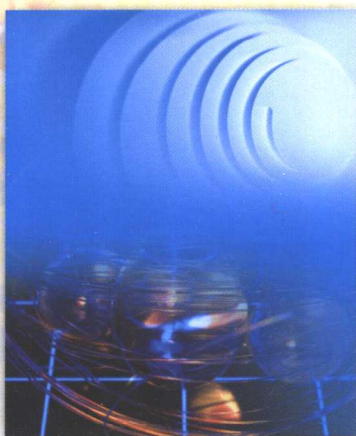
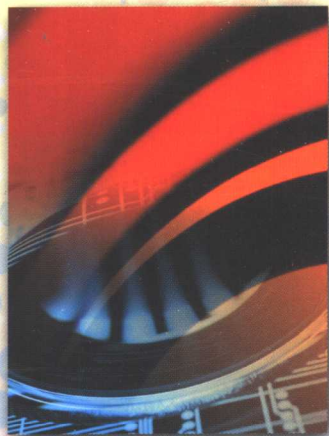




高等学校“十一五”精品规划教材

# 控制电机

赵君有 张爱军 编



中国水利水电出版社  
www.waterpub.com.cn



高等学校“十一五”精品规划教材

# 控制电机

赵君有 张爱军 编  
王成元 主审

江苏工业学院图书馆  
藏书章



中国水利水电出版社  
www.waterpub.com.cn

## 内 容 提 要

本书为高等学校“十一五”精品规划教材，主要特点是内容重点突出、简明扼要、联系实际。本书共九章：直流测速发电机、直流伺服电动机、脉冲变压器、旋转变压器、交流伺服电动机、交流异步测速发电机、自整角机、微型同步电动机、步进电动机等。分别介绍了各种电机的结构组成、工作原理、性能指标和选择使用方法。

本书可作为工业电气自动化、热工过程自动控制等专业的教材，也可供相关电气技术人员阅读和参考。

### 图书在版编目 (CIP) 数据

控制电机/赵君有, 张爱军编. —北京: 中国水利水电出版社, 2006

高等学校“十一五”精品规划教材

ISBN 7-5084-4031-5

I. 控... II. ①赵...②张... III. 微型控制电机—高等学校—教材 IV. TM383

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2006) 第 102122 号

书 名	高等学校“十一五”精品规划教材 <b>控制电机</b>
作 者	赵君有 张爱军 编
出版 发行	中国水利水电出版社 (北京市三里河路 6 号 100044) 网址: <a href="http://www.waterpub.com.cn">www.waterpub.com.cn</a> E-mail: <a href="mailto:sales@waterpub.com.cn">sales@waterpub.com.cn</a> 电话: (010) 63202266 (总机)、68331835 (营销中心)
经 售	全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	北京市兴怀印刷厂
规 格	787mm×1092mm 16 开本 9 印张 213 千字
版 次	2006 年 9 月第 1 版 2006 年 9 月第 1 次印刷
印 数	0001—4000 册
定 价	<b>17.00 元</b>

凡购买我社图书, 如有缺页、倒页、脱页的, 本社营销中心负责调换

版权所有·侵权必究

# 前 言

控制电机，作为执行元件、测量元件或者解算元件，在自动控制系统中起着十分重要的作用。

本教材是在总结多年教学经验的基础上进行编写的，具有明显的职业教育特色，既可供高等学校工业电气自动化、热工过程自动控制等专业学历教育使用，也可供有关企事业单位工程技术人员学习参考。

本教材共分九章：直流测速发电机、直流伺服电动机、脉冲变压器、旋转变压器、交流伺服电动机、交流异步测速发电机、自整角机、微型同步电动机、步进电动机。分别介绍了各种电机的结构组成、工作原理、性能指标和选择使用方法。

本教材具有以下鲜明特色：

(1) 重点突出。本教材基于电机的基本工作原理，但特别注重各种控制电机的特殊性，强调性能指标的物理意义及其实现方法。

(2) 力求简练。本教材注重对基本概念、基本原理的表述，尽可能回避或简化复杂的数学推导。

(3) 联系实际。本教材的内容注重与工程实际紧密联系，强调各种控制电机的选择、使用原则。

本教材可作为工业电气自动化、热工过程自动控制等专业的教材，也可供相关电气技术人员阅读和参考。

本教材由沈阳工程学院赵君有和张爱军合作编写。由沈阳工业大学王成元教授主审。在编写过程中，沈阳工程学院吕中枢教授提出了许多宝贵意见。在此对两位老师表示衷心感谢。

由于水平有限，书中难免存在缺点和错误，真诚希望广大读者批评指正。

作 者

2006年7月

# 目 录

前言

绪论	1
<b>第一章 直流测速发电机</b>	<b>3</b>
第一节 直流发电机	3
第二节 直流测速发电机	6
第三节 直流测速发电机的性能指标	11
小结	13
思考题与习题	13
<b>第二章 直流伺服电动机</b>	<b>15</b>
第一节 直流电动机	15
第二节 直流伺服电动机的控制方法和运行特性	20
第三节 直流力矩电动机	25
第四节 低惯量直流伺服电动机	28
第五节 直流伺服电动机的性能指标及选择使用	30
小结	32
思考题与习题	33
<b>第三章 脉冲变压器</b>	<b>34</b>
第一节 变压器的工作原理	34
第二节 脉冲变压器	39
小结	43
思考题与习题	43
<b>第四章 旋转变压器</b>	<b>44</b>
第一节 旋转变压器的结构特点和分类	44
第二节 正余弦旋转变压器的工作原理	45
第三节 其他旋转变压器	49
第四节 旋转变压器的典型应用	51
小结	54
思考题与习题	55
<b>第五章 交流伺服电动机</b>	<b>56</b>
第一节 概述	56
第二节 交流伺服电动机的结构特点和工作原理	57

