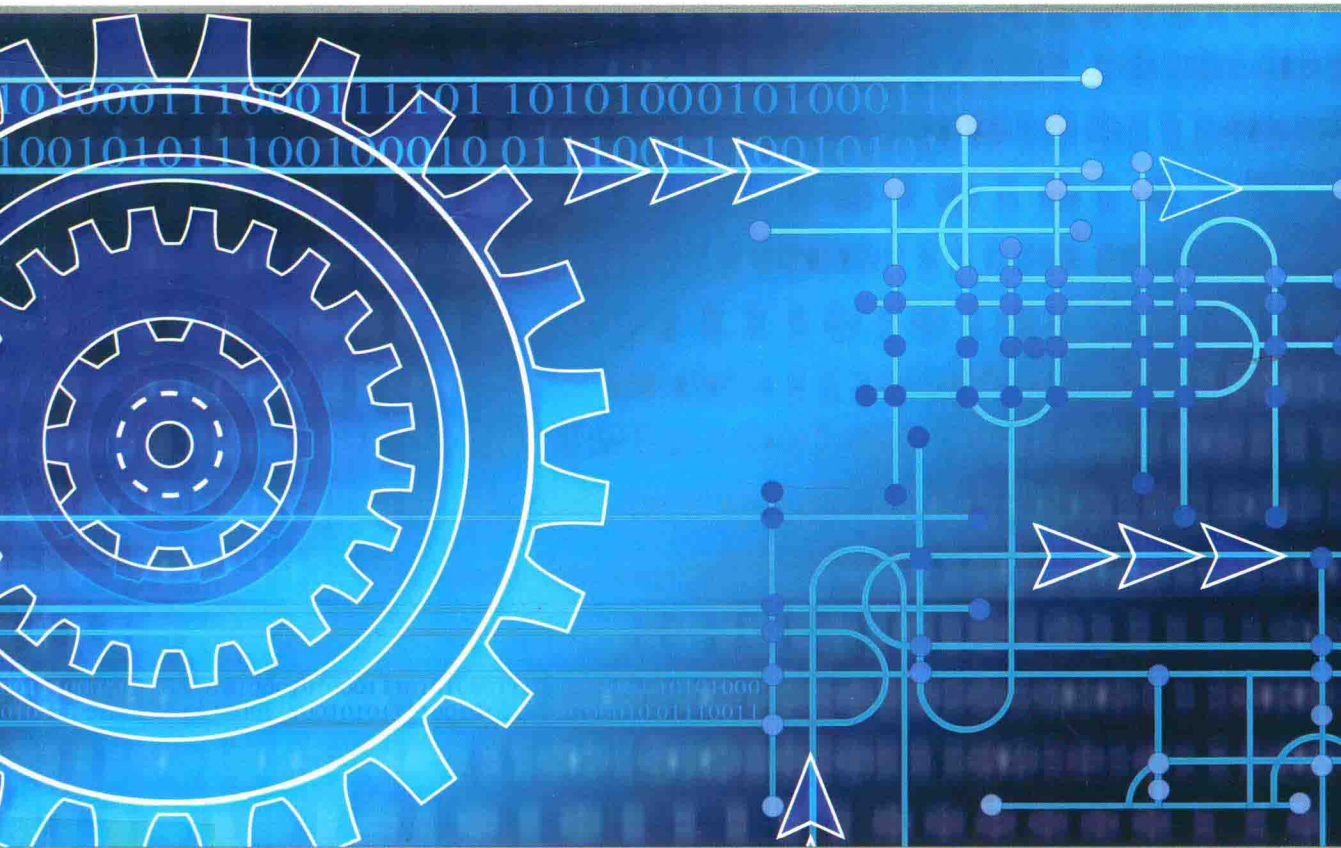


現場で役立つ制御工学の基本

控制技术基础及现场应用

【日】涌井伸二 桥本诚司 高梨宏之 中村幸纪 著

邓明聪 金龙国 译著



控制技术基础及现场应用

現場で役立つ制御工学の基本

【日】 涌井伸二 桥本诚司 著
高梨宏之 中村幸纪

邓明聪 金龙国 译著

著作权合同登记号 图字:15-2016-271 号

Title: Fundamentals of Control Engineering Available to Industry by Wakui, Hashimoto, Takanashi, Nakamura, ISBN 978-4-339-03202-4

Copyright © 2016 by Wakui, Hashimoto, Takanashi, Nakamura.

