

高等学校交流讲义

自动调整原理

西安交通大学电机系工企教研組編

只限学校内部使用



中国工业出版社

高等学校交流讲义



自动调整原理

西安交通大学电机系工企教研组编

中国工业出版社

本书包括线性和非线性自动调整理论基础两大部分。线性部分叙述了一般概念。自动调整系统的对象和元件、自动调整系统、数学基础（拉氏变换）、传递函数和频率特性、自动调整系统的稳定性，并对调整系统的品质进行了研究；非线性部分阐述了自动调整系统的典型非线性特性、研究非线性自动调整系统的相迹法及谐波平衡法。

本书可供高等学校四、五年制工企专业及电机电器专业作为相应课程的试用教材。

书中线性部分采用何文敏著“自动调整原理”的全部，非线性部分采用 B.B. 索洛多夫尼可夫主编、王众祐译“自动调整原理”第二十七和三十三两章的全部；另加一些补充材料附于书末。

自动调整原理

西安交通大学电机系工企教研组编

*

中国工业出版社出版(北京佟麟阁路丙10号)

(北京市书刊出版事业许可证出字第110号)

中国工业出版社第二印刷厂印刷

新华书店科技发行所发行·各地新华书店经售

*

开本 $787 \times 1092^{1/16}$ ·印张11·字数253,000

1961年10月北京第一版·1961年10月北京第一次印刷

印数0001—4,837·定价(10-6)1.35元

统一书号: 15165·342 (水电-53)

目 录

第一部分 线性自动调整理论基础

第一章 一般概念	5
1-1 自动调整的基本任务	5
1-2 自动调整系统的分类	7
1-3 对自动调整系统所提出的基本要求	10
第二章 自动调整系统的对象和元件	12
2-1 调整对象	12
2-2 调整器元件	15
第三章 自动调整系统	22
3-1 自动调整系统的静特性及其作图法	22
3-2 按动态性质来划分自动调整系统成若干环节	24
3-3 编写自动调整系统的方程式	30
3-4 自动调整系统方程式的编写举例	31
第四章 数学基础(拉氏变换)	33
4-1 函数的拉氏变换的定义和公式	33
4-2 函数的导数和积分的拉氏变换	34
4-3 拉氏变换的反演	37
4-4 最终值定律和起始值定律	37
4-5 用拉氏变换解微分方程式	38
4-6 分解定律	39
第五章 传递函数和频率特性	42
5-1 传递函数的定义	42
5-2 由环节的传递函数求系统的传递函数	43
5-3 频率特性	45
5-4 频率特性的作图	47
第六章 自动调整系统的稳定性	52
6-1 稳定的概念	52
6-2 系统特征方程式的根与稳定性的关系	52
6-3 劳斯-古尔维茨判据	55
6-4 米哈依洛夫判据	57
6-5 奈魁斯特判据	60
6-6 对数判据	64
6-7 Π -域划分的概念	66
6-8 根据一个复数参数的 Π -域划分	68
6-9 关于两个实数参数的 Π -域划分	70
6-10 单环系统的稳定	72
6-11 自动调整系统的稳定	75
6-12 各种稳定装置的应用	79
第七章 调整系统品质的研究	81

7-1 调整过程品质的指标	81
7-2 调整过程品质的评价	81
7-3 间接评价	83
7-4 稳定度与振荡度	84
7-5 积分评价	86
7-6 频率法	88
7-7 频率特性和调整过程之间的关系	91
7-8 按闭环系统实频率特性的特点确定系统的某些品质指标	93
7-9 根据频率特性绘出调整过程的近似法	95
7-10 闭环系统实频率特性的绘制	97

第二部分 非线性自动调整理论基础

第八章 自动调整系统的典型非线性特性	100
第九章 研究非线性自动调整系统的相迹法	104
9-1 相平面的概念	104
9-2 积分曲线方程式和奇点的分类	108
9-3 自持振荡和奇点的分类	112
9-4 右边不可解析的方程式所描述的调整系统的相平面	114
9-5 多叶相曲面的概念	120
第十章 研究非线性自动调整系统的谐波平衡法	125
10-1 非线性元件的等效复放大系数	125
10-2 具有非线性元件的调整系统的方程式	130
10-3 非线性自动调整系统自持振荡的稳定性	131
10-4 非线性调整系统稳定性的研究举例	132
10-5 具有非零阶非线性元件的调整系统的分析	142
10-6 非线性调整系统的锁定	146
10-7 正弦波扰动下的非线性系统	147
10-8 某些非线性元件的等效复放大系数的计算	149

第一部分的补充材料

(I) 自动调整系统静特性的作法	153
I-1 环节相联接时的特性	153
I-2 闭环自动调整系统的静特性	156
I-3 由 n 个线性环节串联成的单回路系统的静特性	159
(II) 自动调整系统中对象和元件方程式的编写法	160
II-1 具有一个自由度的理想化原动机的方程式	160
II-2 直流发电机的方程式	163
II-3 液力伺服马达的方程式	167
II-4 他激直流电动机的方程式	163
附录	171
1. 常用函数的拉氏变换表	171
2. 函数 e^{-x} 以及以弧度(径)为单位的角的积分正弦和三角函数表	172
3. h 函数表	175