第三节	两相交流绕组产生的旋转磁场 .....	59
第四节	交流伺服电动机的运行 .....	64
第五节	交流伺服电动机在椭圆形磁场下的运行 .....	72
第六节	交流伺服电动机的控制方式和移相方法 .....	78
第七节	交流伺服电动机的主要性能指标、选择及使用 .....	83
小结	.....	87
思考题与习题	.....	88
<b>第六章</b>	<b>交流异步测速发电机</b> .....	<b>89</b>
第一节	交流异步测速发电机的结构特点和工作原理 .....	89
第二节	交流异步测速发电机的特性和主要技术指标 .....	91
第三节	交流异步测速发电机的使用 .....	95
小结	.....	97
思考题与习题	.....	98
<b>第七章</b>	<b>自整角机</b> .....	<b>99</b>
第一节	自整角机的基本结构 .....	99
第二节	控制式自整角机的工作原理 .....	100
第三节	力矩式自整角机的工作原理 .....	103
第四节	自整角机的选用和技术数据 .....	105
小结	.....	107
思考题与习题	.....	107
<b>第八章</b>	<b>微型同步电动机</b> .....	<b>108</b>
第一节	概述 .....	108
第二节	永磁式同步电动机 .....	108
第三节	反应式同步电动机 .....	111
第四节	磁滞式同步电动机 .....	113
第五节	微型同步电动机的性能指标及应用选择 .....	117
小结	.....	118
思考题与习题	.....	119
<b>第九章</b>	<b>步进电动机</b> .....	<b>120</b>
第一节	概述 .....	120
第二节	反应式步进电动机的结构及工作原理 .....	121
第三节	反应式步进电动机的运行特性 .....	126
第四节	步进电动机的性能指标、选择和使用 .....	131
小结	.....	133
思考题与习题	.....	133
<b>参考文献</b>	.....	<b>135</b>

# 绪 论

控制电机是各类自动控制系统、遥控和解算装置中重要的元件之一，在系统中具有执行、检测和解算的功能。从基本理论上讲，控制电机与普通电机没有本质上的区别，但是普通电机着重于对电机的力能指标方面的要求，注重能量传递或转换；而控制电机则着重于对特性、性能指标的要求，注重高精度和快速响应，满足控制系统对其提出的要求。

## 一、控制电机的种类

控制电机的种类很多，包括直（交）流测速发电机、直（交）流伺服电动机、旋转变压器、脉冲变压器、自整角机、步进电动机、永磁式同步电动机、反应式同步电动机、滞滞式同步电动机等。

## 二、控制电机在自动控制系统中的应用

控制电机是自动控制系统中一个很重要的元件，它的使用范围非常广泛。例如，发电厂的阀门和断路器的遥控、机床加工过程的自动控制、雷达的自动定位、飞机的自动驾驶、舰船的自动操作，以及计算机、自动记录仪表、录像、录音、摄影、医疗设备等方面的自动控制系统。

### 1. 作为执行元件（功率元件）

主要包括直流伺服电动机、交流伺服电动机、步进电动机、无刷直流电动机。这些电动机的主要任务是将电信号转换成轴上的角位移或角速度及直线位移或线速度，带动控制对象运动。

理想伺服电动机的转速与控制信号的关系  $n = f(U)$ ，即控制特性，其特性曲线如图 0-1 所示，电压  $U$  为控制信号。转速与控制电压成正比关系，而转速方向由控制电压的极性来决定。如图 0-2 所示是步进电动机的控制特性曲线，电机的转速与脉冲电压的频率成正比。

