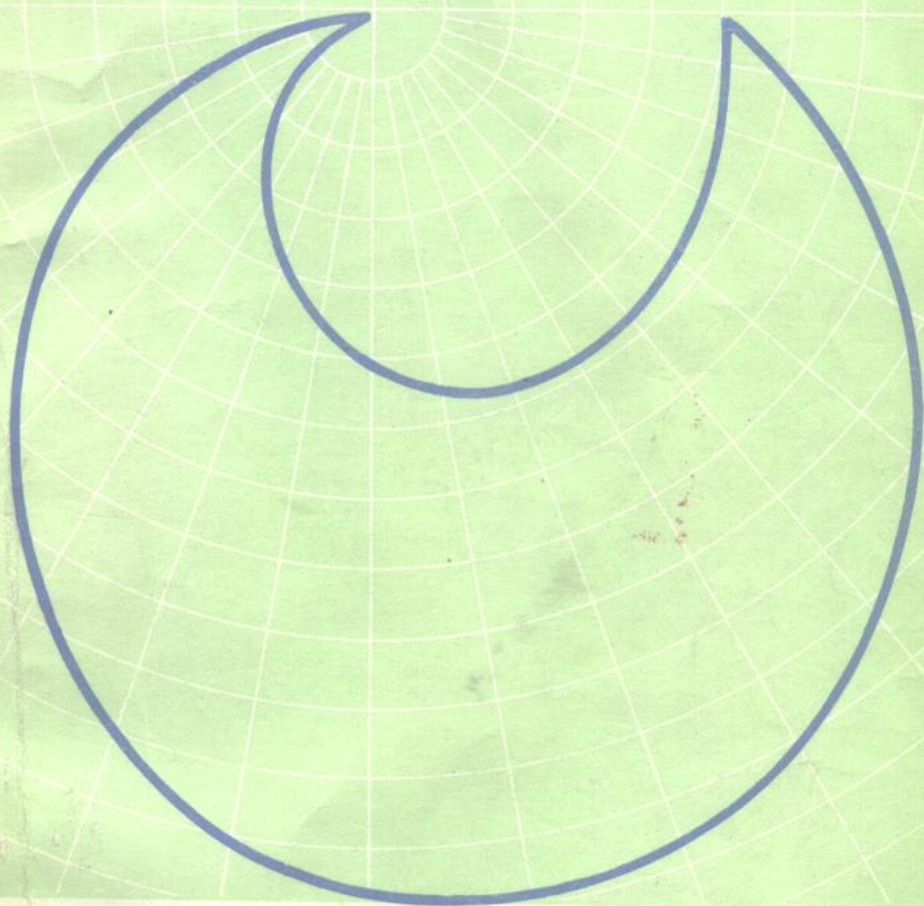


电子调节技术入门



〔德〕弗里西 弗罗等著

刘 锦 江 译



73.823
160

电子调节技术入门

[德]弗里西 弗罗等著

刘 锦 江 译



水利电力出版社

8510125

Von Friedrich Fröhr und Fritz Orttenger
Einführung in die elektronische Regelungstechnik
4 Völlig überarbeitete und erweiterte Auflage 1976

电子调节技术入门

【德】弗里西 弗罗等著

刘锦江译

*

水利电力出版社出版

(北京三里河路6号)

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售

水利电力印刷厂印刷

*

850×1168毫米 32开本 10.25印张 270千字

1984年11月第一版 1984年11月北京第一次印刷

印数00001—12260册 定价2.30元

书号 15143·5567

DT65/18
内 容 提 要

本书共分九章，主要内容有：电子调节技术中一般的定义、概念、调节系统品质的分析方法和各种典型调节环节的特性；比例、积分、微分等形式的运算放大器电子调节器的基本电路和特性，各种辅助电路和特性以及有复杂反馈的调节回路和变换；电子调节回路（即调节器）的最优化调整，幅值最优法和对称最优法，以及I、PI、PID等形式的调节器对各种调节对象的补偿；用列表法进行各种调节器的最优化调整。

本书深入浅出地阐述了电子模拟调节自动化技术的基础知识，物理概念清晰，数学处理简明，便于广大技术人员和工人掌握应知的自动化调节理论。书中提出的有关名词、概念、公式、曲线、调整方法等都有实用价值。

