

高等学校教学用书

冶金炉热工过程 自动调节

叶铭焯 徐烈鹏 吴永生 编



中国工业出版社

本书是为高等工业院校冶金炉专业的“冶金炉热工过程自动调节”课程编写的专业教科书。

书中首先概括地讲述了生产过程自动调节的基本概念，自动调节系统的基本原理，各种自动调节设备的分类、构造及其调节过程。然后，对冶金工厂的高炉、平炉、电炉、均热炉、加热炉、热处理炉等热工过程的自动调节，分别作了介绍。最后对自动调节系统的性能进行了分析研究，并讲解了各种调节对象的特性和调节器的选择方法。

本书是由东北工学院冶金炉教研室和北京钢铁学院电工教研组共同组织三位教师：吴永生（第一章、第二章）、叶铭焯（第二章、第四章）、徐烈鹏（第三章）共同编写的。

冶金炉热工过程 自动调节

叶铭焯 徐烈鹏 吴永生 编

*

冶金工业部工业教育司编辑（北京猪市大街78号）

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）

中国工业出版社第三印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售

*

开本 $787 \times 1092^{1/16}$ ·印张 $12^3/8$ ·字数290,000

1962年8月北京第一版·1962年8月北京第一次印刷

印数0001—1,100·定价（10—5）1.55元

*

统一书号：K15165·1678（冶金-262）

76.121
173

31-522/20
序 言

生产过程自动化是现代科学技术高度发展的重要标志之一。目前各工业部門都广泛地运用許多自动化設備，并且正由个别工段和工序的自动化向全盘自动化和綜合自动化过渡。因为生产过程自动化以后給生产带来如下所述的好处，即：

1) 能够使生产設備經常地保持在高限度的生产水平，充分發揮其生产潛力，提高生产进行的速度，进一步强化生产过程，从而使生产率大大提高。

2) 能够严格地执行和遵守生产工艺制度，保証生产过程正常地进行。因此在提高生产率的同时，能提高产品质量，节约燃料和原材料，延长設備寿命，从而使成本大大地降低。

3) 能够減輕操作人員在生产中的繁重体力劳动，使操作人員的劳动条件大大地改善。这样一来，他們就有更充沛的精力集中到生产工艺方面，使生产能以更高的速度不断地提高和发展。

这些好处对冶金生产，特别是冶金炉热工过程來說，具有更重要的意义。从目前情况看，一方面冶金炉的热效率还比較低，生产潛力沒有充分地發揮，冶金炉工作的好坏还在相当程度上取决于操作人員在技术上的熟练程度和操作中的經驗；同时冶金炉又是一个燃料的巨大消費者，合理而有效地利用燃料，无疑的在国民經济中有着重大的意义；另外，冶金炉是一种高溫作业的設備，劳动条件的改善也是我們必須注意的問題。所以新中国成立十多年来，党和政府在大力发展冶金工业的同时，大力提高冶金炉自动化的程度，采用了許多自动化設備。因此，作为冶金炉热工的专业工程人員來說，不仅要掌握冶金炉热工，同时也要掌握冶金炉上的自动化設備，特别是其中占主要地位的自动調节設備。所以冶金炉热工自动調节就成为冶金炉专业重要的专业课程之一。

本教材的編写工作由东北工学院冶金炉教研室和北京鋼鐵学院电工教研組共同完成。教材中第一章和第二章的調节設備构造部分由北京鋼鐵学院吳永生編写，第二章的其余部分和第四章由东北工学院叶銘綽編写，第三章由东北工学院徐烈鵬編写。由于我們在教学和实际工作中都缺乏經驗和鍛鍊，而且編写的時間也比較短促，书中的缺点和錯誤在所难免，希望讀者批評指正。

一九六一年十月



目 录

序言	
第一章 自动调节基本概念	1
§1. 常用名词及术语	1
§2. 调节系统的基本结构	2
§3. 调节系统的分类	4
第二章 自动调节设备及其调节过程	7
§1. 自动调节器及其分类	7
§2. 位置调节器及其调节过程	8
1. 位置调节过程及其特征	8
2. 双位及三位调节器	9
§3. 无定位调节器及其调节过程	13
1. 无定位调节过程及其特征	13
2. 液压式无定位(无差)调节器	16
3. 电动式无差调节器	18
§4. 定位调节器及其调节过程	23
1. 定位调节过程及其特征	23
2. 定位调节器(正比例调节器,有差调节器)	25
§5. 再调调节器及其调节过程	26
1. 再调调节过程及其特征	26
2. ИР-130型(KQ-1型)电子再调调节器	28
§6. 最佳点调节器	35
§7. 气动调节器	38
1. 位移平衡式气动调节器	38
2. 力平衡式气动调节器	41
§8. 放大装置(放大元件)	44
1. 液压放大器	44
2. 磁放大器	45
3. 电机放大机	46
§9. 执行机构	47
1. 液压执行机构	47
2. 气动执行机构	48
3. 电动执行机构	49
§10. 调节机构	52
§11. 程序调节设备	57
§12. 其他附属设备	58
1. 远距离控制阀	58
2. 万能切换开关	59
3. 自动关断阀	60
第三章 冶金炉热工过程自动调节系统	63
§1. 高炉生产热工过程自动调节系统	63
1. 概論	63
2. 高炉鼓风温度自动调节	64
3. 高炉鼓风湿度自动调节	67
4. 高炉炉喉煤气压力自动调节	68
5. 热风炉热工过程自动调节	70
6. 高炉生产热工过程综合自动调节	76
§2. 平炉生产热工过程自动调节系统	79
1. 概論	79
2. 平炉热负荷自动调节	81
3. 平炉燃烧过程自动调节	85
4. 热负荷及燃烧过程自动调节系统的结构	87
5. 平炉炉膛压力自动调节	94
6. 平炉自动换向控制	97
7. 平炉生产热工制度综合自动调节	100
§3. 均热炉热工过程自动调节	113
1. 蓄热式均热炉热工过程自动调节	113
2. 换热式均热炉热工过程自动调节	117
§4. 轧钢和热处理生产用火焰炉热工过程自动调节	120
1. 连续式加热炉热工过程自动调节	120
2. 室状加热炉热工过程自动调节	124
3. 热处理炉热工过程自动调节	126
§5. 电炉生产热工过程自动调节	126
1. 电阻炉热工过程自动调节	126
2. 电弧炉自动调节	129
第四章 自动调节系统性能的分析和研究	133
§1. 自动调节原理的基本任务	133
§2. 自动调节系统的基本典型环节、其微分方程式、运算式、频率特性和结构线路	133
1. 微分方程式、运算式(传递函数)和频率特性	133
2. 方向性作用的基本典型动态环节	136
3. 环节不同连接时的运算式(传递函数)	145
4. 开环系统和闭环系统的方程式及其运算式之间的联系	147
5. 调节的静差率	148
6. 自动调节系统动态结构线路的组成	149
§3. 自动调节系统稳定性的研究	152
1. 系统稳定性的概念	152
2. 胡尔维茨判据	155
3. 奈奎斯特判据	157
4. 米哈依洛夫判据	161
5. 稳定性的对数判据	162
6. 稳定性的储备	164
§4. 自动调节系统过渡过程品质的研究	165
1. 过渡过程品质的指标	165
2. 以特征方程式根的分布为基础的调节过程品质的研究	166
3. 以积分特性为基础的调节过程品质的研究	168
4. 以频率特性为基础的调节过程品质的研究	170
§5. 调节对象特性和调节器的选择	179
1. 调节对象的特性	179
2. 调节器的选择	182
3. 调节器最佳参数的调整计算	184
参考书目	196

