

TK73
0754

0421 9

中小型水轮机调速器的 使用与维护

郭 中 枹

水利电力出版社

内 容 提 要

本书系统地介绍了中小型水轮机机械液压式调速器和油压装置的工作原理、结构、特性、分解、组装、调整试验、故障处理及容量选择等，还介绍了调速器试验用的有关仪表仪器和非电量转换元件等。本书针对中、小型水电站在调速器的安装、调整和使用中所经常遇到的各种实际问题，加以总结，故实用性很强。本书语言通俗，图文并茂，便于阅读使用。

读者对象：中小型水电站运行、检修人员及有关专业院校师生。

中小型水轮机调速器的使用与维护

郭 中 枹

*

水利电力出版社出版

(北京三里河路6号)

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售

水利电力印刷厂印刷

*

787×1092毫米 16开本 14.75印张 329千字 2插页

1983年2月第一版 1984年8月北京第二次印刷

印数6331—15880册 定价 1.65元

书号15143·5053

前 言

我国水力资源极为丰富，为数众多的中、小型水电站，在工农业生产和人民生活中，发挥着越来越大的作用。为了提高水电站的自动化水平，确保电能质量和供电可靠性，近年来，许多中、小型水电站也都选用了自动调速器，取得了显著的技术经济效益。但是，如果缺少有关调速器的使用与维护方面的知识，即使自动化程度很高的调速器，在运行和使用中，也很难正常工作，甚至经常产生故障，给生产造成不应有的损失。为此，特编写本书，希望它能对广大中、小型水电站水轮机调速器的安装、运行和维修有所帮助。

本书共十章，第十章由黄秉铨同志编写。在全书编写过程中，得到了天津水电控制设备厂领导的关怀和支持。书中主要章节，曾两次作为厂办的调速器学习班教材。全书由常兆堂、赵坤耀两位工程师审阅。此外，刘惠英、袁洪滨、朱金梁、陈远萍、王文生、梁健成以及黄昭山等同志，对书稿的有关内容，也提出了宝贵的意见，在此一并表示衷心感谢。

由于水平和时间所限，书中存在的缺点错误，恳切希望广大读者予以批评指正。

编 者

1982年3月

目 录

前 言

第一章 概述	1
第一节 水轮机调节的基本任务	1
第二节 水轮机转速调整	1
第三节 调速器的组成	2
第四节 调速器的工作原理	3
第五节 调速器的分类	6
第二章 调速器各元件的工作原理及结构	7
第一节 飞摆与引导阀	7
第二节 暂态转差机构	13
第三节 主配压阀	31
第四节 接力器	35
第五节 永态转差机构	40
第六节 转速调整机构	44
第七节 开度限制机构	45
第八节 起动开度及起动方式	47
第九节 双调节调速器	50
第十节 冲击式水轮机调速器	54
第三章 装配与调整	58
第一节 飞摆与引导阀	58
第二节 缓冲器	60
第三节 主配压阀	64
第四节 接力器	64
第五节 整机开环调整	65
第六节 安装、分解和组装	66
第四章 调速器主要特性的测试方法	69
第一节 飞摆静态特性的测定及逸速试验	69
第二节 调节系统静态特性的测定	72
第三节 调速系统和水轮机调节系统静态特性的有关参数测定	77
第四节 缓冲器特性的测试	79
第五节 接力器关闭时间 T_c 的初步调整	83
第六节 空载试验	84
第七节 带负荷试验	86
第八节 甩负荷试验	88

第九节 暂态转差系数的测定	92
第十节 速动时间常数的测定	94
第十一节 接力器反应时间的测定	95
第十二节 变速机构工作范围的测定	96
第五章 调节系统常见故障及其处理方法	98
第六章 调速器工作容量及其参数的选择	104
第一节 概述	104
第二节 调速器的系列型谱和产品概况	104
第三节 调速器容量的选择	105
第四节 调速器的参数及其对调节系统静态和动态品质的影响	108
第五节 调节对象的有关参数及其对调节品质的影响	111
第六节 调速器参数的估算法	113
第七节 选型计算实例	113
第七章 调速器的并联运行和电力系统的频率调整	117
第一节 电力系统中机组的负荷分配原理	117
第二节 电力系统的频率特性及其负荷组成	119
第三节 电力系统频率的调整	121
第四节 自动频率调整装置简介	124
第八章 油压装置	126
第一节 概述	126
第二节 油压装置的构成及其组合方式	129
第三节 油泵	130
第四节 油压装置容量的选择计算	134
第五节 国产油压装置简介	143
第六节 压力罐	146
第七节 回油箱	147
第八节 旁通阀	147
第九节 补气装置	148
第十节 压力罐的油位指示器及保安装置	152
第十一节 常见故障及其排除方法	156
第十二节 调整与试验	158
第九章 机械式调速器的电气回路	164
第一节 概述	164
第二节 飞摆的信号源	164
第三节 飞摆电动机	166
第四节 操作电源	167
第五节 油泵电动机的控制方式	167
第六节 压力罐自动补气的控制回路	171
第七节 事故停机电磁阀	172
第八节 开度限制及变速机构的电动机	174

