

自动调节原理

何 文 蛟 編

上海科学技术出版社

自动调节原理

(第二版)

何文蛟



上海科学技术出版社

內 容 提 要

本书簡明扼要地闡述自动調节的基本理論及有关的物理过程,着重討論自动調节系統的分析方法,对自动調节系統的靜特性、傳遞函数、頻率特性、稳定性以及过渡过程品质等都有較詳細的論述,并扼要地介紹非綫性自动調节的基本理論;比較重要的基本方法如頻率法、根軌迹法、相平面法及諧波平衡法等,也作了必要的介紹。

本书供从事自动控制的工程技術人員及大專學生作參考。

自动調节原理(第二版)

何 文 蛟 編

上海科学技术出版社出版 (上海瑞金二路450号)

上海市书刊出版业营业許可証出 093 号

上海市印刷四厂印刷 新华书店上海发行所发行

开本 850×1156 1/32 印張 11 4/32 排版字数 274,000

(原科技版印 3,000 册 1958 年 7 月第 1 版)

1959 年 2 月新 1 版印 4 次共印 11,500 册

1966 年 5 月第 2 版 1966 年 5 月第 1 次印刷

印数 1—4,000

統一書号 15119·683 定价(科六) 1.70 元

序

本书自 1958 年出版以来 (原名自动調整原理), 已經七年了。这七年中, 由于中国共产党的正确领导, 祖国科学技术事业得到蓬勃发展, 本书已显得不能适应客观形势的需要。作者在领导的关怀与支持下, 对本书进行了比較全面的修訂。章节的安排, 仍然沿用原来的順序, 书中第一至四章是在原书第一至三章的基础上重新写的。重写时, 是企图能加强基本概念和某些物理过程的闡述, 并增加有关分析自动調节系統靜特性以及有关編写自动調节系統微分方程式的内容。其次, 由于复合調节系統和根軌迹法已經相当普遍, 在本书第一、第三、第七等章里, 先后介紹了有关复合調节系統的初步知識。在第七章中, 扼要地补充了根軌迹法的要点。

此外, 由于非綫性調节原理愈来愈显得重要, 第九章介紹了几种典型非綫性特性和非綫性調节过程的特点, 并就第一章所举的继电器温度調节系統为例, 作出了定性的和定量的分析。然后在这个基础上, 介紹了有关相平面法和諧波平衡法的基本知識。

除对原书作补充外, 这次在取材上力求精簡, 而对于問題的闡述及基本公式的推导, 一般則並沒有从簡从略。为了能使讀者閱讀时感到平易, 节省一些精力, 书中采用了比較簡單的調节系統作为例子, 各章节之間的联系也較為緊密。因此, 作者认为, 本书适宜供在校同学以及未学习过这門課程的一般技術人員参考。

本书虽經修訂, 但限于作者水平, 錯誤和不妥之处在所难免, 希望讀者多予指正。

目 录

序

緒論	1
第一章 自动調节的一般概念	4
1-1 閉环調节	4
1-2 开环調节、按扰动的調节和复合調节	7
1-3 自动調节系統的分类	12
1-4 对自动調节系統的基本要求	25
第二章 自动調节系統的对象和元件	29
2-1 調节对象	29
2-2 調节器元件	33
2-3 自动調节系統举例	49
第三章 自动調节系統的靜特性	51
3-1 元件的靜特性	51
3-2 开环系統的靜特性	55
3-3 自动調节系統的靜特性	61
3-4 有差及无差系統的分析	69
3-5 无差系統的阶数及无差度	77
3-6 无差系統的缺点和改进方向	77
第四章 編写自动調节系統的方程式	83
4-1 按动特性將調节系統划分为若干环节	83
4-2 編写元件的微分方程式	97
4-3 編写自动調节系統的微分方程式	112
4-4 編写自动調节系統的微分方程式举例	119
第五章 应用的数学基础(拉普拉斯变换)	125
5-1 函数的拉普拉斯变换的定义和公式	125
5-2 函数的导数和积分的拉普拉斯变换	127

