

高等学校试用教材

控 制 电 机

天津大学杨渝钦主编



机械工业出版社

控制电机

天津大学杨渝钦 主编

*

机械工业出版社出版 (北京阜成门外百万庄南街一号)

(北京市书刊出版业营业许可证出字第 117 号)

国防工业出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

*

开本 $787 \times 1092/16$ · 印张 $16\frac{1}{4}$ · 字数 393 千字

1981年8月北京第一版·1981年8月北京第一次印刷

印数 00,001—14,800 · 定价 1.70 元

*

统一书号: 15033·5073

前 言

本书是根据 1978 年 4 月在天津召开的高等学校一机部对口专业座谈会的精神和同年 6 月在长沙召开的电机专业教材会议审定的《控制电机》教材编写大纲编写的。

全书共分五章,包括伺服电动机、测速发电机、自整角机、旋转变压器和自动控制系统中的同步电动机。书末附有附录,介绍了控制电机的有关特性和精度的测量方法。书中带 * 号的部分可作为选学内容。

本书从各类控制电机的基本电磁关系出发,阐明其物理概念,再进一步深入分析其工作原理和运行性能;结合各类控制电机的理论分析,分别介绍了对称分量法、 $dq0$ 坐标系统的变换和气隙磁导波理论等分析方法;举例介绍了各类控制电机在自动控制系统中的应用,同时,考虑到控制电机与系统的联系及其影响已成为使用中的一个重要问题,对有关控制电机的动态特性作了相应的分析;本书力求反映当前国内外控制电机的发展情况,较为详细地阐述了无刷直流电动机、力矩电动机、多极自整角机和多极旋转变压器、双通道自整角机和双通道旋转变压器、感应移相器、感应同步器、步进电动机、平面电机和低速同步电动机等新型电机,又适量地介绍了霍尔效应直流测速发电机、霍尔效应旋转变压器和自整角机,内容较新。

本书可作为高等院校电机专业选修课程的试用教材,也可作为有关专业的教学参考书,并可供有关工程技术人员自学和参考。

本书由天津大学杨渝钦同志主编,上海工业大学欧阳珂同志参加编写,其中第一章、第二章、附录一和附录二为欧阳珂同志编写,其余各章及有关部分均由杨渝钦同志编写。全书由浙江大学沈云宝同志主审。

在编写过程中,上海工业大学电机教研室和天津大学电机教研室的部分同志进行了认真的深入的讨论,提出了宝贵意见,谨在此表示衷心的感谢。

由于编写者水平所限,加上时间仓促,书中的缺点和错误在所难免,欢迎广大读者批评指正。

一九八〇年三月

符 号 表

一、角标符号

a	电枢的(或整步绕组的)、有功的
av	平均的
c	控制绕组的、导体的
ca	电容的
cp	补偿的
d	直轴的、动态的
D	阻尼的
e	电气的、等效的、误差、涡流的
f	激磁(或励磁)绕组的、激磁回路的
i	瞬时的、理想的、内部的
K, k	短路的、堵转的
l	负载的
m	幅值、磁的、机械的、测定的
max	最大
min	最小
n	法向的
N	额定的
o	空载的、圆形旋转磁场的
q	交轴的、正交的
r	转子的、剩余的、径向的、无功的
ref	基准的
rsi	合成的
s	定子的、静态的、同相的、同步的
st	起动的
suc	连续的
t	切向的
1	输入、正序分量的、发送机的、序号
2	输出、负序分量的、接收机的(或变压器的)、序号
$\prime$	折合值
$*$	标么值
σ	漏磁的
δ	气隙的

二、基本符号及有关符号说明

B	磁通密度(磁密)
B_{δ}	气隙磁密的幅值

D	气隙平均直径
Dia	电枢内径
e	绕组感应电势的瞬时值
E_a	电枢电势、 a 相绕组电势
E_H	霍尔电势
f	频率
f_e	函数误差
F	合成磁势(幅值)、作用力
F_{ad}	电枢反应磁势的直轴分量(幅值)
F_{aq}	电枢反应磁势的交轴分量(幅值)
$F(p)$	传递函数
g	重力加速度
G	重量
h	下落距离
i	电流的瞬时值、齿轮的减速比
i_{em}	电磁减速系数
I	整步绕组各相回路中最大电流的有效值、绕组电流有效值
I_{ca}	控制绕组电流的有功分量
I_d	直轴等效绕组电流、电枢绕组电流的直轴分量
I_{da}	激磁绕组回路电流的有功分量
I_q	交轴等效绕组电流、电枢绕组电流的交轴分量、交轴绕组回路电流
J	转动惯量
K_e	电势常数
K_t	转矩常数
K_u	变压比
$K_w(K_{w1})$	基波绕组系数
K_{wv}	v 次谐波的绕组系数
l	长度
L	电感
m	相数
n	转速、有效匝数比
n_o	理想空载转速
n_{m*}	最大转速标么值
N	绕组(每相)匝数、绕组(每极)匝数

