

《信息、控制与系统》系列教材

自动控制原理

(上册)

吴麒 主编

清华大学出版社

《信息、控制与系统》系列教材

自动控制原理

(上册)

吴 麒 慕春棣等 编著

主编 吴 麒

清华大学出版社

内 容 简 介

本书是工科大学“自动控制原理”课程的教科书。在处理传统控制理论与状态空间控制理论的关系上,本书既不把二者截然分割,又不勉强“结合”,而采取“数学描述统一,工程研究分开”的方法。在状态空间控制理论的陈述方法上,本书努力避免单调繁冗的数学论证模式,而尽量联系工程实际。这些特点使本书既保持应有的理论水平,又适合于实际教学使用。

本书上册叙述控制系统的数学描述(传统的和状态空间的)和传统控制理论的大部分内容,下册除采样控制、非线性控制外,主要叙述状态空间控制理论和最优控制。

本书可作为工科大学电类专业和其他专业本科生的教科书,也可作为科技和工程人员的参考书。

《信息、控制与系统》系列教材

自 动 控 制 原 理

(上册)

吴 麒 慕春棣等 编著

主 编 吴 麒

☆

清华大学出版社出版

北京 清华园

清华大学印刷厂印刷

新华书店总店科技发行所发行

☆

开本: 787×1092 1/16 印张: 21.5 字数: 509 千字

1990 年 3 月第 1 版 1990 年 3 月第 1 次印刷

印数: 0001—6000

ISBN 7-302-00581-8/TP·205

定价: 4.20 元

《信息、控制与系统》系列教材

出版说明

《信息、控制与系统》系列教材是一套关于信息、控制和系统学科的基本理论和应用技术的高等学校教材。选题范围包括信号和信息处理、模式识别、知识工程、控制理论、自动化技术、传感技术、自动化仪表、系统理论、系统工程、机器人控制、智能控制、计算机应用和控制等方面。主要读者对象为自动控制、计算机、过程自动化、无线电等系科的高年级大学生和研究生，以及在这些领域和部门工作的科学工作者和工程技术人员。

信息、控制与系统科学是在本世纪上半叶形成和发展起来的新兴学科。它们的应用和影响已经遍及众多的部门和领域，贯穿其中的许多思想和方法已用于经济和社会现象的研究，而以这些学科为理论基础的自动化技术的广泛应用更是实现现代化的重要标志之一。这套系列教材，正是在这样的客观要求下，为适应教学和科研工作的需要而组织编写和出版的。它以清华大学自动化系近年来经过教学实践的新编教材为主，力求反映这些学科的基本理论和最新进展，并且反映清华大学在这些学科中科学研究和教学研究的成果。我们希望这套系列教材，既能为在校大学生和研究生的学习提供较为系统的教科书，也能为广大科技人员提供有价值的参考书。

组编和出版这套教材是一次尝试。我们热忱欢迎选用本系列教材的老师、学生和科技工作者提出批评、建议。

《信息、控制与系统》系列教材编委会

一九八七年三月

《信息、控制与系统》系列教材编委会

主 编 常 迥

编 委 常 迥 童诗白 方崇智

韩曾晋 李衍达 郑大钟

夏绍玮 徐培忠

责任编辑 蔡鸿程

前 言

十年来,我国陆续出版了好几种控制原理课程的大学教科书,其中大多数都各有特色,质量很好,满足了“文化革命”后对教材的急需,对培养新一代科技人才起了重要作用,为我国的社会主义教育事业作出了贡献。

十年来,在控制原理课程的教学实践中,不少教师和学生感觉到了一些需要研究的问题。

首先,是怎样处理传统控制理论(常被称为“古典”控制理论)与状态空间控制理论(常被称为“现代”控制理论)这两部分内容的关系。有的院校把这两部分内容分开讲授,互不联系,甚至开成两门不同的课程。有的院校则力图把这两部分内容合并起来,在教学的每一段落都平行地讲授这两种理论的有关内容。这两种不同的处理方法也反映到教科书的编写上:有的教科书把这两部分内容截然分开,有的则力图把它们“结合”起来。按照这两种写法写的教科书,都有写得很好的。