第九节 缓冲器切除装置	176
第十章 调速器试验的电测法	178
第一节 关于误差的一般概念	178
第二节 记录仪器及被测量变换装置	180
第三节 调速系统转速死区的电测法	196
附 录	198
I、TT-75型调速器动作原理(附图1)	198
II、TT- ¹⁵⁰ / ₃₀₀ 型调速器动作原理(附图2)	202
III、YT- ³⁰⁰ / ₆₀₀ 型调速器动作原理(附图3)	208
IV、CT-40型调速器动作原理(附图4)	214
V、DT-1800型电液调速器动作原理(附图5、附图6)	220
VI、HYZ型油压装置工作原理(附图7)	221
主要参考文献	225

第一章 概 述

第一节 水轮机调节的基本任务

水轮发电机组不论在单机运行还是在并网运行时，对其调节系统——控制装置都是有明确地、严格地和多方面地要求的。

第一、电能质量的主要指标是频率和电压。如果电能的频率变动过大，对许多工业生产过程，像织布、纺纱、造纸、广播和日常用电（收音机、电视机、电钟和照明）等，都会造成严重的不良影响。

对机组本身来讲，如果转速变化太大，有可能出现振动现象。严重时威胁机组和电站本身的安全。另外，机组转速变化过大，还会导致电压的波动。当这种波动超过一定界限时，也会发生严重的事故。因此，调速器首先要满足转速（频率）的控制要求，即严格地将机组的频率控制在某一范围之内。

大型电网的频率波动值不得超过 $\pm 0.4\%$ （ $\pm 0.2\text{Hz}$ ），中、小型电网的频率波动值不得超过 $\pm 1\%$ （ $\pm 0.5\text{Hz}$ ）。单机供电时，频率的波动范围还可以适当地放宽^①。

第二、迅速地起动机组，准确而又平稳地并网发电，连续不断地将电能送到用户，出现异常现象时自动而又可靠地在规定的时间内紧急停机。

第三、随着电网容量的增加和自动控制技术的发展，近年来出现了流量控制、计划运行、高效率运行等许多新的控制方式。这些要求都是通过调速器本体上增加某些辅助装置来实现的。这样，调速器又在充分地利用水力资源、保证运行的最佳经济性方面发挥了新的作用。

第二节 水轮机转速调整

水轮机的转速只有在发电机的负荷与水轮机的出力处于平衡状态时，才能保持恒定。实际上，不论是并入电网中运行的，还是单机运行的水轮发电机组的负荷，时时刻刻都处于变化之中。因而，机组的转速即频率也会随之而变化。这一变化规律可以分述如下：

对于并入电网中运行的水轮发电机组的运动形式，可以用下列关系式来表达^{〔1〕}：

$$\frac{m}{f} \cdot \frac{d\omega}{dt} = M_i - M_e \quad (1-1)$$

式中 m ——电网的惯性常数；

$\frac{d\omega}{dt}$ ——机组的角加速度；

① 根据水电部一九六二年五月颁布的动力系统调度管理规程。

$\omega = \frac{\pi n}{30}$ ——机组的角速度（ n 为机组的转速）；

f ——电网的频率；

M_t ——水轮机的动力矩；

M_g ——发电机的阻力矩。

对于单机运行的机组来讲，可用下式表达：

$$I \frac{d\omega}{dt} = M_t - M_g \quad (1-2)$$

式中 I ——水轮发电机组的惯性矩。

从以上两式可明显地看出：公式右面的水轮机的动力矩 M_t 和发电机的阻力矩 M_g 之间出现不平衡时，转速（频率）就会发生变化。为了保持机组的转速（频率）不变，则必须设法控制水轮机的动力矩，使之经常地与发电机的阻力矩保持平衡，机组才能处于稳定工况下运行。怎样才能达到这一目的呢？

水轮机的动力矩可由下式表达：

$$M_t = \frac{\gamma Q H \eta}{\omega} \quad (1-3)$$

式中 γ ——水的容重；

Q ——流量；

H ——水头；

η ——效率；

ω ——机组的角速度。

分析上面各量后，可以看出： γ 是常数； ω 是使之不变的被调节量，可以变化的只有 η 、 H 和 Q 。显然，从技术和经济两方面考虑，改变 η 和 H 都是不现实的，只能通过改变 Q 来达到改变动力矩 M_t 的目的。

调速器就是这样一种装置，它能把感受到的水轮机转速偏差，按一定的规律，相应地转换为接力器的位移，从而相应地改变进入水轮机中的流量，调整其出力，使其转速保持在某一规定范围内。

第三节 调速器的组成

水轮机调节与其他动力机械（汽轮机、内燃机等）调节的最大差异在于其引水系统中，存在着严重地恶化调节过程的水击现象，迫使水轮机调速器必须采用双重反馈机构（软反馈和硬反馈），以获得稳定的调节过程。同时，要获得同样的功率，进入水轮机中的流量，远比进入其它动力机械的蒸汽量、燃油量大的多（单位体积的水所含能量相对讲很低），所以，操作导水机构所需之功甚大。因此，水轮机调速器不仅系统复杂，而且执行机构及整个装置非常庞大。