第一部分

线性自动调整理论基础

第一章 一般概念

1-1 自动调整的基本任务

在各种生产过程以及技术设备中，常常需要使其中的某些物理量(例如温度、电压、转速等等)保持常数，或者让它们按照一定的规律变化。要满足这种需要，应该对生产机械或技术设备进行即时的调整，以抵销外界的扰动和影响。这种调整，除了可以由人工来进行以外，还可以由机械来进行，即自动地进行。用来执行这种调整动作的设备，称为调整器；被调整器控制的设备称为调整对象。调整对象和调整器一起，统称为自动调整系统。

尽管被调整的物理量有各式各样的，并且就各种自动调整系统来说，它们的构造也可能有很大的差别，然而，在一些不同的自动调整系统中，无论如何，总有一个共同的目标，那就是要用机械的调整来代替人工的调整。为了弄清这种代替为什么可能，以及究竟是怎样代替的，首先值得我们考虑一下的，是在人工调整中，到底人担任了哪些工作，或者说起了些什么作用。

既然谈到调整，那末，总有一个希望达到的目标，也就是总有一个理想情况，通常把它叫做给定值。例如，就一个温度调整系统(图1-1)来说，我们需要炉子1在什么温度工作，事先总有个数目；其次，这个炉子在任何时候的实际温度也有个数目，调整人员的任务是：在测量了实际温度以后，把它和给定温度比较。倘若炉子的温度比给定值高，我们便将图中的开关3断开，于是电阻4便停止发热，炉子逐渐冷下来。倘若炉子的温度比给定值低，则我们让开关3合上，于是电阻4发热，炉子的温度逐渐上升到给定值。

由此可见，在人工调整中包含着这样几个步骤：

- (1) 测量被调整量；
- (2) 将所测得的被调整量的值和给定值进行比较，得出误差；
- (3) 根据误差的性质来转化为调整动作。

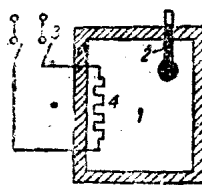


图 1-1

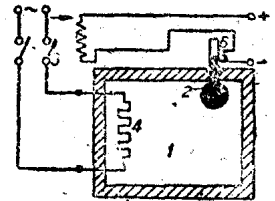


图 1-2

因此，倘若要用自动调整来代替人工调整，那末，在自动调整系统中，必须包含三种机构，即：(1) 测量机构，(2) 比较机构，和(3) 执行机构。同时，由于在人工调整中，将被调整量和给定值进行比较是靠调整人员进行，因此，关于给定值的问题，只要调整人员心中有数就行了。而在自动调整系统中，则必须将给定值在系统中具体的体现出来，从而自动调整设备还应该引入给定值的设备。我们把它称为命令机构。

下面讲一个具体的例子。图 1-2 是一个最简单的温度自动调整系统的原理图。在这一图中，3 所代表的，不是一个普通的开关，而是一个继电器。这继电器的触头接在交流电源的电路中，当继电器的绕组中没有电流时，继电器的触头是闭合的。此外，在温度表 2 中，还引出了两根导线 5、6 作为接头。继电器绕组和直流激磁电源的连接法如图所示。

当炉子 1 的温度高于给定的温度时，温度表中的水银柱上升得超过接头 6，从而将继电器绕组的电源接通，继电器开始动作，使得电阻 4 的交流电源切断，于是电阻停止发热，炉子的温度逐渐降低下来。当炉子的温度低于给定值时，温度表中的水银柱下降得低于接头 6，这时，继电器绕组和电源没有接通，触头在常闭的位置，于是有电流流过电阻 4，使得炉子的温度上升。自动调整就是这样进行着。在这一系统中，显然，炉子是被调整对象；温度是被调整量；温度表 2 是测量元件；接头 6 是给定值；由接头 5、6 所连成的继电器激磁绕组的供电线路，是比较机构；继电器本身是执行元件。

到这里，自动调整系统的基本原理便很清楚了。它和人工调整一样，也是由测量元件测量了被调整量，把它和给定值比较，得出误差，然后由误差来控制执行元件，从而达到减少误差的目的。由上述的温度自动调整系统也不难看出，当初是被调整量（炉子的温度）使测量元件动作，其次测量元件的输出和给定值相比得出误差，误差使执行元

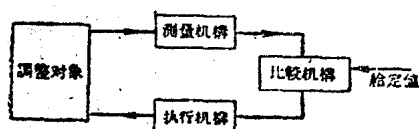


图 1-3

件动作，执行元件的动作最后又反过来改变被调整量的值。自动调整系统的各种机构就是这样按照一定的顺序，一个影响一个，周而复始循环不已。因此，自动调整系统的特点，在于它是一个闭环系统。用下列方框图（图 1-3）可以清楚地把这个特点表现出来。显然，命令机构不包含在闭环系统之内。

在人工调整中，假如把工作人员也看作是调整系统的一个组成部分，那末，人工调整系统也是一个闭环系统。在这种闭环系统中，比较机构和执行机构是由人来担任的。

然而应该指出，在自动调整系统中，也有按开环系统来工作的。这种系统是利用某些元件的内部物理性质来完成调整作用的。例如，利用辉光放电管的稳压装置便是一个具体的例子。辉光放电管是一种二极管（板极和冷阴极），管中装有惰性气体，它的表示方法如图 1-4（甲）所示。这种二极管的伏安特性曲线则如图 1-4（乙）所示。这特性曲线