本书可供电力、冶金、化工、机械等工业中从事自动控制、自动调节和电气工程安装、调试、运行、设计等工作的技术人员和工人学习，也可供大专院校有关专业的师生参考。

译者序

在电力工业和其它工业中，设备功能的自动化调节系统和设备操作程序的自动化控制系统，广泛应用了晶体管电路、运算放大器及其各种电路组成的电子模拟调节器。这种电子模拟调节器是调节设备的核心部分，它决定和改善了调节系统的灵敏度、速应性、稳定性等调节品质的指标，同时还产生了很多新的调节功能，因此又促进了这种电子模拟调节技术的发展。

西德西门子公司的这本专著阐述了电子模拟调节技术的基础知识，这是从事自动化调节工程的工作人员应知的知识。在阐述中，深入浅出，物理概念清晰，数学处理简明，侧重于实际应用。

本书的第一章到第三章叙述了电子调节技术中一般的定义、概念、调节系统品质的分析方法和各种典型调节环节的特性。在调节品质分析方法的简介中，主要是说明频率综合方法，即普通频率法和对数频率法的基本概念。频率综合法是本世纪三十年代至五十年代发展完善的古典控制理论。第四章和第五章叙述了比例、积分、微分等形式的电子调节器的基本电路和特性，各种辅助电路和特性，以及有复杂反馈的调节回路和变换。第六章叙述了电子调节回路的最优化调整，也就是调节器的最优化调整；说明了幅值最优法和对称最优法，以及 I 、 PI 、 PID 等形式的调节

器对各种调节对象的补偿；还提出用列表法进行各种调节器的最优化调整。

限于译者的翻译水平与技术水平，译文难免有错误之处，恳请读者批评指正。第一机械工业部自动化研究所林启荣同志、原电力工业部科学技术委员会张树文同志对译文初稿提出了宝贵的意见，由清华大学微电子学研究所钱佩信同志审稿。对以上同志特此致谢。

译 者

第四版前言(原序)

电子调节技术广泛应用于自动化的所有领域。例如,用于巨型发电厂、重工业,甚至用于只有几毫安电流的小型电力拖动设备。

本书向读者说明调节回路里的各种概念和调节过程,以及在调节回路中有模拟式调节装置作用时,回路中各种连续的、近似连续的工作情况。另外,还清楚地叙述了调节回路中各种客观存在的关系和调节方法。本书的内容密切联系实际,并且选用了电力拖动设备的调节作为实例。

本版考虑了集成线性放大器(即运算放大器)的不断发展。至今为止,由于经济上的原因,在一个调节器中采用很多放大器的电路已经被淘汰。因此,本书要详尽地讨论那些与现代技术相适应的具有反相放大器、同相放大器和差分放大器的电路,以及由这种电路构成的电子装置。

读者理解调节回路的这些关系只需要少量的数学知识。书中利用传递函数来表示各传递环节,并且运用极易掌握的代数方法来运算,简化了各调节回路之间的关系。

如果按照幅值最优和对称最优的方法进行调节回路的最优化调整,就不必再考虑调节回路的稳定条件。此外,这种最优化是由数学确定的,不需要图解的方法。本书将广义调节对象特性及

其所需的调节器之间已知的数学关系都编入了一览表。

在本书中，列有很多的插图、曲线、表格和图解，并且汇编了电子调节技术方面所需的函数、公式符号和术语，这些资料对读者都是很有用的。

西门子公司

目 录

译者序

第四版前言（原序）

第一章 调节技术的基本概念	1
1.1 定义和符号	2
1.2 模拟与数字	10
1.3 被调量的各种暂态过程	11
1.4 阶跃响应和频率特性	16
第二章 各种传递环节的动态调节特性	20
2.1 将时间领域转换为频率领域	20
2.2 一阶惯性环节	22
2.3 二阶振荡环节	29
2.4 由两个一阶惯性环节组成的二阶振荡环节	40
第三章 广义调节对象中各种传递环节的特性	46
3.1 比例传递环节	48
3.2 积分传递环节	50
3.3 一阶惯性环节	53
3.4 二阶振荡环节	56
3.5 具有超前特性的环节（理想微分环节）	61
3.6 缓冲环节（实际微分环节）	65
3.7 延迟环节	68

3.8	非线性传递环节	71
第四章	电子调节器	77
4.1	四端调节放大器	78
4.2	调节放大器的基本连接	90
4.3	调节器的传递特性及其实现方法	105
4.4	调节器的辅助电路	142
第五章	各种传递环节之间的连接	166
5.1	各种传递环节特性的表示法	166
5.2	作用线及其连接	168
5.3	各种传递环节的基本连接	169
5.4	传递环节间基本连接的应用实例	173
5.5	分支和加法的变换	180
5.6	调节回路的传递函数	183
第六章	调节回路的最优调整	190
6.1	对被调量阶跃响应的评价	191
6.2	补偿	194
6.3	多个小时间常数的总和	201
6.4	简单的调节回路	203
6.5	最优化的一般考虑	205
6.6	幅值逼近的最优化方法	209
6.7	运用列表法进行各调节器最优调整的实例	269
第七章	附录	282
7.1	符号和说明	282
7.2	标号	282
7.3	传递函数与过渡函数的对照表	292
第八章	参考文献	295
第九章	术语索引	297

