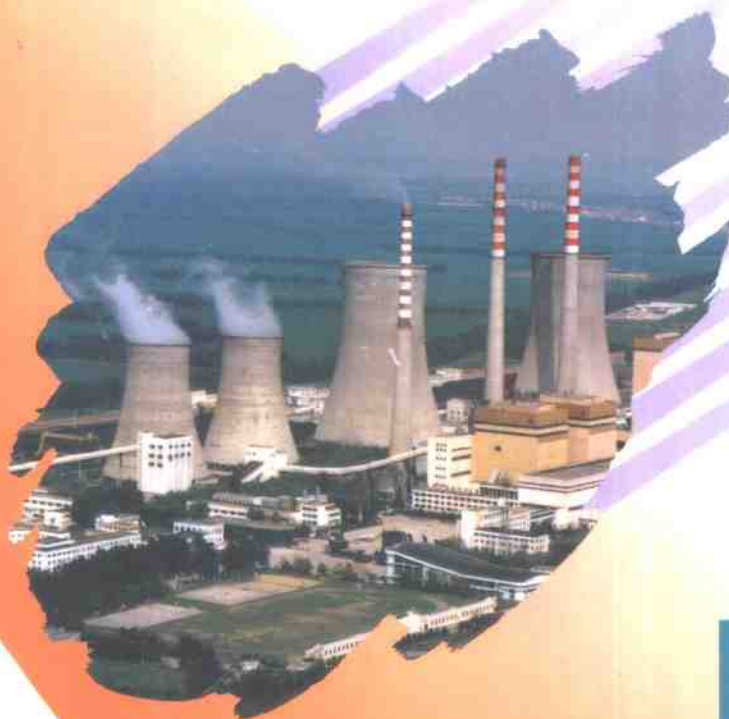


大型火电厂生产技术人员培训系列教材

汽轮机控制监视和保护

谷俊杰 丁常富 编著



中国电力出版社
www.cepp.com.cn



大型火电厂生产技术人员培训系列教材

汽轮机控制 监视和保护

谷俊杰 丁常富

中国电力出版社
www.cepp.com.cn



内 容 提 要

本书为大型火电厂生产技术人员培训系列教材之一,全面、系统地介绍了现代大型汽轮机数字电液控制的原理和汽轮机监测保护的原理。全书共分6章,前3章讲述汽轮机控制的原理、汽轮机数字电液控制的组成和功能及汽轮机数字电液控制的逻辑分析,后3章讲述了汽轮机监测仪表系统的组成、传感器技术及汽轮机轴系各参数的监测方法。

本书可作为火力发电过程控制的工程技术人员的培训教材,也可作为高等学校自动化和热能工程专业的专业教材。

图书在版编目(CIP)数据

汽轮机控制、监视和保护/谷俊杰,丁常富编. —北京:中国电力出版社,2002

大型火电厂生产技术人员培训系列教材

ISBN 7-5083-1169-8

I. 汽… II. ①谷…②丁… III. 火电厂-蒸汽透平-技术培训-教材 IV. TM621.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2002)第 053052 号

中国电力出版社出版、发行

(北京三里河路6号 100044 http://www.cepp.com.cn)

北京密云红光印刷厂印刷

各地新华书店经售

*

2002年10月第一版 2002年10月北京第一次印刷

787毫米×1092毫米 16开本 11印张 249千字

印数 0001—5000册 定价 21.00元

版 权 专 有 翻 印 必 究

(本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换)

随着科学技术的迅速发展,新技术、新材料、新工艺不断涌现并得到应用。电力生产是技术高度密集型产业,伴随科学技术及电力工业的发展,现代化电力生产也朝着“大容量、高参数、高自动化”的方向快速发展。快速发展的电力技术对电力生产技术人员和管理人员提出了更高的要求,迅速提高生产技术人员素质及观念,更新知识,已经成为当前电力生产的重要任务。

在职教育是提高劳动者素质的重要途径,高等学校发挥自身的人才优势,开展在职教育是现代高等教育发展的一大趋势。华北电力大学动力工程系统经过十多年的努力与探索,在开展在职教育,为电力生产企业培训高层次技术人才方面,取得了一定成绩,积累了丰富的实践经验。为满足电力生产企业培训及电力生产技术人员学习新技术、新知识的需要,华北电力大学动力工程系组织具有十多年培训经验的教师,编写了这套《大型火电厂生产技术人员培训系列教材》。本套教材首批共8种:《火电厂锅炉设备及运行》、《火电厂汽机设备及运行》、《火电厂电气设备及运行》、《火电厂过程控制》、《火电厂开关量控制技术及应用》、《汽轮机控制、监视和保护》、《计算机控制系统及其在电厂中的应用》、《火电厂自动控制理论基础》。

本套培训教材的特点:

