

自动調整理論讲义

M.A. 阿依捷尔曼著



國防工業出版社

自动调整理论讲义

M. A. 阿依捷尔曼著

华中工学院自动学及运动学教研室

陈珽等译

国防工业出版社

1958

內 容 介 紹

本書是作者根据十多年来对莫斯科許多部門的科学研究所、設計局和工厂的科学工作者及工程师講課的講义編写而成的。書中扼要地叙述了各种自动調整器及用以計算調整系统的原始資料的获得，并討論了自动調整系统的稳定性，綫性化系统中过渡过程的繪制与評定，非綫性系统中的自振蕩和强迫振蕩等問題。

本書适合于工程师及科学研究工作者研究自动調整理論之用，也可作为动力学院及电工学院学生的参考書。

苏联 М. А. Айзерман 著 ‘Лекции по теории автоматического регулирования’ (Обorongиз 1956年第一版)

国防工业出版社

北京市書刊出版业营业許可証出字第 074 号

机械工业出版社印刷厂印刷 新华書店發行

*

850×1168 耗 $1/32 \cdot 10^7/16$ 印張 · 263,000 字

一九五八年十二月第一版

一九五八年十二月北京第一次印刷

印数: 1—4,900 册 定价: (10)1.65 元

NO. 2169 統一書号 15034·264

目 录

作者原序	5
第一章 关于自动调整器的一般知識	7
§1 关于调整过程的一般概念。專門名詞	7
§2 最簡單的直接調整系統	11
§3 間接作用的无差調整器	16
§4 硬反饋。間接作用的有差調整器	20
§5 恒速反饋	25
§6 导数作用	28
§7 关联調整	31
第二章 計算調整系統用的原始資料的获得	33
§1 划分調整系統为一些元件	34
§2 系統及元件的靜态特性	40
§3 系統中元件的方程式	46
§4 元件的綫性模型。方程式的綫性化	60
§5 元件綫性模型的分类。固有算子和作用算子。典型元件（环 节）	67
§6 系統綫性模型的傳遞函数。按元件的綫性模型方程式編写傳 遞函数	70
§7 自动調整系統綫性模型的靜态。有差系統和无差系統的傳遞 函数	76
§8 綫性元件和系統綫性模型的頻率特性	79
§9 結論	111
第三章 自动調整系統的稳定性	114
§1 根据系統綫性模型的傳遞函数来判定它的稳定性	115
§2 根据頻率特性来判断系統的稳定性	146
§3 关于某些类型的自动調整系統稳定条件的一般性質	156
§4 根据綫性模型的稳定性来判断原系統的稳定性	176
§5 結論	181
第四章 綫性化系統中調整过程的繪制与評定	183

§1 概述	183
§2 根据已知的系統傳遞函数繪制过程	187
§3 繪制調整过程的圖解法	197
§4 根据系統的頻率特性繪制調整过程	208
§5 关于間接評定調整过程的一般知識。穩定度	224
§6 积分評判	229
§7 根据頻率特性曲綫的形状以評定过程	242
§8 結論	248
第五章 非綫性自动調整系統中的自振蕩和強迫振蕩	251
§1 关于非綫性系統中的周期状态的一般知識	251
§2 周期状态接近于諧和状态的条件	254
§3 用諧波平衡法近似地决定自振蕩	260
§4 用諧波平衡法近似地决定在外界周期作用力下的強迫振蕩	269
§5 包含若干个非綫性元件的系統	273
§6 近似求出的周期解在“小偏差”下的稳定性	276
§7 准确决定含有繼电器的系統中的周期状态	279
§8 关于动态系統相空間的某些知識	286
§9 結論	302
附录 1 拉普拉斯变换与福里哀变换及其对于常系数綫性微分方程組积分的应用	304
§1 关于拉普拉斯变换的一般概念	304
§2 單个微分方程的积分	307
§3 綫性微分方程組的积分	316
§1 福里哀变换与福里哀积分	320
附录 2 积分正弦 $\text{Si } x$ 的函数表, 角度用弧度表示的三角函数表, 和 e^{-x} , $\frac{\sin x}{x}$, $\frac{\cos x}{x}$ 的函数表	325
中俄名詞对照表	330