调节技术的基本概念

调节技术是一门比较年青的科学。众所周知，调节技术在解决种类繁多的物理问题中，只用一种通用的方式方法。这种方式方法的特点是反馈，它有自己的规律，而不取决于调节回路个别部分的物理性质。

这种调节技术是自动化技术的初步和基础，现在一直被广泛地应用着。所以，理解调节技术中的各种过程和关系，对每一个自动化系统都是很有意义的。

本书采用的符号和定义，主要参照的是1968年5月西德国家标准 DIN 19226 标准篇，还参照了1973年3月起草的西德国家标准 DIN 19229 标准篇和1971年4月起草的 DIN 19232 标准篇。本书只叙述以晶体管为放大元件的电子调节器的应用，并且只探讨它在电力拖动技术和发电技术中的调节性能，即连续和近似连续工作的调节性能。实际上，调节器除了过调以外，一直进行的是连续的调节工作。所以，本书涉及到的各种调节过程，都能够由时域和频域里的一个连续函数加以描绘。但是，这里假设一个系统里所有的传递环节都是线性的和无反馈的。

另外，这里不再叙述有很大延迟时间的广义调节对象的调节、采样调节、两位式或三位式的调节，而主要是叙述在过程调节技术中出现的调节。

1.1 定义和符号

现在说明调节技术采用的定义和符号。这里举出电力拖动工程中的一个简例。

1.1.1 数量的控制

一个恒励磁直流电动机带动着一个具有规定转速的工作机器。这个转速是物理量，它由运转工作机器的工人决定。为此，工人利用一个适当的直流电位器，将直流电动机电枢的电压调整到规定值，譬如，对于容易加工的材料，转速被调到600转/分。假定这是工作过程的最佳转速。所以，这个转速在机器的全部工作过程中应该保持不变。

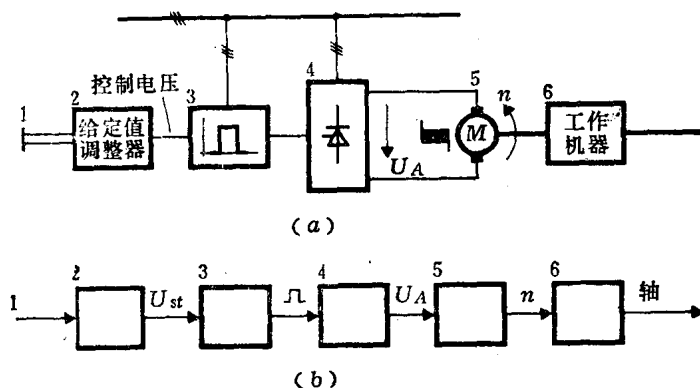


图 1.1 串联控制系统（可变转速的电力拖动设备）的实例

（a）原理图；（b）方框结构图

在本例中，只示出控制机器转速的一种控制设备或工作设备（图1.1）；工人用手轮1调整“输入量”，使转速达到预期的值。操作过程是：“控制电压”作为“给定值”2作用到“控制装置”3上，控制装置用触发脉冲控制输出直流电流的可控硅整流器4。调整装置将调整好的直流电压 U_A 输送到直流电动机5的电枢

上，这个电动机驱动工作机器 6 的轴。本例所述的转速 n 应该达到 600 转/分。

本例是串联控制的形式，即其中一个环节的作用能影响到后边的环节。事先规定一个预期的转速，这个转速称做“输入量”。它由控制电压的形式来表现，并且由给定值调整器（1 和 2）产生。这个预期转速的指令从本串联系统中的一个环节依次逐个地传递出去。这些环节称做“传递环节”。由几个传递环节串联成的整体称做“串联控制系统”。若在这个系统的始端通入一个输入量，则在其终端将输出一个物理量，这个物理量称做“输出量”。输出量是按照输入量被调整的。在图 1.1 的例子中，采用了控制装置和整流器。这两个环节称做“执行环节”。除了给定值调整器以外，所述串联控制系统的传递环节也称做“广义调节对象”。

