

自动控制 系统技术

〔美〕丹尼尔·皮·散特 著

何生泰 宋黎明 译



中国铁道出版社

自动控制系统技术

〔美〕丹尼尔·皮·散特 著

何生泰 宋黎明 译

中国铁道出版社

1986年·北京

Automatic Control System Technology
DANIEL.P.SANTE
prentice-Hall, Inc. Englewood Cliffs,
New Jersey, 1980

自动控制系统技术

〔美〕丹尼尔·皮·散特 著

何生泰 宋黎明 译

中国铁道出版社出版

责任编辑 林连照 封面设计 刘景山

新华书店北京发行所发行

各地新华书店经售

中国铁道出版社印刷厂印

开本：787×1092毫米 1/32 印张：7.25 字数：142 千

1986年1月 第1版第1次印刷

印数：0001—5,500册 定价：1.40元

内 容 提 要

本书系统地介绍了自动控制系统的基本原理和基本结构,并且对控制系统各种电气、机械元件的特性、参数进行了必要的分析与计算。全书共十一章,主要内容有:控制系统的基本原理,具有反馈的放大器,电路响应图解,拉普拉斯变换,传递函数的解,控制系统元件,开、闭环系统分析,动力系统设计依据等。该书内容丰富,图文并茂,通俗易懂,并附有习题,可供教学参考或自学用书。

译者的话

自动控制技术是当代最活跃的技术领域之一。采用自动控制代替人工控制，在许多行业中能够显著提高劳动生产率，提高产品质量和降低产品成本。自动控制装置不仅可以代替人们的繁重、重复劳动，使人们去从事更有效的劳动，而且能够完成人们脑力和体力难以实现的任务。因此，自动控制技术广泛应用于宇宙航行、导弹制导、飞机和舰艇的驾驶，雷达以及火炮瞄准等国防尖端技术中，同时也广泛应用于机械工程、电气工程、化学工程以及交通运输等民用工业中。反馈控制的基本原理还应用于生物工程、经济管理和社会科学等领域。为了加速我国的四化建设，上述各学科中的广大科技工作人员，迫切需要掌握自动控制这门科学。

为了适应这种形势的需要，各种自动控制的教科书和科技书相继出版，这些书基本上都是以较深的工程数学为基础的，也是非常必要的。因为自动控制是伴随工程数学和计算技术的发展而发展起来的。但是，对于没有学过很多工程数学或学的太早经久不用而记忆淡薄的广大技术界、经济管理学界和社会科学界的人员来说，高深的数学理论往往成为学习自动控制技术的“拦路虎”。我们翻译这本书的目的就在于满足这部分同志的需要。

这本书原是美国电气技术学院学生的教材。它以较小的篇幅，用普通数学方法，着重从物理概念上阐明了自动控制的原理和方法，尽量避免冗长的数学推导。所以这本书作为学习自动控制的入门书是很合适的。它不仅可作为技术学校

的教学参考书，而且也适合于自学。

本书第一章到第五章及附录由宋黎明翻译，第六章至第十一章由何生泰翻译。译者对原文中某些疏漏及错误尽可能地作了修正。但由于水平不高，难免有不当之处，欢迎读者批评指正。

本书稿的编译工作曾得到北方交通大学范振武副教授的大力支持和帮助，借此谨表谢意。

译 者

目 录

序 言	1
第一章 控制系统的基本概念	3
1-1 绪 论	3
1-2 简单系统和时间常数	4
1-3 简单的闭环系统	7
1-4 传递函数	9
名词术语	11
习 题	12
第二章 具有反馈的放大器	14
2-1 绪 论	14
2-2 正反馈和不稳定性	21
2-3 作为时间滞后函数的相位移	22
名词术语	23
习 题	24
第三章 网络响应的图解法	28
3-1 绪 论	28
3-2 分 贝 (dB)	28
3-3 时间常数和角频率	30
3-4 倍频程和十倍频程	33
3-5 单滞后网络的一般图解	34
3-5-1 标 准 化	35
3-6 串联网络的解	38
3-6-1 伯 德 图	38