All Rights Reserved. This translation published under license. Authorized translation from the Japanese language edition, published by Corona Publishing Co., Ltd. No part of this book may be reproduced in any form without the written permission of the original copyrights holder.

本书中文版权为中国石油大学出版社所有。未经出版者书面许可,不得以任何方式复制或抄袭本书的任何部分。

图书在版编目(CIP)数据

控制技术基础及现场应用/(日)涌井伸二等著;
邓明聪,金龙国译著. —东营:中国石油大学出版社,
2016.11

ISBN 978-7-5636-5399-7

I. ①控… II. ①涌… ②邓… ③金… III. ①工程控制论—高等学校—教材 IV. ①TB114.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 259524 号

书 名: 控制技术基础及现场应用

作 者: 涌井伸二 桥本诚司 高梨宏之 中村幸纪

译 著 者: 邓明聪 金龙国

责任编辑: 高 颖 岳为超(电话 0532—86983568)

封面设计: 悟本设计

出 版 者: 中国石油大学出版社(山东 东营 邮编 257061)

网 址: <http://www.uppbook.com.cn>

电子信箱: shiyoujiaoyu@126.com

印 刷 者: 山东省东营市新华印刷厂

发 行 者: 中国石油大学出版社(电话 0532—86981531, 86983437)

开 本: 185 mm×260 mm 印张: 15 字数: 356 千字

版 次: 2016 年 11 月第 1 版第 1 次印刷

印 数: 1—2 000 册

定 价: 38.00 元

在北京举行的 2015 年先端机电系统国际学术会议上,经国际知名控制理论学者、日本国立东京农工大学机电工程学院邓明聪教授引荐,有幸与涌井伸二教授结识,之后通过 E-mail、电话以及直接面谈的形式,与涌井教授及邓教授针对自动控制理论及技术在教学、科研和现场应用中的问题进行了广泛交流和探讨。期间,涌井先生赠送给我一本新出版的日文教材《控制技术基础及现场应用》(現場で役立つ制御工学の基本)。刚看到第 1 章,我就被作者新颖的编写思想和思路深深吸引,并紧接着集中精力用心通读了全书。从该书中不仅能读到作者丰富的工业现场工作阅历和渊博的自动控制理论知识修养、厚重的科研能力,更能感受到一切为了学生、从满足学生学习需求出发的以学为主的教学理念,以及在教材内容选取上所采取的来自于现场应用、服务于现场应用的致用思想。而这恰恰是应用型本科教育和高等职业技术教育的特点。经与国内多位长期从事自动控制原理及技术应用领域教学和科研的同行探讨,大家都觉得这本教材很值得向国内介绍,作为应用型本科和高职教学的教材及从事自动控制技术现场应用人员的参考书。基于此,我和邓教授多次反复商量和推敲,决定在中国翻译出版这本教材的中文版。

本教材以现场应用为主线,通过大量工业现场和实际生活中的自动控制实例,重点介绍自动控制原理的经典控制理论及其现场应用。主要内容包括:反馈控制实例、自动控制的基本概念、自动控制系统的数学模型、自动控制系统的时域分析法、控制系统的频域分析法、控制系统的稳定性、控制系统的设计、前馈控制等。

本教材在编写思路坚持教学内容“来自现场、服务现场”和理论“够用为度”的原则,对传统的学科式教育教学内容进行了较大的精练和压缩,力求做到深入浅出、循序渐进、

通俗易懂,在注重物理概念叙述的同时大量引入工业现场实例,突出理论联系实际。本教材注重培养学生学习的逻辑思维能力、综合运用能力和解决问题能力。教材中设置有“习题”,便于学生巩固所学知识及自学。在分析手段上引入了目前自动控制领域中广泛使用的 MATLAB 软件,强化了经典控制理论中的计算机辅助分析和设计的应用。另外,为了保持日文原版教材的特点,中文版教材在图表的处理上采用中英文混合说明的方式,同时为了保留软件所绘图的信息和仪器设备直接测出图的信息,图中单位采用“[]”的形式表示。

本教材由邓明聪、金龙国共同完成翻译及书稿撰写等工作。在翻译出版本教材过程中,得到了原著作者的真诚帮助和支持,在此表示最诚挚的感谢。

限于译著者水平,书中不足之处在所难免,恳请广大读者提出宝贵意见,以便完善。

译著者

2016 年 6 月

序言

PREFACE

能与本书译著者邓明聪先生相遇相知,并通过他与另一位译著者金龙国先生结识并交往,且因此得以在中国翻译出版《控制技术基础及现场应用》(現場で役立つ制御工学の基本,コロナ社)一书,这的确是一段不可思议的缘分。