- 一、力求反映当前电力生产的新知识、新技术。
- 二、力求理论结合实际,明确理论在生产过程、生产设备及系统中的作用。
- 三、注重解决生产过程中的实际问题。

本套教材可供电力生产企业培训生产技术人员使用,也可供其他相关工程技术人员学习、参考。

这套教材的出版是编著者多年教学培训实践的积累结果,但不可避免地会存在一些问题和不足,热切地希望广大读者给予批评指正。

《大型火电厂生产技术人员培训系列教材》编委会

2000年7月

前 言

现代火力发电机组的控制技术以计算机系统为核心，采用了许多新的技术和方法，大大的提高了火力发电机组的运行和安全水平，汽轮机控制、监测和保护系统是保证汽轮机安全运行的重要组成部分。

本书共分6章，全面、系统地介绍了现代大型汽轮机数字电液控制的原理和汽轮机监测保护的原理。第1~3章由谷俊杰编写，讲述了汽轮机控制的原理、汽轮机数字电液控制的组成和功能、汽轮机数字电液控制的逻辑分析及EH系统和超速保护；第4~6章由丁常富编写，讲述了汽轮机监测仪表系统的组成、汽轮机监测常用传感器技术及汽轮机轴系各参数的监测方法。

本书由华能上安电厂郅彦明高级工程师审阅，并提出了详细的修改意见。此外韩爽讲师参与了第4~6章的部分工作，在此对她们的辛勤劳动致以衷心感谢。

由于作者水平有限，书中的错误和缺点在所难免，恳请读者批评指正。

编者

2002年6月

序 言 前 言

第一章 汽轮机功率——频率电液控制的基本原理	1
第一节 中间再热式汽轮机的控制特点	1
第二节 功频电液控制的原理及各环节的数学模型	2
第三节 功频电液控制系统分析	19
第二章 汽轮机数字电液控制 (DEH) 的组成及功能	24
第一节 DEH 的组成	24
第二节 DEH 系统的功能	27
第三节 DEH 自动控制系统分析	30
第四节 DEH 系统的操作	32
第三章 DEH 的控制逻辑分析	36
第一节 汽轮机转速控制	36
第二节 汽轮机负荷控制	45
第三节 阀门管理逻辑分析	53
第四节 汽轮机自启动 (ATC)	58
第五节 EH 抗燃油及 DEH 执行机构	78
第六节 DEH 的超速保护和危急遮断系统	91
第四章 汽轮机监测仪表系统综述	104
第一节 概述	104
第二节 3300 系统的组成和功能	105
第三节 3500 监测系统综述	109
第五章 传感器系统	114
第一节 概述	114
第二节 电涡流传感器系统	114
第三节 速度传感器系统	122
第四节 加速度传感器系统	126

第五节	复合式探头传感器系统.....	127
第六节	鉴相器.....	128
第七节	线性变量差动互感器.....	130
第六章	汽轮机轴系各参数监测.....	132
第一节	汽轮机轴向位移监视.....	132
第二节	汽轮机热膨胀监视.....	141
第三节	汽轮机转速、零转速监视.....	147
第四节	汽轮机偏心监视.....	155
第五节	汽轮机振动监视.....	161
参考文献.....		170

汽轮机功率——频率电源 控制的基本原理

随着高参数、大容量、中间再热机组的广泛使用，要求进一步提高中间再热机组的功率动态响应性能、抗蒸汽参数扰动的能力及自动化水平，以满足电网调频、集中控制和综合自动化的需要。在此情况下，人们研制出了数字式汽轮机功率——频率控制系统。

汽轮机控制系统是控制汽轮发电机组启动、升速和发电运行的重要装置。没有它将无法保证在发电运行时的安全经济运行。

第一节 中间再热式汽轮机的控制特点

中间再热式汽轮机的原则性系统图如图 1-1 所示。锅炉过热器来的新蒸汽经高压主汽门和高压调节汽门进入高压缸做功，自高压缸排出的蒸汽又引回到锅炉的再热器，经过再热器加热后的蒸汽温度一般又达到与新汽温度相同的温度，然后经中压主汽门和中调节汽门进入中低压缸做功，最后排入凝汽器，由于采用了中间再热，汽轮机被中间再热器分成高压部分和中、低压部分。这就对汽轮机的动态特性有了显著的影响。

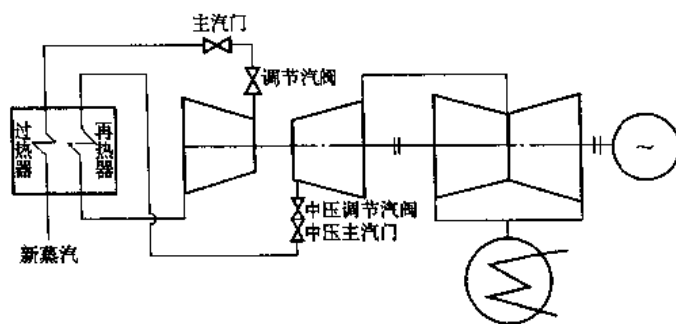


图 1-1 再热式汽轮机原则性系统图

一、中间再热容积的影响

再热式机组的特点之一是，再热器和再热器与汽轮机之间的连接管道一起形成的庞大蒸汽容积（简称再热器蒸汽容积），其时间常数 T_H 一般为 $8 \sim 12$ s，加之再热汽轮机的转子时间常数 T_R 一般只有 $7 \sim 8$ s，因此，甩负荷时，即使高压缸调节汽门能同时完全关闭，中间再热容积中所储存的蒸汽量，也能使汽轮机超速 $40\% \sim 50\%$ ，这是不允许的。为此，中间再热机组设置了高压缸和中低压缸的调节汽门，以便在机组甩负荷时，两种调节汽门

