

自动控制基础 [III]

反馈控制理论

〔日〕稻田春政 著



新 时 代 出 版 社

自动控制基础(第三分册)

(反馈控制理论)

[日] 稻田春政 著

盛君豪 译

新时代出版社

内 容 简 介

本书介绍反馈控制理论,讨论什么是优良的控制系统(系统的分析和评价)以及怎样才能得到优良的控制系统(系统的调整和设计)等问题。

为使初学者能学到一些基础理论知识,书中介绍了古典控制理论的基本内容。为便于读者理解,书中介绍的典型控制系统都是简单的线性系统,并且控制系统的理论是从稳定性和系统评价这两个方面来对控制系统的调整和设计方法进行阐述的。

本书作为入门级的通俗读物,可供具有高中以上文化程度的工人和技术人员学习控制论之用,也可供从事自动控制的各种人员和从事自动控制有关专业的师生参考。

反馈控制理论(Ⅱ)

反馈控制理论

稻田春政 著

盛君豪 译

自动控制基础 (第三分册)

(反馈控制理论)

[日] 稻田春政 著

盛君豪 译

新时代出版社出版 新华书店北京发行所发行

国防工业出版社印刷厂印刷

787×1092毫米 32开本 5.75印张 118千字

1984年1月第1版 1984年1月北京第1次印刷

印数: 00001—11,300册

统一书号: 15247·31 定价: 0.73元

前 言

自从人们将自己所处的时代称为自动化时代以来，已经过去了许多年月。目前，自动化技术已经相当成熟，成为现代社会的一项不可缺少的技术。

以实现无人化生产为目的的“自动控制技术”和以电子计算机为中心的“信息处理技术”，是自动化技术的两个主要分支。

自动控制技术涉及到机械、电气、化学等许多基础技术，其内容很广泛，不易全面掌握，而关于这方面的有趣而通俗的读物目前并不多见。

作者稻田春政根据自己多年从事自动控制教育所积累的宝贵经验，本着使读物通俗易懂，又能使读者在学习时发生浓厚兴趣的想法写成本书，这的确是一件可喜的事情。作者的这种想法，已在他认真地将基础知识整理、总结并和实际应用结合起来的通俗易懂的文字说明中体现出来了。

本书不仅适用于在自动化领域工作的科技人员阅读，并且可作为一本自动控制的常识性读物供其他科技工作者参考。

大阪大学教授 工学博士

藤井克彦

1978年4月

绪 论

好多年以前人们就把自己所处的时代称为自动化时代，目前我们深感自动化已真正来到了我们的中间。只要注意一下我们周围的一切，就能感到自动化所带来的好处。

自动化不仅适合于以合理化为目的的生产部门，而且适用于其它所有部门。

自动化技术由自动控制和应用电子计算机的信息处理两个技术分支所组成。

自动控制也称为自动化技术和自动操作，这是一种由控制装置代替人类的头脑和手足的作用而实现无人化目的的技术。自动控制可使人摆脱危险场所的工作和连续紧张的劳动，从而在某种意义上使人类在肉体和精神上的地位得到提高。

自动控制包括顺序控制和反馈控制。顺序控制的动作是一步一步进行的可靠的自动控制，它既适用于在火车站等场所可以看到的自动售货机和大楼的电梯等简单装置，也适用于钢铁和汽车生产等大型工业的自动控制。反馈控制是一种将操作结果不断返回到输入端，并对结果进行修正的准确而可靠的自动控制。这种控制常见于飞行器和船舶等的舵机自动操纵装置以及石油精炼和化学药品工业等的设备中。

本书属于自动控制的入门书，所以采用较多的插图，以便读者能通过插图获得较多的知识。此外，将同一类元件编排在一起，根据结构原理图说明它们的工作原理、构造、特征、应用等，这有利于掌握所学知识。

本书共分三册，其中第一册介绍自动化的基础知识和顺序控制。第二册介绍反馈控制元件，包括过程控制的元件和伺服机构的元件。第三册介绍反馈控制理论，主要讨论反馈控制及其环节的特性，环节的结合和特性，控制系统的稳定性及其判据。