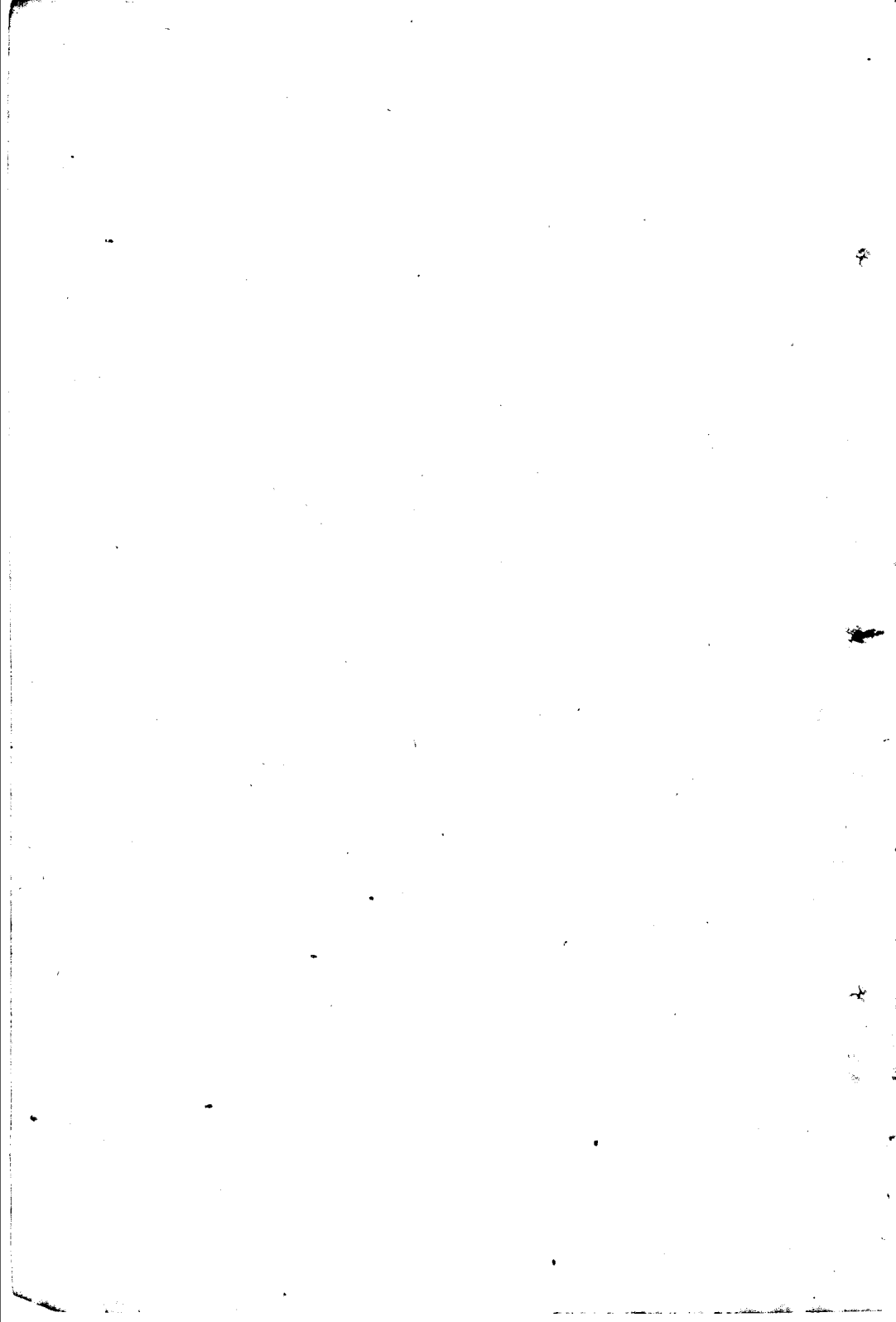
作者原序

本書是作者根据十多年来对莫斯科許多部門的科學研究所、設計局、和工厂的科學工作者及工程師講課的講義編写而成的。听講人都不是自动調整方面的專家，但是他們在其他技術領域方面都有丰富的工作經驗，并且掌握了調整技術。为了力求达到能够設計和調整調整器的目的，听講人深知必需懂得那怕是自动調整理論的基础知識也是好的。因此，他們請求作者，从調整理論所积累下来的丰富材料中，选取实际应用上最重要的一部分而远不是全部編成講義，作者接受了这个請求。自然，在选材中可能还会有錯誤。作者是憑自己的經驗，听講者的經驗和建議編写的，但观点、習慣、和爱好不能不影响到講義的內容，只有通过一定的时间和实际运用的體驗才能有根据地区分主要的和次要的。

本書所討論的是調整理論而不是調整技術，所以在第一章內关于調整器的基本知識只是很扼要地叙述了一个梗概，它的份量只够供讀者去了解其他章節的內容。

本書的編写是考虑到讀者已經懂得拉普拉斯變換和福里哀變換的理論。至于不懂这方面知識的讀者，在本書的附录一中有學習本書所必需具备的一些理論知識的介紹，因此希望他們首先从这一部分讀起。列举的例子和某些次要的解釋是用小号字排印的，在第一次閱讀时，可以不看。

作者感謝 Я. З. 崔普金，Ю. В. 陀耳果連科，А. Я. 列尔聶尔在审查手稿中所提的意見；并对 Ю. В. 克烈緬土洛，Ю. И. 奧斯特洛夫斯基，和 Е. А. 安德烈也娃在本書付印时給予的帮助致以謝忱！。



第一章 关于自动調整器的一般知識

§1 关于調整过程的一般概念。專門名詞

所謂自动調整就是在机器、仪器、或其他技术装备中維持或按照給定的条件变更某一量的过程，在完成这种过程时，毋需人們的直接参与，而只依靠为了达到这个目的所專門接入的仪器——自动調整器。