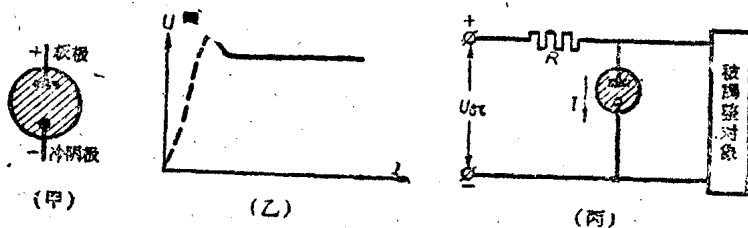


图 1-4

曲线的一部分代表二极管尚未辉光放电时，管中只有电子流的情形；特性曲线的水平部分代表二极管已经辉光放电后的情形，这时尽管含气管中的电流在相当大的范围内变化，含气管两端的电压实际上没有什么变动。就利用含气管这一段特性，可以达到自动稳定电压（直流电压）的目的。自动稳定电压的线路如图 1-4（丙）所示。需要稳压的

对象和含气管并联后，经过限流电阻 R 接到电源。当电源电压 U_{xx} 升高时，含气管中的电流增加，而电压不变，这使得电阻 R 上的电压降相应的增高。相反，当电源电压 U_{xx} 降低时，含气管中的电流减少，但两端的电压不变，这使得电阻 R 上的电压降相应的减小。因此，这种开环系统也可以在一定范围内完成自动调整电压的任务。不过，自动调整原理不以这种调整系统为研究对象。

1-2 自动调整系统的分类

上一节中我们介绍了自动调整系统的任务和特征。现在来讲自动调整的分类。

自动调整系统可以从一些不同的角度来进行分类，即：(1)按被调整量的物理性质分类；(2)按系统有无放大器分类；(3)按给定值变化的规律分类；(4)按调整动作与时间的关系分类；(5)按被调整量的稳定值是否受外来扰动的影响分类等等。

(1)按被调整量的物理性质分类——可以分为：电调整系统，机械调整系统，热调整系统等等。

(2)按系统有无放大器分类——不含放大器的系统称为直接调整系统；含有放大器的系统称为间接调整系统。

直接调整系统的优点是设备简单，可是在这种系统中，执行机构所消耗的功率是由误差信号来供给，而误差信号的功率一般很小，常常不足以使执行机构动作，因此这种系统不够灵敏或者说准确度小。

在间接调整系统中，误差只作为控制信号，执行机构所消耗的功率是由供给放大器的外界能源来供给，因此这种系统的准确度比较高。在现代的自动调整系统中，很少用直接调整系统，譬如就图 1-2 所示的自动调整温度的系统来说，不难看出，并不是继电器绕组中的电流（它代表误差）直接使电阻 R 发热，而它是作为控制信号来控制触头的开闭。调整温度所需要的功率，是由外界的交流电源供给的。因此，这个系统中的继电器，除了执行元件以外，还同时担任了放大器的作用。这个系统乃是一个间接调整系统。

(3)按给定值变化的规律可以分为下列三类：

1. 恒值调整系统：使被调整量保持恒定或者基本上保持恒定的自动调整系统，称为恒值调整系统。图 1-2 所示的保持温度恒定的系统，可以当作这种系统的一个例子。

2. 循序调整系统：在这种系统中，被调整量按一定的事先确定了的规律变化。例如在冶炼金属时，冶炼炉的温度往往要按一定的规律变化，才能满足冶金的要求。这时便要用循序调整系统。这种系统与恒值调整系统的区别在于：前者的给定值是时间的已知函数，而后的给定值是常数。显然，循序调整系统具有比较复杂的命令机构。

3. 随动系统：在这种系统中，被调整量的给定值可在广大范围内随意变化，也就是给定值的变化规律事先不能确定。这种系统的实例如工业上常用的同轴旋转设备以及国防上用的由雷达控制的高射炮等。下面举一个简单的例子。

如图 1-5 所示，图中有两个电位计。电位计 1 的可动片装有旋转手柄，电位计 2 的可动片则与电动机 4 的电枢以及负载 5 装在同一轴上，一起旋

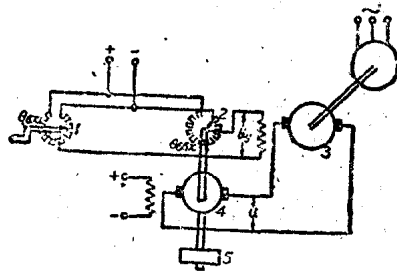


图 1-5

轉。两个电位計固定的两端并联接在直流电源上，两个电位計的可动片則分別接在他激发电机的激磁繞組的两端。他激发电机的电樞由三相同步电动机帶動作恆速旋轉，发电机的电压則接在他激电动机的电樞上。