p	极对数、算符 ($p = \frac{d}{dt}$)	x_{af}	整步绕组和激磁绕组的互感电抗
P	有功功率	x_{ad}	整步绕组和阻尼绕组的互感电抗
P_h	磁滞损耗	x_{aq}	整步绕组交轴自电抗、交轴电枢反应电抗
P_{em}	电磁功率	x_d	整步绕组直轴全电抗、直轴同步电抗
P_2	输出机械功率	x'_d	整步绕组直轴短路电抗
r	半径、电阻 (通常指电机绕组电阻)	x_D	交轴阻尼绕组全电抗
r'_d	整步绕组直轴短路电阻	x_{Dq}	交轴阻尼绕组自电抗
r_{Fe}	铁耗等效电阻	x_f	激磁绕组全电抗
r'_q	整步绕组交轴短路电阻	x_{fd}	激磁绕组自电抗
R	电阻 (通常指电机外部电阻)	x_q	整步绕组交轴全电抗、交轴同步电抗
s	转差率、距离	x'_q	整步绕组交轴短路电抗
s_m	最大转矩时转差率	Z	齿数、阻抗
S	视在功率	Z_{c1}, Z_{c2}	控制绕组的正序阻抗和负序阻抗
t	时间	Z_{f1}, Z_{f2}	激磁绕组的正序阻抗和负序阻抗
T	转矩、整步转矩、周期	Z_{ia}	自整角变压器整步绕组 (每相) 等效阻抗
T_{dm}	最大动态转矩	Z_o	定子绕组的空载阻抗
T_e	涡流转矩	α	信号系数、角度、转子转角、加速度
T_{em}	电磁转矩	α'	有效信号系数
T_{hm}	最大磁滞转矩	α_c	导通角
T_{KO}	圆形旋转磁场时的堵转转矩	α_m	磁状态角
T_{Sm}	最大静态转矩、静态整步转矩最大值	α_p	位置传感器扇形片张角
T_θ	比整步转矩	β	位置角、相位角
u_θ	比电压	θ	角位移、转子转角、失调角
Δu	线性误差	θ_s	步距角
ΔU_b	电刷电压降	θ_1	发送机转子位置角
U	电压	θ_2	接收机 (或自整角变压器) 转子位置角
U_d	直轴等效绕组电压	λ	气隙比磁导
U_q	交轴等效绕组电压	λ_1	气隙比磁导基波幅值
U_{rq}	剩余电压的正交分量	Λ	磁导
U_{rs}	剩余电压的同相分量	ν	谐波次数
U_0	零位电压	τ	极距、时间常数
U_{2cp}	补偿点的输出电压	τ_{me}	伺服电动机的机电时间常数
U_{2m}	最大输出电压的有效值	φ	功率因数角、转子转角、相位移
V	体积	Φ, ϕ	磁通
W	绕组 (或线圈)	Ψ, ψ	磁链、相位角
W_m	磁场能量	ψ_0	零序磁链
x	电抗	ω	电角速度
x_{ad}	整步绕组直轴自电抗、直轴电枢反应电抗	Ω	机械角速度
		Ω_0	理想空载角速度、自然振动角频率

目 录

前言

符号表

绪论 1

第一章 伺服电动机 9

§ 1-1 概述 9

§ 1-2 直流伺服电动机 9

*§ 1-3 无刷直流电动机 17

§ 1-4 交流伺服电动机 26

§ 1-5 力矩电动机 54

*§ 1-6 伺服电动机的应用举例 59

思考题 61

第二章 测速发电机 62

§ 2-1 概述 62

§ 2-2 直流测速发电机 63

§ 2-3 交流测速发电机 66

*§ 2-4 霍尔效应无刷直流测速发电机 80

*§ 2-5 测速发电机的应用举例 83

思考题 84

第三章 自整角机 86

§ 3-1 概述 86

§ 3-2 力矩式自整角机的结构和运行性能 88

§ 3-3 $dq0$ 系统坐标变换 98

§ 3-4 通过坐标变换, 研究力矩式自整角机的运行性能 114

§ 3-5 阻尼绕组 124

*§ 3-6 多台自整角接收机的并联使用 126

*§ 3-7 力矩式自整角机的应用举例 129

§ 3-8 控制式自整角机的结构和运行性能 129

*§ 3-9 多台自整角变压器的并联使用 134

§ 3-10 差动自整角机的结构和运行原理 136

*§ 3-11 差动自整角机的应用举例 139

§ 3-12 无接触式自整角机 140

§ 3-13 双通道自整角机 142

思考题 145

第四章 旋转变压器 147

§ 4-1 概述 147

§ 4-2 正余弦旋转变压器的工作原理 149

*§ 4-3 正余弦旋转变压器的数学分析 156

§ 4-4 线性旋转变压器 162

§ 4-5 旋转变压器的误差及其改进方法 167

*§ 4-6 旋转变压器的应用举例 172

§ 4-7 感应移相器 180

*§ 4-8 多极旋转变压器和感应同步器 191

*§ 4-9 霍尔效应旋转变压器和自整角机 195

思考题 196

第五章 自动控制系统中的同步电

动机 197

§ 5-1 概述 197

§ 5-2 步进电动机 197

§ 5-3 平面电机 214

§ 5-4 低速同步电动机 217

§ 5-5 磁滞电动机 230

思考题 236

附录 237

附录一 伺服电动机的转动惯量和机电时间常数的测量 237

附录二 异步测速发电机的线性误差和相位误差的测量 238

附录三 自整角机的精度测量 242

附录四 正余弦旋转变压器的精度测量 246

附录五 微型控制电机型号命名方法 250

附录六 微型控制电机产品名称代号 251

主要参考书 252

绪 论

一、控制电机的基本用途和分类

随着自动控制系统和计算装置的不断发展，在普通旋转电机的基础上产生出多种具有特殊性能的小功率电机，它们在自动控制系统和计算装置中分别作为执行元件、检测元件和解算元件，这类电机统称为控制电机。虽然，从基本的电磁感应原理来说，控制电机和普通旋转电机并没有本质上的差别，但普通旋转电机着重于对起动和运行状态力能指标的要求，而控制电机则着重于特性的高精度和快速响应。

控制电机的输出功率较小，一般从数百毫瓦到数百瓦；系列产品的外径一般由12.5毫米到130毫米；重量从数十克到数千克。但是在大功率的自动控制系统中，有些控制电机的输出功率也可达数十千瓦，机壳外径也可达数百毫米。