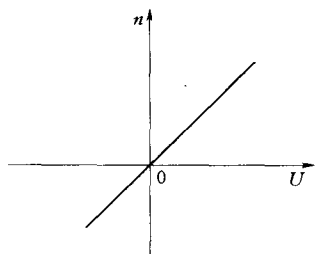


图 0-1 伺服电动机的控制特性

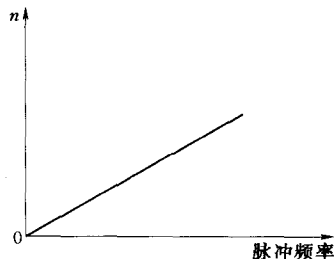


图 0-2 步进电动机的控制特性

## 2. 作为测量元件（信号元件）

主要包括自整角机、直（交）流测速发电机、旋转变压器等，它们能够用来测量机械角度、转角差和转速，在自动控制系统中一般作为敏感元件和校正元件。

自整角机可以把发送机和接收机之间的转角差转换成与转角差成正弦关系的电信号。

测速发电机可以把转速信号转变成与转速成正比的电压信号。

旋转变压器的输出电压与转子相对于定子的转角成正弦、余弦或线性关系。

## 三、控制电机的特点

在自动控制系统中，控制电机只起一个元件作用，主要作用是完成控制信号的传递和转换，能量传递是次要的。自动控制系统主要要求控制电机运行可靠、动作迅速、准确度高、体积小、重量轻、耗电少。自动控制系统由成百上千个各种各样的元件组成，每个元件都按照系统对其特定的要求而工作，每个元件工作性能的好坏，直接影响整个系统的工作。为了使整个自动控制系统敏捷、准确地动作，就要求组成系统的每一个元件都要动作迅速、准确和可靠。同时，控制电机的应用范围很广，工作环境条件十分复杂，这就要求在各种环境条件下仍然能可靠、准确地工作。另外，在许多场合，还要求控制电机的体积小、重量轻、耗电少，像电子手表中的步进电动机，直径6mm，长度4mm，仅耗电几微瓦，重量十几克。

## 四、如何学习控制电机

控制电机这门课程是自动控制专业、工业电气自动化专业、生产过程自动化专业的一门重要的专业课。小功率电机在自动控制系统、自动控制伺服遥控系统及计算机、自动记录仪和大型绘画机中，主要用作信号传递和执行元件。

控制电机是一门理论性和实践性都很强的课程，各种控制电机的原理建立在基本的电磁理论上，因此它们之间相互联系，有很多共同之处，但各自又有不同的运行特性。在学习时，首先要复习好《电机学》及《电力拖动》中的基本电磁理论；充分认识各种电机的基本结构，掌握各种电机的基本原理和工作特性，掌握各种电机的共同规律，并且要分析每种电机的特殊性质；同时还要结合实验、实习，进一步认识控制电机，做到理论联系实际。



# 第一章 直流测速发电机

直流测速发电机是一种微型直流发电机，其电磁原理与直流发电机相同。本章首先介绍直流发电机的工作原理、结构及特性，然后分析直流测速发电机的特性及应用。

## 第一节 直流发电机

### 一、直流发电机的工作原理

直流发电机的工作基于电磁感应定律，如图 1-1 所示为其原理示意图。直流发电机采用固定的磁极和旋转的电枢，有与电枢同步旋转的换向片（换向器）和与换向片相接触的空间位置固定的电刷 A 和 B，换向器与电刷构成机械整流子，转子绕组任一线圈的两边分别接到互相绝缘的两片换向片上。由图中可见，线圈 abcd 通过换向片和电刷与外电路接通，从而形成一个闭合回路。根据电磁感应定律，当电机转子（又称电枢）在原动机驱动下匀速旋转时，导体内将感应交流电动势为：

$$e_a = Blv \quad (1-1)$$

式中  $B$ ——导体所处位置的气隙磁通密度，T；

$l$ ——导体的有效长度，m；

$v$ ——导体切割磁场的线速度，m/s。

由于气隙磁通密度沿圆周近似按梯形波分布，如图 1-2 (a) 所示，因此当线圈随电枢同步旋转时，电刷 A、B 两端将输出经过机械整流的脉动直流电动势，其电动势波形如图 1-2 (b) 所示，如果在两电刷间接一负载，则负载上的电流是脉动直流。