当两个电位計的可动片位于相应的位置时，也就是当电位計 1 可动片的旋轉角 θ_{ax} 和电位計 2 可动片的旋轉角 θ_{bax} 相等时，两个电位計可动片之間的电压为零，从而他激发电机的激磁电压等于零。这时，发电机的电樞电压当然等于零，于是他激电动机不轉动。假如我們將电位計可动片的手柄轉动一个角度，便得 $\theta_{ax} \neq \theta_{bax}$ 。这时发电机的激磁电压不再为零，激磁电压的大小和 $(\theta_{ax} - \theta_{bax})$ 的絕對值成正比。激磁电压的极性和 $(\theta_{ax} - \theta_{bax})$ 的符号有关，因此，发电机电樞电压的大小和极性决定于 $(\theta_{ax} - \theta_{bax})$ 的大小和极性。

当发电机的电樞电压加在电动机的电樞上时，电动机帶动負載和电位計 2 的可动片一起旋轉，旋轉的方向是使得 $(\theta_{ax} - \theta_{bax})$ 减小。显然，当轉到 $\theta_{ax} = \theta_{bax}$ 时，发电机的激磁电压重新等于零，这使得发电机的电樞电压变得等于零，于是电动机停止旋轉，两个电位計的可动片重新停留在新的对应位置上。

因此，尽管两个旋轉軸之間沒有机械联系，然而，电位計 2 的轉軸，随时都有轉到与电位計 1 轉軸相应位置的趋势。在这一系統中，电位計 1 的可动片的轉角 θ_{ax} 为給定值；电位計 2 的可动片的轉角 θ_{bax} 是被調整量；由两个电位計和直流电源接成的电路是比較机构；两个电位計的可动片之間的电压 U_y 是誤差。显然，在这一系統中，誤差仅作为控制信号，而調整动作的功率是由他激发电机把外界的机械能变成电能来供給的。因此，发电机在这个系統中，起着放大器的作用，而他激电动机起着执行机构的作用。

由上一例子中可以看出，給定值 θ_{ax} 既不是常数，也不需要事先确定。此外，在随动系統中，尽管有各种不同的原理图，但总有一个是主动的，例如上一例子中的旋轉手柄；也总有一个是跟随着动的，如上一例子中的电位計 2 的轉軸。有时把主动的机构称为发送机，从动的机构叫做接收机。

(4) 按調整动作与時間的关系可分为：連續調整系統，脉冲(斷續)調整系統和继电器調整系統。

連續調整系統的特征是：这种系統的一切組成部分，其輸出都是其輸入的連續函數。图 1-5 所示的随动系統就是一个連續調整系統。

脉冲調整系統的特征是：这种系統总含有一个这种元件，連續作用的輸入通过这种元件后，变为具有一定周期的暫短脉冲。

继电器調整系統的特征是：这种系統至少含有一个继电器。在继电器中，当輸入量达到一定值时，会发生輸出量的突变。例如图 1-2 所示的系統就是一个继电器調整系統。

(5) 按被調整量的穩定值是否受外来扰动的影响，可以分为两类：无呆滯系統和有呆滯系統。

1. 无呆滯系統的特征是：在穩定状态下的被調整量的值总保持恆定，它与外来作用无关。

图 1-6 所示的自动調整电压的系統，便是无呆滯調整系統的一个例子，图中他激发电机的电樞由一三相同步电动机帶動作勻速旋轉，发电机的激磁繞組与一可变电阻 R 串

联后接到固定的直流电源上，可变电阻可动片与他激直流电动机同轴，发电机的输出电压 U 和给定电压 U_0 依相反的极性串联后，把这两个电压的差 ΔU (误差) 作为放大器的输入，而放大器的输出则接在电动机的电枢上。显然，当发电机的端电压与给定电压有差别时，即 $\Delta U \neq 0$ 时，电动机将按照放大后 ΔU 的大小和符号，以一定的速度和方向旋转，从而改变发电机的激磁来减小误差。不难看出，只要有误差存在，电动机便转个不停，调整动作便不会终止，直到发电机的端电压与给定值相等时为止。因此，无呆滞有下列两个特点：

甲、只有被调整量与给定值相等时，系统才能稳定。

乙、当被调整量为同一值时，系统的执行机构可能占据不同的位置。

要使系统具有上述这两个特点，系统必须含有一种元件。当有输入时，这种元件的输出不断的加大；当没有输入时，它的输出等于零。图 1-6 中的电动机 3 便具有这种性质：当输入 $\Delta U \neq 0$ 时，电动机转个不停；当输入等于零时，它随处都可以停下来。以后

