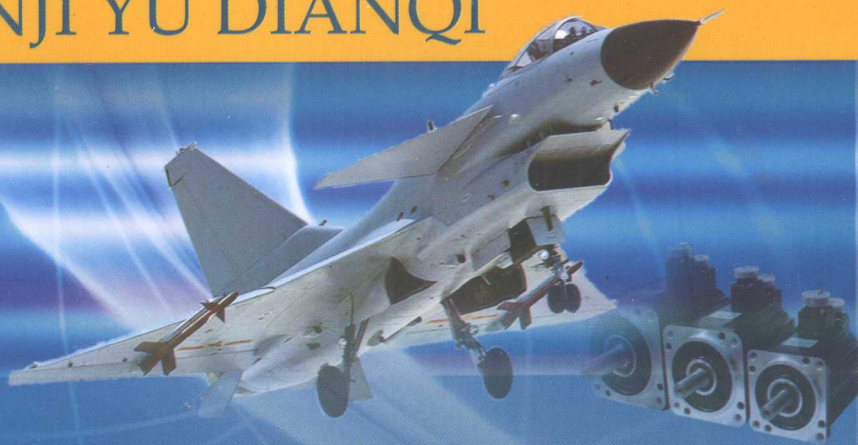


FEIJI KONGZHI  
DIANJI YU DIANQI



# 飞机控制 电机与电器

刘勇智 等编著



国防工业出版社

National Defense Industry Press

# 飞机控制电机与电器

刘勇智 等编著

国防工业出版社

·北京·

## 内 容 简 介

本书共10章,内容包含控制电机与常用控制电器两个部分,主要介绍航空用测速发电机、同位器、旋转变压器、伺服电动机、永磁无刷电动机、磁滞电动机、步进电动机和开关磁阻电动机的基本结构、工作原理、分析方法、运行性能、特性及其典型应用等。对于飞机中常用的低压电器和可编程控制器 PLC 的基本结构、原理及其使用特点也作了介绍。

本书是航空电气工程类本科教材,适用于自动化、电气工程及其自动化等专业。其目的是使学生掌握飞机用控制电机和低压控制电器的相关知识,并满足后续课程学习的需要。亦可供相关专业的工程技术人员参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

飞机控制电机与电器/刘勇智等编著. —北京:国防工业出版社,2009.9

ISBN 978 - 7 - 118 - 06561 - 9

I. ①飞... II. ①刘... III. ①航空电气设备—电机②航空电气设备—电器 IV. ①V242.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 173404 号

※

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100048)

天利华印刷装订有限公司印刷

新华书店经售

\*

开本 710 × 960 1/16 印张 17 字数 390 千字

2009 年 9 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—3000 册 定价 45.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)68428422  
发行传真:(010)68411535

发行邮购:(010)68414474  
发行业务:(010)68472764

# 前 言

《飞机控制电机与电器》主要讲述航空用各类控制电机的基本结构、工作原理、分析方法、运行性能、特性及其典型应用等,以及飞机常用低压控制电器和可编程控制器的基本结构、原理及其使用特点,是本科自动化、电气工程及其自动化,以及其它相关专业的一门专业基础课。

近几十年中,尽管电机理论和技术的发展没有信息技术那样迅猛,但是成熟孕育出新,经典催生变化。机电相结合、多技术相融合,控制电机作为电机的重要门类,其技术亦是更先进、更可靠。结合现代控制理论,控制电机的控制方式也逐渐由电压、磁通或相位等模拟量控制,演变为具有数字接口的数字控制,可直接用于数字控制系统。现代加工技术、新材料、新工艺的广泛采用,以及容错/余度等先进技术在控制电机与控制电器上的引入,使得现代控制电机和控制电器在精确度、灵敏度和可靠性等诸多方面的性能大大提高,一些新型控制电机和控制电器不断出现。我们在本书的编写中,认真汲取了国内外出版的各种相关教材的成功经验,广泛涉猎了控制电机与控制电器理论和技术发展的相关文献,充分结合了我们多年的教学实践经验,注重讲清基本原理,强化“经典与现代相结合、多技术相融合”这一系统观。内容上力求扼要实用,篇幅上力求剔繁化简,文字上力求精炼易懂。

本书由空军工程大学刘勇智、童止戈、吕永健和中南大学刘剑锋编写,其中,第1章、第4章、第7章、第9章由刘勇智编写,第2章、第5章、第6章由吕永健编写,第10章由童止戈编写,第8章由刘剑锋编写。本书由刘勇智任主编,负责全书的组织和统稿工作,并绘制了全书的插图。本书由西北工业大学刘卫国教授担任主审,空军工程大学谢年教授、石山教授、朱潼生副教授在审阅过程中提出了许多宝贵意见。编者的研究生在本书的出版工作中做了大量的工作。本书参考了部分教材和著作。在此一并敬致谢意。