水轮机调速器主要由下列各元件组成（图1-1、图1-2、图1-3）：

（1）检测水轮机转速的飞摆及其驱动装置。

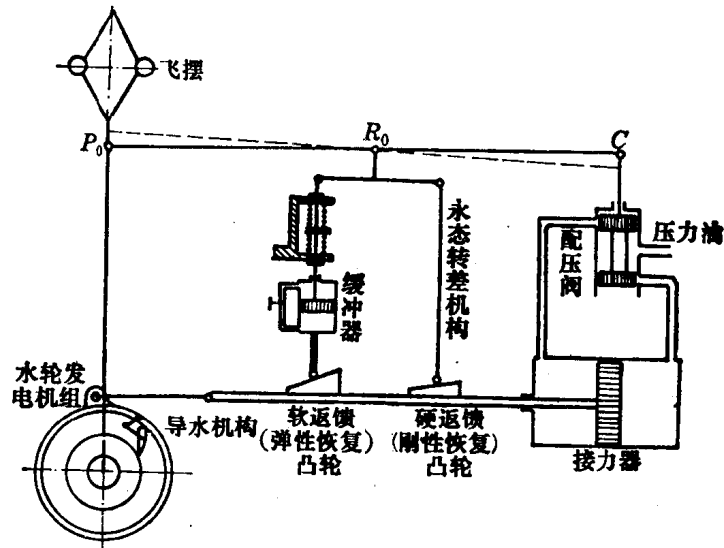


图 1-1 调速器的系统简图

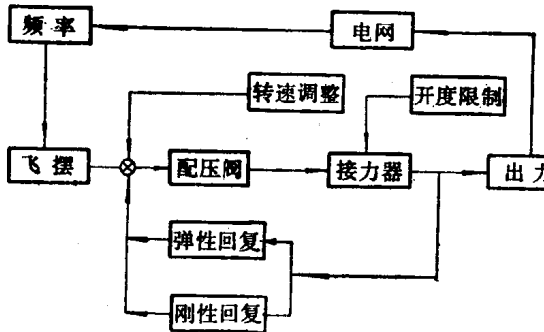


图 1-2 调速器并入系统运行时的方框图

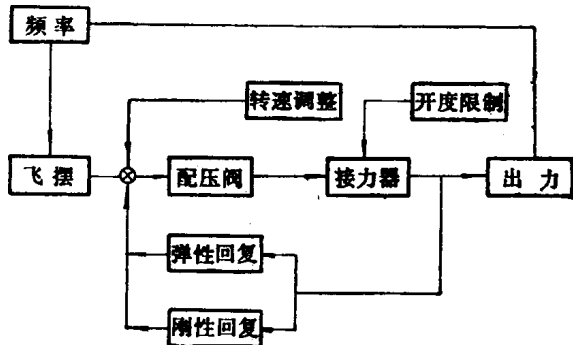


图 1-3 调速器单机运行时的方框图

- (2) 根据飞摆的命令去控制接力器的配压阀。
- (3) 控制导水机构 (或喷针) 的接力器。
- (4) 根据接力器的动作使配压阀回复中间位置, 进而能够获得稳定运行的弹性回复机构——缓冲器。
- (5) 根据接力器的位置, 产生刚性回复, 从而能够确保机组并列运行所需要的调速机构。
- (6) 单机运行时控制机组转速, 并网后控制机组出力的转速调整机构。
- (7) 开度限制机构。
- (8) 生产、储备并能经常稳定地提供能源的油压装置等。

第四节 调速器的工作原理

下面用图解的方式, 分别对仅有硬反馈和软反馈的调速器动作原理, 分步加以说明。

一、具有硬反馈的有差调节调速器动作原理

图1-4为分步动作示意图, 说明如下:

(1) 图1-4(a)：机组处于额定转速下稳定运行，接力器和配压阀均处于中间位置，杠杆 $P_0R_0C_0$ 保持水平。假定此时负荷减少，转速上升，则调速器将由稳态而进入动作过程。

(2) 图1-4(b)：由于转速上升，飞摆由 P_0 点上升到 P_1 点，杠杆以 R_0 为支点，顺时针旋转，配压阀由 C_0 点下降到 C_1 点。配压阀活塞下圆盘处窗口开启——打开了压力油进入接力器右腔的油路；配压阀活塞上圆盘处窗口同时开启——为接力器左腔的油提供了排油通路。于是接力器活塞开始向左侧关闭。

(3) 图1-4(c)：当接力器向左侧关闭的同时，通过硬反馈机构——斜块和支杆等，以杠杆左端 P_1 为支点，使 R_0 往上移动，直到配压阀回到原来的中间位置 C_0 时，接力器活塞向关闭侧的运动才能终止，并进入一新的平衡状态。此时，飞摆的转速比原来的额定转速要高。也就是说，随着接力器的关闭，机组的转速要逐渐升高，这就形成了有差调节。