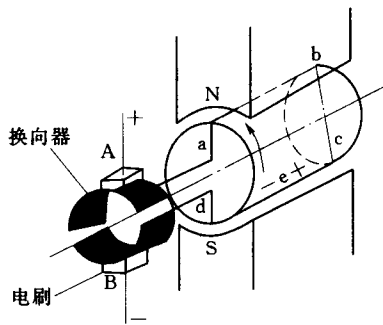


图 1-1 直流发电机原理示意图

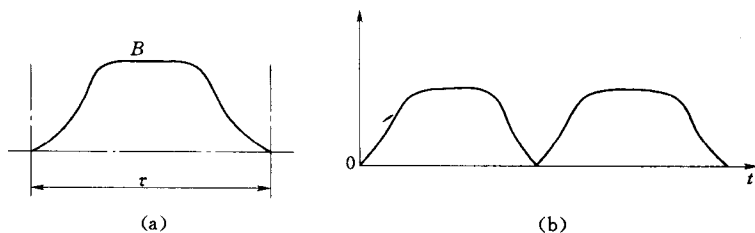


图 1-2 磁场分布和电刷间电动势

(a) 磁场分布；(b) 电刷间电动势

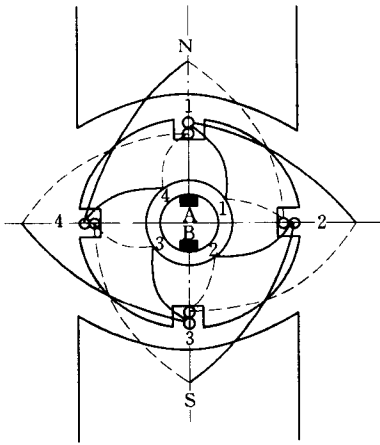


图 1-3 实际电机的模型

为了减小电动势的脉动程度，实际电机中不只有一个线圈（元件），而是由许多元件组成电枢绕组。这些元件均匀分布在电枢表面，按一定规律连接起来。

图 1-3 所示是一个实际电机的模型，电枢铁芯表面有齿有槽，槽内安放多匝元件。放在槽中的元件边称为有效边（见图 1-4），连接有效边的导线称为端部接线（端接）。元件的两个有效边分别安放在电枢圆周两个相对的槽内，一个有效边放在槽钢的上层（槽口），另一个有效边放在槽钢的下层（槽底）。元件的头、尾分别与相邻的两个换向片相连。电枢绕组自成闭合回路。为简化分析，模型表面均匀开出 4 个槽，换向器有 4 个换向片，1 号元件的一个有效边放在 1 号槽的上层，另一个有效边放在 3 号槽的下层，

其头、尾分别与 1、2 换向片相连，1 号元件尾与 2 号元件头在换向片 2 上相连……，4 个元件形成闭合回路。电刷的放置应该使电刷间获得最大电动势。对于端部对称的元件，电刷应放置在主磁极轴线上。随着电机的旋转，电刷经换向片轮流与元件 1、2、3、4 连接。电刷间所连接的元件总是位于一定的磁极下，由图 1-3 可见，从电刷 B 到电刷 A，由元件 1 和元件 3 并联构成两条支路，如图 1-5 所示。可以证明，在电枢旋转时，A、B 之间仍然具有 2 条并联支路，这样，电刷间的电动势为一条支路的电动势。若电枢表面槽数越多，元件数越多，则电刷间串联的元件数越多，输出的电动势平均值将更大，脉动更小。

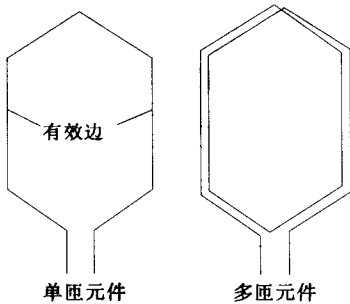


图 1-4 电枢元件

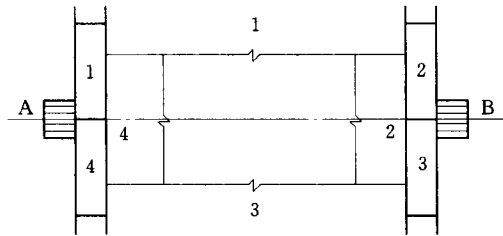


图 1-5 等值电路

## 二、直流电机的基本结构

各种型号的直流电机的基本结构都是一样的，这里简述小型直流电机的基本结构。

直流电机由定子和转子两大主要部分组成，定子、转子之间是空气隙。

定子作为电机的机械支撑并用来产生主磁场，由机座、定子铁芯、励磁绕组、端盖和连接外部电路的电刷装置组成。

定子铁芯往往将主磁极和磁轭加工成一体，由 0.35~0.5mm 厚的电工钢板冲片叠压而成，用铆钉把冲片铆紧，固定在机座上，如图 1-6 所示。主磁极铁芯分成极靴和极身，极靴的作用是使气隙磁通密度的空间分布均匀并减小气隙磁阻，使励磁绕组牢固地套在主

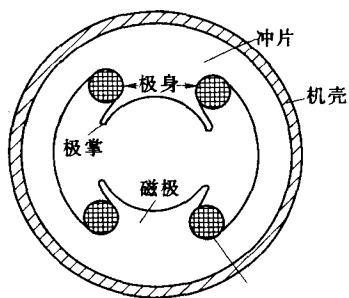


图 1-6 定子结构简图

磁极铁芯上。

励磁绕组由铜线制成，包上绝缘材料后套在磁极上，励磁绕组通入直流电流时，产生磁通，形成 N、S 极，控制用的直流电机一般做成二极。

转子用来感应电动势、产生电磁转矩，由电枢铁芯、电枢绕组、换向器和转轴等组成。

电枢铁芯是主磁路的一部分。为了降低铁芯中的涡流损耗，电枢铁芯由 0.35~0.5mm 厚的电工钢板冲片叠压而成，并用绝缘漆作为片间绝缘。冲片如图 1-7 所示，槽内安放电枢绕组。

电枢绕组通常由铜线绕成，预先制成元件，嵌放在槽内，然后将元件的两个端头按照一定的规律分别接到两片换向片上，如图 1-8 所示。

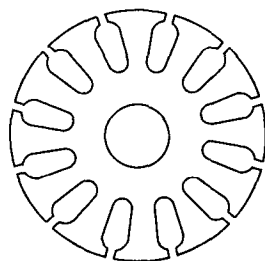


图 1-7 电枢铁芯冲片

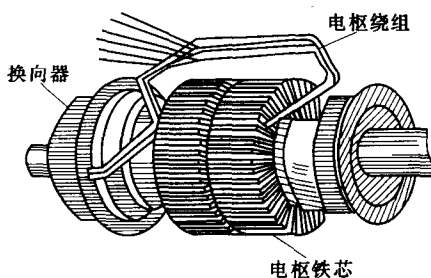


图 1-8 电枢铁芯和绕组

换向器由许多换向片组成。换向片间用塑料或云母绝缘，各换向片与元件相连。

电刷装置是直流电机的重要组成部分，它连接外部电路和换向器，把电枢绕组中的交变电动势变成外电路的直流电动势。电刷被安装在电刷座中，用弹簧将它压在换向器表面上，使之有良好的滑动接触。

