计算机辅助控制系统设计

〔英〕H. H. 卢森布劳克 著

科学出版社

计算机辅助控制系统设计

〔英〕H. H. 卢森布劳克 著
周文忠 译 潘科炎 校

科学出版社
1983

内 容 简 介

本书着重从工程设计的观点介绍了当前最适用于计算机辅助控制系统设计的频率域方法. 全书分四章,包括数学基础、单变量控制系统设计、多变量控制系统设计以及设计应用实例等. 为了有助于工程设计人员具体掌握本书的设计方法, 书中各章节有针对性地给出了许多例题和习题.

本书主要供从事机械、电力、化工、轻工等生产过程自动化和航空及宇宙航行等领域自动控制系统设计的工程技术人员参考, 也可供大专院校自动控制专业的教师、研究生及高年级学生参考.

H. H. Rosenbrock
COMPUTER-AIDED CONTROL
SYSTEM DESIGN
Academic Press, 1974

计算机辅助控制系统设计

〔英〕H. H. 卢森布劳克 著
周文忠 译 潘科炎 校
责任编辑 魏 玲 袁放尧
科学出版社 出版
北京朝阳门内大街 137 号
中国科学院印刷厂印刷
新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

1983 年 5 月第 一 版 开本: 787×1092 1/32
1983 年 5 月第一次印刷 印张: 9 3/8
印数: 0001－9,000 字数: 210,000

统一书号: 15031·481
本社书号: 3007·15－8

定 价: 1.45 元

译 者 的 话

本书是一本论述与频率域有关的控制系统设计方法的专著. 二十世纪五十年代末，状态空间方法的崛起为控制系统设计提供了另一种强有力的工具. 但是，控制系统设计者用状态空间法进行多变量控制系统设计时往往感到缺乏鲜明性和直观性，因为这种方法过于抽象化、数学化，不易把控制系统的数学模型与实际系统有机地联系起来. 本书提出的设计方法恰好弥补了这个不足. 它一方面提高了控制系统设计者利用计算机辅助控制系统设计的兴趣；另一方面显示了计算机辅助控制系统设计的优越性及其带来的效益.

本书第一章，扼要地叙述了作者在其早期著作《动态系统的数学基础》以及《状态空间和多变量系统理论》两书中的主要定理和概念，并增补了一些定理，为读者提供必要的数学基础. 卢森布劳克(H. H. Rosenbrock)教授在这三部著作中系统地总结了他多年来的工作成果，可以说，作者在控制理论体系中建立了一个独特的学派，这个学派的重要贡献是创建了系统矩阵理论，把经典调节理论中久经工程实践考验过的，但以往只能应用于单变量控制系统设计的频率法扩充到多变量控制系统. 有关系统矩阵理论方面的内容，读者可参阅作者的《状态空间和多变量系统理论》一书(即将翻译出版).

本书第二章全面阐述了几种频率域设计方法在单变量控制系统设计中的应用，目的是为第三章讨论多变量系统打好基础. 在这里作者创新地提出逆奈奎斯特图法.

第三章是本书的核心和精华，在这里作者根据Ostrowski

定理和Gershgorin定理提出了Ostrowski带和Gershgorin带，进而提出了"列(行)对角优势"，以及同时满足列和行对角优势的"对角优势"概念；还提出了实现伪对角线化["列(行)对角优势"及"对角优势"]的几种方法．这些设计方法应用到二十五个工业控制系统设计中，取得了很好的设计效果．在第四章中用四个设计实例，介绍了本书设计方法在不同方面的具体应用．