机器或其他技术装备的稳定状态，常因外界的作用而遭到破坏，这种作用就叫做扰动。無論这些扰动的本質怎样，它們对过程有害的作用应当由調整器相应的控制作用来抵消。例如：任何發动机轉速的恒定由于外界負載的变化而遭到破坏，为了維持轉速的恒定，必須依靠能够抵偿这种負載变化的一种作用，它作用在控制蒸汽，燃料等的輸入量的机构上；室內溫度的恒定当热交换条件变更时，就会發生变化，为了維持溫度不变，就应当改变房間的加热强度来抵偿这种变化；飞机的航向常因一陣陣的疾風、气潭、及其他飞行条件的改变而被扰乱，这就应当靠作用在舵上的力来維持使航向不变，諸如此类等等。

为了維持某一量为恒定，可以測量外界的扰动，并依靠这些量度来对机器發生作用，这种使过程稳定的方法就叫做自动补偿。它有时被采用。但同一机器扰动的来源可能是形形色色的；如果是这样的话。这种方法就不实用。所有可能扰动的来源决不是永远能够预料得到的，并且它們常常是在机器本身的内部（例如：潤滑条件和热状态等等的变化）。所以在很多的情况下，控制一个过程只靠自动补偿的方法一般是不可能的。

为了維持某一量为恒定，往往不是去測量各种各样的干扰，而只限于測量所必需調整的量和給定值的偏差，并依靠这一偏差

去作用于机器。这样组成的控制机器的系统，不论有多少形形色色的扰动，只要一个测量仪器就行了。当然，被测量的量这时不可能保持绝对的准确，因为只有被测量的量和所需的值发生偏差时才会对机器发生作用。由于这个缘故，为了使被测量的量和所需值之间很小的偏差（无论它们是怎样产生的）也能对机器起足够的补偿作用，所以重要的是能够对一些很小的量有所反应。根据这个原则建立起来的调整系统原理图如图 1 所示。

