

数字控制系统 分析与设计

(原书第4版)

查尔斯 L. 菲利普斯 (Charles L. Phillips)

[美] H. 特洛伊·内格尔 (H. Troy Nagle)

著

阿兰尼亚·查克拉博蒂 (Aranya Chakraborty)

王萍 等译

*Digital Control
System Analysis
& Design
Fourth Edition*

Digital Control
System Analysis
and Design

Fourth Edition



Phillips • Nagle • Chakraborty



机械工业出版社
China Machine Press

数字控制系统 分析与设计

(原书第4版)

查尔斯 L. 菲利普斯 (Charles L. Phillips)

[美] H. 特洛伊·内格尔 (H. Troy Nagle)

著

阿兰尼亚·查克拉博蒂 (Aranya Chakraborty)

王萍 等译

*Digital Control System
Analysis & Design
Fourth Edition*

Digital Control
System Analysis
and Design



Phillips • Nagle • Chakraborty



机械工业出版社
China Machine Press

图书在版编目 (CIP) 数据

数字控制系统分析与设计 (原书第 4 版)/(美) 查尔斯 L. 菲利普斯等著; 王萍等译. —北京: 机械工业出版社, 2017.6

(国外工业控制与智能制造丛书)

书名原文: Digital Control System Analysis & Design, Fourth Edition

ISBN 978-7-111-57356-2

I. 数… II. ①查… ②王… III. 数字控制系统—高等学校—教材 IV. TP273

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 155934 号

本书版权登记号: 图字: 01-2014-2707

Authorized translation from the English language edition, entitled Digital Control System Analysis & Design, Fourth Edition, 978-0-13-293831-0 by Charles L. Phillips, H. Troy Nagle, Aranya Chakraborty, published by Pearson Education, Inc., Copyright © 2015.

All rights reserved. No part of this book may be reproduced or transmitted in any form or by any means, electronic or mechanical, including photocopying, recording or by any information storage retrieval system, without permission from Pearson Education, Inc.

Chinese simplified language edition published by Pearson Education Asia Ltd., and China Machine Press Copyright © 2017.

本书中文简体字版由 Pearson Education (培生教育出版集团) 授权机械工业出版社在中华人民共和国境内 (不包括香港、澳门特别行政区及台湾地区) 独家出版发行。未经出版者书面许可, 不得以任何方式抄袭、复制或节录本书中的任何部分。

本书封底贴有 Pearson Education (培生教育出版集团) 激光防伪标签, 无标签者不得销售。

本书就数字控制系统的分析和设计问题进行全面系统的介绍。它从 5 个实际的控制问题切入 (第 1 章), 在对 z 变换等必要的数学问题做出适当铺垫 (第 2 章) 和对采样 / 数据保持等特殊问题进行适当讲解 (第 3 章) 之后, 第 4~8 章讲解数字控制系统的分析问题, 第 9~11 章讲解数字控制系统的设计问题, 最后 (第 12 章) 给出了 5 个案例的设计例程。

本书兼顾数字控制系统和模拟控制系统的关系, 注重从经典方法到现代方法的自然过渡, 强调计算机辅助分析及计算机辅助设计技术的讲解, 示例丰富且具有连贯性, 习题配置充分。

本书适合作为本科高年级或研究生一年级的数字控制系统教材, 也可作为控制工程师的自学读本。

出版发行: 机械工业出版社 (北京市西城区百万庄大街 22 号 邮政编码: 100037)

责任编辑: 张梦玲

责任校对: 殷 虹

印 刷: 中国电影出版社印刷厂

版 次: 2017 年 7 月第 1 版第 1 次印刷

开 本: 185mm×260mm 1/16

印 张: 22.25

书 号: ISBN 978-7-111-57356-2

定 价: 79.00 元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换

客服热线: (010) 88378991 88361066

投稿热线: (010) 88379604

购书热线: (010) 68326294 88379649 68995259

读者信箱: hzjsj@hzbook.com

版权所有·侵权必究

封底无防伪标均为盗版

本书法律顾问: 北京大成律师事务所 韩光/邹晓东

出版者的话

文艺复兴以来,源远流长的科学精神和逐步形成的学术规范,使西方国家在自然科学的各个领域取得了垄断性的优势;也正是这样的传统,使美国在信息技术发展的六十多年间名家辈出、独领风骚。在商业化的进程中,美国的产业界与教育界越来越紧密地结合,信息学科中的许多泰山北斗同时身处科研和教学的最前线,由此而产生的经典科学著作,不仅擘划了研究的范畴,还揭示了学术的源变,既遵循学术规范,又自有学者个性,其价值并不会因年月的流逝而减退。

近年,在全球信息化大潮的推动下,我国的信息产业发展迅猛,对专业人才的需求日益迫切。这对我国教育界和出版界都既是机遇,也是挑战;而专业教材的建设在教育战略上显得举足轻重。在我国信息技术发展时间较短的现状下,美国等发达国家在其信息科学发展的几十年间积淀和发展的经典教材仍有许多值得借鉴之处。因此,引进一批国外优秀教材将对我国教育事业的发展起到积极的推动作用,也是与世界接轨、建设真正的世界一流大学的必由之路。

机械工业出版社华章公司较早意识到“出版要为教育服务”。自1998年开始,我们就将工作重点放在了遴选、移译国外优秀教材上。经过多年的不懈努力,我们与 Pearson、McGraw-Hill、Elsevier、John Wiley & Sons、CRC、Springer 等世界著名出版公司建立了良好的合作关系,从他们现有的数百种教材中甄选出 Alan V. Oppenheim Thomas L. Floyd、Charles K. Alexander、Behzad Razavi、John G. Proakis、Stephen Brown、Allan R. Hambley、Albert Malvino、Peter Wilson、H. Vincent Poor、Hassan K. Khalil、Gene F. Franklin、Rex Miller 等大师名家的经典教材,以“国外电子与电气技术丛书”和“国外工业控制与智能制造丛书”为系列出版,供读者学习、研究及珍藏。这些书籍在读者中树立了良好的口碑,并被许多高校采用为正式教材和参考书籍。其影印版“经典原版书库”作为姊妹篇也越来越多被实施双语教学的学校所采用。