3-6-2	放 大 器	40
3-6-3	增益穿越频率	42
	名词术语	44
	习 题	45
第四章	s 算子和拉普拉斯变换	49
4-1	绪 论	49
4-2	网络的基本类型	49
4-2-1	滞后网络	50
4-2-2	超前网络	51
4-2-3	其它网络	51
4-3	s 算子	53
4-4	使用 s 算子解网络	55
4-5	拉普拉斯变换	57
4-5-1	拉普拉斯变换理论	58
4-6	s 算子和拉普拉斯变换的应用	60
4-7	串联 LCR 回路	65
	名词术语	67
	习 题	68
第五章	复杂传递函数的解	71
5-1	绪 论	71
5-2	以 s 算子表示的二阶方程式的解法	71
5-3	超前网络	73
5-4	特殊的传递函数	78
	名词术语	83
	习 题	84
第六章	控制系统的元件	88
6-1	绪 论	88
6-2	位置电位器	89

6-3	位置变压器 (自整角机)	91
6-3-1	线性自整角机	93
6-3-2	旋转式编码器	93
6-4	调制器/解调器	94
6-5	控制系统的驱动马达	96
6-5-1	伺服马达 (角位移型)	96
6-5-2	伺服控制阀 (线位移型)	97
6-6	旋转型伺服控制马达的传递函数	99
6-7	控制系统元件的传递函数	102
6-8	简单控制系统的流程图	103
6-9	相位校正	104
6-10	比率发电机	105
	名词术语	107
	习 题	108
第七章	开环系统分析	112
7-1	绪 论	112
7-2	位置控制系统的传递函数	113
7-2-1	伯德图分析	115
7-3	系统性能的增益效应	120
7-3-1	死 区	121
7-3-2	低系统增益的效应	122
7-4	对超前网络相位裕量的影响	123
7-5	速率反馈对相位裕量的影响	125
7-6	滞后速度误差	127
	名词术语	128
	习 题	129
第八章	闭环系统分析	132
8-1	绪 论	132

8-2	闭环位置控制系统	132
8-2-1	增加齿轮传动系统	133
8-3	静态分析	134
8-4	关于闭环响应的增益效应	137
8-4-1	在 ω_p 时的峰值响应 M_p	139
8-5	阻尼因数	139
8-5-1	固有共振频率 ω_n	140
8-5-2	确定响应的峰值频率 ω_p	141
8-5-3	确定闭环系统的带宽 ω_B	146
	名词术语	150
	习 题	150
第九章	闭环系统的图解法	152
9-1	绪 论	152
9-2	尼柯尔图	152
9-3	应用尼柯尔图的步骤	155
9-4	解释尼柯尔图	156
9-4-1	根据尼柯尔图确定 K_o	160
9-4-2	确定 ω_p 、 M_p 和 ω_B	163
	名词术语	165
	习 题	165
第十章	瞬态分析	168
10-1	绪 论	168
10-2	阶跃输入响应的效应	168
10-2-1	响应时间和超调	173
10-2-2	调整时间	174
10-2-3	单位阶跃输入的阻尼响应	176
10-3	共振系统的类型	179
10-4	应用拉普拉斯变换的瞬态分析	181

10-4-1 电气共振系统	182
10-4-2 弹簧-质量系统	182
10-4-3 旋转系统	184
10-5 基本伺服系统	185
名词术语	186
习 题	187
第十一章 动力系统的设计依据	190
11-1 绪 论	190
11-2 马达转速/扭矩特性的传递函数	190
11-2-1 马达和负载研究	192
11-3 具有100%反馈的基本伺服系统	194
名词术语	200
习 题	200
附 录	202
附录A 用惯性矩和粘性阻尼表示的 马达传递函数	202
附录B 速率反馈	205
附录C 超前网络	210
附录D 相位裕量	212
附录E 速度控制系统	214
附录F 拉普拉斯变换	217

序 言

自动控制系统是电气技术研究中最使人感兴趣的领域之一。自动控制系统几乎包括了所有关于电气和通信原理方面的基本概念。

自动控制系统是动力系统的理论发展和分析。它和控制系统通常使用的分析方法稍有差异。它是建立在众所周知的电子的、电气的现象，如共振和阻尼的基础之上的，并着重地依赖人们对时间常数的深入了解。随着电路元件被与其相似的或相当的机械元件所取代，这样电-机系统的解也就求出来了。