第一章 自动调节基本概念

§1 常用名詞及術語

所謂自动调节,是要把生产設備中决定生产过程进程的各种参数,自动地保持在预先規定的范围内,或者使它們按照預定的規律而变化。在完成这种任务的过程中,不需要人們的直接参与,而是采用專門的仪器——调节器来实现这个目的。

凡其生产过程全部或局部进行自动调节的設備,称为调节对象;而受到调节的各种参数,称为被调节参数或被調量。因此,对操作过程产生作用以保持被調量不变或使被調量作一定变化的装置,就叫做调节器。

例如,对加热炉炉膛温度进行自动调节时,采用调节器自动改变送入炉內的燃料(煤气)量,以保持炉膛温度一定。此时,加热炉称为调节对象,而温度就是被调节参数。

用来测量被调节参数变化的元件,称为感受元件。测量所得的数值(称为测定值)送至调节器中,跟一个事先規定的数值(称为給定值或指定值)进行比较,比較的结果称偏差。有的调节器,就是根据这一偏差的符号及数值对调节对象产生作用,使被調量恢复到給定值。

任何使被調量发生变化的因素,称为扰动。在扰动作用下,使生产过程遭到破坏时,调节器就开始工作。调节器作用的结果,就产生被调节参数随時間变化的过程,这种变化的过程叫做调节过程或过渡过程。或者说,生产过程由起始的平衡状态或稳定状态过渡到另一平衡状态或稳定状态的过程,就叫做过渡过程。

下面的例子可以說明这些名詞的实际意义及其相互間的关系。

例如,軋制前用的一座鋼坯加热炉,为了保持鋼坯在軋制前加热到一定的温度,必須保持炉温为某一相应的温度。然而軋机的生产率是有变化的,这样就要求加热炉的生产率能随着它而改变:軋机的生产率高时,推鋼速度要加快,炉温会下降;反之生产率低时,推鋼速度減慢,炉温会升高。炉温作这样的变化,就会使鋼坯加热的温度不符合要求。为了使鋼坯温度保持一定,可以改变送入炉內的燃料(煤气)量来使炉温恢复某一数值。如炉子生产率高,炉温要降低,就增加燃料的供应量。

上例中加热炉就是调节对象,炉膛温度是被调节参数,影响炉膛温度的加热炉生产率就称为扰动。炉膛温度可用热电偶进行测量,热电偶就是感受元件,它把实际温度变成电势后送至调节器,和一給定值进行比较。热电偶测量所得的电势称测定值。比較时,测定值可能大于或小于給定值,比較的结果就称为偏差。调节器就可根据偏差的符号及数值发出命令,改变煤气管道中节流閥(调节机构)的开度,从而改变送入炉內的燃料量。这一作用就称为调节作用。燃料量改变后就使炉膛温度逐渐恢复至所需值的附近。由于加热炉生产率的改变,使炉膛温度发生变化,直至调节器作用使炉膛温度又恢复給定值,这一过程就称为调节过程或过渡过程。可以用图 1-1 来表示上述的例子。感受元件,调节器和调节机构等总称为调节設備。如图 1-1 所示,调节对象和调节設備就

組成了調節系統。在調節過程中，不需要人的直接參與，而依靠自動調節器來進行，就稱為自動調節系統。

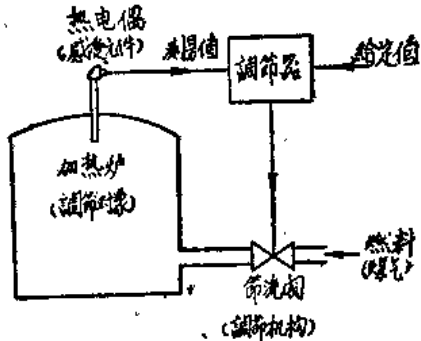


图 1-1 加热炉温度自动调节原理图

§ 2 調節系統的基本結構

当被調量在扰动作用下离开了給定值，则需要进行补偿，使被調参数恢复到給定值附近。补偿的方式有两种：1) 按扰动进行調節；2) 按被調量与給定值的偏差进行調節。此外还有一种是兼有上述二者的綜合的調節。

现在研究一下这些調節方式的例子：要求保持容器中的液面为給定值。

第一种方式：在图 1-2a 中容器 1 就是調節对象，液体沿着管 5 流入容器，沿着管 3 流出容器，容器中的液面（被調量）和某一給定值的偏差不許超过規定的范围。当管道中的压力以及阻力发生变化时，改变了流入容器的液体量和流出容器的液体量，也就是有了扰动，从而使被調量产生偏差。

图 1-2a 繪出了这个对象按扰动进行調節的簡图。可以测量液体的流入量和流出量来得到扰动。調節机构位置的变化和流量的差值成比例。通过管道的流量用薄膜 4 来测量，薄膜和安装在管道中的孔板 2、6 相连接。由图上可以看出，当液体流入量增大时，薄膜对調節机构产生作用，使节流閥 7 关小。而当流入量减小时，則使节流閥开大。既然这个装置对調節机构的作用是向着减小容器的輸入量和輸出量的差值方向动作，因而容器中的液体量几乎是不改变的，所以液面也保持不变。