控制电机已经成为现代工业自动化系统、现代科学技术和现代军事装备中必不可少的重要元件。它的使用范围也非常广泛。例如：火炮和雷达的自动定位，舰船方向舵的自动操纵，飞机的自动驾驶，遥远目标位置的显示，机床加工过程的自动控制和自动显示，阀门的遥控，天文望远镜和大型绘图机的自动控制，以及电子计算机、自动记录仪表、医疗设备、录音、录象、摄影等方面的自动控制系统。下面仅以雷达天线和显示管偏转线圈的随动系统为例，简要介绍一些控制电机在自动控制系统中的基本用途。

当雷达搜索飞机目标时，雷达天线由力矩电动机驱动不断进行旋转扫描。同时，雷达发射机发出强大的无线电波四处搜索，当无线电波遇到飞机时，它的能量就从飞机再向四周幅射，其中一部分被反射到发射地点，又被雷达天线接收，经过雷达接收机，在显示管的荧光屏上反映出来，如图0-1所示。根据无线电波从发射到接收的时间，便可计算出飞机和雷达之间的距离。飞机的方位则可通

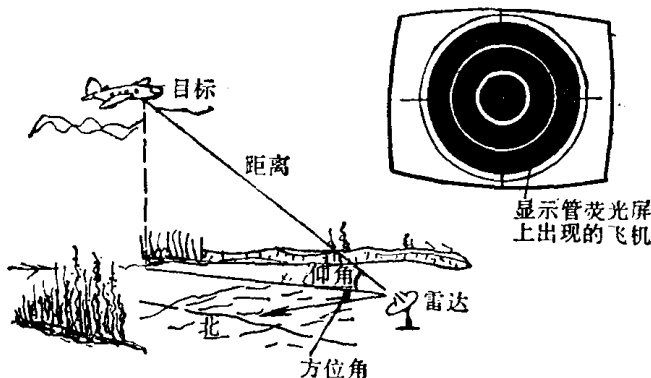


图0-1 雷达扫描示意图

过雷达天线的方位角来确定。在雷达扫描过程中，力矩电动机直接接到电源上，由它带动天线搜索目标。一旦找到目标后，雷达收到反射回来的电波，力矩电动机立即自动与原来的电源断开，转而接受雷达接收机控制。雷达天线将跟踪飞机作缓慢转动。为了使控制室内雷达显示管偏转线圈的转角完全对应于雷达天线的偏转角，这就需要采用图0-2所示的自整角机和伺服机构所组成的随动系统。

飞机继续飞行，雷达天线将由力矩电动机带动转过一个 θ 角，经齿轮和天线啮合的自整角发送机也转过同样的 θ 角。自整角变压器与发送机之间便出现相应的角差 θ 。此角差

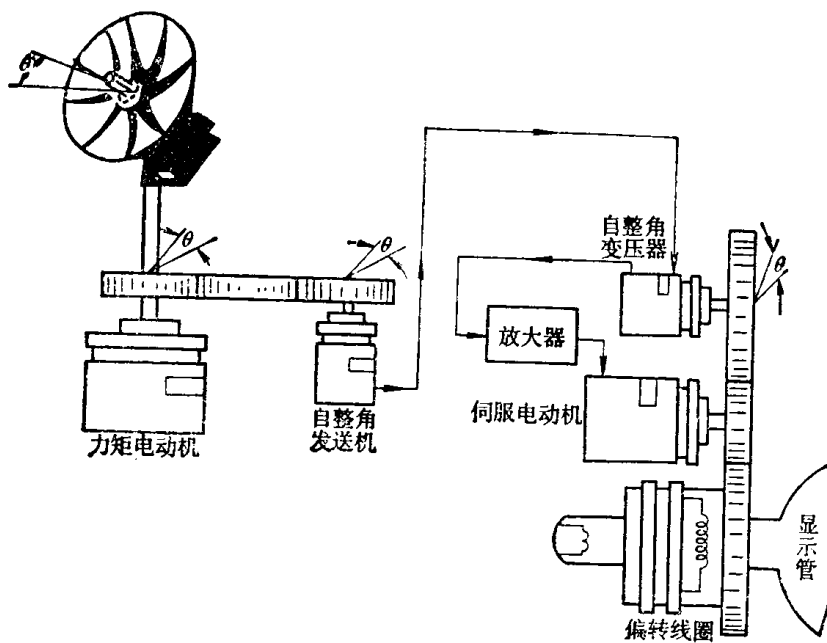


图0-2 雷达天线和显示管的偏转线圈随动装置图

θ 又使自整角变压器的输出绕组产生相应的输出电压，经放大器放大后，作为控制电压再加到伺服电动机的控制绕组中，从而使电动机转动。此时，伺服电动机既带动雷达显示管的偏转线圈，又带动自整角变压器的转子。自整角变压器的转子转动后，它与发送机之间的角差逐渐减小，输出电压也随之变小，直到自整角变压器转子转过 θ 角后，它与发送机又处于新的协调位置，此时角差 θ 为零，相应的输出电压也为零。伺服电动机则因控制电压为零而停转。这样，雷达显示管的偏转线圈随之转过同样的 θ 角后，使目标在荧光屏相应的确定位置上显示出来。

如果再把自整角变压器的输出信号送到具有自动瞄准装置的火炮控制系统中，经过比较和放大后，使执行元件动作，带动炮筒转到和雷达天线相一致的空间位置对准目标，就组成了火炮自动瞄准系统。

为了保证雷达系统的高精度和运行的稳定可靠，实际系统要复杂得多。除需要复杂的电子设备以外，还应包括其他控制电机所组成的位置和速度反馈回路。

从上述例子可以看到，自整角发送机和变压器组成了检测装置。它们将天线转动的角度位置变换成电压信号，这种检测角位移并使之变换成电压信号的元件，又称为传感元件。伺服电动机和放大器组成了执行机构。它仅在控制电压信号加入时才能旋转，转速的高低也和控制电压有关，当控制电压为零时，电动机立即停转，所以伺服电动机在系统中作为执行元件。力矩电动机在这里也起了执行元件的作用。

