

◎ 高等教育精品教材



# 控制电机

KONGZHI DIANJI

仲伟堂  
主编

中国矿业大学出版社

China University of Mining and Technology Press

高等教育精品教材

# 控 制 电 机

主 编 仲伟堂  
副 主 编 王继强 彭 泓

中国矿业大学出版社

## 内 容 提 要

本书重点突出,浅显易懂,在介绍每一种控制电机原理时均附有工程应用实例介绍,既开阔了读者的眼界,也加深了对特种电机的了解。本书主要内容包括:绪论、直流测速发电机、直流伺服电动机、变压器、自整角机、旋转变压器、交流伺服电动机、交流异步测速发电机、步进电动机、小功率同步电动机等。分别介绍了各种电机的结构组成、工作原理、性能指标等。

本书既可作为大学本科自动化和电气工程类相关专业的教材,也可供相关电气技术人员参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

控制电机/仲伟堂主编.—徐州:中国矿业大学出版社,  
2009.8

ISBN 978 -7 - 5646 - 0405 - 9

I. 控… II. 仲… 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(2009)第 125936 号

书 名 控制电机  
主 编 仲伟堂  
责任编辑 杨传良 仓小金  
责任校对 何晓惠  
出版发行 中国矿业大学出版社  
(江苏省徐州市中国矿业大学内 邮编 221008)  
网 址 <http://www.cumtp.com> E-mail: cumtpvip@cumtp.com  
排 版 中国矿业大学出版社排版中心  
印 刷 江苏淮阴新华印刷厂  
经 销 新华书店  
开 本 787×1092 1/16 印张 8.5 字数 212 千字  
版次印次 2009年8月第1版 2009年8月第1次印刷  
定 价 17.00 元

(图书出现印装质量问题,本社负责调换)



## 前 言

本书是从 21 世纪人才培养的要求出发并结合编者在本课程多年教学中的经验编写的,供自动化和电气工程类相关本科专业使用。

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,它们在各类自动控制系统、遥控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。控制电机已经成为现代工业自动化系统和现代军事装备中必不可少的重要元件,其使用范围非常广泛。现代自动控制系统对控制电机除了要求其体积小、质量轻、耗电少外,还要求它有高精度、高可靠性和快速响应等特性。

随着科学技术的发展,需要学习和了解的新知识明显增加。从培养人才的角度出发,知识的重新组合势在必行。面对这一新情况、新要求,我们确定以保证基础知识、降低理论深度、加强工程应用作为本教材编写的基本思路,以突出重点、力求简练、联系实际为本教材的鲜明特色。

本书共分十章:绪论,直流测速发电机,直流伺服电动机,变压器,自整角机,旋转变压器,交流伺服电动机,交流异步测速发电机,步进电动机,小功率同步电动机。分别介绍了各种电机的结构组成、工作原理、性能技术指标及其应用。

本书除作为本科自动化和电气工程等专业教材使用外,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。

本书由辽宁工程技术大学仲伟堂、王继强、彭泓、王巍和刘艳丽合作编写。仲伟堂编写第一章、第六章、第七章和第八章;王继强编写第四章、第五章;彭泓编写第九章和第十章;王巍编写第二章和第三章。绘图工作由刘艳丽完成。

本书由仲伟堂担任主编,王继强、彭泓担任副主编,李晓竹教授主审。

在编写过程中,辽宁工程技术大学的郭凤仪教授、高迎慧教授和孟庆春教授提出了许多宝贵意见和建议,谨在此表示衷心感谢!



