

工程系统 的建模与控制

Modeling and Control of Engineering Systems

Clarence W. de Silva 原著

席斌译

高等教育出版社

工程系统 的建模与控制

Modeling and Control of Engineering Systems

Clarence W. de Silva 原著

席 斌 译

高等教育出版社·北京

内容提要

以作者的学术和工程经验为基础，通过工程系统的建模与控制提供了对机械、电气、流体和热力系统统一的处理方法。内容涵盖了传统、先进和智能控制，仪器仪表，实验和设计。包括理论，分析技术，常用的计算工具，仿真细节和应用。

本书克服了其它有关建模和控制方面书的不足之处，书中的建模都与实际物理系统有关，并阐明了控制系统所适应的特定技术。尽管使用了MATLAB，Simulink 和 LabVIEW，作者全面地解释了方法背后的要点和解析基础，对给定的系统如何选择合适的工具，对结果进行解释和验证，以及软件工具的局限性。这样的方法可以使读者掌握核心主题，学会在实际中使用概念。

图书在版编目(CIP)数据

工程系统的建模与控制/(美)德.席尔瓦·克劳伦斯(Clarence W.de Silva)著;席斌译.--北京:高等教育出版社,2016.10

书名原文:Modeling and Control of Engineering Systems

ISBN 978-7-04-045644-8

I. ①工… II. ①德… ②席… III. ①系统工程-系统建模-高等学校-教材②系统工程-控制系统-高等学校-教材 IV. ①N945.17

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 140650 号

策划编辑	平庆庆	责任编辑	平庆庆	封面设计	于文燕	版式设计	杜微言
插图绘制	杜晓丹	责任校对	胡美萍	责任印制	刘思涵		

出版发行	高等教育出版社	网 址	http://www.hep.edu.cn
社 址	北京市西城区德外大街 4 号		http://www.hep.com.cn
邮政编码	100120	网上订购	http://www.hepmall.com.cn
印 刷	山东鸿君杰文化发展有限公司		http://www.hepmall.com
开 本	787mm×1092mm 1/16		http://www.hepmall.cn
印 张	39.5	版 次	2016 年 10 月第 1 版
字 数	980 千字	印 次	2016 年 10 月第 1 次印刷
购书热线	010-58581118	定 价	86.00 元
咨询电话	400-810-0598		

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题，请到所购图书销售部门联系调换
版权所有 侵权必究
物 料 号 45644-00

译者序

Clarence 教授多次访问厦门大学自动化系进行合作研究和举办讲座,在拟开展的课程教学中,Clarence 教授提出采用他的著作并希望翻译成中文提供给中国读者。了解到我有过翻译控制类书籍的经历后,Clarence 教授希望我来完成翻译。鉴于 Clarence 教授的研究经历和国际地位,我欣然接受了邀请。

这部体量巨大的著作主要是针对本科学生和工程技术人员的。在众多的控制工程类教科书中,这本书无疑有许多独特之处。首先是应用面极其广泛,跨越许多工程领域。每个理论方法都对应了大量的工程实际,这种理论与实际的紧密结合在国内的教材中并不多见。读者从中能深刻地体会到控制工程的魅力和重要性。其次是清晰的系统化步骤。作为工程化的理论,分析和设计有内在的逻辑关系和软件支撑平台,如果读者能够跟随大量的例题进行一些实际的操作,包括解析计算和计算机仿真,则可具备从事相关工程实践的能力。这应当是所有工程技术类书籍的最终目的,可惜这样的著作并不多见。

动态模型与控制早已存在于我们生活的方方面面,既有大量人造的系统,也有许多天然的闭环控制系统。但是以模型为基础的控制理论和工程并未在广大工程技术人员中得到普及。许多一线的工程技术人员往往满足设备的正常运行,忽视了利用控制策略来进一步提高运行品质。原因就在于对控制理论和模型作用的准确理解。而许多本科学生在完成控制理论课程学习后并没有真正领会其核心内容。希望本书的出版能够真正地促使我们理论研究者和广大的工程技术人员多从跨学科的角度来处理问题,为我们所有工程类专业的同学打开新的视野。

席 斌

2015 年 11 月

前 言

这是一本关于工程系统建模与控制的导论性书籍,既可作为工程学科的本科生和低年级研究生教材,也可作为专业技术人员的参考书。作为教材可适用的学科有:动态系统建模,反馈控制系统,控制工程以及控制系统的设计与仪器仪表。书中有足够的内容可满足两个十四周课程的需要,一部分内容可在大学三年级或四年级讲授,另一部分则可在研究生一年级讲授。书中所涉及的分析手段,计算机/软件工具,仪器仪表装置,设计方法,注重实用并以深入浅出的方式来陈述先进的理论和概念,使之非常适合来自工业和研究室的工程技术人员,项目管理者和其它专业人士参考,所涵盖的领域包括控制工程,机械工程,电气与计算机工程,制造生产工程,航空航天工程,以及机电一体化。