权威的作者、经典的教材、一流的译者、严格的审校、精细的编辑,这些因素使我们的图书有了质量的保证。随着电气与电子信息学科建设的不断完善和教材改革的逐渐深化,教育界对国外电气与电子信息教材的需求和应用都将步入一个新的阶段,我们的目标是尽善尽美,而反馈的意见正是我们达到这一终极目标的重要帮助。华章公司欢迎老师和读者对我们的工作提出建议或给予指正,我们的联系方法如下:

华章网站: www.hzbook.com

电子邮件: hzjsj@hzbook.com

联系电话: (010)88379604

联系地址: 北京市西城区百万庄南街1号

邮政编码: 100037



华章科技图书出版中心

数字控制系统是现代控制系统的主要类型，它以数字计算机为核心组建，也称为计算机控制系统。

从控制系统的组建方式上看，数字控制系统通过“采样”和 A/D(模/数)转换、D/A(数/模)转换，将模拟控制系统中由硬件控制器完成的连续模拟运算转换为由计算机执行的离散数值运算；从理论意义上讲，控制系统问题是系统模型的求解问题，数值方法适用于离散系统模型求解，由于只求数值解，所以摆脱了解析方法的局限，同时可以实现快速求解，这使数字控制系统的应用领域更宽广；从工程角度看，控制系统是一种以控制器为核心组织起来的物理系统，在数字控制系统中，控制器的使命由数字计算机担当，它通过数值计算实现的系统控制的策略(算法)更丰富，例如数字滤波、数字 PID，以及模糊和智能控制算法等。

计算机强大的运算能力和编程的灵活性为数字控制系统的设计、组织和实现提供了极大的灵活性，并为更高级的控制策略的实施和更复杂的特性补偿提供了可能，从而大大强化了控制器的功能，并使复杂控制系统的品质得以改善；计算机的联网通信功能为大系统的控制问题提供了多种现实的解决途径，使得大工业生产自动化的实现成为可能。现代工业控制工程中广泛应用分层、分布式、集生产管理与过程控制为一体的 DCS (Distributed Control System) 系统，即所谓的分散(集散)控制系统就是基于数字控制系统构建的。

奥本大学电气工程系 Charles L. Phillips 教授等撰写的这本著作对数字控制系统的分析和设计问题进行了全面介绍，并在以下方面具有鲜明特色：

1) 起止于实际案例的编写方式，使读者一开始就具有很强的代入感。教材在对必要的数学知识和特殊的“采样/数据保持”内涵讲解之后，分别介绍了数字控制系统分析和设计的基本概念、常用方法和贯穿始终的应用示例；章后习题与章内讲解配合紧密、章间内容前后呼应。当你带着解决实际问题的渴望开始本书的学习后，会发现，结束本书学习之时，你已有能力对类似于飞机自动着陆、新生儿的自动供氧等数字控制系统进行分析和设计。

2) 经典方法和现代方法相融合。将经典控制与现代控制组织成两门课程是形成目前比较常见的教材编写体系的客观背景。与此不同，本教材从一开始(第 1 章除外)，就针对数字控制系统的具体分析和设计问题将这两种方法相融合，每一次从经典方法到现代方法的过渡自然、衔接顺畅，令人耳目一新。这一编写方法可为从事控制类课程的教师提供新的教学改革思路。

3) 计算机辅助分析与计算机辅助设计贯穿始终。为了方便读者对教材中基本概念和基本方法的掌握，删繁就简是许多控制类教材的通常做法。这会使学习者依然解决不了实际的复杂自动控制系统的分析问题，承担不起实际的控制系统的设计使命。本教材各章均强调使用 MATLAB 软件对相关问题的实现进行计算机辅助分析和设计，同时给出各段程序及程序运行结果，如此，在准确掌握数字控制系统分析和设计的基本概念、基本方法和要领的基础上，进一步领会计算机辅助方法，有助于学习者增强解决实际复杂问题的信心和能力。

参加本书翻译工作的有王萍、王娟、窦冰杰、王迪和石君志，其中，王娟博士完成对第3~6章的初译，窦冰杰完成对第9~11章的初译，王迪博士翻译了附录Ⅲ和附录Ⅳ，其余章节及附录由王萍翻译，同时也由她完成全书的统稿和审校。

由于译者水平所限，译文中难免有疏漏和不妥之处，恳请读者不吝赐教。

王 萍

2017年4月于天津大学

前言

本书适合作为高年级本科生或一年级研究生离散时间控制系统方面的教材,也可作为执业控制工程师的自学读本。

本书基于奥本大学、北卡罗来纳州立大学的离散时间系统课程以及美国和欧洲的短期集中课程中的教学内容。受那些参加短期集中课程的执业工程师的影响,本书的内容和定位更侧重数字控制系统设计及实现的实际问题。

第1章对全书内容梗概进行了简要介绍。第2~11章讲述线性离散时间系统的分析和设计问题,这时,知晓一些连续时间系统的知识将非常有助于理解相关的内容,所涉及的数学知识是 z 变换和向量矩阵差分方程,这些内容在第2章讲述;第3章的议题非常重要,讲的是采样信号、采样器及数据保持器的数学模型,该模型是本书后续内容的基础,其中特别强调了其内涵及应用局限。

接下来,第4~7章讲解如何将第2章的数学方法应用到离散时间系统(特别是数字控制系统)的分析中。第8章介绍经典的设计方法——基于频率响应的伯德图法,现代设计方法安排在第9~11章。第12章就离散时间控制系统的设计问题给出了几个实际案例研究。本书各章均强调使用MATLAB软件对相关问题的实现进行计算机辅助分析和设计。

与前几版相比,第4版的变动内容如下:

- 在本书各章追加了基于MATLAB的应用举例;
- 新增一章(第11章)讲述系统辨识问题;
- 对大部分章节内容增补了习题;
- 对章后习题进行了重新编号,以便于将习题与正文内容对应起来;
- 第8章增加了基于MATLAB pidtool 工具包的设计方法;
- 第12章添加了两个案例研究;
- 删掉了关于数字滤波器实现方法的内容(上一版的第11~14章及附录V和附录VI),以节省篇幅,并使读者将更多的精力放到控制系统设计上。

章后习题与章内基本内容相辅相成。章内的多数例题配置了小段MATLAB程序,并给出了计算机执行那段程序的结果,对这些程序稍做修改,就可用于对章后习题的求解。

为了帮助教师用好本书,我们制作了一套PPT及含有章后习题答案的手册。作者认为,章后习题是本书不可或缺的部分,所有使用本书的人应该充分利用它们。索取章后习题答案及PPT材料的请求可直接发给本教材外方出版商(service.cn@pearson.com)。

在奥本大学,基于本书第2~11章讲述的控制内容开设有三门课程。其中,第2~8章用于开设一门研究生课程,占4学分系列课程中的1个学分,而北卡罗来纳州立大学则将其用于一门3学时的课程;还可以将2~8章用于20学时的本科生课程,不过这时应删减掉许多内容,如状态变量、改进的 z 变换、非同步采样、闭环同步采样等;第3种课程所获学分为3学分系列课程中的1/3学分,这时应先修前述的一种课程,课程中,先介绍第2章状态变量的内容和第4章的状态变量模型,然后详细讲授第9~11章的现代设计方法。本教材已经在北卡罗来纳州立大学使用,他们用书中第2~11章的内容在近期组织了一门一学季3学分的课程,同时完成了与之配套的PPT。

最后,衷心感谢我们的许多同事、研究生、本科生,以及奥本大学电气工程系的工作

人员，他们促成了本书前三版的出版。特别感谢奥本大学电气工程系系主任 J. 戴维·欧文教授这些年来的帮助和鼓励。还要感谢在北卡罗来纳州立大学电气和计算机工程系的同事和学生们对第 4 版教材的支持和所做的贡献。

奥本大学 查尔斯 L. 菲利普斯
北卡罗来纳州立大学 H. 特洛伊·内格尔
北卡罗来纳州立大学 阿兰尼亚·查克拉博蒂

出版者的话

译者序

前言

第1章 引言	1
1.1 概述	1
1.2 数字控制系统	2
1.3 控制问题	3
1.4 卫星模型	4
1.5 伺服电动机系统模型	5
1.6 温度控制系统	8
1.7 单机无穷大电力系统	9
1.8 小结	11
参考文献	11
习题	11
第2章 离散时间系统及 z 变换	16
2.1 引言	16
2.2 离散时间系统	16
2.3 变换法	17
2.4 z 变换的性质	19
2.5 求 z 变换	23
2.6 求解差分方程	24
2.7 z 反变换	26
2.8 仿真图和信号流程图	31
2.9 状态变量	33
2.10 其他状态变量公式	39
2.11 传递函数	45
2.12 求解状态方程	47
2.13 线性时变系统	51
2.14 小结	51
参考文献	52
习题	52
第3章 采样与重构	59
3.1 引言	59
3.2 采样控制系统	59
3.3 理想采样器	61
3.4 对 $E^*(s)$ 的估计	62
3.5 傅里叶变换结果	64

3.6 $E^*(s)$ 的性质	65
3.7 数据重构	67
3.8 小结	72
参考文献	72
习题	73
第4章 开环离散时间系统	76
4.1 引言	76
4.2 $E(z)$ 与 $E^*(s)$ 的联系	76
4.3 脉冲传递函数	77
4.4 含数字滤波器的开环系统	80
4.5 改进的 z 变换	82
4.6 时间延迟系统	84
4.7 异步采样	86
4.8 状态变量模型	88
4.9 连续时间状态变量回顾	89
4.10 离散时间系统的状态方程	91
4.11 程序计算	94
4.12 小结	95
参考文献	95
习题	95
第5章 闭环系统	103
5.1 引言	103
5.2 初步概念	103
5.3 推导	105
5.4 状态变量模型	109
5.5 小结	115
参考文献	115
习题	115
第6章 系统的时间响应特性	122
6.1 引言	122
6.2 系统的时间响应	122
6.3 系统特征方程	127
6.4 s 域到 z 域的映射	128
6.5 稳态精度	132
6.6 仿真	134
6.7 控制软件	137
6.8 小结	137
参考文献	137

习题	137
第 7 章 稳定性分析	143
7.1 引言	143
7.2 稳定性	143
7.3 双线性变换	146
7.4 劳斯-赫尔维茨准则	147
7.5 朱里稳定性测试	149
7.6 根轨迹	151
7.7 奈奎斯特准则	154
7.8 伯德图	159
7.9 解释频率响应	161
7.10 闭环系统的频率响应	161
7.11 小结	168
参考文献	168
习题	168
第 8 章 数字控制器设计	175
8.1 引言	175
8.2 控制系统特性	175
8.3 补偿	179
8.4 相位滞后补偿	180
8.5 相位超前补偿	184
8.6 相位超前设计方法	186
8.7 滞后-超前补偿	191
8.8 积分滤波器和微分滤波器	193
8.9 PID 控制器	194
8.10 PID 控制器设计	197
8.11 基于根轨迹的设计	202
8.12 小结	212
参考文献	212
习题	212
第 9 章 极点配置与状态估计	219
9.1 引言	219
9.2 极点配置	219
9.3 状态估计	224
9.4 降维观测器	232
9.5 实时观测器	236
9.6 能控性与能观性	239
9.7 具有输入的系统	242
9.8 小结	245
参考文献	245
习题	246