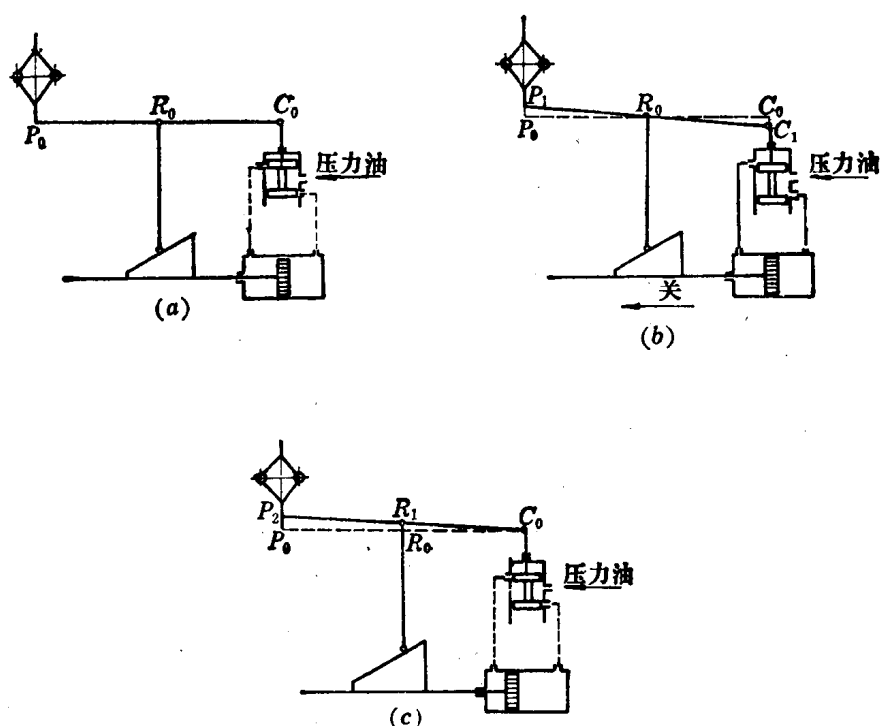


图 1-4 具有硬反馈的调速器原理简图

为了获得稳定的调节过程而示于图 1-4 中的硬反馈机构，与为了负荷分配而加设的硬反馈的差异在于，前者转速差值比后者大的多。

实际上，最古老的小型水轮机上使用的调速器，就属于此种类型。

随着机组容量的增加，电网的出现，这种简单的调速器已满足不了生产的需要，于是人们又发明了具有软反馈的调速器。

二、具有软反馈（缓冲器）的无差调节调速器动作原理

为了叙述方便，下面利用仅有一个振荡周期的无差调节过程为例说明之。图 1-5 为其分步动作示意图。

(1) 图 1-5(a)：机组处于额定转速下运行。

(2) 图 1-5(b)：假定机组负荷减少，转速上升，飞摆引导阀由 P_0 上升到 P_b ，再以 R_0 为支点，使配压阀由 C_0 点下降到 C_b 点，接力器开始向关闭侧移动，通过软反馈（缓冲器）的作用，使支点 R_0 上升到 R_b 点，于是杠杆 $P_0 R_0 C_0 \rightarrow P_b R_b C_b$ 。接力器继续向关闭侧移动。

(3) 图 1-5(c)：随着接力器的继续关闭，转速在继续下降，飞摆引导阀由 P_b 下降到 P_c ，反馈支点 R_b 随着接力器向关闭侧移动而继续上升到 R_c 点；配压阀回到中间位置，即 $C_b \rightarrow C_0$ 。于是，接力器停止关闭，即其速度暂时为零。

(4) 图 1-5(d)：由于接力器暂时停止关闭，由于缓冲器的回复作用，支点 R_c 略有下降，而机组的转速下降较多，即线段 $\overline{P_c P_d}$ 大于线段 $\overline{R_c R_d}$ ($\overline{P_c P_d} > \overline{R_c R_d}$)，所以杠杆以 R_d 为支点逆时针转动。配压阀活塞略有上升，即由中间位置变为开启工况 ($C_0 \rightarrow C_d$)。接力器由停止转而向开启侧移动。阻止机组转速过快地下降，以较慢的速度趋于额定转速。

(5) 图 1-5(e)：额定转速下的稳定运行工况再次出现。除接力器的位置与图 1-5(a) 不同外，其它各点 (P 、 R 、 C) 则完全相同。于是，一种理想的无差的稳定调节