5-3	有时滞函数的拉普拉斯变换	132
5-4	单位脉冲函数的拉普拉斯变换	134
5-5	拉普拉斯变换的反演	135
5-6	最终值定律和初始值定律	135
5-7	用拉普拉斯变换解微分方程式	137
5-8	分解定律	139
5-9	零点和极点	146
第六章	传递函数和频率特性	149
6-1	传递函数的定义	149
6-2	由环节的传递函数求系统的传递函数	152
6-3	频率特性	154
6-4	频率特性的作图	157
第七章	自动调节系统的稳定性	167
7-1	稳定的概念	167
7-2	系统特征方程式的根与稳定性的关系	167
7-3	古尔维茨判据	172
7-4	米哈依洛夫判据	176
7-5	奈魁斯特判据	181
7-6	对数判据	190
7-7	D 域划分的概念	195
7-8	根据一个复数参数的 D 域划分	197
7-9	关于两个实数参数的 D 域划分	201
7-10	根轨迹法的概念	204
7-11	描绘根轨迹的一些规则	207
7-12	关于根轨迹作图规则的证明	215
7-13	单环系统的稳定	220
7-14	自动调节系统的镇定	227
7-15	各种镇定装置的应用	237
7-16	复合调节系统(按扰动的镇定装置)	238
第八章	自动调节系统品质的分析	243
8-1	调节过程品质的指标	243
8-2	调节过程品质的评价	243
8-3	间接评价	247

8-4 穩定度与振蕩度	248
8-5 积分评价	252
8-6 頻率法	255
8-7 頻率特性和調节过程之間的关系	260
8-8 按閉环系統实頻特性的特点确定系統的某些調节过程品质指标	263
8-9 根据頻率特性繪出調节过程的近似法	266
8-10 閉环系統实頻特性的繪制	271
第九章 非綫性自动調节的基本概念	275
9-1 自动調节系統中的典型非綫性特性	275
9-2 非綫性調节过程的特点	280
9-3 最簡單继电器調节系統的分析	286
9-4 相平面法的概念	289
9-5 相軌迹的方程式和奇点	294
9-6 极限环	302
9-7 繪制相軌迹的等傾綫方法	303
9-8 用相平面法分析非綫性調节系統举例	307
9-9 由已知的相軌迹求被調量随時間变化的曲綫	310
9-10 諧波平衡法的概念	317
9-11 非綫性元件的描述函数	321
9-12 用諧波平衡法确定非綫性調节系統的自振蕩	329
附录	335
I. 拉普拉斯变换表	335
II. 函数 e^{-x} 以及以弧度(徑)为单位的角的积分正弦和三角函数表	336
III. h 函数表	340
参考文献	344
索引	345
符号說明表	347

緒 論

簡單地說，毋需人工操纵的技术設備，称为这个設備的自动化。自动化是人类掌握了一定的科学技术，并已进入大生产后逐渐发展起来的一門科学。許多生产部門的自动化，可以改善劳动条件，譬如可以减少工人在高温或者有害空气的場合下工作。有了自动化，工人便只要对自动机构的运转进行监视，而不需要再从事大量而又繁重的操作。

此外，自动化还可以加快生产速度，提高产品质量。这是因为在用人工操纵的生产过程中，由于人的生理条件有一定的限制，倘若生产速度过于迅速，对生产规范的要求过于精确，則人的反应已經感到迟鈍，达不到对生产控制的要求。倘若用电子设备代替人的操纵，便沒有这种限制。因此，在生产过程自动化的条件下，我們可以在新的設備和规范上，重訂或新訂生产过程，从而大大提高生产率。

自动化除了能提高生产率以外，更重要的是有些难于或者根本无法用人工进行的操纵，可以由自动机构来完成。例如原子能工业，由于放射性的关系，不可能用人工来操纵；其次象火箭、导弹上的导航装置，更非自动化的設備不可。