机器、仪器、或其他技术装备，如装有实现自动调整过程的调整器时，就叫做调整对象。调整对象受到调整器作用的那一部分叫做调整机构。受调整的量叫做被调整量或被调整参数。

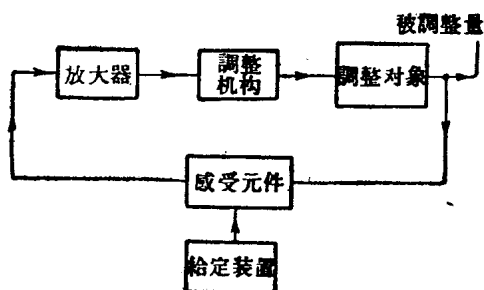


图 1

为了能对调整机构产生作用，调整器应装有测量被调整参数和给定值之间偏差的测量装置和确定被调整量给定值的装置，前者叫做感受元件，后者叫做给定装置。

当被调整量和给定值有偏差时，如果调整器的感受元件所产生的力和能量足以使调整机构以所需的速度移动的话，这时就把感受元件和调整机构直接相联。像这样的调整器叫做直接作用式调整器。由于直接作用调整器的结构异常简单，所以一直到現在仍广泛流行。但它的应用范围只限于下列几种调整对象：要求以不大的力就能推动调整机构的调整对象；或者是允许采用能产生相当大推动力的感受元件的调整对象。在所有其他的情况下，调整器的感受元件只用来作为命令装置：从感受元件发出的信号控制某一放大器（液压的、气动的、电子的、电机的等等）。这种放大器依靠了外来的能量产生足以控制执行装置的力和功率。

装有这种放大器的調整器叫做間接作用式調整器。

在間接作用式調整器中，直接和調整机构联在一起，并驅使它运动的装置，就叫做調整器的执行装置。作为执行装置的有各种电动机，液压的和气动的拖动装置等等。

上面已經指出，沒有一个調整器能够准确地保持被調整量的給定值。这是因为根据它本身动作的原理，調整器只有当过程在某一扰动的作用下遭到破坏时才开始工作。由于某种扰动以及由于这一扰动所引起的調整器作用的结果，产生被調整参数随时间的变化，这种变化就叫做調整过程。因为調整对象的工作質量决定于調整器，所以在設計調整器时，必須使調整过程的进行能满足一系列严格的技术要求。調整器通常也具有使过程振荡和稳定性破坏的傾向，这应当在設計和調整調整器的过程中加以克服。为了保証調整的稳定性，同时为了减弱满足技术任务对調整过程所提出的很高而必需具备的条件，我們加进了專为达到这个目的用的各种装置，于是調整器就变得更加复杂起来了。作为这种装置的有：各种反饋、导数作用、积分作用、加快作用以及故意引入的延滯或开断作用迴路等等。所有这类装置称为鎮定装置。

如果調整对象的状态遭到某一扰动的破坏，这一扰动在以后時間上保持常值，那末調整器或者是使被調整参数回复到所需的值而与扰动的大小无关，或者是使参数达到一个新值，这一个新值与原来值相差極微（相差一个靜态誤差），但与剩余扰动的值有关。第一种情况的調整器叫做无差調整器[●]，第二种叫做关于扰动的有差調整器。調整器所維持的調整参数之值与調整对象剩余負載的关系叫做調整系統的靜态特性。在許多情況下，必需用无差調整，但通常只要具有微小靜态誤差的有差調整就可以滿足了。照例，有差調整器比較稳定些，而且，只要用較簡單的，因