控制系统是集成了控制器的动态系统。控制器的作用是产生控制信号,该信号以期望的方式来驱动被控过程(对象),从而满足一系列性能要求。我们需要执行机构通过直接驱动或操作对象来完成控制作用;需要传感器和变送器测量输出信号(过程响应)来实现反馈控制,测量输入信号来实现前馈控制,测量过程变量来实现系统监控,诊断和管理控制;此外还有其它一些用途。设计也是必不可少的一个环节,正是通过设计才能让我们能够从基本的元器件开始,如传感器,执行器,控制器,补偿器和信号调节装置,构造出满足性能要求的控制系统。本书探讨了所有这些问题,从基本原理出发,系统化地进入高级概念。

控制工程师应该能够对分立元件或一个集成的控制系统进行建模和分析,设计控制器,为控制系统确定和选择元器件,设定参数值,使得特定的控制系统在满足一系列约束的情况下,实现预期的功能。对一个工程系统进行恰当的控制需要有一个合适的系统“表示”——系统的“模型”。注意任何模型都是实际系统的理想化。特性的建立和结果的推导都是和模型相关的,并非来自实际系统,但是激励信号是施加到实际系统上的,输出响应也是从实际系统测量出来的。建模常常是控制工程中最基本的任务。例如,我们通过建模、相关分析以及计算机仿真,会对被控系统有着比较深入的理解。实际上在构造物理控制器之前,我们是通过建模和计算机仿真来设计控制器和评价它的性能的,这样的途径会更经济和节省时间。另外,控制技术中的“基于模型的控制”更是需要进行建模。

本书包含了重要的实验装置和仪器仪表,提供了大量的解决方案,习题和练习,其中有很多都是与实际应用相关的。每章后面的习题都提供了书中主要内容所没有涉及的有价值信息。所以除了主要内容之外,我们竭力建议学生仔细研究这些习题。各章末尾的习题答案都完整地包含在**解答手册**中,采用这本书的教师都可以得到。

原始书稿是由作者在卡内基梅隆大学所采用的讲义而发展来的,用于大学必修课程中的动态系统建模和反馈控制课程,以及为电气与计算机工程,机械工程和化学工程的低年级研究生开设的控制系统仪器仪表与现代控制工程。在准备这些课程材料的过程中,我的初衷是覆盖与麻省理工学院机械工程系相类似课程大纲中的主要部分。在英属哥伦比亚大学,原始材料得到进一步地发展,修改和增扩,用于动态系统建模,控制系统,智能控制,机电一体化和控制传感器与

执行器等课程。书中的内容也产生于作者在一些工业机构所获得的实际经验,如 IBM 公司,西屋电气公司,Bruel 和 Kjaer 公司,NASA(美国国家航空航天局)的刘易斯和兰利研究中心。

书中的内容可为学习工程系统的建模与控制打下坚实的基础,再通过进一步地获取控制硬件和分析技能的知识(以及一些亲身经历的实践经验),就可以更好地开展工业应用和科学研究。

本书的主要特点

目前已有的关于建模与控制的流行书籍中存在一些缺点。例如,有些书“看似”考虑了实际应用,在形成分析或数值计算问题之前先提出一些实际工程系统。它们可能会描述一辆汽车(用简化图甚至是照片),然后有这样的陈述:“我们用下面的传递函数来近似汽车”,并没有花费精力来说明模型和实际系统的关系,没有阐述诸如为什么一个特定的控制技术对系统的控制是合适的问题。还有一些书籍过于依赖软件工具来建模和进行控制系统分析,没有指出基本的要点和方法后面的分析基础,对所得结果的解释和验证方法也缺乏交代,还有所使用工具的局限性不明确。通过吸取这些流行书籍的长处,本书竭力克服它们的不足之处。以下就是本书的主要特点,也是区别于其它建模与控制学科教科书的地方。

