

第 6 篇

微 特 电 机

第 6 篇

微 特 电 机

主编单位 机械工业部西安微电机研究所

编写单位 机械工业部西安微电机研究所
湘潭电机厂

主 编 王祖奇

副主编 郑朝简 毛鼎品

编写人 王祖奇 姜全荣 任 捷 高云峰
熊瑞煜 薄兰尊 周彦瑜

主 审 刘大椿 吉崇庆 黄大绪

第 1 章 概 论^{[4]~[10][13]~[14]}

微特电机是指其原理、结构、性能、作用、使用条件或运动方式上与常规电机不同,在某些方面具有一定特点,且其体积和输出功率大多很小的电机。这类电机主要包括控制微电机和一些特殊微电机,常被用于自动控制系统和计算装置中来实现机电信号或能量的检测、解算、放大、执行或转换等功能。

微特电机的机座外径一般不大于 130mm,其质量从数十克到数千克,功率从数百毫瓦到数百瓦。但在较大的自动控制系统(例如轧钢、数控机床、火炮和工业机器人的自动控制系统)中,这类电机的机座外径已达 300~400mm,质量已达数十千克至数百千克和功率已达数十千瓦至数百千瓦。

微特电机的性能由于其所起的作用,偏重于要求静态和动态特性参数的高精度、快速响应和可靠性,这与驱动用的常规电机不同,后者一般侧重于运行和启动时的力能指标。

随着科学技术的进步,微特电机与电子学、计算机科学和材料科学的联系越来越紧密,促进了微特电机的专业技术向更高层次发展以及新品种的加速开发。例如,基于非电磁原理(如压电、静电、光电等原理)的特殊电机和采用由专用集成电路或功能模块组成驱动器、控制器的具有组合化、智能化特征的高性能、高精度、高可靠性的高水平的机电一体化新品种不断地被开发和应用;采用新型稀土永磁材料的应用,开发了新一代的步进电动机和永磁交流伺服电动机等。使微特电机的控制性能产生了质的飞跃,其应用领域也不断地被拓宽,它已成为一个具有广阔发展前景的独特的电机门类。

微特电机的种类很多。本篇主要介绍常见的控制微电机(包括自整角机、旋转变压器、感应同步器、测

速发电机、伺服电动机、力矩电动机、步进电动机、开关磁阻电动机和电机扩大机等)和若干种与常规电机明显不同的具有特殊工作原理或结构特点的特殊微电机,以及由微特电机组成的伺服系统。

1 微特电机的分类和用途

微特电机广泛应用于军事、民用领域的各种现代化装备及其控制系统中。如雷达的扫描跟踪、火炮控制、导弹制导、舰船方位控制、飞机自动驾驶、天文望远镜操纵、轧钢控制、数控机床控制、无梭织机控制、造纸张力控制、工业缝纫机控制、工业机器人控制、遥测遥控、音象设备、医疗设备、自动化仪表以及计算机外围设备等领域中,都大量使用微特电机。

按照微特电机的功能,大体上可分为以下五类:

(1) 测位用微特电机。它能将机械角度或直线位移进行直接指示、变换(变换成电压幅值信号或电压相位信号或数字量)或远距离传输,有的还可以作为解算元件。

(2) 测速用微特电机。它能将机械转速变换成电压幅值信号或脉冲数信号输出,也可作为解算元件。

(3) 执行用微特电机。它能快捷而正确地执行频繁变化的位置和速度指令,带动负载完成所要求的动作。

(4) 放大用微特电机。能对输入量或反馈量进行变换、校正和放大,以控制执行用微特电机的运动。

(5) 特殊微电机。按其不同的特点,分别具有相应的特殊功能,适用于某些特殊场所。

以上 1 和 2 两类主要用作转换电信号,属于信号元件;3 和 4 两类主要用作转换转矩或功率,属于功率元件。微特电机的分类及具体用途见表 6·1-1。

表 6·1-1 微特电机的分类和用途

类别	名称	用途
测位用微特电机	自整角机(包括力矩式、控制式、多极式、无刷式、四线式及固态式)	1. 角位的远距离指示,如力矩式自整角机用于水位指示器、航向指挥仪、反应堆控制棒指示器 2. 角位的远距离控制和定位,如控制式自整角机用于轧钢机轧辊定位伺服系统 3. 角位的高精度传输,如四线自整角机用于高精度角位传输系统;多极自整角机用于双通道同步伺服系统,作角位的精密传输、变换和读取;无刷自整角机用于环境条件严酷,可靠性要求高的系统;固态自整角机用于数字控制系统

(续)

类别	名称	用途
测位用微特电机	旋转变压器(包括正余弦、线性、比例式、多极式、无刷式及磁阻式)	<ol style="list-style-type: none"> 1. 角位检测, 如数控机床伺服系统中用正余弦旋转变压器作为精密位置传感器 2. 数学运算, 如四则运算(用线性旋转变压器)、反三角函数运算(用正余弦旋转变压器)、矢量合成与分解(用正余弦旋转变压器)、微分和积分运算(用线性旋转变压器与交流测速发电机)及坐标变换(用正余弦旋转变压器)等, 供解算装置使用 3. 输出特种函数, 如正割、倒数、对数及各种弹道修正函数, 供解算装置使用; 多极式用于双通道同步伺服系统, 作角位的精密变换和读取; 无刷式用于环境条件严酷、可靠性要求高的系统
	感应移相器	<ol style="list-style-type: none"> 1. 作仪表的移相元件, 如相敏指零仪中的移相电源 2. 检测步进电动机的步距精度 3. 测距, 如在雷达脉冲测距仪中, 根据感应移相器的移相角精密测距
	感应同步器(包括直线式及旋转式)	角位的精密传输、变换和检测, 如在精密机床及测量仪表中, 用它作角位的分度和检测; 在雷达天线定位跟踪系统及惯性导航系统中, 用它作精密的传输变换元件
	编码器	作角位的精密数字检测元件
测速用微特电机	霍尔效应自整角机和旋转变压器	基本用途是角位检测、传输和变换。由于输出电动势小及工艺要求很高, 还未广泛使用
	测速发电机(包括模拟型及数字型)	<ol style="list-style-type: none"> 1. 作检测元件, 如直接作测速仪 2. 作校正元件, 如在速度伺服系统中, 用它校正伺服电动机的转速, 使系统工作于指令要求的转速 3. 作阻尼元件, 如在位置伺服系统中使伺服电动机获得阻尼, 防止系统振荡 4. 作计算元件, 如在解算装置中作积分和微分仪 5. 作加速度元件
执行用微特电机	交流伺服电动机(包括两相及同步型、异步型)	<ol style="list-style-type: none"> 1. 两相交流伺服电动机用于小功率伺服系统 2. 同步型(永磁)交流伺服电动机及异步型交流伺服电动机是新型机电一体化产品, 其结构可靠, 伺服性能优良。前者用于中高档数控机床的速度进给伺服系统及工业机器人关节驱动伺服系统; 后者主要用于中高档数控机床的主轴驱动伺服系统
	直流伺服电动机(包括永磁式(永磁式直流、印制绕组、线绕盘式、杯型电枢等直流伺服电动机)及电磁式)	<ol style="list-style-type: none"> 1. 电磁式直流伺服电动机用于早期的伺服系统, 作执行元件 2. 永磁式直流伺服电动机比电磁式的体积小、效率高、结构简单, 广泛用于要求具有良好伺服性能的速度及位置伺服系统, 如数控机床、火炮、机载雷达等伺服系统 3. 印制绕组、线绕盘式及空心杯电枢等直流伺服电动机均为无槽电枢永磁电机, 具有时间常数小、理论加速度大、功率变化率大等优良快速响应性能, 特别适用于作录象机、盒式录音机、电唱机、计算机外围设备及物镜变焦等驱动的执行元件。印制绕组、线绕盘式直流伺服电动机还可作雷达及数控机床的执行元件
	无刷直流伺服电动机	它具有直流伺服电动机的伺服特性, 又具有交流伺服电动机的运行可靠、维护方便的优点, 适用于伺服性能及可靠性要求高的伺服系统
	力矩电动机	在要求理论加速度大、速度与位置精度高、低速时具有大的转矩, 且长期运行于零速状态的系统中作执行元件, 如炮塔、天文望远镜、卫星发射火箭等伺服系统, 采用大转矩的力矩电动机直接驱动负载, 而不用齿轮减速
	步进电动机	其转速与施加的电脉冲严格成正比, 且步距误差积累。适用于(1)经济型数控机床、绘图机、自动记录仪中作执行元件; (2)转速要求恒定的装置, 如在手表、打印机及走纸机中作驱动元件
	开关磁阻电动机	用于机车及纺织机械驱动