各种控制电机的用途和功能尽管不同，但基本上可划分为信号元件和功率元件两大类。凡是用来转换信号的都为信号元件；凡是把信号转换成输出功率或把电能转换为机械能的都为功率元件。下面简要介绍一些常用控制电机的用途和分类情况。

第一类作信号元件用，有：

(一) 旋转变压器（包括多极旋转变压器）

普通的旋转变压器都做成一对极。其输出电压是转子转角的正弦、余弦或其他函数。主要用作坐标变换、三角运算，也可以作为角度数据传输和移相元件（如感应移相器）使用。

多极旋转变压器是在普通旋转变压器的基础上发展起来的一种多对极的、精度可达角秒级的元件，在高精度解算装置和多通道系统中用作解算和检测元件。

（二）交流和直流测速发电机

测速发电机的输出电压精确地与转速成正比、在系统中用来检测转速或进行速度反馈，也可以作为微分、积分的计算元件。

（三）自整角机（包括多极自整角机）

自整角机的基本用途是角度数据传输。一般是两个以上元件对接使用。输出电压信号的属于信号元件；而输出转矩的属于功率元件。信号元件的输出电压是两个元件转子角差的正弦函数。功率元件的输出转矩也近似为两个元件转子角差的正弦函数。

多极自整角机是在普通自整角机的基础上发展起来的一种多对极的精密元件，在多通道系统中作为检测元件。

（四）感应同步器

它是利用多极旋转变压器的原理，采用印制绕组形式的精密检测元件。用作直线位移和角位移的检测。直线位移的精度可达微米级，角位移精度可达到角秒级。

第二类作功率元件用，有：

（一）交流和直流伺服电动机

伺服电动机是一种受输入电信号控制、并作快速响应的电动机。其堵转转矩与控制电压成正比，转速随转矩的增加而近似均匀降低。实际使用时通常经齿轮减速后带动负载，在系统中作为执行元件。

（二）步进电动机

步进电动机的定子铁心上放置多相绕组，并由专用电源供给电脉冲。它的角位移与所接受的电脉冲数成正比，其转速与每秒的电脉冲数成正比。通常用在开环系统中作为执行元件。

（三）力矩电动机

力矩电动机能在长期堵转状态下工作，低速运转时能产生足够大的转矩。在系统中通常用作直接驱动负载的执行元件。

（四）低速电动机

它是一种不需要齿轮减速、转速为每分钟数十转至数百转的特殊电动机。其转动惯量较小，起动和停止较快。常用的交流低速同步电动机，通以交流电时可作低速旋转；通以电脉冲时可作步进运转。在系统中通常作为直接驱动负载的执行元件。

此外，磁滞电动机在系统中通常用作恒速负载的驱动电动机，有时也可作为执行元件。

二、对控制电机的基本要求

控制电机作为自动控制系统中的一类重要元件，其性能好坏将直接影响到整个控制系统的工作性能。如果控制电机的性能不佳或使用不当，整个控制系统的性能就难以提高。现代自动控制系统对控制电机除了要求其体积小、重量轻、耗电少以外，还要求它有高可

靠性、高精度和快速响应。

(一) 高可靠性

控制电机的工作可靠性对保证自动控制系统的正常工作极为重要。在宇宙航行系统、军事装备和一些现代化的大型工业自动化系统中,对所用控制电机的可靠性总是提出第一位的要求。如采用自动化程序生产的炼钢厂,一旦伺服机构中的控制电机发生故障,就会造成停产事故,甚至损坏炼钢设备。此外,如核反应堆中使用的执行元件,由于工作条件所限,不便于维修,要求能够长期可靠地工作。

据概率计算,如果元件的可靠性是 99.5%,则 40 个元件所组成的系统的可靠性仅为 0.995^{40} ,即 81.8%;100 个元件组成的系统,其可靠性仅为 60.5%。一套自动控制系统有时要使用数十台甚至数百台控制电机,它们在系统中又往往处于关键地位,因此,强调可靠性是不容置疑的。据统计,控制电机的故障约 90% 是发生在电刷、滑环或换向器以及轴承等方面。显然,有刷产品的接触不可靠是一个普遍存在的问题。一般有刷直流电机的寿命仅为 350~400 小时左右,而无刷直流电机的寿命可长达 20000 小时。尽管无刷电机的成本较高,但无需长期维修、对电子设备无干扰和不会产生由火花引起的可燃性气体爆炸事故等优点,使得系统的可靠性大大提高。

(二) 高精度

在各种军事装备、无线电导航、无线电定位、位置指示、自动记录、远程控制、机床加工自动控制等系统中,对精度要求越来越高,因而相应地对这些系统所使用的控制电机在精度方面也提出了更高、更新的要求,有时候它们的精度对系统起着决定性的作用。以常见的角位检测系统为例,精度要求较高的是几角分,而某些高精度系统则要求几十个甚至几个角秒。控制电机的精度,主要是对信号元件而言,它包括静态误差、动态误差,使用环境的温度变化、电源频率、电压变化等所引起的漂移。从广义而言,也适用于功率元件,如同步电动机特性的线性度和失灵区,步进电动机的步距精度等,这些也都直接影响到控制系统的精度。

(三) 快速响应

由于自动控制系统中主令信号变化很快,所以要求控制电机特别是功率元件能对信号作出快速响应。表征快速响应的主要指标是机电时间常数和灵敏度。这些又直接影响系统的动态误差、振荡频率和振荡时间。

三、控制电机的主要特点

普通旋转电机都作为动力来使用,其主要任务是进行能量转换,关键是如何提高能量转换的效率。控制电机虽然是在普通旋转电机的基础上发展起来的,但它在自动控制系统中担负着某些特定任务,通常是进行控制信号的转换或传送,而能量转换是次要的。根据使用要求和完成任务的特点,要求它们有高可靠性、高精度和快速响应特性,相应地,在设计、材料选用、制造工艺、生产组织和试验量测等方面也具有许多不同的特点。