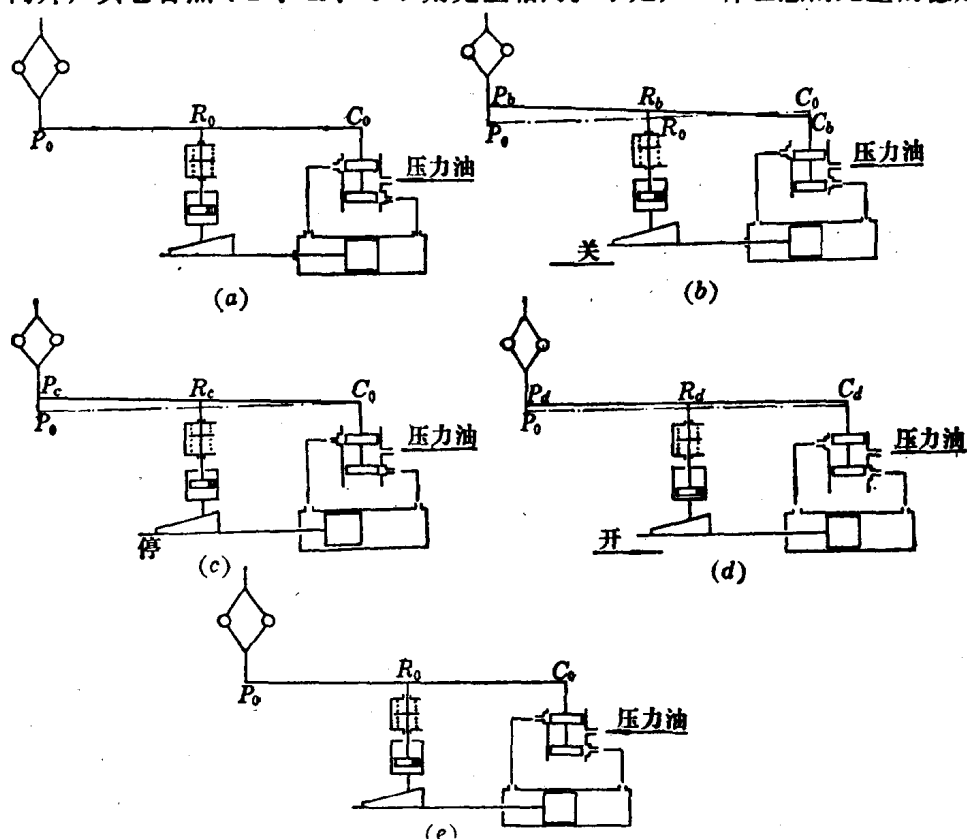


图 1-5 具有软反馈的调速器原理简图

过程就获得了。

实际上使用的调速器，都具有两重返馈——硬返馈和软返馈。前者主要是为了机组并网运行时，进行负荷分配而加设的，后者是为了获得无差稳定运行而设置的。

第五节 调速器的分类

调速器基本上可分为机械式和电气式两大类。本书仅讨论机械式调速器。

机械式调速器采用飞摆作为测频元件，利用飞摆离心力的变化，来检测机组转速的偏差值。按其传动方式和结构特征，分类如下：

一、按驱动方式分类

- (1) 皮带轮式：多用于小型卧式机组，如TT-75型调速器。
- (2) 主轴直联式：国内未采用。
- (3) 齿轮传动式：国内未采用。
- (4) 电动机传动式：国内多采用之，如YT型和T型调速器等。

二、按测速机构分类

- (1) 单臂重锤式：TT-75及S-38型调速器都属此类。
- (2) 菱形钢带式：国内多采用之，如YT型系列调速器。
- (3) 板簧式：国内未采用。

三、无飞摆式调速器

正常运行时，没有转速测量机构——飞摆，只有当转速升高到某一数值时，调速器才动作，去关闭水轮机的导水机构。国外不少机组甚至在比较大型的机组上，都采用了这种方式。运行经验证明：在大电网中，这种方式是可靠的，而且比较经济，容易管理。

四、按主接力器的位置分类

- (1) 合成式（一体式）：控制柜、主接力器和油压装置合为一体时，被称为合成式调速器，多为中、小型调速器所采用，如CT-40型、YT型、TT型调速器。
- (2) 分离式：控制柜与主接力器分开布置，大型机组上多采用之。如T-100型调速器。

五、按调节机构的数量分类

- (1) 单调节调速器：只控制一个调节机构——导叶接力器。它用于定桨轴流式或混流式水轮机的控制，如TT-75型、CT-40型和T-100型调速器。
- (2) 双调节调速器：需要同时控制两个调节机构——导叶接力器和桨叶接力器（或喷针接力器和折向器接力器）。它用于转桨式、斜流式和冲击式水轮机的控制。如ST-100型调速器。

第二章 调速器各元件的工作原理及结构

第一节 飞摆与引导阀

一、工作原理

飞摆又称为测速机构或测频环节，是调速器中一重要组成元件。飞摆的结构及型式很多，但工作原理大体上是一样的。在此，仅以示于图2-1、图2-2的菱形飞摆为例，对其工作原理及结构加以说明。

如图2-2所示，飞摆由飞摆电动机1驱动。飞摆电动机的电源来自永磁机或发电机，借以测量机组的转速变化。飞摆旋转时，当重块9的离心力与飞摆弹簧15的支撑力相等时，则处于平衡状态。由于弹簧的变形与外力是成正比例的，当机组转速增加或降低时，重块上的离心力将随之加大或减小。通过钢带使飞摆弹簧的压缩状态发生变化——缩短或伸长，进而使引导阀处于较高或较低的位置上。这样，只要能把重块、飞摆弹簧和引导阀等零件正确而又合理地组合起来，即可获得引导阀转动套21的位移与转速成正比例的运动规律。

飞摆钢带由两层组成，二者长度相等。实际工作的只是外面一层，内层作为备用。飞摆重块应视为由以下几种零件共同组成的一个集合体：弧形重块8、重块9、止动垫圈10、螺母11和限位螺杆12。钢带两侧对称地装有重块，下面有下支持块18和转动套21等零件。钢带上端通过螺钉，固定在上支持块7上。上支持块7和飞摆电动机1通过开尾圆锥销6联结在一起。图2-1中，针塞9由叉头15来控制不使其旋转。此叉头与主传递杠杆中的一个杠杆相连接。

如图2-3所示，转动套上有三排孔口。最上排孔口与压力油相通，中间一排与辅助接力器4的上腔相通，最下一排孔口通向排油侧。转速稳定时，上、下两排孔口被针塞3封闭（遮程或搭叠量为 Δ ），三排孔口彼此隔绝，如图2-3（a）所示。

