

线性控制系统

计算机辅助分析与设计方法

〔美〕 M. 詹姆希迪 等著

航空工业出版社

TP273
126

TP3
26

线性控制系统

计算机辅助分析与设计方法

〔美〕 M. 詹姆希迪 等 著

沈春林 宋振璞
沈正华 耿 征 编 译

航空工业出版社

1989

内 容 简 介

本书系线性控制系统的计算机辅助分析和设计的入门书。内容分三大部分：第一部分是数学基础，介绍线性代数，拉普拉斯变换和Z变换等基本知识；第二部分介绍系统建模，大系统模型简化，状态方程的解，系统稳定性、能控性和能观性等；第三部分是系统设计。包括带校正的线性控制系统的设计，反馈控制和状态估计，参数最优及多变量控制系统。

上述内容配有计算机实用程序百余个，可在个人机上演习用。书末列出了全部参考程序，可供选用。

本书可作自动控制与计算机系高年级学生的参考书和仪器、仪表专业及机械控制工程专业研究生的教材。对从事计算机应用工作的工程师和科技人员及高等院校教师亦是一本有用的参考书。

线 性 控 制 系 统

计算机辅助分析与设计方法

〔美〕M.詹姆希迪 等著

沈春林 宋振璞 编译
沈正华 耿 征

航空工业出版社出版发行

(北京市和平里小关东里14号)

全国各地新华书店经售

航空工业出版社印刷厂印刷

1989年5月第1版

1989年5月第1次印刷

787×1092毫米1/32

印张：31.4

印数：1—3000

字数：740千字

ISBN 7-80046-059-2/TP·006

定价：10.40元

前 言

本书旨在介绍经典的和现代的控制系统建模,分析和设计。原稿中的大部分内容取材于新墨西哥大学电气和计算机工程系开设的“经典和现代控制”及“线性系统”两门课程的讲稿。书中三个主要部分是:控制、系统和计算机辅助分析与设计。

本书是作者在不同的地方——伊朗的希拉兹大学(Shiraz)、美国的IBM托马斯·沃森研究中心和新墨西哥州立大学——经过几年时间,大家共同努力,逐渐发展形成的专著,其意图是把经典控制和(教学)计划中规定的研究生课(如最优控制)之间架起桥梁。用时域法和频域法描述连续时间线性系统,或离散时间线性系统的知识,为学习本书的必备基础。书中内容适合电气工程系的高年级大学生及第一学年的研究生学习。虽然在原稿中列写出100个以上用BASIC语言写的子程序及驱动程序,并没有试图讲解计算机程序之意。所有计算机程序原来是为HP-9845A型或B型台式计算机编写的。现在这些程序包已集中在一起组成了两个互相联接的交互式软件包,称为“FREDO₉”及“TIMDO₉”。它们分别用来处理系统的频域和时域的分析 and 设计问题。这些软件包,既可用于个人计算机亦可用于其他系统机。例如,IBM/PC,HP-2816,Apple II e和SUN工作站。若要了解有关软件更多的情况,有兴趣的读者可直接寄信给第一作者。

本书的详细安排,参看第1.5节的说明。书中章节构成如下,每章的章首有一节引论,接着是理论研究或数学描述,随后用几个实例加以阐明。有时将某些重要的方法概括为算

法。用扩展BASIC程序语言编写不同系统和控制概念的程序，把相应的主程序或驱动程序列写于书中。在这些程序中，凡调用一次的子程序，将子程序和主程序列写在一起。凡在程序中调用多于一次的子程序和所有的实用子程序列写于附录A。全部程序和子程序的索引列在书末。每章的结束都有练习题和参考文献。

第一章是本书的引论。在这章里给出了系统的定义，介绍了系统的主要分类。第二章，第三章复习了线性代数和变换理论（拉普拉斯变换和Z变换）。对于熟悉这些知识的读者可以跳过这两章而无损于连贯性。第四章介绍两种常用的系统建模方法，即用传递函数（频域法）和状态空间（时域法）表达式。还讨论了状态转换和非线性系统的线性化等其它内容。

第五章讨论了线性时不变的大系统模型降阶问题，讲解了摄动法（奇异摄动和正则摄动）和集结法（时域和频域）两种方法。第六章讨论了连续时间系统和离散时间系统的状态方程的解，并考虑到时变和时不变两种情况。

第七章专门研究系统的稳定性。本章谈到经典控制的稳定性概念，例如，劳斯-古尔维茨（Routh-Hurwitz）判据，朱里-布兰查特（Jury-Blanchard）判据以及根轨迹法，伯德图、奈奎斯特图和奈奎斯特判据等。本章还介绍了现代控制理论的稳定性概念，例如零输入和零状态稳定性、李亚普诺夫法和圆判据等。第八章讨论了能控性和能观性的重要概念，并研究了不完全能控（不完全能观）系统，按规范型分解为能控的（能观的）和不能控（不能观）的子系统。系统的最小实现和对偶系统问题也在本章中作了介绍。