第 10 章 离散时间系统的系统 辨识	250
10.1 引言	250
10.2 静态系统的辨识	250
10.3 动态系统的辨识	252
10.4 黑箱辨识	253
10.5 最小二乘系统辨识	257
10.6 部分零极点已知下的传递函数 估计	261
10.7 递归的最小二乘系统 辨识法	262
10.8 辨识过程中的现实因素	265
10.9 小结	266
参考文献	266
习题	267
第 11 章 线性二次最优控制	270
11.1 引言	270
11.2 二次代价函数	271
11.3 最优准则	272
11.4 线性二次最优控制设计	274
11.5 最小值原理	279
11.6 最优稳态控制	280
11.7 最优状态估计——卡尔曼 滤波	284
11.8 最小二乘函数的最小化	288
11.9 小结	289
参考文献	289
习题	290
第 12 章 案例研究	295
12.1 引言	295
12.2 伺服电动机系统	295
12.3 人工气候室控制系统	300
12.4 飞机着陆系统	303
12.5 新生儿供氧系统	308
12.6 电力系统模型拓扑辨识	316
参考文献	320
附录 I 设计方程	321
附录 II 梅森增益公式	322
附录 III 对 $E^*(s)$ 的估计	325
附录 IV 矩阵	328
附录 V 拉普拉斯变换	333
附录 VI z 变换表	343

1.1 概述

本书讲述一类闭环系统的分析和设计,这种闭环系统是物理的、内嵌数字计算机的系统。数字计算机改变闭环系统的动态性能,例如,获得满意度更高的系统响应。

在闭环系统中,其动力函数(输入)至少部分地取决于系统响应(输出),即输入是输出的函数。图 1-1 给出了一个简单的闭环系统示意。这是一个物理系统,其受控的物理过程称为“控制对象(被控对象)”,执行器含于其中,它通常需要一种称为控制器的装置来驱动,传感器将经驱动后的被控对象的响应检测出来,与期望响应进行对比,对比后所获得的信号差促使被控对象动作,以使信号差降低直至趋于零,这时,将导致实际响应逼近期望响应。一般来讲,如果被控对象的输入仅简单地取期望响应与实际响应的差,则会使闭环系统的响应不尽如人意。为此,必须再引入称为补偿器(控制器,或简单地称为滤波器)的物理环节对这个信号差进行处理。因此,控制系统设计就是进行补偿器的设计。

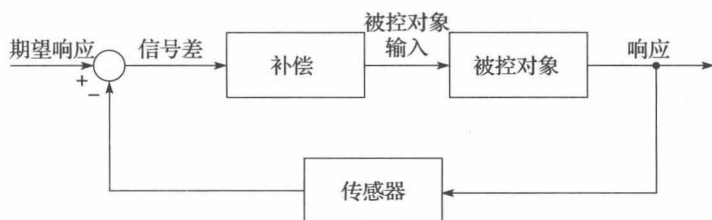


图 1-1 闭环系统

举一个用于飞行员降落飞机的闭环系统的例子。对该例而言,图 1-1 中的被控对象就是飞机,飞机的输入是飞行员控制飞机行为和飞行速度的操作。飞行员是传感器,提供对飞机位置、速度、仪表指示等的视觉感受和对飞机平衡、飞机运动等的感觉。期望响应是飞行员关于所期望飞行路径的想法,补偿是校正飞行员察觉到的飞行路径的偏差。可见,该例的补偿、传感及所生成的期望响应是飞行员所执行的各项工作。显然,这里的补偿一定是飞机的动态函数,即使飞行员能够实施控制操作,仅接受过驾驶战斗机训练的飞行员还是不能胜任降落大型客机的工作。

接下来,讨论图 1-1 示出的典型系统,系统中传感器是一台适宜的测量仪器,补偿工作交给一台数字计算机来完成,被控对象具有动态行为,我们为计算机编程,使其动态行为与被控对象的动态行为具有相同的性质。进一步讲,尽管通常无法决定被控对象的动态行为,但能选择计算机的动态行为,以使闭环系统的动态行为在某种意义上满足要求。例如,如果我们设计飞机自动降落系统,那么首要的是安全着陆,且其降落过程必须能够被飞行员和所有乘客所接受,因此,不能对飞机过度加压。

本书对经典控制和现代控制的分析和设计方法展开讨论,几乎所有的控制系统分析与设计方法均适用于线性时不变离散时间系统模型。线性系统可用叠加原理。设系统对输入 $x_1(t)$ 产生的响应(输出)为 $y_1(t)$,对输入 $x_2(t)$ 产生的响应(输出)为 $y_2(t)$,那么,如果该系统是线性的,则根据叠加原理,系统对输入 $[a_1x_1(t) + a_2x_2(t)]$ 产生的响应(输出)便为 $[a_1y_1(t) + a_2y_2(t)]$,其中, a_1 、 a_2 为常数。所有的物理系统本质上是非线性的。然而,

如果系统中的信号仅在一个小范围内变化,就可以使用线性方法分析这一系统的响应。尽管现有的分析和设计方法仅适于线性系统,我们还是会讨论到一些系统的非线性效应问题。

如果系统参数不随时间变化而变化,则称该系统为时不变系统。空间飞行器的助推器是一个时变系统的例子,其燃料以一个已知的速率不断地消耗掉,其间,飞行器质量将随时间的推移而下降。

离散时间系统中的信号仅为离散时间瞬间的取值,而所有信号取值随时间变化而连续变化的系统则称为连续时间系统,或称为模拟系统。

本书谈及的系统补偿器(控制器)是一种数字滤波器,它履行传递函数的职责。第2章到第9章,以及第11章介绍数字控制器的传递函数的设计,一旦获知了传递函数,便要实现基于数字计算机的算法编程。第10章介绍系统辨识方法,以实现对被控对象的动态行为建模。第12章给出一些数字控制系统的设计案例。