由于编者的水平有限,加之编写时间比较仓促,书中错误和不妥之处在所难免,诚请读者给予批评指正。

编者

2008年4月



# 目 录

<b>第一章 绪论</b> .....	1
<b>第二章 直流测速发电机</b> .....	4
第一节 概述.....	4
第二节 直流测速发电机的结构.....	5
第三节 直流测速发电机的工作原理.....	6
第四节 直流测速发电机的输出特性.....	8
第五节 直流测速发电机的误差.....	9
第六节 直流测速发电机的应用及主要技术指标 .....	12
小结 .....	14
思考题与习题 .....	14
<b>第三章 直流伺服电动机</b> .....	15
第一节 概述 .....	15
第二节 直流伺服电动机的基本结构和工作原理 .....	15
第三节 直流伺服电动机的启动和调速 .....	19
第四节 直流伺服电动机的机械特性和调节特性 .....	21
第五节 直流伺服电动机的过渡过程和过渡过程中的工作状态 .....	24
第六节 直流伺服电动机的应用 .....	27
小结 .....	28
思考题与习题 .....	28
<b>第四章 变压器</b> .....	30
第一节 变压器的结构 .....	30
第二节 变压器的空载运行 .....	31
第三节 变压器的负载运行 .....	33
第四节 变压器的基本方程、等效电路和向量图.....	35
第五节 脉冲变压器 .....	38
小结 .....	39
思考题与习题 .....	40
<b>第五章 自整角机</b> .....	41
第一节 概述 .....	41



第二节	自整角机的基本结构 .....	41
第三节	控制式自整角机的工作原理 .....	42
第四节	力矩式自整角机的工作原理 .....	47
第五节	自整角机的性能指标及应用 .....	48
小结	.....	51
思考题与习题	.....	52
<b>第六章</b>	<b>旋转变压器</b> .....	<b>53</b>
第一节	概述 .....	53
第二节	正余弦旋转变压器的结构 .....	53
第三节	正余弦旋转变压器的工作原理 .....	55
第四节	其他旋转变压器 .....	58
第五节	旋转变压器的应用 .....	60
小结	.....	62
思考题与习题	.....	63
<b>第七章</b>	<b>交流伺服电动机</b> .....	<b>64</b>
第一节	概述 .....	64
第二节	交流伺服电动机的结构和工作原理 .....	64
第三节	两相绕组产生的圆形旋转磁场 .....	66
第四节	圆形旋转磁场作用下电动机的运行分析 .....	70
第五节	椭圆形旋转磁场的产生及其分析方法 .....	76
第六节	椭圆形旋转磁场作用下的机械特性 .....	80
第七节	交流伺服电动机的控制方式 .....	83
第八节	交流伺服电动机的主要性能指标及其应用 .....	87
小结	.....	90
思考题与习题	.....	91
<b>第八章</b>	<b>交流异步测速发电机</b> .....	<b>92</b>
第一节	概述 .....	92
第二节	交流异步测速发电机的结构特点和工作原理 .....	93
第三节	交流异步测速发电机的主要技术指标 .....	95
第四节	交流异步测速发电机的使用 .....	99
小结	.....	101
思考题与习题	.....	101
<b>第九章</b>	<b>步进电动机</b> .....	<b>102</b>
第一节	概述.....	102
第二节	步进电动机的结构.....	103
第三节	反应式步进电动机的工作原理.....	104
第四节	反应式步进电动机的静态运行特性.....	108
第五节	反应式步进电动机的动态运行特性.....	112
第六节	步进电动机的主要性能指标.....	115



小结.....	116
思考题与习题.....	117
<b>第十章 小功率同步电动机.....</b>	<b>118</b>
第一节 概述.....	118
第二节 永磁式微型同步电动机.....	119
第三节 反应式同步电动机.....	120
第四节 磁滞式同步电动机.....	123
第五节 反应式电磁减速同步电动机.....	125
小结.....	126
思考题与习题.....	126
<b>参考文献.....</b>	<b>128</b>





# 第一章

## 绪 论

随着现代科学技术的进一步发展,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,它们在各类自动控制系统、遥控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满足对启动和运行状态力能指标的要求,而控制电机则着重于满足特性的高精度和快速响应方面的要求。

控制电机已经成为现代工业自动化系统和现代军事装备中必不可少的重要元件。其使用范围非常广泛,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、录像、摄影、机器人等方面的自动控制系统。

控制电机的输出功率较小,一般从数百毫瓦到数百瓦,质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。

### 一、控制电机的种类

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(测量元件)和功率元件(执行元件)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。

#### (一) 信号元件

作信号元件用的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传感元件和校正元件。

##### 1. 自整角机

自整角机的用途是角度数据传输,一般是两个以上元件对接使用。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。

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,在多通道系统中做检测元件。

##### 2. 交流和直流测速发电机

测速发电机的输出电压与转速成正比,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。

##### 3. 旋转变压器

普通旋转变压器都做成一对极,其输出电压与转子转角成正弦、余弦或线性关系,主要



用于坐标变换、三角运算,也可以作为角度数据传输和移相元件使用。

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做解算和检测元件。

## (二) 功率元件

作功率元件用的元件主要包括直流伺服电动机、交流伺服电动机、步进电动机等。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。