- 书中的陈述和内容安排优先考虑了可读性和参考方便。
- 基本概念和公式的总结都用框图、表格和清单来表示,友好的用户界面贯穿全书,易于参考和回顾。
- 全书包括了大量的关于实际问题 and 控制工程实例的演示。
- 每章结束时都有大量的问题和练习,大部分都来自实际应用,包含了建模与控制的更进一步信息。
- 描述了 MATLAB®, Simulink® 和 LabVIEW®, 以及相关的工具箱的使用,并伴有各种各样的示例进行说明。书中的许多问题都是利用这些计算机工具来解决的。但是本书的主要目的并不仅在于训练学生如何使用这些软件工具,全面理解本书的核心和基础可以使掌握软件工具背后的基本原理和工程方法,即选择合适的软件解决给定的问题,解释由此得到的结果,对结果进行验证和校正,以及理解现有工具的局限性。
- 书后三个独立的附录包含了不便于放在主要章节中的有用素材。
- 使用一般化的方法探讨建模问题,使之能通用于机械,电气,流体和热力系统。这是受到电气工程领域中的等效电路和戴维宁(Thevenin)定理的启发。
- 引入了智能控制,特别是模糊逻辑控制。包含了控制系统仪器仪表一章,给本科生提供了从事实验工作的一些细节。
- 准备了**教师手册**,其中有教学计划和发展的建议以及各章末尾习题的详细解答。

Clarence W.de Silva

温哥华,加拿大

作者简介

Clarence W.de Silva 博士,美国注册工程师,IEEE 和 ASME 院士;是位于温哥华的加拿大英属哥伦比亚大学机械工程系教授;拥有加拿大顶级研究教授职位。在这之前,从 1988 年开始就担任 NSERC-BC 的工业自动化研究讲座教授;牛津大学富布莱特访问教授(1987/1988)。

他获得了麻省理工学院(1978)和剑桥大学(1998)的博士学位,还有滑铁卢大学的名誉工程博士学位(2008)。是新加坡国立大学电气与计算机工程的讲座教授,台湾科技大学的客座教授。

其它社团:加拿大皇家学会会员;加拿大工程学会会员;Lilly 会员;NASA-ASEE 会员;剑桥大学高阶富布莱特会员;大不列颠哥伦比亚省先进系统研究院会员;基勒姆会员;厄斯金会员。

获奖:佩因特杰出研究奖;ASME 动态系统和控制分会的高桥教育奖;IEEE 加拿大分会的杰出工程教育奖;世界自动化大会的终身成就奖;IEEE 千禧年奖;大不列颠哥伦比亚省职业工程师协会功勋成就奖;IEEE 系统,人和控制协会的杰出贡献奖。

编委:承担了 14 个期刊的编辑工作。

著作:出版了 16 本专业书籍,其中 14 本是编辑过的;是 32 个书本章节的作者;大约有 180 篇的期刊文章,200 篇的会议论文。

研究领域:工业过程监控与自动化,智能多机器人协同,机电一体化,智能控制,传感器,执行器和控制系统仪器仪表。在过去的 15 年中,作为项目负责人的项目经费达到 500 万元。

目 录

1. 工程系统的建模与控制	1	(A 型元件)	20
1.1 控制工程	1	2.3.4.2 流体感抗	
1.2 应用领域	2	(T 型元件)	20
1.3 建模的重要性	3	2.3.4.3 流阻(D 型元件)	20
1.4 控制工程历史	4	2.3.4.4 结构方程的推导	21
1.5 全书的内容安排	5	2.3.5 热力元件	24
习题	7	2.3.5.1 结构方程	25
2. 动态系统模型	9	2.3.5.2 三维传导	27
2.1 动态系统	9	2.3.5.3 毕奥系数	28
2.1.1 术语	9	2.3.6 自然振荡	29
2.2 动态模型	10	2.4 解析建模	29
2.2.1 模型复杂性	10	2.4.1 建模步骤	30
2.2.2 模型类型	10	2.4.2 输入-输出模型	30
2.2.3 解析模型类型	11	2.4.3 状态空间模型	31
2.2.4 叠加原理	12	2.4.3.1 状态空间	31
2.2.5 分布系统的集总模型	13	2.4.3.2 状态模型的性质	31
2.2.5.1 重质弹簧	13	2.4.3.3 线性状态方程	32
2.2.5.2 动能等价	14	2.4.4 时不变系统	35
2.2.5.3 固有频率等价	14	2.4.5 建立状态空间模型的系统化	
2.3 集总元件和相似性	15	步骤	36
2.3.1 跨越变量和穿越变量	15	2.4.6 从状态空间模型求输入-	
2.3.2 机械元件	16	输出模型	39
2.3.2.1 质量(惯性)元件	16	习题	41
2.3.2.2 弹簧(弹性)元件	17	3. 模型线性化	50
2.3.2.3 阻尼(耗散)元件	17	3.1 模型线性化	50
2.3.3 电气元件	18	3.1.1 关于工作点的线性化	50
2.3.3.1 电容元件	18	3.1.2 两个变量的函数	51
2.3.3.2 电感元件	19	3.2 非线性状态空间模型	52
2.3.3.3 电阻(耗散)元件	19	3.2.1 线性化	52
2.3.4 流体元件	20	3.2.2 弱化系统的非线性	53
2.3.4.1 流容或集流器		3.3 非线性电气元件	67
		3.3.1 电容	67

