

# 透平壓縮機調節

壓縮機教研室編

西安交通大學

1963. 8

## § 1-1 自动调整的一般概念

当机益、仪益以及任意其它技术装置之中，我们维持其中某一量不变或依数量按一定之规律而变化，只依靠为此目的而专门接入的称为自动调整器这一装置而毋须人直接参与其工作，这样的一种过程称为自动调整。

例一：如电厂中我们须维持电网频率恒定为 50 赫芝，这亦即保持汽轮机之转速恒定为三千转/每分，但由于电网是通往各种耗电用户，为简单起见，设只通往电灯，若本来通往十万只电灯，此时汽轮机输出功率与电网消耗功率保持平衡而以 3000 转/每分 运转，这时如关闭一万只电灯，则由于功率平衡破坏，转速亦必被破坏（转速为我们所须维持不变之量），这时自动调整器起作用，它控制进入汽轮机之蒸汽，从而重新建立功率以及转速平衡。

例二：设有一室温自动调整系统，须维持室内温度为  $20^{\circ}\text{C}$ ，室内热量始终向室外扩散，而失去之热由取暖器之蒸汽供给。设在一定大气状态之下室内由取暖器供给一定热量而维持为  $20^{\circ}\text{C}$ ，当外界气候改变，或当窗户打开之后，取暖器在前一状态下所供给之热量就不足以维持室温为  $20^{\circ}\text{C}$ ，这时自动调整器即起作用，增加或则减少取暖器之供热来恢复

室温为  $20^{\circ}\text{C}$ 。

由上述二例我们明显地可见我们所须维持之那一量之被破坏是由于外界对机益及装置之作用，这种作用称之为干扰作用。

上面我们只谈

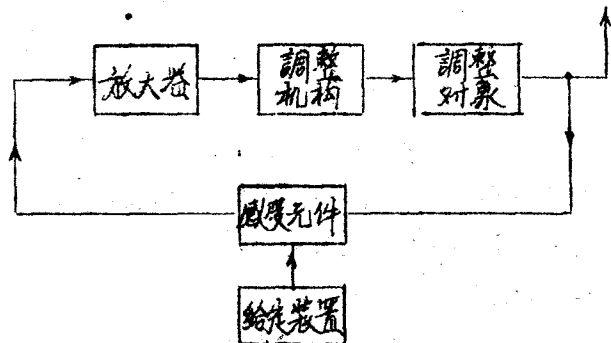


图 1

到自动调整之定义，现在须讨论自动调整器按什么原理来进行调整的，为此先解释下述各名称。

机盖、仪盖以及任何技术装置当装有自动调整器之后，它们自身被称为调整对象，如上例中之汽轮机及取暖器，调整对象受到自动调整器作用那一部分称为调整机构，如汽轮机之汽阀，取暖器之汽阀，我们所须维持不变或依一定规律变化之量称为被调整量，或被调整参数，如上例之转速以及温度。

自动调整器中具有一元件给定了我们所须维持的被调整量数值，该值称为被调整量的给定值，该元件称为给定元件，另外具有一元件专门测定被调整量实际值与所须维持之值之间有无偏差，称为感受元件，当存在这种偏差时，感受元件发生一个讯号给放大元件，放大元件为一液压，气动，电液等动力装置，它受到讯号之后可以依靠外来能量产生相当大功率及力来推动调整机构，调整机构位置改变使调整对象状况改变一直到被调整量恢复到给定值为止。放大器中与调整机构直接联接部分称为执行装置。

因之自动调整原理可简述如下——当外界对调整对象作用一干扰作用，使被调整量之实际值与给定值产生一偏差，感受元件感受此偏差并发出一讯号，放大器接受此讯号并利用外加能源推动调整机构直到被调整量恢复给定值为止。

如果感受元件发出之讯号相当强，具一定之功率及力，则不须利用外加能量以及放大器，这时称为直接调整，而利用放大器时称为间接调整，此时感受元件是控制放大器的外界能量。主扰动作用（干扰作用）直到被调整量恢复到给定值为止，被调整量一直随时间变化，这个变化过程称之为调整过程，为了改善调整过程，我们一般在自动调整器之中加入反馈等装置，统称为镇定元件。