大概 20 岁时,我到中国旅行,这是我第一次来中国。旅游目的地是风景如水彩画般闻名世界的桂林。乘船游漓江,入目尽是多彩的山水画,我被两岸的静寂深深地感动了。但是,这次旅行之后我很长时间也没能再去中国。这是因为随着年龄的增长,不得不优先考虑企业的工作。

从企业调入大学后,与邓明聪先生相识来往,并受邓先生之邀,虽说是有些半强迫性的邀请,参加了在中国召开的国际会议并指导学生发表研究成果。但就是从那时开始,事情渐渐变得有趣了。那是一次轻松、愉快的国际会议,期间结识了几位邓先生率直、可敬的朋友们,其中一位便是金龙国先生。同时,还接触到了令人肃然起敬的中国历史,紫禁城的广阔、深厚真是令人惊叹。小说家浅田次郎所写的《苍穹之昴》中描述的西太后隐退后生活的颐和园简直不能用隐居来表示,因为它确实太宽广,远望所谓人工湖的昆明湖,看到的是霞光万丈的宽阔水面。能够在这样一个具有伟大文明的中国出版译著,除了感谢以外无以言表。我觉得这就是一种缘分。

控制原理及技术是一门很有意思的学问,尽管有“在稳定范围内”这样的限制条件,但是设计者可以根据要求驱动被控对象。在传统的控制原理教材中,一开始就用大量的篇幅介绍微分方程式及拉普拉斯变换,因此给人以控制原理就是用数学公式堆起来的感受,亦或觉得课程很难学,导致产生厌恶情绪。甚至我在企业工作时,很多技术人员都是这样认为的。后来,转任大学教授控制原理课程时,发现好多学生不能将数学公

式与实际物理现象很好地联系起来,因此开始构想编写一本新颖的教材,以替代传统的教材,着重介绍控制理论的实际应用。《控制技术基础及现场应用》一书应运而生。

希望中国的学生们通过本译著的学习,从中感受到控制工程的乐趣,也希望中国的技术人员在本书中得到一些有益的启示,为中国的产业发展做出贡献。

原著者代表

涌井伸二

电气工程或机械工程专业一般都设有控制原理这一必修课程,笔者连续多年担任该课程的主讲教师。在研究室里分配进来的学生中,有些是在期中和期末考试中取得优异成绩的学生,有些是考试成绩较差的学生。笔者将研究课题布置给这两类学生,让他们各自实施,发现有不少学生不会应用控制原理的基本知识解决实际问题,而按道理这些是学生理应掌握的,对此笔者常感到有些失望。应用所学知识解决实际问题的能力和课堂学习成绩之间几乎没有关系。那些课堂学习成绩差,但对自然现象具有浓厚兴趣的学生,反而会将研究课题掌握得很好。知识的获取和应用是不同的,因此工学部实施研究室学生分配制,试图使学习工科类专业的学生能够通过研究室的实际工作体会学以致用。对此,大家都理解,但是作为致力于教学的教师来说,希望学生能较好地利用所学的专业术语说明实验结果,希望学生能熟练地应用控制系统分析和设计技术,以便理解各种现象。

为改善上述情况,笔者第一次聚在一起交换意见。结果发现,在控制原理教材中,作为工具的数学公式过多、过杂。笔者认为,若学生掌握不好这些公式,就实现不了控制。另外,过去的控制原理教材中的内容与现实世界中正在运转的实际系统相差甚远,产生不了亲近感。笔者达成了共识,确信上述问题就是学生学不好控制原理内容的最主要原因,并有意识地改变传统模式的教材构成。本书开篇就介绍在我们的生活中有效利用控制技术的实际系统,让学生感觉到控制是一门很有意思的技术。也就是说,我们教材的内容框架体系是首先让学生对控制技术有一个整体的了解,然后依次介绍所

用到的数学背景。笔者确信,这样安排的意义对初学控制原理的学生自不必说,而且一定会对年轻的控制工程师带来极大的帮助。

最后,对为本书的出版竭尽全力的□□□出版社的全体人员表示真挚的谢意。

全体作者
2011 年 11 月

1. 现有的教材中,通常第1章设置为“绪论”,接着第2章就是“数学基础”,而本书中则将第2章定为“反馈控制实例”。首先介绍无须数学背景也能够实现的控制实例,继而介绍涉及数学背景的控制实例。这样设置的目的在于让学习者感觉到学习控制有趣,使他们意识到实现控制并不难,但接下来要实现更加精确的控制则需要控制技术所用的数学基础。