同时关闭,以确保机组的安全。为了减少机组在运行时的节流损失,汽门的调节规律应按照图 1-2 来设计。在负荷高于额定负荷的 33.3%时,中低压缸调节汽门处于全开状态,机组的负荷仅由高压缸调节汽门来控制;在低于额定负荷的 33.3%时,机组的负荷才由高中低压缸调节汽门同时控制。

再热机组的第二个特点是,由于中间再热容积的存在,导致机组总功率的“滞后”。从图 1-3 中看出,当外界要求增加机组的负荷时,调节系统将把高压缸调节汽门开大,此时,流量增加,高压缸的功率随着增加;而中低压缸的功率,则是随着再热器内蒸汽压力的逐渐升高而增大。同时,由于中间再热蒸汽压力气的升高,高压缸前后的压差将逐渐减小,其功率略有下降。因此,汽轮机的总功率,不是立即增加至电网所要求的数值,而是缓慢地增加,这情况随着中低压缸功率占整机功率比重的增大而变得更加显著。由于机组总功率的“滞后”,限制了机组参加一次调频任务,所以,在调节系统中,必须解决功率“滞后”的问题。

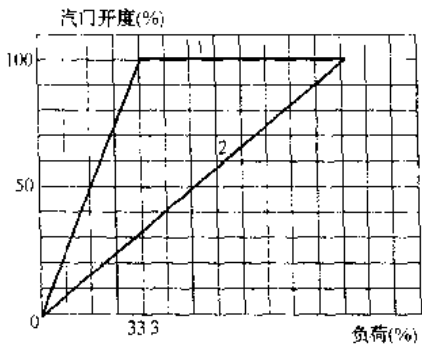


图 1-2 再热机组高中低压缸
调节汽门的调节规律
1—中低压缸调节汽门的开度;
2—高压缸调节汽门的开度

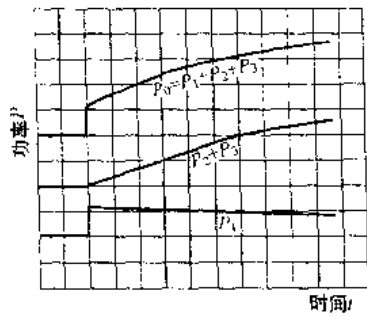


图 1-3 在没有动态校正时,中间
再热机组功率的变化
 P_1 —高压缸的功率; P_2 —中压缸的功率;
 P_3 —低压缸的功率; P_0 —机组的总功率

二、汽轮机和锅炉的协调配合

大容量再热机组一般均采用锅炉——汽轮机单元制运行,因而提高机组的负荷适应性,就不仅是汽轮机,还涉及到锅炉问题。我们知道,电力系统的负荷变化是一个随机过程,对于一般的负荷变化,若变化速度较快,要通过改变锅炉燃烧率来调节机组功率是远远来不及的,只能利用锅炉的一些蓄能来应付。因此,提高单元机组的负荷适应性,主要取决于对锅炉蓄热利用的程度。这样锅炉和汽轮机的运行和控制方式就直接关系到对蓄热的利用。同时,从提高电力系统运行可靠性的要求来看,机组本身运行的可靠性就是一个严重的问题。所以,在进行一台机组的控制系统设计时,应从整体来进行考虑,这是一个工程设计优劣与成败的关键。

第二节 功频电液控制的原理及各环节的数学模型

一、工作原理

图 1-4 是功频电液控制系统的基本工作原理图。系统中测功、测频、控制器 PID、功

放、给定等称为电控部分，油动机为液压控制部分。电液转换器是将电信号转换成液压控制信号的装置，它是电控部分与液压控制部分的联络部件，即接口装置。下面简述其工作原理。