(续)

类别	名称	用途
放大用微特电机	电机扩大机、磁放大器	作伺服系统中的放大元件,对输入量进行变换、校正或放大,以控制执行元件的运动
其他微特电机	低速同步电动机 滚切电动机 谐波电动机 有限转角电动机 音圈电动机 超声波电动机 微波电动机 导波电动机 电容式电动机 静电电动机 热磁电动机 磁性编码器	这些电机具有特殊的工作原理和运行方式或特殊的结构,按不同的性能和特点分别适用于相应的特殊场所

2 自动控制系统对微特电机的要求

各类微特电机在自动控制系统中的功能和作用虽然不同,但都必须满足高可靠性、高精度和快速响应的要求。

2.1 高可靠性

自动控制系统的可靠性与构成系统的元器件的数量和品质紧密相关。现代自动控制系统随着科学技术进步和工业生产发展的需要,其规模不断扩大,构成系统的元器件数量也不断增加。例如,一个伺服系统所用的微特电机可以多到几十台甚至几百台。在元器件为串联的系统中,系统的可靠度 R_s 为构成系统的各元器件的可靠度 R_i 的乘积,即

$$R_s = \prod_{i=1}^n R_i$$

式中 n —— 构成系统的元器件数;

i —— 1, 2, ..., n 。

元器件的可靠度 R_i 是一个小于1的数。因此, R_i 越小或元器件的数目越多,则系统可靠度 R_s 越低。假设各元器件的可靠度均为0.95,则由2、10、100个元器件所组成的三个系统,其可靠度分别为0.9025, 0.5987, 0.006;如将元器件的可靠度提高到0.99,则系统的可靠度分别提高到0.9801, 0.9044, 0.366。若

要保证由200个元器件所组成的串联系统的可靠度为0.95,则必须使每个元器件的可靠度达0.9997。由此可见,系统越大,组成系统的元器件越多,系统对所用元器件的可靠度要求就越高。元器件的高可靠性是确保系统高可靠性的基础。

2.2 高精度

微特电机的精度对自动控制系统特别是对伺服系统的精度有直接影响。高精度的伺服系统必须有相应的高精度微特电机支撑。例如,现代雷达天线的定位跟踪系统、惯性导航控制系统和火炮控制系统等测位所用的微特电机,其电气误差就必须达到角秒级甚至更小。在上述系统中,电气误差仅达角分级的微特电机就难以胜任这些系统的要求。加工精度为 $0.01\mu\text{m}$ 的数控机床伺服系统,需要选用分辨率为 10^6 脉冲/r,最高转速为 10^4r/min 的精密数字检测元件来检测角位。所以选用相应精度的微特电机是保证伺服系统精度的基础,要开发更高精度的伺服系统,开发相应精度等级的微特电机是前提条件。

○ 可靠度是描述可靠性的一项定量指标。微特电机常用可靠度、失效率、使用寿命和平均无故障时间等定量指标来反映其可靠性。

2.3 快速响应

由于伺服系统的指令信号变化极快,所以要求微特电机特别是执行用微特电机,具备快速响应的能力。表征快速响应的主要指标有机电时间常数、最大理论加速度和功率变化率(Power Rate)等。这些指标直接影响系统的动态性能。例如,高炮摄像系统中的物镜变焦驱动装置及工业机器人的关节驱动,对快速响应的要求很高,传统结构的伺服电动机无法满足要求。新型的无槽电枢伺服电动机(如印制绕组伺服电动机、线绕盘式伺服电动机及空心杯电枢伺服电动机)及机电一体化产品稀土永磁交流伺服系统的出现,才使得这种高快速响应的伺服驱动得以实现。无槽电枢伺服电动机的机电时间常数最小可做到0.5ms,理论加速度可做到 $1.6 \times 10^5 \text{rad/s}^2$;功率变化率可做到7400kW/s。稀土永磁交流伺服电动机的功率变化率为直流伺服电动机的四倍多,机电时间常数仅为直流伺服电动机的1/3。

随着机电一体化技术与现代控制理论的发展,自动控制系统的可靠性、高精度及快速响应等性能的获得,不仅取决于微特电机,还与组成系统的其他元器件(如电力电子元器件、微电子器件、控制器、驱动器等)的性能及其控制理论有关。

3 微特电机的基本特点

3.1 生产特点

(1)由于微特电机在自动控制系统中的用途广泛,故它的品种规格繁多,而每种规格的生产批量却较小,为适应这种生产特点,微特电机的标准化、系列化及零部件的通用化程度高。

(2)为满足系统对微特电机的高可靠性和高精度等性能要求,因此,零部件的制造精度高,需要较精良的加工设备及检测设备。

3.2 设计制造特点

(1)设计信号元件时,要把保证元件的精度放在第一位,对能量传递的考虑则放在次要位置。设计功率元件时,首先要着眼于满足其特性参数要求,其次才考虑力能指标。

(2)确保气隙磁场分布的正确波形是保证微特电机获得高精度和预期特性的基础。因此,提高磁路的对称性,确保绕组分布规律适应磁场波形的要求和各相

绕组匝数和电阻的平衡,以及保证零部件的配合尺寸和定、转子的同轴度,达到规定的精度等级等是设计和制造中基本要求。

(3)在结构设计、材料和工艺选用上,要考虑微特电机的不同使用条件,采取相应的措施,确保要求在某些苛刻环境条件(如高温、低温、湿热、高海拔、低气压、振动、冲击和加速度等)下运行的元件能够可靠地工作,不致对元件的性能、精度和寿命造成不良影响。