2. 现有的教材中,前面章节介绍大量的基础内容,导致控制技术应用的相关内容到最后才出现。实际上有关应用的内容是最重要的,更是需要大量课时的,但往往被忍痛割爱或上课时讲授不完这些内容。鉴于此,本教材开始对某些不易理解的内容暂且不述,在教材的开篇重点展示控制技术的全貌。

3. 现有的教材中,为了某些理论的理解,通常会举一些侧重与数学相关的例子加以说明,这样做不易使学生产生亲近感,有时还会阻碍他们对问题的理解。因此,本教材尽可能地举一些在现场实际运行的控制系统的例子加以解释。

4. 本教材中,图号、公式号采用“章.节.号”的形式标注,供需要引用时参考,但其引用大多是在节内发生的。例如,图号采用图 2.2.1、图 2.2.2 的形式,公式号采用式 (3.2.1)、式 (3.2.2) 的形式。

5. 图表的标记没有采用统一格式。例如,作为频率响应代表的波特图,其横轴表示角频率或频率,纵轴表示增益或相位。此时,通常的做法是横轴统一标记为角频率 ω 或频率 f ,而在本书中则混合使用,因为某些领域主要用的是角频率 ω ,而某些领域主要用的是频率 f 。另外,讲课时有时需要改变图表的形式,以便获取更多的信息,因而为使学生熟悉各

种形式的图表,也没有必要统一图表的形式。

6. 对本教材而言,图表中的标记通常统一为日文表述,而学术论文则通常用英文来表述。为了让学生习惯各种形式的图表,本书采用日英文混合的表述形式。

7. 章末有习题,书后给出了习题答案。为了让学生自主学习,大多数教材给的是简单的解答,只给出了关键点。这样做的目的在于启发学生自发学习的主动性,提升教学效果。但是,考虑到有些学生做不好习题时有放弃的情况,本书给出了详尽的解答。

8. 各章的主要执笔者为:第1章涌井、高梨;第2章涌井、桥本、高梨;第3章中村;第4章高梨、涌井;第5章涌井、中村;第6章高梨;第7章涌井、桥本、中村;第8章桥本。本书采用统稿人附有通稿意见的初稿,并据此综合全体作者的意见和建议,因此全体执笔者均涉及各章内容的撰写。

第 1 章 绪 论	1
1.1 反馈控制引例	1
1.2 控制工程中的常用术语	2
1.3 反馈控制的必要性	5
1.4 反馈控制与前馈控制的关系	6
第 2 章 反馈控制实例	8
2.1 温度控制	8
2.2 激光头的位置控制	10
2.3 磁力轴承的控制	13
2.4 开关电源的控制及其参数的辨识	16
2.5 大型超重结构体(半导体光刻装置)的辨识与控制	17
2.6 电动机的控制	19
2.6.1 电磁型电动机的控制	20
2.6.2 压电陶瓷马达的控制	25
2.6.3 超声波马达的控制	27
第 3 章 控制系统的方框图表示	31
3.1 方框图的优点	31
3.2 基于微分方程的控制系统建模	32
3.3 微分方程的解法及拉普拉斯变换	34

3.4	拉普拉斯变换基础	36
3.4.1	拉普拉斯变换表	36
3.4.2	拉普拉斯变换的基本性质	38
3.4.3	拉普拉斯反变换	40
3.4.4	初值和终值	45
3.5	基于传递函数的建模	47
3.5.1	传递函数的推导及方框图	48
3.5.2	典型环节的传递函数	49
3.6	动态方框图	51
	习 题	57
第4章	时域响应	59
4.1	时域响应相关术语	59
4.2	时域响应的计算	63
4.2.1	一阶惯性环节的脉冲响应	63
4.2.2	一阶惯性环节的阶跃响应	64
4.2.3	二次振荡环节的阶跃响应	67
4.2.4	极点配置与响应波形	69
4.2.5	零点配置与响应波形	71
4.3	稳态误差	73
4.3.1	稳态位置误差	73
4.3.2	稳态速度误差	74
4.3.3	稳态加速度误差	75
4.3.4	干扰引起的稳态误差	76
	习 题	77
第5章	频率响应	79
5.1	时间与频率的关系	79
5.2	频率响应及其分类	80
5.3	频率响应的读取	82
5.3.1	频率响应和时域响应的对应关系	82
5.3.2	频率响应的实测	83
5.4	波特图的绘制及矢量轨迹	88
	习 题	100
第6章	控制系统的稳定性	102
6.1	控制系统的稳定和不稳定	102
6.2	稳定性和内部稳定性	104
6.3	基于频率特性的稳定判据	105