本书的后面三章，涉及线性系统设计，包括单输入单输

出(SISO)系统或多输入多输出(MIMO)系统的设计。第九章介绍了SISO线性控制系统的各种串联和反馈补偿器的设计。给出许多详细设计例子说明如何借助于通用计算机程序,用绘制根轨迹曲线和频率响应曲线的方法进行系统设计。同样举例说明由计算机辅助设计SISO系统中的各种反馈补偿器。

第十章讨论了用现代控制系统的概念设计MIMO线性系统,如与状态估计有关的极点配置法,并介绍了用全阶或降阶两种方式来设计状态估计器(观察器)等。

第十一章涉及到用系统优化的方法设计SISO线性系统,在对象参数变化的条件下,利用泛函极小化原理来设计SISO系统的控制器。为此,不论是连续时间系统还是离散时间系统都使用了帕斯威尔(Parseval)定理。总之,第十一章讨论的是通过参数优化的方法来设计SISO线性系统。

使用本教科书有两种方案:经典控制和现代系统工程。对以上两种方案可按下面给出的章节次序进行教学。

经典控制(高年级课程):第1.3节,4.2,4.3,4.5,7.4,7.5和7.6节以及第9章第11章。

线性系统(第一年的研究生课程):第1.2节,3.6至3.9节,4.2至4.4,4.6,4.7节,第6章,第7.2,7.3和7.9节,第8章,第10章,第5.3和5.4节。

本书原稿按上述两种方案在新墨西哥大学电气和计算机工程系使用过。若本教材连同软件包FREDOM_g和TIMDOM_g一起使用对读者更为有益。

作者感谢为本书作过各种贡献的人们。我们要感谢新墨西哥大学工学院院长杰丽·梅(Jerry·May)电气和计算机工程系主任彼得·多拉托(Peter Dorato),感谢他们的领

导和不断的支持。我们要感谢曼彻斯特理工学院马德·辛教授 (Madan Singk), 感谢他审阅手稿和提出许多有益的建议, 并感谢辛教授以珀格蒙 (Pergamon) 国际丛书一系统和控制丛书编者的名义建议我写这本书。我们要感谢许多已毕业的学生, 他们曾经以各种方式为本书作出贡献。我们特别感谢堤-贝罗奇 (D. Behroozi), 常 (R. W. Chang), 蒋 (S. K. Chiang), 依斯利尔 (G. Eisler), 吉利 (V. Gieri), 马苏卡娃 (M. Mashkawa), 莫利尔 (R. Morel), 奥铁斯 (S. Otis), 欧文 (R. Owen), 汤 (P. E. Tang) 和伟尔科西 (J. Wilcoxon) 等, 感谢他们编写的部分源程序。

感谢格拉迪斯·埃里克生 (Gladys Ericksen) 夫人不知疲倦地坚持在DEC11/780VAX计算机上为本书进行文字处理。

编译者序

本书作者之一，穆罕默德·詹姆希迪 (Mohammad Jamshidi)，已为我国读者所熟悉。他的《大系统建模与控制》一书，在1986年已由科学出版社出版。深得我国控制界同行的欢迎。本书——《线性控制系统——计算机辅助分析与设计方法》是它的另一本有影响的著作。几年前詹姆希迪在新墨西哥州立大学电气与计算机工程系开设《经典控制与现代控制》，《控制系统的计算机辅助设计》，《大系统建模与控制》等课程。当时，我作为访问学者在该校结识了詹姆希迪教授。感到《控制系统的计算机辅助设计》讲义不论作为教材或科技人员参考书都是有实用价值的，值得介绍给中国读者。1987年5月，詹姆希迪教授将新出版的该书样本赠寄于我，我们又按新书校译。在詹姆希迪教授建议下，开展了多变量控制系统的计算机辅助设计研究。为此，将此内容增补到本书中，本书改为编译出版。

为了更好的帮助中国读者使用本书，詹姆希迪教授还寄来了可在IBM/PC及其兼容机上使用的FREEDOM/PC和TIMDOM/PC全部软件盘片及其使用手册，同时寄来了为《大系统建模与控制》一书使用的LSSPAK/PC全部软件盘片及其使用手册。这些软件已流行于美国、欧洲等地。另外，我们研制了可在IBM/PC机上使用的多变量控制系统计算机辅助设计软件包MCDP (Multivariable Control System Design Package)。这些软件包对读者的学习和科学研究都是非常有用的。有兴趣的读者可与南京航空学院自动控制系联系。

