚的SIAPC，匈牙利的TAPSO等。同时，我国不少单位也正在建立我国自己的计算机辅助设计控制系统软件包^{[11] [12]}。

计算机辅助设计控制系统反过来也促进了控制理论以及控制系统设计方法的发展。在经典的设计方法中，之所以主要采用传递函数和频率特性的方法，主要是由于它比较直观，适合于用手工计算和图表分析。现在，由于计算机可以用来帮助控制系统的设计，因此就可能应用基于状态空间表示的时域分析方法从而使得象线性二次型最优控制理论、最优估计理论、系统辨识的参数估计方法以及多变量系统的现代频域设计法等才有可能获得广泛的发展，并真正在实际中获得应用。

第二节 控制系统CAD的一般

步骤及主要内容

一、计算机辅助建立系统模型

设计一个自动控制系统，通常需要经历好几个阶段。首先，必须建立受控对象的数学模型这是整个设计的基础。模型的准确与否直接影响到所设计的控制系统的质量。

建立受控对象的数学模型主要有两条途径。一是根据物理规律，直接列出对象的动力学方程。在用这种方法建立数学模型时，也有许多方面须依靠计算机的帮助。例如，在所列写的方程中，有些参数是需要通过实验才能确定的。而有时利用计算机来帮助采集、分析和处理数据可以迅速地获得比较准确的结果。其次，根据物理规律所列写的方程往往是非线性的。为了便于控制系统的分析和设计，常常需要对原始的非线性方程在工作点附近进行线性化。对于较为复杂的情况，这类求解工作点及在工作点附近线性化的任务也只有借助于计算机才能完成。

建立数学模型的另一条途径是系统辨识 (system identification) 的方法。即对受控对象施加一定的试验信号，通过测量输入和输出数据，并对它们进行分析、处理，从而辨识出对象的数学模型。根据所加的试验信号及所用分析方法的不同，系统辨识的方法也有很多种。

(1) 时域法。对受控对象施加脉冲或阶跃型信号，测量出系统输出的脉冲或阶跃响应。将测量得到的输出响应数据送入计算机，最后便可获得对象的传递函数或频率特性表示。

(2) 频域法。对受控对象施加不同频率的正弦信号，用实验的方法首先测出它的幅频和相频特性曲线。然后将这些频率特性数据送入计算机，经由曲线拟合的方法求得相应的传递函数。除此以外，也可以通过给受控对象施加其它形式的试验信号，测出相应的输出响应。然后将输入、输出数据送入计算机，通过离散傅里叶分析可以分别得到输入和输出信号的傅里叶变换，并进而求得对象的频率特性。

(3) 相关分析法。对受控对象施加随机信号，通过输入和输出数据进行相关分析（这个工作需计算机帮助），可以获得对象的频率特性，并进而求得其传递函数。这个方法尤其适用于模型的在线辨识。

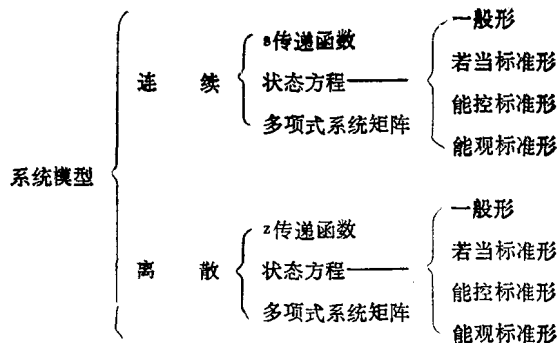
(4) 参数估计法。根据对受控对象的先验知识，首先设定对象模型的阶次，并选定一种模型的表示方式。然后根据输入、输出数据，利用参数估计的方法估计出所选模型中的参数，改变模型的阶次，重复以上步骤。比较不同的模型对于输入、输出数据的拟合情况，并从中选出阶次尽量低、拟合情况尽量好的结构模型。最常用的参数估计的方法有最小二乘 (least square) 估计和最大似然 (maximum likelihood) 估计。它们都需要借助于计算机才能完成这些方法的运算。至于对象模型结构和阶次，更需要人-机交互式地工作，通过反复地进行分析、比较才能确定。