本书编者通过自己的教学实践感到,将这两部分内容截然分开讲授,固然思路比较清楚,但容易使学生以为这两种理论是没有内在联系的,不可互通的;甚至从名称上望文生义,以为其中一种是过时的,应被淘汰的,另一种才是符合现代化需要的。反之,将这两部分内容处处“结合”起来平行讲授,固然强调了它们的联系,但却增加了教师讲课的困难。因为这两种理论的思路和方法事实上都很不相同,硬要把它们处处“结合”,有些地方就难免生硬勉强,有些地方可能会出现“牛刀杀鸡”的情况。

在本书中,编者尝试采用另一种处理方法。这就是:数学描述统一,工程研究分开。编者以为,描述动力学系统运动的各种数学工具,如微分方程,复变函数,矩阵和向量等,都已存在很久,并且有内在联系。用它们描述运动,在学理上容易融通。在讲授动力学系统的数学描述时,可以很自然地把这些方法统一起来讲,使学生对系统的运动规律有统一的深入的认识。另一方面,对控制系统运动的工程分析乃至综合和设计,则是工程技术问题,在历史发展过程中事实上已形成两套系统的方法。勉强地逐章平行讲授两种方法,对学生的学习未必有益处。不如基本上维持历史形成的思路体系,分别讲清,或许教学效果倒还好些。

十年教学实践中感觉到的另一个问题是:状态空间控制理论部分的教学,比较普遍地存在着控制理论与工程实际问题 and 工程实例结合不紧密的情况。在某些教科书中,不少重要的概念和关系停留在数学表达式上。有的甚至摹仿数学教科书的写法,把大部分内容表述为一系列定理。由于这些,状态空间控制理论的教学往往抽象枯燥,师生都感到棘手。这种状况多少与状态空间控制理论引进我国教学不过十年多一点,教学经验总结不够有关。不象传统控制理论在我国工科院校已有三十多年的教学实践,已经积累了较为成熟的经验,理论与工程结合得较好。所以,在控制原理课程的教学,传统部分

与状态空间部分的陈述风格往往迥然不同，形成一个“断层”。

为了改善这种状况，本书编者作了一些努力，试图避免“引理—定理—证明—推论”的单调模式，尽量从工程实例出发引入某些重要的概念和方法。有些次要的证明过程，如果本身不提供新的概念，则予删去。必要的证明也在陈述上力求避免繁冗，有的利用对偶性质加以简化。另外，本书还试图把状态空间控制理论的若干内容（例如关于观测器和鲁棒调节器的部分）用频率域的概念来解释和补充。在讨论解耦控制时，本书采用了逆系统方法这一新的研究成果。

关于最优控制的一章，虽然篇幅有限，编者还是努力在系统地叙述变分法，极大值原理和动态规划等方法及其应用条件以外，也扼要地介绍了时间最优控制器和线性二次型最优控制器的综合设计方法。

虽然本书编者主观上作了一些努力，希望能编出一本有些特色的教科书，但编后回顾，自觉这个希望并未很好地实现。全书缺点不少，也不敢说完全没有错误。希望读者和有关高校师生多向我们批评指教。

本书上册共六个章。除控制系统的数学描述外，讲授传统控制理论的大部分内容。下册共六个章。除采样控制和非线性控制系统外，主要讲授状态空间控制理论和最优控制。

本书第一、二章由吴麒执笔，第三、六和九章由慕春棣执笔，第七、八、十、十一章由杜继宏执笔，第十二章由解学书执笔。全书上册经吴麒校改，下册经吴麒和解学书合作校改。全书并经上海交通大学施颂椒、曹柱中等老师审校和提出许多宝贵的修改意见。编者谨在此致谢。

编 者

一九八九年一月

目 录

前言

第一章 绪论	1
1.1 自动控制	1
1.2 反馈控制的原理	2
1.3 按偏差控制与按扰动控制	6
1.4 反馈控制系统的构成	7
1.5 控制系统的分类	8
第二章 控制系统的数学描述	10
2.1 引言	10
2.2 列写运动方程	11
2.2.1 描述运动的微分方程	11
2.2.2 非线性方程的线性化	16
2.2.3 为复杂对象列写方程组	17
2.2.4 从原始方程组导出单变量微分方程	21
2.2.5 离散时间运动方程	24
2.3 状态空间与状态方程	25
2.3.1 状态向量与状态空间	25
2.3.2 状态方程与输出方程	27
2.3.3 从原始方程组导出状态方程	29
2.4 线性微分方程的解	33
2.4.1 线性微分方程的正规解法	34
2.4.2 线性微分方程的 Laplace (拉普拉斯) 变换解法	39
2.4.3 运动的模态	40
2.5 状态方程的解	43
2.5.1 矩阵指数函数	43
2.5.2 用矩阵指数函数解状态方程	48
2.5.3 状态转移矩阵	51
2.5.4 系统特征值与模态的不变性	55
2.6 传递函数与传递函数矩阵	59
2.6.1 传递函数	59
2.6.2 框图	63
2.6.3 传递函数的极点与零点	65
2.6.4 传递函数极点与零点的相消	68
2.6.5 传递函数矩阵	71