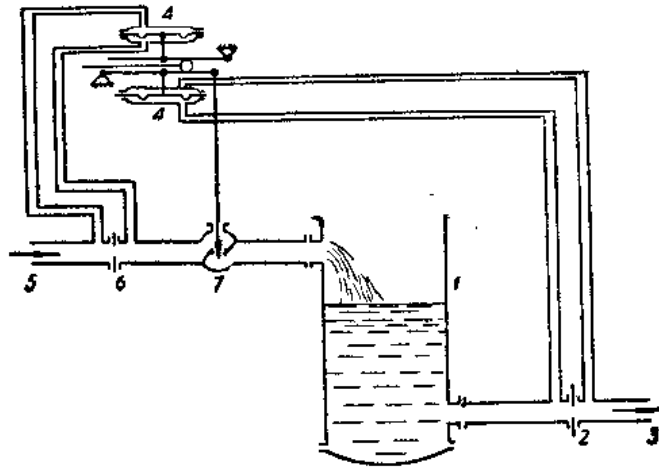


图 1-2a 按照測量輸入量和輸出量之差來調節容器中的液面

这种調節方式的优点，就在于当有扰动作用的同时，立即就对調節机构产生作用，它的作用并不滯后于偏差。亦即它能及时改变被調参数的数值。

这个方式的缺点，就是它会因为調節器的工作不精确，而使被調量产生的偏差累积起来，因而最后就会使偏差超出允許的范围。而且一般調節系統中，扰动的种类很多，要求对每种扰动进行补偿，故調節系統非常复杂，且有的扰动还很难补偿。

第二种方式：容器中的液面可以按照被調量与給定值的偏差进行調節（图 1-2b）。采用浮子 2 来測量液面。浮子又和調節机构 4 相联系，这样当液面升高时节流閥关小，而液面降低时节流閥就开大。流体的流入量和流出量变化时就使液面发生变化，这个装置就使調節机构动作。使液体的流入量和流出量相适应，从而使液面接近給定值。这个

裝置作用的結果使液面的變化限制在規定的範圍之內。適當的選擇這一裝置的參數可使誤差小於規定的範圍。

在這個調節系統中沒有偏差無限制累積的情況，而調節作用是直接和被調量相聯系的；在這個系統中被調量和給定值間的偏差增大了。這個系統的缺點就是調節機構的動作是由被調量的偏差所引起的，故它對擾動有滯後。按偏差進行調節，不論有多少種擾動，只要一個測量儀器就夠了，這是工業上最常用的方法。

這樣，可以在一個調節器中把前面所述的兩種調節方法結合起來進行綜合的調節，即所謂綜合調節器；它可以按照某個擾動（或某些擾動）以及被調量和給定值的偏差來對調節機構產生作用。圖 1-2B 中繪出了這種綜合調節器的例子。在這個調節器中，根據擾動調節的元件，保證調節機構 2 的工作不慢於擾動的出現；而根據偏差調節的元件僅當前一元件工作不精確而使被調量發生明顯的偏差時才起作用，後者且排除了偏差無限止累積的可能性。

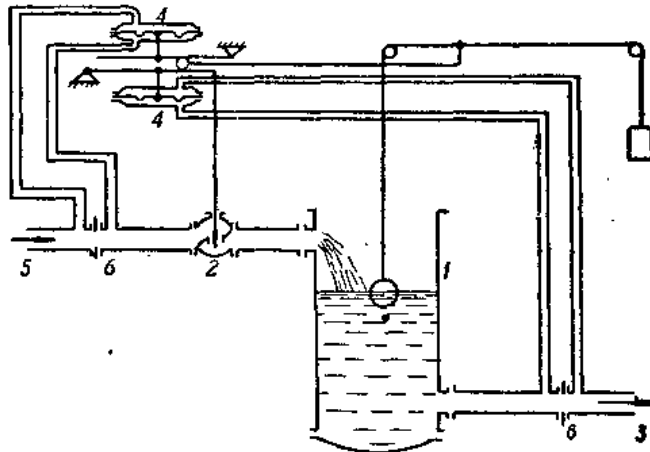


圖 1-2B 按照同時測量輸入量和輸出量的差值和被調量的偏差來調節容器中的液面

調節對象和調節設備二者組成了調節系統。

按偏差調節系統中的自動調節設備，它應該測量被調量和給定值偏差的大小和符號，從而確定加在調節機構上的作用。這些任務由調節設備中相應的元件來執行，這些元件又稱為基本環節，調節設備就是由這些基本環節所組成的。

用感受元件 7 測量被調節參

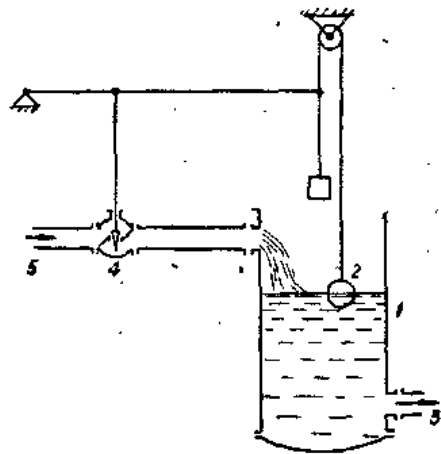


圖 1-26 按照測量被調量和給定值的偏差來調節容器中的液面

這種結構的綜合調節器，通常用於鼓形蒸汽鍋爐的液面調節中。

上面所述的一些調節系統圖稱為原理圖，現在用方塊來表示調節系統中的每一部分，這就叫結構圖或方塊圖。按偏差控制的調節系統，一般可用圖 1-3 的結構圖表示。

圖中 1 是調節對象，而用虛線包圍的部分是調節設備 ①，調

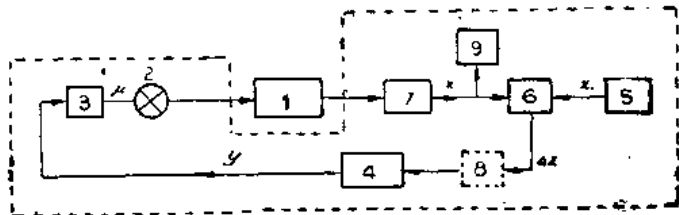


圖 1-3 自動調節系統中的基本元件

① 這裡所指的調節設備，它包含了感受元件，測量裝置，調節裝置，執行機構和調節機構等等。有時將其中的調節裝置稱為調節器，有時則將測量裝置，調節裝置和執行機構等合稱為調節器。

数的数值。图中出口处的信号 x ，就是感受元件测得的被调量的数值，信号 x_0 为被调量的给定值，它由调节器的给定值装置 5 产生的。用比较元件 6 来比较这些信号，在比较元件中测得被调量和给定值的偏差 Δx 。

控制装置 4 感受到偏差后，就按已定的规律发出控制信号 y ，送到调节设备的执行机构 3 去，执行机构 3 就产生调节作用 u 作用在调节对象的调节机构 2 上，使调节机构 2 产生相应的动作。

作用在系统元件上信号的功率通常不够大，因此需要采用放大元件 8（放大器）来增大信号的功率。放大器输出信号的能量由另外的能源供应。而输出信号的变化是由输入信号来控制的。

有的调节设备中，还用指示及记录仪表 9，来指示及记录被调量的变化情况。

调节设备中各元件的技术特性是各不相同的。自动调节设备的每一个元件，用它们的输入量和输出量的性质来表征。输入量表示系统中其它元件对这个元件的作用，而输出量则表示该元件对系统中其他元件的作用。