### 三、直流电机的电枢电动势

当励磁绕组中流过励磁电流时，产生的主磁通从 N 极出发，经过气隙及电枢进入 S 极，分别从两边的磁轭回到 N 极，形成闭合回路，如图 1-9 所示。磁极和电枢之间的气隙是不均匀的，极中心部分最小，极尖处最大，因此电枢表面各点的磁通密度不同，在极中心处磁通密度最大，靠近极尖逐渐减小，在极靴外则减小更快，在几何中性线（主磁极分界线）处为零。若不考虑电枢表面齿槽的影响，电枢表面的各点磁通密度分布如图 1-10 所示。

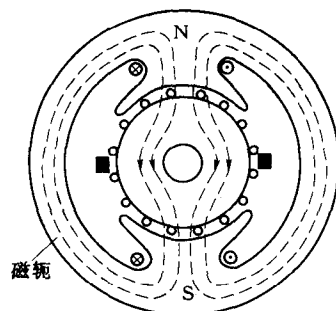


图 1-9 直流电机磁路

直流电机电刷间的电动势等于正负电刷间每一条支路的感应电动势。

一根导体的感应电动势为：

$$e_{av} = B_{av}lv \quad (1-2)$$

式中  $B_{av}$ ——一个磁极下的平均气隙磁通密度。

若直流电机的极距为  $\tau$ ，每极平均磁通密度  $B_{av}$  与每极磁通量  $\Phi$  的关系为：

$$B_{av} = \frac{\Phi}{\tau l} \quad (1-3)$$

若电机的转速为  $n$  (r/min)，极对数为  $p$ ，则：

$$v = 2p\tau \frac{n}{60} \quad (1-4)$$

把式 (1-3)、式 (1-4) 代入式 (1-2)，则：

$$e_{av} = 2p\Phi \frac{n}{60} \quad (1-5)$$

若电枢导体总数为  $N$ ，电枢绕组并联支路数为  $2a$ ，则每条支路的导体数为  $N/2a$ ，从而可得电刷间的总电动势为：

$$E_a = e_{av} \frac{N}{2a} = \frac{pN}{60a} \Phi n = C_e \Phi n \quad (1-6)$$

式中  $C_e$ ——直流电机的电动势常数， $C_e = \frac{PN}{60a}$ 。

式 (1-6) 是直流电机中非常重要的关系式。

当每极磁通  $\Phi$  一定时：

$$E_a = k_e n \quad (1-7)$$

式中  $k_e$ ——电动势系数， $k_e = C_e \Phi$ 。

由式 (1-7) 可知，电刷间的感应电动势与电机的转速成正比，即电动势能表征转速的大小，因此直流发电机能把转速信号转换成电动势信号，从而可以用来测速。

## 第二节 直流测速发电机

### 一、直流测速发电机的基本型式

直流测速发电机为微型直流发电机，转子结构与小功率的直流电机一样。定子根据励磁方式的不同可分为电磁式（他励式）和永磁式，如图 1-11 和图 1-12 所示。

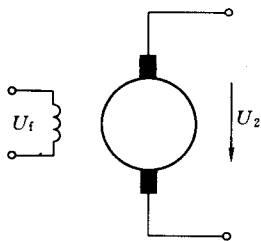


图 1-11 电磁式直流测速发电机

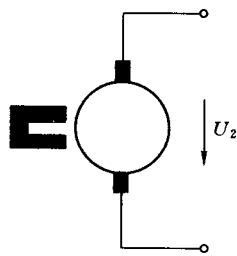


图 1-12 永磁式直流测速发电机

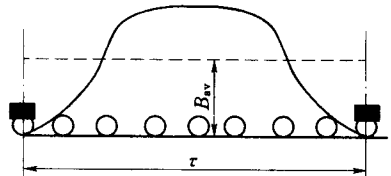


图 1-10 气隙中磁通密度分布图

电磁式（他励式）：定子结构与小功率直流电机没有区别，直流励磁绕组由外部直流电源供电。

永磁式：定子磁极由矫顽力较高的凸极永久磁钢制成，磁极上无励磁绕组。这种结构的优点是简单并省略了励磁电源，使用方便；缺点是永久磁钢的磁性受到温度和振动的影响，经长期使用和振动，磁性会逐渐衰减，而且高性能的永磁材料成本较高。

目前，随着技术的进步，永磁材料的性能逐渐改善，成本也在下降。常用的永磁式测速发电机分为普通速度（几千转每分钟以上，最高达 10000r/min）和低速（几百转每分钟以下，最低 1r/min）两类。

## 二、自动控制系统对直流测速发电机的要求

自动控制系统对元件的要求，主要是精度高、灵敏度高、可靠性好。直流测速发电机在电气性能方面应满足以下要求：

- (1) 输出电压与转速的关系——输出特性曲线应为线性。
- (2) 输出特性斜率要大。
- (3) 温度变化对输出特性的影响要小。
- (4) 输出电压的纹波要小。
- (5) 正反转时输出特性要求一样。