2.7	闭环系统的传递函数	76
2.7.1	框图的变换与化简	77
2.7.2	闭环系统的传递函数	78
2.7.3	闭环系统的传递函数矩阵	82
2.8	基本单元	83
2.9	信号流图	89
2.10	脉冲响应与阶跃响应	91
2.10.1	单位脉冲函数	91
2.10.2	脉冲响应	92
2.10.3	阶跃响应	95
2.11	小结	96
	习题	97
第三章	线性控制系统的运动	106
3.1	引言	106
3.2	稳定性	107
3.2.1	运动的稳定性	107
3.2.2	线性系统的稳定性	108
3.2.3	线性系统稳定的充分必要条件	110
3.2.4	稳定的 Ляпунов (李亚普诺夫) 定义	110
3.2.5	Ляпунов 第一方法	111
3.3	稳定性的 Routh-Hurwitz (劳斯-霍尔维茨) 判据	112
3.3.1	Routh (劳斯) 判据	112
3.3.2	Hurwitz (霍尔维茨) 判据	116
3.4	参数对稳定性的影响	117
3.5	参数的稳定域	119
3.5.1	单参数稳定域	119
3.5.2	双参数稳定域	121
3.6	静态误差	122
3.6.1	静态误差的定义	123
3.6.2	静态误差系数	124
3.6.3	关于静态误差的物理解释	127
3.6.4	关于扰动的静态误差	128
3.7	动态性能指标	130
3.7.1	阶跃响应的几个动态指标	130
3.7.2	误差积分指标	132
3.8	二阶单输出系统的运动	134
3.8.1	二阶系统的阶跃响应	134
3.8.2	二阶系统的动态性能指标	137
3.8.3	二阶系统的脉冲响应	140
3.9	高阶系统的运动	140
3.9.1	高阶系统的二阶近似	141

3.9.2 开环系统小参数对闭环系统动态性能的影响	142
3.10 交连	144
3.11 控制系统的校正	146
3.11.1 串联校正	146
3.11.2 局部反馈校正	150
3.12 小结	151
习题	152
第四章 频率响应法	158
4.1 概述	158
4.2 Fourier (傅立叶) 变换与非周期函数的频谱	160
4.3 频率特性函数	167
4.4 频率特性函数的图象	170
4.4.1 极坐标频率特性图 (Nyquist(乃奎斯特) 图)	171
4.4.2 对数频率特性图 (Bode (伯德) 图)	172
4.4.3 对数幅相特性图	175
4.5 基本单元的频率特性函数	176
4.6 复杂频率特性图的绘制	186
4.7 闭环频率特性图	189
4.7.1 闭环频率特性图的绘制	189
4.7.2 绘制闭环系统频率特性图用的一些工程图表	192
4.8 Nyquist 稳定判据	198
4.8.1 映射定理	198
4.8.2 Nyquist 稳定判据	199
4.8.3 Nyquist 稳定判据应用举例	202
4.8.4 应用逆 Nyquist 图的 Nyquist 稳定判据	210
附录 映射定理的证明	210
4.9 控制系统的稳定裕量	212
4.10 频率特性函数的几个重要性质	215
4.11 从开环频率特性研究闭环系统的动态性能	219
4.11.1 从开环对数幅频特性研究闭环系统的稳定性及静态特性	219
4.11.2 从开环对数幅频特性研究闭环系统的动态性能	220
4.12 小结	231
习题	232
第五章 根轨迹法	238
5.1 根轨迹法的基本概念	238
5.2 根轨迹的基本特性及绘制规则	239
5.2.1 模条件和角条件	239
5.2.2 绘制根轨迹的基本规则	242
5.3 根轨迹绘制举例	250
5.4 闭环零极点的分布与系统性能指标间的关系	262