3.3.2 电感	68	5. 传递函数和频域模型	119
3.3.3 电阻	68	5.1 拉普拉斯和傅里叶变换	119
3.4 利用实验曲线的线性化	68	5.1.1 拉普拉斯变换	119
3.4.1 电机的转矩速度曲线	68	5.1.2 导数的拉普拉斯变换	120
3.4.2 电机控制的线性模型	69	5.1.3 积分的拉普拉斯变换	120
习题	70	5.1.4 傅里叶变换	121
4. 线状图	77	5.2 传递函数	121
4.1 变量和符号体系	77	5.2.1 传递函数矩阵	122
4.1.1 穿越变量和跨越变量	77	5.3 频域模型	126
4.1.2 符号体系	77	5.3.1 频率传递函数(频率响应	
4.2 线状图元件	79	函数)	126
4.2.1 单端口元件	79	5.3.1.1 谐波输入响应	126
4.2.1.1 源元件	79	5.3.1.2 幅值(增益)和	
4.2.1.2 源元件的功能	81	相位	127
4.2.2 双端口元件	82	5.3.2 波特图和奈奎斯特图	127
4.2.2.1 变换器	82	5.4 机电系统传递函数	128
4.2.2.2 电变换器	83	5.4.1 机械系统中传递函数的	
4.2.2.3 陀螺	83	意义	128
4.3 线状图方程	85	5.4.2 机械传递函数	129
4.3.1 相容(回路)方程	85	5.4.2.1 机械阻抗和	
4.3.1.1 符号约定	85	移动性	130
4.3.1.2 “基本”回路数	85	5.4.3 连接规则	130
4.3.2 连续(节点)方程	86	5.4.3.1 机械阻抗和移动性	
4.3.3 串联和并联	87	的连接规则	130
4.4 从线状图到状态模型	88	5.4.3.2 电气阻抗和导纳的	
4.4.1 系统阶次	88	连接规则	131
4.4.2 符号约定	89	5.4.3.3 A型传递函数和	
4.4.3 求取状态空间模型的步骤	89	T型传递函数	131
4.4.4 一般观察	89	5.4.4 基本元件的传递函数	131
4.4.5 拓扑结果	90	5.4.5 传输性函数	135
4.5 其它例子	103	5.4.5.1 力传输性	135
4.5.1 放大器	103	5.4.5.2 移动传输性	135
4.5.1.1 线状图表示	103	5.4.5.3 单自由度系统	136
4.5.2 直流电机	104	5.4.5.4 二自由度系统	137
4.5.3 热力系统线状图	107	5.5 等效线路和线状图简化	139
4.5.3.1 模型方程	107	5.5.1 线路中的戴维宁定理	139
习题	110	5.5.2 用线状图分析机械线路	142

5.5.3 机械线路戴维宁方法的 总结	150	响应	193
5.5.3.1 一般步骤	150	6.5.2.2 二阶系统的阶跃 响应	193
5.6 方框图和状态空间模型	150	6.6 阶跃响应初始条件的确定	194
5.6.1 方框图模拟	152	6.7 计算机仿真	200
5.6.2 叠加原理	153	6.7.1 计算机仿真中 Simulink 的 使用	201
5.6.3 因果性和物理可实现性	164	6.7.1.1 启动 Simulink	201
习题	166	6.7.1.2 基本要素	201
6. 响应分析和仿真	173	6.7.1.3 构建一个应用	201
6.1 解析解	173	6.7.1.4 仿真运行	202
6.1.1 齐次解	173	习题	205
6.1.1.1 重根	174	7. 控制系统结构和性能	213
6.1.2 特解	174	7.1 控制系统结构	213
6.1.3 冲激响应函数	175	7.1.1 前馈控制	214
6.1.3.1 卷积积分	176	7.1.1.1 计算控制输入	215
6.1.4 稳定性	177	7.1.2 术语	217
6.2 一阶系统	178	7.1.3 可编程逻辑控制器 (PLC)	218
6.3 二阶系统	179	7.1.3.1 PLC 硬件	219
6.3.1 无阻尼振荡器的自由 响应	179	7.1.4 分布控制	219
6.3.2 阻尼振荡器的自由响应	180	7.1.4.1 网络应用	220
6.3.2.1 情况 1: 欠阻尼运动 ($\zeta < 1$)	181	7.1.5 递阶控制	222
6.3.2.2 情况 2: 过阻尼运动 ($\zeta > 1$)	182	7.2 控制系统性能	224
6.3.2.3 情况 3: 临界阻尼运动 ($\zeta = 1$)	182	7.2.1 时间域性能指标	224
6.4 阻尼振荡器的受迫响应	185	7.2.2 简谐振荡模型	225
6.4.1 冲激响应	185	7.3 控制策略	228
6.4.2 零初始条件的解谜	186	7.3.1 具有 PID 作用的反馈 控制	230
6.4.3 阶跃响应	186	7.4 稳态误差和积分控制	232
6.4.4 谐波激励响应	188	7.4.1 终值定理	233
6.5 响应的拉普拉斯变换法	192	7.4.2 手动重置	233
6.5.1 阶跃响应的拉普拉斯 变换法	192	7.4.3 自动重置(积分控制)	234
6.5.2 考虑初始条件	193	7.4.4 重置饱和	234
6.5.2.1 一阶系统的阶跃		7.5 系统类型和误差常数	235
		7.5.1 系统类型定义	235
		7.5.2 误差常数	236