● 稳定性这一名詞的定义将在第三章說明。

● 无差指的是无靜差，有差指的是有靜差。以后均簡称无差或有差。——譯者

而也就是比較便宜的鎖定裝置就可以保證調整過程的優良質量。有時有差調整對調整對象正確地工作來說是必要的，例如調整并聯運行的幾個機器就是如此。

所有以上所述的都是直接屬於調整某一個量的調整器。在工業實際情況中，通常在同一個對象內必須調整幾個量。如果這些量通過對象彼此沒有聯繫，即每一調整機構的偏差只引起一個被調整量的偏差，而不引起其他被調整量的偏差，那麼它們每一個量都可以由自己的調整器來調整。在這種情況下，裝在同一對象上的這些調整器的作用彼此獨立。

常常需要調整許多這樣的對象，其中各個被調整量是彼此相關的。在這些對象內，一個調整機構的偏差會引起幾個被調整量的偏差。如在這種對象上裝有幾個彼此獨立的調整器，那麼其中一個調整器的動作會引起其他被調整量的偏差，而結果就引起其餘的調整器動作。在這種條件下，調整器就會彼此妨害。

例如：當調整中間抽汽作為供暖用的汽輪機時，它既裝有轉子的角速度調整器，而在各中間抽汽室又裝有蒸汽壓力調整器。其中一個壓力的改變會引起其餘室內壓力的變更，並引起轉子角速度的改變。反之，轉子上負載的改變，不僅使它的角速度改變，而且也改變了蒸汽的壓力。

在類似這樣的情況下，把各個調整器彼此聯接在一個統一的調整系統內往往是合理的。在這種關聯系統內，每一調整器的執行裝置控制的不是一個，而是幾個或者是所有的調整機構。

這類的系統叫做關聯系統。在關聯系統內，某一量的調整過程不能認為與其他的量無關，而系統應當整個地視為統一的關聯組合體。在許多情形下，各個調整器彼此之間的聯系方式可以這樣來選擇：儘管被調整量通過對象彼此是有聯系的，然而要使其其中一個被調整量的偏差不致引起其餘被調整量的偏差。它們可由調整器之間的外部聯系來補償。這種系統叫做自治系統。

在下面幾節中將用最簡單的例子說明主要類型的自動調整器

的結構。所舉的例子大多是用于技術操作過程中的調整器。今後，讀者在專門手冊和教程中將會找到很多更複雜但是更專門的例子。

§2 最簡單的直接調整系統

初期廣泛流行的調整器是直接作用式調整器。由於直接作用的調整器結構非常簡單而且工作不會間斷，迄今仍廣泛使用於調整機器旋轉部分的角速度、各種容器中液體的水位、煤氣管及煤氣庫中的氣壓。

圖 2 為直接作用式離心調整器的典型例子。當機器軸的角速度變化而不同於給定值（由彈簧拉力所確定的）時，重錘的離心力改變，相應地改變了聯軸節的平衡位置，後者連接到機器的調整機構。

圖 3 為直接作用式離心調整器的另一例。這種調整器的重錘是球形；它被彈簧壓在平板及圓錐形盤之間。當離心力改變時，球心至旋轉軸的距離也改變了。

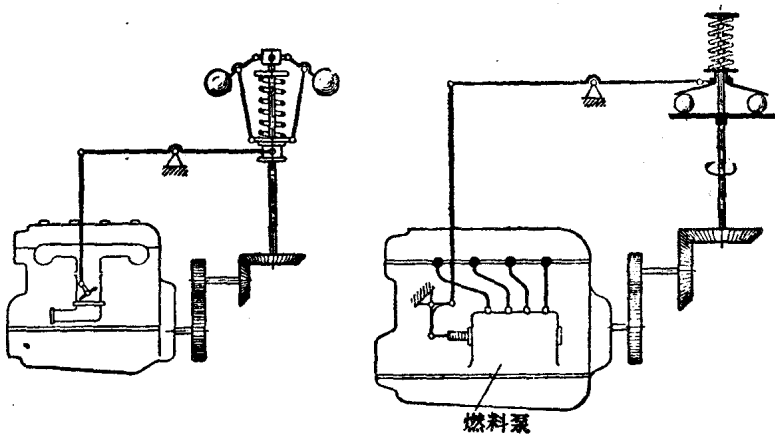


圖 2

圖 3

平面式調整器（圖 4）與前述調整器（稱它為圓錐式調整器）不同，在這種調整器中重錘在旋轉平面上移動。因此作用在重錘上的不僅有比例於角速度的慣性離心力，也有比例於角加速度的慣