现举例一之转速调整来解释上述之各名称以及调整原理如图2。

离心调速器之弹簧为给定元件，离心调速器本身起感受元件<sup>作用</sup>，联轴盖M之移动为发出之讯号，油动机B为执行元件，放大元件包括滑

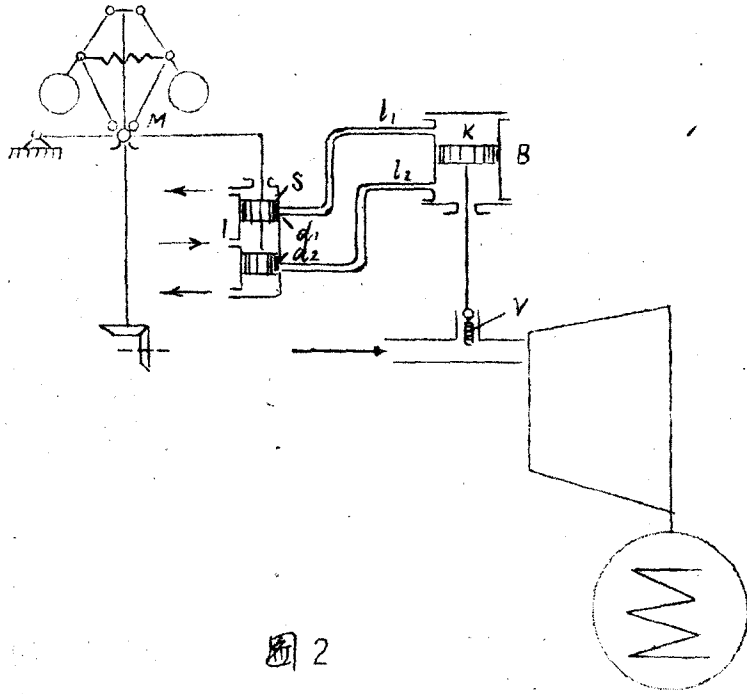


图 2

阀 S 以及油动机 B，汽阀 V 为调整机构。

设汽轮机空负荷  $N_0$  下以转速  $n_0$  运转，外界所需功率改变  $\Delta N$  这对汽轮机而言为一干扰作用使转速  $n \neq n_0$  因之 M 移动控制滑阀活塞 S 使高压油经滑阀进入油动机之一端，在油压作用下汽阀向相应方向移动，减少汽量，直到转速恢复到  $n_0$  为止。

应当注意的是很多书本均把感受元件称为调节器，而把感受元件与调整机构同一切统称为执行元件，同学们须善于区分。

上面我们讨论了自动调整定义，以及进行原理，介绍了最基本概念如被调整量、感受元件……但只假设调整机构动作会使被调整量恢复或依一定规律改变而并未解释其原因，因之我们必须对机器本身亦即调整对象作进一步分析。

### § 1-2 调节对象之基本知识

我們已經知道扰动作用之后是依靠調整机构來使被調整对象恢復被調整量，本節將討論調整对象一些基本性質，從而可以更深入了解此問題實質。

首先我們限于討論動力機械，動力機械之目的是產生有用能量，因之其特點即為能量在機組內各部分間不斷被傳遞及轉換，傳遞是指把同一種形式能量傳送，轉換是指把一種能量改變成另一種能量，據此功能而把動力機械之各部分相應為蓄積益及變能益，蓄積益之作用為自前面之變能益接受能量並且把之傳遞給下一變能益而自身又積聚一定能量，變能益之作用為自前蓄積益接收一種形式能量而把之改變為另一種形式能量交給下一蓄積益，二者一般均是交替連接。

現試舉例說明之

例一：電廠中鍋爐之汽包可認為一變能益，它把熱能變為蒸汽之壓能，蒸汽管接收汽包輸出高壓蒸汽并傳送之到汽輪機之葉柵（靜止及運動二部分葉柵），同時自身又存儲一定量之高壓蒸汽，因之為蓄積益，葉柵又為變能益，它把汽體壓能變為機械能，而轉子及電樞之迴轉質量又組成一蓄積益，它接受并傳送機械能給電樞，而自身又儲存一定之機械能，而發電機之電樞把機械能轉變為電能，故又為一變能益，如圖3示。

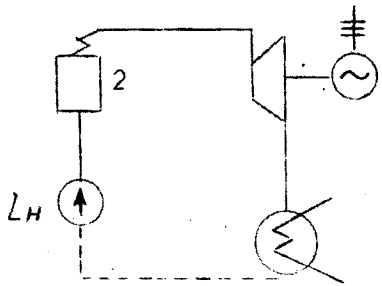


圖 3

對發動機或其先熱機均可作表

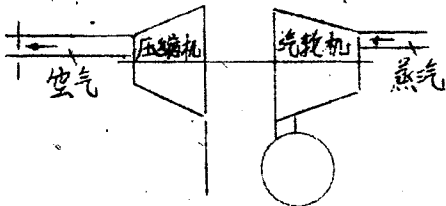


圖 4

似之分析。

例二：汽輪機拖動鼓風機（圖4）。汽輪機葉柵為變能益，汽輪機與鼓風機之迴轉質量為蓄積益，接收并把機械能傳給鼓風機葉柵，鼓風機葉柵

把机械能转变为气体压能，故又为变能器，压缩空气之管道内容积又组成一蓄积器，输送并储存一定气体压能，压缩空气之用户又做为变能器，把气体压能改变为热能。

对一般动力机组而言均可认为是介于二个极大蓄积器之间之一系列能量变换与传递，如图5。

如例二举一个蓄积器应认为是汽轮机前之蒸汽管道，其储存能力可认为是极大，不论汽轮机叶栅消耗蒸汽多少，不足以影响其中压力，最末蓄积器为大自然，能先完全吸收压缩空气变来之热能。

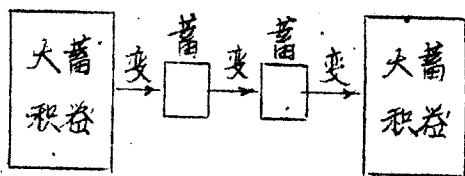


图5

在介绍了蓄积器变能器之概念之后，我们对它们尚须作详细说明。

首先蓄积器既然传递一定能量，则它所接收之能量可以一个参数  $Q^1$  表示，其输出能量可以一个参数  $Q^2$  表示，其储存能量之大小或其状态则以一个参数  $x$  表示，我们称  $Q^1, Q^2, x$  者为蓄积器之输入，输出量参数以及质参数。蓄积器状态之改变是由于储存之能量改变，故当  $x$  变动之时刻，它所储存之能量亦在变动，由能量守恒可知这时之输入能量不等于输出能量，亦即  $Q^1 \neq Q^2$ ，而当蓄积器状态稳定情况之下则  $x$  不变，此时一定  $Q^1 = Q^2$ ，故自  $Q$  大小可以看出传递能量之大小， $x$  大小看出储存能量之大小，由  $x$  是否变动或  $Q^1$  是否等于  $Q^2$  来判断蓄积器是处在平衡状态抑在变动状态；例汽轮机及鼓风机转子之回转质量组成蓄积器，量参数为汽轮机及鼓风机之力矩，质参数为转速，转速变动时二个力矩不等……。