3.3 试验特点

1. 试验项目繁多 微特电机试验主要分检查试验和鉴定试验两大类。前者共16项,主要考核电气性能;后者共40项^①,除16项检查试验项目外,另增24项,主要考核对环境条件的适应能力。此外,各类微特电机的通用或专用规范中还要增加许多项目,有的试验项目还要做多次重复检查^②。

2. 专用测试设备多,而且精度要求高 微特电机的角位、相位、位移、转速、转矩、功率以及这些量的静态和动态响应的测量,均需配备精度比被试产品精度高一个数量级的专用测试设备和仪器。例如,测位用微特电机的角位及相位精度以角分或角秒计,位移精度以微米计,则测试系统中的光栅分度头、函数桥、相角电压表、角位指示器、倍频器等误差应控制在角秒级。又如,为满足线性误差为0.1%~0.25%及输出电压不对称度为0.5%~1%的直流测速发电机的测试要求,专用测试装置的稳速精度应达0.03%;为满足常规的变温温差及零速输出电压的测试要求,交流测速发电机的专用测试装置的感应分压箱精度应达 10^{-5} 。

3. 对测试的环境条件要求严格 微特电机有些试验项目,如自整角机的电气误差试验、零位电压试验、伺服电动机的始动电压试验等,要求在专用的高低温箱中,使电机处在极限的高低温(例如+85℃、-55℃)条件下进行测试。

4 微特电机的发展趋势

1. 模块化、组合化、智能化、机电一体化 微特电机与微电子技术、电力电子技术、计算机技术以及现代控制理论的紧密结合,实现模块化、组合化、智能化,

① 详见(国标)GB7345—87《控制电机基本技术要求》及(国军标)GJB361—87《控制电机基本技术要求》。

② 详见GJB788—89《自整角机通用规范》。

使微特电机及其所组成的控制系统向更高水平的机电一体化发展。如固态自整角机和固态旋转变压器(具有与相应的旋转式机电元件同等功能的模块化电子元件),自整角力矩伺服机(Servtorq)(是由脉宽调制伺服放大器、自整角机和力矩电机组装成一体的组合化电机),多功能无刷直流电动机(由微处理机控制,具有能按负载或温度的变化,自动寻优调节转速等功能的智能化电机),以及新型交流伺服系统(由稀土永磁交流伺服电动机、无刷测速发电机和编码器组装成一体的伺服—测速—编码机组、集成电路或模块化的脉宽调制伺服控制器、驱动器以及微处理机组成)等,都是体现微特电机发展趋势的已开发而有代表性的机电一体化产品。这些产品不但改善和提高了性能、可靠性和精度,而且实现了小型化、廉价化与方便使用。

2. 无刷化、无铁心化、永磁化 为了适应自动控制系统的不断发展需要,不断改进电磁式微特电机,以无刷微特电机逐步取代有刷微特电机,以无铁心电枢的微特电机逐步取代有铁心电枢的微特电机,以高性能的永磁体励磁逐步取代电磁励磁,始终是改进传统

微特电机的一个方向。到目前为止,朝着这一方向开发的微特电机已有无刷微特电机(包括自整角机、旋转变压器、移相器、测速发电机和交、直流伺服电动机等),无铁心电枢微特电机(包括印制绕组式、线绕盘式和杯型电枢电动机等)及永磁微特电机(包括永磁交、直流伺服电动机,永磁步进电动机等)。这些微特电机各自分别在可靠性、快速响应、精度、寿命或技术经济性等方面比相应的电磁式微特电机有明显的改进和提高。

3. 积极开发和研制非电磁原理微特电机 电磁原理微特电机具有许多优点,是这类电机的主要类型。但是随着控制系统不断发展的需要,对微特电机的性能和功能提出许多新的特殊要求,有的是传统电磁原理微特电机所不能适应或难以完全满足的。因此,积极利用相关学科的新成就,开发具有某些特殊原理(非电磁原理)或特殊功能、特殊运动方式的微型特殊电机以适应系统的特殊要求,是微特电机专业发展的另一个重要方向。

第2章 测位用微特电机

1 概述

在运动控制系统中,测位用微特电机可将运动对象的机械角度或直线位移进行指示(如力矩式自整角机及山形变压器)、检测(如差动式自整角机可检测两主令轴的转角之和或差)、变换(如自整角机、旋转变压器将机械角变为电信号,固态自整角机将角度的数字量变为电压模拟量,编码器将角度的模拟量变为电的数字量)、传输与控制(如控制式自整角发送机、差动式发送机及控制式变压器所组成的伺服系统,四线

自整角机系统)及解算(如旋转变压器)。

由于运动控制系统的不断更新,它对测位用微特电机的精度及可靠性的要求越来越高。曾在40~60年代广为采用的电位器、山形变压器(又称直线自整角机)及微型同步器,已逐渐被自整角机、旋转变压器所代替。而现代的一些高精度系统,则要采用性能更好的多极式测位元件,如多极旋转变压器、感应同步器、多极自整角机。测位用微特电机的种类很多,其分类和特点见表6-2-1。

表6-2-1 测位用微特电机的种类和特点

种 类	特 点	误差范围
山形变压器	它是利用无滑动接触测量直线位移的电磁感应元件,运行寿命长,工作可靠,但输出电压的谐波分量较大,易使放大器饱和。当两个山形变压器匹配使用时,两者特性应相同。大多在仪表中使用	数十(′)
微型同步器	输出电压与主令轴的转角成线性关系,可靠性较高,寿命长,结构简单坚固,但精度较差。可作为转矩发送机使用,其转矩与两绕组输入电流之积成正比	数十(′)

(续)