在进行相关分析和参数估计时，需要对随机数据进行分析处理。有时，从实验测得的随机数据并不能直接拿来使用，须必先对它们进行预处理。如计算它们的均值和方差等统计量计算概率密度函数和相关函数等。所有这些任务也都需要计算机的帮助。

在经过系统辨识建立模型后，需要对所选模型进行验证分析。验证的方法主要依靠计算机仿真。通过仿真研究，可以比较模型的输入、输出特性与实际受控对象的拟合程度。除此以外，还可借助于计算机进一步对模型的稳定性、能控性、能观性以及极点分布等性能进行分析。

二、数学模型表示方式之间的相互转换

根据物理规律或系统辨识所建立的系统模型，由于所采用的方法不同，模型的表示方式也是各种各样的。下面示出了常见的几种模型表示及其相互关系。



根据对系统的分析和设计所使用方法的不同,它所要求的系统模型的表示方式也不一样。因此,为了能够使前面所建立的系统模型能方便地用于系统的分析和设计,常常有必要对系统的模型表示方式进行转换。最主要的转换应包括以下几方面:

- (1) 系统的连续模型与离散模型之间的转换。显然,它包括从高阶微分方程到差分方程、 s 传递函数到 z 传递函数以及连续状态方程到离散状态方程的转换。
- (2) 传递函数与状态方程之间的转换(包括连续和离散两种情况)。
- (3) 化一般状态方程为各种标准形(包括连续和离散两种情况)。
- (4) 多项式系统矩阵与传递函数及状态方程之间的相互转换。这里也包括连续和离散两种情况。

以上各种形式的转换,除十分简单的情况,一般都需要计算机的帮助。

三、计算机辅助分析和设计控制系统

计算机的帮助为控制系统的分析和设计开辟了广阔的天地。它使得原来认为难以应用的设计方法成为可能。根据所使用的数学工具的不同,控制系统的分析和设计方法可以分为如下的两大类:①变换法(频域法);②状态空间法(时域法)。下面将分别予以介绍。

(1) 变换法(频域法)

在用这种方法分析和设计控制系统时,要求系统的数学模型用传递函数表示。从传递函数出发,利用代数的方法(如Routh判据)判断系统的稳定性;并可画出系统的波特图、奈魁斯特图以及根轨迹图来进一步分析系统的稳定性以及其它系统性能。也可在此基础上,根据对系统品质指标的要求,选定一种校正装置的结构形式,利用参数寻优的方法定出校正装置的参数。

六十年代末和七十年代初,英国学者卢森布劳克(H.H.Rosenbrock)等人将经典的单变量控制系统的频域设计法推广到了多变量系统。多变量控制系统的频域设计法需要有较多的复杂运算。如多项式矩阵的相乘、求逆以及对角优势化运算等。同时还需要绘制比单变量系统更为复杂的奈魁斯特图。所有这些运算,也都要求计算机的帮助。

(2) 状态空间法(时域法)

随着现代控制理论不断发展以及计算机应用的日益普及,这两者的结合使得基于状态空间的控制系统设计方法在实践中得到了越来越广泛的应用。这个方法的一个突出优点是它能够适用于多变量控制系统的设计。

利用状态空间设计控制系统的方法主要有两种。一种是最优设计方法,它包括最优控制

规律的设计及状态的最优估计两个方面。通常称这样的最优设计问题为LQG (Linear Quadratic Gaussian) 问题。在这个方法中,最主要的设计工作是线性二次型最优控制规律以及卡尔曼 (Kalman) 滤波器的计算。显然这些计算是难以用手工进行的。

另一种利用状态空间设计控制系统的方法是基于对闭环系统的极点配置。即给定的性能指标是闭环系统的极点分布,并由此设计出所需的控制器。控制器由两部分组成,一部分是状态观测器,另一部分是线性状态反馈规律。因为只有全部状态的线性反馈才能获得极点的任意配置,状态观测器的作用就在于根据测量到的输出量重构出全部状态。因此,这种设计方法包括了按极点配置设计线性状态反馈控制规律和设计观测器两个方面。而这两方面的计算都需要计算机的帮助。