当难加工的材料代替容易加工的材料时，电动机的负载加重，便出现低转速，事先调整好的 600 转/分的转速便受到干扰。

对输出量（在本例中为转速）的某些影响称做“干扰量”。假如干扰量的影响处于某种极限以内，使得输出量不超过所用工艺的允许误差范围，那么，采用的这个控制系统是正确的。

如果这个广义调节对象为随着或按照已知时序的其它控制方式运行，则前述的定义和符号仍然不变。

根据西德国家标准 DIN 19226 “控制”的定义如下：

在一个限定的系统上，从外部（即所谓的输入量）对系统施加影响，而使输出量或工作量按照已知的物理规律性、连接方式和时间过程成为一个预期值。这里，输出量不影响输入量。因此，输出量可能在外界干扰下显著地偏离预期值。

1.1.2 数量的调节

在上述“直流拖动设备”的例子中，如考虑干扰量，可以得出结论，在串联控制系统里，输出量仅仅十分有限地随输入量变化。因为任何干扰量都影响输出量。例如，在图 1.1 中一个持久不变的干扰（图 1.1 中的基本负载），可以由给定值调整器的一个

相应的预整定来校正。但是，如果在系统中的干扰量随时间和任意的幅值（直至允许极限）变化时，则应该去检测输出量，并且当输出量与输入量的规定值有偏差时，应使输出量接近输入量。为此，必须从输出量引出一个“反馈量”到输入量内，这个过程称做“调节”。

任何的干扰量变化都需要调节。

调节是由一个“调节装置”驱动的，调节装置必须装在已有的设备上。调节装置一般由三个部分组成，它的每一个部分都有其特殊的任务。当输出量就是检测量时，如果在调节中输出量保持不变，或者随着变化的输入量而改变，则这个输出量称做“被调量”。在图 1.1 的例子中，被调量就是转速，它是由测速电机检测的。

在很多情况下，输出量是不能或很难测得的。这里以另一种调节为例，如输出量是一台直流电机气隙里的磁通。在气隙中，安装一个霍耳探测器是不可能的，而必须以励磁电流为被调量，因为它能很好地反映磁通，并且便于检测。所以，输出量与被调量不是永远一致的，但是它们必须有密切的物理关系。

在后一个例子中，如果利用一个分流器测量直流电流，因为分流器上的电压很小，所以还需用一个放大器。在这种情况下，分流器称做“测量传感器”，高精度和线性的电压放大器称做“测量放大器”。测量传感器和测量放大器组成“检测变换器”。这样，变换器便能够测量一个被调量，并将它变换成调节设备所能够接受的任意物理量。

检测变换器不一定由多个部件组成。如在图 1.1 的例子中，所谓的测速电机就是一个部件的检测变换器，它能将转速变换成电压。

调节设备的第一个任务，是起检测变换器的作用；

检测变换器可测量被调量，并且能将它转换成调节设备中其它部件所能接受的一个信号。这里，讨论的是电力拖动和发电技术中的调节，变换器应该连续不中断地工作。

在电力拖动和发电技术中，模拟一个物理量的信号是一个直流电压。这个信号称做“直流电压信号”。信号可以在-10伏到+10伏范围内变化。10伏是模拟量的最大值，其符号表示方向。例如，一个旋转力矩可能是右旋的或是左旋的。一般，10伏的最大值对应于100%的物理量额定值。所以，这个最大值称做“单位值”。

此外，在很多情况下，主要是在过程调节技术中，用0到20毫安范围的直流电流去模拟一个物理量。

输入量必须与被调量比较，以便确定被调量的“实际值”与“给定值”的偏差值。所以，检测变换器反映出的被调量应当扣除给定值调整器输出端的值。这就需要有一个比较电路或者“比较器”，在比较器的输出端得到“调节偏差”的模拟值。

输入量和被调量有时由电压来模拟，两个量在通常的电路中必须有不同的极性。并且在“输入量通道”和“被调量通道”的电阻上产生不同极性的电流。电流之差就是调节偏差的模拟值。

另外，还应区别暂态调节偏差和残留调节偏差。“暂态调节偏差”仅仅在调节过程中发生，它在调节过程终止即消失。如果调节偏差直到调节过程终止时仍没完全消失，这个偏差称为“残留调节偏差”。当调节偏差不超过一定的误差范围，如2%时，则认为调节过程到达终点。误差范围可由被调量全控制范围的绝对值表示，也可由输入量每次的变化量表示。