自动化技术在工业生产和国防上的应用很广，例如，在电力系統中，我們用它来調节发电机的电压、頻率和功率；在鍋炉設備中，用来調节蒸汽的压力；在电弧炉里，用来調节温度；在各种原动机（汽輪机、水輪机、內燃机、电动机）中，用来調节轉速；在造纸設備中，用来調节傳动設備。此外，在航空中，用来自动导航；在电子計算机中，用来进行数学运算；在国防中，用来自动瞄准或搜索目

标等等。

自动化有許多种方法，而自动調節可以說是自动化的一个最重要和最基本的形式。自动調節原理这门課程是以自动調節的普遍理論为研究对象。这个課程的意义可以从两方面来看。

首先，現代技术的发展往往对自动調節設備提出很严格的要求，譬如要求調節动作有很高的精确度，要求調節动作非常迅速等等。要满足这些要求，就使得調節設備变得很复杂，它往往是一些液压的、气动的、机械的、电气的元件的組合体。面对着这样复杂的調節設備，純粹凭經驗公式，或者純粹凭試驗方法，已經不能作出滿意的結果。因此，实际需要，要求我們創立关于自动調節的普遍理論来指导实践。

其次，尽管如前面提到的，自动調節設備几乎应用在所有的技术部門中，它有各式各样的构造，然而这些不同的自动調節系統中却存在着共同之处，这是自动調節的任务所規定了的。因为任何一种技术操作过程都是和它周圍环境相互联系的情况下进行的，周圍环境的各种因素时常扰动它，使它发生偏差。而自动調節設備的任务，正是减少这种偏差。因此，在自动調節系統中，随着操作过程的发生偏差和恢复原状，不断的发生着动的状态。尽管自动調節系統的构造以及它調節的物理量种类很多，但在操纵时所发生的动态，都可以用彼此間很相似的微分方程式来描述。这便使得我們有可能建立关于分析自动調節系統动特性的普遍理論——自动調節原理。

由此可見，自动調節原理是由于提高工业生产的实际需要而发展起来的一門科学，而这門科学的发展又促进了工业生产的提高。

自动調節理論的奠定和发展，也和其他科学一样，有它的阶段性，简单地讲，从人們开始拟定个别的自动調節系統——蒸汽机轉速自动調節系統，水位高度自动調節系統等——开始，到十九世紀

末叶,已經奠定了这門科学的基础;1940年前后,这門科学有了巨大的发展;随后和信息論、計算技术这些科学結合起来,形成了一門新的科学——控制論。控制論不限于研究工程技术方面的問題,而且能探討、模拟生物器官的机能。从而为創造出嶄新的、更完善的自动調节系統,开辟了广闊的天地。

自动調节原理所研究的内容有:

1. 研究自动調节系統的分析方法;
2. 研究自动調节系統的綜合方法。

所謂分析方法,是指根据已知調节系統的方案和数据,来判断系統性能的方法;所謂綜合方法,是指根据所要求系統的性能,来确定自动調节系統的方案和数据。

此外,自动調节原理还可以分为綫性自动調节原理和非綫性自动調节原理。其中綫性自动調节原理已經发展得比較完备;而非綫性自动調节原理,由于非綫性微分方程式沒有正規解法,至今还没有完整的理論。不过近年以来,由于各国学者的大力研究,提出了不少方法,或者說形成了不少学派,已經可以解决很多实际問題。

尽管自动調节原理目前还处于沒有完全成熟的境界,然而发展迄今,在这个領域里,人們已經积累了丰富的經驗,掌握了渊博的知識。要想涉及这門科学的全貌,需要巨大的篇幅,同时也不是本书的目的。在本书里,除了闡明一些基本概念和必要的准备知識以外,主要介紹几种关于綫性調节系統的分析方法,以及两种常用的非綫性調节系統的分析方法——相平面法和諧波平衡法。也就是介紹这門科学的一些基礎知識。