7.5.2.1 位置误差常数 K_p ...	236	8.4.6.2 相位裕量	289
7.5.2.2 速度误差常数 K_v ...	237	8.4.7 波特和奈奎斯特图	290
7.5.2.3 加速度误差常数 K_a	237	8.4.8 相位裕量和阻尼比的关系	291
7.5.3 系统类型的鲁棒特性	239	8.5 波特图的渐近线方法	292
7.5.4 S 平面上的性能指标	239	8.5.1 波特的增益斜率和相位关系	294
7.6 控制系统灵敏度	242	8.5.1.1 非最小相位系统 ...	295
7.6.1 关于参数变化的系统灵敏度	243	8.5.2 增益裕量和相位裕量不明确情况	301
习题	246	8.5.3 时间延迟的不稳定因素	302
8. 稳定性和根轨迹方法	257	8.6 奈奎斯特稳定判据	302
8.1 稳定性	257	8.6.1 奈奎斯特稳定判据	303
8.1.1 自然响应	257	8.6.2 虚轴上的回路极点	304
8.2 劳斯-霍尔维兹判据	259	8.6.3 应用奈奎斯特判据的步骤	304
8.2.1 劳斯阵列	259	8.6.4 相对稳定性	310
8.2.2 辅助方程(零行问题)	260	8.7 尼科尔斯图	310
8.2.3 零系数问题	261	8.7.1 闭环频率响应的图形方法	311
8.2.4 相对稳定	262	8.7.2 M 圆和 N 圆	311
8.3 根轨迹方法	263	8.7.3 尼科尔斯图	312
8.3.1 根轨迹的绘制规则	264	习题	315
8.3.1.1 复数	265	9. 控制器设计和整定	322
8.3.1.2 根轨迹规则	266	9.1 控制器设计和整定	322
8.3.1.3 规则的解釋	267	9.1.1 设计要求	323
8.3.2 绘制根轨迹的步骤	268	9.1.2 时间域技术	323
8.3.3 根轨迹中的可变参数	280	9.1.3 频域设计技术	323
8.4 频域中的稳定性	282	9.2 传统的时域设计	324
8.4.1 谐波输入的响应	282	9.2.1 比例加微分控制器设计	324
8.4.2 复数	283	9.2.2 设计方程	325
8.4.3 谐振峰值和谐振频率	284	9.3 频域补偿器设计	326
8.4.3.1 阻尼振荡器	285	9.3.1 超前补偿	326
8.4.3.2 峰值	286	9.3.1.1 超前补偿器设计步骤	328
8.4.4 半功率带宽	286	9.3.2 滞后补偿	330
8.4.4.1 阻尼简谐振振荡器 ...	286	9.3.2.1 滞后补偿设计	
8.4.5 临界稳定	287		
8.4.5.1 $(1,0)$ 条件	287		
8.4.6 增益和相位裕量	289		
8.4.6.1 增益裕量	289		