(第 3-2 节) 我们要讲到，这种元件叫做无呆滞元件或积分元件。它是无呆滞系统所必需的。

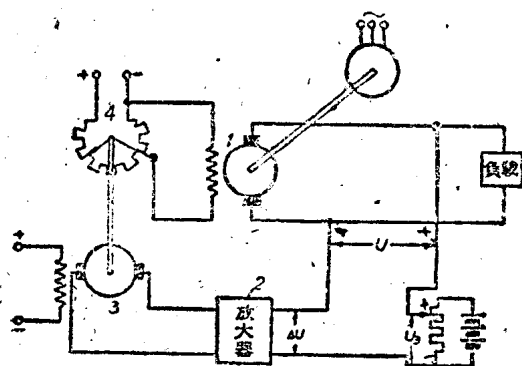


图 1-6

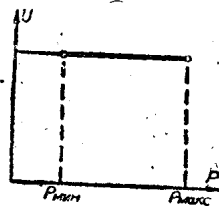


图 1-7

无呆滞系统用在对调整过程要求比较高的地方，它的特性曲线如图 1-7 所示，随动系统都是无呆滞系统。

2. 有呆滞系统的特征是：稳定状态下被调整量的值与外来扰动的大小有关；在这种系统中，调整器固然可以减小外来扰动所引起的偏差，然而却不能使被调整量准确地达到给定值。外来扰动(例如负载)愈大，被调整量的稳定值与给定值相差也愈大，图 1-8 所示的自动调压系统便是一个有呆滞系统。在这一系统中，他发电机的电枢由三相同步电机带动作匀速旋转，发电机的输出电压 U 和定电压 U_0 依相反的极性串联后，作为放大器的输入，放大器的输出则接在发电机的激磁绕组上。由图中不难看出，误差 $U_0 - U = \Delta U$ ，倘若 $\Delta U = 0$ ，那就不会有调整动作，但同时也没有激磁了。因此，系统不可能

停留在这种状态，也就是说，在这种系统中，误差总是难免的。关于这种系统的特性曲线如图 1-9 所示。有呆滞系统的特点

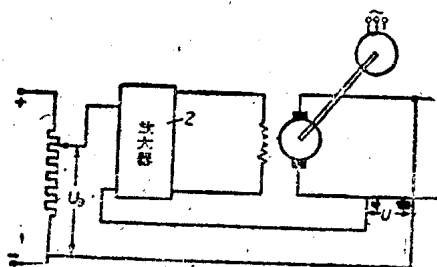


图 1-8

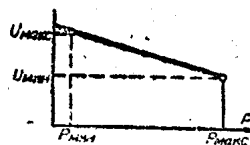


图 1-9

可以陈述如下:

甲、在一定范围内, 被调整量为任意值时, 系统都可以平衡。

乙、被调整量的稳定值与系统的调整机构的位置成单值对应。

既然有呆滞系统在稳定状态下总会有误差存在, 为了便于对误差作出量的估计起见, 我们引用“呆滞度”这个新的概念, 它由下列关系式来确定

$$S = \frac{x_{\text{макс}} - x_{\text{мин}}}{x_{\text{мин}}} \quad (1-1)$$

其中 $x_{\text{макс}}$ 与 $x_{\text{мин}}$ 分别代表当负载变动时被调整量的最大值与最小值。

在稳定状态下, 开环系统输出端的增量与引起它的输入端的增量的比值, 称为开环系统的放大系数(或传递系数)。

现在由上述的调压系统(图1-8)来推导呆滞度与放大系数之间的关系。

在调压系统中输入的增量为

$$\Delta U = U_s - U \quad (1-2)$$

而开环放大系数

$$k = \frac{U}{\Delta U} \quad (1-3)$$

由图1-8中不难看出在开环 $\Delta U = 0$ 时, $U = 0$, 因此, 在这里 U 应该理解为输出的增量。

由(1-2)式及(1-3)式可以求得

$$U_s = U + \Delta U = U \left(1 + \frac{1}{k} \right)$$

或者

$$\frac{U}{U_s} = \frac{k}{1+k} \quad (1-4)$$

比值 $\frac{k}{1+k}$ 称为闭环系统的放大系数, 在后面(第5-3节)我们还要讲到它。

在调压系统中

$$S = \frac{U_{\text{макс}} - U_{\text{мин}}}{U_{\text{макс}}} = \frac{U_s - U}{U_s} = 1 - \frac{U}{U_s}$$

将(1-4)式代入上式, 使得

$$S = 1 - \frac{k}{1+k} = \frac{1}{1+k} \quad (1-5)$$

当 $k \gg 1$ 时, 可以大致上认为

$$S = \frac{1}{k} \quad (1-6)$$

即呆滞度与放大系数成反比。因此, 要减小系统的呆滞度应该增加放大系数。

1-3 对自动调整系统所提出的基本要求

实际生产过程对自动调整各有其一定的具体要求, 倘若只有了自动调整系统的原理图, 例如我们前面所举的调压系统的线路图, 还不能保证系统就能很满意的工作。实际上, 任何调整系统的组成部分总含有一些如电容、电感、质量等等储藏能量的元件, 例如调压系统中激磁绕组的电感、电动机电枢的转动惯量便是。在调整过程中, 这种元件使得执行机构的动作不能即时地随着误差变化, 而是总有些延缓。于是, 当被调整量已

經达到給定值时，执行机构由于慣性的关系，在短時間內还繼續向原来的方向进行，这会使被調整量超过給定值，从而产生符号相反的誤差。于是执行机构向反方向动作，同样由于慣性的关系，又会使被調整量低于給定值。因此，一般說来，被調整量往往会在給定值两旁摆动，調整过程往往是一个振动过程。这振动若是减幅振动，則系統最后会达到平衡状态，这时，我們便說系統是稳定的；否則系統就是不稳定的。不稳定的系統根本无法自动調整，因此，稳定性是調整系統性能的一个重要的标志，也可說是对調整系統的一个基本要求。

然而，調整系統仅仅能滿足稳定性的要求还是不够的。例如每种生产过程对于調整过程的快慢、振动次数以及被調整量与稳定值的最大相差，都会有某种要求。上述这三点統称为系統的品质。

除了系統的稳定性和品质以外，还有一个对系統的基本要求，就是准确度。准确度代表系統达到平衡状态后被調整量与給定值的差額。显然，差額愈小，准确度愈高，无呆滞系統的准确度为100%。