5.5 根轨迹在控制系统校正中的应用	266
5.5.1 根轨迹的改造	266
5.5.2 按根轨迹校正反馈系统	268
5.6 小结	275
习题	276
第六章 单变量系统的校正与综合	280
6.1 引言	280
6.1.1 控制系统的性能指标	281
6.1.2 各类指标的关系	282
6.2 预期开环频率特性的设计	285
6.2.1 问题的提出	285
6.2.2 开环频率特性的分频段设计	286
6.2.3 中频段的设计	287
6.2.4 高频段的设计	290
6.2.5 低频段的设计	292
6.2.6 尽量利用对象的极点与零点	295
6.2.7 预期开环模型的设计举例	296
6.3 串联校正的综合	298
6.3.1 超前校正	298
6.3.2 滞后校正	301
6.3.3 滞后超前校正	304
6.3.4 基于根轨迹法的串联校正的综合	308
6.3.5 二阶模型的 PID 校正	311
6.4 局部反馈校正	312
6.4.1 局部反馈校正的作用	312
6.4.2 局部反馈校正的综合方法	314
6.4.3 局部反馈校正的优点	316
6.4.4 局部反馈校正综合举例	317
6.5 恒值调节系统的综合	321
6.5.1 恒值调节系统的综合目标	321
6.5.2 恒值调节系统的综合方法	322
6.5.3 恒值调节系统综合举例	324
6.6 顺馈控制	328
6.7 小结	331
习题	332

第一章 绪 论

1.1 自动 控制

从本世纪初以来，特别是从第二次世界大战以来，控制科学与控制技术得到了迅速发展。自动控制极大地提高了劳动生产率和产品质量，推动了现代工农业的巨大进步。在军事上，控制技术有效地提高了武器的精确度和威力。在航天、制导、核能等方面，控制技术更是不可缺少的。

在工业和军事领域中，控制技术的作用是：不需要人的直接参预，而控制某些物理量按照指定的规律变化。

以往复式轧钢机为例。在钢材往复两次通过轧辊的时间间隔里，一方面要使钢材停下，反向，并把钢材拨正后送入轧辊；另一方面必须使轧辊及时停转和反向，并调整到正确的转速，迎接钢材。这许多操作必须互相配合，迅速完成。在人工操作时，难免由于配合得不紧密而造成钢材或轧辊等待。如果每一个轧程多等待1秒钟，一台轧机一年就要少轧几万吨钢。

又如，工业加热炉按照生产要求，其炉温通常应当维持在一定的数值（例如几百度）。而要在经常变化的热负荷下维持炉温为某个数值，只允许很小的误差（例如1度甚至更小），靠人力凭经验调整燃料供给量，就很难保证，甚至造成燃料的浪费，或直接影响产品质量。

在一个电力系统中，对于既定的输电线路，输电功率主要是受限制于输电的稳定性。发电厂因受稳定性限制而不能满容量发电的情况，在我国某些地方以及在其他某些国家都是常见的。采用先进的控制技术提高输电稳定性，使电厂尽量多发电，具有很大潜力和经济效益。

再以雷达高射炮为例。在敌方飞行器飞行时，雷达天线必须时刻旋转，随时自动保持指向敌方飞行器。雷达测出的敌方飞行器方位和仰角数据经过计算机加工并计入射击提前量后，又用来控制高射炮炮身的转动，使高射炮时刻保持瞄准敌方飞行器，随时准备开火。瞄准的角度误差只有几分。如果不用控制技术，这些显然是做不到的。现代的军用飞行器速度很快，炮身又很沉重，用人力直接转动炮身是完全不能适应战争需要的。

又如，要把重达数吨的人造卫星准确地送入位于数百公里高空的预先计算好的轨道和指定的位置，并一直保持它的姿态正确，使它的太阳能电池一直朝向太阳，无线电天线一直指向地球，还要保持卫星内的环境条件正常，使它所携带的各种仪器自动地准确地工作，……。所有这一切都是以高水平的控制技术为前提的。

在上面这些例子中，使轧钢机的轧辊快速下降一个准确的距离，使雷达天线准确地

跟踪一架飞机旋转，等等，都是控制某些物理量（轧辊位置、天线角度等）按指定规律变化的具体例子。使加热炉的炉温保持为常值，当然也算按一种指定的规律“变化”。

应当说，仅仅使某些物理量变化，并不是什么难事。移动轧辊、升降炉温、旋转天线等，都是容易做到的。困难在于要求这些量的变化符合指定的规律。比如说，敌机的飞行方向时刻改变并且事先不知道，而雷达天线又有惰性，如果不采用控制技术，天线的旋转必然经常处于不是大幅度跟不上就是大幅度冲过头的状态中，谈不上精度了。又比如说，工业加热炉的炉门经常启闭，冷工件时时被送进炉中，热工件时时取出去，要在这些扰动的影响下自动增减燃料供给量，以维持炉温近似不变，就比较困难。