下面举一个数字控制系统的例子,然后给出闭环系统中三类典型被控对象的描述式。

1.2 数字控制系统

我们以飞机自动着陆系统为例,引出数字控制系统的基本结构。这个系统的设计很像美国海军当今航母上使用的飞机自动着陆系统^[2],不过,这里仅涉及对该系统的简单描述。

图1-2所展现的就是这一飞机自动着陆系统,它由三个基本部分组成,即飞机、雷达装置和控制单元。其中,雷达装置用来测量飞机的纵向及横向的近似位置,并将测量结果发射给控制单元,控制单元根据输入的测量值计算出适当的间距,将飞行命令发射给飞机自动驾驶仪,从而依次使飞机做出相应的飞行动作。

图1-2中的控制单元实际上是一台数字计算机,其横向控制系统和纵向控制系统的工作是相互独立的,分别用来控制飞机的横向位置和纵向位置。就是说,倾斜命令影响的是飞机的横向位置,俯仰命令影响的是飞机的纵向位置。为简化起见,接下来仅讨论其中的横向控制系统。

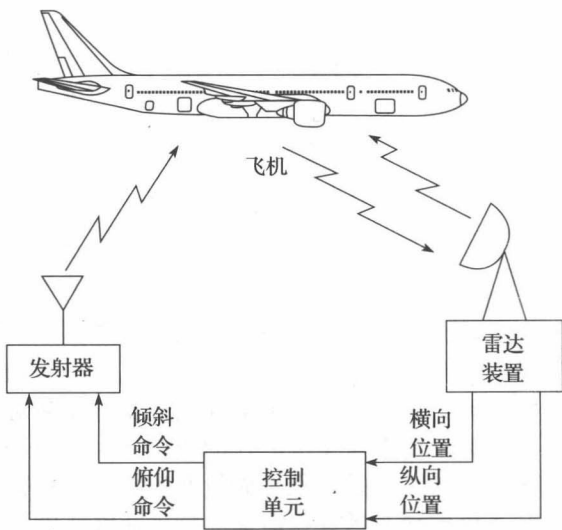


图 1-2 飞机自动着陆系统

横向控制系统的框图由图1-3给出。飞机的横向位置 $y(t)$ 为飞机距跑道中心延长线的水平距离,控制系统力图使 $y(t)$ 为 0。雷达装置每 0.05s 测一次 $y(t)$, 得到 $y(t)$ 的采样 $y(kT)$, 其中, $T=0.05s$, 称为采样周期, $k=0, 1, 2, 3, \dots$ 。数字控制器对这些采样值进行处理并产生离散的倾斜命令 $\phi(kT)$, 飞机上的数据保持器将最近收到的命令倾斜值 $\phi(t)$ 持续维持到下一个命令值的到来, 也就是说, 倾斜命令值每 0.05s 更新一次, 飞机对这些命令的响应就是改变它的横向位置 $y(t)$ 。

图1-3中有两个不希望出现的额外输入(称为干扰)。第一个是风 $w(t)$, 风会在一定程度上影响飞机的位置。第二个干扰输入是雷达噪声, 源于雷达无法给出飞机位置的精准测量, 从而导致在飞机位置的测量值与实际值之间出现差异。理想传感器是不存在的, 因此, 控制系统中的传感器噪声总是不可避免的。

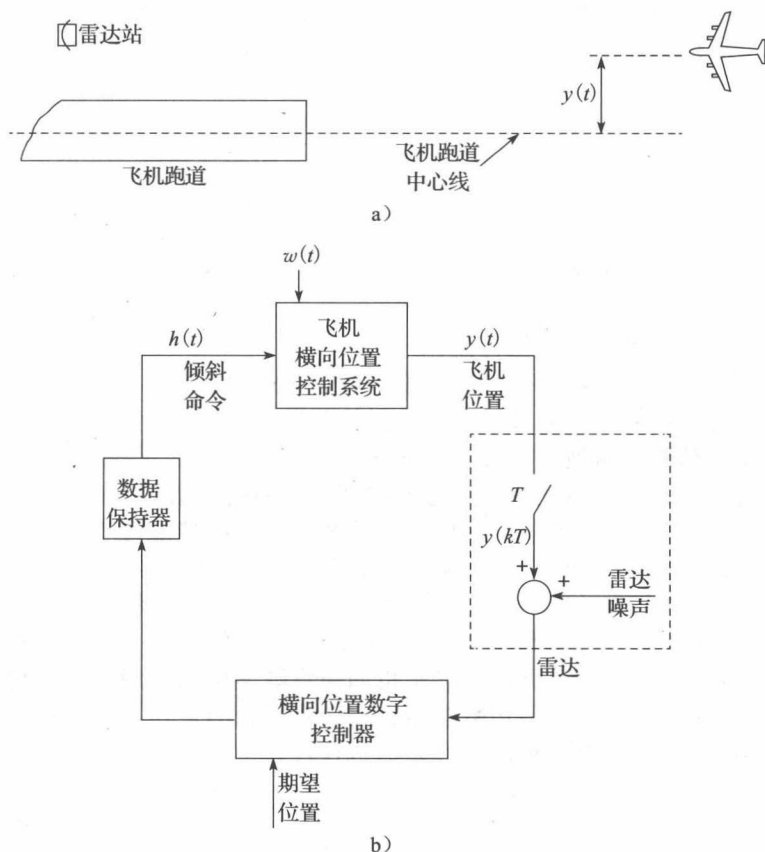


图 1-3 飞机横向位置控制系统

设计上述系统所面临的问题是如何在风及雷达噪声的干扰下，依然将 $y(t)$ 的变化维持在一个较小的级别上。此外，飞机的响应行为必须在一定程度上使飞行员所能承受，同时也不能对飞机体过度施压。

为了完成此项设计，必须了解飞机所承受的风、倾斜命令输入 $\phi(t)$ 与飞机的横向位置 $y(t)$ 之间的数学关系，这一数学关系可称为飞机的数学模型，或简称为飞机模型。例如，麦克唐纳-道格拉斯公司的 F4 型飞机的横向位置系统模型是一个九阶非线性常微分方程^[3]。对此，倾斜命令 $\phi(t)$ 保持较小的幅值，以使系统的非线性不再明显，并使这个九阶非线性常微分方程所描述系统模型可用于系统的设计。