当转速增加时（ $n_0 + \Delta n$ ），转动套2升高 y_a ，下孔口开启少许，如图2-3（b）所示。此时，辅助接力器的上腔与排油相通，油压随即降低，于是辅助接力器的活塞4和主配压阀的活塞6一起上升，在杠杆5的作用下，使针塞3随之抬起，如图2-3（c）所示。显然，只有当针塞3上升的高度正好等于转动套2的上升高度 y_a 时，转动套的下排油孔口才能被封住，辅助接力器上腔排油终止，活塞4和6才能停止上升。此时，它们上升的高度与杠杆5的比值即支点的位置有关：

$$\frac{y_a}{y_b} = \frac{a}{a+b} = \alpha \quad (2-1)$$

式中， $\alpha = \frac{a}{a+b}$ ——局部反馈系数。它表征着转速发生变化后，辅助接力器活塞停止运

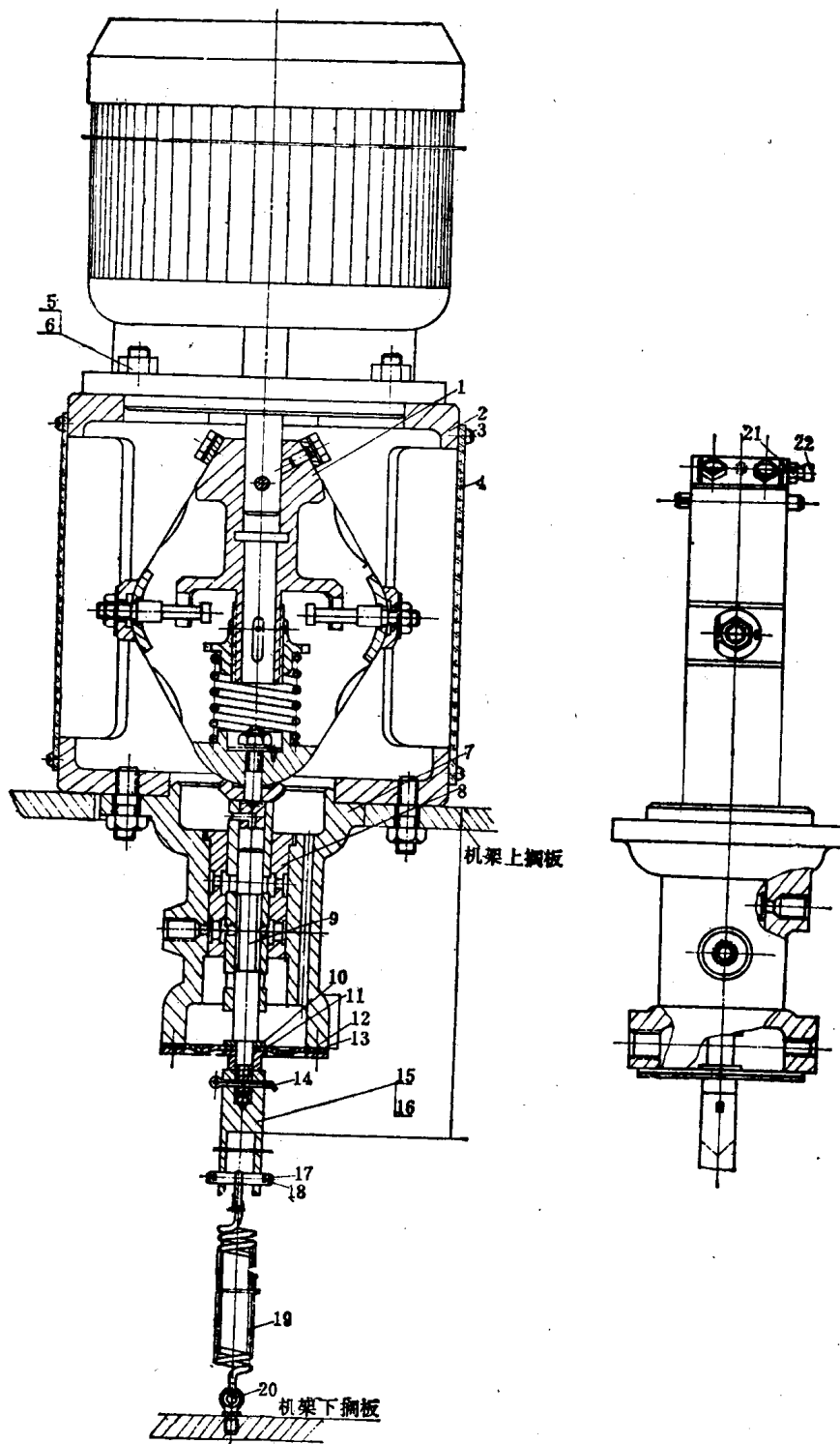


图 2-1 飞摆与引导阀

1—飞摆装配；2—壳体；3—螺钉；4—外罩；5、21—螺母；6—螺栓；7—壳体；8—固定套；9—针塞；10、13—垫片；11—橡皮膜；12—压板；14—半圆头螺钉；15—叉头；16、18—开口销；17—圆柱销；19—拉紧弹簧；20—吊环螺钉；22—紧定螺钉