自动调节设备中某一个或全部元件是具有方向性作用的（检波元件）。所谓有方向性作用的元件乃是输出量随输入量而变，而输入量不是直接随它的输出量而变。感受元件几乎都是具有方向性作用的元件，例如前面的例子中测量液面的浮子的位置由液面高度来决定，而当浮子位置改变时却不能改变液面的高度。

§3 调节系统的分类

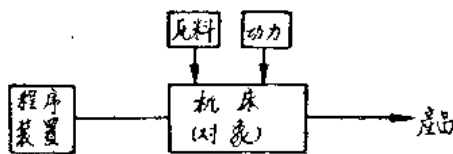
调节系统分类的方法很多，例如：从调节器所使用能源的种类来区分，可以分为电动调节系统、电子调节系统、气动调节系统、液压调节系统以及机械调节系统等；从调节器能源取用方式而分为直接调节系统和间接调节系统；从调节器的工作情况而分为连续调节系统和断续调节系统；还有从稳态时被调参数的情况而分为有差调节系统和无差调节系统等等。现采用比较有意义的两种方法进行分类，一种是按照调节系统的结构来区分，一种是按照调节系统的特性来区分。

1. 按照调节系统的结构来分类：这时调节系统可以分为开环系统和闭环系统两种。

I、开环系统

在此系统中，从一环节到另一环节之间没有反馈。所谓反馈，就是从环节或系统输出端取出一个动作或能量回送到输入端。

如图 1-4 所示的系统中预先用程序装置给定自动机床加工的顺序，机床就按照程序



对原料进行加工，最后就得到产品。至于产品质量的好坏，却不会自动反馈给程序装置来改变操作程序，只有经过工作人员对产品进行检查后，才能相应的去改变操作程序。这种系统只有在原料、动力以及生产机械工作状态较稳定的情况下才适用。因此输出量的变化，并不引起输入量发生变化的系统，称为开环系统。

I、闭环系统

也就是反饋控制系統，有反饋是閉環系統最根本的特点，从自动調节系統的结构来看，調节的基本方法就是反饋，按偏差調节也是反饋。如图 1-26，改变液体流入量，則液面变化，因而閥門变化，但閥門的变化又使液面发生变化，这样变化的原因和变化的結果，互相关联而形成一个整体。因此，传递的作用形成閉合回路的系統，称为閉環系統。

和开环系統不同，閉環系統的特点为：

① 作用是閉合的：無論在系統中那一点加上扰动，經過一系列动作后，又会回到原来这一点上。

② 有方向性：系統中有方向性元件，因此系統的动作只能向一个方向进行，不能反向，亦即为方向性系統。

③ 动态特性不同：系統中工作状态的改变不可能是瞬时的，要引起过渡过程。这是因为系統中的元件有儲能作用，而能源不可能为无限大，因此状态改变的时间不会是无穷小，一定有一个过渡时间。反饋显著地改变了系統的特性，改变的效果取决于反饋的“正”“負”。

反饋信号与所加信号的符号相同称正反饋；反饋信号与所加信号的符号相反称負反饋。

工程上用正反饋使信号作用加强，正反饋可以把信号累积起来，所加信号經過几次反饋后愈来愈强，它在磁放大器、高频振盪器及无线电工程中应用。

自动控制系統中一般用負反饋，負反饋可以抵消扰动信号的作用。因反饋信号与扰动信号的符号相反，例如前例中当液体流入量增加时，反饋使液体流入量减少，因而使液面恢复至指定值附近。近年来反饋在各方面的应用获得了极大的发展。

2. 按照調节系統的特性来分类：这时調节系統可以分为定值（自鎖定）調节系統，程序調节系統及随动（追踪）調节系統。

I、定值調节系統

在这种調节系統中，給定值是不变的数值，因而被調量亦必須保持稳定不变。例如图 1-5 所示，在热交换器中用蒸汽来加热某种液体，液体流过热交换器后加热至一定温度，为了满足生产过程的需要，液体在出口处的温度应保持恒定。

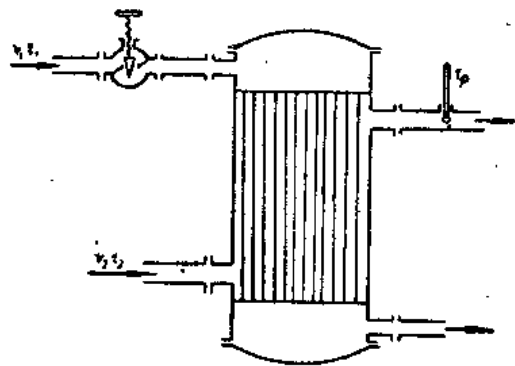


图 1-5 热交换器

如果液体流量 V_2 、进口温度 τ_2 、蒸汽流量 V_1 、温度 τ_1 和热交换器中的传热强度等均恒定，則液体在出口处的温度差不多維持恒定。但实际上这种理想情况是不存在的，因为工程上任何装置的工作状态，都在一定范围内变化，变化的幅度可能很大，可能很小。像液体进口温度、蒸汽流量等参数都可能发生变化。这样也就可能使液体出口温度发生变化。如前所述，使被調节参数发生变化的因素称为扰动。如果扰动相当小，对被調量影响不大，或者扰动本身很大，但对被調量影响很小，則被調量的变化范围，可能比設備所允許的变化范围为小，这样就不要进行調节，如上述热交换器，只要出口温度

变化在允许的范围內，此时就不存在调节的问题。如果扰动使被调量的变化，超出了允许的范围，就要用补偿的装置，使它的变化减小到许可范围之內。通常使用下列两种办法：

1) 消除扰动。为了维持被调量的恒定，可以测量外界的扰动，并依据这些度量来对设备发生作用。例如热交换器中温度 t_p 的变化，可能是由于蒸汽流量 V_2 变化而引起的，只要消除蒸汽流量的变化，就可使被调量仍旧保持恒定。这种方法有时可采用，但它并不是永远有效与可能的，因为同一个设备扰动的来源可能是多种多样的，要对设备的扰动量进行控制就需要很多调节器，有些扰动还很难补偿，例如热交换器中输入液体温度变化时，补偿就很困难。所以在很多情况下，控制一个过程只靠这一方法，往往是不能满足要求的。

2) 采取能量平衡或质量平衡。一般都采取能量平衡或质量平衡的办法，来补偿各种扰动所引起被调量的变化。例如在热交换器中可以调节蒸汽流量（质量平衡）来维持出口温度恒定。