由于编者水平有限,书中难免有错误和不妥之处,恳请广大读者批评指正。

编者  
2009.6

# 目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 控制电机与电器的分类	1
1.1.1 控制电机的分类	1
1.1.2 控制电器的分类	2
1.2 控制电机与电器的发展概况	2
1.3 本书的结构、各章节内容	3
1.4 本课程的主要特点和学习方法	4
第 2 章 测速发电机	6
2.1 概述	6
2.2 直流测速发电机的输出特性及误差	7
2.2.1 输出特性	7
2.2.2 输出特性的误差	8
2.3 直流测速发电机的性能指标和使用	9
2.3.1 直流测速发电机的主要性能指标	9
2.3.2 直流测速发电机的使用	10
2.4 直流测速发电机的应用及发展方向	12
2.4.1 直流测速发电机的应用	12
2.4.2 直流测速发电机的的发展方向	14
2.5 交流异步测速发电机的结构和工作原理	18
2.6 异步测速发电机的特性和主要技术指标	20
2.6.1 输出特性和线性误差	20
2.6.2 输出相位移与相位误差	21
2.6.3 剩余电压 $U_s$	23
2.6.4 输出斜率	24
2.7 异步测速发电机的使用和主要技术数据	25

2.7.1	异步测速发电机的使用	25
2.7.2	交流异步测速发电机产品型号和主要技术数据	27
2.8	交流伺服测速机组	29
	小结	30
	思考题	31
<b>第3章</b>	<b>同位器</b>	<b>32</b>
3.1	概述	32
3.2	单相同位器的基本结构	33
3.2.1	定子	33
3.2.2	转子	34
3.3	变压器式同位器	35
3.3.1	变压器式同位器工作原理的物理分析	35
3.3.2	变压器式同位器的数学分析	37
3.3.3	变压器式同位器的应用举例	42
3.4	差动式同位器	45
3.4.1	变压器式差动同位器同步传输系统的基本工作原理	46
3.4.2	差动式同位器同步传输系统的应用举例	47
3.5	力矩式同位器	48
3.5.1	力矩式同位器的基本工作原理	49
3.5.2	电磁转矩公式	52
3.6	无接触式同位器	53
3.6.1	无接触式同位器的结构	53
3.6.2	无接触式同位器的磁路系统	54
3.7	角位移信号转换器	55
3.7.1	微动同位器	55
3.7.2	环形同位器	60
3.8	同位器的技术数据及使用	62
3.8.1	同位器的技术数据	62
3.8.2	同位器的使用	66
	小结	68
	思考题	70

<b>第 4 章 旋转变压器</b> .....	71
4.1 概述 .....	71
4.1.1 旋转变压器的分类 .....	71
4.1.2 旋转变压器的结构 .....	72
4.2 余弦旋转变压器 .....	72
4.2.1 空载运行时的情况 .....	73
4.2.2 负载运行时的情况 .....	74
4.2.3 原边补偿 .....	76
4.3 正弦旋转变压器 .....	76
4.3.1 空载运行时的情况 .....	76
4.3.2 负载运行时的情况 .....	77
4.3.3 副边补偿 .....	77
4.3.4 反馈补偿 .....	78
4.4 Scott 变压器 .....	80
4.5 线性旋转变压器 .....	82
4.6 无刷旋转变压器 .....	83
4.7 旋转变压器的应用 .....	83
4.7.1 作测量元件 .....	83
4.7.2 作解算元件 .....	85
4.7.3 作反馈元件 .....	88
4.8 旋转变压器的特性指标和技术数据 .....	89
4.8.1 旋转变压器的主要特性指标及误差范围 .....	89
4.8.2 旋转变压器的技术数据 .....	90
小结 .....	93
思考题 .....	94
<b>第 5 章 伺服电动机</b> .....	95
5.1 概述 .....	95
5.2 直流伺服电动机的结构特点和控制方法 .....	96
5.2.1 电枢控制直流电动机 .....	96
5.2.2 磁场控制直流电动机 .....	98
5.2.3 直流伺服电动机的动态特性和传递函数 .....	100