在用状态空间法对控制系统进行分析方面,主要包括有稳定性、能控性及能观性的判断、能控及能观子系统的分解、性能指标函数的计算以及灵敏度分析等方面。这些方面的计算也都需要有相应的计算机程序。

四、控制系统的计算机仿真

在前面第一部分所讨论的建立模型阶段,需要对所建立的模型进行仿真研究,以验证模型的正确性。那里主要是对受控对象即开环系统进行仿真。在经历了第三部分所讨论的系统设计阶段后,同样需要对所设计的系统进行仿真研究,以校核系统的性能是否满足要求。因而这里是对整个闭环系统进行仿真研究。

根据所用方法的不同,控制系统的计算机仿真可分为面向整个闭环控制系统和面向控制系统各个环节两类情况。所谓面向系统是指给定的模型是整个闭环控制系统的传递函数(或高阶微分方程)或状态方程。然后基于这个系统模型,利用计算机对其进行仿真。所谓面向环节是指给定的模型是闭环系统的结构图及每个环节的数学模型(传递函数或状态方程)。然后针对每个环节及它们之间的相互联系,利用计算机对它们进行仿真。

根据系统模型表示方式的不同,仿真所采用的计算方法也随之而异。当模型采用传递函数或高阶微分方程的形式表示时,系统的仿真计算则建立在微分方程的数值求解上。当系统的模型采用状态方程表示时,则仿真建立在矩阵指数的数值计算上。

随着数字仿真技术的不断发展,现在国外已发展了不少用于系统仿真的专用语言。国内不少单位也在移植或研制这样的仿真语言,利用仿真语言编制仿真程序比采用普通的算法语言更加简单和方便。

实际的控制系统可以是连续系统、离散系统以及二者混合的采样数据系统。因而前面介绍的控制系统CAD的主要内容应该包含适合这几种类型系统的计算程序。

第三节 控制系统CAD的主要特点及其应用

控制系统的计算机辅助设计比之单靠手工计算及图表帮助的经典设计方法有如下的优点:

(1) 由于计算机的帮助,使得一些新的设计方法,例如利用状态空间法设计控制系统的LQG问题以及多变量系统设计的现代频域法等,能够在实际中得到应用。

(2) 由于计算机具有运算速度快和修改参数容易的优点,因而便于对不同的设计方法

及不同的参数组合进行充分的比较，并从中选出一个较好的控制方案。

(3) 借助于计算机输出的图形显示，可以对控制系统的动态响应性能获得更加直观和深入的理解。

由于计算机具有很强的计算功能，而设计人员则具有较强的分析、综合及决断能力。因此，具有人-机会话功能的交互式计算程序可以将计算机和设计人员这两者的长处有机地结合起来，从而使得控制系统的计算机辅助设计能够发挥更大的作用。

控制系统CAD可以广泛地用于工业生产部门。利用它来帮助设计实际的控制系统，不仅可以缩短设计周期，而且能够设计出性能较好的控制系统。从而有助于改进产品质量和提高劳动生产率。

控制系统CAD对于从事自动控制的研究人员来说也是必不可少的工具和手段。借助于CAD程序，研究人员可以很方便地对控制系统进行不同方法的分析和研究。从而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。

控制系统CAD在控制系统教学中的应用也是十分明显的，借助于控制系统CAD程序，可以加深学生对控制系统理论的学习和理解。同时由于减少了许多繁杂的手工计算，从而可以提高学习效率。过去在课堂学习中只能举一些低阶系统和简单参数的例子，以便于手工能够计算。今天借助于计算机，更为接近实际的高阶系统也可作为学生的练习。从而使他们能得到更多的实际训练，较早地获得实际控制系统设计的经验。

为使控制系统CAD程序的使用更加方便和灵活，并进一步促进它的应用，目前很多国家都建有计算机辅助设计控制系统的软件包。这些软件包不仅包括了设计控制系统的各方面的应用程序，而且通过软件包的管理程序，可以对所有程序和数据进行统一管理，并提供人-机交互的功能。比较突出的有：瑞典Lund大学的软件包、英国UMIST软件包、罗马尼亚的SIPAC以及日本的DPACS-F等。我国已从国外引进了一些现成的控制系统CAD软件包，如罗马尼亚的SIPAC和匈牙利的TAPSO等。另外，我国不少单位也正在研制自己的软件包。