本书的编译出版，得到有关领导和同志的热心帮助，我

们十分感谢航空部机载设备局杨曾复同志对本书编译出版的鼓励和关心。感谢628所金允汶和丛选超两位同志的热情支持，他们对原稿安排和处理上提出了有益的建议和帮助。我们要特别感谢姜育义同志的辛勤劳动为我们的稿件作了许多修饰和剪辑工作，同时要感谢秦海波同志为第十二章内容编制了计算程序。由于以上同志们的积极努力和出版社印刷厂的配合才使本书在较短时间内能够顺利出版。

本书的第一、二、十章由沈正华译，第三、六、十一章由宋振璞译，第四、五、八章由耿征译，第七、九和十二章由沈春林译和编。由于时间匆匆，会有不当之处，望读者指正。

沈春林

1987.12

目 录

第一章 预备知识	(1)
1.1 引言	(1)
1.2 什么是系统	(1)
1.3 标记	(2)
1.3.1 数字编号和相互参照	(2)
1.3.2 约定	(2)
1.3.3 缩略语和记号	(3)
1.4 系统的分类	(4)
1.4.1 集中参数系统和分布参数系统	(4)
1.4.2 确定性系统和随机系统	(5)
1.4.3 连续时间系统和离散时间系统	(5)
1.4.4 线性系统 and 非线性系统	(5)
1.4.5 时不变系统和时变系统	(5)
1.5 全书概貌	(6)

第一部分 数学基础

第二章 线性代数	(8)
2.1 引言	(8)
2.2 域和向量空间	(8)
2.3 线性无关和秩	(10)
2.4 基底和维数	(15)
2.5 内积和范数	(18)
2.6 特征值和特征向量	(27)
2.7 矩阵对角化	(35)
2.8 广义特征向量和约当标准型	(37)
2.9 方阵的函数	(44)

2.10	凯勒-哈密尔顿定理的应用	(47)
2.11	二次型	(55)
第三章	拉普拉斯变换和Z变换	(67)
3.1	引言	(67)
3.2	拉普拉斯变换的定义	(68)
3.3	拉普拉斯变换的性质	(70)
3.4	拉普拉斯反变换	(78)
3.4.1	用部分分式展开法求拉普拉斯反变换	(78)
3.4.2	拉普拉斯数值反变换	(105)
3.5	用拉普拉斯变换解微分方程	(117)
3.6	Z变换的定义	(118)
3.7	Z变换的性质	(122)
3.8	Z反变换	(123)
3.8.1	幂级数方法	(124)
3.8.2	留数方法	(124)
3.8.3	部分分式展开法	(126)
3.9	用Z变换解差分方程	(142)

第二部分 分析

第四章	系统建模	(151)
4.1	引言	(151)
4.2	建立系统模型	(151)
4.3	状态的概念	(154)
4.4	线性系统的状态空间模型	(156)
4.4.1	状态方程和输出方程	(156)
4.4.2	模拟图	(161)
4.4.3	状态方程的标准形	(164)
4.4.3.1	可控相伴形	(164)

4.4.3.2 可观相伴形	(166)
4.5 状态变换	(175)
4.6 传递函数	(186)
4.6.1 连续系统传递函数	(186)
4.6.2 离散系统传递函数	(189)
4.6.3 SISO闭环系统传递函数	(195)
4.6.4 信号流图	(203)
4.7 非线性系统线性化	(207)
4.7.1 相对于向量的微分	(207)
4.7.2 工作点附近的线性化	(208)
第五章 大系统模型简化	(215)
5.1 引言	(215)
5.2 摄动方法	(219)
5.2.1 正则摄动	(219)
5.2.2 奇异摄动	(223)
5.2.2.1 边界层校正	(224)
5.2.2.2 时标分离	(225)
5.3 集结方法——时域法	(236)
5.3.1 精确集结	(237)
5.3.2 模态集结法	(244)
5.4 集结方法——频域法	(251)
5.4.1 矩量匹配法	(251)
5.4.2 帕德 (Padé) 近似法	(254)
5.4.3 混合法和多变量系统	(262)
5.4.3.1 帕德—模态法	(262)
5.4.3.2 矩阵连分式法	(264)
第六章 状态方程的解	(275)
6.1 引言	(275)
6.2 齐次情况——转移矩阵	(277)