控制科学和控制技术还处在继续发展的过程中。从第二次世界大战以来，由于计算机的诞生和迅速发展，由于现代（时间域的和频率域的）控制理论的出现，控制技术一方面不断提高水平，以适应日益复杂、日益精密、难度愈来愈大的控制要求；另一方面又不断扩大应用到国民经济与社会生活的各个部门、各个方面。近年来，控制科学的应用范围已经扩展到生物、医学、环境、经济管理和其他许多社会生活领域。可以毫不夸张地说，控制科学和控制技术已经成为现代化社会的不可缺少的组成部分。

中华人民共和国建立以来，控制技术与科学在中国从无到有，发展得很快。自动化仪表，工业调节器，数字控制技术等的研究和应用都取得了很大成就。在航天工程和核动力工程的控制方面尤其有使世人瞩目的成绩。在控制理论的研究方面也有一些水平很高的工作。但是总的说来，与美国，苏联等发达国家相比，差距仍然很大。建国以来几十年正反两方面的历史经验反复证明，在整个社会主义初级阶段，中国人民的基本任务是发展生产力。这个认识把控制科学的重要性提到了新的高度，同时也对发展控制科学提出了很高的要求。系统地学习和掌握控制理论，为发展社会主义祖国的生产力作出贡献，是控制和自动化方面各有关专业的青年学生和科技工程人员的严肃责任和光荣事业。

1.2 反馈控制的原理

如前所述，控制技术的作用是控制某些物理量按照指定规律变化。为此广泛采用反馈控制。现在举例说明如下。

图 1.1 表示一台发电机 1 向负载供电。由于负载的变化以及其他原因，发电机的端电压 U 时时都在波动。为了把这种波动限制在尽可能小的范围内，一名工人经常监视着电压表 3。当发现端电压 U 偏离规定的数值（称为整定值） U_0 时，就调节变阻器 4，以改变通过励磁绕组 2 的电流 I_f ，使端电压恢复到整定值。这样就可以以某种精度做到使端电压 U 这个物理量按照指定规律变化（在本例中是保持等于整定值），达到控制的目的。

在这个例子中，被控制的对象是发电机，被控制的物理量是它的端电压 U 。上述的控制过程可以这样表述：检测被控制量的数值并与它的整定值相比较，根据二者之间的差值（偏差）而改变被控制对象的某个物理量（本例中是改变励磁电流 I_f ），通过

它影响被控制量，使之向整定值变化。

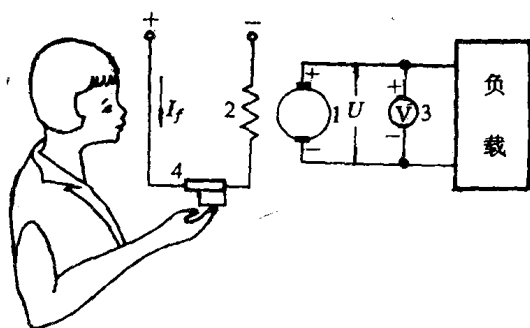


图 1.1

在上述过程中，人们先从被控制对象获取信息，反过头来又把调节被控制量的作用馈送给被控制对象。所以这种控制方法称为反馈控制。在反馈控制装置中，关于被控制量的信息被获得后，经过一些中间环节（电压表、人的眼、脑、手、变阻器、励磁电流等），最后又作用于被控制量自身，使之发生变化。这样，信息的传递途径是一个自身闭合的环，称为闭环。

所以，反馈控制总是通过闭环来实现的。在闭环中，除了被控制对象，还有实现控制的设备，称为控制器。控制器与被控制对象构成一个互相作用的整体。凡是一些对象互相作用，互相制约，组成一个具有一定运动规律的整体，就称为系统。被控制对象与控制器就组成一个控制系统。

