

系统与amp;控制丛书 C₆

Guang-Ren Duan 著

段广仁 于海华 吴爱国 张显 译

广义线性系统 分析与设计



科学出版社

系统与amp;控制丛书

广义线性系统分析与设计

Guang-Ren Duan 著

段广仁 于海华 吴爱国 张显 译

科学出版社

北 京

图字: 01-2011-3294 号

内 容 简 介

本书集中讨论了连续时间广义线性系统的分析与设计问题,对广义线性系统理论进行了一个相对系统性的介绍。系统分析部分包括广义系统的等价性、广义线性系统的解和稳定性、正则广义线性系统的结构特性以及广义线性系统的各种能控性和能观性;系统设计部分包括广义线性系统的正则化、动态阶配置和正常化、脉冲消除、极点配置与镇定、特征结构配置、最优控制和观测器设计等。

本书可作为控制理论与控制工程、系统工程、信息与计算科学以及相关工程与应用专业的研究生教材或教学参考书,也可供相关专业教学和科研人员、工程技术人员参考。

Translation from the English language edition:

Analysis and Design of Descriptor Linear Systems by Guang-Ren Duan

Copyright © Springer Science+Business Media, LLC 2010

All Rights Reserved

图书在版编目(CIP)数据

广义线性系统分析与设计/段广仁著;段广仁等译. —北京:科学出版社, 2012

(系统与控制丛书)

ISBN 978-7-03-034634-6

I. ①广… II. ①段… III. ①线性系统(自动化)—系统分析②线性系统(自动化)—系统设计 IV. ①TP271

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2012) 第 117601 号

责任编辑:张 宇 孙 芳/责任校对:包志虹

责任印制:张 倩/封面设计:耕者设计工作室

科学出版社 出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

陈海印刷有限责任公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2012 年 6 月第 一 版 开本: B5(720 × 1000)

2012 年 6 月第一次印刷 印张: 30

字数: 571 000

定价: 80.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

“十一五”国家重点图书出版规划项目

《系统与amp;控制丛书》编委会

主 编:

郭 雷 院 士 中国科学院数学与系统科学研究院

副 主 编:

程代展 研究员 中国科学院数学与系统科学研究院

林宗利 教 授 University of Virginia, USA

陈 杰 教 授 北京理工大学

编 委:

黄 捷 教 授 香港中文大学

谈自忠 教 授 Washington University, USA

Prof. Hassan K. Khalil Michigan State University, USA

Prof. Frank Lewis University of Texas at Arlington, USA

编者的话

我们生活在一个科学技术飞速发展的信息时代,诸如宇宙飞船、机器人、因特网、智能机器及汽车制造等高新技术对自动化提出了更高的要求。系统与amp;控制理论也因此面临着更大的挑战。它必须要能够为设计高水平的物理或信息系统提供原理和方法,使得设计出的系统能感知并自动适应快速变化的环境。

为帮助系统控制专业的专家、工程师以及青年学生迎接这些挑战,科学出版社和中国自动化学会控制理论专业委员会合作,设立了《系统与amp;控制丛书》的出版项目。丛书分中、英文两个系列,目的是出版一些具有创新思想的高质量著作,内容既可以是新的研究方向,也可以是至今仍然活跃的传统方向。研究生是本丛书的主要读者群,因此,我们强调内容的可读性和表述的清晰。我们希望丛书能达到这些目的,为此,期盼着大家的支持和奉献!