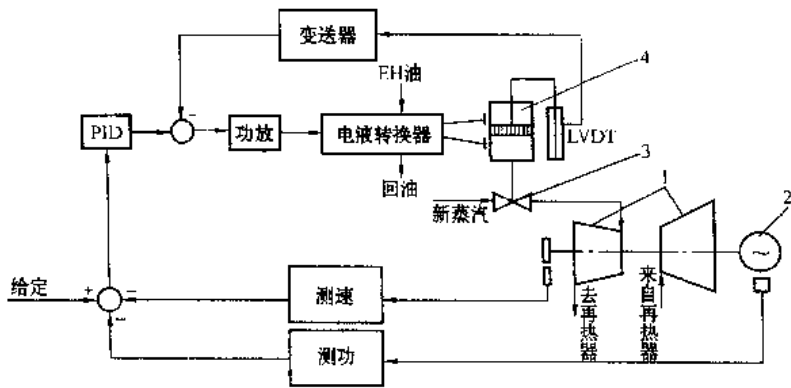


图 1-4 功频电液控制系统原理图
1—汽轮机；2—发电机；3—调节阀门；4—油动机

当外界负荷增加时，汽轮机转速下降，测频单元感受了转速变化，产生一个与转速偏差成比例的电压信号 ΔU_f ，输入到 PID 控制器，经 PID 运算后输入到电液转换器的感应线圈，当线圈的电磁力克服了弹簧的支持力后，使高压抗燃油（EH 油）进入油动机底部，使油动机上行开大了调节阀门，增大了汽轮的功率，与外界负荷变化相适应。汽轮机的功率增加后，测功元件感受到了这一变化后，输出一负的电压信号 ΔU_p ，到 PID 控制器，如果 $\Delta U_p = \Delta U_f$ ，且两者的极性相反，其代数和为零，此时 PID 的输出不变，因此控制系统的一个过渡过程动作结束。当外界负荷减小时其控制过程与上述相反。

当新汽压力降低变化时，在同样阀门开度下汽轮机的功率减少，这时测功单元输出电压信号减小，因此在 PID 入口仍有正电压信号存在，使 PID 输出信号继续增加，经功放、电液转换器和油动机后又开大调节阀门，直到测功元件输出电压与给定电压完全抵消时，即使 PID 的入口信号代数和为零时才停止动作。由此可见，采用了测功单元后可以消除新汽压力变化对功率的影响，从而保证了频率的偏差与功率变化之间的比例关系。即保证了一定的速度不等率，也就是保证了一次调频的能力不变。

利用测功单元和 PID 控制器的特性也可补偿功率滞后。当外界负荷增加时使汽轮机转速下降，测频单元输出正电压信号作用于 PID 控制器，经过一系列的作用开大调节阀门，首先使高压缸增加功率，但此时由于中缸功率增加缓慢，使测功元件输出信号很小，不足以抵消测频单元输出的正电压信号，因此，高压调节阀门继续开大，即产生过开。这样高压缸因过开而产生的过剩功率刚好抵消了中压缸功率滞后。当中低压缸功率滞后逐渐消失时，由于测功元件输出电压的作用又使高压调节阀门关小；当中低压功率滞后完全消失后，高压调节阀门开度又回到稳态设计值。此时控制系统动作结束了。

根据以上的叙述可知，无论是新汽压力发生波动或者功率产生滞后，都能保证转速偏差与功率变化之间的固定比例关系，即保证一次调频能力不变。这是功频电液控制系统的

一大优点。

二、功频电液控制系统的静态特性

功频电液控制系统的原理方框图如图 1-5 所示。

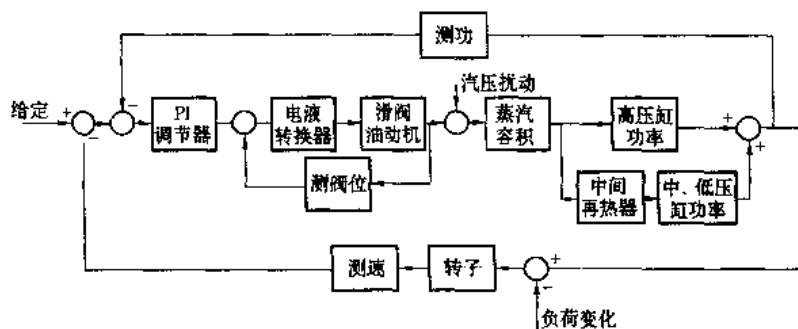


图 1-5 功频电液控制系统方框图

从图 1-5 中可以得出：测频（速）单元的输出与频率成正比

$$U_f = k_1 \delta n_0 \quad (1-1)$$

$$\Delta U_f = k_1 \Delta n \quad (1-2)$$

式中 k_1 ——比例系数；

δ ——转速不等率；

U_f 、 ΔU_f ——测频单元输出的额定值 and 变化值。

式 (1-1) 与式 (1-2) 相除得

$$\Delta U_f = U_f \frac{\Delta n}{n_0} \cdot \frac{1}{\delta} \quad (1-3)$$

由测功单元的输出与功率成正比可得

$$U_p = k_2 P_0 \quad (1-4)$$

$$\Delta U_p = k_2 \Delta P \quad (1-5)$$

式中 k_2 ——比例系数；

U_p 、 ΔU_p ——测功单元输出的额定值与电压变化值。

式 (1-4) 与式 (1-5) 相除得

$$\Delta U_p = U_p \frac{\Delta P}{P_0} \quad (1-6)$$

因为在稳定工况下， $\Delta U_f + \Delta U_p = 0$

所以有

$$U_f \frac{\Delta n}{n_0} \cdot \frac{1}{\delta} + U_p \frac{\Delta P}{P_0} = 0$$

又因为

$$U_f = U_p$$

所以

$$\frac{1}{\delta} \cdot \frac{\Delta n}{n_0} + \frac{\Delta P}{P_0} = 0 \quad (1-7)$$

$$\delta = - \frac{\frac{\Delta n}{n_0}}{\frac{\Delta P}{P_0}} \quad (1-8)$$

式中的负号代表转速增加时功率减少。

根据式 (1-8) 可以给出系统的静态特性曲线 (见图 1-6)。从图可以看出, 静态时对于不同的转速有不同的功率, 这表明其特性曲线的倾斜程度代表了一次调频能力的大小。一次调频的能力只与测功单元的信号和测频单元的信号有关 (相比较), 而不受蒸汽参数的影响, 所以, 静态特性曲线的大小及倾斜程度可以很方便地进行调整。