比較。倘若炉子的温度比給定值高,便将图中的开关3断开,于是电阻4停止发热,炉子逐渐冷下来;倘若炉子的温度比給定值低,則把开关3合上,于是电阻4发热,炉子的温度逐渐上升到給定值。

由此可見,在人工調节中,人担任了下列工作:

1. 測量被調量;
2. 將所測得的被調量的值和給定值进行比較,得出偏差;
3. 根据偏差的性质轉化为調节动作。

因此,若要用自动調节代替人工調节,那末,在自动調节系統中,必須包含三种机构,即:(1)測量机构,(2)比較机构,和(3)执行机构。此外,由于在人工調节中,关于給定值的問題,只要調节人員心中有数就行了。而在自动調节中,則必須將給定值在系統中具体体现出来,从而自动調节系統中还應該有引入給定值的設備,称为指令机构。

下面举一个具体例子。图1-2是最简单的温度自动調节系統的原理图。图中,3所代表的,不是一个普通的开关,而是一个继电器。继电器的触点接在交流电源的电路中,当继电器的繞組中没有

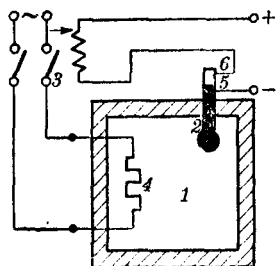


图 1-2

电流时,继电器的触点是闭合的。此外,在温度表2中,还引出了两条導线5、6作为接头。继电器繞組經過5、6和直流激磁电源連接。

当炉子1的温度高于給定的温度时,温度表中的水銀柱上升到超过接头6,从而将继电器繞組的电源接通,继电器吸合,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。当炉子的温度低于給定值时,温度表中的水銀柱下降到低于接头6,这时,继电器繞組和电源沒有接通,触点又在闭合的位置,于是电流又流过电阻4,使得炉子的温度上升。就这样不断地

自动调节。在这个系统中，炉子是调节对象；温度是被测量；温度表2是测量元件；接头6是指令机构；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。

从这个例子来看，自动调节系统的基本原理便很清楚了，它和人工调节一样，也是由测量元件测得了被测量，把它和给定值比较，得出偏差，然后由偏差来控制执行元件，从而达到减少偏差的目的。由上述的温度自动调节系统来看，是被测量（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偏差，偏差使执行元件动作，执行元件的动作最后又反过来改变被测量的值。自动调节系统的各种机构就是这样按照一定的顺序，一个影响一个，循环不已。因此，自动调节系统的特点，可以用图1-3所示的结构图表现出来，由图中看出，首先，系统的各种机构的作用都有一定的方向性，也就是对每种机构来说，虽然输入的变化会引起输出的变化，但输出的变化本身不会反过来影响原来输入的变化。这种方向性用箭头在图中表现出来。其次，各种有单方向作用的机构首尾相接形成闭合的环路，因此，这个自动调节系统是用偏差控制的**闭环系统**。但指令机构不包括在闭环系统之内。

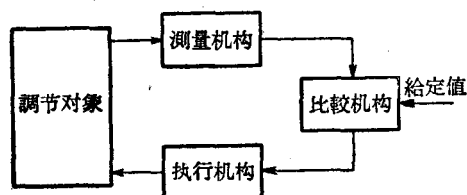


图 1-3

上述关于自动调节系统的特点虽然是由一个简单的系统推出的，然而它的结论却具有普遍性，这是因为在各种自动调节系统中，尽管所用元件的类型以及系统的复杂程度，可能有很大的差别，可是用来标明各种机构的功用的结构图总是一样的。其实，在各种人工调节中，假如把工作人员也看成是调节系统的一个部分，