既然反馈控制的目的是要消除（或减小）被控制量与整定值之间的偏差，那么不言而喻，控制作用的方向就必须与偏差的极性相反。在本例中，当端电压高于整定值时，调节变阻器的方向必须是使发电机的电势降低；相反，当端电压低于整定值时，则必须使电势升高。为了强调说明这种性质，我们把这样的反馈称为负反馈。如果不采用负反馈而采用正反馈，在端电压太高时却把发电机的电势调高，在端电压太低时却把电势调低，那就与控制的目的背道而驰了。

图 1.1 的控制系统中，控制作用是由人来实现的。它不是一个自动控制系统。

要把图 1.1 的系统改成自动控制系统，就要做以下几件事。

首先要把人手调节变阻器的操作改为用机器完成。为此，可以照图 1.2(a) 那样，采用一台小电动机 5，配以适当的减速传动机构 6，与变阻器相联接。代替人手执行控制任务的电动机 5 称为执行电动机。

其次要观察电压表并把实际电压值与整定值比较以判断偏差的极性这件工作也用机器来完成。在本例中这只要用图 1.2(b) 的电路就能做到。图中使用了一个本身电压很稳定的电源 7，其电压等于发电机端电压的整定值 U_0 。因此，图 1.2(b) 的电路就意味着把发电机的实际端电压 U 与它的整定值 U_0 相比较。图中的电压 U_{ab} 就等于实际端电压与它的整定值之差。当实际端电压高于整定值时， U_{ab} 是一种极性；而当实际端电压低于整定值时，则 U_{ab} 是另一种极性。所以 U_{ab} 可以称为偏差电压。

有了这些，再把图 1.2(b) 中的偏差电压 U_{ab} 与图 1.2(a) 中的执行电动机

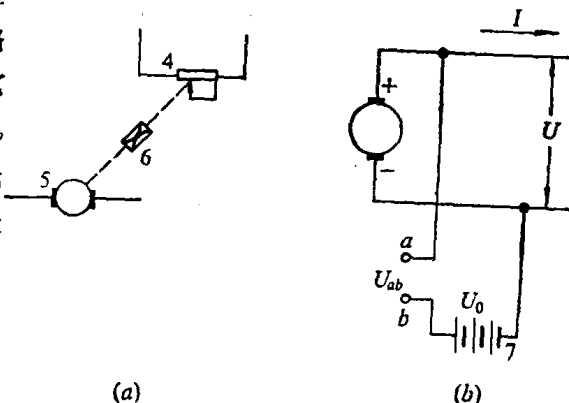


图 1.2

5 联系起来,使执行电动机按照这个电压的极性旋转。当发电机的端电压 U 高于整定值时, U_{ab} 是一种极性,执行电动机就向某一方向旋转,使变阻器 4 的阻值增大,从而减小励磁电流,最终使端电压 U 回降。相反,当端电压 U 低于整定值时, U_{ab} 的极性自动反过来,执行电动机也就向相反方向旋转,使变阻器 4 的阻值减小,励磁电流增大,最终使端电压 U 回升。这样,就完全代替了图 1.1 的系统中的操作工人。

偏差电压 U_{ab} 可能很小,不足以带动执行电动机。但是,我们所要求的是使执行电动机按照偏差电压的极性旋转,并不一定要用偏差电压本身向执行电动机供电。换句话说,从控制的目的来看,重要的是关于偏差的信息,而不是偏差电压的能量。因此我们不妨用电压 U_{ab} 来控制另一个电源,而用这个电源来供给电动机所需要的能量。照这个观点,我们可以在电压 U_{ab} 与执行电动机之间加一台放大器,包括电压放大级和功率放大级。它的输出电压不但幅度足够大,而且足以提供执行电动机所需要的功率。这样,就形成了图 1.3 所示的系统。图中的 8 是放大器。它的输出电压的极性应当能随输入电压的极性而变化,并且功率足以带动执行电动机。只要满足这两点要求,就可以实现自动控制了。至于放大器采用什么元件或线路,对于实现控制功能来说,并不重要。

图 1.3 的系统如果设计得当,可以把端电压 U 维持在 U_0 附近。当负载变化或其他原因使端电压偏离 U_0 时,它会自动调节变阻器,使端电压回到 U_0 。它就是发电机端电压 U 的一个简单的自动控制系统。