(一) 设计特点

1. 设计功率元件时,首先着眼于特性要求,其次才考虑力能指标;设计信号元件时,主要着眼于精度和阻抗,而把能量转换放在次要的地位。

为了满足控制电机的性能要求,设计时需要选用一些特殊的材料。如铁心材料,除了

部分控制电机选用硅钢片外，还经常采用铁镍软磁合金钢片。又如交流测速发电机，为了增大转子空心杯的电阻并具有较高的电阻温度系数，通常选用锡锌青铜或硅锰青铜作为空心杯的材料。

2. 气隙磁场波形是保证信号元件高精度的基础，也是保证功率元件高灵敏度及其特性要求的必要前提。因此保证电机磁路的对称性以及使绕组导体沿铁心圆周的分布规律服从于磁场波形的要求（如正弦绕组），也就成为控制电机设计中的重要特点。

3. 考虑到控制电机工作环境的温度变化、接触电阻的变化、负载变动、电压大小和频率波动等影响，设计时需采取相应的补偿措施。其次，还应满足控制电机的特殊使用场合所提出的要求，如地下、水面、海洋、高空、高温、低温、盐雾、潮湿、冲击、振动、加速度、幅射等。此外，设计时还应采取有效措施，解决如热膨胀、腐蚀、接触导电部件加速磨损以及噪声、对无线电的干扰等问题，并确保控制电机结构的可靠，使其能长期稳定地运行。

（二）工艺特点

由于控制电机要求高精度，除了在设计时采取必要的措施外，在制造工艺上也需要有特殊的工艺方法加以保证。事实上，控制电机的精度常常是由工艺水平来决定的。控制电机的制造工艺特点是：保证定、转子的高同心度、磁路的对称和电路的平衡。具体的要求是

1. 定、转子槽的分度必须精确，其误差要小到十几个角分，甚至几个角分。为此，需要采用复式冲模来保证。

2. 要求电机铁心的导磁性能各向同性。为此，冲片叠装时，采用每片错过一个齿槽的旋转形叠片法。铁心的固紧，在交流控制电机中，一般不采用螺栓或铆钉而是用树脂将其粘合成整体。铁心加工工序间的运输和传递，要有专用的定位器具，以防止零、部件的变形，也避免对于应力敏感的磁性材料的磁性能变坏。

3. 绕组匝数要准确，有时还要求各相绕组的电阻值相等。

4. 零、部件的机加工精度要求较高，大部分零、部件的配合尺寸要求达到一、二级精度。为了保证定、转子的高同心度，定子的加工有时采用“一刀通”的工艺。

5. 装配环境要求高度清洁，并保持一定的温度和湿度。

6. 绝缘处理和热处理等专业工艺较多，而且工艺规范要求严格。

因此，控制电机在加工制造中，工艺装备系数比普通旋转电机高得多。

（三）试验特点

1. 由于各种控制电机有不同的性能要求，因此它们的性能试验项目也各不相同。各类产品除了有共同性的试验项目外，还各有其专门的试验项目。

控制电机的共同性试验项目有：接触可靠性试验（对有电刷、滑环的产品）、绝缘介电强度试验、绝缘电阻测量、温升试验（通常在功率元件中进行）、低温试验、高温试验、振动试验、振动强度试验、冲击试验、噪声试验、耐潮试验、寿命试验。有些产品还要进行低温和高温低气压试验、加速度试验和无线电干扰试验等。

有些试验项目要求在标准环境下进行。

2. 专用试验设备多，要求精度高。如角位、位移、相位、小转矩和转速测量仪器，稳

频、稳压电源，稳速装置和无感电阻箱等。这些仪表和设备精度有的要比产品精度高一个数量级。

3. 由于控制电机的容量一般较小，所以在试验中对仪表的选择、试验线路的连接以及因仪表产生的分流、分压等因素都要予以必要的修正。

控制电机在自动控制系统中有多种用途，所以它的品种、规格繁多。虽然它的总产量很大，但每种规格、每批的生产量相对来说又比较小。因此它的生产特点是：产品品种多、批量小。为此控制电机的标准化、系列化和结构件的通用化程度较高。

四、控制电机的发展概况

控制电机属于电机制造业中的一个新兴部门。它的历史较短，但发展迅速，其品种规格繁多是普通电机所不可比拟的。在国外，从二十世纪三十年代开始，随着工业自动化、科学技术和军事装备的发展而迅速发展起来，其使用领域也日益扩大。到四十年代以后，逐步形成了自整角机、旋转变压器、交、直流伺服电动机，交、直流测速发电机等一些基本系列。六十年代以后，由于电子技术、宇宙航行等科学技术的飞速发展和自动控制系统的不断完善，对控制电机的精度和可靠性又提出了更高的要求。控制电机的品种也日益增多。在原来的基础上又系列生产出多极自整角机、多极旋转变压器、感应同步器、无接触自整角机、无接触旋转变压器、永磁式直流力矩电动机、无刷直流伺服电动机、空心杯电机、永磁式直流伺服电动机、印制绕组直流伺服电动机、低速同步电动机等。至于因特殊需要而生产的品种就更多，如音圈电机、平面电机、特殊函数旋转变压器（正割、正切、倒数、对数、弹道函数等）、各种直线电机（直线步进电动机、直线测速发电机、直线自整角机等）、高速电动机、低速电动机等。