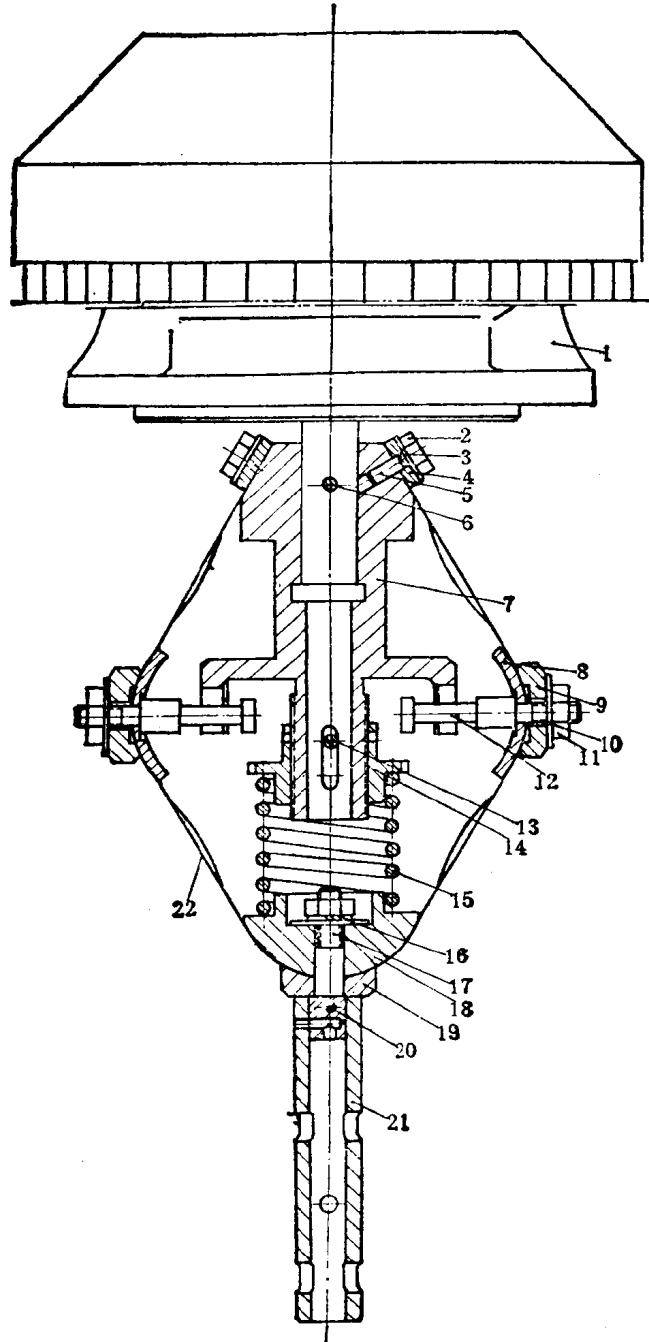


图 2-2 飞摆装配

1—电动机；2—螺钉；3—锁紧压片；4—压板；5、20—圆柱销；6、13—开尾圆锥销；7—上支持块；8—弧形重块；9—重块；10—止动垫圈；11—螺母；12—限位螺杆；14—调节螺母；15—飞摆弹簧；16—弹簧垫圈；17—销子；18—下支持块；19—压板；21—转动套；22—钢带

动时，转动套1的位移 y_a 与辅助接力器活塞4的位移 y_b 之比，习惯上用分数形式表示。分子代表飞摆转动套移动的距离（通常令其为1），分母则代表辅助接力器活塞4和主配压阀活塞6相应移动的距离。

公式(2-1)也可改写成:

$$y_b = \frac{1}{\alpha} y_a = K y_a \quad (2-2)$$

式中 $K = \frac{1}{\alpha} = \frac{a+b}{a}$ ——放大系数。

当转速下降时($n_0 - \Delta n$), 如图2-3(d)所示。此时, 转动套1随之下降, 上部孔口开启少许, 压力油与辅助接力器上腔相通, 在油压的作用下, 使活塞4、6也随之下降, 借助杠杆5的回复作用, 针塞3也随之而下降, 直至把转动套上部的开启孔口再次封住为止, 活塞4、6才能停止下降, 如图2-3(e)所示。其下降的距离 y_b , 仍可用公式(2-2)计算。