种类	特点	误差范围	
自整角机	力矩式	无力矩放大功能,接收误差较大。故只适用于负载较轻及传递精度不高的开环控制的伺服系统中,作角位指示	0.5°~2° (静态误差)
	控制式	精度较高。适用于精密的闭环控制的伺服系统中,作精密的角位检测、变换元件	3'~15'
	多极式	精度高,极对数大于1。适用于高精度伺服系统中的电气变速的双通道、多通道系统,作为精密测位元件	5"~60"
	固态式	利用电力电子器件、微电子器件组成的非旋转式的数字型自整角机。适用于伺服系统的数字量控制	5'~20'
	无刷式	无电刷和集电环,运行寿命长,可靠性高。发展趋势是取代有刷式的自整角机,但价格较贵	与有刷式相当
	四线式	将旋转变压器作自整角机使用,有旋变发送机、差动发送机和旋转变压器三种类型,在系统中作角位的传输和变换	3'~5'
	霍尔式	利用霍尔原理的新型自整角机,无滑动接触件及绕组,体积小。但精度还不高,温度对精度影响大,还未广泛使用	10'左右
旋转变压器	正余弦	二次输出电压与转子转角呈正、余弦关系。精度较高,在系统中做各种数学运算,亦可作精密测位元件	0.05%~0.2%
	线性	在一定转角范围内,二次输出电压与转子转角呈线性关系,作为机械转角转变为线性电信号的角位转换元件	0.06%~0.22%
	比例式	二次输出电压与一次输入电压之比值可以通过调节转子转角进行调整,结构上增加调整和锁紧转子位置的装置。在系统中可作为调整电压和匹配阻抗的比例元件	
	多极式	精度高,极对数大于1。适用于高精度伺服系统中的电气变速的双通道、多通道系统,作为精密测位元件	5"~60"
	磁阻式	利用磁阻变化原理而开发的无电刷、无集电环旋转变压器。极数多,精度高,体积小,使用可靠性高	5"~120"
	无刷式	无电刷和集电环,运行寿命长,可靠性高。发展趋势是取代有刷式的旋转变压器,但价格较贵	与有刷式相当
	霍尔式	利用霍尔原理的新机种,无滑动接触件及绕组,体积小。但精度还不高,温度对精度影响大,还未广泛使用	10'左右
	特种函数	在一定的转角范围内,二次输出电压与转子转角呈某种特种函数关系,在解算系统中作解算元件	各种特种函数有不同的要求
感应移相器(包括多极式)	一次输出电压与二次励磁电压的相位差与转子转角成线性函数关系,在伺服系统中作移相元件。多极式感应移相器可用作精密测角	相位误差 ±10'~±45' ±10"~6" (多极式)	

(续)

种 类	特 点	误差范围
感应同步器 (包括旋转式和直线式)	原理同旋转变压器, 绕组采用印制电路板的工艺制成。极数可做得很多, 精度取决于导片的制造精度。在测位用微特电机中其精度很高, 可与光栅、磁栅媲美	直线式 0.8~2.5μm; 旋转式 1"~5"
编码器 (包括接触式、光电式及磁性式)	能将角位移、角速度转换成数码或电脉冲信号, 其精度高 (接触式除外)。适用于高精度伺服系统中的角位的数字检测。按功能可分为增量型、绝对型及复合型三种	接触式 7~12bit; 光学式 15000~20000 p/r; 磁性式 12000p/r 以上

注: 多极式测位用微特电机的输出信号误差, 随着机座号增大、极数增多而减小, 即精度提高。

2 自整角机

自整角机是一种电磁感应式机电元件, 在伺服系统中用作角位的远距离指示、小力矩机构的远距离定位及伺服机构的远距离控制等。

按自整角机在系统中的功用可分为力矩式和控制式两大类, 按结构形式可分为有刷和无刷, 按供电电源可分为单相和三相, 按极数多少可分为单对极和多极, 按原理可分为旋转式和固态式。本章主要介绍应用最广的有刷、单相、单对极、旋转式的力矩式和控制式自整角机, 其分类见表 6-2-2。

2.1 分类

表 6-2-2 自整角机的分类

分 类	代 号		电 气 原 理 图	结 构 特 征	功 用
	国内	国际			
力 矩 式	发送机	ZLF TX		凸极式转子, 嵌有单相绕组	将转子转角变换成电信号输出
	接收机	ZLJ TR		凸极式转子, 嵌有单相绕组和阻尼绕组, 或带机械阻尼器	接收力矩式发送机的电信号, 转变成转子的机械角输出
	差动发送机	ZCF TDX		隐极式转子, 嵌有三相星形绕组	串接于力矩式发送机与接收机间, 将发送机转角及自身转角的和 (或差) 转变为电信号, 输至接收机
	差动接收机	ZCJ TDR		同力矩式差动发送机, 但带有机械阻尼器	串接于两个力矩式发送机间, 接收其电信号, 并使自身转子转角为两发送机转角的和 (或差)

(续)

分 类	代 号		电 气 原 理 图	结 构 特 征	功 用
	国内	国际			
制 式	发送机	ZKF CX		凸极式转子，嵌有单相绕组	同力矩式发送机
	变压器	ZKB CT		隐极式转子，嵌有单相分布绕组	接收控制式发送机的信号，转变成与失调角呈正弦关系的电信号
	差动发送机	ZKC CDX		隐极式转子，嵌有三相星形绕组	串接于发送机和变压器间，将发送机转角及其自身转角的和（或差）转变成电信号，输至变压器

注：1. 各类自整角机的定子皆为隐极式结构，并嵌有三相星形绕组，其输出端以 S_1 、 S_2 、 S_3 表示。转子绕组输出端以 R_1 、 R_2 、 R_3 表示。

2. 电气原理图中定、转子绕组的相对位置，即为该自整角机的基准电气零位。

3. 表中国内代号 Z—自整角机；L—力矩式；K—控制式；C—差动式；J—接收机；F—发送机；B—变压器。

2.2 工作原理

在系统中自整角机通常是两个或两个以上组合使用，故各类自整角机的工作原理皆以表 6.2-2 的成对运行状态叙述。

2.2.1 力矩式自整角机的工作原理

如图 6.2-1 所示，左方为发送机，右方为接收机，两者的转子绕组以单相励磁。当两者的转子从基准电气零位逆时针旋转 θ 角度后，在各自的三个定子绕组中所感生的线电压为

$$\left. \begin{aligned} U_{S1S3} &= KU \sin \theta = U_m \sin \theta \\ U_{S3S2} &= KU \sin (\theta + 120^\circ) = U_m \sin (\theta + 120^\circ) \\ U_{S2S1} &= KU \sin (\theta - 120^\circ) = U_m \sin (\theta - 120^\circ) \end{aligned} \right\} \quad (6.2-1)$$

式中 U —— 励磁电压；

U_m —— 定、转子绕组轴线重合时，在定子绕组中感生的最大输出电压；

K —— U_m/U 。

当发送机与接收机的转子处于相同位置，即无失调角时，由式 (6.2-1) 可知，两者所感生的电压完全

相同，故定子绕组中无电流。当发送机转过 θ_1 而接收机仍在基准电气零位 ($\theta_2 = 0$)，即失调角 $\theta = \theta_1 - \theta_2 = \theta_1$ 时，若发送机转子绕组励磁而接收机不励磁，则在发送机定子绕组中感生电动势并产生电流。此电流分别在发送机和接收机的定子绕组中建立磁动势 F_1 及 F'_1 。 F_1 与发送机的励磁轴线方向相反，而 F'_1 则与其相同，见图 6.2-1a。同理，若接收机转子绕组励磁而发送机不励磁时，则分别在接收机及发送机的定子绕组中建立磁动势 F_2 及 F'_2 ， F_2 与接收机的励磁轴线方向相反，而 F'_2 则与其相同。