也可以按另一种方式构造一个与此类似的控制系统。从图 1.3 中去掉变阻器 4,执行电动机 5 和传动机构 6,而把放大器 8 的输出电压取出一部分来,串联在励磁电路内,如图 1.4 中的 U_{cd} 。当实际端电压低于整定值 U_0 时,串联电压 U_{cd} 的极性使励磁电流 I_f 增大,从而使端电压回升;当实际端电压高于 U_0 时,偏差电压 U_{ab} 反号,于是 U_{cd} 的极性也随之反过来,使励磁电流 I_f 减小,从而使端电压回降。这样就构成了发电机端电压 U 的另一个负反馈控制系统。

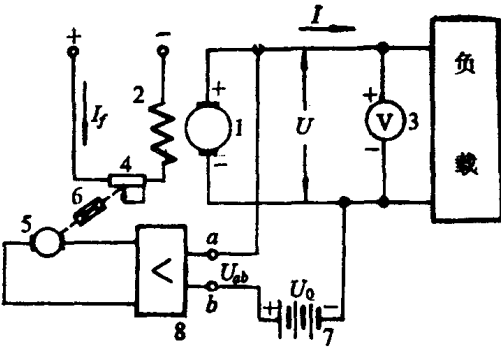


图 1.3

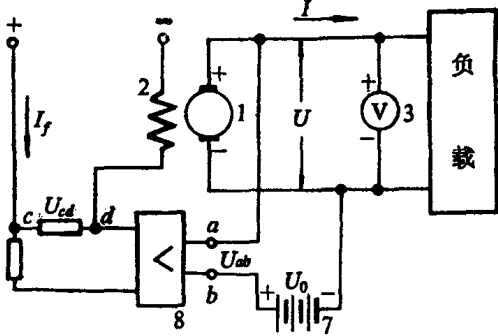


图 1.4

图 1.3 与图 1.4 的两个控制系统,其工作方式略有不同。可以断言,图 1.4 的控制系统虽然能控制端电压 U 使之接近整定值 U_0 ,但当发电机的负载电流 I 不同时,端电压 U 仍然会不同。换言之,与整定值 U_0 相比较,它仍然有一定误差,只不

过比不加控制时的误差小罢了。这个断言可以论证如下。假设负载电流 I 增大了。又假设由于控制的作用使端电压 U 仍能维持原来的值不变，那么发电机的电势必须升高才行。因此励磁电流 I_f 必须增大。这意味着电压 U_{ab} 必须有变化，也就是说电压 U_{ab} 必须有变化。但是我们假设了 U 维持未变，所以 U_{ab} 就不可能变化。这就证明，在负载电流 I 变化时，端电压 U 必定会发生一些变化，也就是说，与整定值 U_0 相比较，仍然会有一个小的偏差。正是靠这小的偏差电压经过放大后产生一个必要的电压 U_{ad} ，以改变 I_f ，从而改变发电机的电势，产生控制作用。假如在没有控制的情况下，负载电流 I 的某一变化会导致端电压下降 10V。那么有了控制以后， I 的同一变化也许只导致端电压下降 1V。而由这 1V 偏差电压 U_{ab} 所产生的电压 U_{ad} 的变化和电流 I_f 的变化却使发电机电势升高 9V。这 9V 电势就是控制的效果。它使本来 10V 那样大的偏差缩小到只有 1V。

图 1.3 的控制系统的工作原理则与此不同。在不同的负载电流 I 下，它总能维持端电压 U 等于整定值 U_0 。而没有偏差。因为，只要还有偏差残留，执行电动机 5 就要继续旋转即继续调节励磁电流 I_f ，从而继续调节端电压 U 。要使它停止旋转，除非电压 U_{ab} 为 0，即端电压 U 与整定值 U_0 相等。

因此，在静止状态下，图 1.4 的控制系统有一定的偏差，而图 1.3 的系统则没有。所以它们分别称为有静差控制系统和无静差控制系统。

然而不应当认为无静差控制系统必定优于有静差控制系统。无静差系统虽然在理论上没有偏差，实际运行时偏差仍然不可避免。至少，由于摩擦的存在，偏差电压很小时就不足以驱动执行电动机旋转。反之，有静差系统虽然在理论上必然有偏差，但如果设计正确，其偏差也可以很小，对于实际使用并无妨碍。事实上，产生偏差的因素很多，有些因素是无静差系统与有静差系统所共有的。更进一步说，衡量一个控制系统的优劣的指标也不止偏差一项，而应当全面考虑。这些以后还要详细研究。