系統受外来扰动时，紧接着就引起調整过程，經過足够长的時間以后，調整过程結束，系統恢复到稳定状态。調整过程的特点，由稳定性与品质来标明；而稳定状态的特点則由准确度标明。因此准确度属于系統的靜特性，稳定性与品质属于系統的动特性。

尽管調整系統的种类很多，但从上列的基本要求——准确度、稳定性、品质——着眼，便不难建立关于自动調整的普遍理論。因此，这些基本要求也是調整理論的中心問題。

第二章 自动调整系统的对象和元件

要对调整系统作全面的分析，首先必须对系统的每一个组成部分的性能有清晰的了解。前面提到过，调整系统是由调整对象和调整器组成的；它们的种类又很多，例如有属于机械方面的，有属于电气方面的、光学方面的等等，而每一种中又有各式各样结构和型式。在这里，我们限于篇幅，不能作比较全面的介绍，因此，只就其中选几种来讨论一下。

2-1 调整对象

在调整电压的自动调整系统中，发电机是调整对象；在调整转速的自动调整系统中，电动机可作为调整对象。关于电机的结构及原理，另有专门的书籍讨论，我们要讲的主要是诱导关于它们的微分方程式。

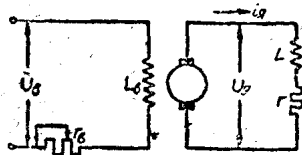


图 2-1

(1) 他激直流发电机——这种电机的原理图如图 2-1 所示。在诱导它的方程式时，为了使问题简化起见，我们假定激磁绕组的电感是常数；其次假定我们是变动激磁电压 U_s 来调整电机的电压，也就是说 U_s 是时间的函数，或者

$$U_s = U_s(t) \quad (2-1)$$

发电机激磁绕组中的电阻和电感分别用 L_s 和 r_s 来代表，而用 i_s 来代表激磁电流，则激磁电路的方程式可以写为

$$L_s \frac{di_s}{dt} + r_s i_s = U_s(t) \quad (2-2)$$

而电枢电路的方程式可以写为

$$L \frac{di_a}{dt} + r i_a = U_a \quad (2-3)$$

其中 L 和 r 为负载的电感和电阻， U_a 为电枢电压。由于不考虑铁心对绕组的影响，故磁化曲线可以用直线表示，或者

$$U_a = k' i_s \quad (2-4)$$

其中 k' 代表磁化曲线的斜率。将(2-4)式中的 i_s 的值代入(2-2)式中得到

$$L_s \frac{d}{dt} \left(\frac{U_a}{k'} \right) + r_s \left(\frac{U_a}{k'} \right) = U_s$$

将上式作变换，并用表示符号

$$T = \frac{L_s}{r_s}; \quad k = \frac{k'}{r_s}$$

其中 T 称为时间常数， k 称为放大系数，我们得到

$$T \frac{dU_a}{dt} + U_a = k U_s \quad (2-5)$$

我们以后有时用 p 来代表微分运算 d/dt ，这仅仅是为了方便，没有什么特别的意义。当用这种符号时，(2-5)式便可以写成

$$\begin{aligned} T p U_a + U_a &= k U_a \\ (T' p + 1) U_a &= k U_a \end{aligned} \quad (2-6)$$

或

(2) 他激直流电动机——假定他激直流电动机的磁场保持不变，而变动它的电枢电压来调整转速。现在来诱导关于它的微分方程式。

在诱导电动机的方程式时，除了电路电压的方程式以外，还须写出其力学方面的动平衡方程式。这是因为电动机的转速不但随着它本身电压、电流的不同而发生变化，同时还受它本身力学条件的影响。由力学中知道，关于物体转动的方程式是：

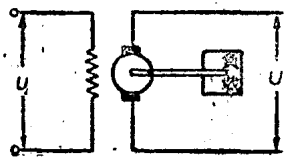


图 2-2

$$J \frac{d\omega}{dt} = \Sigma M \quad (2-7)$$

其中 J 是旋转物体的转动惯量； ω 是物体的角速度，从而 $\frac{d\omega}{dt}$ 是角加速度； ΣM 是加于旋转物体一切力矩的代数和。

在目前的情况下，加于电动机转轴上的力矩，包含着由电动机发出的原动力矩和加于转轴上的阻力矩。我们用 M_d 代表原动力矩，则由电机学中知道：

$$M_d = C_m \Phi i_a \quad (2-8)$$

其中 C_m 为常数； Φ 为激磁绕组中的磁通； i_a 为电枢电流。

我们用 M_c 代表阻力矩，它包含负载加于电动机的制动力矩以及摩擦力矩等。在一定的工作情况下， M_c 为常数。于是电动机转轴上的总力矩可以写为

$$\Sigma M = M_d - M_c \quad (2-9)$$

例如

$$M_d = M_c, \text{ 则 } \frac{d\omega}{dt} = 0.$$

这就表示电动机在匀速转动状态(或处于静止状态)；例如

$$M_d \neq M_c, \text{ 则 } \frac{d\omega}{dt} \neq 0.$$

这就表示电动机是在加速或减速状态。

将(2-9)式代入(2-7)式中，并考虑到(2-8)式时，使得

$$J \frac{d\omega}{dt} = M_d - M_c = C_m \Phi i_a - M_c \quad (2-10)$$

在实用中往往不用 J ，而用飞轮力矩。而每个旋转物体围绕其自身重量的轴的转动惯量，又等于它的质量 m 与环动半径 ρ 的平方的乘积，即

$$J = m \rho^2$$

现在用 G 代表物体的重量， g 代表重力加速度， D 代表环动直径，则显然

$$m = \frac{G}{g}; \quad \rho^2 = \frac{D^2}{4},$$

故

$$J = m \rho^2 = \frac{G}{g} \times \frac{D^2}{4} = \frac{GD^2}{4g} \quad (2-11)$$