在翻译本书之前，译者曾参加中国科学院系统科学研究所控制理论研究室主办的定期讨论班，在讨论班中对本书主要内容进行了较深入的探讨和交流，获益匪浅．

杨家墀教授对本书的翻译给予了热情的鼓励，译者在此表示感谢．

在翻译过程中对原书中的数学公式及一些排印中的错误均作了修改．

限于译者水平，错误和不妥之处在所难免，希望有关控制理论专家，工程控制系统设计人员，及对本书感兴趣的读者批评指正．

原　　序

本书专门研究用于控制系统设计的频率响应法以及与之密切相关的一些设计方法，因为这些方法在目前是适合于控制系统设计者与计算机之间进行交互的唯一有效方法．因此，频率响应法在1935—1960年间取得蓬勃发展的基础上，目前又有了一系列新的进展，并且这种方法在处理一类完全确定的控制问题时十分成功．这些问题包括只具有单输入-单输出的线性定常控制对象的伺服随动问题和调节器问题．

1955年以后，由于火箭制导的需要，使得状态空间方法得以发展，而用这种方法能直接处理微分方程；用它们来处理许多宇航控制问题也特别适宜；除此之外，应用这种状态空间方法使得我们对一些重要控制领域的认识更加深化了，然而人们却不适当地把这些方法称之为"现代控制理论"．

在频率响应法和状态空间法之间一度存在的鸿沟现在正开始填平．人们在处理线性定常系统过程中已经认识到，无论用向量空间方法或是用同拉普拉斯变换有密切联系的代数方法都可以得到大多数理论结果．看来，状态空间法和频率响应法都可用于处理给定的控制问题，这是两种可供选择并且又有着密切联系的数学方法．如果说状态空间方法的适用范围能扩大到线性定常系统以外的控制问题，那么从另一角度也可以说频率响应法具有无比的直观洞察力，并且它对系统描述中的许多小误差也不特别敏感．

在处理线性定常调节器问题或伺服随动问题时，如果只有一个输入和一个输出，状态空间方法决不能成功地取代频

率响应法．但是，对多变量控制问题来说，大约到1960年研究工作就处于停滞不前状态，因此，那时没有非常好的处理方法．撰写本书的一个主要目的就是要把频率响应方法推广到为数众多的多变量调节器问题和伺服随动问题．

当我们回过头来探讨早期的研究方向时，有两个非常重要的发展阶段值得一提．第一个阶段，状态空间理论及其后的发展澄清了人们在早期还不熟悉的一些问题，特别是控制系统结构方面的问题．由于充分利用在这方面积累起来的知识，较好地解决了诸如系统稳定性和系统冗余效应(不可控性或不可观测性)这类问题．特别应该指出的是，应用频率响应法处理不具有最小阶的控制系统也不存在困难．本书中一般以代数形式给出所需要的结果，而这些结果是从作者前期著作《状态空间和多变量系统理论》一书中引伸过来的，在本书第一章中扼要叙述了其中的精华．然而在大多数情况下，这些结果也可用向量空间方法得到，其中大部分内容读者可能是非常熟悉的．

第二个发展阶段就是利用计算机配合图形显示，这对工程设计将产生日益深远的影响．由于这一发展，使得我们有必要对现有的频率响应法重新做一番全面的评价，图形显示法只能用来与控制系统设计者交换信息，但不能取代求根等这类标准的数值计算法．此外，图形方法的发展不必密切关注计算量问题，但如果在没有计算机的条件下采用图形方法，则需要很大的计算量．我们确信这种设计方法对处理工业控制问题来说是一种强有力的工具，并且它具有很大的灵活性，在目前，任何其它方法都不能与之相匹敌．

频率响应法的复兴使得这种方法得到了广泛的应用．例如，现有的状态空间法可用频率响应法重新陈述；提出了以描述函数为基础的非线性系统的设计方法；并且把这里所给出

的许多结果推广到数据采样系统. 然而重要的是，所提出的任何一种设计方法都必需在实际的工程控制问题上经过广泛的考验. 迄今为止，这种频率法在单变量控制系统设计中已经过了广泛的验证，然而对多变量问题，只是在有限范围内得到了验证. 因此，本书所陈述的内容只限于已经过充分试验并且可以用范围很广的许多实际应用来证实的一些设计方法，如同在第四章里介绍的那样.