《系统与amp;控制丛书》编委会

2007年4月1日

序

现代控制理论大致起始于 20 世纪 60 年代, 其中成果最丰富、理论最系统的当首推定常线性系统的分析与设计, 这得益于线性代数的强力支持。定常线性系统理论的特征在于系统不仅是线性的、时不变的, 而且描述系统的状态维数与系统的阶次是一致的, 即系统状态从本质上讲是不受其他约束而在其状态空间中运动的。不能否认这种系统模式在便于研究的同时与很多实际系统有明显的差别。于是, 人们就致力于将这个好的框架, 借助数学工具向更广的系统模式进行推广。在这方面一个突出的例子是利用微分流形作为工具, 利用微分同胚变换将一类非线性系统化成线性系统, 从而建立了一类非线性系统的控制理论; 另一个突出的例子是利用泛函分析特别是算子半群的工具将线性系统的不少理论推广到分布参数系统。

与上述推广不同的是广义线性系统的理论。这类系统的状态空间维数大于系统的动态阶数, 这表明在系统运行的过程中受到了线性约束。这类约束提出了新的不同于常规线性系统的问题, 如正则性、脉冲模等, 以及其他常规线性系统中一些概念、理论和方法所需作的对应变更与拓广。由于系统的基本特征仍然是线性的, 因此主要研究工具仍然是线性代数。这大体上确定了广义线性系统近二十年研究的特征。段广仁教授在这方面持续研究了十多年, 得到了非常丰硕的成果。《广义线性系统分析与设计》正是在此基础上又综合了国际上的成果, 博采众家之长而写成的。

科学发展的规律是当一个分支的成果在一个框架内基本完善以后, 它必然寻求进一步的发展。线性系统的研究起始于 20 世纪 60 年代, 经过近二十年的发展, 虽然有几个学派还在做这方面的工作, 但控制界的主要精力很快就转移到将线性系统的框架和结论向其他模式系统进行拓展。现在关于广义线性系统的研究也有二十多年了, 也必然会向其他模式系统拓展, 如非线性广义系统、分布参数广义系统等。我相信具有很好的微分几何或算子半群基础的研究者将可以做到这一点。但由于广义系统本身在物理背景上的特殊性, 作为技术科学的控制科学, 如果真想把广义系统付诸应用而解决实际问题, 可能遇到的困难会更为多样且较难解决。

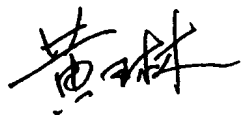
19 世纪末叶法国人 Painleve 在有接触的多刚体系上提出过一个佯谬: 对于无相互接触的刚体系, 其广义加速度的系数矩阵就是通常的质量矩阵, 它是正定的, 这样系统没有什么特殊的无法解释的物理现象出现; 但当多刚体之间存在接触时, 在刚体之间存在干摩擦, 于是系统的广义加速度矩阵系数就可能产生退化而出现

广义系统的特征。从数学理论上讲,系统的解的唯一性就得不到保证。但这个系统在现实空间中,其运行确实是明确唯一的,有时只从刚体系模型出发分析计算并不能得到这一真实的过程。这一悖论一百年来一直困惑着研究者,而这刚好是广义系统所产生的问题。

有时候人们将广义系统看成是一类奇异摄动系统的极限。奇异摄动系统是指系统中包含着摄动,而当摄动为零时系统会产生阶次降低的在动力系统中称为“非粗”的现象。在数学上 $x \rightarrow 5$ 和 $y \rightarrow 0$ 之间是可以通过 $y = x - 5$ 加以联系的。但在物理上一个参数以 $\alpha > 0$ 为极限和以 0 为极限并不一定通过简单的方式就能联系起来。以空气密度为例,在稠密大气层中运动的飞行器所受的气动力是可以弄清楚的。在完全真空的情况下,飞行器受力则相对单纯;而当空气稀薄时,空气已不是连续介质,原来建立在连续介质基础上的气动研究对于这类气体并不适用。这表明当物理参数趋近于零时可能会带来意想不到的麻烦,而这种状况在我们将具有小参数的奇异摄动系统看成广义系统时要十分小心。

我只想通过上面两个例子表明,将奇异摄动系统和广义系统真正用来解决实际问题时,我们可能碰到极为复杂、也极丰富多彩的物理与实际情形。力学系统中的运动是机械运动,按恩格斯的分类,这是一种最简单的运动形态。但当我们讨论电网、经济这些范畴内的广义系统时,将会极为困难与有趣。这也表明将广义系统理论真正用于实际,其前景将更为宽广,对于探索未知世界,会更富有兴趣与动力。