其次蓄积器之量参数与质参数之间存在完全肯定之关系  $x - Q^1$ ，称为它的输入特性线， $x - Q^2$  称为它的输出特性线，图6。蓄积器之状态只能有一个，即  $x$  只能有一个，据  $x$  由输入输出特性找出  $Q^1, Q^2$ ，显然蓄积器之稳定状态亦即输出输入能量保持平衡状态只可能是输入特性与输出特性之交点。

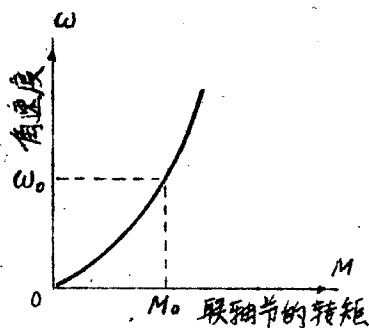


圖 6

输入特性与蓄积益前面之变能益具体结构以及前面一蓄积益之状态有关，例如汽轮机鼓风机转子之回转质量之输入特性为  $M_T - \omega$  ( $M_T$  汽轮机力矩,  $\omega$  转速) 与汽轮机叶栅构造以及蒸汽管道中压力有关，如蒸汽管道内不同压力下可获得一系列之 ( $M_T - \omega$ ) 曲线，而输出特性与蓄积益后面之变能益构造有关，如  $M_K - \omega$  ( $M_K$

鼓风机力矩) 与鼓风机叶栅有关，亦与后面一蓄积益之状态有关。当压缩空气管道内不同压力  $p$  之下获得一系列之  $M_K - \omega$  曲线，如图 7

示，当接有调整机构时，调整机构之位置亦影响到输入特性，如汽轮机之前设一只进汽阀，在其不同开度  $m$  之下可获一族  $M_T - \omega$  曲线，如图 8。

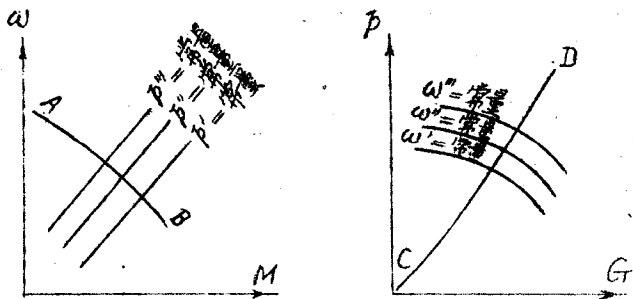


圖 7

第三，我们尚须对多蓄积益机组作更详细之说明，每一蓄积益  $i$  ( $i$  为机组中第  $i$  个蓄积益) 具一族输入特性  $x_i - Q_i^1$ ，及一族输出特性  $x_i - Q_i^2$ ，而每一根  $x_i - Q_i^1$  对应了第  $i-1$  个蓄积益之  $x_{i-1}$ ，而每一根  $x_i - Q_i^2$  对应了第  $i+1$  个蓄积益之某一状态  $x_{i+1}$  如图 9，因之第  $i$  个蓄积益上之任一点  $a_i$  对应了一个量参数  $Q_{ia}$ ，一个质参数  $x_{ia}$ ，同时必然具一根输入特性及一根输出特性通过  $a_i$ ，而输入特性  $x_i - Q_i^1$  是在某一  $x_{i-1}$  下作出，输出特性  $x_i - Q_i^2$  是在某一  $x_{i+1}$  之下作出，故对应于  $a_i$  点我们可知四个参数  $x_i, Q_i, x_{i+1}, x_{i-1}$ 。

