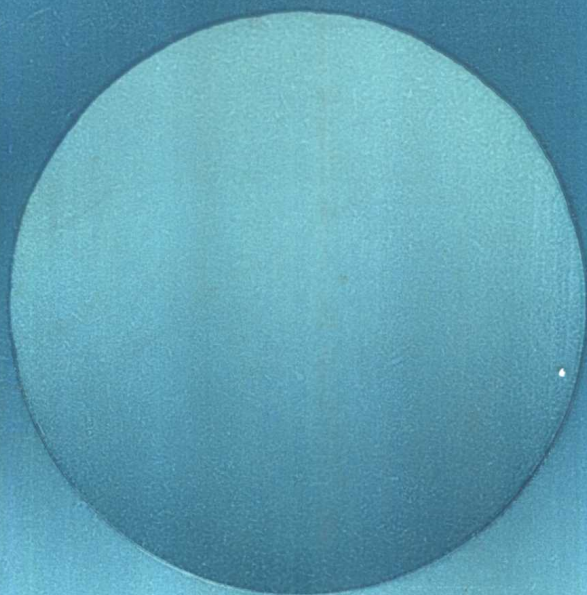


● 研 究 生 用 书 ● LINEAR MULTIPLE VARIABLE
SYSTEMS

华中理工大学出版社



庞富胜 等

线性多变量系统

TP271
0037

967103

TP271
0037

线性多变量系统

庞富胜 等

华中理工大学出版社

·研究生用书·

线性多变量系统

庞富胜 罗宗虔 胡亚光 涂健

责任编辑 余健棠

华中理工大学出版社出版发行

(武昌喻家山)

新华书店湖北发行所经销

华中理工大学出版社沔阳印刷厂印刷

开本: 850×1168 1/32 印张: 17.875 插页: 2 字数: 445 000

1992年6月第1版 1992年6月第1次印刷

印数: 1—1 000

ISBN 7-5609-0628-1/TP·62

定价: 4.85元

(鄂)新登字第10号

内 容 简 介

本书比较全面地介绍了目前流行的线性多变量系统四种描述方法,讨论了系统的稳定性、能控性和能观性,论述了系统的零、极点配置、状态观测器和跟踪系统,引入了频率法。

本书适用于自动控制、工业电气自动化等有关专业的研究生、本科高年级大学生,亦可供有关专业的教师和从事控制工程的工程师和科学技术工作者参考。

ABSTRACT

The book introduced four most popular methods representing linear multivariable systems, represented systems stability, controllability and observability, discussed contents about the zero-poles assignment, state-observers and trajectory tracking of systems, introduced the frequency-domain methods for systems analysis and synthesis.

The book is most suitable for graduate students and senior students in the fields of Automation Control and Industry Electrical Automation. Teachers, engineers and researchers in the fields of control engineering can also use it as reference book.

“研究生用书”总序

研究生教材建设是提高研究生教学质量的重要环节，是具有战略性的基本建设。各门课程必须有高质量的教材，才能使学生学习掌握各门学科的坚实的基础理论和系统的专门知识，为从事科学研究工作或独立担负专门技术工作打下良好的基础。

我校各专业自1978年招收研究生以来，组织了一批技术水平较高、教学经验丰富的教师，先后编写了公共课、学位课所需的多种教材和教学用书。有的教材和教学用书已正式出版发行，更多的则采用讲义的形式逐年印发。这些讲义经过任课教师多年教学实践，不断修改、补充、完善，已达到出书的要求。因此，我校决定出版“研究生用书”，以满足本校各专业研究生教学需要，并与校外单位交流，征求有关专家学者和读者的意见，以促进我校研究生教材建设工作，提高教学质量。