步骤	331	10.4.4 因果性要求	369
9.3.3 补偿器设计要求	332	10.4.5 应用双线性变换的稳定性 分析	369
9.4 根轨迹设计	335	10.4.6 计算机实现	370
9.4.1 根轨迹的设计步骤	335	习题	370
9.4.2 超前补偿	336	11. 先进控制	377
9.4.3 滞后补偿	339	11.1 现代控制	377
9.5 控制器整定	342	11.2 时间响应	377
9.5.1 齐格勒-尼科尔斯整定	343	11.2.1 标量系统	378
9.5.2 响应曲线法	343	11.2.1.1 齐次情况 (输入 $u=0$)	378
9.5.3 终极响应法	344	11.2.1.2 非齐次(受迫) 情况	378
习题	346	11.2.2 状态空间模型的时间 响应	379
10. 数字控制	350	11.2.2.1 定常系统矩阵	379
10.1 数字控制	350	11.2.2.2 矩阵指数	379
10.1.1 计算机控制系统	350	11.2.2.3 计算 e^{At} 的方法	380
10.1.2 数字控制系统构成	351	11.2.3 用拉普拉斯变换求时间 响应	386
10.1.3 数字控制的优点	351	11.2.4 输出响应	386
10.2 信号采样和控制带宽	352	11.2.4.1 传递函数矩阵	386
10.2.1 采样定理	352	11.2.5 模态响应	387
10.2.2 抗假频滤波器	352	11.2.5.1 从模态响应到状态 响应	388
10.2.3 控制带宽	352	11.2.5.2 模态分解的 优点	388
10.2.4 控制系统带宽设计	355	11.2.6 时变系统	390
10.2.5 控制周期	356	11.2.6.1 状态转移矩阵 性质	392
10.3 应用 z 变换的数字控制	357	11.3 系统稳定性	392
10.3.1 z 变换	357	11.3.1 线性系统稳定性	392
10.3.2 差分方程	359	11.3.1.1 重根情况	393
10.3.3 离散传递函数	360	11.3.1.2 广义特征向量	393
10.3.4 时间延迟	360	11.3.2 重根模态响应的稳定性	395
10.3.5 s - z 映射	361	11.3.2.1 可能的约当块和 模态响应	395
10.3.6 离散模型的稳定性	362		
10.3.7 离散时间终值定理	363		
10.3.8 冲激响应函数	364		
10.3.8.1 单位脉冲和单位 冲激响应	364		
10.4 数字补偿	365		
10.4.1 保持运算	365		
10.4.2 离散补偿器	365		
10.4.3 数字补偿器的直接设计	368		

11.3.3 平衡点	396	11.7.1 欧拉方程	435
11.3.3.1 有界输入有界状态 (BIBS)稳定	396	11.7.2 边界条件	436
11.3.3.2 有界输入有界输出 (BIBO)稳定	397	11.7.3 无限时间二次线性 调节器	437
11.3.4 线性系统稳定性	397	11.7.4 控制系统设计	439
11.3.4.1 Frobenius 定理	397	11.8 其它先进控制技术	443
11.3.4.2 李雅普诺夫第一 方法	397	11.8.1 非线性反馈控制	443
11.3.5 李雅普诺夫第二方法 (直接法)	400	11.8.2 自适应控制	444
11.3.5.1 李雅普诺夫 方程	401	11.8.3 滑模控制	445
11.4 能控性和能观性	403	11.8.4 线性二次高斯控制 (LQG)	447
11.4.1 最小(不可简约)实现	406	11.8.5 H_{∞} 控制	448
11.4.2 友矩阵和能控性	408	11.9 模糊逻辑控制	449
11.4.3 反馈的意义	409	11.9.1 模糊逻辑	449
11.4.4 状态反馈	410	11.9.2 模糊集和隶属函数	450
11.4.5 稳定性	410	11.9.3 模糊逻辑运算	450
11.5 模态控制	411	11.9.3.1 补(非, NOT)	450
11.5.1 控制器设计的极点配置 方法	412	11.9.3.2 并(析取, OR)	451
11.5.2 多输入系统的极点配置	415	11.9.3.3 交(合取, AND)	451
11.5.3 极点配置过程	417	11.9.3.4 蕴含(If-Then)	452
11.5.4 重极点配置	418	11.9.4 推理规则复合	452
11.5.5 部分闭环极点配置到 开环极点	419	11.9.5 扩展到模糊决策	453
11.5.6 输出反馈极点配置	421	11.9.6 模糊控制基础	454
11.6 最优控制	423	11.9.7 模糊控制曲面	457
11.6.1 基于变分法的最优化	423	习题	461
11.6.2 具有末端状态函数的 代价函数	431	12. 控制系统装置	469
11.6.3 推广到向量的问题	432	12.1 控制系统装置	469
11.6.4 一般最优控制问题	433	12.2 器件互联	470
11.6.5 边界条件	434	12.2.1 装置串联	471
11.6.6 哈密尔顿公式	434	12.2.2 阻抗匹配放大器	472
11.6.7 庞特里亚金最小值原理	435	12.2.3 运算放大器	473
11.7 线性二次调节器	435	12.2.3.1 运算放大器中的 反馈	474
		12.2.4 仪表放大器	474
		12.2.4.1 微分放大器	474
		12.3 运动传感器	475
		12.3.1 线性可变差分变换器	