在有些科学技术较先进的国家中，近十几年来，控制电机的年生产增长率约为10~20%，其增长速度将超过普通电机。

我国控制电机制造业是在六十年代前后才开始全面发展起来的。开始阶段主要是进行产品仿制，到六十年代后期就进入了自行设计和研制阶段，逐步形成了我国自己的自整角机、旋转变压器、直流伺服电动机、鼠笼转子两相伺服电动机、磁滞同步电动机等系列，品种规格近千种。此外，为整机配套也进行了某些机种的设计研制工作，填补了一些空白，有些控制电机的单项性能指标已达到世界先进水平。同时，在控制电机的生产中进行了标准化、系列化工作，已经建立起能适应我国国民经济需要、初具规模的专业生产体系。

由于我国控制电机的发展历史较短，生产实践经验不足，与国外先进水平相比还有一定的差距，尤其是产品的性能和品种规格方面差距甚大。其次，生产效率较低、成本高，新工艺和新技术推广较慢，新材料无法满足生产上的需要，这些问题都还需要今后努力加以解决。此外，产品的可靠性和使用寿命同国外相比差距也较大。

近年来，随着控制系统的不断完善和更新，控制电机也有许多新的发展动向，大致有以下几个方面。

（一）提高精度

由于控制系统对电机性能的要求越来越高，提高精度乃是控制电机的发展方向之一。为了提高精度，除了从单台控制电机着眼，在设计、工艺和材料选用方面加以改进外；目前也着重于结构上的更新，这方面又常常与系统线路的改进结合起来。如选用自整角机进

行角度数据传递,过去都用两极自整角机组成的单通道系统,精度受到限制。现在,一些高精度系统中常常采用由两极和多极自整角机组成的电气变速的双通道系统,它的精度可提高到几十角秒,甚至几个角秒。

(二) 提高可靠性和适应性

为了提高控制电机的可靠性,除了在电机结构上不断改进,使其能长期可靠地运转外,十几年来国外一直致力于发展各种无刷电机,取得颇为显著的成果。相继研制出各类无刷控制电机,如无接触自整角机、无接触旋转变压器、无接触式感应移相器、无刷直流伺服电动机、无刷直流力矩电动机及无刷直流测速发电机等。

由于控制电机的使用范围日益扩大,一些现代科学技术部门如火箭、导弹、人造卫星、宇宙航行以及核反应堆等都广泛使用各种控制电机,因此,要求各种控制电机能在不同环境条件下工作。许多系列产品就能使电机在 $-55\sim+125^{\circ}\text{C}$ 范围内正常运行。有些特殊场合甚至要求控制电机在温度高达 $250\sim300^{\circ}\text{C}$ 的环境下工作;而在深冷技术中所应用的控制电机,则要求能在零下 200°C 以下的环境中正常运行。有些在地下或高压溶液中工作的电机,要求能在几十个大气压下正常运转;而在高空飞行器中又要求能够适应高真空度。在火箭、导弹等方面使用的控制电机,则要求它具有特高的耐冲击、振动的性能。对在核反应堆中使用的各种控制电机,又要求它具有防辐射的性能。

(三) 小型化

由于大规模集成电路的广泛应用,为自动控制系统小型化创造了条件,相应地要求控制电机也能满足整机小型化的要求。因此,小型化问题已成为当前控制电机研究中迫切需解决的问题之一。特别在高空飞行器中,其重量每增加一公斤,则每小时就要多消耗燃料 100 公斤,数字相当可观。

控制电机的小型化,除了指它的体积和重量以外,还指它的功率消耗。在近代的电子设备中,电机往往是耗电量最大的元件之一。尤其在宇宙航行系统中,通常以燃料电池或太阳能电池供电,因此所用电气元件的耗电量受到严格限制。所以,减小电机损耗,提高单位体积输出功率成为一个重要的研究课题。

为了使控制电机小型化,通常采取:改进设计、简化结构;采用新材料(如稀土-钴合金永磁高磁能材料、高聚合物新型绝缘材料);选用先进工艺;发展组合电机(如伺服测速机组、双通道自整角机、直流力矩测速机组)等有效措施。

(四) 发展特殊用途和特殊性能的控制电机

目前,在自动化系统中,常用数字计算机进行控制,而其输出设备中都要将数字信号转换成角位移或线位移,即实现数-模转换。步进电动机的工作特性完全适应这种要求,而且步距误差不会长期积累,保证了系统断续位移的精度,所以在开环控制的数控机床中应用了高速大功率步进电动机,并使步进电动机的研究得到了较快发展。

在数字计算机的输入设备中,通常采用自整角机或旋转变压器来进行模-数转换。为了适应数字技术的需要,国外近年来发展了多相自整角机和旋转变压器。如用 5 相或 10 相来适应 10 进制;用 8 相或 16 相适应 2 进制;用 9 相或 18 相来适应角度数字等。此外,还为电子计算机的磁盘存储装置设计了供直接驱动磁头用的音圈电机;为驱动磁带机设计了时间常数在 1 毫秒以下的各种低惯量电机。

在现代高速摄影、录象、激光技术和陀螺仪中，为提高整机的精度和稳定性，都需要使用高速电机。转速一般高达 6~24 万转/分，某些场合还需要超过 50 万转/分的超高速电机。为了适应高速电机的要求，又研制了静压式空气轴承、动压式气体轴承，美国还在研制超强磁体转子，利用磁悬浮现象的无轴承高速电机方面取得了一定成效。