性切綫方向力。在这种調整器中，联軸节的瞬刻位置也即調整机构的瞬刻位置，不仅决定于被調整参数（即角速度）与給定值之間的偏差，而且也决定于被調整参数对時間的第一阶导数值（即角加速度）。圖 4 的調整器可作为具有导数作用的調整器的例子。

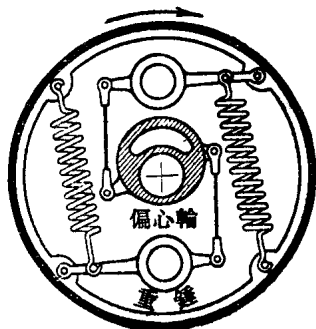


圖 4

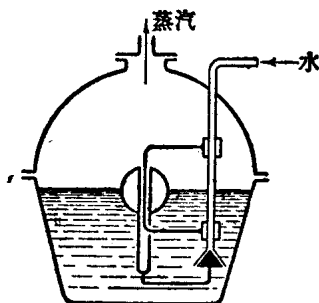


圖 5

与直接作用式离心調整器同样广泛流行的有直接作用式浮子水位調整器。第一个应用在工业上的自动調整器是浮子式水位調整器，由波耳祖諾夫把它裝置在蒸汽机的鍋爐上（圖 5）。現在浮子式水位調整器仍应用很广，自汽車發動机汽化器的浮子調整器（圖 6），至巨型工业貯藏器中的巨大調整器（圖 7）均屬其应用范围。

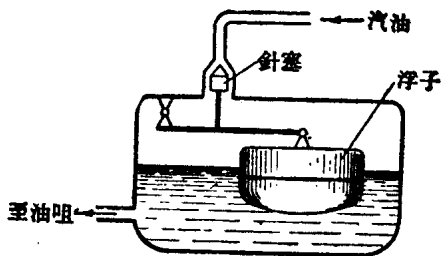


圖 6

直接作用式的压力調整器也用得很广泛。尺寸較小的这种調整器可以举减压活門或气体减压器为例（圖 8）。巨大的調整器其压力达数百公斤甚至若干吨。巨型煤气管中安装的干管自动調整活門（圖 9）就是这样的例子。