### 1. 两相交流伺服电动机和直流伺服电动机

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线性下降。实际使用时通常经齿轮减速后带动负载,在系统中作执行元件。

### 2. 步进电动机

步进电动机的角位移与所输入的电脉冲数成正比,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、耗电少外,还要求它有高精度、高可靠性和快速响应能力。

### 1. 高精度

随着科学技术的发展,各种军事装备、无线电导航、无线电定位、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,这就决定了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。以常见的角位移检测系统为例,某些高精度系统要求几十甚至几角秒。控制电机的精度主要是对信号元件而言,它包括静态误差、动态误差及使用环境的温度变化、电源频率和电压变化等所引起的漂移。

### 2. 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。在军事装备和一些大型工业自动化系统中,总是把控制电机的可靠性摆在第一位。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,核反应堆中使用的控制电机由于工作条件所限,不便于维修,要求它能够长期可靠地工作。

### 3. 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

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。

#### 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。控制电机的种类很多,有数十种,但是这些电机的基本原理都是建立在两个基本规律的基础之上的:一是电磁转化规律;二是电流在磁场中要受到力的作用。所以各种控制电机有很多共同之处,但各自又有不同的运行特性。因此,要想学好控制电机首先要复习好“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。



## 第二章

# 直流测速发电机

### 第一节 概 述

直流测速发电机就其物理本质来说是一种测量转速的微型直流发电机。从能量转换的角度看,它把机械能转换成电能,输出直流电;从信号转换的角度看,它把转速信号转换成与转速成正比的直流电压信号输出,因而可以用来测速,故称为测速发电机。

直流测速发电机是一种测量转速的信号元件,它将输入的机械转速变换为电压信号输出。通常要求电机的输出电压与转速成正比关系,如图 2-1 所示。其输出电压可用下式表示:

$$U = kn \quad (2-1)$$

直流测速发电机广泛应用于自动控制系统和计算装置中,其用途主要是作校正元件和计算元件。

自动控制系统对直流测速发电机的要求:

(1) 输出特性呈线性关系并保持稳定。这是指直流测速发电机的输出电压与转速保持严格的正比关系。

(2) 温度变化对输出特性的影响要小。

(3) 电机的转动惯量要小,以保证反应迅速。

(4) 电机的灵敏度要高。这是指直流测速发电机的输出电压对转速的变化反应灵敏,即测速发电机的输出特性斜率要大。

(5) 正、反转两个方向的输出特性要一致。

(6) 要求它对无线电通信的干扰要小、噪声小、结构简单、工作可靠、体积小和重量轻等。

直流测速发电机是一种微型直流发电机,其工作原理与直流发电机相同。本章首先介绍直流测速发电机的结构和工作原理,然后分析直流测速发电机的特性及应用。

直流测速发电机的发展趋势是提高灵敏度和线性度,减小纹波电压和变温所引起的误差,减轻重量,缩小体积,增加可靠性,发展新型电机。例如,永磁式高灵敏度直流测速发电机以及永磁式无槽电枢、杯形电枢、印制绕组电枢测速发电机等。

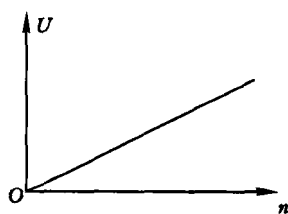


图 2-1 测速发电机输出电压与转速的关系



## 第二节 直流测速发电机的结构

直流测速发电机的结构与普通直流电机的结构基本相同。直流电机总体结构可以分成两大部分:定子部分和转子部分。直流电机的基本结构示意图如图 2-2 所示。

下面分别介绍定子和转子的结构和作用。

### 一、定子

定子由定子铁芯、励磁绕组、机壳、端盖和电刷装置组成。定子结构可分为永磁式和电磁式两种。永磁式直流测速发电机在定子上装有永磁磁铁做成的磁极;电磁式直流测速发电机的定子通常是由硅钢片冲制叠装而成,磁极和磁轭整体相连,在磁极铁芯上套有励磁绕组。如图 2-3 所示。