5.3	直流伺服电动机的型号和额定值	104
5.3.1	直流伺服电动机的型号	104
5.3.2	直流伺服电动机的额定值	105
5.4	低惯量直流伺服电动机	106
5.4.1	杯形转子直流伺服电动机	107
5.4.2	印制绕组直流伺服电动机	108
5.4.3	无槽电枢直流伺服电动机	109
5.5	交流伺服电动机的结构特点与工作特性	109
5.5.1	结构特点	110
5.5.2	控制方式	112
5.5.3	两相异步电动机的接线方法	113
5.5.4	两相异步电动机的磁势和转矩	115
5.5.5	两相异步电动机的特性	119
5.6	交流伺服电动机的主要性能指标和技术数据	124
5.6.1	两相交流伺服电动机主要性能指标	124
5.6.2	交流伺服电动机的主要技术数据	127
5.7	力矩电动机	128
5.7.1	概述	128
5.7.2	直流力矩电动机	130
5.7.3	交流力矩电动机	134
5.8	交、直流伺服电动机的性能比较及应用	134
5.8.1	交、直流伺服电动机的性能比较	134
5.8.2	伺服电动机的应用举例	136
	小结	138
	思考题	139
<b>第6章</b>	<b>永磁无刷电动机</b>	<b>140</b>
6.1	无刷直流电动机的工作原理和结构	141
6.1.1	基本工作原理	141
6.1.2	基本结构	143
6.2	无刷直流电动机的绕组	144
6.2.1	绕组联结方式	144
6.2.2	各种绕组联结方式的比较	147



6.3	无刷直流电动机的位置传感器	148
6.3.1	光电式位置传感器	149
6.3.2	霍尔磁敏位置传感器	149
6.3.3	霍尔磁敏位置传感器的选择与使用	150
6.4	无刷直流电动机的基本方程和主要参数	151
6.4.1	基本方程	151
6.4.2	主要参数	155
6.4.3	无刷直流电动机的电枢反应	155
6.5	无刷直流电动机的驱动电路	156
6.5.1	正、反转方法	156
6.5.2	由分立元件组成的三相全桥驱动电路	157
6.5.3	专用集成电路的驱动电路	157
6.6	无位置传感器的无刷直流电机控制	161
6.7	永磁同步电动机	162
6.7.1	同步电动机工作原理	162
6.7.2	永磁同步电动机的结构	165
6.7.3	永磁同步电动机驱动系统的速度控制方法介绍	168
6.8	基于 DSP 的永磁无刷电机控制	170
	小结	170
	思考题	170
<b>第 7 章</b>	<b>磁滞电动机</b>	<b>172</b>
7.1	磁滞电动机的结构和基本工作原理	172
7.1.1	磁滞电动机的结构	172
7.1.2	磁滞电动机的基本工作原理	174
7.1.3	磁滞角与磁滞转矩	176
7.2	磁滞电动机的运行特性	179
7.2.1	磁滞转矩与转速的关系	179
7.2.2	涡流转矩与转速的关系	182
7.2.3	磁滞电动机的机械特性	182
7.3	磁滞电动机的技术发展	184
	小结	185
	思考题	186

<b>第 8 章 步进电动机</b> .....	187
8.1 反应式步进电动机的结构特点和工作原理.....	188
8.1.1 步进电动机的结构特点 .....	188
8.1.2 步进电动机的工作原理 .....	189
8.1.3 基本特点和公式 .....	193
8.2 反应式步进电动机的运行特性与控制方法.....	195
8.2.1 步进电动机的运行特性 .....	195
8.2.2 步进电动机的常用控制方法 .....	203
8.3 其它类型的步进电动机.....	208
8.3.1 永磁式步进电动机 .....	208
8.3.2 感应子式步进电动机 .....	210
8.3.3 直线和平面步进电动机 .....	212
8.4 步进电动机的型号选择与使用.....	214
小结 .....	215
思考题 .....	215
<b>第 9 章 开关磁阻电动机</b> .....	217
9.1 开关磁阻电动机的基本结构和工作原理.....	217
9.1.1 基本结构 .....	217
9.1.2 工作原理 .....	218
9.2 开关磁阻电动机的基本控制原理.....	222
9.2.1 恒转矩区的电流斩波控制 .....	223
9.2.2 恒功率区的角度位置控制 .....	223
小结 .....	224
思考题 .....	225
<b>第 10 章 常用控制电器</b> .....	226
10.1 常用电磁式低压控制电器 .....	226
10.1.1 电磁铁的基本原理 .....	226
10.1.2 电接触及灭弧工作原理 .....	230
10.1.3 电磁式接触器 .....	236
10.1.4 电磁式继电器 .....	239
10.2 其它常用低压控制电器 .....	245