因此，发送机与接收机的定子绕组都产生两个磁动势，考虑到两者的结构及参数相同，则 $F_1 = F_2 = F'_1 = F'_2 = F$ 。若把磁动势分解成与各自的励磁轴线重合和垂直的两个分量，则仅垂直分量 $F \sin \theta$ 与励磁磁通 Φ 的相互作用才产生整步转矩 T ，见图 6.2-1a，即

$$T = KF \Phi \sin \theta \quad (\text{N} \cdot \text{m})$$

式中 K —— 比例常数。

由于发送机转子的轴与主令轴连接，主令轴发出指令后是固定的，故只有接收机的整步转矩才带动其转子朝 F'_1 的方向转动(发送机方的整步转矩是使转子朝其基准电气零位方向转动)。直到接收机的励磁轴线

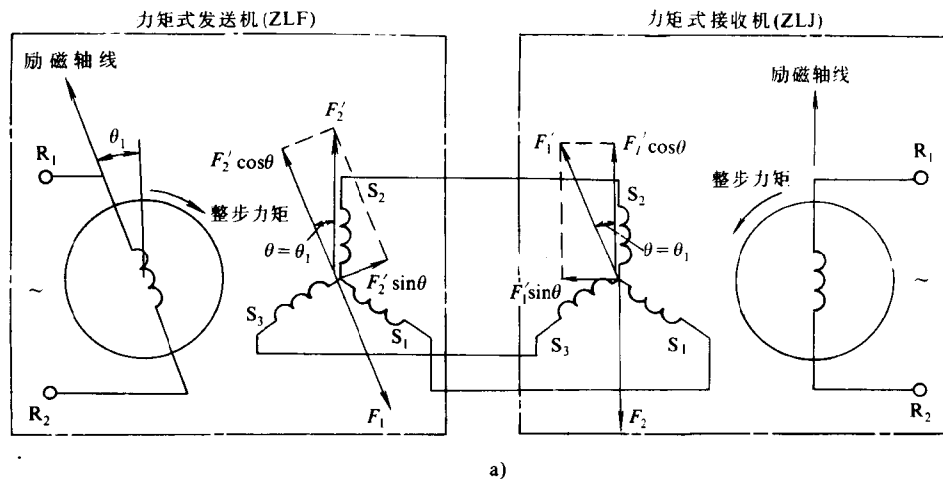


图 6-2-1 ZLF—ZLJ 的工作原理

a) 存在失调角时 b) 磁场和磁动势的相互作用

与 F'_1 重合, 即失调角 $\theta=0$, 整步转矩 $T=0$ 时为止, 此时系统进入新的协调位置。应注意:

(1) 与励磁绕组重合的磁动势分量, 在发送机为 $F_1 - F'_2 \cos\theta = F(1 - \cos\theta)$, 在接收机为 $F_2 - F'_1 \cos\theta = F(1 - \cos\theta)$, 它们仅对各自的励磁磁场起去磁作用, 见图 6-2-1a。

(2) 定、转子同时受到大小相同、方向相反的转矩作用, 由于定子固定不动, 故只有转子才转动。

由于发送机与接收机之间存在失调角, 就会产生整步转矩, 两者的关系见图 6-2-2。曲线的形状近似于正弦, 在失调角 $\theta = \pi/2$ 附近, 整步转矩 T 达最大值。曲线形状与参数选择及电机结构有关。

若要求力矩式接收机指示两个指令角的和或差时, 则可在发送机与接收机之间接一台力矩式差动发送机 (ZCF), 如图 6-2-3 所示。当发送机从其基准电

气零位转过 θ_1 , 而差动发送机从其基准电气零位转过 θ_2 时, 则接收机将从其基准电气零位转过 $\theta_1 - \theta_2$ 。对于角度前的正负号, 逆时针转向取“+”, 顺时针转向取“-”。如图所示, 接收机所指示角度为 $\theta_1 - \theta_2$, 由于 $\theta_2 > \theta_1$, 其值为负值, 即接收机应顺时针转过 $\theta_1 - \theta_2$ 角度。

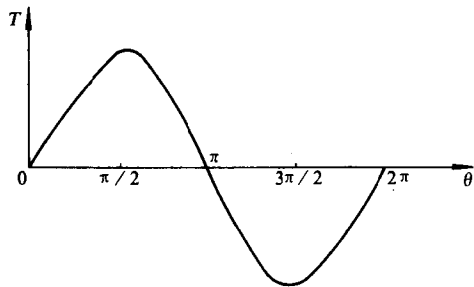


图 6-2-2 整步转矩与失调角的关系

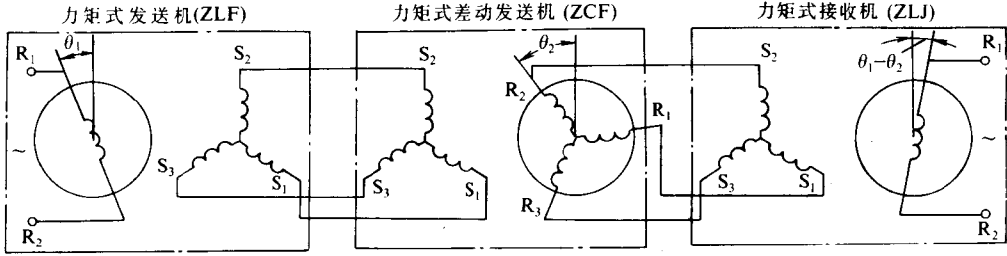


图 6-2-3 ZLF-ZCF-ZLJ 的工作原理

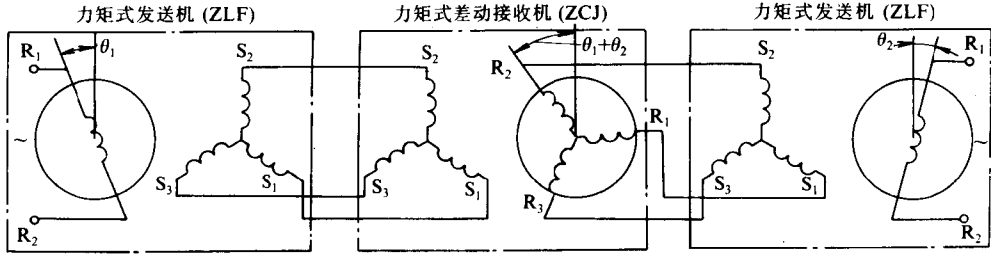


图 6-2-4 ZLF-ZCJ-ZLF 的工作原理

亦可在两台力矩式发送机之间接一台力矩式差动接收机 (ZCJ)，指示两指令角的和或差，如图 6-2-4 所示。 θ_1 前应取“+”号， θ_2 前应取“-”号，则力矩式差动接收机指示角度为 $\theta_1 - (-\theta_2) = \theta_1 + \theta_2$ ，即逆时针转过 $\theta_1 + \theta_2$ 角度。