本书以介绍本专业必需的基本知识为主，尽量避免高深的理论。对于要了解较多理论知识的读者，可阅读本书第三册。对于需要学习更高深理论的读者，也可以本书作为阶梯，以便学习更高级的专著。

著 者

1978年4月

目 录

第一章 反馈控制及其环节的特性	1
1.1 构成环节的特性	2
1.1.1 信号和特性	2
1.1.2 频率特性	5
1.1.3 过渡特性	16
1.2 基本环节的种类和特性	28
1.2.1 环节的构成元件及信号	29
1.2.2 环节的种类和特性	36
练习题	56
第二章 环节的结合和特性	68
2.1 环节的结合和等价变换 (求合成传递函数)	68
2.1.1 方块图和传递函数	68
2.1.2 方块图的等价变换	72
2.1.3 求合成频率特性的方法	76
2.1.4 合成传递函数和特性	85
2.2 控制系统的传递函数和响应	87
2.2.1 控制系统的闭环传递函数和基础方程式	87
2.2.2 控制系统的频率特性	89
2.2.3 控制系统的过渡特性	94
练习题	101
第三章 控制系统的稳定性及其评价和调整	110
3.1 控制系统稳定性的评价	111
3.1.1 控制系统的稳定判据	111
3.1.2 控制系统的稳定程度	117
3.1.3 控制系统的偏差	119

目 录

4. 控制系统的快速性	127
3.2 控制系统的调整	130
1. 控制系统的特性及其特征	131
2. 过程控制系统的调整	133
3. 伺服机构的调整	139
练习题	152
附录	156
附录 1. 拉氏变换公式 I	156
附录 2. 拉氏变换公式 II	157
附录 3. $G(j\omega) = \frac{1}{1+j\omega}$ 的 g 和 ϕ	161
附录 4. 各种系统的信号和环节的共同点	162
附录 5. 尼柯尔斯图	166
附录 6. 自动控制 (一般) 术语 (JIS Z 8116)	167

第一章 反馈控制及其环节的特性

控制系统是由检测（包括传送）、调节、操作、被控对象等很多环节组成的。要得到一个良好的控制系统，就必须将这些环节协调地连接起来。所谓协调，就是根据控制的目的构成满意的控制系统。显然，如果随便地将各环节结合在一起，那是不能得到满意的控制系统的。

所谓根据控制的目的得到满意的控制结果，就是指具有能根据输入得到理想的输出特性。

本章开始涉及控制理论。应该指出，控制系统的特性不仅与机械系统、电气系统、液压系统等很多构成环节的构造、形状、尺寸有关，还可由它们共同的基本特性来区分。

特性的表示方法有两种：其一是频率响应法，即用连续的正弦波振动作为输入，由其输出的响应确定其特性；另一种为过渡响应法，用急剧变化的波形作为输入，由其输出的响应确定其特性。这两种方法各有长处，但在对特性的分析和表示时，往往同时应用这两种方法。图 1.1 介绍了控制理论的构成。

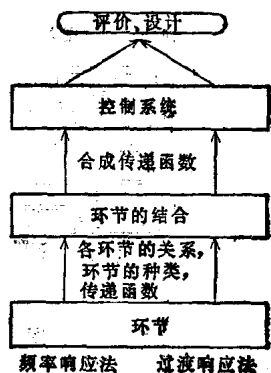


图 1.1 控制理论的构成

1.1 构成环节的特性

特性 (characteristic) 就是环节的输入和输出之间的关系。

实际控制系统的构成元件有电气式、液压式、气动式等多种, 其输入和输出量的性质也各不相同。如将这些量进行不同的组合就更加复杂。在自动控制中称这些输入和输出为控制信号 (control signal) 或简称信号。图 1.2 所示为控制环节的输入和输出。