(LVDT)	476	12.5.8.1 接口板	502
12.3.2 信号调节	477	12.5.8.2 驱动单元	502
12.3.3 直流测速计	478	12.5.9 直流电机选型	504
12.3.3.1 电子换向	479	12.5.9.1 电机参数和 规格	504
12.3.4 压电加速度计	479	12.5.9.2 选型考虑	505
12.3.4.1 电荷放大器	480	12.5.9.3 电机定型过程	506
12.3.5 数字变送器	480	12.5.9.4 惯性匹配	507
12.3.6 轴角编码器	481	12.5.9.5 驱动放大器 选型	507
12.3.7 光学编码器	481	12.5.10 电机选型总结	508
12.4 步进电机	482	12.6 应用 LabVIEW 的控制实验	509
12.4.1 步进电机分类	483	12.6.1 实验 1:水箱液位展示	509
12.4.2 驱动和控制器	483	12.6.1.1 步骤	509
12.4.3 步进电机选型	485	12.6.1.2 创建前面板	510
12.4.3.1 转矩特性和 术语	485	12.6.1.3 创建方框图	510
12.4.3.2 步进电机选型 程序	486	12.6.1.4 调整 VI	513
12.5 直流电机	492	12.6.1.5 计算过程阀 阻抗	513
12.5.1 转子和定子	492	12.6.2 实验 2:应用 LabVIEW 的 过程控制	514
12.5.2 换向	493	12.6.2.1 双水箱系统	514
12.5.3 直流无刷电机	494	12.6.2.2 前面板描述	514
12.5.4 直流电机方程	494	12.6.2.3 通/断控制算法	516
12.5.4.1 稳态特性	495	12.6.2.4 比例控制算法	516
12.5.5 直流电机的实验模型	496	12.6.2.5 单水箱过程 控制	516
12.5.5.1 电气阻尼常数	496	习题	519
12.5.5.2 线性化实验 模型	497	附录 A. 变换技术	528
12.5.6 直流电机控制	497	A.1 拉普拉斯变换	528
12.5.6.1 电枢控制	497	A.1.1 常用函数的拉普拉斯 变换	529
12.5.6.2 电机时间常数	498	A.1.1.1 常数的拉普拉斯 变换	529
12.5.6.3 磁场控制	499	A.1.1.2 指数的拉普拉斯 变换	529
12.5.7 直流电机的反馈控制	500	A.1.1.3 正弦和余弦的拉普	
12.5.7.1 速度反馈控制	500		
12.5.7.2 位置和速度反馈 控制	500		
12.5.7.3 PID 控制的位置 反馈	501		
12.5.8 电机驱动	501		

拉斯变换	530	B. 3. 4. 1 三阶系统的极点 配置	557
A. 1. 1. 4 导数的拉普拉斯 变换	531	B. 3. 4. 2 三阶系统的线性 二次调节器	559
A. 1. 2 拉普拉斯变换表	532	B. 3. 4. 3 移动车辆倒立摆的 极点配置	559
A. 2 响应分析	534	B. 3. 4. 4 移动车辆倒立摆 的 LQG 控制器	561
A. 3 传递函数	538	B. 4 模糊逻辑工具箱	561
A. 4 傅里叶变换	539	B. 4. 1 图形化编辑器	562
A. 4. 1 频率响应函数(频率 传递函数)	539	B. 4. 2 命令行驱动的 FIS 设计	562
A. 5 S-平面	540	B. 4. 3 实用的单机 C 程序	563
A. 5. 1 拉普拉斯变换和傅里叶变换 的解释	540	B. 5 LabVIEW	563
A. 5. 2 在电路分析中的应用	540	B. 5. 1 导论	564
附录 B. 软件工具	542	B. 5. 2 关键概念	564
B. 1 Simulink	542	B. 5. 3 LabVIEW 的使用	565
B. 2 MATLAB	542	B. 5. 3. 1 前面板	565
B. 2. 1 计算	542	B. 5. 3. 2 方框图	566
B. 2. 2 算术	542	B. 5. 3. 3 工具调色板	567
B. 2. 3 数组	544	B. 5. 3. 4 控制调色板	567
B. 2. 4 关系和逻辑运算	545	B. 5. 3. 5 函数调色板	567
B. 2. 5 线性代数	546	B. 6 LabVIEW 声音和振动工具	568
B. 2. 6 M-文件	547	B. 6. 1 声音和振动工具包	568
B. 3 控制系统工具箱	547	B. 6. 2 信号获取和仿真	568
B. 3. 1 补偿器设计举例	547	B. 6. 2. 1 集成	568
B. 3. 1. 1 构建系统模型	548	B. 6. 2. 2 振动幅度测量	568
B. 3. 1. 2 将模型导入 SISO 设计工具箱	548	B. 6. 2. 3 频率分析	569
B. 3. 1. 3 增加超前和滞后 补偿器	550	B. 6. 2. 4 瞬态分析	569
B. 3. 2 采用齐格勒-尼科尔斯校正 的 PID 控制	551	附录 C. 线性代数复习	571
B. 3. 2. 1 比例控制	551	C. 1 向量和矩阵	571
B. 3. 2. 2 PI 控制	554	C. 2 向量-矩阵代数	573
B. 3. 2. 3 PID 控制	554	C. 2. 1 矩阵加和减	573
B. 3. 3 根轨迹设计举例	555	C. 2. 2 零矩阵	574
B. 3. 4 现代控制系统 MATLAB 设计 举例	557	C. 2. 3 矩阵乘法	574
		C. 2. 4 单位矩阵	575
		C. 3 矩阵逆	575
		C. 3. 1 矩阵转置	575