为了提高系统的精度，省去齿轮减速机构，并使体积缩小、重量减轻，在国外已系列生产低速直流力矩电动机。在无线电传真机中也已采用高瞬时转速稳定度的低速同步电动机。

此外，为了满足某些系统的需要，近年来又逐步发展了各种直线电动机、直线自整角机、直线位移测速发电机。在记录仪、绘图仪中又采用了 $x-y$ 双向运动的平面电机等。

（五）开展新原理、新结构电机的研制工作

由于新原理、新技术、新材料的发展，使电机在很多方面突破了传统的概念。国外近几年来结合科学技术的最新成就，已研制出一些新原理、新结构的电机，这也是一个值得重视的动向。如利用“霍尔效应”相继研制成霍尔效应的自整角机及旋转变压器，霍尔效应无刷直流测速发电机，带有霍尔元件位置检测器的无刷直流电动机；利用“压电逆效应”研制出压电同步电动机、压电直线步进电动机（其步距可达到 0.1 至 5 微米）；利用“介质极化”研制出驻极体电机；利用“磁性体的自旋再排列”研制出光电机。此外，还有电介质电动机、静电电动机、集成电路电动机等。到目前为止，除带有霍尔元件位置检测器的无刷直流电动机和霍尔效应无刷直流测速发电机已有应用外，其他一些新原理、新结构电机大都属于研究阶段，需要不断地改进和完善。有些材料，如霍尔元件、压电陶瓷材料等也有待进一步提高其性能。这类控制电机的进一步发展，已经不再限于一般的电磁理论，而将与其他学科相互结合、相互促进，成为一门多种学科相互渗透的边缘学科。这方面的研究工作尚待深入。

第一章 伺服电动机

§ 1-1 概 述

伺服电动机又称为执行电动机。在自动控制系统中作为执行元件，把输入的电压信号变换成转轴的角位移或角速度输出。输入的电压信号又称为控制信号或控制电压，改变控制电压可以变更伺服电动机的转速及转向。

伺服电动机按其使用的电源性质不同，可分为直流伺服电动机和交流伺服电动机两大类。直流伺服电动机通常用在功率稍大的系统中，其输出功率约为 1~600 瓦，但也有的可达数千瓦；交流伺服电动机输出功率约为 0.1~100 瓦，其中最常用的在 30 瓦以下。

近年来，由于应用范围日益扩展、要求不断提高，促使伺服电动机有了很大发展，出现了许多新型结构。又因系统对电机快速响应的要求越来越高，使各种低惯量的伺服电动机相继出现，如盘形电枢直流电动机、空心杯电枢直流电动机和电枢绕组直接绕在铁心上的无槽电枢直流电动机等。

随着电子技术的发展，又出现了采用电子器件换向的新型直流伺服电动机，它取消了传统直流电机上的电刷和换向器，故称为无刷直流伺服电动机。

此外，为了适应高精度低速伺服系统的需要研制出直流力矩电动机，取消了减速机构而直接驱动负载。在某些控制系统中，作为输出或中间环节，要求电机在有限的角度范围内围绕轴心作往复摆动，因而又产生了有限转角力矩电动机。

伺服电动机的种类虽多，用途也很广泛，但自动控制系统对它们的基本要求可归结为如下几点：

1. 宽广的调速范围：即要求伺服电动机的转速随着控制电压的改变能在宽广的范围内连续调节。
2. 机械特性和调节特性均为线性：伺服电动机的机械特性是指控制电压一定时，转速随转矩的变化关系；调节特性是指电机转矩一定时，转速随控制电压的变化关系。线性的机械特性和调节特性有利于提高自动控制系统的动态精度。
3. 无“自转”现象：即要求伺服电动机在控制电压降为零时能立即自行停转。
4. 快速响应：即电机的机电时间常数要小，相应地伺服电动机要有较大的堵转转矩和较小的转动惯量。这样，电机的转速才能随着控制电压的改变而迅速变化。

此外，还有一些其他的要求，如希望伺服电动机的控制功率要小，这样可使放大器的尺寸相应减小；在航空上使用的伺服电动机还要求其重量轻、体积小。

§ 1-2 直流伺服电动机

直流伺服电动机是指使用直流电源的伺服电动机，实质上就是一台他励式直流电动机。

一、结构和分类

直流伺服电动机有传统式结构和低惯量型两大类。

(一) 传统式直流伺服电动机

传统式直流伺服电动机的结构型式和普通直流电动机基本相同，也是由定子、转子两大部分所组成。它又可再分为永磁式和电磁式两种。永磁式直流伺服电动机是在定子上装置由永久磁铁做成的磁极，目前我国生产的 SY 系列直流伺服电动机就属这种结构。电磁式直流伺服电动机的定子通常由硅钢片冲制叠压而成，磁极和磁轭整体相连如图 1-1 所示。在磁极铁心上套有激磁绕组。目前我国生产的 SZ 系列直流伺服电动机就属这种结构。

这两种电机的转子铁心，均由硅钢片冲制叠压而成，在转子冲片的外圆周上开有均布的齿槽，如图 1-2 所示。在转子槽中放置电枢绕组，并经换向器、电刷引出。

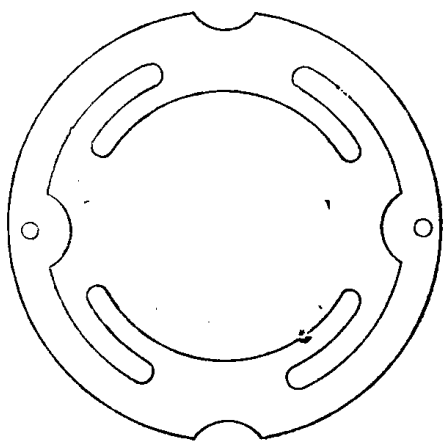


图1-1 电磁式直流伺服电动机的定子冲片

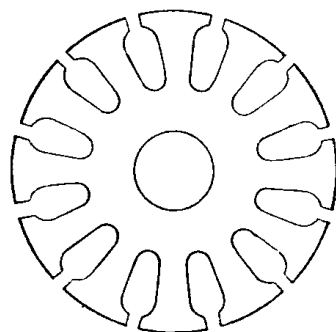


图1-2 直流伺服电动机的转子冲片

(二) 低惯量型直流伺服电动机

1. 盘形电枢直流伺服电动机

图 1-3 为盘形电枢直流伺服电动机。它的定子是由永久磁铁和前后磁轭所组成，磁铁可在圆盘的一侧放置，也可以在两侧同时放置。电机的气隙就位于圆盘的两边，圆盘上有电枢绕组，可分为印制绕组和线绕式绕组两种形式。印制绕组是采用制造印刷电路相类似的工艺制成的，它可以是单片双面的，也可以是多片重叠的。线绕式绕组则是先绕制成单个线圈，然后将绕好的全部线圈沿径向圆周排列起来，再用环氧树脂浇注成圆盘形。盘形电枢上电枢绕组中的电流是沿径向流过圆盘表面，并与轴向磁通相互作用而产生转矩。因此，绕组的径向段为有效部分；弯曲段为端接部分。在这种电动机中也常用电枢绕组有效部分的裸导体表面兼作换向器，它和电刷直接接触。