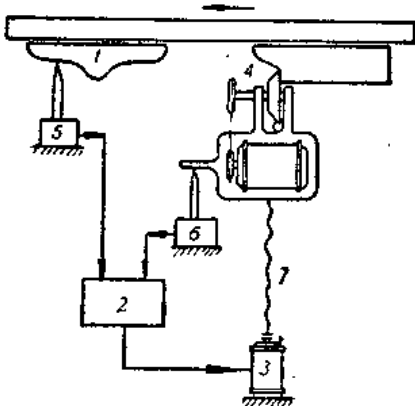


图 1-6 仿型铣床装置简图

- 1—模型； 2—自动调节器； 3—马达；
4—铣刀； 5—千分垫（测量模型的高度）； 6—千分垫（测量刀架的位置）；
7—螺杆

在这种调节系统中，给定值按照预先规定的程序变化，因而被调量也按照这一规定的程序变化。例如在热处理炉中，要求炉温随时间按照一定的曲线变化，调节器就必须依照这一要求进行动作，使炉温按照这一给定的规律变化。这种使被调量按预先给定的程序而变化的调节系统，称为程序调节系统。程序不一定是时间的函数，也可以是其它数量的函数，例如在仿型铣床中如图 1-6 所示，程序由模型形状决定。

Ⅲ、随动调节系统

在这种系统中，给定值是随机函数。在这种系统下，预先不知道被调量的变化规律及调节器的动作位置，只知道所要求的调节结果。例如工业炉燃烧过程的比例调节，只知道空气的消耗量和燃料消耗量应具有的比例关系，但并不知道燃料是怎样消耗的和消耗的多少，属于这类的系统称为随动系统。

上面所述的这三种类型的调节系统，还可以用给定值 x_0 的变化来表示，在定值调节系统中 $x_0 = \text{常数}$ ，在程序调节系统中 x_0 按预定的程序变化，在随动调节系统中 x_0 为一随机函数。

第二章 自动调节设备及其调节过程

§1 自动调节器及其分类

自动调节器（简称调节器）是自动装置中最重要的设备，也是自动调节系统中最基本的组成部分。它的任务是使生产设备（即调节对象）的工作制度经常地保持在正常的状态。

生产设备的工作情况，通常是由一个或几个参数（即被调节参数或被调节量）来表征的。当生产设备的工作正常时，这些参数值或者这些参数的变化规律保持固定不变。为了使表征生产过程进行情况的参数保持固定不变，要求在生产设备中输入的能量与输出的能量相等，也就是在能量上保持平衡，从而使被调节参数稳定下来。由此可见，调节器的任务具体的说来，是在无人参与下，根据被调节参数的变化情况，通过改变生产设备中能量的输入或输出，自动地使被调节参数保持固定不变，或使之按一定的规律变化。

由于调节器在用途上，功能上和使用外来能源的种类上的不同，其种类是各式各样的，构造上也有很大的差异，但是可根据它们的特征进行如下的分类：

1. 按用途分——有温度调节器、压力调节器、流量和流量比调节器等。
2. 按所采用的外来能量的种类分——有液压式，气动式，电动式和综合式（电动液压式和电动气动式）等。
3. 按动作情况分——有连续动作和间歇动作的。连续动作调节器的特点是只要有输入信号存在时，它的动作就连续地进行直到输入信号消除为止。而间歇动作调节器却不完全是这样。在有输入信号的情况下，它动作一段时间后就自动停止，经过了一定的时间后，如果输入信号还没有消除，那它的动作才继续进行。亦即它的动作在有输入信号存在时，是间歇性地进行的，直到信号消除后才完全停止动作。
4. 按作用方法分——有直接作用和间接作用的。直接作用调节器的特点是其发出调节作用所需的能量，即其输出信号的能量，直接由被调节量与其给定值的偏差得来，而不需要任何外加的能量；也就是说，调节器通过感受元件由调节对象所得到的能量变化，就能够使得调节机构动作。因此调节器中没有放大元件。由于这种调节器没有放大元件，因而输出的能量较小，所以在工程应用中受到极大的限制。至于间接作用的调节器，因其通过放大元件而能够输出较大的能量，在性能上就能够做得比较完善，能够完成比较复杂的任务。所以工程上应用的大都属于这一类型。后面将要讨论的，也主要是间接作用的调节器。

5. 按作用特性（即调节规律或调节过程）分——可分为：

- I、位置调节器（或称定点调节器）；
- II、无定位调节器（或称无差调节器，无反馈调节器）；
- III、定位调节器（或称正比调节器，有差调节器及带刚性反馈调节器）；
- IV、再调调节器（或称均衡调节器，等值调节器及带弹性反馈调节器）；

7. 带导数的再調調節器。

在这些分类法中，最使我们感兴趣的是第五种分类法。它不仅说明了调节器的主要特点，最重要的是它与我们所研究的调节过程有着紧密的联系。下面将根据这种分类法对调节器及其调节过程分别给以简单的介绍。

§ 2 位置调节器及其调节过程

1. 位置调节过程及其特征

位置调节器是指当被调节量与其给定值发生偏差时，调节机构可以占据某一规定位置的调节器。根据调节机构所占据位置的数目，位置调节器又分为双位调节器、三位调节器及多位调节器（一般不多于五个）。通常应用最广泛的是双位调节器及三位调节器，特别是双位调节器。

在位置调节器中，不论是双位或多位的，其调节的基本规律是一样的，而且以双位调节器为其基础，下面以双位调节器为例分析其调节过程。

今有一电阻炉温度调节系统如图 2-1，1 为电阻炉（调节对象）。当电阻炉的温度 x 达到给定值 x_0 时，温度计 2 中的水银上升且把接点 3 闭合。通过继电器 4 将进入电炉中电热体 5 的电源切断，这时输入对象中的能量等于零，于是电炉的温度不再上升。由于电炉输出的能量并不等于零，电炉的温度就逐渐下降。当其回到给定值以下时，温度计中的水银下降并使得接点 3 断开。中间继电器再次将进入电炉中的电源接通。电炉的温度重新上升。

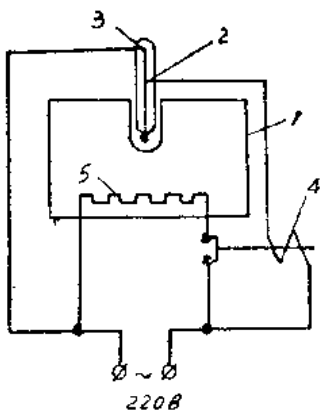


图 2-1 电阻炉温度调节系统图

这系统的调节过程如图 2-2 所示。上图为被调节量的变化曲线，下图为电炉输入能量的变化，这里输出的能量假定不变。

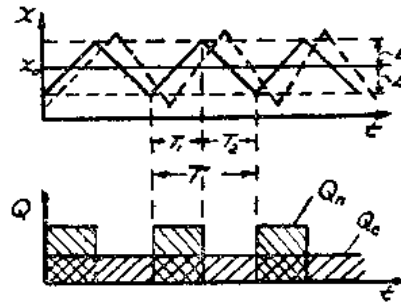


图 2-2 双位调节过程

由这系统的工作情况看，它有一系列的特点。首先调节机构仅能占据两个极限的位置，即使电源全部接通和全部切断（在其他情况也有是任意两个位置的）。因此电炉中能量的输入 Q_0 和输出 Q_c 始终不能相等；输入的能量也是在二极限值之间波动。这样一来，被调节量——温度 x 是不稳定的，它将在给定值 x_0 的附近波动。其次，调节器的作用仅决定于被测量 x 与给定值 x_0 偏差 Δx 的符号，而与此偏差的大小无关。因此调节机构的移动速度是瞬时的，调节机构所占据的位置也仅决定于偏差 Δx 的符号，而与其大小无关。