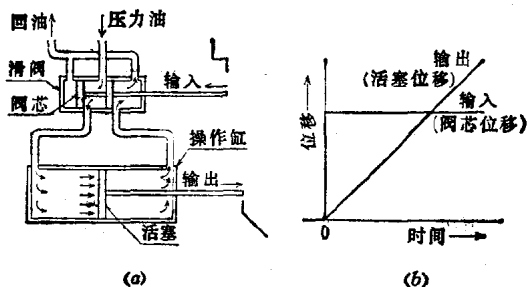


图1.2 控制环节的输入和输出

(a) 用于控制装置的液压伺服阀;

(b) 液压伺服阀的输入和输出。

1. 信号和特性

自动控制系统是由若干合适的环节构成的。实际控制系统中所出现的信号, 当通过环节传递时其大小和状态都要发生变化。对于这种控制系统, 如果考虑信号所采用的量的性质和种类, 则问题就变得复杂了。因此, 控制理论所处理的信号, 只注意当什么样的输入加在环节上将出现何种形状和大小的输出。这样对任何环节都可进行同样的处理。由于

上述理由，在控制理论中并不探讨环节的内部情况，而是把环节用一个方框来表示。这种表示方法称为暗箱表示，并在方框中记入描述环节的输入和输出关系的特性公式。

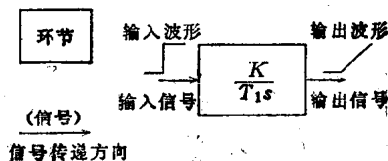


图1.3 暗箱和方块图

如把图 1.2 所示的液压伺服阀画成方块图，就成为图 1.3 所示

的简单形式，方框中所写的特性式称为传递函数 (transfer function)。

(1) 静特性

静特性 (static characteristic) 是表示输入和输出关系的特性之一。灵敏度和精度都属于静特性。静特性表示环节的输出和输入之比，它和时间的变化无关。

(i) 灵敏度 (sensitivity)

灵敏度即为输出变化量和输入变化量之比，即

$$\text{灵敏度} = \frac{\text{输出变化量}}{\text{单位输入变化量}} \quad (1.1)$$

如输入和输出都为电压，则对这种同类信号的情况称为增益 (gain)。图 1.4 所示为静特性曲线和灵敏度，对于这种情况灵敏度的意义是容易理解的。但自动控制环节的输入和输出信号不一定是同一种类的信号，例如输入为电压而输出为空气压力的情况。对于这种情况下的灵敏度，如果还是用输出和输入之比来表示就难以理解了，而用稳态增益 (stationary state gain) 来表示则较为方便。

例如，输入和输出分别在工业仪器的刻度所限制的有限

动作范围内变化，则输出和输入的变化量的百分比即为稳态

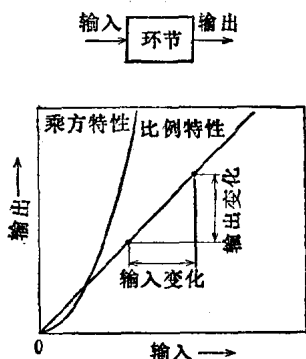


图1.4 静特性曲线
和灵敏度

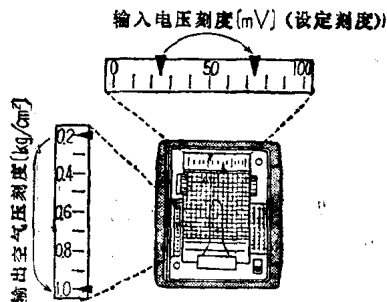


图1.5 稳态增益

$$\begin{aligned} \text{稳态增益} &= \frac{\text{输出刻度变化}[\%]}{\text{输入刻度变化}[\%]} \\ &= \frac{100\%}{50\%} = 2 \end{aligned}$$