所有上述作为例子的調整器均屬有差調整器。如果使这种調整器和調整机构断开，改变引入調整器中的被調整参数之值，則

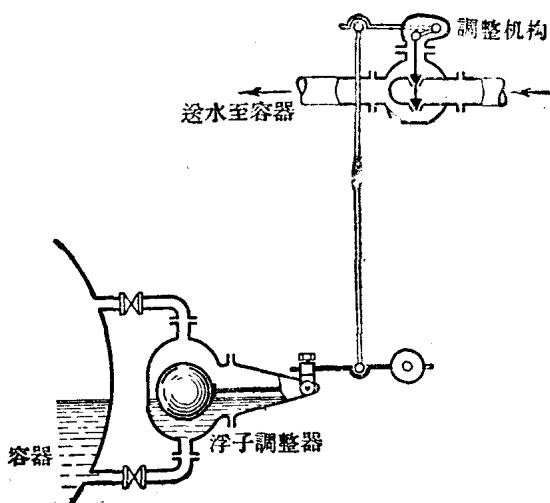


圖 7

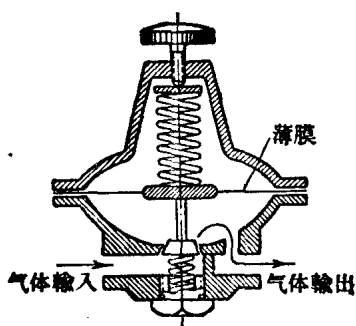


圖 8

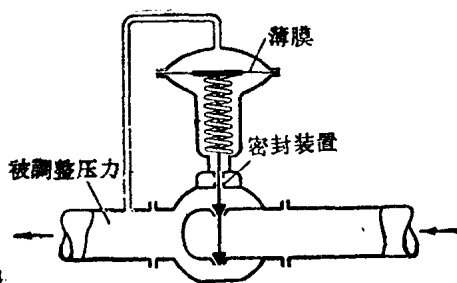


圖 9

必将改变和调整机构断开的执行装置的平衡位置。例如，在圖 2 及圖 3 中，将調整器的联轴节从調整机构断开，則当改变角速度时，每一角速度的数值对应于联轴节完全确定的位置。

在这种調整器中静态誤差是不可避免的。当調整对象有各种不同負載时，被調整参数必須是不同数值，平衡才能达到。

为了获得无差直接調整，調整器必須具有这样的条件，即当被調整参数为任一完全确定的数值时，其感受元件可处于各种平

衡位置，而当参数为其它数值时不能有平衡。

活塞式压力调整器可作为无差调整器的典型例子。这种调整器的活塞不是受弹簧的力，而是受重锤的重力（圖 10）。仅当活塞所受的压力为某一完全确定的数值时，活塞才能平衡，因此当调整机构在任何平衡位置时，压力均将为同一数值。

在具有重锤的薄膜式压力调整器中也能实现无差调整（圖 11），因为自重锤传至杆上的力，在杆的工作行程范围内差不多与重锤的位置无关。离心调整器及水位调整器也可以是做成无差的。

无差调整器通常要求加入锁定装置。导数作用最常被用作作为锁定装置。圖 4 表示具有导数作用的直接作用式离心调整器结构的例子圖。圖 12 表示这种压力调整器。这种调整器的腔 A 通过活塞上的限流孔与腔 B 贯通。活塞两面的压力差决定于腔 A 中压

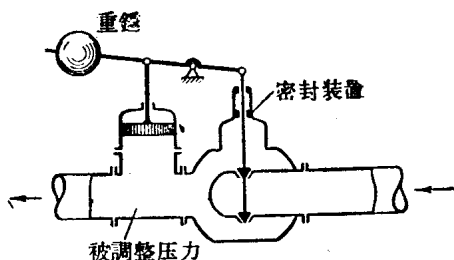


圖 10

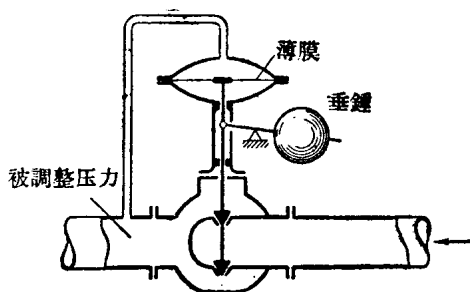


圖 11

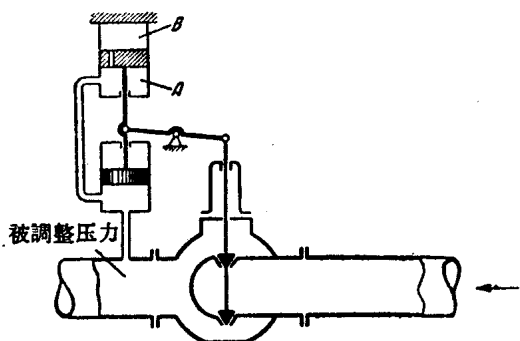


圖 12

力改变的速度：当压力改变得很緩慢时，差不多沒有压力差，而当压力迅速改变时則压力差很大。

为了鎮定无差調整器有时引入“暫时的有差”。圖 13 就是这种調整器。調整器的結構是这样来选择：当沒有阻尼器时它几乎是无差的[●]。將調整器的联轴节与彈簧相接，彈簧的另一端則接到具有微小限流孔的阻尼器（圖 13）。在調整的过程中彈簧的这一端实际上是不动的，調整器是作为一个有差調整器在工作。但当建立平衡时，阻尼器的活塞在彈簧的作用下移动直至彈簧的应力完全消失，静态誤差消除为止。这种装置可作为恒速鎮定裝置的簡單例子，我們以后还将談到恒速鎮定裝置。