一般說來，任何一種調節器都具有所謂不靈敏區（或稱呆滯區）；在此區域內，被調量的變化並不能引起調節器作用，這是因為調節器的元件中存在有間隙、摩擦力和其他類型的阻尼作用。不靈敏區的大小通常用 2Δ 表示，它決定於調節器的具體構造；對一般調節器來說，不靈敏區的存在對調節過程是不利的，被調量只有在到達不靈敏區上限或下限時才能使調節器發生作用。因而，被調量將在此範圍內波動着。不靈敏區愈大，被調量的振幅也愈大，所以總希望不靈敏區愈小愈好。但是對雙位調節器來說有它有利的一面，它決定於調節機構在所佔據的位置上停留的時間，亦即決定於調節器作用的週期 T 。

在雙位調節器中，調節過程的好壞不僅要考慮到被調量波動的振幅，同時也要考慮到波動的頻率，因為它與調節機構所佔的兩個位置之間來回運動的頻率相同。由於技術上的原因，此頻率不能太大，否則調節機構容易損壞。

一般情況下，不靈敏區（亦即被調量的波動幅度），對象的負荷與調節機構動作的週期存在下列關係：

$$T = \frac{2\Delta}{Q_n - Q_c} C + \frac{2\Delta}{Q_c} C = \frac{1}{\omega} \quad (2-1)$$

式中 T ——被調量變化或調節機構動作的週期；
 2Δ ——不靈敏區的大小（ Δ = 被調量的波動振幅）；
 Q_n ——輸入對象中的能量；
 Q_c ——由對象中輸出的能量；
 C ——對象中的容量係數，它決定於對象的時間常數並與之成正比；
 ω ——被調量和調節機構動作的頻率。

由式（2-1）可以看到，調節器動作的頻率不僅決定於不靈敏區的大小，同時也決定於對象的負荷和時間常數。在對象負荷一定和調節器振動頻率一定時，對象的時間常數（或對象的容量係數）愈小，則要求不靈敏區的範圍愈大，即被調量的波動振幅愈大。故雙位調節器應用於時間常數較大的對象比較合適。

上面所提到的是沒有考慮時滯（即滯後時間）的情況，但是實際上因為熱源與測量元件之間有一定的距離，熱源的變化反應到測量元件需要一定的時間，所以即使爐子溫度達到不靈敏區上限並使調節器發生作用時，溫度仍然上升到某一定數值，亦即超過了不靈敏區的範圍。其情況如圖 2-2 中虛線所示。時滯的存在對調節過程將產生不良的影響，時滯 τ 之值愈大，則被調量波動的振幅也愈大。故這種調節器適用於時滯較小的對象。

2. 雙位及三位調節器

熱工過程自動調節中，常用的雙位及三位電子調節器有兩種類型，一種是帶毫伏計的電子調節器，它的型號是 $\Theta PM-47$ 型；另一種是帶位置調節裝置的電子式自動電位計和電子式自動平衡電橋。

I、 $\Theta PM-47$ 型電子調節器

$\Theta PM-47$ 型電子溫度調節器是帶有高頻振蕩器的調節器，它把被測量轉換為柵極電

路里线圈电感的变化。调节器可以单供测量或者供测量信号和调整温度之用。

作为感受元件的有热电偶或辐射高温计，而用毫伏计做为测量元件（装置）。

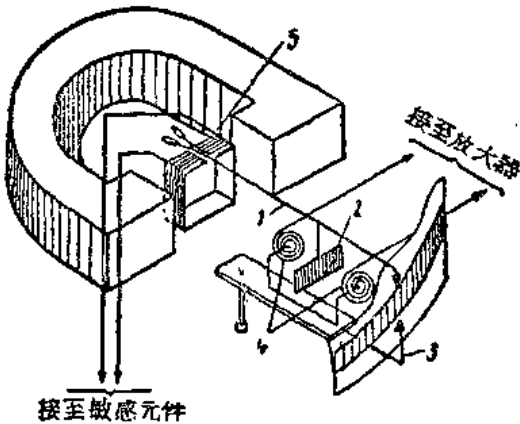


图 2-3 9FM-47型电子调节器测量部分的简图

毫伏计控制着高频振荡器，后者又作用于电磁继电器。继电器闭合控制着调节机构的执行机构回路。继电器的触点还可用来接通信号回路。电子调节器系由交流电源供电的。

测量装置的简况示于图 2-3。在测量装置的指针 1 上装有一面小旗——厚 0.05 毫米的硬铝箔所制成的屏蔽 2。在带控制指示器的可动杆上装置了栅极振荡电路的线圈 4。