在实用中往往不用角速度 ω ，而用每分钟的旋转次数 n ，显然

$$\omega = 2\pi \times \frac{n}{60} \quad (2-12)$$

于是

$$J \frac{d\omega}{dt} = \frac{GD^2}{4g} \times \frac{d}{dt} \left(\frac{2\pi}{60} n \right) = \frac{GD^2}{375} \frac{dn}{dt}$$

于是(2-10)式可以写为

$$\frac{GD^2}{375} \times \frac{dn}{dt} = C_m \Phi i_a - M_c \quad (2-13)$$

或

$$\frac{GD^2}{375} pn = C_m \Phi i_a - M_c \quad (2-14)$$

此外, 电枢电路的方程式是

$$U = e + L_a \frac{di_a}{dt} + i_a r_a \quad (2-15)$$

其中 L_a 和 r_a 代表电枢电路中的电感和电阻; i_a 代表电枢电流; U 代表加于电动机电枢上的端电压; e 为电枢电路中的反电势。大家知道,

$$e = C_e \Phi n \quad (2-16)$$

其中 C_e 是常数, 和前面一样; Φ 和 n 仍代表激磁磁通和电枢每分钟的旋转数。

将(2-16)式中的 e 代入(2-14)式, 使得

$$U = C_e \Phi n + L_a p i_a + i_a r_a \quad (2-17)$$

由(2-14)式和(2-17)式中消去 i_a , 使得

$$\begin{aligned} & \frac{L_a}{C_e C_m \Phi^2} \times \frac{GD^2}{375} p^2 n + \frac{r_a}{C_e C_m \Phi^2} \frac{GD^2}{375} pn + n \\ &= \frac{1}{C_e \Phi} U - \frac{M_c}{C_e C_m \Phi^2} (L_a p + r_a) \end{aligned} \quad (2-18)$$

由于他激电动机的磁通保持不变, 故 Φ 为常数。此外 C_e 、 C_m 、 G 、 D 、 L_a 、 r_a 也都是常数。因此我们引入下列表示符号

$$k = \frac{1}{C_e \Phi}, \quad k' = \frac{r_a}{C_e C_m \Phi^2}$$

$$T_a = \frac{L_a}{r_a}, \quad T_m = \frac{GD^2}{375} \times \frac{r_a}{C_m C_e \Phi^2}$$

用上列表示符号时, (2-18)式可以简化为

$$T_m T_a p^2 n + T_m pn + n = kU - k' M_c (1 + T_a p) \quad (2-19)$$

上式为电动机在激磁不变而变更电枢电压的情况下, 关于转速和它的端电压之间的微分方程式。显然当 $M_c = 0$ 时, 方程式简化为

$$T_m T_a p^2 n + T_m pn + n = kU \quad (2-20)$$

k 代表在稳定状态下 (即 $\frac{dn}{dt} = pn = 0$, 以及 $\frac{d^2 n}{dt^2} = p^2 n = 0$ 时), 输出量 n 和输入量 U 之比, 所以 k 称为放大系数。

由 T_m 的表达式中, 不难看出 T_m 具有时间的因次, 所以 T_m 称为电动机的电力时间常数。

T_a 为电枢电路中的电感和电阻的比值, 和前面发电机 $T = \frac{L_a}{r_a}$ 的情形相仿, 这里我们称 T_a 为电枢电路的时间常数。

2-2 調整器元件

調整器元件可以分为测量和比較元件、放大元件、执行元件等。下面我們每样略举几种来討論一下。

(1) 测量和比較元件——测量元件的任务是测量被調整量的值。比較元件的任务是将所測得的被調整量的值和給定值相比，从而得出誤差信号。下面分別討論关于轉速、温度、轉角的测量和比較元件。

1. 关于轉速的测量和比較元件

甲、差动齒輪系：差动齒輪系的原理图如图 2-3 所示。在支架 4 中，装有包含三个伞形齒輪的輪齒系，齒輪 1, 2 的軸可以在支架的槽中自由旋轉，齒輪 3 的軸則裝在支架上，可以和支架一起旋轉。这种設備可以用在自动調整轉速系統中，作为测量和比較元件来利用，將齒輪 1 的軸与給定轉速机构的軸相連，例如，同步电动机的轉速是恆定的，齒輪 1 便可以与同步电动机的軸相連，齒輪 2 与調整对象的轉軸相連，并且使齒輪 1, 2 依相反的方向旋轉。于是不难看出，当被調整轉速与給定轉速刚好相等时，則齒輪 3 靜止不动；假如被調整轉速与給定轉速不相等，則齒輪 3 連同支架將以齒輪 1 和齒輪 2 的轉速差為轉速來旋轉。当齒輪 1 的轉速大于齒輪 2 的轉速时，齒輪 3 依某一方向旋轉；当齒輪 1 的轉速小于齒輪 2 的轉速时，齒輪 3 便依相反的方向旋轉。