与其它一般著作相比较，本书在很大程度上是很多同事共同努力的结果. 在整整五年期间，许多同事和学生们始终不渝地致力于书中所陈述的方法的发展和应用工作. 实现第三章中所述设计方法的第一个计算机计算程序是由 I.Paul 先生编写的. 但是在这一方面以及在早期应用中贡献最大的是 R. S. McLeod 博士，D. J. Hawkins 博士和 P. D. McMorran 博士也作出了重大贡献. 在此期间，G. C. Barney 博士、J. M. Hambury 博士和 S. Karniel 博士发展和完善了计算机设备和图形显示装置. 以后的程序设计是在 N. Munro 博士指导下由 B. J. Bowland 女士和 L. S. Brown 女士完成的.

在此首先应该感谢科学研究委员会，因为他们为我们提供了不少计算机专用设备. 在这种设计方法未取得成功的证明之前，这些设备是很有用的. 他们对我们提供这些设备，是对我们的信任，对这些援助，我们是无法用恰当言语来表示感谢的.

许多朋友和同事对本书的组织结构和表达方式提出了改进意见，其中特别要感谢 R. W. Brockett 和 A. G. J. MacFarlane 两位教授所给予的指教. 本书插图中所用的计算机输出图表都是从 N. Munro 博士那儿觅得的，在此，对他的无偿援助表示最衷心的感谢. 同样，我还要对 L. E. Mann 女士

表示感谢，感谢她把我的凌乱手稿整理成精巧而工整的打字稿.

最后，以我个人名义向在准备手稿期间去世的 Harold Hartley 先生表示深切感谢，多年以前，他曾对我本人给予过巨大的鼓励，并促进了自动控制这门新生学科的发展. 谨以本书奉献给 Harold Hartley 先生，以表深切怀念.

H. H. 卢森布劳克

1974年9月

目　录

第一章 引论和数学基础

本章拟为后面几章将要讨论的控制问题提供一个数学基础. 在这一章中还引入了动态系统的一些数学定义和定理, 这些是研究本书后面几章必须具备的. 这些数学结果可供读者参考, 其中大部分摘自作者另一本早期著作[State-space and multivariable theory, Rosenbrock, 1970, 在本书中简称为SSMVT]中的相应章节.

学生们若要更深入地掌握这一学科知识, 希望能对SSMVT一书作一番初步研究, 从中将得到裨益; 本书也可供研究人员和工程师使用, 他们可以先接受这些必要的定理, 而把这些定理的详细证明留待以后再研究. 这些读者不必在数学准备上花费过多时间, 只要简单学习后就可转到第二、三章. 读者将会发现, 二、三章的内容是简单易懂的, 可把它们作为设计程序的工作规范.

希望读者学习这一章时能参考SSMVT一书, 领会其中的数学细节.

1. 系统模型

控制系统设计工程师经常面临下面两种情况:

第一种情况, 已经有了控制对象, 并且这个对象是易于直接测量的. 这时, 通常在控制对象的输入端注入信号, 而在输出端测量它对注入信号的响应. 如果控制对象是线性定常的, 则根据这些测量结果, 便可用一个传递函数阵$G(s)$来表

征被控对象. 注入信号可以是阶跃信号、脉冲信号、正弦波信号、伪随机二进制信号或其它形式信号. 对这些测量数据进行处理后就可得到(或至少近似于)一个 $m\times l$ 维有理函数阵 $G(s)$, 或对 s 的一定虚值用数值方法求得矩阵的元素值.

通常只有当输入信号足够小时, 控制对象是线性的这种假定才正确. "定常"的假定也只是在限定的时间间隔内(例如, 当控制对象在某个工作点上平稳地运行时)才正确. 此外, 为了消除噪声的影响, 数据可能需要用统计方法进行处理. 上述所有问题均超出了我们现在要考虑的范围, 这里我们假设控制对象可用一个 $G(s)$ 表征, 这个 $G(s)$ 或是用代数方法给出, 或对 s 的虚值用数值方法给出.

