

21世纪电子电气工程师系列

自动控制

双色

〔日〕 正田英介 主编
春木 弘 编

ART 21
电子电气工程师

科学出版社

OHM社

21 世纪电子电气工程师系列

自动控制

〔日〕 正田英介 主编 春木 弘 编
卢伯英 译



图字:01-2000-3686 号

Original Japanese edition

Arute 21 Jidou Seigyo

Edited by Hiromu Haruki

Copyright © 1998 by Hiromu Haruki

Published by Ohmsha, Ltd.

This Chinese language edition is co-published by Ohmsha, Ltd. and Science Press.

Copyright © 2001

All rights reserved.

本书中文版权为科学出版社和 OHM 社所共有

アルテ21

自動制御

春木 弘 オーム社 1998

图书在版编目(CIP)数据

自动控制/[日]春木 弘编;卢伯英译. —北京:科学出版社,2001

(21 世纪电子电气工程师系列/[日]正田英介主编)

ISBN 7-03-009268-6

I. 自… II. ①春… ②卢… III. 自动控制 IV. TP273

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2001)第 13655 号

北京东方科龙电脑图文制作有限公司 制作

科学出版社 OHM 出版

北京东黄城根北街 16 号 电话:010-63917

中国科学院印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

2001 年 6 月第一版 开本: A5(890×1240)

2001 年 6 月第一次印刷 印张: 5 1/2

印数: 1—5 000 字数: 165 000

定 价: 15 00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈新欣〉)

主编的话

当今,电子设备已广泛应用于国民经济的各个领域。为了用好这些电子设备,科技人员必须掌握电子技术方面的有关知识。目前,电子技术的应用领域也在迅速扩展,人材需求量很大的状况一直没有改变。因此对电子工程专业的毕业生有必要从应用的角度进行二次培训,也有必要为非电专业的技术工作者学习电气电子技术的基础知识创造更多的机会。

为了适应这一形势的需要,组织编写了“21世纪电子电气工程师系列”丛书,目的是要编写一套全面系统介绍电子电气专业基础知识的,既适用于企业技术人员培训,也适于非电专业技术人员阅读的新型教科书。丛书编委都是在日本有名的电子电气企业中长期从事职工教育培训的专家,丛书结构及各册内容均由编委会讨论决定。

本套丛书的特点首先表现在教材内容紧密联系实际。通过产品和技术模型说明基础知识与产品、系统的关系,通过具体产品的结构和系统中所发生的现象说明其工作原理或理论。另外,本丛书的所有执笔者均为在相应企业中长期从事实际技术工作或从事职工教育工作的专家,所以,具有丰富的实际经验,书中的举例和例题都是他们多年工作经验的结晶。

此外,在电子技术的专业教学中,由于所涉及内容非常广泛,所以以往在对教学内容细化的同时常常忽略了对基础内容的充分消化。本丛书充分注意到了这一问题,从现象入手说明原理,从而保证了基础知识易学易懂,教材内容紧密联系实际。本丛书还可用于大专院校的专业课教学。

由于受产业全球化和社会环境的影响,21世纪的工程学科必将会发生巨大的变化。读者通过对本套丛书的学习,可以对新时代的电子技术知识有较系统的了解,并在各种领域的产品和系统的革新中充分发挥自己的聪明才智。

东京理科大学教授,工学博士

正田英介

21 世纪电子电气工程师系列

编辑委员会

主 编 正田英介（东京理科大学 前东京大学）

编 委 楠本一幸（株式会社东芝）
岛田 弥（三菱电机株式会社）
高木正藏（东芝综合人材开发株式会社）
常深信彦（株式会社日立制作所 日立京滨工业专科学院）
丹羽信昭（东京电力株式会社 综合研修中心）
春木 弘（前富士电机株式会社）
吉冈芳夫（金泽工业大学 前株式会社日立制作所）
吉永 淳（福井工业大学 前三菱电机株式会社）

执 笔 鹭野翔一（三菱电机株式会社）
矶贝裕久（关东学院大学 前株式会社富士电机能力开发中心）
工藤俊明（株式会社东芝）
关口邦男（株式会社东芝）
佐藤隆史（日立计测器服务株式会社）

前 言

现在的多数机械装置和设备是利用电气信号进行控制的。控制有各种各样的方法,而且其精度水平也是各不相同的。本书把在具体工作中得到普遍应用的自动控制基础知识,尽可能地与应用实例相结合,进行了通俗易懂的讲解。