6.2.1	连续时间系统	(277)
6.2.2	离散时间系统	(279)
6.3	转移矩阵的性质	(281)
6.4	转移矩阵的计算	(282)
6.4.1	时不变连续系统	(282)
6.4.1.1	特征值方法	(283)
6.4.1.2	凯勒-哈密尔顿方法	(283)
6.4.1.3	拉普拉斯变换法	(284)
6.4.2	时不变离散系统	(294)
6.4.2.1	特征值方法	(295)
6.4.2.2	凯勒-哈密尔顿方法	(295)
6.4.2.3	Z变换方法	(296)
6.4.3	时变情况的转移矩阵	(304)
6.5	预解矩阵	(306)
6.6	非齐次情况——全解	(321)
6.6.1	连续时间系统	(322)
6.6.2	冲激响应矩阵	(325)
6.6.3	离散时间系统	(343)
6.6.4	脉冲响应矩阵	(347)
6.7	伴随和对偶系统	(363)
第七章	系统稳定性	(377)
7.1	引言	(377)
7.2	稳定性概念及定义	(379)
7.2.1	零输入稳定性	(379)
7.2.2	零状态稳定性	(382)
7.3	稳定性判据	(383)
7.3.1	零输入稳定性	(383)
7.3.2	零状态稳定性	(399)
7.4	劳斯-古尔维茨稳定性判据	(404)

7.5 朱里-布兰查特 (Jury-Blanchard) 稳定性判据	(416)
7.6 根轨迹法	(434)
7.6.1 绘制根轨迹的基本规则	(435)
7.6.2 绘制根轨迹的计算机辅助方法	(442)
7.7 频率响应法	(461)
7.7.1 伯德图	(461)
7.7.2 相角裕度和幅值裕度	(470)
7.7.3 奈奎斯特图	(472)
7.7.3.1 奈奎斯特稳定判据	(474)
7.7.3.2 稳定裕度和条件稳定性	(482)
7.8 圆判据	(512)
7.9 李亚普诺夫方法	(520)
第八章 能控性和能观性	(544)
8.1 引言	(544)
8.2 函数族的线性独立	(545)
8.3 能控性	(549)
8.3.1 定义和例子	(549)
8.3.2 能控性的特性	(551)
8.4 能观性	(557)
8.4.1 定义和例子	(557)
8.4.2 能观性的特性	(559)
8.5 对偶性	(567)
8.6 状态空间的标准分解	(568)
8.6.1 能控部分的分解	(570)
8.6.2 线性时不变系统能观部分的分解	(579)
8.6.3 系统的标准分解	(587)
8.7 最小实现	(588)

第三部分 设计

第九章 带校正的线性控制系统的设计.....	(599)
9.1 概论	(599)
9.2 主导极点的假设	(600)
9.3 稳态误差和静态误差系数	(601)
9.3.1 稳态误差	(601)
9.3.2 静态误差系数	(602)
9.4 校正网络	(606)
9.4.1 超前网络	(606)
9.4.2 迟后网络	(608)
9.4.3 迟后—超前网络	(610)
9.5 性能指标	(611)
9.5.1 时间域性能指标	(612)
9.5.2 频率域性能指标	(618)
9.6 用根轨迹法进行设计	(657)
9.7 用伯德图和奈奎斯特图法进行设计	(666)
9.8 校正器选择的规律	(679)
9.8.1 超前校正和根轨迹图	(679)
9.8.2 迟后校正和根轨迹图	(680)
9.8.3 超前一迟后校正和根轨迹图	(681)
9.8.4 超前校正和频率响应图	(682)
9.8.5 迟后校正和频率响应图	(683)
9.8.6 超前一迟后校正和频率响应图	(684)
9.9 反馈校正	(684)
第十章 反馈控制与状态估计.....	(693)
10.1 引言.....	(693)
10.2 状态反馈和输出反馈.....	(694)

10.3	反馈对系统性能的影响	(696)
10.4	极点配置	(701)
10.4.1	以状态反馈配置极点	(702)
10.4.2	输出反馈的极点配置	(714)
10.5	状态估计——观测器	(715)
10.6	全维观测器	(718)
10.7	降维观测器	(722)
第十一章	参数最优设计	(734)
11.1	引言	(734)
11.2	性能指标	(734)
11.3	用Parseval理论的最优化	(737)
11.3.1	连续时间系统	(737)
11.3.2	离散时间系统	(741)
11.4	函数最优化技术	(743)
11.4.1	直接搜索法	(744)
11.4.2	变量测度法	(764)
11.4.3	自动约束法	(771)
11.5	最佳状态反馈设计	(787)
第十二章	多变量控制系统	(797)
12.1	平衡法模型降价	(798)
12.1.1	概述	(798)
12.1.2	连续系统降价方法	(798)
12.1.3	离散系统模型降价方法	(800)
12.1.4	程序清单及例题	(802)
12.2	特征结构配置法用于控制器设计	(828)
12.2.1	概述	(828)
12.2.2	状态反馈控制器设计	(828)
12.3	运用软件包“MCDP”进行控制系统分析、设计实例	(854)

12.3.1	系统的数学模型.....	(854)
12.3.2	开环系统分析.....	(856)
12.3.3	开环系统降价.....	(857)
12.3.4	控制器设计.....	(863)
附录		(871)