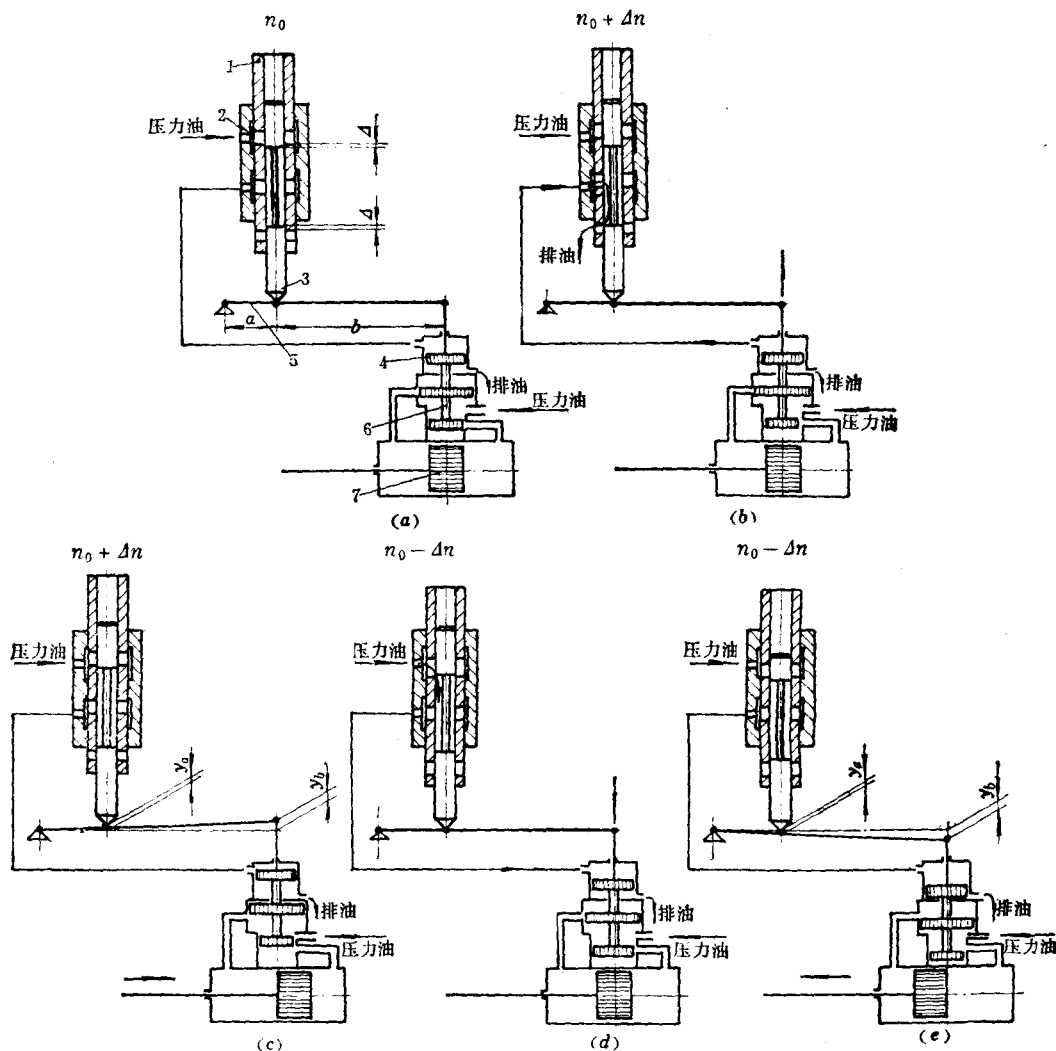


图 2-3 引导阀——辅助接力器(接力器)工作原理

1—转动套; 2—固定套; 3—针塞; 4—辅助接力器活塞; 5—反馈杠杆; 6—主配压阀活塞; 7—主接力器活塞

对具有一级液压放大的调速器，像TT-75型、TT-150型和TT-300型等调速器，其引导阀就是配压阀，辅助接力器就是接力器，其方框图如图1-3所示。

对具有二级液压放大的调速器，像YT型、CT-40型和T-100型等调速器，引导阀又叫一次配压阀，主配压阀又叫二次配压阀，其方框图如图2-4所示。

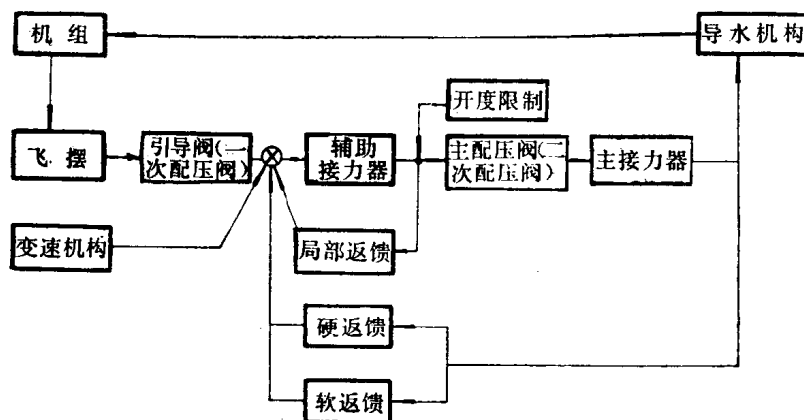


图 2-4 具有二级液压放大的调速器的方框图

应当指出的是：

第一，这种菱形飞摆与引导阀合在一起，不仅结构简单、紧凑，工艺性好，而且由于没有销类、轴承等连接，因此工作时，间隙、死行程和摩擦力等很小，所以性能良好。

第二，这种菱形飞摆具有双层钢带，一为工作钢带（强度计算时，仅按一层考虑），另一为备用，故安全可靠。

二、静态特性

所谓飞摆静态特性，系指稳态工况时，飞摆的转速与引导阀行程之间的关系。现以YT型调速器为例，具体说明如下：

1. 飞摆的放大系数 K_F 和单位不均衡度 δ_F

放大系数 K_F 的表达式为：

$$K_F = \frac{y_{max} - y_{min}}{\frac{n_{max} - n_{min}}{n_0} \times 100\%} \quad (2-3)$$

式中 n_{max} ——飞摆工作范围内的最高转速；

n_{min} ——飞摆工作范围内的最低转速；

n_0 ——飞摆的额定转速；

y_{max} ——飞摆工作范围内引导阀的最高工作位置；

y_{min} ——飞摆工作范围内引导阀的最低工作位置。

对YT型而言，以上各数值如图2-5所示。现将具体数值代入公式（2-3）中，则

$$K_F = \frac{7.5 - (-7.5)}{125\% - 75\%} = 0.3 \text{ 毫米/\%}$$