段教授的《广义线性系统分析与设计》一书系统地介绍了连续时间广义线性系统分析与设计方面的基本结果和一些最新进展,为我们开展研究提供了一个基本的理论方法。我相信将这方面的理论与客观实际系统结合起来,不仅能够解决控制问题,而且可能对理论本身的发展也产生新的动力。



2012 年 1 月 6 日

于北京大学

译者的话

Analysis and Design of Descriptor Linear Systems 一书历经十年时间的写作、教学与修改,终于在 Springer-Verlag 出版了。时代进步了,先进的排版系统为我们的翻译工作提供了很大便利,英文原著中的数学公式均是可利用的,这给中译本的形成节省了大量的时间。在相对容易的情况下,能为国内的读者们提供个方便当然是件很令人欣慰的事情。

本书的三位合译者均是我的学生,他们都在广义系统理论方面有一定的造诣,且在本书的内容方面也都有所贡献。具体分工是:于海华完成了第一章至第四章的翻译工作;张显完成了第五、六章以及附录 A 和 B 的翻译工作;吴爱国完成了第七章至第十一章以及附录 C 的翻译工作。另外,于海华还承担了全书的编辑与排版工作。我本人则对全书进行了校对、统一和协调,并对一些重要环节、翻译过程中产生的问题以及原书中不当之处的处理等方面进行了重点把握。在此,我真诚地感谢三位合译者对本书的贡献以及他们在翻译过程中所付出的辛勤劳动。

对于这样大篇幅的一部著作来说,要想穷尽其中的所有错误是不可能的,但我们尽力将其中的错误减小到最少。同英文原著一样,此中译本亦得到了我学生们的鼎力相助。我曾指导的现已留在哈尔滨工业大学任教的博士生,张永安、周彬和付艳明三位副教授,分别帮助校对了本书的第三、四章和第五、六章。我的 2008、2009 和 2010 级在读博士生也帮助校对了其他各章。在此我对他们的无私帮助表示衷心的感谢。

在翻译过程中,我们还发现了英文原著中的一些问题,并以脚注的形式进行了标注。另外,对于英文原著中跳跃性大的几个地方,我们在本书中加了一些过渡性内容,对于此种情况,我们也进行了标注。

本书较原著在风格上做了一些较大的改动。书中的定义、定理、引理、命题、问题、算法、说明和公式标号现均是按节排序的,因而采用了三级编号形式,如定理 4.6.1、式 (2.1.5) 等。本来我们很希望在原著中就采用这种方式,因为它对位置的指向更加明确,但因受到 Springer-Verlag 著作风格的限制而没有如愿,因而在原著中采用了按章排序的两级排序方式。经与科学出版社协商,我们在本书中特将这方面的相关编号改为三级排序方式。

由于本人水平有限,原著中会存在一些错误。另外,尽管译者在翻译过程中都尽了最大的努力,同时还得到许多人的鼎力相助,但错误也在所难免。在此,本人代表所有译者恳请广大读者能够在阅读本书的过程中及时将书中的错误通过邮箱

g.r.duan@hit.edu.cn 反馈给我们, 以便再版时加以改正。

借此机会, 还要再次感谢国家自然科学基金委的多项支持, 具体包括国家杰出青年科学基金项目 (69925308)、重大国际合作项目 (60720106002)、创新群体项目 (61021002) 及多项面上项目 (61074111、60474015、60374024、69504002)。本书的出版和国家自然科学基金委多年的大力支持是分不开的。

最后, 本人对黄琳院士能于百忙之中为本书作序表示感谢。同时也真诚地希望本书能对国内控制界的读者朋友有所帮助。

段广仁

2011 年 11 月 15 日

于哈尔滨工业大学

前 言

广义线性系统理论是控制系统理论的一个重要组成部分,在过去的二十多年里得到了国内外控制界学者的广泛关注。尽管广义线性系统理论在内容方面已非常丰富,但关于该方面的综合性书籍却只有 Dai(1989b), Campbell(1982) 和 Campbell(1980) 等少数几本。尽管现在还有一些与广义系统相关的其他书籍和一些博士论文,但它们都只是集中于某些非常具体和较为特定的主题上。