“研究生用书”以公共课和若干门学位课教材为主，还有教学参考书和学术专著，涉及的面较广，数量较多，准备在今后数年内分批出版。编写“研究生用书”总的要求是从研究生的教学需要出发，根据各门课程在教学过程中的地位和作用，在内容上求新、求深、求精，每本教材均应包括本门课程的基本内容，使学生能掌握必需的基础理论和专门知识；学位课教材还应接触该学科的发展前沿，反映国内外的最新研究成果，以

适应目前科学技术知识更新很快的形势；学术专著则应充分反映作者的科研硕果和学术水平，阐述自己的学术见解。在结构和阐述方法上，应条理清楚，论证严谨，文字简炼，符合人们的认识规律。总之，要力求使“研究生用书”具备科学性、系统性和先进性。

我们的主观愿望虽然希望“研究生用书”的质量尽可能高一些，但由于研究生的培养工作为时尚短，水平和经验都不够，其中缺点、错误在所难免，尚望校内外专家学者及读者不吝指教，我们将非常感谢。

华中理工大学研究生院院长

黄树槐

1989.11.

前 言

线性系统，无论是在工程实践上 或是在理论上，都是人们研究得最早、最广泛、最深入的一类系统。多少年来，它引起众多工程师、物理学和数学工作者的浓厚兴趣。原因是：客观上这类可以作线性处理的系统在生产和科学实验中到处都可接触到；主观上这类系统最容易使用现有的数学工具进行处理。研究从单输入单输出（单变量）系统开始，逐步发展到多输入多输出（多变量）系统（包括大系统）；从有限维系统到无限维系统；从工程系统到社会经济系统。今天，线性系统理论已成为控制理论、通信理论、网络理论的基础。它也是社会经济系统理论和一般系统理论的基础。因此它是信息与控制领域的大学生、研究生、工程师和科技工作者必备的一门知识。从不同角度考察线性系统，用多种数学工具来处理问题，就形成了不同的方法。它们虽各有特点和功用，但实质上是统一的，形式上是可以互相转换的。目前比较全面系统而又篇幅不大的介绍线性系统理论的教材和教学参考书尚不多见。本书正是从这点出发为自动化类专业研究生和本科高年级学生编写的。它亦可作为教师和从事这方面工作的工程师和科技工作者的参考书。

本书主要研究有限维线性多变量系统。在书中，对定常系统和时变系统、连续系统和离散系统均进行讨论，并以状态空间法为主穿插介绍其他方法。这样做是想使学生对线性多变量系统理论有一个总体的认识。考虑到读者已有了相当的数学和自动控制理论的基础知识，并且有了一定的自动控制工程实践经验，也受到篇幅的限制，故书中没有过多的工程实例。为了培养学生由具体工程实践到理论抽象的思维能力和思维能力，讨论问题时力求物理概念清晰，数学逻辑推理严密。总目的是使学生通过本课程的学习，

在理论上、在分析综合问题的思想方法上、在解决实际问题的能力上都能得到较大的提高，为以后学习最佳控制、自适应控制和数学模型辨识等后续课程打下坚实的基础。

本书的前身是编者1981年以来给华中理工大学研究生讲授线性系统理论所用的、多次修改过的讲义。以此为基础，参照全国高等学校工业电气自动化专业教学指导委员会控制理论组1987年秦皇岛会议上制订的教学基本要求编成初稿。1989年，经该会组织专家评审，此书稿被推荐为研究生教材出版。

本书适于40~60学时使用。讲授时可视具体情况对内容作适当的取舍，有些章节可作为自学阅读的内容。

全书共分八章，第一、二、三、四、五章及第七章的附录由庞富胜编写，第六章由罗宗虔编写，第七章由胡亚光编写，第八章由涂健编写，由庞富胜进行全书统编。

限于我们的水平，书中可能存在着不足和错误，敬请读者批评指正。

编者



作者简介

庞富胜，1961年毕业于华中工学院无线电系自动控制专业并留校任教，现为华中理工大学副教授。曾任控制理论教研室、工业自动化教研室副主任，现任控制工程研究室主任，湖北省暨武汉市自动化学会理事。长期从事控制理论及应用的教学和科研，发表论文数篇，参加研究项目——集成电路激光封装焊机获大规模集成电路设备奖和全国科技大会奖，负责研究项目——复膜装置微机控制获机电部一等奖、国家科技进步三等奖。