线圈系由两个串联的线圈段组成。线圈段绕成双层螺旋形，外径为 8—9 毫米。

在两段线圈之间有 1.5—2 毫米的空气隙，以便让小旗通过。

按照毫伏计指针所处的位置，小旗可以处在线圈 4 两段之间的空隙中或者处在线圈段以外。

如果小旗在空隙之外时，继电器用触点闭合执行机构回路，当小旗进入空隙时，继电器的触点便断开。

1) 双位置调节器的电路

双位置作用的电子装置的电路示于图 2-4。

线圈 L_0 和电容器 C_0 形成了振荡回路。电容器 C_2 隔断线圈 L_0 到栅极偏压电阻 R_0 去的直流通路。

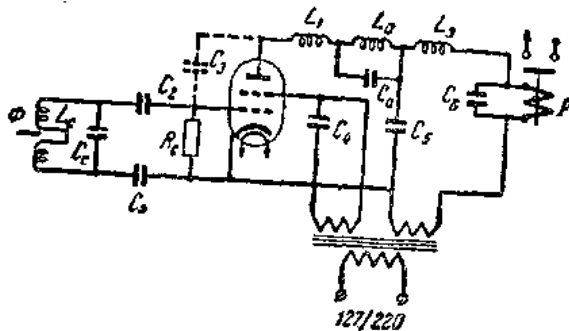


图 2-4 双位置作用的电子装置的原理电路

电子管完成下列一些作用：产生高频振荡；将控制回路里高频振荡幅值的变化转变为栅极负压直流分量的变化；将阳极电流整流，以使用板流的直流分量来供给继电器线圈。

电容器 C_5 使高频电流旁路了继电器线圈和变压器。扼流线圈 L_3 、 L_4 和 L_5 阻塞了高频电流在低频阳极回路里的通路。

此外，这些扼流线圈和电容器 C_5 、 C_6 还用来作为平稳滤波器，以平稳整流过的，供给继电器线圈的低频阳极电流。

当被调节温度低于给定值时，指针处于温度盘的左边，小旗则从线圈 L_0 两段之间的空隙中跑了出来。同时，在栅极电路 L_0 、 C_0 里的谐振条件也消失了。在这种情况下电子管振荡器将不产生高频振荡。由于起始栅偏压具有零或者不大的值，故电子管相当于一个整流管，其阳极电流可达到大约 25 毫安的数值。于是继电器动作，并用水银接点合上执行机构的电动机回路。调节机构便向规定被调节温度的方向移动。

随后指针和小旗将沿着度盘向右移动。一俟温度达到给定值，指针就处在控制指针

的对面，小旗便落到两段线圈 L_0 之间的空隙里。

线圈 L_0 的电磁场将在小旗的材料里感应出涡流来。按照楞次定律，这种电流所造成的电磁场，将反作用于产生它的线圈磁场。于是线圈 L_0 的电感便减小了。

由于这个缘故，栅极和阳极电路(L_a 、 C_a)被调谐到谐振，因此阳极电流就剧烈地降低(从25毫安降到5—6毫安)。

这个电流将低于电磁继电器的返回电流，因而继电器便释放其衔铁并切断执行机构回路。于是对于被调节对象的加热就减小或者完全停止。

然而物体有热惯性，温度的提高会继续一段时间。此时，小旗也不可能从空隙的右面跑出来，因为受到固定在可动杆上支撑的阻碍。当温度降低时，指针将沿温度盘向左移动，而小旗也从线圈 L_0 两段之间的空隙中退了出来。这样就使高频振荡中断。于是继电器线圈里的电流增大，执行机构重新向“增加”方向合闸。

在作双位调节时，执行机构和调节机构不可能停留在相当于被调节温度给定值的静止位置。这样就增大了摩擦部分的磨损。

2) 三位置调节器的电路

$\Theta PM-47$ 型三位置电子装置的电路示于图2-5。电路中包含有两个双电路振荡器。左面一个振荡器用来控制增加热量的执行机构，右面一个则用来控制减少热量的执行机构。如果被调节温度等于给定值，那末执行机构都不动作。

栅极电路里的两个线圈 L_{c1} 和 L_{c2} 各被固定在一个单独的可动杆上。温度的容许偏差范围就靠这些可动杆来整定。

当温度低于规定的低限时，小旗便处在 L_{c1} 和 L_{c2} 的左面。在这种情况下，电子管不起振荡，并且在继电器线圈里流过了大约25毫安的电流。继电器 P_1 动作，并闭合水银接点 K_1 。由于这个缘故，执行机构合闸，并将调节机构向提高物体温度的方向移动。同时辅助触点 a 被断开，并切断右边电子管的阳极回路。因为这个电子管处在和左边的电子管相同的情况下，所以在它的阳极电路里，也应该有近25毫安的电流。如果不将这个电子管的阳极回路切断，那末继电器 P_2 就会动作，并将执行机构的电动机向相反的方向合闸。这样一来，电动机便停止不转了。为了防止这点起见，在把电动机合向“增加”时，要把继电器 P_2 的阳极回路切断。其次，当继电器 P_1 动作时，还断开继电器 P_3 线圈短接回路中的辅助触点 b 。当该线圈无电时，常闭触点 K_3 会将“正常”信号回路接通，由于温度实际上低于正常值，那末就应该取消这个信号，这靠触点 b 的断开来实现。因此，在

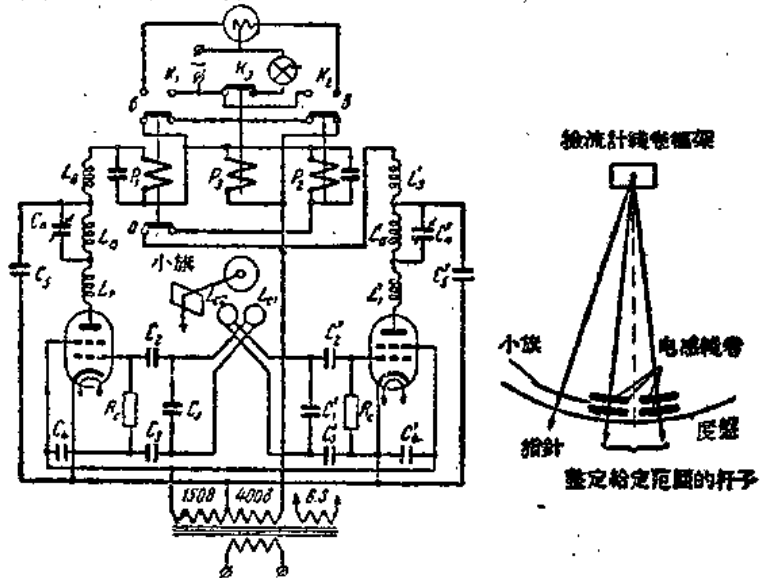


图 2-5 $\Theta PM-47$ 型电子装置的原理电路

当温度高于规定的上限时，小旗便处在 L_{c1} 和 L_{c2} 的右面。在这种情况下，电子管不起振荡，并且在继电器线圈里流过了大约25毫安的电流。继电器 P_2 动作，并闭合水银接点 K_2 。由于这个缘故，执行机构合闸，并将调节机构向降低物体温度的方向移动。同时辅助触点 a 被断开，并切断左边电子管的阳极回路。因为这个电子管处在和左边的电子管相同的情况下，所以在它的阳极电路里，也应该有近25毫安的电流。如果不将这个电子管的阳极回路切断，那末继电器 P_1 就会动作，并将执行机构的电动机向相反的方向合闸。这样一来，电动机便停止不转了。为了防止这点起见，在把电动机合向“减少”时，要把继电器 P_1 的阳极回路切断。其次，当继电器 P_2 动作时，还断开继电器 P_3 线圈短接回路中的辅助触点 b 。当该线圈无电时，常闭触点 K_3 会将“正常”信号回路接通，由于温度实际上高于正常值，那末就应该取消这个信号，这靠触点 b 的断开来实现。因此，在