在图 1.1 的人工控制系统中，控制质量的优劣与操作工人的经验和技巧有关。设想这种情况：一个不熟练的操作工发现端电压高了一些，就把变阻器的电阻调大。但是励磁电路有很大电感，所以励磁电流不会瞬时地变化，而有一个过渡过程，从而发电机的端电压也不是一下子就能降下来。经验不足的操作工以为自己调节的幅度不够，就继续增大变阻器的电阻。结果当端电压正好降到整定值时，变阻器的电阻值已经调过了头。端电压的下降势头不止，迅速降到整定值以下。这时操作工连忙把变阻器向相反的方向调回来。但是端电压的回升也有一个过渡过程。如果操作失当，又可能把变阻器的电阻减小得过分，以致端电压又猛升到整定值以上。这样，尽管操作工按照负反馈原理进行控制，被控制的物理量在发生偏差后却要往复振荡多次才能最终在整定值上停下来。对于熟练的操作工，情况就会好些。

同样道理，对于一个自动控制系统来说，控制质量的优劣取决于控制系统的设计水平。设计得不好的控制器，其动特性与被控制对象的动特性不相适应，就如同缺乏经验的操作工一样，对于被控制量的偏差反应过于敏感（或过于迟钝）。其结果是控制质量不佳，偏差大，调节过程长，甚至可能使被控制量持续地振荡而不停息，根本达不到控制的目的。这种情况并不少见。

正因为如此，所以有必要深入地研究控制系统的运动规律，把它用严格的数学形式描述出来，并进而总结出分析和设计控制系统的方法，以指导工程实践。

这正是《自动控制理论》课程的目的。

1.3 按偏差控制与按扰动控制

如上节所述，反馈控制的基本思想是按照被控制量偏离整定值的方向（即偏差的极性）而向相反方向改变控制量，所以也称作**按偏差控制**。这是一种广泛使用的重要控制方式。

除了按偏差控制以外，还有一种**按扰动控制**的控制方式。

以上节所举的电压控制系统为例。我们知道，影响端电压波动的最主要的因素是负载电流的变化。从对端电压进行控制的观点来看，负载电流的变化就是一种**扰动**。对于给定的发电机，负载电流每增大 1A 所引起的端电压下降的量是可以预知的。如果设计一个装置，每当负载电流增大 1A，就相应地把发电机的励磁电流增大若干，使发电机的电势相应地升高，以弥补负载电流增大所引起的端电压下降的量，那么也可以做到使端电压不受负载电流波动的影响而基本上保持恒定。图 1.5 就是体现这种想法的两种设计方案。图 1.5(b) 中的 S 是发电机的串联励磁绕组。

类似地，在其他物理量的控制系统中，如果扰动因素已知，并且可以直接地或间接地检测出来，那么就可以利用扰动信号来产生一种补偿作用，即与扰动的效果相反的作用，以抵消扰动的影响。这样控制方式就称为按扰动控制。

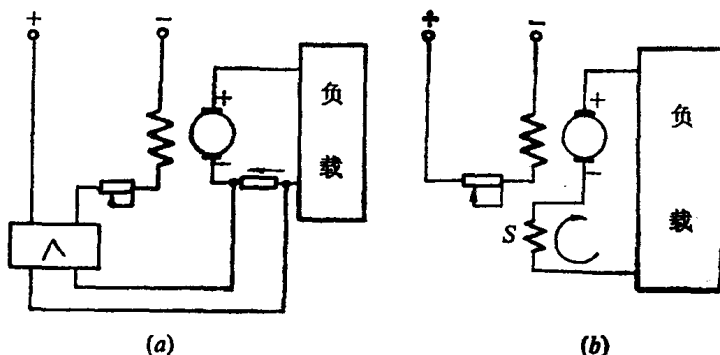


图 1.5

在按扰动进行控制时，是从扰动作用取得信息，而据以改变被控制量。信息和控制作用的传送是单方向的。所以没有反馈，而是**顺馈**；不构成闭环，而是**开环**。

图 1.6(a)，(b) 分别是按偏差进行反馈控制与按扰动进行顺馈控制的示意图。

按扰动控制在技术上常常比按偏差控制简单。但是只在扰动是可观测的场合才能用。此外，如果系统中有多种扰动存在（这是常见的情况），要为每一种扰动配备一种补偿装置就显得复杂，可靠性也差。不仅如此，各种补偿装置彼此之间往往会有矛盾。以图 1.5 的两种补偿装置为例。它对于补偿负载电流波动这一特定扰动是很有效的。但若是