

线性控制理论研究用

辅助计算程序

【美】G. E. 奈尔森等著

湖南教育出版社

线性控制理论研究用

辅助计算程序

饶立昌 喻寿益 叶俊英 译

COMPUTER PROGRAMS FOR
COMPUTATIONAL ASSISTANCE
IN THE STUDY OF
LINEAR CONTROL THEORY

JAMES L. MELSA
STEPHEN K. JONES
SECOND EDITION

线性控制理论研究用
辅助计算程序

〔美〕J. L. 梅尔萨等著
饶立昌 喻寿益 叶俊英译
责任编辑：董树岩

湖南教育出版社出版(长沙市展览馆路14号)
湖南省新华书店发行 湖南省新华印刷二厂印刷

1984年10月第1版 1984年10月第1次印刷

字数：220,000 印张：9.825 印数：1—4,500

【湘教(84)10—3】统一书号：7284·411 定价：1.45元

译 者 的 话

随着计算机技术的迅速发展，特别是带光笔输入的交互式图形显示终端设备的出现，使得控制系统的设计工作能够方便地利用计算机进行。图形显示法和数值算法这两种设计方法通过计算机的有机联系和互相补充，对控制系统的工程设计正在产生日益深远的影响。近年来出现的“计算机辅助控制系统设计”(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。我们希望通过本书的翻译出版，能在这方面发挥一定的作用。

本书根据美国McGRAW-HILL BOOK COMPANY 1973年出版的《COMPUTER PROGRAMS FOR COMPUTATIONAL ASSISTANCE IN THE STUDY OF LINEAR CONTROL THEORY》第二版译出，作者是J. L. MELSA等。原著虽然是作为自动控制专业的学生学习线性控制理论的补充教材而编写的，但它也可以作为一本“计算机辅助控制系统设计”的教材或参考书。原著阐述十三个计算程序都按如下方式进行：先简单地介绍计算程序所依据的基本原理；再描述程序的输入和输出格式；然后举例说明怎样输入程序运行所需要的数据和如何阅读程序的输出结果；最后附有用 FORTRAN-IV 语言编写的程序清单。这就使读者易于掌握和使用书中描述的计算程序，还可以领会到计算

机辅助设计的基本概念。书中所述的辅助计算程序所调用的27个计算子程序和3个行式打印机绘图子程序，分别在附录A和附录B中作了原理性说明和列出了详细的程序清单，这些子程序具有很大的通用性，便于读者在解决其它问题时参考和选用。还要说明一点，在原著中输入计算机的程序和数据都用卡片组方式读入，如果改用目前流行的CRT终端作为输入设备，卡片组的一张卡片便可以用CRT终端输入的一行来替换。

中国自动化学会系统仿真专业委员会负责人王行仁副教授和中南矿冶学院自动化系王鸿贵副教授对本书的翻译给予了热情的鼓励，译者在此表示感谢。

本书的序言、第一章和附录A、B由饶立昌翻译，第二章由喻寿益翻译，第三章和第四章由叶俊英翻译。由于译者水平有限，错误和不妥之处在所难免，希望读者批评指正。

1983年10月于长沙

目 录

序	(1)
第一章 导 言	(3)
1.1 目的和概要	(3)
1.2 输入格式	(5)
1.3 输出格式	(9)
第二章 状态变量程序	(10)
2.1 引言	(10)
2.2 基本的矩阵 (BASMAT) 程 序	(11)
2.3 有理式的时间响应 (RTRESP) 程 序	(18)
2.4 图示时间响应 (GTRESP) 程 序	(35)
2.5 灵敏度分析 (SENSIT) 程 序	(45)
2.6 状态变量反馈 (STVARFDBK) 程序	(62)
2.7 可观测性指数计算 (OBSERV) 程序	(89)
2.8 龙伯格观测器设计 (LUEN) 程 序	(94)
2.9 串联补偿 (SERCOM) 程 序	(106)
2.10 最优控制——卡尔曼滤波器 (RICATI) 程序	(118)
2.11 多输入多输出系统解耦 (MIMO) 程 序	(133)
第三章 传递函数程序	(160)
3.1 引言	(160)
3.2 频率响应 (FRESP) 程序	(160)
3.3 根轨迹 (RTLOC) 程序	(175)

3.4 部分分式展开 (PRFEXP) 程序.....	(188)
第四章 设计问题	(198)
4.1 引言	(198)
4.2 简化的垂直通道着陆状态自动驾驶仪的设计	(198)
4.3 核反应堆系统的状态变量反馈控制	(205)
4.4 通讯问题	(208)
附录A 子程序	(213)
附录B 图示子程序	(232)