力矩式自整角机角位传递系统存在许多缺点：整步转矩较小，只能带动轻负载；角位传递误差高达 $1^\circ \sim 2^\circ$ ，且误差随负载及转速的增加而增大；当带动多台接收机工作时，接收机的整步转矩要随之降低而引起传递误差进一步增大；力矩式自整角机是低阻抗元件，其温升较高。

2.2.2 控制式自整角机的工作原理

如图 6-2-5 所示，对照图 6-2-1 可知，在控制式自整角机系统中，接收机的转子绕组不接电网励磁，而与放大器连接。当发送机转子转过 θ_1 后，其定子绕组中

产生如式 (6-2-1) 所示的电压，此电压使发送机与接收机定子绕组产生电流，而建立磁动势并产生磁场，此磁场使接收机的转子绕组感生如下电压：

$$U_2 = U_{2m} \sin \theta \quad (6-2-2)$$

式中 U_{2m} ——接收机转子绕组的最大输出电压；

θ ——发送机与接收机之间的失调角， $\theta = \theta_1 - \theta_2$ ，逆时针转向时取正，顺时针转向时取负。

由于控制式接收机运行于变压器状态，故称为控制式变压器 (ZKB)。其输出电压 U_2 经放大器放大后输至伺服电动机的控制绕组，使伺服电动机驱动负载，并带动控制变压器的转子直至 $\theta_2 = \theta_1$ ，即失调角 θ 为零。此时 $U_2 = 0$ ，放大器无电压输出，伺服电动机停止旋转，系统进入新的协调位置。

在控制式发送机与控制式变压器之间接上一台控制式差动发送机 (图 6-2-6)，则控制式变压器的输出

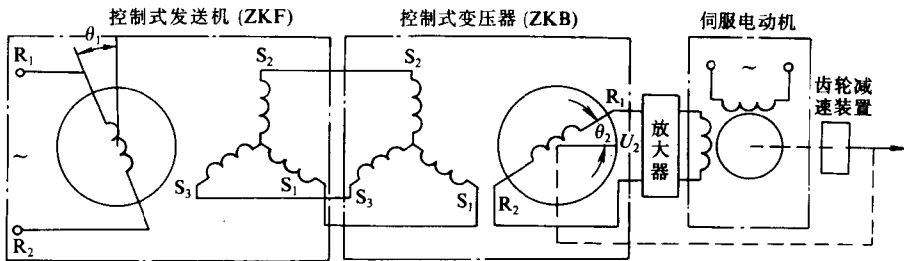


图 6-2-5 ZKF-ZKB 的工作原理

电压 U_2 将是 ZKF 与 ZKC 两者转子转角之差 $\theta_1 - \theta_1'$ 与控制式变压器转角 θ_2 之间的失调角 $(\theta_1 - \theta_1') - \theta_2$ 的正弦函数, 即

$$U_2 = U_{2m} \sin [(\theta_1 - \theta_1') - \theta_2]$$

式中 θ_1 —— 控制式差动发送机转子的转角。

转角角度逆时针转向时为正, 顺时针转向时为负。输出电压经放大器放大后, 输至伺服电动机的控制绕组, 使伺服电动机驱动负载, 并带动控制式变压器的转

子, 直至 $\theta_2 = \theta_1 - \theta_1'$ 为止。此时系统到达新的协调位置。

由此可见, 控制式自整角机系统的负载能力取决于伺服电动机的功率, 故能驱动大负载。其单机电气误差仅为 $3' \sim 10'$, 传递误差远比利矩式的小。控制式自整角机设计成高阻抗, 其温升比利矩式的低, 从而克服了力矩式自整角机系统的缺点, 使控制式自整角机所组成的闭环系统广泛用于伺服机构的高精度、远距离控制。