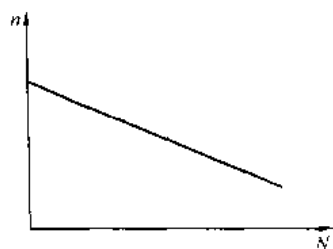


图 1-6 功频电液控制系统的静态特性曲线

三、功频电液控制系统主要单元的动态特性

1. 测频单元

磁阻发讯器是用来将被测转速信号转换为相应频率信号的测量元件。发讯器由测速齿盘和测速头两部分组成 (见图 1-7)。测速齿盘装在汽轮机轴上, 测速头固定在齿盘旁边的支架上, 处于齿盘径向位置。测速头内装有永久磁钢、铁芯和线圈。铁芯端部与齿盘的

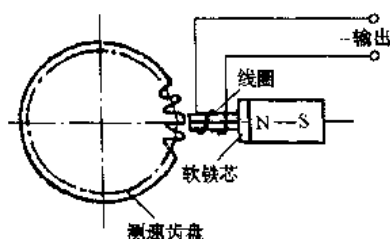


图 1-7 测速装置磁阻发讯器

齿顶之间留有约 1mm 间隙。当齿盘随主轴转动时, 铁芯与齿盘的间隙便不断变化, 每经过一齿, 气隙磁阻变化一次, 磁路中的磁通量也随之变化, 套在铁芯上的线圈就感应出一个交变电动势波形, 此感应电动势即为测速头的输出信号。

设齿盘齿数为 Z_1 , 汽轮机轴的转速为 n r/min, 则输出信号的频率为

$$f = \frac{n \cdot Z_1}{60} \text{ Hz} \quad (1-9)$$

当齿数一定时, 频率 f 与汽轮机转速 n 成正比。一般取 $Z_1 = 60$, 所以 $f = n$ 。例如当 $n = 3000$ r/min 时, 输出信号频率 $f = 3000$, 即测速头每秒钟输出信号的频率在数值上等于汽轮机每分钟的转速, 因而可以方便地将 f 作为转速 n 的信号。

测速头感应电动势的大小可由电磁感应定律推导而得

$$E = \frac{4.44 \cdot \omega \cdot n \cdot Z \cdot \Delta \varphi_{\alpha}}{60} \times 10^{-8} \text{ V} \quad (1-10)$$

式中, ω 为线圈匝数, $\Delta \varphi_{\alpha}$ 为有效磁通量, 它与齿顶和测速头之间的间隙、齿盘直径的大小有关。当转速与齿盘直径越大, 间隙越小时, 感应电动势越大, 抗干扰能力就越强。为了控制汽轮机的全部升速过程, 希望测速头在较低的转速 (100 ~ 200 r/min) 下就能输出一定强度的信号, 以保证后续电路正常工作, 以实现大范围测速的要求。

试验表明: 测速头壳体应采用不导磁的镍铬不锈钢材料或非金属材料, 而不能用铜质

壳体，以避免高频时涡流损耗大使有效磁通量下降；测速齿盘采用渐开线齿轮能得到接近正弦波的波形。

由前述可知，传感器输出的电脉冲频率 f 与被测转轴的转速 n 成正比。因此，只要测得频率 f ，就可通过式 (1-9) 计算得到被测转速 n 。目前对电脉冲频率 f 的测量一般都采用数字频率计。

数字频率计的测量原理一般为计数法测频率，即测定在预定的标准时基内进入计数器的待测信号脉冲的个数，从而求得待测转速。图 1-8 为其工作原理方框图。

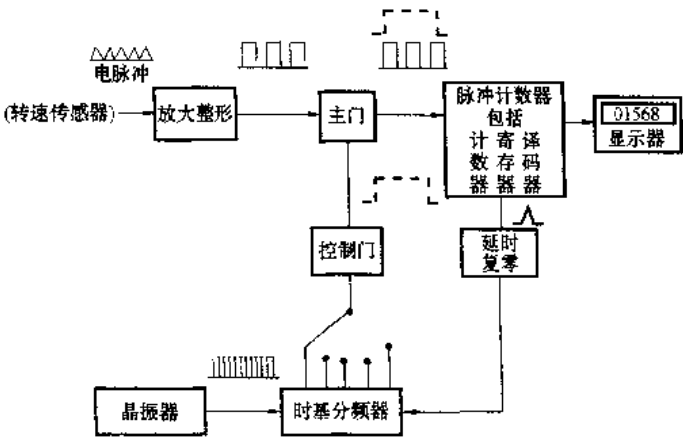


图 1-8 数字频率计原理框图

由转速传感器输出的电脉冲信号（频率为 f_x ，经过放大整形形成幅度一致的脉冲波形，如矩形波），被传输到主门的输入端。由晶体振荡器产生的标准频率，频率较高，经过时基分频器加以分频后，变成为每 1s 1 次、每 10s 1 次等的低频脉冲信号，亦称秒信号，则两个秒信号之间的间隔即为 1s、10s 等的标准时基 t 。当选一个标准的时基 t s 后，设第一个秒信号进入控制门后，使门内的双稳态翻转，从而使主门开启，允许被测信号 f_x 通过，计数器即随之计数；经 t s 后，当第二个秒信号进入控制门，使门内的双稳态再次翻转，使主门关闭，不允许待测信号 f_x 通过，计数器即停止计数。计数所累计的待测信号脉冲数 N_x 被显示在显示器上，即 $N_x = f_x t$ ，则被测轴的转速 n 为