控制系统设计者的任务是明确指出数字处理器欲实现怎样的处理。会涉及飞机的九阶函数模型、预计的风的输入、雷达噪声、采样周期 T 和所期望的响应特性。本书第 8 章、第 9 章，及第 11 章将谈到数字控制器的多种设计方法。

九阶飞机模型过于复杂，不适合作为本书的例子，对这一模型的研究也已超出本书的范畴。因此，为了说明建立物理系统模型的历程，本章将介绍四个简单而常见的控制系统的数学模型，其中的两个系统与位控相关，一个与温控相关，第四个涉及的则是电力系统的单机无穷大模型的电力控制问题。第 10 章将介绍如何通过对物理系统输入输出的测量，建立其模型的方法。

1.3 控制问题

可以这样来谈控制系统：闭环结构或反馈手段可实现对一个物理系统或物理过程的精准控制。系统中，称为响应的输出变量(信号)受到误差信号的调节，这个误差信号是关于

系统响应和期望响应之间差异的测量值,其中,系统响应由某一传感器所感知。

一般来讲,为了满足一定的控制规格,需要用控制器来处理误差信号。这些控制规格可以是(但又不限于此):

- 1) 抗扰能力;
- 2) 稳态误差;
- 3) 瞬态响应;
- 4) 对被控对象参数变化的敏感度。

待解决的控制问题一般包括:

- 1) 选择用于测量所需反馈信号的传感器;
- 2) 选择驱动控制对象动作的执行器;
- 3) 研发被控对象、传感器和执行器的模型(数学方程);
- 4) 在所给模型及控制规格的基础上,进行控制器设计;
- 5) 先通过系统仿真,再通过物理系统测试,对其设计进行分析性评估;
- 6) 重复上述过程,直到得到令人满意的物理系统的响应结果。

初次的设计不能通过物理系统测试的原因是数学模型的精准性不够,这时,控制工程师必须反复上述设计过程,其间,需要采用所有可能的办法对系统进行改进。在这一设计过程中,对物理系统进行实验时所产生的直觉往往会起到重要的作用。

图 1-4 给出了这个数学分析与物理系统设计过程的关系^[4]。本书将讨论该图中各阶段,需要强调的是,其中概念层面的内容是指如何将数学概念应用到数学模型上。在实际设计时,所面临的主要难题是如何用数学语言完成对问题的表述,以及如何针对客观的物理世界诠释数学解,其间,常常要用到许多的迭代过程。

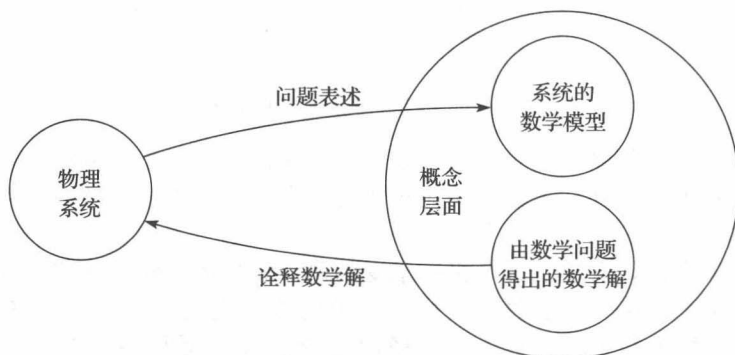


图 1-4 物理系统的数学解

在进行系统设计时,有些早先列出的步骤可以略去,这取决于系统的特点以及设计者的经验。实际上,许多控制系统选用的是标准控制器,并依靠经验确定控制器的参数,将规定好的方法一步步地直接用于物理系统,而不伴随数学模型的构建和使用,这种方法对有些控制系统非常奏效,有些则不然。例如,空间飞行器的控制系统就不能如此设计,该系统必须在第一时间就使空间飞行器状态良好。

本书采用数学的方法展开对控制系统分析与设计问题的讨论,在特定的控制系统的设计问题上,这些方法具有参考价值,但也不尽然。不过,本书采用标准控制器,将分析方法上升到控制系统设计的概念层面,同时给出每个标准控制器的应用。

1.4 卫星模型

卫星姿态控制系统属于物理系统,我们将其选作首例,来介绍如何建立物理系统的数学模型。设卫星为圆形,为其配置的推进器如图 1-5 所示。图中, $\theta(t)$ 为卫星的偏航角。

卫星推进器需要对卫星实施三维姿态控制,因此,除了要控制图示的偏航角之外,还要控制卫星的俯仰角和滚转角。在这里,我们仅介绍偏航角控制系统。

卫星运转时,被激活的推进器将产生转矩 $\tau(t)$ 。就是说,在图 1-5 所示卫星中,两个被激活的推进器将通过转矩减小 $\theta(t)$,而另两个推进器则有使 $\theta(t)$ 角增大的趋势。

考虑到卫星为刚体,且在其工作环境中摩擦力几乎为零,因此,可写出如下关系式:

$$J \frac{d^2 \theta(t)}{dt^2} = \tau(t) \quad (1-1)$$

式中: J 为卫星关于偏航轴的转动惯量。

下面推导其传递函数。设 $\theta(t)$ 和 $\tau(t)$ 的初始值为 0, 对式(1-1)进行拉普拉斯变换, 得:

$$Js^2 \Theta(s) = T(s) = \mathcal{L}[\tau(t)] \quad (1-2)$$

我们称一个对象的传递函数为其输出变量 $\theta(t)$ 的拉普拉斯变换与输入变量 $\tau(t)$ 的拉普拉斯变换之比, 记为 $G_p(s)$, 于是由式(1-2)可得:

$$\frac{\Theta(s)}{T(s)} = G_p(s) = \frac{1}{Js^2} \quad (1-3)$$

关于拉普拉斯变换的简要介绍请见附录 V。

于是, 卫星模型可以由式(1-1)给出的二阶微分方程来说明, 也可以用二阶传递函数(见式(1-3))来表示, 还可以使用状态变量模型, 现在我们就来推导这个状态变量模型。首先将 $\theta(t)$ 定义为变量 $x_1(t)$, $x_1(t)$ 的微分定义为变量 $x_2(t)$, 即

$$x_1(t) = \theta(t) \quad (1-4)$$

$$x_2(t) = \dot{x}_1(t) = \dot{\theta}(t) \quad (1-5)$$

将式(1-1)和式(1-5)进行联立, 得

$$\dot{x}_2(t) = \ddot{\theta}(t) = \frac{1}{J} \tau(t) \quad (1-6)$$

式中: $\ddot{\theta}(t)$ 表示对 $\theta(t)$ 求关于时间 t 的二阶导数。

将式(1-5)和式(1-6)改写成如下的向量-矩阵形式(参见附录 VI):

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1(t) \\ \dot{x}_2(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{1}{J} \end{bmatrix} \tau(t) \quad (1-7)$$

式中: $x_1(t)$ 和 $x_2(t)$ 称为状态变量。

至此, 我们可以为卫星模型指定三种形式, 分别为式(1-1)、式(1-3)和式(1-7)。关于模拟系统状态变量模型较详细的讨论见第 4 章。

1.5 伺服电动机系统模型

下面我们以一个天线跟踪系统为例, 来推导伺服(定位)系统的模型。在这个系统中, 天线通过旋转实现对飞机的自动跟踪, 而天线由电动机带动, 电动机由经过放大的偏差信号驱动, 这个偏差信号正比于天线所指方向到飞机的视线方向之间的差, 它使电动机朝着降低这一差值的方向旋转。

图 1-6 所示直流电动机为恒定磁场下的电枢控制型电动机, 其中, R_a 和 L_a 分别为电枢电阻和电枢电感, 按照对伺服电动机的惯常做法, 将电感 L_a 忽略, 得电动机反电势 $e_m(t)$ 与电动机轴的角速度 $\omega(t)$ 及电动机反电势 $e_m(t)$ 与电动机轴的位移 $\theta(t)$ 之间的关系^[5], 如式(1-8)所示。

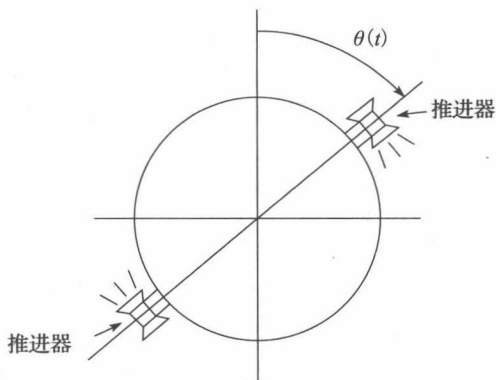


图 1-5 卫星

$$e_m(t) = K_b \omega(t) = K_b \frac{d\theta(t)}{dt} \quad (1-8)$$

式中: K_b 为常数, 与电动机相关。

设电动机转子的总惯性矩为 J , 总黏性摩擦力为 B , 则电动机产生的扭矩为:

$$\tau(t) = J \frac{d^2\theta(t)}{dt^2} + B \frac{d\theta(t)}{dt} \quad (1-9)$$

该扭矩由下式给定:

$$\tau(t) = K_T i(t) \quad (1-10)$$

其中: $i(t)$ 为电枢电流; K_T 为电动机参数。

电枢电路电压约束式为:

$$e(t) = i(t)R_a + e_m(t) \quad (1-11)$$

为了导出输出 $\theta(t)$ 与输入 $e(t)$ 的函数关系,

首先, 将式(1-8)代入式(1-11), 得:

$$i(t) = \frac{e(t) - e_m(t)}{R_a} = \frac{e(t)}{R_a} - \frac{K_b}{R_a} \frac{d\theta(t)}{dt} \quad (1-12)$$

然后, 根据式(1-9)、式(1-10)和式(1-12), 得:

$$\tau(t) = K_T i(t) = \frac{K_T}{R_a} e(t) - \frac{K_T K_b}{R_a} \frac{d\theta(t)}{dt} = J \frac{d^2\theta(t)}{dt^2} + B \frac{d\theta(t)}{dt} \quad (1-13)$$

可将上式改写成:

$$J \frac{d^2\theta(t)}{dt^2} + \frac{BR_a + K_T K_b}{R_a} \frac{d\theta(t)}{dt} = \frac{K_T}{R_a} e(t) \quad (1-14)$$

这就是我们要寻求的模型。该模型是二阶的。如果不忽略电枢电感, 所推出的模型会是三阶的^[6]。

对式(1-14)进行拉普拉斯变换, 可得传递函数为:

$$\frac{\Theta(s)}{E(s)} = G_p(s) = \frac{K_T/R_a}{Js^2 + \frac{BR_a + K_T K_b}{R_a}s} = \frac{K_T/JR_a}{s(s + \frac{BR_a + K_T K_b}{JR_a})} \quad (1-15)$$

这个传递函数在本书的多个举例中均会用到。

按照前述方法, 同样可导出这个系统的状态变量模型。即令

$$\begin{aligned} x_1(t) &= \theta(t) \\ x_2(t) &= \dot{\theta}(t) = \dot{x}_1(t) \end{aligned} \quad (1-16)$$

由式(1-14), 可得:

$$\dot{x}_2(t) = \ddot{\theta}(t) = -\frac{BR_a + K_T K_b}{JR_a} x_2(t) + \frac{K_T}{JR_a} e(t) \quad (1-17)$$

其向量-矩阵形式为:

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1(t) \\ \dot{x}_2(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & -\frac{BR_a + K_T K_b}{JR_a} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{K_T}{JR_a} \end{bmatrix} e(t) \quad (1-18)$$