較低溫度時，只有左邊電子管和繼電器 P_1 在工作。

隨着溫度的升高，指針與小旗將順着溫度盤向右移動。在某個溫度值時，小旗進入到柵極繞圈 L_{c2} 兩段之間的空隙里，由於這個緣故，陽極電流便降低到5毫安。但調節器電路的工作並未改變，因為右邊電子管的陽極回路還是斷開的。

當繼續提高溫度時，小旗將處在兩個控制繞圈(L_{c1} 和 L_{c2})之間的對稱位置，也即相當於在正常溫度值時的情況。左邊的電子管開始振蕩，所以它的陽極電流便降低到5毫安。繼電器 P_1 釋放其銜鐵，並用觸點 K_1 斷開執行機構的電動機回路。同時，繼電器 P_1 接通了觸點 a 和 b ，觸點 b 短路了繼電器 P_3 的繞圈。因此常閉觸點 K_3 便接通了“正常”信號。觸點 a 接通了右面電子管的陽極回路，在該回路中接有繼電器 P_3 的繞圈。

由於有熱慣性，在某段時間內溫度將升高或繼續高於正常值。所以小旗從繞圈 L_{c2} 的气隙里走出來以後，將整個地處於繞圈 L_{c1} 的气隙中。左面的電子管仍舊保持振蕩，而右邊的電子管卻停止振蕩了，於是它的陽極電流便增大到25毫安。

繼電器 P_2 合上後，執行機構便減少物體的加熱，同時觸點 B 被斷開，電流通過了繼電器 P_3 的繞圈，於是“正常”信號就熄滅了。

大功率觸點 K_1 和 K_2 ，也可以用來發出信號，表示溫度偏離了平均值。

I、帶位置調節裝置的電子自動電位計和平衡電橋

這種電子調節器，是在原有電子自動電位計和平衡電橋的儀表上，加裝位置調節裝置。

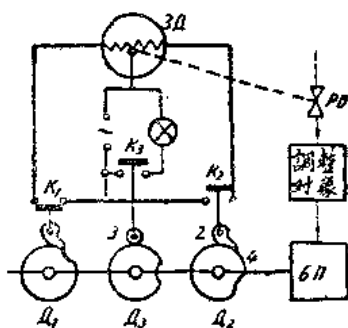
在雙位置調節器中，當被調量偏離給定值時，調節機構可以處在預先確定的兩個位置之一的上面。

如果這兩個位置對應於調節機構的全開和全閉，那末此時雙位置式調節器就是按“合一斷”電路而工作的。

雙位調節器可以有一個控制觸點或者有兩個觸點。

在作三位位置調節時，調節機構可以有三個確定的位置，相當於被調量的三個值：“少”、“正常”和“多”。

為了進行控制，三位調節器至少需要兩個控制觸點。



2-6 三位式調節器原理電路

三位調節器亦可用作雙位調節。

雙位及三位電子調節器基本電路

三位式電子調節器電路示於圖2-6，其基本儀器為 $\Theta\Pi\Pi$ 型和 $\Theta M\Pi$ 型。被調量的變化，引起基本儀器 $\Theta\Pi$ 的可逆電動機合閘。在可逆電動機減速齒輪箱的軸上套了三個圓盤，相互間用螺栓連接起來。中間一個圓盤 Π_3 是由兩個圓盤組成的。這兩個圓盤的相對位移，可以用來增大或減小雙圓盤 Π_3 的總凹眼的大小，這樣就可以確定調節範圍。

圖2-6的電路表示調節器處於被調量低於給定值的情況下。調節機構移動着，力求提高被調節的溫度。圓盤向反時針方向旋轉。

當被調量剛落到規定的範圍以內，觸點 K_1 就斷開了，而觸點 K_3 則閉合并合上“正常”信號，或者就作用於調節機構，力圖使被調量恢復到給定值。

如果被調量超过了規定范围的上限，触点 K_3 被断开，而触点 K_2 接通。调节器执行机构被合上以減少被調量。

调节器的触点可接光或声的信号（单独的或者与执行机构合用）。触点的容許电流在120伏时为5安。大功率的执行机构，要通过中間继电器来合閘。

当被調量緩慢变化时，会出现火花并使触头烧伤。在这种情况下，触点 K_1 、 K_2 和 K_3 的回路，可用12伏的电压供电。

控制执行机构的电动机，应该采用功率較大的触点（通常用玻璃的水銀开关）。

图2-7所示为具有切换范围的双位置调节器的电路。

调节器具有两个被基本仪器 БП 所轉动的圆盘（ Δ_1 、 Δ_2 ）。触点 K_1 和 K_2 处在继电器 P_1 和 P_2 的綫圈回路中。这些綫圈由硒整流器 CB 来的30伏直流电压供电。继电器控制着接在执行电动机回路中的玻璃水銀开关 B_1 和 B_2 。继电器 P_1 在被調量低于預定的调节范围之內时合閘。继电器 P_2 则在温度超过給定值时合閘。

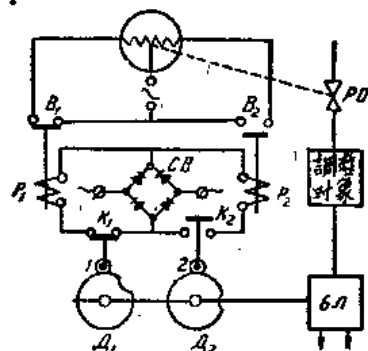


图 2-7 具有切换范围并带有 БП 与 БМБ 型基本仪器的双位置调节器原理电路

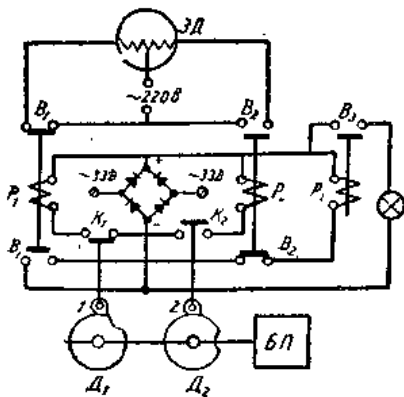


图 2-8 具有 БП 及 БМБ 型基本仪器的三位置调节器原理电路

“正常”信号回路或其他輔助回路接通。

当滚輪 2 刚陷入圆盘 Δ_2 的凹眼时，继电器 P_2 动作以降低被調量。同时，继电器 P_3 的綫圈回路被断开，水銀开关 B_3 也随之而断开。

如果只有一只继电器 P_1 接在电路里，那末三位置切换开关就会象双位置式一样地工作。如果不用那一个控制机构的继电器 P_2 ，那末调节器将按双位置电路工作。

此外还有可以记录多点温度，而对其中某一个温度进行位置调节的电子仪器。它的基本原理和上述的相同，这里不叙述了。

§ 3 无定位调节器及其调节过程

1. 无定位调节过程及其特征

无定位调节器是其调节机构的位置与被调节参数之間，沒有直接关系的调节器，即