$$n = \frac{60 N_x}{zt}$$

式中 z ——被测轴每转一周所产生的脉冲数。

2. 测功单元

测功装置包括发电机有功功率的测量和放大，以及不平衡功率的校正。

目前国内各种功频电调系统所采用的发电机有功功率测量装置主要有霍尔效应测功器和四象限乘法器两种。本书只介绍较常用的霍尔效应测功器。

将一矩形半导体薄片置于磁场 B 中，当沿薄片的一对边通以电流 I_s （称为控制电流）时，则在另一对边即出现电动势 V_H ，这一效应称为霍尔效应，电动势 V_H 称为霍尔电动势。

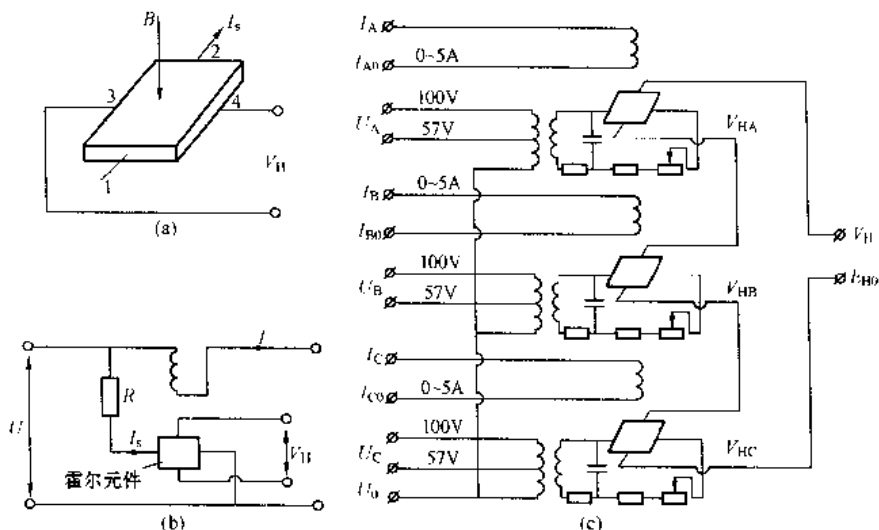


图 1-9 霍尔效应与测功器

(a) 霍尔效应原理; (b) 单相测功器; (c) 三相测功器

势 [见图 1-9 (a)], 该半导体薄片称为霍尔元件。

对于一定长度和宽度的材料, 且磁场 B 和霍尔元件平面相垂直时, 霍尔电动势可按式计算

$$V_H = K_H \cdot B \cdot I_s \quad (1-11)$$

式中 K_H ——霍尔常数;

B ——磁感应强度;

I_s ——控制电流。

式 (1-11) 表明, 霍尔电动势 V_H 与控制电流 I_s 和磁感应强度 B 的积成正比 (B 与霍尔元件平面不垂直时则应取 B 的法向分量)。若用被测电路的电压信号 U 产生控制电流 I_s , 用被测电路的负载电流 I 产生磁场 B , 则输出霍尔电动势 V_H 就和电路中电压和电流的乘积 UI 成正比, 即反映了功率量。所以霍尔元件是一个乘法元件, 可用来测量功率。

图 1-9 (b) 表示单相霍尔测功器原理。霍尔元件平面和磁场垂直, 使通过元件的控制电流 I_s 与被测电路的相电压 U (若系高压则先经电压互感器降压) 成正比, 磁感应强度 B 与被测电路的电流 I (若系大电流则先经电流互感器交流) 成正比, 即

$$I_s = K_u \cdot U = K_u \cdot U_{\max} \sin \omega t$$

$$B = K_i I = K_i \cdot I_{\max} \sin(\omega t - \varphi)$$

则所产生的霍尔电动势

$$\begin{aligned} V_H &= K_H \cdot I_s \cdot B \\ &= K_H \cdot K_u \cdot K_i \cdot U_{\max} I_{\max} \sin \omega t \cdot \sin(\omega t - \varphi) \\ &= \frac{1}{2} K_H K_u K_i U_{\max} I_{\max} \cos \varphi - \frac{1}{2} K_H K_u K_i U_{\max} I_{\max} \cos(2\omega t - \varphi) \end{aligned} \quad (1-12)$$