本书不准备研究控制系统原理方面的常用过程。我曾发现从事电气技术学习的学生，当他们接触到电的现象和概念时，能够很容易地解释自动控制系统的基本特性。这比之用牛顿、米、千克制向他们作普通的弹簧-质量系统的介绍，要容易得多。

本书包括对简单的闭环系统作了循序渐进的推导。它帮助读者了解分支系统（或局部方框）综合成为完整的闭环系统，以及为判明整个系统的稳定性或不稳定性和频率响应、增益特性等提供了依据。

本书是为电气学院的学生编写的。这些学生应具有高等代数的基础知识，对于三角学——作为微积分的入门向导也是希望要具备的，但不是绝对必需的。对于电子计算机的使用则应加以提倡。从直角坐标到极坐标的转换往往需要的。用自然对数求解指数方程 e^{-s} ，以及用常用对数转换到

分贝，这两者也是很需要的。当然，用以建立多种相位角的三角函数也是必要的，因为这种相位角在任何闭环系统的研究中都是十分重要的。应用一些近似法和标准化法可以使很复杂的数学关系式加以简化，并能使系统最终的解发生极小的误差。

拉普拉斯变换是以其最简单的形式（用 s 算子求解复杂的电路，并用 $j\omega$ 表示）作为一种工具来使用的。在多种类似的方式中，我们可用对数来简化多重放大器对总增益和频率响应特性的解。利用拉普拉斯变换可使电和机械的振动系统之间的相互关系变得非常清晰。从电系统特性到机械系统特性的过渡，就成为部件变换这样一个简单的事情了。例如用“质量”替换“电感”，用“弹簧常数”替换“电容”，以及用“阻尼器”替换“电阻”等等。

本书为自动控制系统提供了基本的工作知识，同时为通常存在于电系统和机械系统有关相似性的现象之间的鸿沟搭起了桥梁。

在本书中，强调了多种形式共振的重要性。总之，读者通过对几乎所有基本概念的总复习，就可以把已经学过的知识，归纳成为一个电气的-机械的模型，这就是所谓的自动控制系统。

纽约，巴伐罗
丹尼尔·皮·散特

第一章 控制系统的基本概念

1-1 绪 论

有史以来，人类一直企求从事大量超过其本身体力限度的工作。如利用畜力移动巨大的物体，利用杠杆产生机械效益；利用车轮产生运动。以后又利用发动机旋转轴，可以在相当短的时间内使大型的工作设备运行。随着发动机功率和精度的提高，需要更好的装置来控制发动机，因此，出现了自动控制系统这一新的领域。

今天，自动控制系统应用范围几乎包括在社会的各个方面。在制造行业中，它出现在自动化生产和控制生产过程之中；在食品工业中，它用于自动混合和包装食品；军事上的应用就更多了，从用雷达控制的大炮到火箭和飞机的自动制导。甚至，汽车安装这一装置可以随着道路条件的变化自动改变需要的功率，以自动保持预选的速度。

自动控制系统的应用几乎是无限的，然而，它们具有同一原理，即：输出响应与输入指令能够自动比较，其差值叫误差，然后自动调整系统，使该误差减小到零。

本书的目的是阐述一套简明的方法，去预测一个全自动控制系统总的性能。对该系统的每一部分的方框图进行分析，并为这些框图的性能建立方程组，这些方程称为传递函数。然后，将这些方程式联合起来，并且应用各种各样的数学方法，包括复数代数和被称为伯德图的图解法，以及在网络计算中非常有用的 s 算子（一个与拉普拉斯变换有关的简单数学方法），来预测整个系统的性能。

具有适当反馈的运算放大器将用来模拟整个系统的每个组成部分。在微处理机时代，有一种倾向，即认为用模拟方法求解系统已经过时。实际上，一个系统的模拟模型使得用简单的模拟电子线路板观察和了解整个系统或其子系统的动态性能成为可能。它为即时直接观察系统任何部分由于增益、转角频率和校正相位的变化所产生的效果提供了捷径。

1-2 简单系统和时间常数

真空吸尘器、磨床工作台和牙科医生用的牙钻是我们熟悉的几个简单的电动机系统。如图 1—1 所示，闭合 S_1 ，以“阶跃输入”形式〔图 1—1 (b)〕向电动机供电，电动机开始转动。然而它要经过一定时间才能达到最大速度，这是由下面的物理特性决定的：