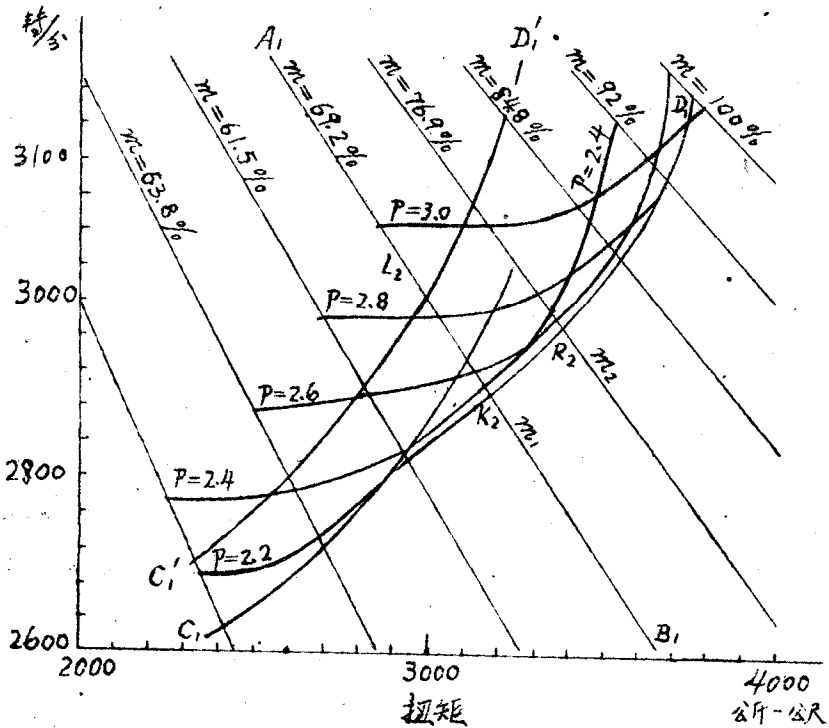


图8

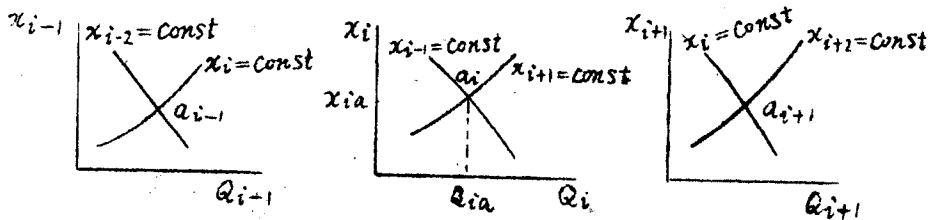


图9

如果已知第  $i$  个蓄积器状态为  $a_i$  点所示, 以及知道了每一蓄积器之所有输出, 输入特性线, 则我们可以非常方便确定任一蓄积器所处之状态, 例如由  $x_i, x_{i-1}$  可找出第  $i-1$  蓄积器之状态  $a_{i-1}$ , 而



由  $x_i, x_{i+1}$  推出第  $i+1$  蓄积益状态  $a_{i+1}$ 。依次类推，整个装置之每一蓄积益状态  $x_1, x_2, \dots, x_n$  及  $Q_1, Q_2, \dots$  均可确定。

例如汽轮机拖动鼓风机共二个蓄积益，其第一个蓄积益之输入特性为  $AB$ ，输出特性为一组等压力  $p$  线（压缩空气管道内压力），压缩空气管路为第二个蓄积益，输入特性为一族等转速下压力—流量特性而输出特性为  $CD$  线（如图 7 所示）。

如已知压缩空气管道内压力为  $p$ ，流量为  $G$ ，则通过该点有一输入特性，对应一定转速  $\omega$ ，据  $p$  及  $\omega$  即可在第一个蓄积益特性线网上找出转子状态，转速及力矩。

利用第  $i$  个蓄积益之一状态  $a_i$  来找出整个机组其它蓄积益所处状态，这一方法使我们能把任意蓄积益上之任意一点或一根线上之工况转绘到其它蓄积益特性线上去。当然第一个蓄积益之输入特性  $AB$  以及最末蓄积益输出特性  $CD$  均可转绘到第  $i$  个中间蓄积益上去做为  $A_i B_i, C_i D_i$ 。

第四点我们尚须讨论一下多蓄积益机组之平衡工况，所谓平衡工况即是每一蓄积益其输入能量等于输出能量，这时每一蓄积益均处在平衡状态下，故必然质参数不改变，输入量参数等于输出量参数，整个装置之  $x_1, x_2, \dots, x_n, Q_1, Q_2, \dots, Q_n$  是完全确定的，显然这样的工况只可能是第一个蓄积益之输入特性  $AB$  与最末蓄积益之输出特性  $CD$  在任意第  $i$  个蓄积益上之  $A_i B_i$  与  $C_i D_i$  之交点，图 10 示

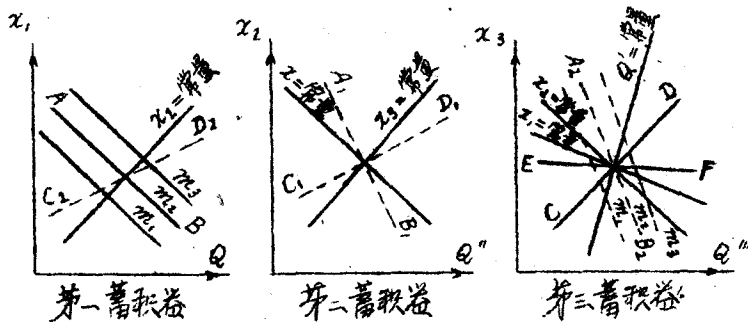


图 10

三个蓄积益之机组在第二个蓄积益上工况为  $A, B, C, D$ ，而决定（这里第二个蓄积益上之  $AB$  表示为  $A, B, C, D$  为  $C, D$ ）。

到此我们将继续讨论一下扰动是什么？机益是根据什么原理来进行调整的？最末蓄积益之输出特性  $CD$  是由用户状态决定的，它经常随用户状态而变动，因之它的变动是最经常出现之扰动形式，当  $CD$  变化时，则在第  $i$  蓄积益中之  $C_i, D_i$  亦变动，其状态  $X_i, Q_i$  均变化，现在设欲维持某量  $X_i$  不变，祇须相应改变  $AB$  位置，使  $A_i, B_i$  与  $C_i, D_i$  之交点维持  $X_i$  不变，这样就达到调整目的，如图 10 所示当须使  $X_3$  沿  $EF$  变化，则当  $CD$  变化时（图上未画出）只须改变调整机构位置  $m$ ，移动  $AB$  而使被调整量  $X_3$  沿  $EF$  变化， $EF$  又称作静工况线。