第二种情况, 控制对象是不能直接测量的, 因而必须根据基本理论建立其数学模型. 这就需要考虑所发生的物理过程和化学过程, 在这种情况下可能会产生代数方程、微分方程、偏微分方程或其它类型方程, 或是它们的混合型. 然而, 采用标准程序(有限差分法、集中参数法等等), 通常可用代数方程、常微分方程来表征控制对象, 而在可能存在时间延迟这种情况下则可用差分-微分方程来表征控制对象.

至于建立数学模型的详细程序也不属于我们目前要讨论的范围. 但是, 在大多数场合, 我们假定控制对象可以用代数方程和微分方程来适当地描述, 这些方程是定常的, 但又往往是非线性的. 然而, 对设计工作状态的小偏离情况可以采用标准的摄动法将方程线性化. 如果 D 是微分算子, 则最后的方程可写成

$$\left.\begin{aligned} T(D)\xi&=U(D)u\\ y&=V(D)\xi+W(D)u\end{aligned}\right\}\qquad(1.1)$$

这里, u 是 l 维输入矢量(或控制变量), y 是 m 维输出矢量(或测量变量), ξ 是 r 维系统状态矢量, 我们把能够使 u 的元

素影响控制对象的物理装置称为执行机构，而 y 的元素是由传感器(或测量装置)产生的．矩阵 T, U, W, V 是实系数多项式矩阵，即它们的各元素是 D 的实系数多项式，并且我们假设 $|T(D)|\neq 0$.

我们假设式(1.1)中的 u 满足拉普拉斯变换的条件[见 SSMVT，第二章第1节]，并且我们可在零初始条件下求出式(1.1)的拉普拉斯变换式，即

$$\left.\begin{aligned} T(s)\bar{\xi}&=U(s)\bar{u} \\ \bar{y}&=V(s)\bar{\xi}+W(s)\bar{u} \end{aligned}\right\} \tag{1.2}$$

式中 s 是拉普拉斯变换的自变量，$\bar{\xi}$, $\bar{u}$, $\bar{y}$ 分别是 ξ, u, y 的拉普拉斯变换．从式(1.2)中消去 $\bar{\xi}$ 便得到传递函数阵

$$G(s)=V(s)T^{-1}(s)U(s)+W(s) \tag{1.3}$$

除上述两类情况外，工程师可能还会遇到另一种中间情况．例如，系统一部分是可测量的，而另一部分则可以从理论上建立其模型，并在模拟计算机上仿真．若我们把模拟计算机连接到其它可用部件上，便可能在模拟计算机上取得测量值．

2. 系统矩阵

上一节确定了系统模型的产生方法．现在我们假设式(1.2)或式(1.3)已给出．首先我们要把这些明显不同的系统描述方法变成一个统一的体系．为此我们定义系统矩阵 $P(s)$：

$$P(s)=\left[\begin{array}{cc|c} I_{n-r} & 0 & 0 \\ 0 & T(s) & U(s) \\ \hline 0 & -V(s) & W(s) \end{array}\right] \tag{2.1}$$

这里 n 是 $|T(s)|$ 的次数，记作 $\delta(|T(s)|)$，称为系统的阶数. 如果 $r \geqslant n$ (T 是 $r\times r$ 阵)，则可删去式 (2.1) 中的单位矩阵 I_{n-r}. 若记

$$T_1=\begin{bmatrix} I_{n-r} & 0 \\ 0 & T \end{bmatrix},\ U_1=\begin{bmatrix} 0 \\ U \end{bmatrix},\ V_1=(0V) \tag{2.2}$$

我们便可以把 P 写成

$$P(s)=\begin{bmatrix} T_1(s) & U_1(s) \\ -V_1(s) & W(s) \end{bmatrix} \tag{2.3}$$

其中 T_1 是 $r_1\times r_1$ 阵，且 $r_1 \geqslant n=\delta(|T_1(s)|)$. 这种形式的系统矩阵称做系统多项式矩阵.