增益（见图 1.5），其关系式为

$$\text{稳态增益} = \frac{\text{输出变化量}[\%]}{\text{输入变化量}[\%]} \quad (1.2)$$

因上式只对信号的大小进行比较，而与输入和输出信号的种类无关，所以对增益的理解就容易了。另外，当理解了稳态增益的意义以后，只要简单地称它为增益即可。

(ii) 精度

精度具有准确性 (accuracy) 和精密性 (precision) 两种含意。

(a) 准确性

准确性可用平均误差和最大误差等来表示。这些误差可用测定值或仪表的指示值等与实际值之间的如下关系式表示：

$$\text{误差} = \frac{\text{指示值} - \text{实际值}}{\text{实际值}} \times 100[\%] \quad (1.3)$$

(b) 精度

精度表示重复误差的程度，即表示误差跳动的程度。

(2) 动特性

与静特性相对应的特性是动特性 (dynamic characteristic)。动特性是控制理论的重要特性，过渡特性 (transient characteristic) 和频率特性 (frequency characteristic) 即为动特性。

动特性是根据加入的变化的输入和输出随时间变化的情况，所求得特性。

求动特性时常用的输入信号有阶跃信号、斜坡信号、正弦信号等。图 1.6 所示为输入环节的几种波形及其响应波形。

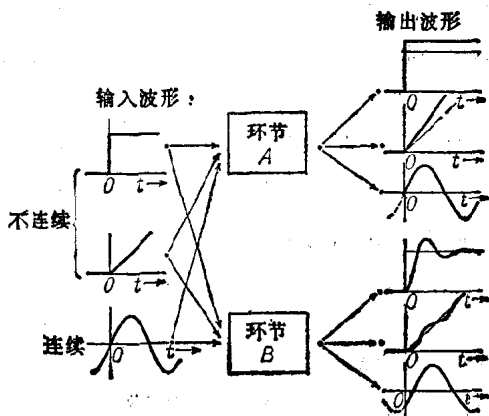


图 1.6 输入环节的几种波形及其响应波形

下面我们对动特性进行详细说明。

2. 频率特性

使自动控制系统产生控制动作的信号 (包括目标值的变动和干扰), 在很多情况下是不能预知的, 而且这些信号的波

形一般都是很复杂的。因此，在求动特性时，如用实际的复杂波形作为输入，再用由这种输入得到的输出求特性固然十分理想，但在求特性时用解析的方法表示出来是十分困难的。然而，这种复杂的波形可以看作若干交流基本波的合成(见图1.7)。所以，在控制理论中采用波形简单而且表示方法容易的，具有一定振幅的正弦波作为输入信号。由与这种输入相对应的响应求出特性，则与实际的复杂输入相对应的响应，也就可推断出来了。

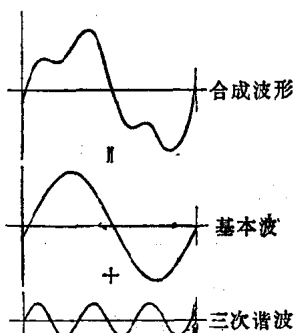


图1.7 复杂波形及基本波的合成

与正弦波输入相对应的响应称为频率响应 (frequency response)。

设输入的具有一定振幅的正弦波信号为 $e_i = A \sin \omega t$ ，当它的频率由零（直流）变到无限大（超高频）时，分别得到与输入频率相同的输出信号 $e_o = B \sin(\omega t \pm \varphi)$ ，这样就求得振幅比 B/A 和相位移 φ ，将它们用图线表示出来即为频率特性。

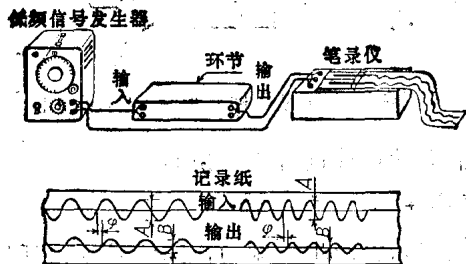


图1.8 电气环节的频率响应试验原理图

图 1.8 所示为求电气环节的频率特性时的简单试验原理图。

用低频信号发生器 (low-frequency oscillator) 产生的正弦波作为输入, 使该信号一方面与环节的输入端相连接, 另一方面输给记录仪。同时环节的输出与记录仪的另一个接线端相连接。如果保持信号发生器的输出振幅不变而逐渐提高其频率, 则在记录纸上便同时记录下了各种频率的输入波形以及环节的输出波形。由这两组波形便可求出振幅比和相位移的频率特性。