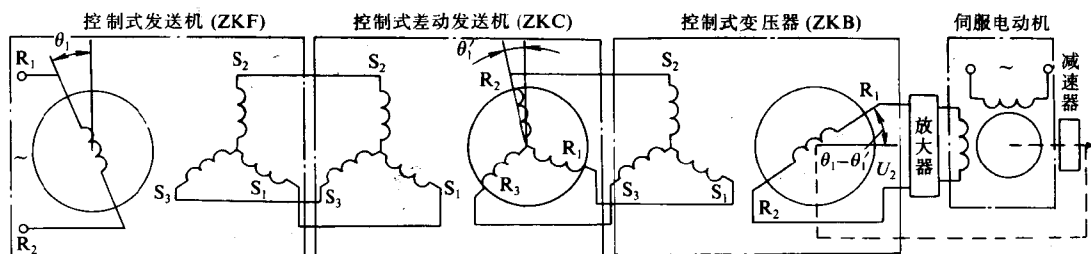


图 6-2-6 ZKF-ZKC-ZKB 的工作原理

2.3 结构

2.3.1 接触式自整角机的结构

各类接触式自整角机的结构特征见表 6-2-2。力

矩式发送机 (ZLF)、力矩式接收机 (ZLJ) 及控制式发送机 (ZKF) 的结构基本相同, 见图 6-2-7。

定子皆为隐极式结构, 嵌有三相星形联结的绕组。其中控制式发送机的定子绕组为正弦绕组, 以提高电气精度; 力矩式的定子绕组为双层短距绕组。转子皆为

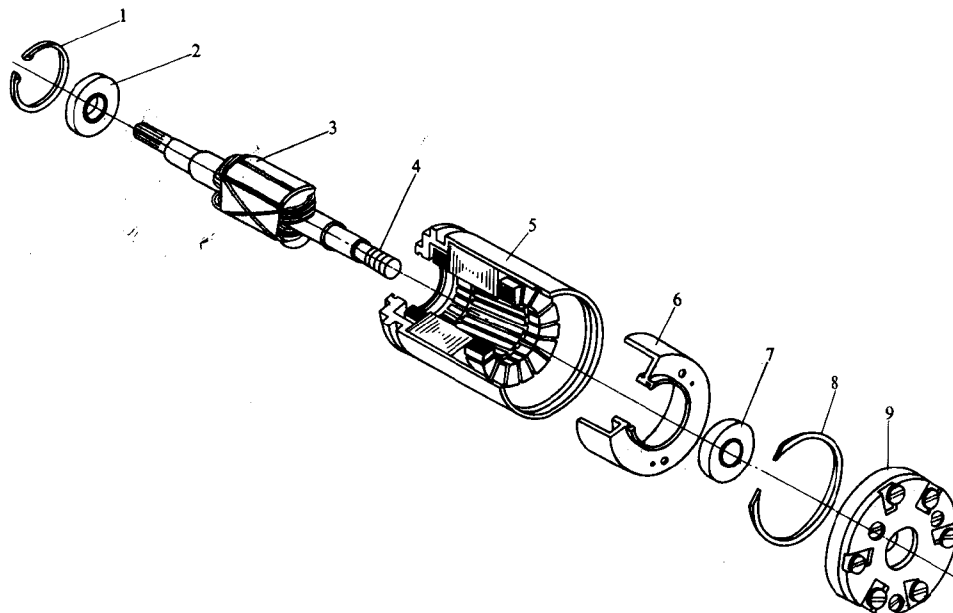


图 6-2-7 接触式自整角机的结构

1—挡圈 2—轴承 3—转子 4—集电环 5—定子 6—端盖 7—轴承 8—挡圈 9—接线板

凸极式结构,嵌有集中绕组作为励磁。与励磁绕组相交90°处嵌有一正交绕组(阻尼条),在力矩式自整角机中用于消除指示状态工作时转子所产生的振荡,减小阻尼时间,故此正交绕组称为阻尼绕组;控制式自整角机的正交绕组起着提高电气精度的作用,故称为补偿绕组。正交(阻尼)绕组的结构见图6·2-8。图6·2-8a为双阻尼绕组中的一个绕组。若力矩式自整角机的阻尼绕组不

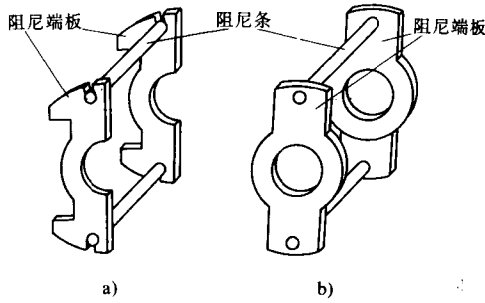


图6·2-8 正交(阻尼)绕组的结构
a) 双阻尼绕组 b) 单阻尼绕组

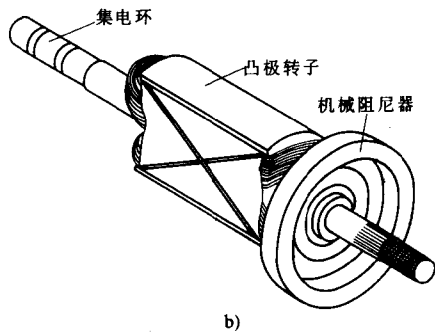
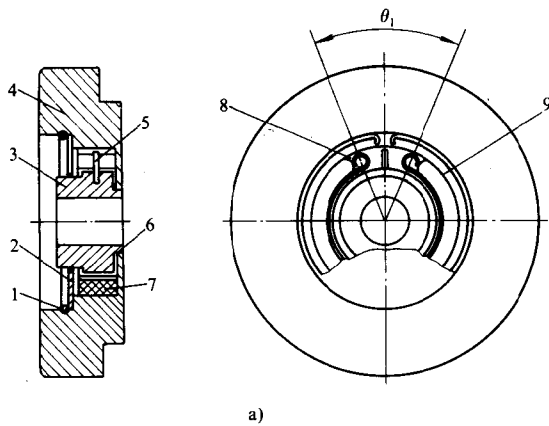


图6·2-9 机械阻尼器

- a) 结构 b) 装在转子上的机械阻尼器
1—弹性卡圈 2—盖板 3—轴套 4—飞轮 5—销钉
6—产生一级摩擦力矩的表面 7—摩擦片 8—弹簧圈
9—产生二级摩擦力矩的表面

能满足阻尼时间要求时,应装机械阻尼器,见图6·2-9。

控制式变压器(ZKB)的基本结构与图6·2-7相似,但转子为隐极式结构,嵌有单相正弦绕组,以提高电气精度并降低零位电压,见图6·2-10。

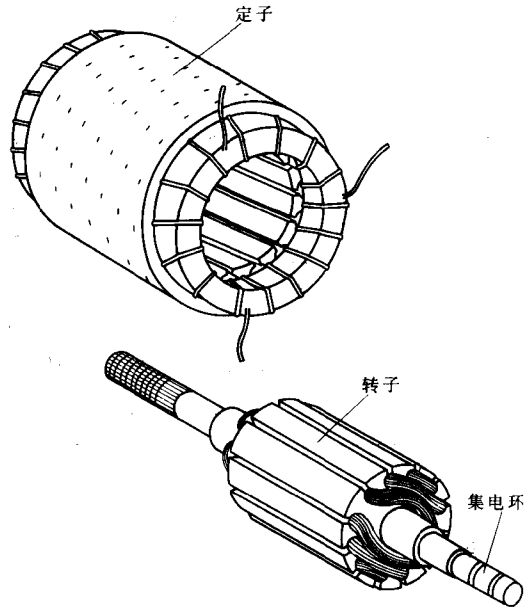


图6·2-10 自整角控制变压器的结构

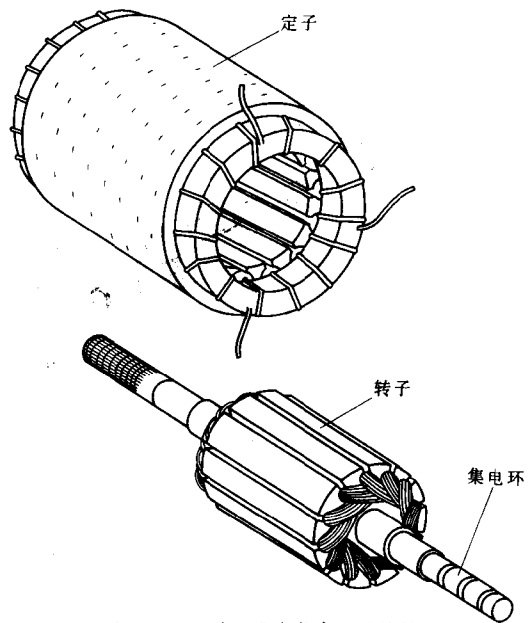


图6·2-11 差动式自整角机的结构

力矩式差动发送机(ZCF)、力矩式差动接收机(ZCJ)及控制式差动发送机(ZKC)的基本结构与图6·2-7相似,但转子为隐极结构,嵌有三相星形联结的

绕组, 故集电环上有三个滑环, 见图 6·2-11。

力矩式差动自整角机的定子及转子绕组一般为双层短距绕组, 而控制式差动自整角机则采用正弦绕组。为满足阻尼时间的要求, 力矩式差动接收机还应安装机械阻尼器。

2·3·2 无刷自整角机的结构

无刷自整角机有两种常见结构, 图 6·2-12 是具有轴向及径向两种磁路的无刷自整角机[⊙]。定子铁心 4 及定子导磁环 1 和 7 及转子的端部导磁体 6 为径向磁路; 转子铁心 5 及外导磁体 8 为轴向磁路, 见图虚线所示。图 6·2-13 是使用环形变压器来代替电刷及集电环