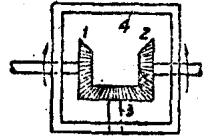


图 2-3

除了差动齒輪系以外，还有其他的办法来测量和比較轉速，用得比較普遍的是所謂測速发电机。

乙、測速发电机：測速发电机是一种小型的直流电机或交流电机，当某种設備的轉速需要测量时，便把它与該設備的轉軸相連。由于这种电机的电势与轉速成正比，因此，便可以不直接处理轉速，而只要处理和它等效的电势。譬如給定值的問題，在前面差动齒輪系中，我們便需要找一个速度保持不变的設備，現在只要用一組電池就够了。此外，在差动齒輪系中，給定值的設備与测量元件不能相距远了，否則很不方便。在用測速发电机时，便不受这种限制。下面簡單的介紹一下測速发电机的工作原理。

測速发电机可以分为直流測速发电机和交流測速发电机。直流測速发电机是一它激或永磁式的直流发电机，其电势

$$e_T = C_e \Phi n$$

其中 e_T 是測速发电机的电势； C_e 是常数； Φ 是磁通； n 是轉速。

因为在測速发电机中， Φ 总保持常数，故可以将上式中的 $C_e \Phi$ 并为一个常数，于是

$$e_T = \alpha n \quad (2-21)$$

其中 $\alpha = C_e \Phi$ 。

同步发电机可以作为交流測速发电机来使用，这种发电机的电势(和頻率)和轉速成正比。

除了上述的同步发电机以外，轉子短路的感应发电机，也可以作为交流測速发电机来使用。这种电机的定子中有互相正交的两个繞組，我們把它称为繞組 α, β 。当一个繞組，例如繞組 α 中接有交流电源，并假定轉子不动时，則尽管繞組 α 中的电流会产生脉动的

磁通，可是由于繞組 β 与繞組 α 正交，所以在繞組 β 中没有感应电势。当轉子旋轉时，短路轉子中的电流所产生的磁通会割切繞組 β 中的导体，于是在繞組 β 中便有电势，这电势的大小也与轉速成正比。

可以利用测速发电机作为测量元件，固定的电源(直流或交流)作为給定值，連成简单的綫路来得出誤差。例如图2-4中表示一用直流测速发电机来测量和比較轉速的綫路，电池組 E 接在一电位計上，在电位計上的 AB 一段上的电压是給定值。由于 A 是連到电位計的可动片，这样便可以在不同的情况下变动給定值。发电机的电势和給定电势是依相反的极性連接的，因此，当它們不相等时， AB 两端会出现誤差电压。电压的极性可以代表轉速是过高还是过低；电压的大小則与轉速誤差的大小成正比。

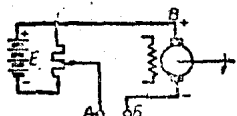


图 2-4

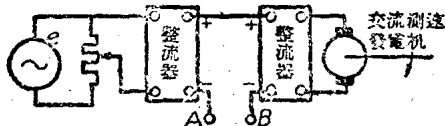


图 2-5

图2-5代表一用交流测速发电机来测量和比較轉速的綫路。不难看出，这一綫路与前一綫路大体上是相似的，只不过是将电池組換成了交流电源 e ，再就是添了两个整流器。这是因为两个交流电压相减，会受彼此間相位的影响，因此就用整流器先把它們变为直流电压然后相减。

2. 关于温度的测量和比較元件:

一般說，导体的电阻会随着其温度的升高而增加，随着其温度的降低而减小。利用这种物理性质可以作出測量温度的仪器，称为电阻溫度計。假定某个場合的温度需要調整到一定的值，那末，将电阻溫度計放在被控制的場合中，再連成一个如图2-6所示的桥式电路，把电阻溫度計作为电桥的一个臂，并且这样来給出給定值，就是变动 R_1 ，使得在我們所需要的温度时， AB 两端的电压等于零。当被調整对象的温度与給定值有差別时，則由于电阻溫度計电阻的变动，破坏了电桥的平衡，于是在 AB 两端有电压出现，电压的极性指出被調整的温度是太高了还是太低了。电压的大小代表誤差的大小。



图 2-6

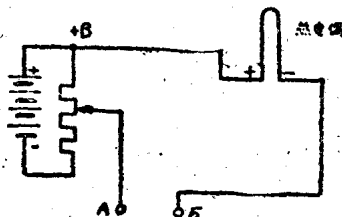


图 2-7

还可以利用热电偶来作为測量温度的元件。大家知道，热电偶是利用电学中热电效应，所作成的元件。热电偶能直接将温度变成电势。假定某个場合的温度需要調整，則把热电偶連成如图2-7所示的电路，并把該热电偶放在需要調整温度的物体中。我們这样变动电位計的可动片，使得在需要的温度时，电位計上 AB 一段的电压和热电偶所产生的电压大小相等，极性相反，因此，在 AB 两端的电压便等于零。当調整对象的温度与給定值有差別时， AB 两端便有电压出现，从电压的极性可以看出被調整的温度是太高了或是太低了。电压的大小則代表誤差的大小。