本书的主要目的在于针对广义线性系统理论进行一个相对系统性的介绍。全书共 11 章,集中讨论了连续时间广义线性系统的分析与设计问题,关于离散时间广义线性系统分析与设计方面的内容没有涉及。除了广义线性系统理论中的基本内容之外,书中还包含了作者的一些研究工作,这些工作主要反映在广义线性系统的响应分析、正则化分析与设计、动态阶配置设计、特征结构配置设计和观测器设计的参数化方法等多个方面。

国内外的许多学者对广义线性系统理论做出了重要贡献,但由于本书的结构安排及篇幅的限制,这些学者所发表的许多成果没有被涵盖在本书之中,对此作者表示歉意。

本书的大部分内容由作者本人在哈尔滨工业大学 2002~2005 春季学期的研究生课程中讲授过。作者的同事严质彬教授和姜苍华博士也在 2006~2008 春季学期协助讲授了这门课程,并且在文稿校对方面提供了很大帮助。另外,本书还包含了严质彬教授、张显教授和吴爱国博士与作者合作的多篇论文中的内容,这里对他们的贡献表示由衷的感谢。

作者的多位硕士生和博士生以及在哈尔滨工业大学 2002~2008 春季学期学习过“广义线性系统”这门课程的研究生,在查找书稿中的错误方面都提供了很大帮助,极大地提高了书稿的质量。作者的多位早期的博士生,于海华博士、吴爱国博士、梁冰博士、付艳明博士、张颖博士、张刘博士、单永正博士和刘宏亮博士等均参与了本书的索引整理、参考文献库的编辑以及部分内容的校对等工作。作者目前的在读博士生顾大可、张世杰、吕灵灵、李彦江、李适和蔡光斌等人帮助整理和验证了书中的部分例子。特别的,除了上述提及的工作外,于海华博士还帮助作者完成了全书的 LaTeX 排版工作。对于这些学生的鼎力相助,作者表示衷心的感谢。此外,需要特别提及的是作者的同事高会军教授,他是作者广义线性系统课程 2003 年的一位学生,也对本书的部分章节进行了校对,提出了许多宝贵意见,在此一并表示感谢。

作者在此还要特别感谢妻子张世超女士在各个方面给予的自始至终的支持。另外,作者的秘书刘明岩女士也协助完成了书稿中部分章节的英文打字工作,在此亦表示真诚的感谢。本书的部分工作是作者于 1998 年 9 月至 2002 年 10 月在英国 Belfast 女王大学工作期间完成的,在此期间,作者得到了 G. W. Irwin 教授和 S. Thompson 博士的多方面帮助以及许多有益的建议和支持,在此一并表示感谢。本书的评审专家对书中的内容提出了一些宝贵的建设性意见,在此也表示感谢。

本书中的研究工作得到了多个研究项目的资助,包括国家自然科学基金委的国家杰出青年科学基金项目 (69925308)、教育部的新世纪优秀人才支持计划和长江学者奖励计划项目,同时还有英国 EPSRC (工程和自然科学研究委员会) 研究项目 (GR/K83861/01) 的支持,在此对相关研究机构的支持表示衷心的感谢。最后,作者对本书的所有读者表示感谢,并真诚地希望各位读者能够将发现的错误和不当之处及时通过邮箱 g.r.duan@hit.edu.cn 反馈给作者,以便作者在后续的版本中加以修改以使本书更加完善。