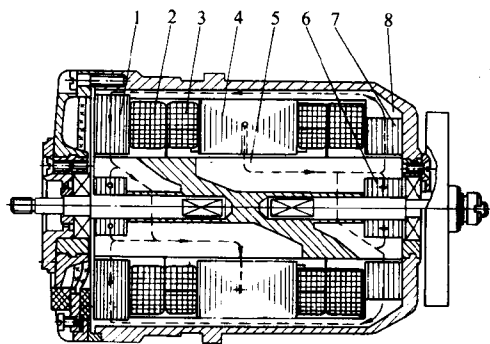


图 6·2-12 带轴向和径向磁路的无刷自整角机

1、7—导磁环 2—励磁绕组 3—定子绕组 4—定子铁心 5—转子铁心 6—端部导磁体 8—外导磁体

的无刷自整角机, 环形变压器的一次侧在定子, 二次侧

在转子, 通过电磁耦合, 使转子绕组从环形变压器的二次侧取得励磁。

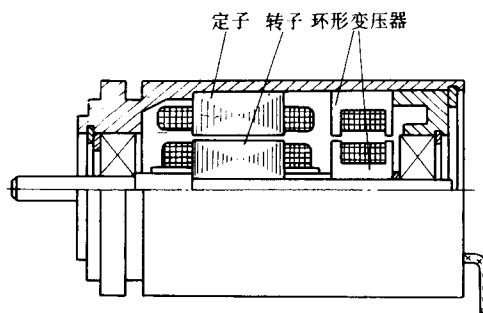


图 6·2-13 带环形变压器的无刷自整角机

无刷式自整角机由于没有电刷和集电环的滑动接触, 具有可靠性高、寿命长、不产生无线电干扰等优点。其缺点是结构较复杂、电气性能指标较差。但新一代的无刷自整角机的电气误差已小于 $5'$, 与有刷式的不相上下。因此, 军事装备、航天航空、重要工业装置已逐渐采用无刷式代替有刷式, 以保证满足装备的可靠性要求。

2·4 主要技术指标

按国家标准规定, 自整角机的鉴定试验应考核的技术指标多达 40 项。

2·4·1 控制式自整角机的主要技术指标 (表 6·2-3)

表 6·2-3 控制式自整角机的主要技术指标

名称	含义	数值范围	对系统的影响
电气误差	由于设计及工艺等原因, 自整角机的转角与定子绕组感应电动势的关系并不全都符合式 (6·2-1) 及式 (6·2-2), 其实际电气位置与理论电气位置之差为电气误差, 以机械 [角] 分表示	$3' \sim 15'$	使系统的精度下降
零位电压	自整角机转子处于电气零位时的输出电压, 也称剩余电压。由于设计及工艺等原因, 在 0° 、 60° 、 120° 、 180° 、 240° 、 300° 等六个电气零位的输出电压并不为零, 它包含与输出电压正交的基波分量和励磁电压频率奇数倍的各次谐波组成的分量	$50 \sim 180 \text{ mV}$	引起伺服放大器饱和, 造成系统的灵敏度下降
比电压	控制式变压器与发送机成对运行, 在协调位置附近单位失调角 (取 1°) 时, 控制式变压器的输出电压	数十 $\text{mV}/(^\circ)$ 至数 $\text{V}/(^\circ)$	比电压大, 可使系统灵敏度提高

⊙ 摘自参考文献 [6] 216 页, 是原苏联所采用的结构。

(续)

名称	含义	数值范围	对系统的影响
相位移	控制式变压器输出电压的基波分量与励磁电压的基波分量之间的相位差	$2^{\circ} \sim 20^{\circ}$	影响系统中伺服电动机的控制与励磁绕组的相位
接触可靠性	以电刷电流小于10mA, 转速为1r/min, 在完整一转内电刷与集电环间的接触电阻的变化 ΔR 来衡量。根据转子电阻 R_r 而有不同要求	$R_r \leq 200\Omega$ 时, $\Delta R \leq 1\Omega$; $R_r > 200\Omega$ 时, $\Delta R \leq 0.5\%R_r$	影响系统的运行可靠性
寿命	自整角机在规定转速(1150r/min)、各种姿态(水平、垂直、 45°)、各种温度(常温、高温、低温)下, 累计运行达到规定的时间。按规定检测各项目并合格	500, 1000, 2000h	影响系统寿命

2.4.2 力矩式自整角机的主要技术指标 (表 6.2-4)

表 6.2-4 力矩式自整角机的主要技术指标

名称	含义	数值范围	对系统的影响
比整步转矩	同型号的发送机与接收机成对运行, 在协调位置附近单位失调角取 1° 时, 在两者转轴上所产生的整步转矩 T_0	$0.03 \sim 38 \text{mN} \cdot \text{m}/(^{\circ})$	在摩擦力矩相同时, T_0 越大, 静态误差越小
最大静态整步转矩	同型号的发送机与接收机成对运行, 随着失调角的增大, 两者转轴上所产生的静态整步转矩亦增大, 但有一极大值, 超过此极大值后要发生失步, 此转矩称为最大静态整步转矩	T_0 越大, 它亦越大。发生在失调角为 90° 附近	最大静态整步转矩大, 表示能传递的负载转矩也大
静态误差	同型号的发送机与接收机成对运行, 在静态协调时, 两者转子转角之差称为静态误差	$0.5^{\circ} \sim 2^{\circ}$	静态误差小, 系统的指示精度高
阻尼时间	同型号的发送机与接收机成对运行, 当失调角为 $175^{\circ} \sim 179^{\circ}$ 时, 接收机由失调位置重新稳定到协调位置所需时间	$< 3\text{s}$	阻尼时间短, 表示系统的稳定性好

注: 力矩式自整角机的主要技术指标还有电气误差、零位电压、接触可靠性及寿命等, 其含义、数值范围及对系统的影响与表 6.2-3 控制式自整角机的相应指标相同。

2.5 设计特点

2.5.1 电磁设计特点[⊖]

电磁设计以尽可能获得高精度为首要目标, 故采取以下措施:

(1) 三相绕组采用正弦绕组或不等匝绕组, 以尽量降低磁动势的谐波分量, 达到气隙磁通密度逼近正弦分布的要求, 保证精度指标。

(2) 采取低磁通密度设计方案, 避免因磁路的局部饱和而导致精度的下降。

(3) 采取合适的齿槽配合及斜槽系数, 以削弱齿

谐波, 提高精度。

(4) 采用合适的凸极转子极弧系数, 以提高气隙磁通密度分布的正弦性。

2.5.2 结构设计特点

自整角机的结构设计以尽可能提高可靠性与延长寿命为主要目标, 并采取以下措施:

(1) 电刷及集电环采用导电性能优良、耐磨性能好的金基合金材料, 经热处理可增加硬度, 提高耐磨性能,

⊖ 摘自参考文献 [1]。