序

在学习和应用线性控制理论时会遇到许多计算问题，本书的目的是为求解这些问题而提供帮助。书中提供了十三个数字计算机程序，使得人们有可能对广泛的线性控制问题进行分析、设计和仿真研究。虽然本书是作为线性控制基本课程的补充材料而写的，但它对从事设计和分析线性控制问题的工程师也有相当的参考价值。

在编写本书中的计算机程序时尽可能引用子程序，以便它们也可以适用于那些在本书中未讨论的问题。为了提高它们的应用灵活性，在两个附录中对所有子程序都作了详尽的说明。我们希望本书及其有关的计算机程序不要被认为是对线性控制计算问题的最后解答，而应把它作为进一步发展的基础。基于上述考虑，作者非常欢迎对使用和修正本书的内容提出意见。

使用本书介绍的程序，仅仅需要具备FORTRAN语言的基本知识和使用卡片穿孔机以及编写FORTRAN程序的能力。对于那些比较熟悉FORTRAN语言的读者，为了帮助他们理解并从而有可能修改这些程序，本书提供了程序清单以及其它资料。我们假定读者已具有线性控制理论的基本概念，因为这些知识可以从许多基本的控制教材中得到。

本书阐述的计算机程序已经编制好几年了，而且也曾被作者和其它人用来解决各种理论和实际的问题。第四章讨论了一些典

型的应用例子。尽管如此,或许还有人用他得到的FORTRAN纯净程序不能圆满地试验本书中任何一个程序。作者对可能出现的这类问题表示抱歉,对提供有关在使用中遇到特殊困难的情况表示感谢。

为了便于使用本书描述的计算机程序,可以写信给美国德克萨斯州,达拉斯,75222,南墨夺狄斯特大学 (Southern Methodist University),信息和控制科学中心,J.L.梅尔萨,以便购买一套穿好孔的卡片组。这组卡片包括所有程序、子程序和例题的输入数据。这些程序都是以IBM029穿孔格式,用基本的FORTRAN-IV语言编写的。

许多学生和同事在编写本书过程中给予了帮助,作者表示深切的谢意。南墨夺狄斯特大学信息和控制科学中心主任,A.P.塞奇博士和工学院院长,T.L.马丁博士给予我们不断的鼓励,一并在此感谢。

第一章 导 言

1.1 目的和概要

在学习线性控制理论时，常常会遇到各种计算问题。这些计算从理论上说虽然简单，但它也会成为学习基本概念的障碍。例如，在完成一个控制系统的设计之后，对这种设计进行评价，就教学过程来看是很有帮助的。确定一个系统的精确的频率响应，或根迹图，或者其阶跃响应，都包括大量繁杂的计算，实际上手算难于完成。此外，为了强调理论在实践中的作用，常常要研究高阶系统的实际设计问题。如果没有一种辅助计算的方法，通常就会回避这类问题，因为进行高阶系统计算得到的收获和它在计算方面所费的功夫相比是完全得不偿失的。

本书的目标是提供一套计算机程序，它几乎可以解答线性控制理论的所有计算问题。用这些程序可以详细地研究各种实际控制问题而不必增加人工的计算工作量。此外，使用这些程序，可以领会到目前在工程实践中很流行的计算机辅助设计和计算机辅助分析的概念。

线性控制理论的知识可以从任一本现行教科书中学到。因此，我们认为读者已经具备这方面的基本概念。本书的着重点放在线性控制系统的状态变量表示法和线性状态变量反馈的应用方

面。有兴趣的读者可以从《线性控制系统》^①这本书中找到有关这方面材料的详细讨论。本书使用的符号和系统公式也与该书使用的非常接近。

使用本书的材料，并不要求读者具有数值计算方法的知识，仅仅需要最基本的FORTRAN语言的基础和一些简单的准备计算机卡片组的知识就行了。对于那些已掌握FORTRAN语言的读者，本书提供了计算程序和子程序清单以及程序注释以供参考。

这些程序分为两大类：(1) 状态变量程序，(2) 传递函数程序。第二章叙述的五个状态变量程序可以用来求得某些矩阵函数，如矩阵的逆矩阵、行列式、预解阵和状态转移矩阵以及分析和设计线性状态变量反馈系统等等。还阐述了两个计算线性状态变量反馈系统的时间响应的程序，一个研究闭环系统对参数变化的灵敏度的程序和六个设计线性系统的程序。

第三章讨论了三个传递函数程序。其中两个程序分别用来计算系统的频率响应和根轨迹，第三个传递函数程序是用来求得有理函数的部分分式展开式的。第四章介绍了这些计算机程序的一些典型的应用例子。

所有要用到的子程序都在附录A中叙述。讲述这些子程序在于帮助有兴趣的读者理解计算程序的运算过程，并使他们有可能用这些子程序编写出新的程序。尽可能引用子程序来编写本书中的计算机程序，这样使用起来就可以更加灵活。比如人们可以把灵敏度分析程序和时间响应程序结合起来，或者把状态变量反馈程序和根轨迹程序结合起来以进行某种特殊的研究。

① J.L. Melsa and D.G. Schultz, Linear Control System, McGraw-Hill Book Co., Inc., 1969.