自动调整基本作用原理已讲完，下章再讨论透平压缩机调整什么，如何来调整。

## 第二章 透平压缩机装置之特性线及调节方法

### § 2-1 装置之输出特性——用户特性

由上一章我们知道当机组装置之输出特性移动时，工况就会发生改变，对透平压缩机装置而言，在压缩机出口排出高压汽体总是流经一系列管路以及流体阻力时把压力逐步损耗掉，转变为热能。对于一定之管路或流体阻力（如阀门）而言，通过它的流量及所损耗压力具完全确定关系  $\Delta p - Q$ （ $\Delta p$  是压力损耗， $Q$  为流量），如果流过一系列管道及阻力，在其第  $i$  个须克服压力为  $\Delta p_i$ ，则总压力损耗为  $\sum \Delta p_i$ ； $\sum \Delta p_i - Q$  关系就是总的压力损耗与流量之关系；我们称它为装置之输出特性，或称为用户特性。

显然用户特性之  $\sum \Delta p_i - Q$  是由管路或阻力之每一特性  $\Delta p_i - Q$  叠加而成，因之只须组成用户之任意一个管道或阻力状态改变而使

$\Delta p - Q$  改变, 总的用户特性  $\Sigma \Delta p_i - Q$  亦就相应发生变化。例如气体流经五个阀门, 我们只改变其中一个阀门之位置, 则总的  $\Sigma \Delta p_i - Q$  就发生改变。

现在转到讨论管路阻力  $\Delta p - Q$  关系一般具有什么形式。

1. 通过任何流体阻力或管道, 其压力损失可归结为  $\Delta p = \xi \rho \frac{v^2}{2g}$

形式, 即动能乘上由这个阻力状态所决定系数  $\xi$ , 由于动能正比于流量平方,  $\therefore \Delta p \propto Q^2$ , 因之对于任意流体阻力以及管路而言  $\Delta p - Q$  是一条抛物线, 如图 11 所示。

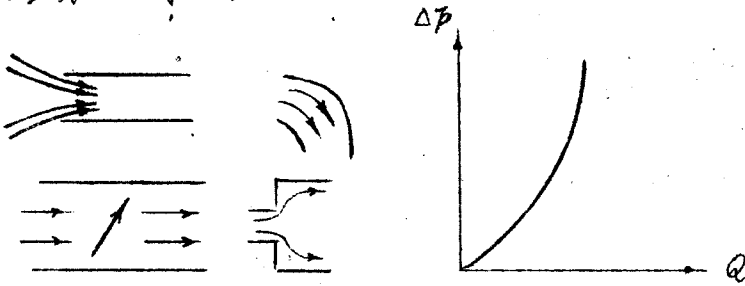


图 11

2. 其次气体在流动之中往往须克服一定之静压力, 如气体流入一保持压力为  $p$  ata 之容器, 而流入流量即使改变所须克服静压  $p$  仍不变, 因这种情况下之  $\Delta p - Q$  为一条水平线, 应当注意这时压力  $p$  ata 不是损耗掉的 (虽然在容器后之流动中它是损耗掉的), 另外如气体流过一定高度之液注所须克服阻力为常数, 不随流量而改变, 如图 12 中, 克服高度为  $h$  之钢液即须克服静压  $\Delta p = h\gamma$  而与流量  $Q$  无关。

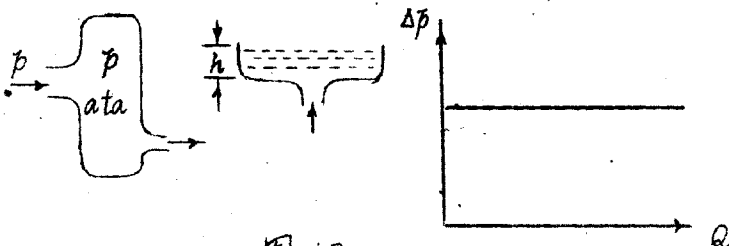


图 12

3. 气体之动能最后总是损耗掉的，它亦由气体之压能转变而来，故亦正比于  $Q^2$ 。

综合上面所述气体流动时阻力或所须克服静压与流量关系一般为  $\Delta p = \text{Const}$ ,  $\Delta p = kQ^2$  二种型式，当它们串接时  $\Delta p$  就应当叠加，总用户特性将呈  $\Sigma \Delta p - Q = (C + kQ^2) - Q$  形式，为一抛物线。例如高炉，炉顶具  $c$  ata 大气压，而炉内以及由风机出口到炉这一段损耗  $\Sigma \Delta p = kQ^2$ ，这时阻力特性即为  $C + kQ^2 - Q$ ，如图 13 所示。