段广仁

2009 年 12 月 12 日

于哈尔滨工业大学

符号表

有关集合的符号

$\mathbb{R}$	所有实数的全体
$\mathbb{R}^+$	所有正实数的全体
$\mathbb{R}^-$	所有负实数的全体
$\mathbb{C}$	所有复数的全体
$\mathbb{C}^+$	开右半复平面
$\mathbb{C}^-$	开左半复平面
$\bar{\mathbb{C}}^+$	闭右半复平面
$\bar{\mathbb{C}}^-$	闭左半复平面
$\mathbb{R}^n$	所有 n 维实向量的全体
$\mathbb{C}^n$	所有 n 维复向量的全体
$\mathbb{R}^{m \times n}$	所有 $m \times n$ 维实矩阵的全体
$\mathbb{C}^{m \times n}$	所有 $m \times n$ 维复矩阵的全体
$\mathbb{R}_r^{m \times n}$	所有秩为 r 的 $m \times n$ 维实矩阵的全体
$\mathbb{C}_r^{m \times n}$	所有秩为 r 的 $m \times n$ 维复矩阵的全体
$\mathbb{R}^{m \times n}[s]$	所有 $m \times n$ 维实系数多项式矩阵的全体
$\mathbb{C}^{m \times n}[s]$	所有 $m \times n$ 维复系数多项式矩阵的全体
$\mathbb{R}^{m \times n}(s)$	所有 $m \times n$ 维实系数有理矩阵的全体
$\mathbb{C}^{m \times n}(s)$	所有 $m \times n$ 维复系数有理矩阵的全体
$\mathbb{C}_p^k$	所有 k 次分段连续可微函数的全体
$\emptyset$	空集
$B \setminus A$	集合 A 在 B 中的补集
$\dim(V)$	向量空间 V 的维数
$V^\perp$	子空间 V 的正交补
$\ker(T)$	变换或矩阵 T 的核
$\text{image}(T)$	变换或矩阵 T 的象
$\text{span}(T)$	矩阵 T 的列张成的子空间
$\text{span}\{x_1, x_2, \dots, x_n\}$	由 $x_1, x_2, \dots, x_n$ 张成的向量空间

有关向量和矩阵的符号

0_n	n 维零向量
$0_{m \times n}$	$m \times n$ 维零矩阵
I_n	n 维单位阵
$[a_{ij}]_{m \times n}$	第 i 行第 j 列元素为 a_{ij} 的 $m \times n$ 维矩阵
A^{-1}	矩阵 A 的逆
A^T	矩阵 A 的转置
$\bar{A}$	矩阵 A 的复共轭
A^*	矩阵 A 的复共轭转置
$\text{Re}(A)$	矩阵 A 的实部
$\text{Im}(A)$	矩阵 A 的虚部
$\det(A)$	矩阵 A 的行列式
$\text{adj}(A)$	矩阵 A 的伴随矩阵
$\text{tr}(A)$	矩阵 A 的迹
$\text{rank}(A)$	矩阵 A 的秩
$\rho(A)$	矩阵 A 的谱半径
$A > 0$	A 是实对称正定矩阵
$A \geq 0$	A 是实对称半正定矩阵
$A > B$	$A - B > 0$
$A \geq B$	$A - B \geq 0$
$A^{\frac{1}{2}}$	满足 $Z^2 = A > 0$ 的实对称正定矩阵 Z
$\lambda_i(A)$	矩阵 A 的第 i 个特征值
$\sigma(A)$	矩阵 A 的所有特征值集合
$\sigma(E, A)$	正则矩阵束 (E, A) 的所有有限特征值集合
$\lambda_{\min}(A)$	矩阵 A 的最小特征值
$\lambda_{\max}(A)$	矩阵 A 的最大特征值
$\sigma_i(A)$	矩阵 A 的第 i 个奇异值
$\sigma_{\max}(A)$	矩阵 A 的最大奇异值
$\sigma_{\min}(A)$	矩阵 A 的最小奇异值
$\ A\ _F$	矩阵 A 的 Frobenius 范数
$\ A\ _1$	矩阵 A 的行和范数
$\ A\ _2$	矩阵 A 的谱范数
$\ A\ _\infty$	矩阵 A 的列和范数
$\mu_i(A)$	由 $\ A\ _i, i = 1, 2, \infty, F$, 导出的测度