那末,人工調节系統也是用偏差控制的閉环系統。不过,在这种閉环系統中,比較机构和执行机构是由人来担任而已。

图 1-3 还只是就自动調节系統本身的结构來說的,事实上,任何自动調节系統总会經常受到外界的影响,致使被調量与給定值发生偏差。例如对熔炼金属的电炉來說,改变熔炼金属的数量,会使炉子的温度产生偏差;电炉电源电压的波动,也会使炉子的温度产生偏差;电炉环境温度的改变,也会使炉子的温度产生偏差等等。在自动調节原理中,我們把这种外界的影响統称为**扰动**。对于一个自动調节系統來說,在任何元件或者任何机构上,都可能产生扰动,而且就一个元件來說,还可能同时存在不止一种扰动,如上面所举电炉扰动的例子就是。然而在各种不同的扰动中,总有一个对調节过程影响最显著的,我們把它称为主扰动,其余影响不大的扰动,則称为次扰动。在以后的討論中,我們只考虑主扰动的影响,并且为了簡單起見,有时把它簡称为扰动。自动調节系統的扰动,通常是調节对象負載的变动。

在图 1-3 中,当考虑到調节对象的扰动,并把测量、比較和执行机构一并用調节器来表示时,那末自动調节系統的结构图如图 1-4 所示。

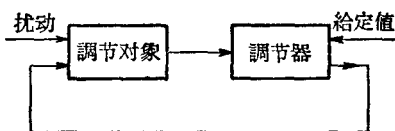


图 1-4

1-2 开环調节、按扰动的調节和复合調节

上面提到的自动調节系統是按偏差控制的单方向作用的閉环系統,然而这并不意味着,这是自动調节的唯一办法,实际上,除了按閉环系統工作的自动調节系統外,还有按开环系統工作的自动調节系統;除了用偏差控制的自动調节系統外,还有用扰动控制的

自动调节系统以及用偏差和扰动联合控制的自动调节系统。后者称为复合调节系统。

下面举几个有关的简单的例子。

图 1-5 是一个用辉光放电管组成的简单稳压装置，是开环自动调节系统的一个具体的例子。辉光放电管是一种冷阴极管，管中装有惰性气体，它的伏安特性曲线如图 1-5a 所示。曲线的虚线部分代表充气二极管尚未到达辉光放电时，管中电压和电流的关系；曲线的水平部分代表充气二极管已经到达辉光放电后，管中的电压和电流的关系。由曲线看出，当充气管开始放电以后，尽管它的电流变动的范围相当大，它两端的电压实际上没有明显的变动，就可以利用充气管这一段特性来达到自动稳定电压的目的，稳压装置的线路图如图 1-5b 所示。需要稳定电压的负载和充气管并联后，经限流电阻 R 接到电源，于是在一定范围内，不论是电源电压的变化还是负载的变化，都会使电流电阻 R 两端的电压降发生相应的变化，从而使负载两端的电压实际上保持不变，也就是说，这个系统也可以完成自动调节电压的任务。显然，电路中的限流电阻 R 和充气二极管构成了调节器，而负载是调节对象，这个系统的结构图如图 1-6 所示。由图中看出，这是一个开环系统。