式(1-12)中,第二项为二倍频的交流分量,第一项为直流分量,反映了有功功率的大小。通过滤波器滤去交流分量后,霍尔片输出的直流电压即与电路的单相有功功率成正比,即

$$V_H = K \cdot U_{\max} I_{\max} \cos \varphi = K \cdot N_{cl} \quad (1-13)$$

上列各式中, K_u 、 K_i 、 K 等均为相应的比例常数。

一般采用三相三元件法测量三相功率[见图1-9(c)]。这时,发电机输出端电流互感器次级分别接到三个激磁绕组以产生磁场,来自电压互感器的相电压经降压后分别送到三个元件的控制电流端,三元件的霍尔电动势串联相加,其总和即表示为三相功率

$$\begin{aligned} V_H &= V_{HA} + V_{HB} + V_{HC} \\ &= K I_A U_A \cos \varphi_A + K I_B U_B \cos \varphi_B + K I_C U_C \cos \varphi_C \\ &= K(N_{eA} + N_{eB} + N_{eC}) \\ &= K \cdot N_e \end{aligned} \quad (1-14)$$

霍尔电动势信号较小,一般为几十毫伏,需通过测功放大器(又称毫伏放大器)予以放大。

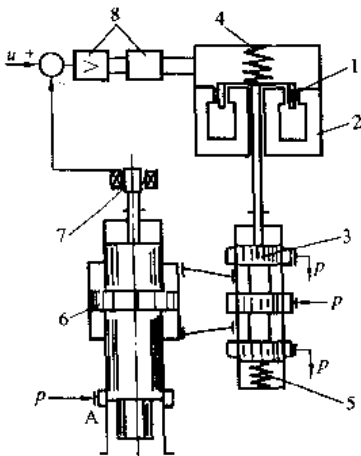


图 1-10 动圈式力矩马达单级
液压放大电液转换器
1—线圈；2—磁铁；3—滑阀；
4、5—弹簧；6—活塞；
7—变送器；8—放大器

3. 电液转换器

电液转换器也是一种调节元件。用它将电调部分和液动系统联系起来,同时又把微弱的电信号放大为液动信号,由液动力去控制油动机。现在常用的电液转换器有两种,即动圈式和动铁式两类,而液动放大部分则可分成单级和多级两种。

(1) 动圈式力矩马达单级液压放大电液转换器。由图1-10可见,校正单元输出信号处理后输入电液转换器的控制线圈1,由于电磁场的作用产生电磁力,克服了弹簧力及阻力后使滑阀3移动,开大进油与排油口使活塞上边油压升高,而下边油压降低,使活塞下行关小脉动油口A,使脉动油压升高,经过滑阀油动机的作用使阀门开大。当活塞下行时通过位移变送器7转成电压信号,反馈到输入端,抵消输入电压,又使滑阀3恢复到原来位置,此时动作结束了。在新的稳定工况下,活塞的位置不同了,油口A面积也不同了。

由于电气元件都很小,质量也小,可把电气部分看成比例环节。其液动部分可看成惯性环节,经过类似的推导便可求得它的传递函数

$$W(s) = \frac{1}{T_s s + 1} \quad (1-15)$$

式中 T_s ——时间常数, s。

(2) 动铁式力矩马达两级液压放大电液转换器。图 1-11 是它的结构图，由 PID 输出的电压信号经功率放大器之后的电流信号作用于线圈 2，在衔铁 4 的一端呈现 N 极，而另一端呈现 S 极。衔铁 4 支承在弹簧管 5 上，后者是具有弹性的薄壁圆管。当衔铁被磁化后，它的一端受到吸引力而另一端受到排斥作用，产生一扭转力矩，衔铁产生一个转角，致使弹簧管变形。衔铁的转动使反馈杆 7 产生弹性变形，改变了喷油口 6 的排油面积。假定电流的作用使衔铁的左端为 N 极，右端为 S 极，则衔铁受磁铁的吸引和排斥作用顺时针旋转，减小了反馈杆左面喷油面积，使油压 p_1 增加；因反馈杆右面喷油面积增加，使油压 p_2 下降。在压差作用下滑阀 8 向右移动，打开油口 b，压力油经过油口 b'，进入油缸活塞 11 右侧，而左侧压力油经油口 a' 排出，因此油缸活塞向左移动。如果衔铁上电流反向，则使油缸活塞向右移动。