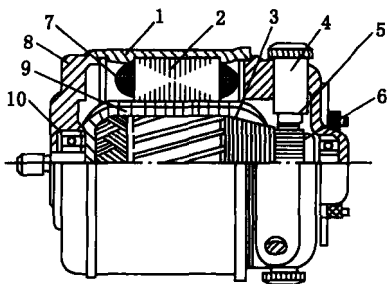


图 2-2 直流电机结构简图

1——机壳;2——定子铁芯;3——电枢;4——电刷座;  
5——电刷;6——换向器;7——励磁绕组;8——端座;  
9——空气隙;10——轴承

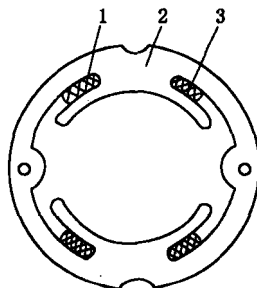


图 2-3 电磁式直流测速发电机定子冲片

1——磁极;2——磁轭;3——励磁线圈

定子作为电机的机械支撑并用来产生主磁场,往往将定子铁芯的主磁极和磁轭加工成一体,由 0.35~0.5 mm 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 2-3 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。

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时,产生磁场,形成磁极,即 N、S 极,控制用的直流电机一般做成二极。

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。

### 二、转子

直流测速发电机的转子通常称为电枢,由电枢铁芯、电枢绕组和换向器组成。

电枢铁芯是主磁路的一部分,由 0.35~0.5 mm 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 2-4 所示,槽内安放电枢绕组。

电枢绕组由铜线绕成,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 2-5 所示。

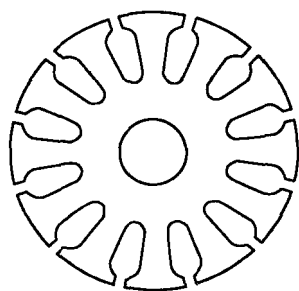


图 2-4 电枢铁芯冲片

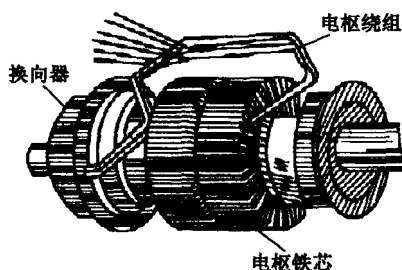


图 2-5 电枢铁芯和绕组

换向器是改变电流方向的装置,直流发电机绕组感应的电动势实际上是交流的,由电刷引出的电流必须经过换向器才变成直流电。换向器的作用是把导体交流电变成直流电,所以又称为“换流装置”。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。

### 第三节 直流测速发电机的工作原理

#### 一、直流测速发电机的工作原理

两极直流测速发电机的模型如图 2-6 所示。磁极 N、S 是测速发电机的定子,由永久磁铁构成。abcd 是一个单匝线圈,置于电机磁场中,线圈两端的引线分别接到互相绝缘的两个换向片上。电刷 A 与 B 与换向片紧密接触。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。当线圈 abcd 作逆时针方向旋转时,线圈的两边 ab 和 cd 在磁场中切割磁力线,根据电磁感应定律,ab 和 cd 将产生感应电动势,根据右手定则可判断,ab 处在 N 极下感应电动势的方向是由 b 指向 a,而 cd 处在 S 极下感应电动势的方向是由 d 指向 c,所以线圈感应电动势的方向是由 a 到 d,a 端为正极,d 端为负极。a 端通过与之连接的换向片,通过电刷 A 引到外电路为正极;d 端通过与之连接的换向片,通过电刷 B 引到外电路为负极。

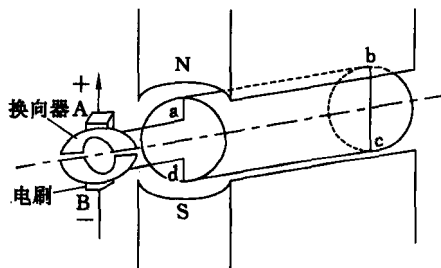


图 2-6 直流测速发电机原理示意图

当线圈旋转  $180^\circ$ ,ab 处于 S 极下,导线 ab 感应电动势的方向变为 a 指向 b,同理导线 cd 处 N 极下,感应电动势的方向变为由 c 指向 d,因此,线圈感应电动势的方向由 d 指向 a。由于直流测速发电机电流引出是经过电刷引出,而且电刷固定在一个磁极下,电刷始终和一个