调节设备的第二个任务，是作为比较器：

比较器将被调量与输入量相比较，并且形成调节偏差。

调节偏差用减法表示，即为

输入量减被调量

如果差值为正的，则调节设备要使被调量增大。这是一个对广义调节对象的正作用。

譬如，用测量仪表显示调节偏差，就可以知道被调量偏差的极性。此外，可用另一个减法表示为

被调量减输入量

这个差值称做“调节偏离”。如果它是负的,则说明被调量较小。

如果调节偏差值较大,就有一个大的执行量作用在广义调节对象输入端的执行环节;如果调节偏差较小,则说明只要有一个小的执行量作用于广义调节对象的执行环节,被调量就能很好地与输入量一致。如果调节偏差为零或者接近于零,则调节系统达到“调节完成”,并且执行环节的调整是正确的。

在调节情况下,调节的对象称做“广义调节对象”,它不立刻反映执行环节的调节变化,而在大多数情况下是延时反映的。调节设备应与广义调节对象的时间特性相配合,使被调量尽可能快速、精确、不振荡地跟踪输入量的变化,或者调节消除一个干扰量的变化。为此,要求调节偏差不直接作用在执行环节上,而是作用在一个特定的传递环节中,这个环节除了产生与调节偏差成比例的作用外,还必须产生一个抵消广义调节对象随时间变化的惯性延迟作用。这两种作用有特定的幅值和特定的时间特性,它们作为“执行量”作用在广义调节对象的执行环节上。当“调节器参数”,也就是“放大系数”和“时间常数”,调整到最优时,就称做调节最优化。这个调节器传递环节的最优化,确定了被调量的调节特性。所以,这个传递环节是调节设备的核心部分。

调节设备的第三个任务,是利用这个核心部分解决下述问题:

按照广义调节对象的特性,将传递环节中的调节器参数进行各种可能的最优调整,使调节偏差形成一个最优调节过程所需的执行量。

能够确定输入量和被调量之间的偏差,由此又能建立所需的执行量的一个装置,称做“调节器”。

调节器可以是机械的、液压的、气动的和电气的。在调节器的输入端和输出端,一般只用一些符号表示是何种信号传递体在工作。为适应现今的电子技术发展状况,在电气调节器中采用了半导体元件。这种调节器属于“电子调节器”。

例如,以转速变化的电力拖动设备为例,它用一个串联控制

回路来表示（图1.1）。为使转速不仅可以调整，而且在干扰量的变化下能够长时间地保持不变，这个串联控制回路应扩大成调节回路。

图1.2示出的是一个调节回路。在现有的串联控制回路上增加了一些装置，这些装置构成调节设备。这里，“反馈”是很重要的。用测速电机7检测转速，并且将转速变换为“实际电压” U_i （转速的模拟值），这个模拟值反馈到调节器的输入端，作用到比较器8上。比较器是调节器的一部分，它将被调量与输入量相加。这个输入量是由给定值调整器2输出的“给定值电压” U_s 。

在图例1.2中，被调量的检测可以连续地进行，也可以按照固定的时间间隔进行。它们称做“连续调节”或“采样调节”。这里只叙述连续调节。

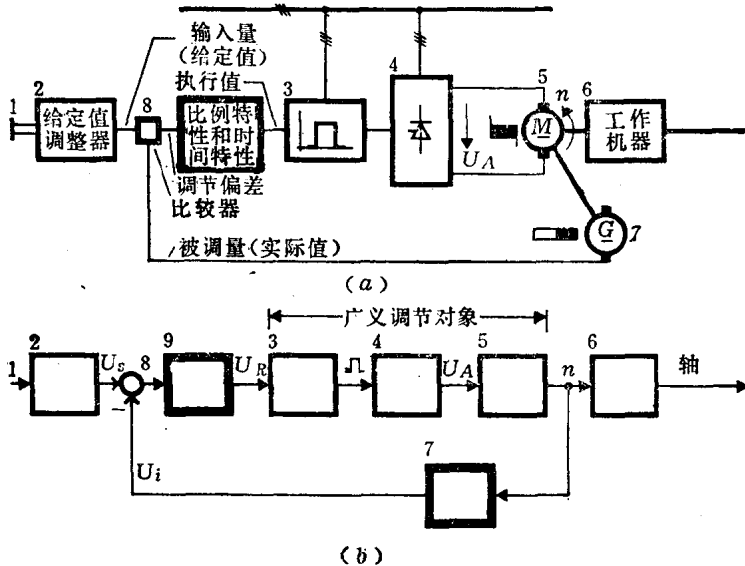


图 1.2 调节回路（转速被调节的电力拖动设备）举例
(a)原理图；(b)方框图

由图1.2可知，有比例特性和时间特性的调节器9的输出端输出执行量，即调节器的输出电压 U_R ，它作用到可控硅整流器