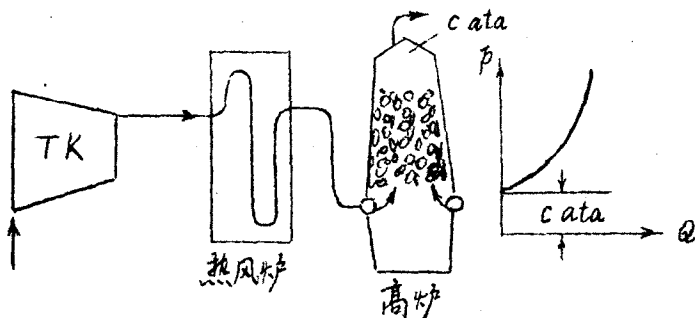


图 13

§ 2-2 压缩机之特性线以及透平压缩机于不变转速下无调节时之工作

图 14 为多级轴流压缩机性能曲线，亦为压缩空气管道之输入特性线，当容积流量  $Q$  (图上为  $V_a$ ) 改变时，压力改变非常急剧，喘振点上之压力亦为最高，图 15 为离心式特性线，比较平坦，喘振发生在压力最高点之左。

现讨论一下如果拖动透平压缩机之原动机之转速能维持不变时，且装置中无其它调整装置，则装置输入特性线将为透平鼓风机

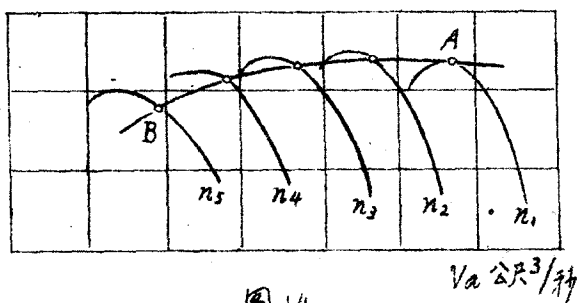


图 14

和之等转速线，而输出特性仍为前节所示，如图 16 所示。

设想用户在某状态下其特性如 I 所示，则工况点必为点 1，如用户之状态改变，特性改为 II，则此时压缩机在点 2 工作，显然遗于压缩机于用户特性改变时，亦相应改变自己

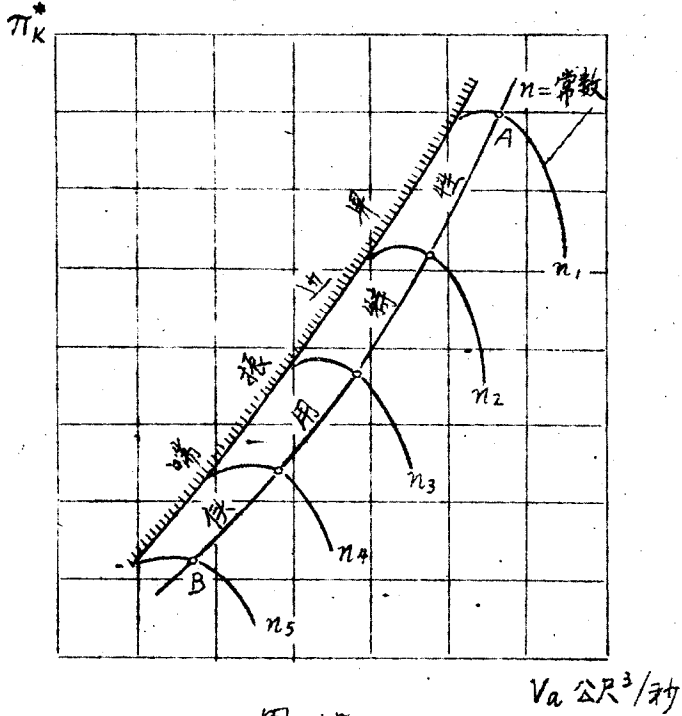


图 15

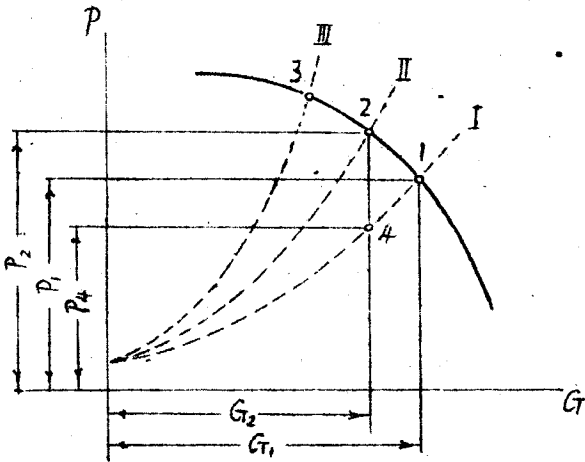


图 16

不是须精确要求场合下才可采用。

另外在等  $n$  线之左段对一般用户特性而言不具有自调整，风机

工作，具有这种能力称为具有自调整。自调整是对风机以及用户二者而言的。

图之只须我们所需之静工况线 EF 与等  $n$  线吻合或则相近的话就不必加入其它设备，当然这种情况是不多的，只在  $Q$  变动时对压力  $p$

无法在此区正常工作。(严格地讲,当用户特性变动时,工况能沿装置之输入特性上工况稳定地工作即称具自调整,此时在装置上无调节设备。故上面报导调速机卷只为一例而言)。

### § 2-3 不变转速之下透平压缩机之调节

由前面讨论,调整目的必须使被调整量按一定规律变化(沿静工况线  $EF$ ),调整方法是当装置之输出特性改变时相应改变输入特性。当鼓风机转速不变场合之下,能够影响输入特性的是改变进气参数,改变叶栅结构,现分别叙述如下:

#### 一、进气管节流方法(图 17)

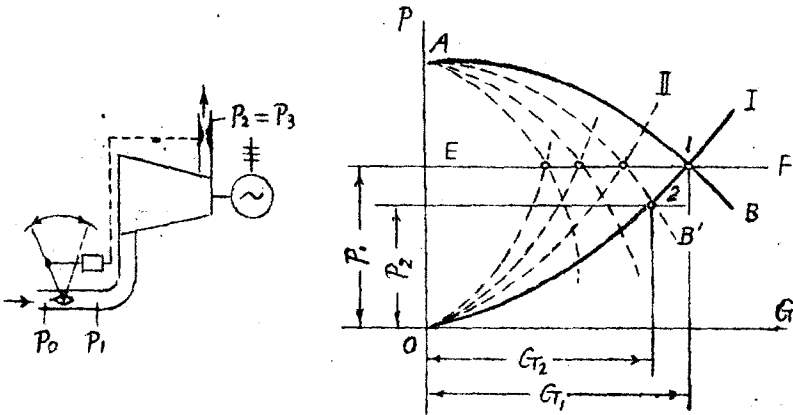


图 17

在进气管中按设一节流阀,则阀门每一位置下就能获得一条输入特性,如  $AB, A'B', \dots$ ,如必须维持工况线为  $p = \text{const}$  ( $EF$ 线),则当用户特性为  $I$  时,工况点为  $1$ ,当用户特性为  $II$  时,只须相应移动阀门转入特性线  $A'B'$  即可。

不同阀门之下  $P-Q$  曲线一般均由试验获得,但亦可经计算而得,列本章附录中。

#### 二、改变进口导叶位置调节方法(如图 18 所示)

当压缩机导叶按装角改变时,相应改变级速度三角形,亦即压缩

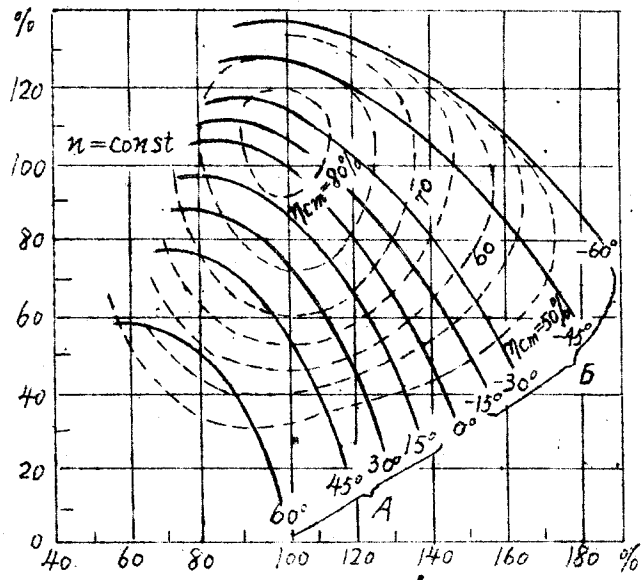
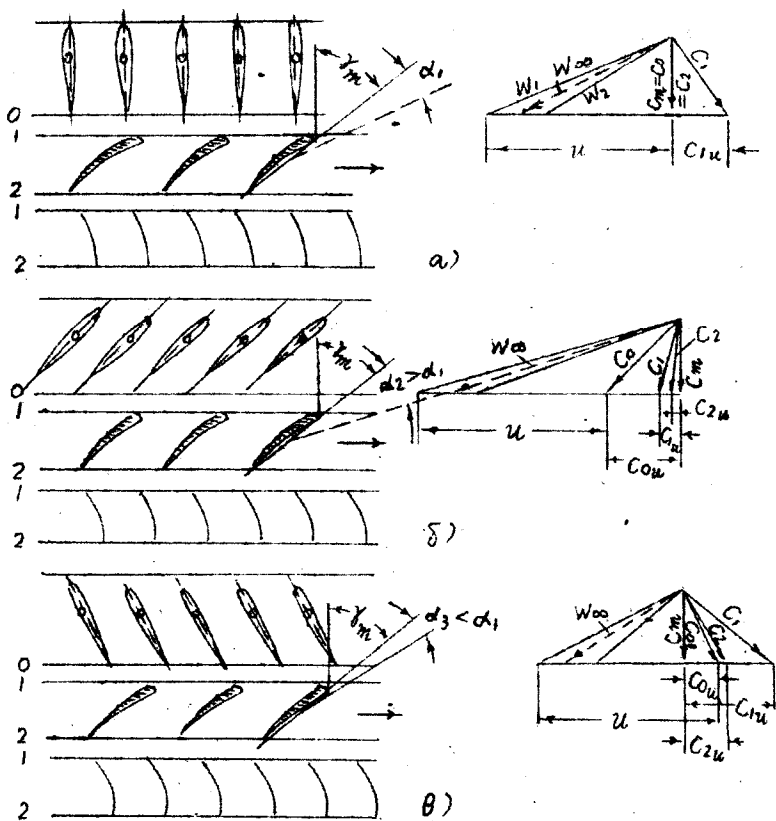


圖 18

机之特性曲线。压缩机之级压增  $\Delta p = C_r w_\infty \frac{L}{2t} \rho u$  ( $C_r$  举力系数,  $w_\infty$  平均相对速度,  $\frac{L}{t}$  相对稠度,  $\rho$  空气密度,  $u$  为圆周速度, ) 故  $\Delta p \propto C_r w_\infty \propto \alpha w_\infty$  ( $\alpha$  为攻角)。