极性下导线的换向片接触,所以由它引出的电动势的极性不变,经电刷输出的电流为直流。

## 二、直流测速发电机的电枢电动势

直流测速发电机的工作是基于电磁感应定律。根据电磁感应定律,当电枢绕组  $abcd$  在原动机驱动下匀速旋转时,导体内感应的电动势为:

$$e_a = Blv \quad (2-2)$$

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 2-7(a)所示,因此当线圈  $abcd$  旋转时,电刷 A、B 两端将输出脉动的直流电动势,其电动势波形如图 2-7(b)所示。

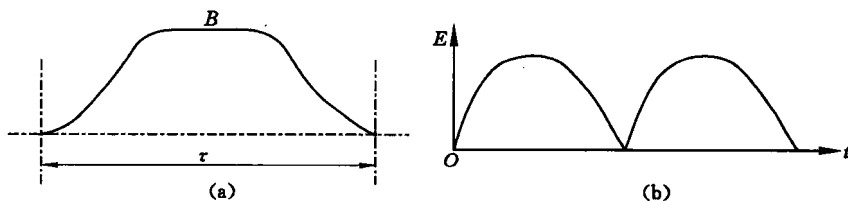


图 2-7 磁场分布和电刷间电动势

(a) 磁场分布; (b) 电刷间电动势

图 2-6 中是用一个线圈来说明直流测速发电机的工作原理。为了减小电动势的脉动程度,实际上直流测速发电机电枢绕组是由若干个元件和换向片相连接,通过换向片把各元件串联成一个闭合回路。具体的连接方式同大容量的直流发电机。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。

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:

$$e_{av} = B_{av}lv \quad (2-3)$$

式中  $B_{av}$ ——每极下的平均气隙磁通密度。

若直流电机的极距为  $\tau$ ,每极平均磁通密度为  $B_{av}$ ,则每极平均磁通密度与磁通量的关系为:

$$B_{av} = \Phi/S = \Phi/\tau l \quad (2-4)$$

设电机的转速为  $n$ (r/min),极对数为  $p$ ,电枢的直径为  $D$ ,则线速度为:

$$v = \pi Dn/60 = 2p\tau n/60 \quad (2-5)$$

把式(2-4)、式(2-5)代入式(2-3),则:

$$e_{av} = 2p\Phi n/60 \quad (2-6)$$

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:

$$E_a = e_{av}N/2a = pN\Phi n/60a = C_e\Phi n \quad (2-7)$$

式中  $C_e$ ——直流电机的电动势常数,  $C_e = pN/60a$ 。

当直流测速发电机的每极磁通  $\Phi$  恒定不变时,电枢电动势与转速成正比,即:

$$E_a = C_e\Phi n = k_e n \quad (2-8)$$



式中,  $k_e = C_e \Phi$ 。

由式(2-8)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。

#### 第四节 直流测速发电机的输出特性

直流测速发电机的输出特性是指其输出电压与转速之间的关系,即:

$$U_a = f(n) \quad (2-9)$$

直流测速发电机接上负载后的电路图如图 2-8 所示。空载时,  $I_a = 0$ , 直流测速发电机的输出电压和电枢感应电动势相等,输出电压与转速成正比,即:

$$U_a = E_a = C_e \Phi n = k_e n \quad (2-10)$$

带上负载  $R_L$  后,因  $I_a \neq 0$ ,电刷两端电压为:

$$U_a = E_a - R_a I_a \quad (2-11)$$

式中  $R_a$ ——电枢回路总电阻,包括电枢绕组电阻,以及电刷和换向器之间的接触电阻。

又因为:

$$I_a = U_a / R_L \quad (2-12)$$

将式(2-12)代入式(2-11),可得:

$$U_a = E_a - R_a U_a / R_L \quad (2-13)$$

整理式(2-13),可得直流测速发电机输出特性的表达式为:

$$U_a = \frac{E_a}{1 + R_a / R_L} = \frac{C_e \Phi n}{1 + R_a / R_L} = C_a n \quad (2-14)$$

式中  $C_a$ ——直流测速发电机输出特性斜率,  $C_a = \frac{C_e \Phi}{1 + R_a / R_L}$ 。

由式(2-14)可以看出,直流测速发电机在负载时  $U_a$  与  $n$  之间为线性关系,如图 2-9 所示。对应不同的负载电阻  $R_L$  得到不同的输出特性,一般  $R_L$  为无穷大。