首先,在第1章中,从广泛的意义上阐明了什么是控制,控制的不同种类与在学习控制时遇到的一些问题,以及自动控制的特征和基本方法。第2章介绍了自动控制理论的基本内容,以及这些理论在具体工作中的应用。基于上述内容,读者可以将自动控制的基本方法,与自动控制理论的物理意义结合起来进行学习。

其次,在第3章中将针对实际系统,研究怎样对自动控制进行设计的问题。这里虽然用电动机作为系统的例子,但是笔者认为,通过这个例子读者可以学习到具体工作中的设计思考方法。

现在的控制大多数都采用了计算机控制,由于在控制中采用了计算机,所以信号是一些离散的分离信号,这与对连续信号的处理不同。当对信号进行离散处理时,会产生一些新问题,必须予以关注。因此,在第4章中介绍了计算机控制。在这一章中将学习数字控制的基本理论,以及采用计算机的自动控制的实际构成。

此外,为了尽可能正确地检测出实际的物理量,在自动控制中还必须有检测装置,即传感器,它也是系统中的重要部件。在第5章中,介绍了物理量的检测原理和应用广泛的传感器。

本书第1章由鷺野翔一编写,第2章由矶贝裕久编写,第3章由工藤俊明编写,第4章由关口邦男编写,第5章由佐藤隆史编写。最后由矶贝裕久进行了统编,并对内容进行了调整。

学习本书,最好的方法是循序渐近法。但是如果读者已经具备了一些基础知识,也可以从所需章节开始学习。总之,作者希望本书对学习有关控制的各方人士均有所裨益。

最后,在本书出版之际应当指出,对于本书的总体结构和内容的取舍,系列丛书编委会主编——东京理科大学教授正田英介曾给予了多方指导,另外,欧姆社的有关人士也为本书出版给予了许多帮助,在此向他们一并表示衷心的感谢。

春木 弘

目 录

第 1 章 自动控制的概念

1.1	控制的意义	1
1.2	控制的分类	2
1.3	控制中的常用术语	5
1.4	程序控制	8
1.4.1	程序控制的目的	8
1.4.2	程序控制的应用举例	9
1.4.3	程序控制的理论基础	13
1.5	反馈控制原理	16
1.5.1	反馈控制的目的	16
1.5.2	反馈控制的应用举例	17
1.6	关于其它控制	21
1.6.1	反馈控制的本质	21
1.6.2	研究先进控制的必要性	22
	练 习 题	24

第 2 章 自动控制系统及其设计

2.1	用方框图表示的控制系统	25
2.1.1	方框图	25
2.1.2	画方框图的规则	26
2.1.3	用方框图表示自动控制系统的基本形式	26
2.1.4	方框图的简化	27
2.1.5	关于干扰的方框图	29

2.1.6	传递函数的含义	31
2.1.7	时域与频域间的桥梁——拉普拉斯变换	32
2.1.8	关于简单传递函数	33
2.2	控制系统的响应	35
2.2.1	时域与频域的关系	35
2.2.2	时域方法和频域方法在自动控制中的应用	39
2.2.3	自动控制系统的稳定性	41
2.2.4	自动控制系统的各种性能	42
2.3	控制系统的设计步骤	46
2.3.1	自动控制系统的的设计步骤	46
2.3.2	传递函数	47
2.3.3	系统的性能要求与稳定性	49
2.3.4	系统运行时的安全性	50
2.3.5	系统的适用性	53
2.4	控制系统的设计	54
2.4.1	传递函数的近似	54
2.4.2	调节器的设计方法	56
2.4.3	普通的调节器	59
2.4.4	系统设计举例	60
	练习题	65

第3章 控制系统的实例

3.1	关于模型化问题	67
3.1.1	模型的建立方法	68
3.1.2	表示电动机模型的方框图	69
3.1.3	可控硅整流器的模型化	71
3.2	电流控制的基本知识	72
3.2.1	绘制电流控制系统的伯德图	73
3.2.2	积分增益与电枢的拐点频率相等时的响应	74
3.2.3	积分增益与电枢的拐点频率相等时系	