当气流具逆旋绕射, 如  $\delta$ , 则攻角,  $w_\infty$  均增加, 特性为  $\delta$  所示, 反之如  $A$  所示。

离心式亦可在工作轮前进气导叶位置改变来进行调整。

三、改变离心式扩压器按装角之调节方法 (图 19)

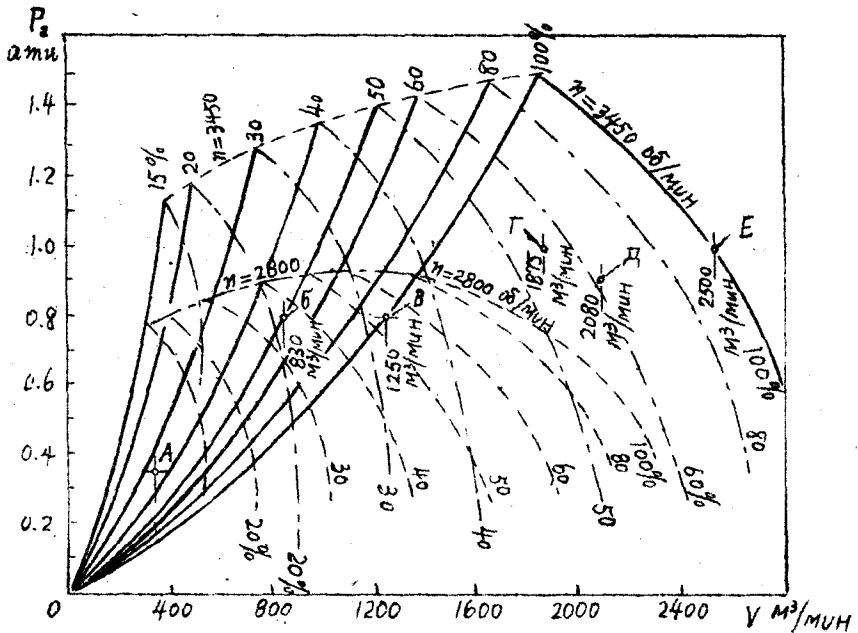


图 19

不同扩压器位置对应了不同扩压器损失, 因之压缩机特性线就不同, 改变扩压器位置就可以进行调整, 使工况沿工况线改变。

四、压缩机出口节流调节 (如图 20)

在出口处先经过一次节流, 该节流阀具一定  $\Delta p - Q$  关系, 只须适当选择节流阀阻力特性  $K_1$ , 使其与用户特性  $K_2$  合成阻力特性  $K$ ,  $K$  与压缩机特性交于点  $z$ , 而用户特性  $K_2$  在该流量之下其压力为



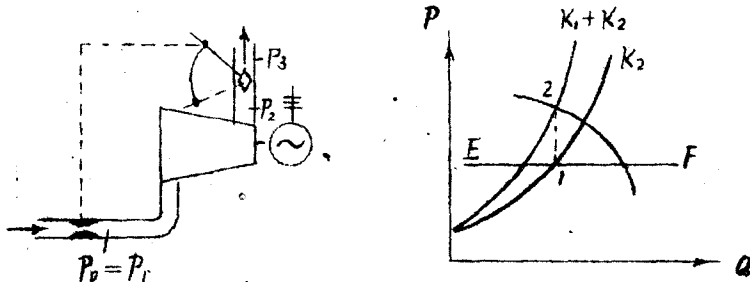


图 20

工况线  $EF$  上之压力。

上面扼要讨论了转速不变下几种常用调节方法。

### § 2-4 可变转速原动机时之调节方法

我们只讨论汽轮机（可变转速的）作为原动机情况，整个装置具有二个蓄积益，第一个蓄积益为转子迴转质量，其输入、输出特性为图 8 所示，第二个蓄积益为压缩空气管道，其输入特性为图 21 示，输出特性即为用户特性  $CD$ ，若要维持所需工况如  $P = \text{const}$ （图上未画），只须当  $CD$  移动时，适当改变汽轮机汽阀位置即可，此时转速亦相应改变了。

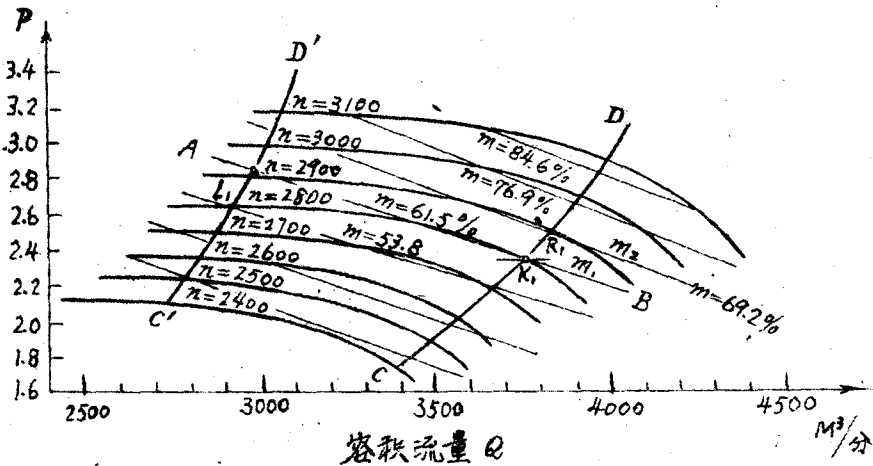


图 21