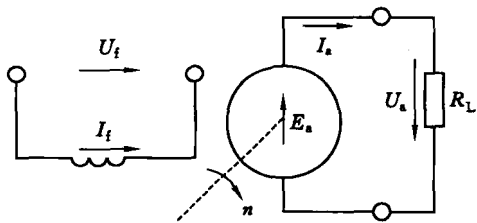


图 2-8 直流测速发电机接负载

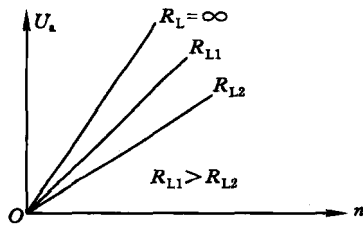


图 2-9 不同负载时的机械特性

**例题 2-1** 有一台直流测速发电机,其电枢电阻  $R_a = 150 \Omega$ ,负载电阻  $R_L = 3000 \Omega$ ,当转速  $n = 1000 \text{ r/min}$  时的空载输出电压  $U_{a0} = 21 \text{ V}$ ,现测得输出电压  $U_a = 40 \text{ V}$ ,试问此时对应的转速  $n$  为多少?

**解** 发电机的电动势常数:

$$C_e \Phi = U_{a0} / n = 21 / 1000 = 0.021 \text{ V}/(\text{r} \cdot \text{min}^{-1})$$

因为  $U_a = \frac{C_e \Phi n}{1 + R_a / R_L}$ ,故  $U_a = 40 \text{ V}$  时的转速为:

$$n = U_a (1 + R_a / R_L) / C_e \Phi = 40 (1 + 150 / 3000) / 0.021 = 2000 \text{ (r/min)}$$





## 第五节 直流测速发电机的误差

本章第四节推导出了直流测速发电机的输出特性  $U_a$  与  $n$  为线性关系。实际上,直流测速发电机的输出特性  $U_a = f(n)$  并不保持严格的线性函数关系,实际特性与理论上的线性特性存在着误差,如图 2-10 所示。产生误差的原因有以下几个方面。

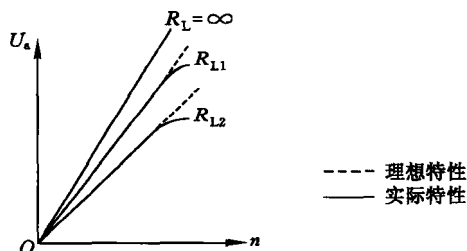


图 2-10 直流测速发电机输出特性

### 一、电枢反应影响

#### 1. 励磁磁场

励磁磁场由励磁电流通过励磁绕组形成,它所产生的磁场如图 2-11(a)所示。在主磁极与转子之间的气隙中磁感应强度基本相等,只有励磁绕组产生的磁场称为空载磁场。

#### 2. 电枢磁场

电机负载时,电枢绕组中有电流通过,电枢磁场由电枢电流通过电枢绕组形成的,它所产生的磁场如图 2-11(b)所示。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。以主磁极的中性线分界,一半与励磁磁场方向相同,另一半与励磁磁场方向相反。

电机工作时的总磁场是由这两个磁场共同作用产生的。电机负载变化时,电枢电流变化,电枢磁场变化,使得合成磁场也发生变化。电枢磁场对合成磁场的影响,称为电枢反应。

合成磁通所产生的磁场如图 2-11(c)所示。比较图 2-11(a)和图 2-11(c),可以看出电枢反应的影响如下:其一,磁场被扭歪,使得磁场的物理中性线与几何中性线分开。被电刷短路的换向线圈中的电动势不为零,增加了换向困难。其二,一半磁极磁通增加,一半磁极磁通减少。磁路不饱和时,磁场的合成可用叠加原理,增加与减少的磁通相同,每极磁通不变。磁路饱和时,增加的磁通少,减少的磁通多,每极磁通减少。由此可知,电枢磁场对合成磁场起去磁作用,电枢电动势和电磁转矩随之减小。

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。

为了减少电枢反应的影响,在直流测速发电机的技术条件中规定了最大转速和最小负载电阻值。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,以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,因为电阻越大,输出特性的斜率越大。