第(1)、(3)、(4)项是为了提高测速的精度，温度变化对特性的影响越小，输出电压越稳定，越能精确地反映转速。第(2)项是为了提高测速的灵敏度。第(5)项要求正反转特性一致，满足了整个系统正反转运行的测量要求。

## 三、输出特性

直流测速发电机的工作原理与直流发电机相同，其输出电压与转速之间的关系称为输出特性，即：

$$U_2 = f(n)$$

在忽略电枢反应的情况下，电枢的感应电动势为：

$$E_a = C_e \Phi n = k_e n$$

带上负载  $R_L$  后，电刷两端电压为：

$$U_2 = E_a - R_a I_a$$

式中  $R_a$ ——电枢回路总电阻。

又因为

$$I_a = \frac{U_2}{R_L}$$

则

$$U_2 = E_a - R_a \frac{U_2}{R_L}$$

可得直流测速发电机输出特性的表达式为：

$$U_2 = \frac{E_a}{1 + \frac{R_a}{R_L}} = \frac{C_e \Phi n}{1 + \frac{R_a}{R_L}} = \frac{k_e}{1 + \frac{R_a}{R_L}} n = Cn \quad (1-8)$$

式中  $C$ ——测速发电机输出特性的斜率， $C = \frac{k_e}{1 + R_a/R_L}$ 。

在理想情况下，即  $\Phi$ 、 $R_a$  和  $R_L$  都为常数，则  $U_2$  和  $n$  之间为线性关系，如图 1-13

所示。对应不同的负载电阻  $R_L$  得到不同的输出特性，如图 1-14 所示。

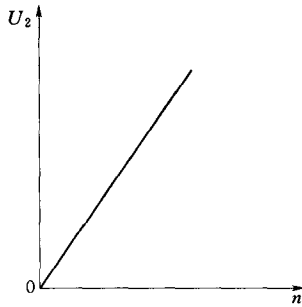


图 1-13 测速发电机的理想输出特性

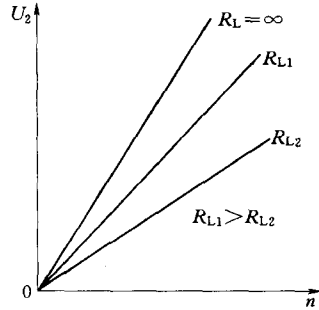


图 1-14 不同负载电阻时的输出特性

#### 四、误差及减小误差的方法

实际的直流测速发电机的输出特性  $U_2 = f(n)$  并不保持严格的线性函数关系，实际特性与要求的线性特性存在着误差。产生误差的主要原因有以下几个方面。

##### 1. 电枢反应的影响

电机空载时，只有励磁绕组产生的主磁场，如图 1-15 (a) 所示，其磁密分布如图 1-2 (a) 所示。电机负载时，由于电枢导体的电流方向总是以电刷为分界线，电刷两侧导体中电流的大小相等、方向相反，所以无论转子转到哪个位置，电枢电流在空间的分布情况不变，电枢电流产生的电枢磁场在空间的分布也不变，成为空间位置固定不动的恒定磁场，如图 1-15 (b) 所示。负载时电机内的磁场是主磁场和电枢磁场的合成，如图 1-15 (c) 所示。

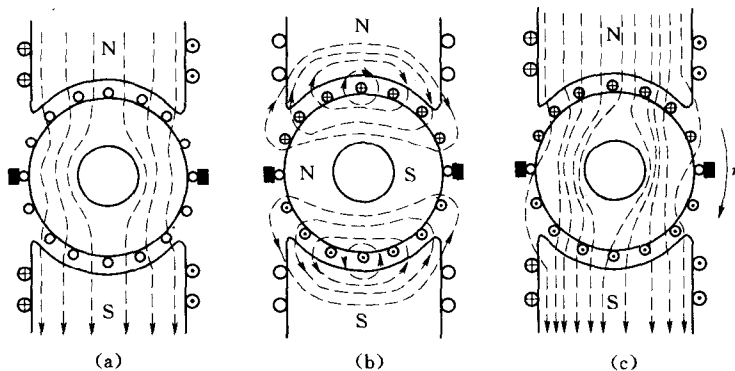


图 1-15 直流电机磁场

(a) 主磁场；(b) 电枢磁场；(c) 合成磁场

由图 1-15 (a)、(b) 可以看出，在每个主磁极下，电枢磁场的磁通在半个磁极下由电枢指向主磁极，在另外半个极下则由主磁极指向电枢，即半个磁极下电枢磁通与主磁通同向，半个磁极下电枢磁通与主磁通反向，因此合成磁场的磁通密度半个磁极下加强了，