現在研究直接作用式电气調整器的例子。

圖 14 系借改变發电机

激磁繞組中电流的有差电压調整器。为了保持給定的电压必須改变激磁电流，此处系靠改变炭柱电阻以达到。电阻大小决定于压

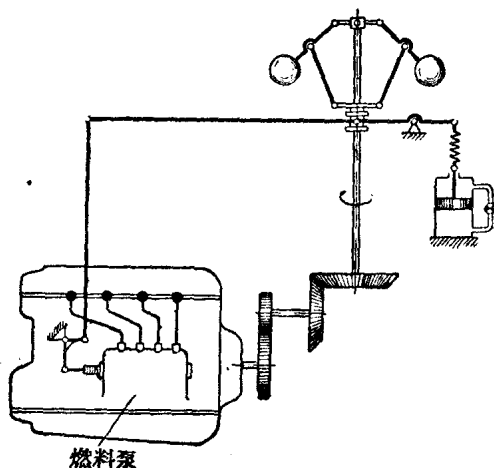


圖 13

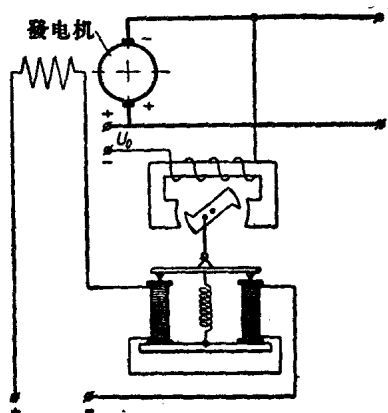


圖 14

● 圖13表示离心調整器。假定其杠杆兩段臂長的比例如此选择，以致調整器的特性近于无差。

力，而压力本身又决定于彈簧張力及由电磁鉄产生之力。在电磁鉄綫圈上施有發机电电压及标准电压 U_0 之差值。当發机电电压改变时，电磁鉄激磁綫圈中的电流也改变，因而改变了炭柱所受压力及發机电激磁电流，由此达到减小發机电电压与給定值間的偏差。

上述調整器系直接作用式調整器。因为产生調整作用所必須的能量（压缩炭柱）在这种系統中系通过調整器的感受元件从調整对象取得。

直接作用式調整器主要的优点是它的結構非常簡單。但是使用这种調整器的实践指出它也具有很多缺点。

在直接作用式調整器中为了能得到大的推动力，不可避免地要增加运动部分的質量。因此降低了調整器的稳定性。大的力增加了摩擦；相应地增加了不灵敏度。

在很多情况下，这种力可达数百公斤，数吨，甚至数十吨。此外，对許多重要参数（例如溫度）說来，很难选择一种測量器能够在有足够高的測量准确度下产生相当大的推动力。

所有这些都自然地引向一个簡單的概念：在測量器与調整机构之間加进一个放大器，依靠自外部輸入到放大器的能量使放大器能够产生必需的推动力，而控制放大器的只是小功率的測量仪表。

§3 間接作用的无差調整器

圖 15 为具有液压放大器的間接作用式无差調整器的典型例子。平衡时，活門总是回复到同一位置（中間位置），而与活塞及由活塞推动的調整机构处在什么位置无关。与此相应，感受元件的“指針”也回复到同一位置[●]。由此，在任何負載时，被調

- 此处以及以后，将感受元件的任一部分規定称为“指針”，該部分的位置比例于感受元件上某一点的位置，这一点和調整系統中下一个元件相連。如感受元件有指示或記錄系統，它就是指針；而在“盲”裝置（意指不能讀出數值的裝置——譯者）則指它的可动系統上的任一点。