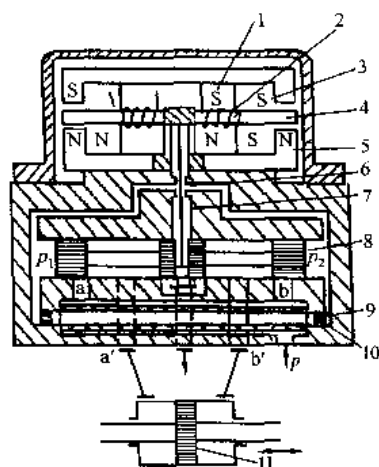


图 1-11 动铁式力矩马达两级
液压放大电液转换器

- 1—永久磁铁；2—线圈；3—导磁体；
4—衔铁；5—弹簧管；6—喷油口；
7—反馈杆；8—滑阀；9—节流孔；
10—滤网；11—油缸活塞

动铁式电液转换器一般与油动机、位置变送器（LVDT）、功放构成如图 1-12 所示的伺服控制回路，以完成阀位控制的任务。此系统的传递函数同式（1-15）一样。

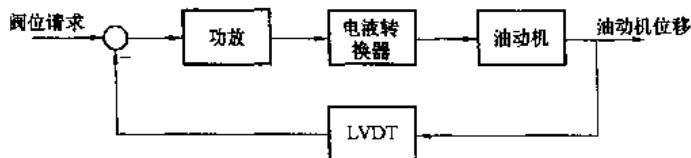


图 1-12 伺服控制回路

4. 阀门位置测量

阀门的位置（开度）是通过测量油动机的位置反映出来的。油动机的位置由位置变送器（LVDT）测出，它的工作原理是采用线性差动变压器测量位置，工作原理如下：

为了反映铁芯移动的方向，对于差动变压器最常用的测量电路是差动整流电路相敏检波电路。

差动整流电路把两个二次绕组的感应电动势分别整流，然后再把两个整流后的电流或电压串成通路合成输出。图 1-13 所示为几种典型电路，图（a）、图（b）用于连接高阻抗负载的组合，是电压输出型。图中可调电阻是用于调整零点输出电压的。

现分析图（a）的工作原理，其输出波形如图（c）所示。

假定在正弦交流电压作用下，正半周时，上绕组电位 a 正 b 负，下绕组电位 c 正 d 负，则分别可得电容上的电压 $\dot{U}_{2a}$ 和 $\dot{U}_{2c}$ 。总的合成输出电压为上述两电压的代数和，即

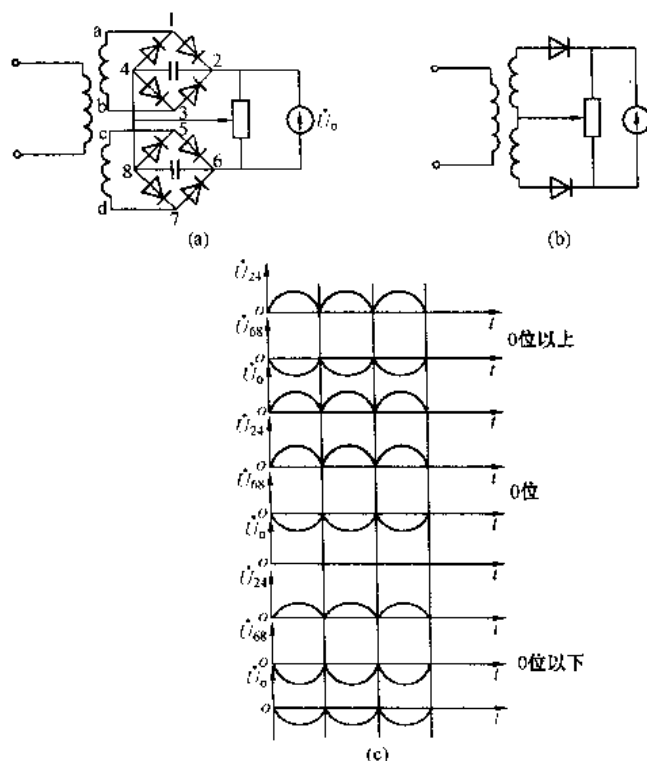


图 1-13 差动整流电路

(a)、(b) 电压输出型；(c) 输出波形

$$\dot{U}_0 = \dot{U}_{24} - \dot{U}_{68}$$

当为负半周时，上绕组电位 a 负 b 正，下绕组 c 负 d 正，所得电容电压仍是 $\dot{U}_{24}$ 和 $\dot{U}_{68}$ 。

所以不论是正半周还是负半周，通过上下绕组在回路中电容上的电流始终不变，总的输出电压为

$$\dot{U}_0 = \dot{U}_{24} - \dot{U}_{68}$$

当铁芯处在 0 位即中间位置时， $\dot{U}_{24} = \dot{U}_{68}$ ，所以 $\dot{U}_0 = 0$ 。

当铁芯在 0 位以上时， $\dot{U}_{24} > \dot{U}_{68}$ ，所以 $\dot{U}_0 > 0$ ，表针向正方向偏转。

当铁芯在 0 位以下时， $\dot{U}_{24} < \dot{U}_{68}$ ，所以 $\dot{U}_0 < 0$ ，表针向负方向偏转。

差动整流电路结构简单、线性好，一般不需调整相位及考虑 0 位输出的影响。

图 1-14 为差动整流电路的一种实用电路，变压器的左半部是一个多谐振荡器，它能输出一个近似为正弦波的交变信号。接通电源时，设 VT1 先导通，则 VT2 截止，电源电流经 R_5 、 R_6 、VT1，在变压器下绕组 L_A 产生一个电压，另外电源对 C_2 充电；同时， C_1 上原来保存的电压将放电，使 U_{be2} 电位下降直至 VT2 导通，VT1 截止。当 VT2 导通时，电源电流经 R_5 、 R_7 、VT2 在变压器下绕组 L_B 产生一个电压，电源对 C_1 进行充电；同时 C_2 上保存的电压将放电，使 U_{be1} 电位下降，直至 VT1 导通，VT2 截止。