$\dot{x}(t)$	向量函数 $x(t)$ 对 t 的一阶导数
$\ddot{x}(t)$	向量函数 $x(t)$ 对 t 的二阶导数
$x^{(i)}(t)$	向量函数 $x(t)$ 对 t 的 i 阶导数
$Q_c[A, B]$	矩阵对 (A, B) 的能控性矩阵
$Q_o[A, C]$	矩阵对 (A, C) 的能观性矩阵
$\text{diag}(d_1, d_2, \dots, d_n)$	对角元素为 $d_1, d_2, \dots, d_n$ 的对角矩阵

有关关系和操作的符号

$\Rightarrow$	蕴含
$\Leftrightarrow$	当且仅当
$\in$	属于
$\notin$	不属于
$\subset$	集合包含于
$\cap$	集合的交
$\cup$	集合的并
$\forall$	对于任意的
$\sim$	等价于
$\oplus$	向量空间的直和
$\equiv$	恒等于

其他符号

δ_{ij}	Kronecker 函数
$\delta(t - \tau)$	Dirac 或 Delta 函数
$\deg(\cdot)$	多项式的次数
$\mathcal{L}[\cdot]$	函数的 Laplace 变换
$\max\{c_1, c_2, \dots, c_n\}$	实数 $c_1, c_2, \dots, c_n$ 中的最大值
$\min\{c_1, c_2, \dots, c_n\}$	实数 $c_1, c_2, \dots, c_n$ 中的最小值

目 录

编者的话

序

译者的话

前言

符号表

第一章 绪论	1
1.1 广义系统模型	1
1.1.1 状态空间模型	1
1.1.2 定常广义线性系统	2
1.2 广义线性系统实例	4
1.2.1 电路系统	4
1.2.2 关联大系统	6
1.2.3 带有约束的动力学系统	7
1.2.4 机器人系统 —— 三连杆平面机械手	10
1.3 广义线性系统分析与设计的主要任务	15
1.3.1 广义线性系统的反馈控制	15
1.3.2 广义线性系统分析	19
1.3.3 广义线性系统设计	20
1.4 本书的内容安排	24
1.5 注释	25
1.5.1 参考文献	25
1.5.2 作者工作	26

第一部分 广义线性系统分析

第二章 广义系统的等价性与解	31
2.1 受限系统等价性	31
2.1.1 受限系统等价性的定义	31
2.1.2 受限等价系统的共性	34
2.2 等价标准型	35

2.2.1 动态分解标准型	35
2.2.2 Kronecker 标准型	38
2.2.3 微分反馈等价标准型	39
2.3 广义线性系统的解	44
2.3.1 基于 Kronecker 标准型的系统分解	45
2.3.2 基本方程组的解	46
2.4 注释	49
第三章 正则广义线性系统	50
3.1 广义线性系统的正则性	50
3.1.1 正则性的定义及其与系统解的关系	50
3.1.2 正则性判据	54
3.2 正则广义线性系统等价标准型	56
3.2.1 标准分解形式	57
3.2.2 逆标准型	62
3.3 传递函数矩阵	64
3.3.1 传递函数矩阵的定义	64
3.3.2 广义线性系统传递函数矩阵的特性	65
3.4 正则广义线性系统的状态响应: 分布解	66
3.4.1 慢子系统和快子系统的解	67
3.4.2 分布解	70
3.4.3 例子	71
3.5 正则广义线性系统的状态响应: 经典解	73
3.5.1 相容初值	73
3.5.2 经典解	75
3.5.3 例子	77
3.6 广义特征值和特征向量	78
3.6.1 有限特征值和特征向量	79
3.6.2 无限特征值和特征向量	84
3.7 特征结构分解及其与标准分解的关系	86
3.7.1 特征结构分解	86
3.7.2 特征结构分解与标准分解的关系	89
3.7.3 压缩子空间	90
3.8 稳定性	94
3.8.1 稳定性的定义	94
3.8.2 直接判据	94