6.3.1	增益裕量和相位裕量	105
6.3.2	基于波特图的稳定判据	105
6.3.3	基于奈奎斯特图的稳定判据	106
6.4	基于传递函数的稳定判据	111
6.4.1	劳斯稳定判据	111
6.4.2	赫尔维兹稳定判据	112
6.5	其他稳定性评价方法	114
6.5.1	根轨迹	114
6.5.2	实际系统的不稳定原因	120
习 题		120
第 7 章	控制系统的设计	122
7.1	控制系统的分析与设计	122
7.2	基于频率响应与时域响应的评价	123
7.2.1	基于闭环频率响应的评价	123
7.2.2	基于开环频率响应的评价	124
7.2.3	基于时域响应的评价	125
7.3	基于 PID 补偿的控制系统设计与调整	125
7.3.1	PI 补偿器的设计	126
7.3.2	PD 补偿器的设计	129
7.3.3	PID 补偿器的设计	130
7.3.4	PID 补偿的整定方法	133
7.3.5	实用型 PID 补偿器的安装	136
7.4	应用相位超前-相位滞后补偿器的控制系统设计	138
7.4.1	相位超前补偿器的设计	138
7.4.2	相位滞后补偿器的设计	141
7.4.3	相位超前-滞后补偿器的设计	144
7.5	频率校正基础	145
7.5.1	高频段的特性	146
7.5.2	低频段的特性	147
7.6	干扰观测器	147
7.6.1	抑制干扰特性	148
7.6.2	标称特性	149
7.7	内部模型控制方法	152
7.7.1	被控对象不具有积分特性时的内部模型控制方法	153
7.7.2	被控对象具有积分特性时的内部模型控制方法	154
7.8	延迟时间补偿方法	156
7.9	基于陷波滤波器的振荡特性改善	159
7.10	控制器的离散化实现方法	163

7.10.1 基于后向差分法的离散化实现方法	165
7.10.2 基于双线性变换法的离散化实现方法	167
7.11 解耦补偿	171
7.12 性能改善方法	175
习 题	177
第8章 前馈的导入	179
8.1 二自由度控制系统	179
8.2 反馈型二自由度控制系统	181
8.3 连续轨迹跟踪控制系统	184
8.4 抗饱和补偿	187
习 题	190
习题解答	192
附 录	220
参考文献	224

第 1 章

绪 论

本章中,首先以自行车骑行为例,介绍控制的本质;然后,介绍控制工程中常用的技术术语,控制工程是一种通用的技术体系,所用术语必然是抽象的专门术语;最后,阐述反馈控制的必要性。

1.1 >> 反馈控制引例

为了定性地理解反馈控制(feedback control)的动作过程,下面以人骑自行车的场景为例进行分析。如果年龄比较小的孩子要骑自行车,则需要一段所谓的“学习”骑行的过程。在此假设已经学会骑行,参照图 1.1.1 讨论骑自行车时的动作。

从自己家骑行到公司或学校,为了不跌倒并将自行车骑好,需要操作好把手、手刹以及脚蹬子。这些操作是由人的手、脚(肌肉)等“执行机构”(actuator)完成的。但是,人具体操作这些身体部件的过程会视情况而有所不同,这是因为对骑行状况的判断会随眼睛、耳朵等“传感器”(sensor)所获得信息(周边地区的状况)的变化而变化。人通过眼睛获取信号灯和障碍物、行人以及对面来的汽车(自行车)等的信息,通过耳朵获取汽车的行车声音、紧急车辆的警笛、道口的报警声等,以便掌握周边地区的即时状况。

该例中骑行的目的是沿着道路操控好自行车并到达目的地。为此,利用视觉检测当前的骑行位置与目标路径的差异,并在大脑中比较,随后被称为“控制器”(controller)的大脑将瞬间或稍有滞后地“考虑”即将要执行的动作指令。所谓的“考虑”和“反省”是等效的。“考虑”的结果作为指令送到肌肉上,这样人就可以操控自行车顺利抵达目的地。如上所述,人在日常生活中是无意识地实现“控制”的,而且人天生就具备五个感觉器官的“传感器”,以及手、脚(肌肉)等“执行机构”,还具备大脑这一“控制器”。