一个特例是

$$T(s)=sI_n-A,\ U(s)=B,\ V(s)=C,\ W(s)=D(s) \tag{2.4}$$

这里 A, B, C 是不依赖于 s 的实矩阵，而 $D(s)$ 也是实多项式矩阵. 相应的系统矩阵是

$$P(s)=\begin{bmatrix} sI_n-A & B \\ -C & D(s) \end{bmatrix} \tag{2.5}$$

它称为状态空间系统矩阵. 由此得到传递函数矩阵

$$G(s)=C(sI_n-A)^{-1}B+D(s) \tag{2.6}$$

如果 $|sI_n-A|=s^n+a_{n-1}s^{n-1}+\cdots+a_1s+a_0$，则 $G(s)$ 可由下式更明显地给出:

$$\begin{aligned} G(s)=\{&(s^{n-1}+a_{n-1}s^{n-2}+\cdots+a_1)CB+(s^{n-2}\\ &+a_{n-1}s^{n-3}+\cdots+a_2)CAB+\cdots+CA^{n-1}B\}\\ &\div(s^n+a_{n-1}s^{n-1}+\cdots+a_0)+D(s) \end{aligned} \tag{2.7}$$

上述方程在 $C=I_n$ 或 $B=I_n$ 时的两个特殊形式也是很重要的.

如果 $D(s)\equiv 0$，那么当 $s\to\infty$ 时，$G(s)\to 0$，这时称 $G(s)$ 为严格真分式. 通常我们假定 $G(s)$ 是严格真分式，而对应于

式(2.5)的微分方程就是

$$\left.\begin{aligned}\dot{x}&=Ax+Bu\\ y&=Cx\end{aligned}\right\}\tag{2.8}$$

式中，x 是系统的状态. 描述一个系统时，往往从这组方程入手. 但是为了化成这种形式，常常要做大量运算. 采用更一般的表达式(2.1)，便可使这种运算系统化.

在稳定性分析中将用到一个重要的公式，这个公式能把传递函数矩阵 $G(s)$ 与导出它的系统矩阵 $P(s)$ 联系起来 [见SSMVT，第二章第1节]. 设由 $(r+m)\times(r+l)$ 系统多项式矩阵为

$$P(s)=\begin{bmatrix}T(s) & U(s)\\ -V(s) & W(s)\end{bmatrix}\tag{2.9}$$

可导出

$$G(s)=V(s)T^{-1}(s)U(s)+W(s)\tag{2.10}$$

于是

$$G^{i_1,i_2,\cdots,i_q}_{j_1,j_2,\cdots,j_q}=P^{i_1,i_2,\cdots,i_q}_{j_1,j_2,\cdots,j_q})\div P),\ q\leqslant l,\ m\tag{2.11}$$

式中 $G^{i_1,i_2,\cdots,i_q}_{j_1,j_2,\cdots,j_q}$ 是由 G 的 i_1, i_2, $\cdots$, i_q 行和 j_1, j_2, $\cdots$, j_q 列形成的子式；$P^{i_1,i_2,\cdots,i_q}_{j_1,j_2,\cdots,j_q})$ 是由 P 的 1, 2, $\cdots$, r, $r+i_1$, $r+i_2$, $\cdots$, $r+i_q$ 行和 1, 2, $\cdots$, r, $r+j_1$, $r+j_2$, $\cdots$, $r+j_q$ 列形成的子式；而 $P)=|T|$. 特别地，$g_{ij}=G^i_j=P^i_j)\div|T|$，并且当 $l=m$ 时，$|G|=G^{1,2,\cdots,m}_{1,2,\cdots,m}=|P|\div|T|$. 当然，多项式矩阵如果具有式(2.4)的特殊形式，这些公式也可应用.

虽然控制对象是用微分方程描述的，而我们关心的倒可能是离散时间情况，用数字计算机进行控制就是这种情况. 这时，变量是在离散时间 0, T, $2T$, $\cdots$点上采样，改变一下时间比例尺就可用 0, 1, 2, $\cdots$表征这些离散时间. 在这种控制系统中，计算机用来处理测量数据，并产生在采样间隔内为恒值的控制信号 u. 采用上述方法，方程(2.8)可用下式代替：