5. 6/10

● **研究生用书**

● 责任编辑：余健棠

● 封面设计：俞纁丽

陈建纲

● 华中理工大学出版社

目 录

第一章 绪论	(1)
§ 1.1 线性系统理论发展简史.....	(1)
§ 1.2 线性多变量系统的特点.....	(4)
§ 1.3 本课程的主要内容和要求.....	(6)
参考文献	(7)
第二章 线性系统的数学描述	(9)
§ 2.1 系统的状态空间描述.....	(9)
2.1.1 状态空间模型.....	(10)
2.1.2 解空间.....	(14)
2.1.3 齐次方程的解——状态转移矩阵.....	(16)
2.1.4 非齐次方程的解.....	(19)
2.1.5 系统的输出——脉冲响应阵.....	(20)
2.1.6 定常系统的解.....	(22)
2.1.7 系统的振型分解.....	(23)
2.1.8 应用举例.....	(27)
§ 2.2 传递函数阵和矩阵分式描述.....	(32)
2.2.1 传递函数阵描述.....	(32)
2.2.2 状态空间描述到传递函数阵描述的转换.....	(34)
2.2.3 传递函数阵的史密斯-麦克米伦形.....	(38)
2.2.4 传递函数阵的逆.....	(44)
2.2.5 矩阵分式描述.....	(46)
2.2.6 传递函数阵的极点和零点.....	(51)
§ 2.3 多项式矩阵描述.....	(53)
2.3.1 多项式矩阵描述.....	(53)
2.3.2 多项式矩阵方程的解空间.....	(57)
2.3.3 基矩阵的求法.....	(58)

2.3.4	多项式矩阵描述和状态空间描述的等价	(61)
2.3.5	系统的极点和零点	(63)
2.3.6	最小阶系统	(68)
§ 2.4	系统等价	(70)
2.4.1	定常系统状态空间描述下的等价	(70)
2.4.2	严格系统等价	(72)
2.4.3	几个特殊的等价问题	(79)
2.4.4	时变系统的等价	(86)
§ 2.5	离散时间系统的描述	(88)
2.5.1	线性定常离散系统	(89)
2.5.2	离散系统的传递函数阵和多项式矩阵	(94)
2.5.3	离散系统模型的获得	(95)
2.5.4	时变离散系统	(104)
§ 2.6	组合系统的数学描述	(107)
2.6.1	组合系统的状态空间描述和脉冲响应阵	(108)
2.6.2	定常组合系统的系统矩阵和传递函数阵	(112)
2.6.3	适定性问题	(116)
§ 2.7	伴随系统和对偶系统	(119)
2.7.1	伴随方程	(120)
2.7.2	时变伴随系统和对偶系统	(122)
2.7.3	定常对偶系统	(125)
习 题		(127)
参考文献		(130)
第三章	线性系统的稳定性	(132)
§ 3.1	李亚普诺夫稳定性理论	(133)
3.1.1	平衡状态的稳定性	(134)
3.1.2	无扰运动的稳定性	(138)
3.1.3	定号函数	(139)
3.1.4	李亚普诺夫稳定性基本定理	(142)
§ 3.2	线性定常系统的零输入稳定性	(150)
3.2.1	李亚普诺夫法	(151)