统对干扰的响应	74
3.2.4 利用伯德图设计干扰响应的方法	75
3.2.5 改变积分增益时的响应	77
3.3 采用滞后电源的电流控制系统的设计方法	79
3.3.1 求电流控制系统开环传递函数的方法	79
3.3.2 利用伯德图设计控制系统的方法	80
3.3.3 控制增益与响应的关系	81
3.4 速度控制系统的设计	82
3.4.1 速度控制系统的构成	83
3.4.2 求电流控制系统闭环传递函数的方法	83
3.4.3 画速度控制系统伯德图的方法	84
3.4.4 控制增益与响应之间的关系	85
3.4.5 系统对干扰的响应	86
3.4.6 过调量的抑制方法	87
3.5 位置控制系统的设计方法	89
3.5.1 位置控制系统的构成	90
3.5.2 画位置控制系统增益曲线的方法	92
3.5.3 比例增益与响应之间的关系	93
3.5.4 轨迹控制中的跟踪性研究	94
3.5.5 在位置控制中限制目标值变化的方法	95
练习题	96

第4章 计算机自动控制

4.1 数字控制的基本知识	98
4.1.1 模拟控制与数字控制	98
4.1.2 计算机的基本构成	101
4.1.3 数字控制中的信号处理	102
4.1.4 PID 控制的操作量运算	103
4.1.5 采样周期的设定	106

4.2	用微型计算机实现的控制系统	108
4.2.1	电动机的微型计算机控制特征	108
4.2.2	由微型计算机构成的电动机控制系统	109
4.2.3	由微型计算机实现传递函数	110
4.2.4	利用定点运算的控制信号处理	112
4.3	计算机控制系统的构成	114
4.3.1	控制系统构成的机器特性	115
4.3.2	计算机控制系统的构成	116
4.4	计算机控制的实例	120
4.4.1	钢板厚度的控制	121
4.4.2	板厚控制系统和功能分配	122
练 习 题		126

第 5 章 自动控制的传感器

5.1	传感器的基本知识	127
5.2	位移、速度和加速度的检测	128
5.2.1	位置和位移的检测元件	129
5.2.2	速度传感器和加速度传感器	136
5.2.3	其他传感器和检测元件	137
5.2.4	伺服系统举例	143
5.3	过程量的检测	143
5.3.1	流量的测定	144
5.3.2	压力的测定	146
5.3.3	温度传感器	148
5.4	传感器的应用	150
5.4.1	使用传感器应注意的事项	150
5.4.2	防噪声对策与接地	151
5.4.3	有关系统安全方面的考虑	154
练 习 题		155

练习题解答	157
-------------	-----

第 1 章 自动控制的概念

本章将介绍控制的意义、控制的种类,以及在控制中使用的术语。因为这些内容是在阅读本书时不可缺少的,所以在本书的一开始,就要对这些内容进行充分的说明。

1.1 控制的意义

也许读者曾经有过,或者正在经历这样的事情,就是与朝夕思慕的异性朋友相处一段时间后,总想按照自己的意愿去支配另一方(例如,当与异性朋友的关系好到一定程度时,根据情况,就会提出结婚)。但是,如果在交往过程中不把握住彼此之间的感情就会疏远起来。这种“如果对某些事情放置不管,任其而行的话,自己也无法估计且把握住事态的发展;如果要达到某种目的,那么,就需要对它进行一些控制”这就是控制的本质上的意义。

控制的英文名为“control”,根据英日辞典的解释,控制的意思有支配、管束、管制、管理、监督,以及抑制、镇压等。如果根据这些译意对控制下定义,还不如前述的定义更容易理解。

下面,利用日常生活中的例子说明上述控制的定义。在工业界中,控制具有特别重要的意义。在钢铁轧制生产线中,需要把在鼓风机或高炉中加热的铁,迅速而精确地轧制成具有规定厚度的板材。在整个过程中须对炉中铁的温度进行控制,为了能冶炼成钢,需对加进生铁中的成分进行控制,此外在轧制过程中,还需对铁板的厚度和张力等进行控制。如能始终保持上述控制,则可以节省能量,并且能够生产出厚度一致的高精度铁板。另外,如果对汽车的发动机进行控制,可以减少燃料消耗,降低公害、为环境保护作出贡献。由此可见,控制在诸如降低燃料消耗、减小公害、

保护环境等，人们难以看到的地方也都起到了良好的作用。因此，当今脱离控制谈论产业已经是不可能的事情了。

1.2 控制的分类

在讨论了控制的意义之后，我们来介绍控制的分类。关于控制的分类方法，存在着各种不同的观点。有人认为应以被控制的对象种类为基础进行分类，也有人认为应以控制系统(施加控制的全部结构)的构成及其设计方法为基础进行分类等等。以什么为基础进行分类，也就决定了系统的分类名称。首先，若以控制系统的构成为基础进行分类，则可以分为开环控制和闭环控制两大类，如图 1.1 所示。