上面是以人作为例子来说明控制动作,在机电一体化系统中则是利用各种执行机构、传感器和电脑来代替人的手脚、眼睛、耳朵及大脑。可任意操控物体位置、姿势等机械物理量的控制系统特称为伺服系统。反馈控制的定义就是“按人们的意愿控制被控对象”。

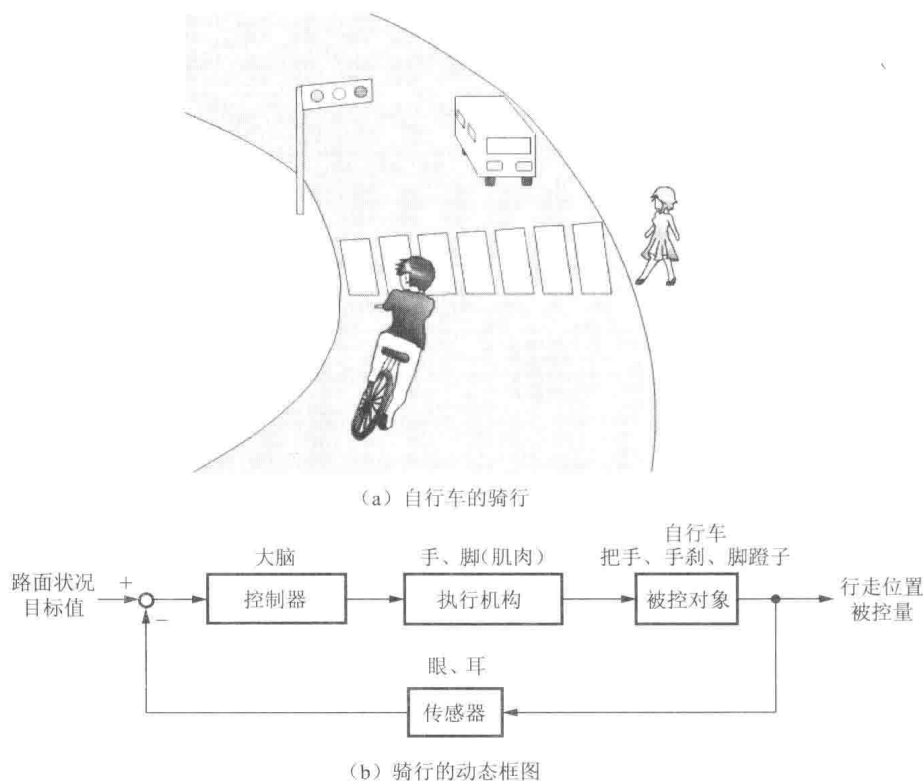


图 1.1.1 反馈控制的实例之一

1.2 >> 控制工程中的常用术语

下面对控制工程中使用的专门技术用语加以说明。例如,定位设备的开发人员是控制定位工作台的,而从事汽车驾驶控制的开发人员或者研究人员是控制汽车的,这不言自明,但控制技术的应用不仅限于工作台和汽车这样的对象。因为是通用性的技术体系,所以控制技术必须使用将不同系统中各个不同的名称经普遍化处理的通用技术术语。技术用语会显得比较生硬,容易使不熟悉控制技术的人产生不适感,控制专家也容易在无意识中把“门外汉”排斥在外。当然,对此也有不同的声音——在融合各种复合技术开发时,即便是正确的,但若过多使用较难理解的控制技术术语,控制技术者自身也将不会被大众所接受,所以对此需要特别注意。

- 图 1.2.1 所示为反馈控制系统的基本构成。参照该图,对技术术语进行说明如下。
- **被控对象**(controlled object)或**设备**(plant):按字面意思,是指要控制的对象物。对机器人开发人员来说,被控对象就是机器人;对飞机开发人员来说,被控对象就是飞机本身。
 - **输入**(input):用来表示信号流入位置的箭头(→),如流入表示控制器、被控对象以及传感器等的方框(参照第 3 章)的信号位置。
 - **控制量**(control input):是指控制输入量或操作量(manipulated variable),并特别称施加到被控对象的输入为控制输入量或操作量。例如,含加热器的温度控制系统中用于加热电热器的功率放大器的输入电压,以及电机控制系统中电流放大器的输入电压等,