下面简单介绍两个比较典型的程序包。本书最后一章还将对它们进行比较详细的介绍。

1. 瑞典隆德(Lund)大学的软件包^[6-10]

这个软件包的研制工作是从七十年代初开始的。它得到了瑞典技术发展部的支持。经过十年左右的努力，其中包括11篇硕士论文、4篇博士论文的工作。到81年为止，经不断修改、充实，建立了一套较为完整的、在国际上具有领先地位的控制系统CAD软件包。结合软件包的建立，他们发展了多变量控制系统的设计理论，逐步形成了为分析和设计控制系统而交互式地应用计算机的思想。整套程序包由以下几部分组成：

(1) INTRAC。这是一个管理程序包。它在使用者与应用程序包之间起一个桥梁的作用。它向用户提供许多命令，这些命令可以看成是一种面向问题的高级语言。使用者运用这些命令可以很方便地处理数据和运行程序。

(2) IDPAC。这是一个进行数据分析和系统辨识的程序包。它包含有数据的处理和作图、相关分析、频谱分析和系统参数估计。参数估计采用了最小二乘和最大似然估计的方法。

(3) MODPAC。这是对系统模型的各种表示方式进行互相转换的一个程序包。

(4) SYN PAC。这是基于状态空间方法设计控制系统的软件包。它包括计算线性状

态反馈、Kalman滤波器、观测器、顺馈控制以及连续系统的离散化等程序。

(5) POLPAC。这是基于多项式运算的控制系统设计软件包。它适用于单输入、多输出系统。它包括极点配置、最小方差控制以及LQG控制的设计。同时它也包括应用古典的根轨迹和波特图的设计方法。

隆德大学的这个交互式程序包是解决控制问题的一个强有力的工具。它使得工程设计人员解决控制系统的设计问题不再感到是一件困难的事情。因而它对控制系统的工程设计产生了很大的影响。控制系统CAD程序包的使用缩小了控制理论与实际应用之间的差距。它已在许多大学、科研单位以及工业部门获得了广泛的应用。

这个程序包最初装备在PDP-15计算机上，后来移植到UNIVAC1108计算机上，使用的是FORTRAN语言。由于这种语言不是对话式，因而INTRAC程序包主要用来实现人一机对话和交互式的工作。他们认为，FORTRAN并不是建立这样的软件包的一个很好的语言。BASIC虽具有较好的人—机会话的功能，由于它运行速度慢，编制程序不方便，因而也不是建立软件包的合适语言。他们建议PASCAL和ADA是将来建立控制系统CAD软件包可供考虑的较合适的算法语言。

2. 罗马尼亚的SIPAC软件包

SIPAC程序包由几个程序模块和一个管理程序组成。每个程序模块又是由一系列单个程序所组成。这些程序可以共用一个数据区，程序可以单个地运行，也可按照需要依次地运行一组程序。

SIPAC软件包主要用于多变量线性定常系统的辨识和设计。它具有以下几方面的功能：

- (1) 原始数据的处理和统计分析；
- (2) 系统辨识；
- (3) 系统数学模型各种表示方式的转换；
- (4) 应用状态空间法的控制系统设计，其中包括LQG和极点配置两种方法；
- (5) 线性系统的数字仿真。

从以上程序包的内容可以看出，SIPAC软件包包括了控制系统设计流程中所有必要的步骤。即从系统模型的建立开始到完成系统的设计并对其进行仿真为止。

SIPAC软件包除了提供上面列举的控制系统辅助设计的应用程序外，还具有对数据的存取以及对软件包进行交互管理的功能，从而使设计程序的使用更加方便和灵活。

根据前面所介绍的内容可以看出，控制系统CAD的课程涉及了控制系统理论、计算方法以及计算程序等多个方面。而每一方面又包括了控制、估计及辨识等多方面内容。因而这是一门内容丰富、范围广泛的综合课程。