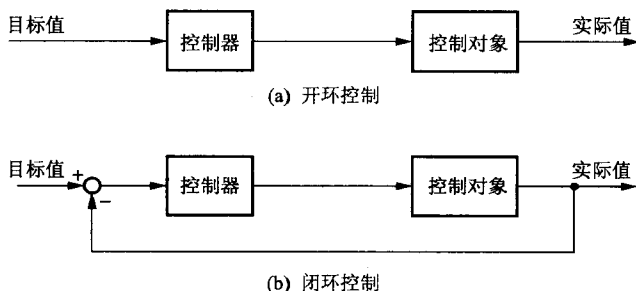


图 1.1 开环控制与闭环控制的功能方框图

图中的各个方框分别表示一种功能，把它理解成随着时间的流逝，信号从左到右方向移动。在开环控制中不存在从右到左的逆向流动信号，随着时间的推移，信号只能向右方流动。与此相反，在闭环控制中，存在着信号从右到左的反向流动的情况，因此，这时显然存在着闭合回路。环路开启(即控制系统中没有环路)的控制，称为开环控制；环路闭合(即控制系统中有环路)的控制，称为闭环控制。

其次，我们以控制对象的种类为基础进行分类。下面，对在控制的定义中引用过的例子，进行如下考虑。第一种情况，讨论关于男女双方结婚

前的流程控制。例如，这时的流程可以表示如下：

- ① 男女双方彼此好感的程度，已经达到了想要结婚的地步，即男女双方之间有充分的吸引力。
- ② 提出结婚申请，男女双方确认结婚意愿。
- ③ 预订结婚礼堂，办理各种手续(邀请函和赠送给客人的礼品等)。
- ④ 举行结婚仪式。

把这样的一种事件(结婚)，按照自己的意愿让它进行下去的过程就是一种流程控制，称为程序控制。通常，程序控制由开环控制来实现。

第二种情况，体现在上述流程①中。即男女双方各自把表示对方对自己好感程度的量，与自己预先的目标量进行比较，并以其符合程度进行控制。在这种情况下，通常是一面将控制结果与自己预定的目标进行比较，看它们是否一致，一面进一步实施控制。然后取控制结果(实际值)与目标(目标值)之间的差值，并根据差值的大小，进行相应的控制。通常目标值标于图 1.1 的左面，实际值则标于右面。于是为了获取目标值与实际值的差值，需要把实际值反馈到左面求其差值，即必须构成图 1.1(b)所示的回路。因为这种控制必然会变成闭环控制，所以特别对控制对象以量控制时，常常称其为反馈控制。综合上述内容，可以表示成表 1.1。在表 1.1 中，关于前馈控制到目前为止尚未进行说明。属于开环控制的前馈控制方法，主要用于需要避免反馈控制带来的缺点的场合。实际上，在现实的控制中，往往将前馈控制与反馈控制各自的特点结合在一起进行。

表 1.1 控制的分类

系统的构成		控制对象	
		流程、条件、时间	量
构成	开环控制	程序控制	前馈控制
	闭环控制		反馈控制

例如，对于汽车发动机来说，即使在一个循环中出现了燃烧失败(失火)现象，那么也不能按规定排出尾气(具体地说，HC 的排出量将超过规定值)。因为空气燃料比(空气与汽油的混合比)过大或者过小均会造成失火，因此，利用反馈控制补偿空气燃料比进而避免上述现象的想法是错误

的。为此，通过前馈控制来尽量确保希望的空气燃料比，通过反馈控制修正一些微小偏差。恰好，前馈控制可以进行粗调整，反馈控制可以进行微调，两者分别承担不同任务，从而可以使两者的特点互为补充，融合为一体。在出现结果前需要时间的机械系统的控制对象中，大都采用了前馈控制与反馈控制的并用形式。与此相反，在电气系统的控制对象中，由于它们出现的比较早，所以大多数场合只采用了反馈控制。

在表 1.2 中，对表 1.1 中的程序控制和反馈控制进行了对比说明。

表 1.2 自动控制的分类和定义

控制的种类	定义	控制的例子
反馈控制	通过过程中的反馈量与设定值进行比较，将过程中的某一个量保持在一定值上	• 速度控制 • 定位控制 • 温度控制 • 压力控制 • 流量控制
程序控制	按照预先确定的顺序，或者按照一定逻辑确定的顺序，逐次对程序控制的各个阶段进行控制	
	(1) 顺序控制 使机器按着制定的操作顺序运行的控制	• 马达和机械的顺序启动 • 霓虹灯广告
	(2) 条件(连锁)控制 若设定的条件成立时，使机器运行的控制	• 一般机械的控制
	(3) 时间控制 某台机器的操作经过规定的时间后，使下一个机器运行的控制	• 交通信号机 • 洗衣机