3·2·2	李亚普诺夫函数的求法	(156)
§ 3·3	劳斯法和霍尔维茨法	(162)
3·3·1	劳斯法	(162)
3·3·2	霍尔维茨法	(167)
§ 3·4	线性时变系统的稳定性	(168)
3·4·1	时变系统稳定性的特点	(169)
3·4·2	使用 $\Phi(t, t_0)$ 的稳定性判据	(169)
3·4·3	李亚普诺夫法	(172)
§ 3·5	有界输入有界输出稳定性	(175)
3·5·1	BIBO稳定性定义	(175)
3·5·2	时变系统BIBO稳定性判据	(176)
3·5·3	定常系统BIBO稳定性判据	(178)
3·5·4	BIBS稳定性	(179)
§ 3·6	离散系统的稳定性	(180)
3·6·1	离散系统的稳定性定义	(180)
3·6·2	有界输入有界输出稳定性的研究	(181)
3·6·3	零输入稳定性的李亚普诺夫判据	(182)
3·6·4	朱利-劳斯-霍尔维茨判据	(183)
习 题		(187)
参考文献		(190)
第四章	线性系统的能控性和能观性	(192)
§ 4·1	线性系统的能控性	(192)
4·1·1	能控状态	(193)
4·1·2	系统的状态能控性	(195)
4·1·3	时间函数向量的线性无关性	(197)
4·1·4	能控性的判别	(199)
4·1·5	定常系统的状态能控性	(202)
4·1·6	线性系统的能达性	(205)
§ 4·2	线性系统的状态能观性	(206)
4·2·1	能观状态和不能观状态	(206)
4·2·2	系统的状态能观性	(208)

4.2.3	系统状态能观性的判别	(209)
4.2.4	定常系统的状态能观性	(212)
4.2.5	系统的状态可重构性	(214)
§ 4.3	输出能控性和输入能观性	(215)
4.3.1	点-点输出能控性	(215)
4.3.2	输出函数能控性	(218)
4.3.3	输入函数能观性	(221)
§ 4.4	对偶系统能控性和能观性的对偶	(222)
4.4.1	时变伴随系统能控性与能观性的对偶	(223)
4.4.2	定常对偶系统能控性与能观性的对偶	(226)
4.4.3	其他性质的对偶	(227)
§ 4.5	状态空间的结构	(228)
4.5.1	伴随(共轭)变换	(228)
4.5.2	能控性问题的讨论	(231)
4.5.3	能控子空间和状态空间的能控性分解	(233)
4.5.4	不能观子空间和状态空间的能观性分解	(235)
4.5.5	状态空间的能控能观性分解	(238)
4.5.6	定常系统的状态空间结构	(239)
§ 4.6	定常系统的结构分解	(243)
4.6.1	能控与不能控分解	(244)
4.6.2	能观与不能观分解	(248)
4.6.3	定常系统的标准分解	(252)
4.6.4	能控性和能观性的频域判据	(259)
§ 4.7	离散系统的能控性和能观性	(265)
4.7.1	能控性、能达性	(265)
4.7.2	能观性、能确定性	(268)
4.7.3	对偶性	(270)
习 题		(271)
参考文献		(274)
第五章	系统的标准形和实现	(275)
§ 5.1	单输入单输出系统的标准形	(276)

5.1.1	能控标准形	(276)
5.1.2	能观标准形	(281)
§ 5.2	多输入多输出系统的标准形	(284)
5.2.1	龙伯格能控相伴形	(284)
5.2.2	龙伯格能观相伴形	(293)
5.2.3	块式相伴形	(294)
5.2.4	块三角形相伴形	(299)
5.2.5	控制器标准形	(303)
§ 5.3	时域标准形与频域描述	(304)
5.3.1	单变量系统 $G(s)$ 的求法	(305)
5.3.2	多变量系统 $G(s)$ 的求法	(306)
§ 5.4	线性系统的实现	(312)
5.4.1	单变量系统的实现	(313)
5.4.2	多变量系统的实现	(318)
5.4.3	脉冲响应阵的实现	(328)
§ 5.5	传递函数阵的最小实现	(330)
5.5.1	最小实现的性质	(330)
5.5.2	最小实现的求法	(334)
§ 5.6	基于矩阵分式的实现	(336)
5.6.1	列(行)既约矩阵	(336)
5.6.2	基于右矩阵分式的能控形实现	(340)
5.6.3	基于左矩阵分式的能观形实现	(344)
习 题		(346)
参考文献		(348)
第六章	多变量反馈控制系统的设计	(348)
§ 6.1	多变量反馈控制系统	(350)
6.1.1	多变量反馈控制系统的几种形式	(350)
6.1.2	反馈对能控性能观性的影响	(352)
§ 6.2	状态反馈与闭环系统极点配置	(354)
6.2.1	状态反馈配置极点的状态空间方法	(355)
6.2.2	状态反馈极点配置问题的几点讨论	(365)