半个磁极下削弱了，如图 1-15 (c) 所示。由于电枢磁场的存在，气隙中的磁场发生变化，这种现象称为电枢反应。

若电机的磁路不饱和，则磁场的合成可用叠加原理，每个磁极半个极增强的磁通和半个极削弱的磁通相等，互相抵消，整个磁极的磁通保持不变，仅仅是磁场的分布发生了变化。

在实际电机中，由于磁路的饱和特性，磁通加强的半个磁极合成磁通小于  $1/2$  主磁通与  $1/2$  电枢磁通之和，而磁通削弱的半个磁极合成磁通等于  $1/2$  主磁通与  $1/2$  电枢磁通之差，即每个磁极下磁通的减少值大于增加值。由此可知，电枢磁场对主磁场起去磁作用，即励磁电流不变，空载时的主磁通  $\Phi_0$  大于负载时的合成磁通  $\Phi$ 。

由于电枢反应的去磁作用，使得主磁通发生变化。负载电阻越小或转速越高，电枢电流越大，电枢反应去磁作用越强，输出特性曲线偏离直线越远，非线性误差越大。

为了消除电枢反应的影响，除了在设计时采用补偿绕组、结构上加大大气隙削弱电枢反应磁场的影响外，应对发电机的使用规定最大转速  $n_{\max}$  和最小负载电阻值。用户所接负载电阻不能小于规定的最小电阻值，转速不能高于规定的最大转速，尽可能减小负载电流产生的电枢反应的影响，保证线性误差在限定的范围内。此外增大负载电阻还可增强发电机的灵敏性，因为  $R_L$  越大，输出特性的斜率越大。

## 2. 温度影响

电机周围环境温度的改变能引起电机绕组电阻值的改变。温度升高，励磁回路电阻增大，励磁电流减小，主磁通也随之减小，输出电压下降。例如，铜绕组的温度每升高  $25^\circ\text{C}$ ，其电阻就要增大  $10\%$ 。一台 ZCF-16 型直流测速发电机：在室温 ( $17^\circ\text{C}$ ) 下起动，调励磁电流  $I_f = 300\text{mA}$ ，转速为  $n = 2400\text{r/min}$ ，输出电压为  $55\text{V}$ ；1h 后，励磁电压不变，励磁电流  $I_f$  降为  $277\text{mA}$ ，转速仍为  $n = 2400\text{r/min}$  时，输出电压为  $52.965\text{V}$ ，降低了  $3.7\%$ ；把励磁电流  $I_f$  再调回  $300\text{mA}$ ，输出电压为  $54.637\text{V}$ ，只降低  $0.66\%$ 。可见励磁绕组温升对输出电压影响非常显著。

为消除温度变化引起励磁电流  $I_f$  变化造成的不良影响，需改进电机铁芯的磁路，设计电机时，总是把磁路设计得足够饱和，以减小温度变化所引起的磁通变化。此外，还可在励磁回路中串联一个比励磁绕组电阻大几倍的附加电阻来稳定励磁电流，附加电阻宜用温度系数低的锰镍铜合金丝制作。

对于因温度变化所引起的误差限制比较严格的场合，可以在励磁回路中串联负温度系数的热敏并网络，如图 1-16 所示。

选择并网络参数的方法是，做出励磁绕组电阻随温度变化的曲线，如图 1-17 中曲线 1 所示，再作并网络电阻随温度变化的曲线图，如图 1-17 中曲线 2 所示；前者温度系数为正，后者温度系数为负。只要让两条曲线的斜率相等，励磁回路中的总电阻就不会随温度变化，如图 1-17 中曲线 3 所示，励磁电流和主磁通也不会随温度变化。

## 3. 电刷接触电阻的影响

要使  $U_2 = f(n)$  呈线性关系， $R_a$  为恒值是不可缺少的条

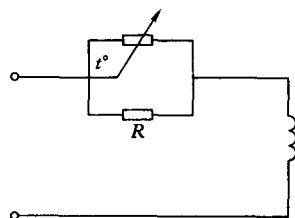


图 1-16 励磁回路中的热敏电阻并网络

件。 $R_a$  包含着电刷和换向器之间的接触电阻。电刷接触电压降  $\Delta U_b$  与电刷和换向器的材料、电刷电流的密度、方向、电刷单位面积上的压力、接触表面的温度、换向器圆周线速度及换向器表面的化学和机械方面等因素有关。当转速低时，接触电阻大，其电压降在总电枢电压中所占比重大，实际输出电压小；当转速高时，接触电阻小，其电压降在总电枢电压中所占比重少，实际输出电压大。在转速较低时，输出特性有一段斜率显著下降的区域，在此区域内，虽然有输入信号（转速），但输出电压很小，对转速很不灵敏，这个区域称为不灵敏区，如图 1-18 所示。不灵敏区是由于接触电阻的非线性影响而产生的。

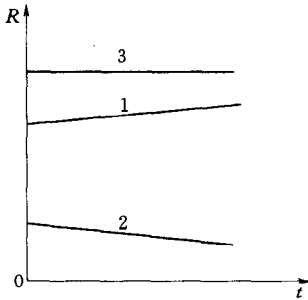


图 1-17 电阻随温度变化的曲线

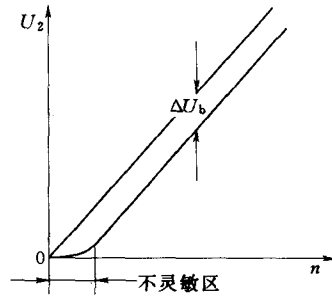


图 1-18 考虑电刷接触压降后的输出特性

为减小电刷接触电阻的影响，常常采用接触电压较小的银—石墨电刷。在高精度的直流测速发电机中还采用铜电刷，并在电刷与换向器接触的表面镀上银层，使换向器不易磨损。另外，使用时可对低电压输出进行非线性补偿。