C. 3. 2	矩阵的迹	576	C. 5. 1	矩阵行列式的性质	581
C. 3. 3	矩阵的行列式	576	C. 5. 2	矩阵的秩	581
C. 3. 4	伴随矩阵	577	C. 6	线性方程组	582
C. 3. 5	逆矩阵	577	C. 7	二次型	582
C. 4	向量空间	578	C. 8	矩阵特征值问题	583
C. 4. 1	域 (F)	578	C. 8. 1	特征多项式	583
C. 4. 2	向量空间 (L)	578	C. 8. 2	特征方程	583
C. 4. 3	L 的子空间 S	579	C. 8. 3	特征值	583
C. 4. 4	线性独立	579	C. 8. 4	特征向量	583
C. 4. 5	向量空间的基和维数	579	C. 9	矩阵变换	584
C. 4. 6	内积	580	C. 9. 1	相似变换	584
C. 4. 7	范数	580	C. 9. 2	正交变换	584
C. 4. 8	格莱姆-施密特正交化	580	C. 10	矩阵指数	584
C. 4. 9	修正的格莱姆-施密特 过程	581	C. 10. 1	矩阵指数的计算	584
C. 5	行列式	581	中英文对照		586

第 1 章

工程系统的建模与控制

控制器的作用是使得对象(被控系统)按照期望的行为运行,满足一系列性能指标的要求。一个控制系统至少包含一个对象和一个控制器。工程系统的设计、研发、修改、性能评估和控制需要一个令人容易理解的适合的系统“表示”,特别是需要系统的“模型”。本书将给出工程系统统一的建模方法,它可能具有多域(机械,电气,流体和热力等)的特征。系统化地讨论控制工程主题,强调有关的模型方法。总之,本书针对的是控制系统的模型,分析,仿真,设计,仪器仪表和评估。本章为导论。

1.1 控制工程

响应(振动或电压冲击)需要受控的物理动态系统(如机械系统)称为对象或过程。根据策略(或控制定律)产生信号(或指令)来控制对象响应的装置称为控制器。对象和控制器是控制系统的两个要素。系统有时会很复杂,可能会被施加已知或未知的激励(输入),例如一架飞机(如图 1.1 所示)。

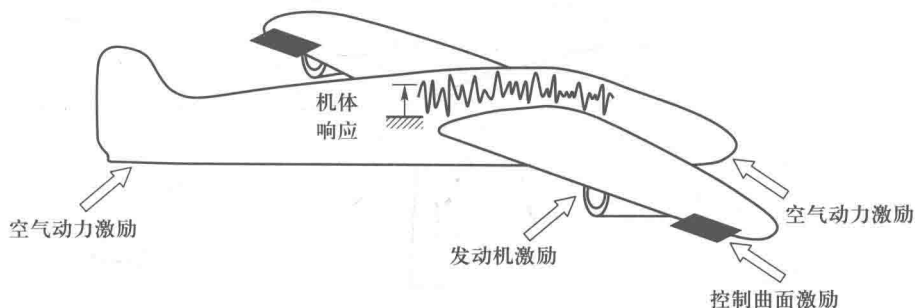


图 1.1 复杂的飞机控制系统

指令信号(或输入)施加到控制器上,于是对象就在控制的作用下按期望的方式运行(根据性能指标要求)。在反馈控制中,对象需被监控,并利用传感器和变送器来测量其响应,然后反馈到控制器上,控制器再比较测量到的信号和外部设定的期望响应,利用此误差信号产生适当的控制信号。理想控制系统应具备以下特点:稳定,快速,精确,对噪声、外部扰动、模型误差和参数变化不敏感,对控制输入高度敏感,没有不期望的动态耦合。控制工程关注的是控制系统的开发,实现,运行和评估。控制工程师应能够对控制器和控制系统的其它部分进行建模,分析,仿真,设计,开发,运行以及评估。