附录B 阐述一组三个图示子程序，它们都是在前面两章用过的。这些图示程序极为通用，而且它们可以很快地将程序演算结果的图形表示在行印机上打印出来。所讨论的三个子程序是对数坐标图子程序，X—Y坐标图子程序和X 与时间坐标图子程序。

第二章和第三章介绍的十三个程序，每一个的阐述方式都遵循同一个格式。先对程序的用途作简要的说明，再讨论编制程序的理论概念。然后解释程序的输入输出格式，并用一个例子加以说明。再列出输入数据卡片组和得到的程序输出结果并加以讨论。有时，有必要稍稍修改或压缩计算机输出的尺寸以使它适合纸张大小的限制，然而输出的结果仍将保留它应得到的那种型式特征。最后列出程序清单以供参考。

通常，所有程序都限于研究10阶以内的问题。虽然在算法中并没有什么本质上的限制使得有必要作出这样的约束，几乎所有的学术上的问题和大多数实际问题都能满足这样的限制。如果必要的话，可以扩大相应的维数语句来消除这一限制。然而处理阶数过份高的问题是不足取的，因为还没有认真地去研究所用的数值计算方法的效能问题。我们推荐有兴趣的读者参考《科学家和工程师用的数值方法》^①这本书，它对数值计算方法问题有非常好的讨论。

1.2 输入格式

在第二章和第三章对每一个程序的输入格式作了详尽的描述。本节的目的是指出所有程序的输入格式的共同特点。选择输入格式的第一个想法就是要使这些程序的使用尽可能简单却又保

① R. W. Hamming, Numerical Methods for Scientists and Engineers, McGraw-Hill Book Co., Inc., 1962.

留足够的灵活性。第二个想法就是要使不同的程序的输入格式，尽可能做到接近统一。由于这个缘故，选用的输入格式常使程序输入数据需要用到更多的卡片。另一方面，由于大量的卡片具有同一个形式，而且在每一个程序中使用同样的通用格式，这种输入格式也就很容易记住。此外，输入数据卡片组是这样设计的，使它与基本的问题语句紧密联系。这样，根据问题需要，修改它就容易了。

只要简单地把各个输入数据卡片组一组接着一组地输入，那么所有的程序都只需运转一次就可以解答一个以上的问题。换句话说，每一个问题有它自己的一个输入卡片组，而这些卡片组叠加在一起就形成了这个程序组合式输入卡片组。

在描述输入数据格式时，也同时包括FORTRAN格式的资料，供熟悉FORTRAN语言的读者参考。每一个输入卡片组的第一张卡片包含供参考的题目标志。任何字母和数字符号都可放在这张卡片的头20列中。正常情况是在这一张卡片的下两列（第21—22列）包含用定点制输入的数目阶数的信息。我们要提醒读者的是定点数在它的字段上通常要右边对齐。

其余的输入卡片根据不同程序而变化。可是，对于用矩阵形式和以多项式形式输入信息也有一些需要共同遵循的格式规则。让我们分别研究这两种不同的输入形式。

1.2—1 矩阵数据 本书描述的程序中，仅仅考虑了两种类型的矩阵：方阵和列向量。方阵的元素通常都是一次读一行，就像它们原始数组那样。所有数字都用浮点制放在十列字段上。如果矩阵的维数大于8，则元素继续放入下一张卡片。下一行的元素又要从一张新卡片开始。因此，如果 $N \leq 8$ 时，只需 N 张卡片就可输入一个矩阵。然而，若 $8 < N \leq 10$ ，则需要 $2N$ 张卡片。例如，

假设输入 3×3 阶矩阵

$$A = \begin{bmatrix} 3 & 0 & 1 \\ -1 & 2 & 0 \\ 4 & 1.2 & 3 \end{bmatrix}$$

那么输入卡片的形式如表 1.2—1 所示。要注意小数点一定要穿孔，因为采用浮点制。

表 1.2—1 3×3 阶矩阵输入卡片

卡号	列号	5	10	15	20	25	30
1	3	• 0	0	• 0	1	• 0	
2	- 1	• 0	2	• 0	0	• 0	
3	4	• 0	1	• 2	3	• 0	

如果是列向量，向量的元素是按列排列的形式读进去的，这样可以使输入卡片的数目最少。换句话说，读各元素时就好像它是个行向量一样。如果向量维数 N 小于或等于 8，只需一张卡片就可以输入这个向量。如果 $8 < N \leq 10$ ，则需要 2 张卡片。为简化讨论，在第二章和第三章描述输入格式时，已经假定 $N \leq 8$ 。当 $N > 8$ 时，只需要将卡片数目加倍就可以表达任何向量和方阵了。