§ 6.3	输出反馈与极点配置	(371)
6.3.1	输出反馈的能稳定和任意配置极点的条件	(372)
6.3.2	极点配置方程和几个有关定理	(374)
6.3.3	输出反馈极点配置的设计方法	(376)
§ 6.4	全状态观测器的设计	(380)
6.4.1	全状态观测器	(381)
6.4.2	带状态观测器的闭环系统	(383)
6.4.3	状态观测器存在的条件及设计方法	(385)
§ 6.5	降阶观测器	(391)
§ 6.6	带动态补偿器的输出反馈	(398)
6.6.1	用全状态观测器组成动态补偿器的设计方法	(399)
6.6.2	用最小阶观测器构成动态补偿器的设计方法	(401)
6.6.3	动态补偿器的并矢设计方法	(401)
§ 6.7	线性状态反馈极点配置的传递函数方法	(403)
§ 6.8	动态补偿器设计的传递函数方法	(407)
6.8.1	只带观测器的动态补偿器的设计	(407)
6.8.2	一般动态补偿器的设计	(413)
§ 6.9	解耦控制	(418)
6.9.1	状态反馈解耦	(418)
6.9.2	输出反馈解耦	(426)
6.9.3	预补偿状态反馈解耦	(434)
6.9.4	预补偿输出反馈解耦	(439)
6.9.5	输出反馈解耦的矩阵分式方法	(443)
	习 题	(447)
	参考文献	(449)
第七章	多变量伺服系统设计	(451)
§ 7.1	伺服系统的内模原理	(452)
§ 7.2	伺服系统的数学描述	(456)
7.2.1	带有积分器的调节系统	(459)
7.2.2	带有参考模型的伺服系统	(464)
§ 7.3	内模控制的基本结构及性质	(470)

7·3·1	内模控制的基本结构	(470)
7·3·2	内模控制结构的基本性质	(473)
§ 7·4	带有内模的伺服系统设计	(477)
7·4·1	选择控制结构	(477)
7·4·2	问题的数学表达	(479)
7·4·3	控制矩阵的计算	(487)
§ 7·5	应用举例	(488)
附录	离散系统的动态规划量优原理	(492)
习 题		(498)
参考文献		(498)
第八章	多变量控制系统的频域理论与设计	(500)
§ 8·1	线性多变量反馈系统的频域描述	(501)
§ 8·2	系统的稳定性	(503)
8·2·1	稳定性的基本定理	(503)
8·2·2	稳定性的频率响应判据	(507)
§ 8·3	对角优势	(509)
8·3·1	对角优势及罗森布鲁克稳定性定理	(509)
8·3·2	图形判据	(513)
8·3·3	奥斯托斯基定理	(516)
8·3·4	关于乃氏周线上 s 的取值范围	(519)
§ 8·4	对角优势的实现	(522)
8·4·1	试探法	(523)
8·4·2	伪对角化法(一)	(525)
8·4·3	伪对角化法(二)	(528)
8·4·4	函数最小化算法	(534)
8·4·5	计算实例	(535)
§ 8·5	INA法设计步骤	(536)
§ 8·6	多变量控制系统设计的特征轨迹法	(539)
8·6·1	系统结构及基本关系式	(539)
8·6·2	系统性能分析	(542)
8·6·3	设计方法和步骤	(547)