除此之外，用于控制的信号(例如图 1.1 中的箭头)还可以区分为向量和标量两类。前者称为**多变量控制**。像生产线那样的大规模控制系统，大多数都是多变量控制。即使在汽车的发动机控制中，例如当发动机产生转矩时，其大小将随前面提到的空气燃料比，每转一圈所吸入的空气量，以及点火时间等三个量而发生变化。因此，对发动机转矩的控制，就是多变量控制。实际上，每转一圈吸入空气量的调整是通过对节流阀的驱动实施的，而点火时间是在同一空气燃料比条件下获得最大转矩为前提被控制的，所以实质上只要控制空气燃料比，使其变为理想的空气燃料比时，控

制就变成单输入单输出控制。

1.3

控制中的常用术语

下面，对在控制中常用到的基本术语加以说明。也许有些读者可能会厌烦对这些术语的定义，但是在进行控制(设计控制系统)时，如果不熟悉这些术语，有可能会犯一些意外的错误。这里我们以前面介绍过的闭环控制为例，对有关术语加以说明。正如前面讲过的那样，图 1.1(b)表示了反馈控制系统的构成。图 1.2 是对图 1.1 的更为详细的描述。这个图就是我们最后要得到的方框图。所以读者把这一图理解为，它只表示了方框的输入输出关系，以及信号的和与差的关系。

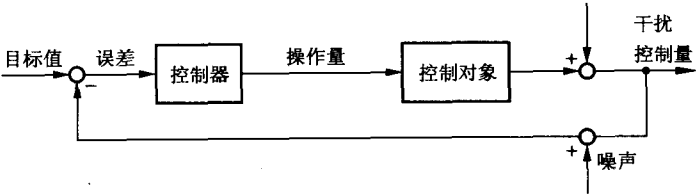


图 1.2 控制系统的功能方框图

在表 1.3 中，结合第 1 节中例子列出了各种术语的定义和对应于图 1.2 中术语的实际例子。

表 1.3 术语的定义和举例

术 语	定 义	举 例
控制量(控制输出量)	被控制的物理量	对异性的好感程度
操作量(控制输入量)	为了操作控制量而进行操作的物理量	收入，人品等
控制对象	输入端有操作量，输出端有控制量的物理对象	男女双方
目标值	对控制量的期望值	对异性好感程度设定的目标

续表 1.3

术 语	定 义	举 例
误差	(目标值——控制量)的实际值	
干扰	对控制产生影响,但不可能控制的任意物理量	异性的感情,生活经验,其他追求者等
噪声	干扰的一种	

首先,我们称被控制的量为**控制量**(或者称控制输出量)。在前面举过的例子中,男女双方的好感程度为控制量;其次,把控制量的期望值称为**目标值**。在前面举过的例子中,追求异性者(进行控制的人;控制系统的设计者)心目中拥有的好感度,就是系统的期望值。**操作量**(或控制输入量)是使控制量进行变化的物理量。在前面举过的例子中,能使好感程度发生变化的物理量,例如有追求异性者(进行控制的人)的收入和人品等,就属于这类物理量。所谓干扰是对控制量发生影响的任意外部因素(通常不能进行控制),如异性的感情和生活经验,以及其他追求者的存在等。误差只是在反馈控制中予以定义的,它是以目标值与控制量实际值之间的差值表示。控制对象是具有作为输入的操作量及作为输出的控制量的被控制的物理对象。在前面举出的例子中,异性就是控制对象。

表 1.4 控制方式

术 语	定 义
稳态误差	稳态状态下残留的控制量与目标值之间的误差
快速响应	迅速达到目标值的性能
抗干扰	具有排除干扰影响的能力
鲁棒稳定	控制效果不会因控制对象特性的变化而改变
抗噪声	一种排除干扰的能力,即消除噪声影响的能力

下面,我们对控制方式加以说明。所谓控制方式,就是进行控制的人要达到某种目的而控制的方法,这可以列表说明。表 1.4 表明,控制方式有稳态误差,快速响应,抗干扰,鲁棒稳定和抗噪声等。另外,图 1.3 表示了控制量对阶跃输入的响应。图中不仅表示出了稳态误差、快速响应特性,而且还表示出了过调量。此外,在抗干扰特性方面,图中还表示出了