2. 空心杯电枢永磁式直流伺服电动机

图 1-4 为空心杯电枢永磁式直流伺服电动机的结构简图。它有一个外定子和一个内定子。通常外定子是由两个半圆形的永久磁铁所组成；而内定子则为圆柱形的软磁材料做成，仅作为磁路的一部分，以减小磁路磁阻。但也有内定子由永磁材料做成，外定子采用软磁材料的结构形式。空心杯电枢上的电枢绕组可采用印制绕组，也可以先绕成单个成型线圈，然后将它们沿圆周的轴向方向排列成空心杯形，再用环氧树脂热固化成型。空心杯电

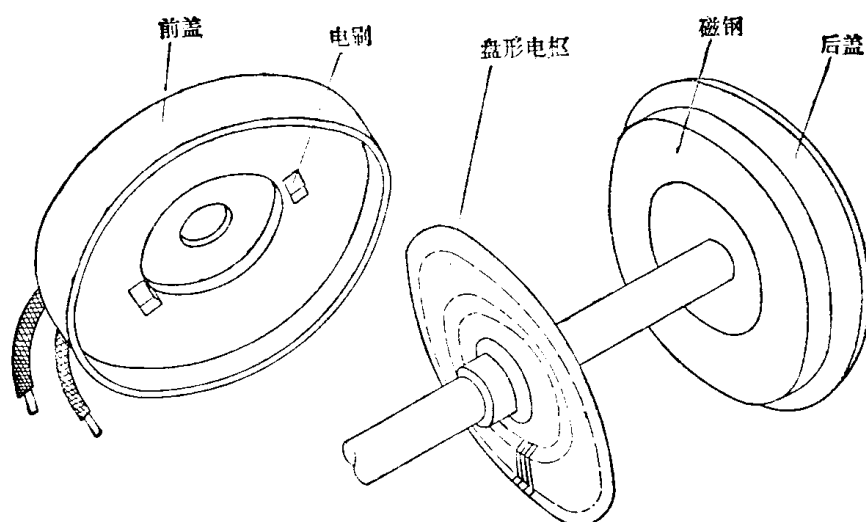


图1-3 盘形电枢直流伺服电动机结构示意图

枢直接装在电机轴上，在内、外定子间的气隙中旋转。电枢绕组接到换向器上，由电刷引出。

这种型式的电机，目前我国生产的型号为 SYK。

3. 无槽电枢直流伺服电动机

无槽电枢直流伺服电动机的电枢铁心上并不开槽、电枢绕组直接排列在铁心表面，再用环氧树脂把它与电枢铁心粘成一个整体，如图 1-5 所示。定子磁极可以用永久磁铁做成，也可以采用电磁式结构。这种电机的转动惯量和电枢绕组电感比前面介绍的两种无转子铁心的电机要大些，因而其动态性能不如它们。

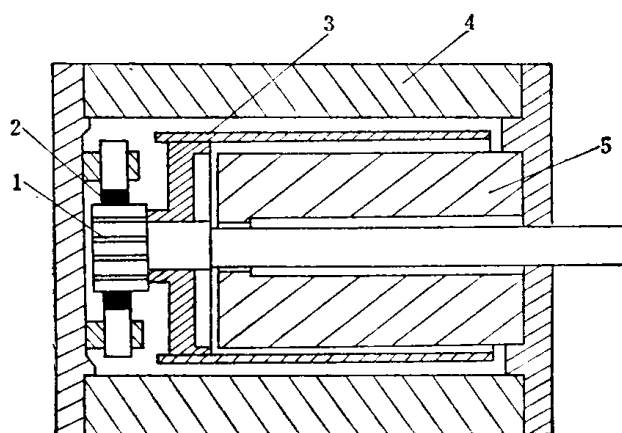


图1-4 空心杯电枢永磁式直流伺服电动机结构简图
1—换向器 2—电刷 3—空心杯电枢 4—外定子 5—内定子

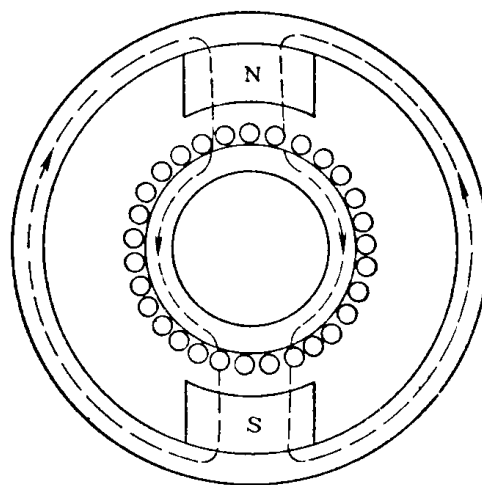


图1-5 无槽电枢直流伺服电动机结构简图

目前我国生产的这种型式电机型号为 SWC。

二、控制方式

它励式直流电动机，当励磁电压 U_f 恒定，又负载转矩一定时，升高电枢电压 U_a ，电机的转速随之增高；反之，减小电枢电压 U_a ，电机的转速就降低；若电枢电压为零，电机