1. 天线定向系统

我们把自动控制装置(简称伺服电动机)定义为能够控制机械定位(定向)的系统。那么天线定向需要两套伺服系统, 如图 1-7 所示。图中, 基座顶视图给出偏转轴控制系统的解释, 其偏转角 $\theta(t)$ 由电动机和齿轮系统控制, 齿轮系统是实施控制的执行器, 示于基座侧视图内。

俯仰角 $\phi(t)$ 示于侧视图上, 该角度由电动机和齿轮系统实施控制, 作为执行器的齿轮

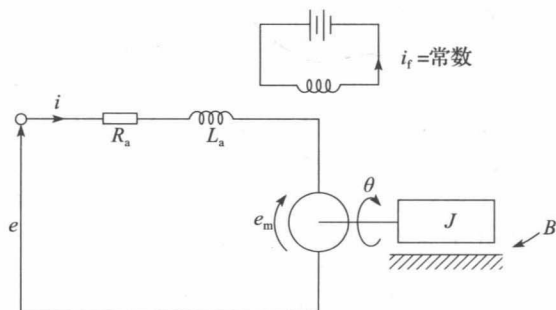


图 1-6 伺服电动机系统

系统安装在基座内部，未示于图 1-7 中。

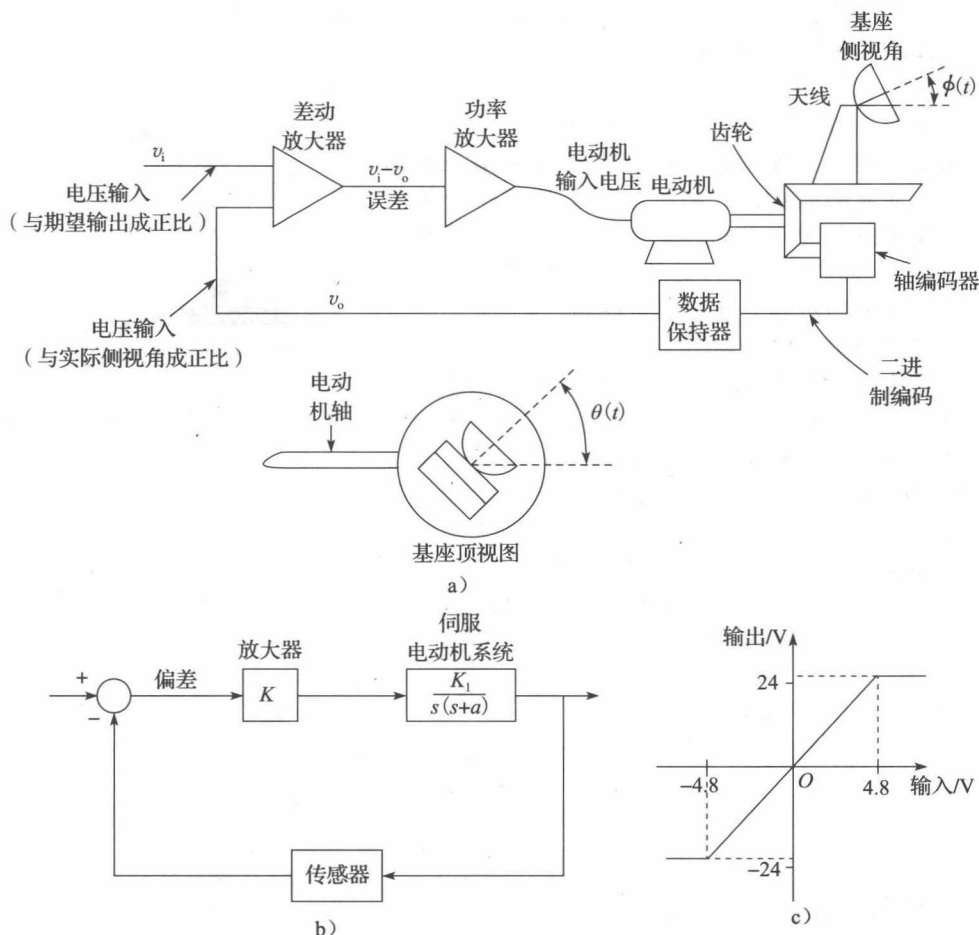


图 1-7 伺服控制系统

下面，我们仅来讨论偏转轴控制系统的问题。系统中，电动机带动天线和传感器旋转，传感器选用轴数字编码器，该编码器对轴转动的角度进行编码，并以二进制数的形式输出，这个二进制数与轴的转动角度成正比。可用 D/A(数/模)转换器将此二进制数转换成电压 $v_o(t)$ ，电压 $v_o(t)$ 自然也与轴的转动角度成正比。后面我们将给出直接将二进制数传送到数字控制器的一些例子。

在图 1-7a 所示视图中，电压 $v_o(t)$ 与天线的实际偏转角度成正比，电压 $v_i(t)$ 与天线的期望偏转角成正比，两个正比例系数相等。如果实际的偏转角度与其期望值不同，则误差电压 $e(t) \neq 0$ ，放大器将这个不为 0 的电压放大后送入电动机，引发电动机轴沿降低误差电压的方向转动。

图 1-7b 给出了上述系统的框图，考虑到误差信号的功率通常较弱，加入功率放大器对其放大，然后再去驱动电动机工作。不过这会导致非线性问题的出现，原因是放大器有一个输出电压的最大限度，此后放大器会处于饱和状态。设放大器的输入输出特性曲线如图 1-7c 所示，可求得其线性增益为 5，最大输出电压为 24V。当输入为 4.8V 时，放大器达到饱和，因此，当误差信号的模值大于 4.8V 之后，系统处于非线性状态。

对于许多控制系统，我们会竭尽全力确保其运行于线性区域。而对于有些系统，我们会有意识地设计出一些非线性的操作。例如，在上述伺服系统中，必须为电动机提供最大电压以获得最大的响应速度，于是当大的误差信号来临时，为了获得快速响应，我们宁肯