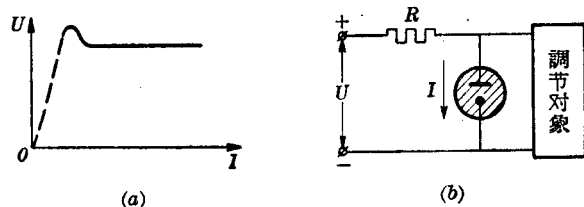


图 1-5

下面我们对上述开环调节系统作进一步的分析，主要阐明，尽管

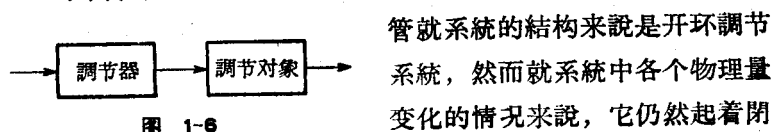


图 1-6

环调节的作用。其实,图 1-5b 的电路其所以能稳定负载两端的电压,主要是因为充气管的内阻随它的端电压而变化,并且响应很灵敏(该管内阻的大小决定于管内气体的电离程度,而电离程度又决定于该管两端的电压)。因此,当电源电压升高时,负载两端的电压本应升高,然而负载电压刚一升高时,便引起一系列的反应,首先它使得充气管的内阻减小,于是充气管的电流以及总电流增加,这使得限流电阻上的电压降加大,终于又使负载两端的电压基本上下降到原来的值。当电源电压降低以及负载变动时,根据类似的理由也可以得出同样的结果。所以,就这个稳压装置中的物理量来说,最初是被调量(负载端电压)发生变化,随后经过一系列物理量的变化,一个影响一个,终于又反过来影响到被调量本身。各个物理量的变化也可以划成闭环的形式如图 1-7 所示,其中 U 代表电源电压, U_L 代表负载两端的电压, R_i 代表充气管的内阻, I 代表限流电阻 R 中的电流。

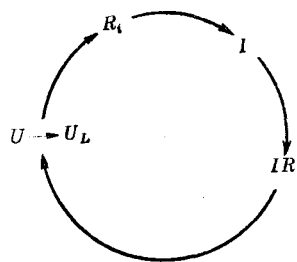


图 1-7

闭环系统和开环系统的区别在于:前者的调节作用是通过外加的执行机构来实现的;而后者的调节作用是通过系统元件的非线性性质来实现的。实际上所谓闭环作用也就是大家知道的负反馈作用,故有时又把闭环调节称为外反馈,而把开环调节称为内反馈。

开环系统由于设备比较简单,也在很多地方得到应用,然而一般情况下,它的调节范围不大,精确度不高,并且不能修正由于元件的衰老和参数变动所引起的偏差,这些都是它的缺点。自动调节原理也不以开环系统为研究对象。

按扰动的自动调节系统的特点是,扰动在系统中同时产生两个相反的效果,一个是使被调量产生偏差,而另一个是产生克服偏差的调节动作,因此,这种自动调节系统实质上是按补偿原理进行

調節的。它和按偏差的自動調節系統不同，毋需去測量被調量并和給定值比較，然後轉化為調節動作。假如把發電機的負載變動作為擾動，則直流復激（積復激）發電機是按擾動自動調節的最簡單的例子。

直流復激發電機的原理如圖 1-8 所示，當負載增加時，由於電樞內阻降壓和電樞反應增加，發電機的端電壓本應該減小，但另一方面，負載增加時又使串激磁場增加，使得發電機端電壓增加，因此，適當選取電機參數，可以使發電機在一定的負載變化範圍內，達到自動穩定電壓的目的。

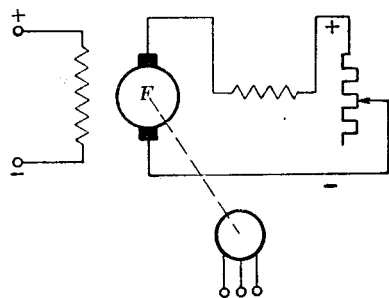


圖 1-8

按擾動的自動調節系統和按偏差的自動調節系統的主要區別在於：前者只能消除某一種預定的擾動所帶來的偏差，例如图 1-8 的復激發電機，便只能消除負載變動對端電壓所帶來的偏差，而不能消除由於原動機轉速變動以及其他原因對端電壓所帶來的偏差；與這相反，按偏差的自動調節系統則可以消除一切擾動对被調量所帶來的偏差，其中包括系統元件一定程度的衰老和參數變動所帶來的偏差，也就是說，這種系統在一定的範圍內有自動修正它工作特性的能力，其所以能如此，是由它的基本工作原理所規定的，在這種系統中只是按偏差來進行調節，並不管產生偏差的究竟是哪種原因。從上述兩種自動調節系統的區別也可看出，按偏差的自動調節系統要比按擾動的自動調節系統優越，這也部分地說