1.2—2 多项式数据 多项式有两种不同的输入格式。所有采用多项式输入的程序都允许使用其中任何一种格式输入数据。既可以读入它的各项系数，也可以读入它的因式。这两种格式分别称为 P 型和 F 型。

如果选用 P 型，那么多项式系数就以浮点制，10 列字段的格式输入，好像是矩阵的元素一样。常数项放在最前，最高次项的系数假定为 1。虽然这个系数设置为 1 而且不要输入，但还是把它读进去了。要注意的是如果多项式次数等于 8 就有必要增加一

张空白卡片。换句话说，如果要读一个 8 次多项式，前面 8 个数是从第一张卡片 8 个 10 列字段读进的， s^8 的系数即算是 1，也要把它放在下一张卡片上（不要穿孔，让它空着——译者注）。

如果要用 F 型，即多项式的因式来输入多项式，那么一个因式要用一张卡片。因子的实部放在头 10 列，而虚部放在下一个 10 列。如果因子处在左半平面，那么它的实部用正数。共轭复根只需要一张卡片就可以了（虚部总是正的），程序本身可以提供它的共轭复数。

为了说明采用哪一种多项式型式，在每一个多项式数据输入卡片前面要放一张控制卡片，字母 P 或 F 放在这张卡片的第一列以表明用的是哪一种型式。多项式次数用定点制放在下两列。考虑下面的三次多项式：

$$P(s) = 5 + 9s + 5s^2 + s^3 = (s+1)[(s+2)^2 + 1]$$

这一多项式用 P 型的输入卡片组示于表 1.2—2a，而用 F 型输入的则由表 1.2—2b 表示。注意， s^3 的系数是 1，而且不要打在输入卡上。

表 1.2—2 多项式的输入卡片组：(a) P 型，(b) F 型

(a)

卡号	列号	5	10	15	20	25	30
1	P	8					
2	5	0	9	0	5	0	

(b)

卡号	列号	5	10	15	20	25	30
1	F	8					
2	1	0					
3	2	0	1	0			

1.3 输出格式

所有程序的输出结果本身就是很清楚的。这里只需要作一点说明，以便弄清楚个别可能引起混淆的特殊因素。在每一个程序输出的开头，都要打出每个用户输入的题目标志和程序的名称以供参考。同样也会把输入数据打印出来，最后才是程序真正的输出结果。如果输出有好几部分，那么题目标志的文字在每一部分之前都会重复打印出来。在第二章和第三章讨论的某些例题的实际的程序输出，由于纸张尺寸的限制，对输出作了某些必要的修改和压缩，然而其基本内容和性质并不改变。建议读者准备一组输入数据，对所举例题再运算一遍。

在程序输出中，方阵通常都是用横行竖列的形式打印出来。而列向量则像它输入时一样以其转置的形式横着打印。

不管多项式输入时是采用哪一种形式，它的因式分解形式和非因式分解形式都会打印出来。它的系数是把常数项放在最前，然后以升幂的形式打出。所有因子都以其原来形式列出，即负实部表示根在左半平面。读者要注意，因式的输入格式和它列出方式之间有一个符号的变化。

第二章 状态变量程序

2.1 引言

在这一章中，我们讨论一组用于分析和设计线性控制系统的十个程序，控制系统的状态变量表达式是

$$\begin{aligned}\dot{\underline{X}}(t) &= \underline{A}\underline{X}(t) + \underline{b}u(t) \\ u(t) &= K[r(t) - \underline{k}^T \underline{X}(t)] \\ y(t) &= \underline{c}^T \underline{X}(t)\end{aligned}$$

2.2节讨论基本的矩阵(BASMAT)程序，它用于计算方阵 $\underline{A}$ 的行列式、逆矩阵、特征多项式和特征根。它还可以用来计算预解阵 $(s\underline{I} - \underline{A})^{-1}$ 和状态转移矩阵 $\exp(\underline{A}t)$ 。

2.3节和2.4节分别阐述有理式的时间响应(RTRESP)程序和图示时间响应(GTRESP)程序，它们都用于求解上述线性反馈控制系统的时间响应。前者给出时间响应的封闭形式表达式，但它要求输入函数 $r(t)$ 的拉氏变换为有理式的形式，而且系统和其输入组合的特征根没有重根。后者可以用来求解系统对任意形式输入的时间响应，并给出响应的图示曲线。设 $K=0$ ，则这两个程序都可以用于研究开环系统；设 $r(t)=0$ ，则它们还可以用于研究自由系统。

系统对参数值变化的灵敏度是分析和设计线性系统的基本问题之一。灵敏度分析(SENSIT)程序可以提供一些关于灵敏