(1) 增益 (振幅比)

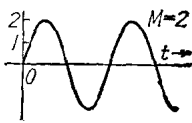
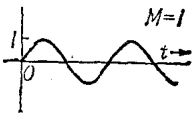
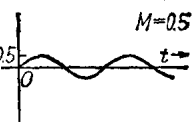
输出和输入的振幅比称为增益。由各种频率下的输出和输入所求得的增益称为增益特性 (gain characteristic)。如某一频率 ω_n 处的输入为 $e_i = A \sin \omega_n t$, 输出为 $e_o = B \sin(\omega_n t + \varphi)$, 其增益用 M 表示, 则

$$M = \frac{B}{A} \quad (1.4)$$

增益有 $M > 1$ (增幅)、 $M = 1$ 和 $M < 1$ (衰减) 三种情况 (见表 1.1)。

由于控制系统是由若干环节连接而成的, 所以信号要逐次经这些环节传递。信号从开始的环节加入到最后的环节输出, 其总的放大量可由各环节的增益相乘得到。但当环节的数量很多时, 这种乘法计算的处理方法是很麻烦的, 这时可应用对数将原来的乘法运算化成对数的简单加减运算。控制理论和通信工程一样, 在应用这一类计算方法时也用分贝来表示。

表1.1 正弦振荡波形的增益（输入波形不变，振幅=1）

$M > 1$	增 幅	
$M = 1$		
$M < 1$	衰 减	

如用分贝来表示的增益为 g ，则分贝的定义式为

$$g = 20 \log_{10} |M| [\text{db}] \quad (1.5)$$

表 1.2 为分贝换算表。

表1.2 分贝换算表

振幅比 (B/A)	10^{-4}	10^{-3}	10^{-2}	10^{-1}	0.5
$g = 20 \log_{10} \left \frac{B}{A} \right [\text{db}]$	-80	-60	-40	-20	6
振幅比 (B/A)	1	2	10	10^2	10^4
$g = 20 \log_{10} \left \frac{B}{A} \right [\text{db}]$	0	6	20	40	80

(2) 相位移 (时间差的比较)

输入和输出波形之间的时间差称为相位移 (phase)。各

种频率的输入和输出之间的相位移关系称为相位移特性 (phase characteristic)。

相位移的符号超前为正而滞后为负。相位移的单位也有用“度”的,但以用“弧度[rad]”较为方便。相位移的测定参见图 1.9。

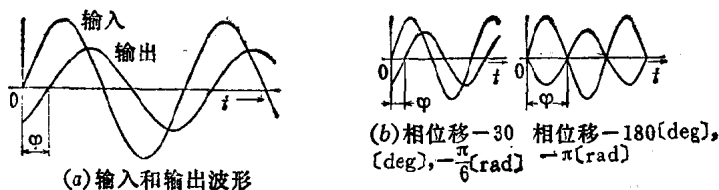


图 1.9 相位移的测定

(3) 频率特性的矢量表示法

对于频率特性,如用一定周期的振动作为变量,按实际时间进行考虑和计算,一般都是十分麻烦的。对于这种情况,和研究交流理论时一样,应用复数的矢量表示法比较方便。

当频率特性在复平面上用矢量表示时,其增益 (B/A)和相位移 (φ)可以在同一图中表示出来 (见图 1.10)。

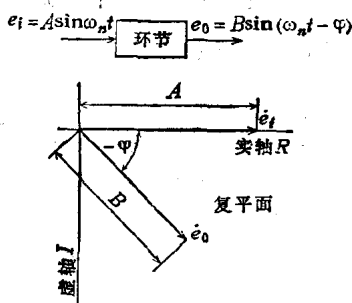


图 1.10 输入和输出的矢量表示

矢量的复数表示法有如表 1.3 所示的三种方法。

(4) 频率传递函数