#### 4. 纹波影响

由于电机换向片数有限，实际输出电压总是有微弱脉动，通常把这种脉动称为纹波。由于制造工艺所限，电机槽数、元件数及换向片数不可能无限增多，因此产生纹波是不可避免的，同时，由于电枢铁芯有齿有槽，以及电枢铁芯的椭圆度、偏心等，也会使输出电压中的纹波幅值上升。虽然脉动分量在整个输出电压中占的比重不大，但对高精度系统是不允许的。纹波电压的存在对于测速机用于阻尼和速度控制都很不利。

为了消除纹波影响，可采用无槽电枢直流电机，或在输出电压电路中加入滤波电路。

#### 5. 延迟换向去磁的影响

直流电机中，电枢绕组的电流方向以电刷为分界线，电机旋转时，电枢绕组元件从一条支路进入另一条支路，电流方向改变，由  $+i_a$  变为  $-i_a$ 。电枢元件电流由  $+i_a$  变为  $-i_a$  的过程称为元件的换向过程；正在进行换向的元件称为换向元件；换向元件从开始换向到换向終了所经历的时间称为换向周期。

在理想换向情况下，当换向元件的两个有效边处于几何中性线位置时，其电流为零。但实际上，虽然该元件切割主磁通感应的电动势为零，但仍然有电动势存在。一个电动势是换向元件电流由  $+i_a$  变为  $-i_a$  而产生的自感电动势  $e_L$ ：

$$e_L = -L \frac{di_a}{dt}$$



式中  $L$ ——换向元件的电感。

另一个电动势是换向元件切割电枢磁场而感应的切割电动势  $e_a$ 。因此换向元件中的总电动势为  $e_k = e_L + e_a$ 。由楞次定律可以判断出自感电动势  $e_L$  和切割电动势  $e_a$  均与换向前的电枢电流方向相同，都是阻碍换向的，使换向过程延迟，即换向元件中的电流由  $+i_a$  变为  $-i_a$  的时间延迟了。

总电动势  $e_k$  在换向元件中产生附加电流  $i_k$ ，由  $i_k$  产生的磁通  $\Phi_k$  与主磁通方向相反，对磁通起去磁作用，称为延迟换向去磁。

可以证明，自感电动势  $e_L$  和切割电动势  $e_a$  均与  $n^2$  成正比。因此，换向元件的附加电流及延迟换向去磁磁通与  $n^2$  成正比，使输出特性出现如图 1-19 所示的形状，即直流测速发电机的转速上限受到延迟换向去磁效应的限制。

为了改善输出特性的线性度，对于小容量的测速发电机规定了最高转速，来限制延迟换向去磁作用。

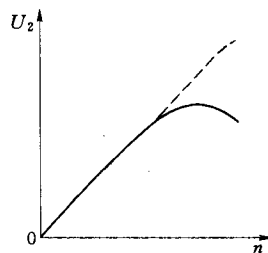


图 1-19 延迟换向对输出特性的影响

### 第三节 直流测速发电机的性能指标

#### 一、直流测速发电机的应用

测速发电机在自控系统中用于测量或自动调节电动机转速；在随动系统中产生电压信号来提高系统的稳定性和精度；在计算解答装置中作为微分和积分元件；还可以测量各种机械性摆动或非常缓慢的转速，并能代替测速计直接测量转速。

测速发电机有交流、直流两大类。由于直流测速发电机有电刷、换向器接触装置，它的可靠性变差，精度也受到影响，因此在系统中使用交流异步测速发电机较为广泛。但是与交流异步测速发电机相比，直流测速发电机具有输出电压斜率大、没有剩余电压（即转速为零时没有输出电压）、没有相位误差（励磁和输出电压之间没有相位移）、温度补偿容易实现等优点，因此在自动控制系统中的应用还是很广泛的。

图 1-20 所示是直流测速发电机（TG）在恒速控制系统中的应用原理图。直流伺服电动机（SM）拖动一个机械负载，当负载转矩发生变化时，要求系统的转速不变。如果单独采用直流伺服电动机来拖动这个负载，则不能实现负载转速恒定的要求，因此，与伺服电动机同轴连接一个直流测速发电机。

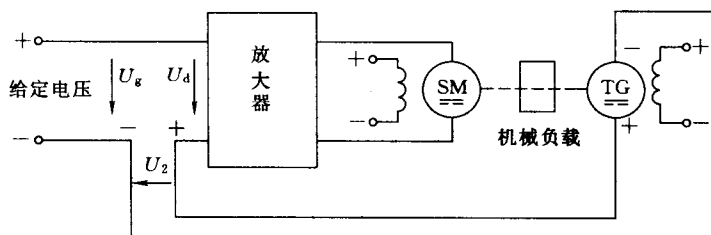


图 1-20 恒速控制系统原理图