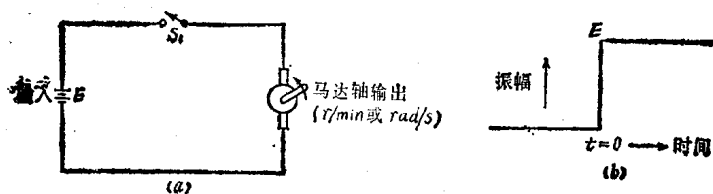


图 1—1

(a) 简单电机电路 (b) 电压的阶跃输入

1. 由于旋转的电枢质量引起的机械惯性，使马达的速度不能从静止状态立即增到最大值。
2. 做为建立磁场的产物，在励磁绕组和电枢绕组中受到电惯性的作用，它将产生一个反电动势和一个传送滞后电流的结果。
3. 产生在转动轴上的摩擦力和空气阻力使速度的增加率逐渐减慢。

图 1—2 所示为时间与转速的特性曲线，该特性曲线为

典型指数函数。当 S_1 闭合之后，从电阻-电容负载电路的输出电压测得的曲线与这一特性曲线相同。请注意图1—2和图1—3之间的相似性。这两条特性曲线都是以系统所含有的时间常数为基础的。

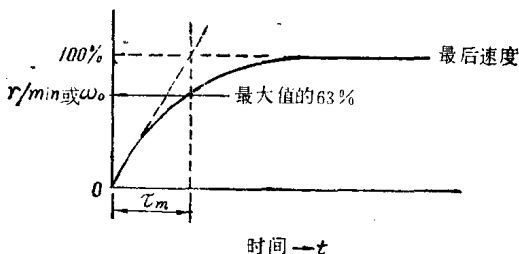


图1—2 电机速度与时间关系图

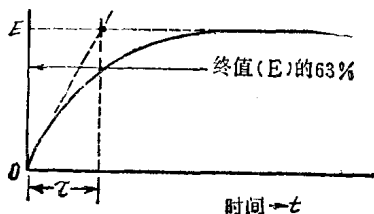
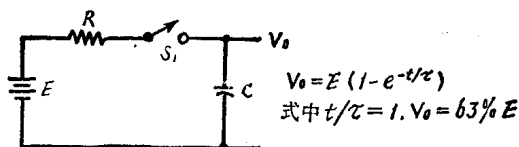


图1—3 电容C两端电压与时间关系图

回路的时间常数取决于输出端（无论是速度或是电压）达到其最终值的 $1/e$ 时所需的时间。这里 e 是自然对数的底（ $e = 2.71828\cdots$ ）。在计算电动机起动时间时，人们发现了这个相同的指数特性曲线。达到相同值（此值大约为最高速度的63%）的时间间隔用符号 τ_m 表示， τ_m 称为电动机的时间常数。在输出量上，两者数值的上升将遵循相同的数学关

式，该式表示 RC 电路充电曲线，即

$$v_0 = E (1 - e^{-\frac{t}{\tau}}) \quad (1-1)$$

式中 τ —— 时间常数 RC ；

v_0 —— 时间 t 时的瞬时电压；

E —— 最终输出电压。

与此相似：

$$\omega_0 = S (1 - e^{-\frac{t}{\tau_m}}) \quad (1-2)$$

式中 τ_m —— 电动机的时间常数；

ω_0 —— 在时间 t 时的瞬时速度；

S —— 电动机最终速度。

上升的指数函数为

$$y = (1 - e^{-\frac{t}{\tau}}) \quad (1-3)$$

该式是被我们用 t/τ 为时间常数来标准化成同一式了，

因此，当 $t/\tau = 1$ 时，

$$y = (1 - e^{-\frac{1}{\tau}}) = 0.63 \text{ 或 } 63\%$$

同样，衰减的指数由

$$y = e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (1-4)$$

来描述，而 $t/\tau = 1$ 时，

$$y = e^{-1} = 0.37 \text{ 或 } 37\%$$

表 1-1

t/τ	$(1 - e^{-t/\tau})$	$e^{-t/\tau}$
1	63%	37%
2	86.5%	13.5%
3	95%	< 5%
4	> 98%	< 2%

以上两个函数值按照不同的时间常数摘要列在表 1-1