10.2.1	热继电器	245
10.2.2	中间继电器	245
10.2.3	速度继电器	246
10.2.4	开关(电门)	246
10.2.5	微动开关和终点开关	248
10.2.6	按钮	249
10.2.7	电路保护设备	249
10.3	可编程控制器 PLC	253
10.3.1	PLC 的基本组成	253
10.3.2	PLC 的工作原理	255
10.3.3	PLC 的应用特点	258
	小结	259
	思考题	261
	参考文献	262

# 第1章 绪 论

控制电机又称为控制微电机,顾名思义,就是指用于控制系统中的容量和尺寸都比较小的电机。在自动控制系统中,控制电机可用来完成检测、放大、作动、解算以及补偿等功能。如飞机航向系统中用到的同位器、陀螺系统中用到的力矩修正电动机等。它们的功率一般在几毫瓦到几百瓦,机壳外径一般小于130mm,质量从十几克到几千克。

控制电机作为自动控制系统中的元件,在飞机上得到了广泛的应用,如自动驾驶仪、导航仪、导弹的制导、火炮的射击控制、雷达的自动跟踪等。它们有时用于开环控制系统,有时用于闭环控制系统。有的用来测位移、转角、转速或角加速度,有的用来驱动其它部件,有的用来解算三角函数,还有的用来积分或微分,进行系统调节规律的补偿。

控制电器是根据外界特定的信号和要求,自动或手动接通和断开电路,断续或连续地改变电路参数,实现对电路或非电路对象的切换、控制、保护、检测、变换和调节的电气设备,是飞机各电气控制系统的重要组成部分。

## 1.1 控制电机与电器的分类

### 1.1.1 控制电机的分类

控制电机的种类很多,通常按其在控制系统中的作用不同,可分为信号控制电机和功率控制电机两大类。

信号控制电机主要用于信号转换,如把航向等角位移信号转换成电信号的同位器和旋转变压器,把转速信号转换成电信号的测速发电机等,在自动控制系统中主要用作敏感元件、校正元件、阻尼元件和解算元件等。信号控制电机主要包括交、直流测速发电机,单相同位器和旋转变压器等。测速发电机可以把转速转换成电信号,其输出电压与转速成正比。同位器可以将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。旋转变压器的作用与同位器类似,但精度更高,其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。

功率控制电机主要用于将电信号转换成轴上的角位移或角速度、直线位移或线速度,并带动控制对象运动。功率控制电机主要包括交、直流伺服电动机,永磁

无刷电动机,磁滞电动机,步进电动机和开关磁阻电动机等。理想的交、直流伺服电动机的转速与控制信号呈线性关系,而转速的方向由控制电压的极性决定。磁滞电动机是利用磁滞效应工作的电动机,既可以工作于异步状态,又可以工作于同步状态。开关磁阻电动机与步进电动机同属于变磁阻电机的范畴,都是利用磁阻最小原理工作的电动机,步进电动机的转速与脉冲电压的频率成正比,开关磁阻电动机本质上是带位置闭环速度控制的步进电动机。

### 1.1.2 控制电器的分类

在飞机上,控制电器主要用于控制各用电设备的工作,保护供电和用电设备不致因电路短路或过载而遭到损坏,以保证机上电气设备完成所担负的各项任务。按额定电压的高低,控制电器可分为高压电器和低压电器。飞机上常用的是低压控制电器,主要有电磁式控制电器、机械式控制电器、电磁机械混合式控制电器以及可编程控制器等。电磁式控制电器主要有各类继电器、接触器等。机械式控制电器主要有开关、按钮等。电磁机械混合式控制电器主要有断路器、自动保护电门等。

## 1.2 控制电机与电器的发展概况

控制电机与电器的发展是随着自动控制系统的发展而发展的。早期用于控制系统的电机多是在普通电机的基础上加以改动而来的,因而没有太多的显著个性特点。控制理论的发展,以及自动控制系统在各行各业的大量应用,极大地推动了控制电机技术的发展,控制电机的种类日益繁多,体积和重量越来越小,特别是由于电子技术及其元器件制造技术的进步,电机与电子技术相结合,使得控制电机的效率越来越高,控制特性越来越好,控制电机的功率以及力矩范围越来越宽,控制电机本身已成为机电一体化的综合产品。例如,220CYD001 测速发电机,在 6 天旋转一周的转速下,可产生 1mV 的电压输出,而最高可输出 156V 的电压,对应的转速范围为 150000:1;又如 ZC 系列磁滞测功机可测转速范围为 0r/min ~ 20000r/min,力矩为 0N·m ~ 10N·m;再如,300GZ 系列圆感应同步器,测角的分辨力为 0.154 角秒,它们都体现了宽范围和高精度。近年来,随着计算机技术的飞速发展,计算机技术与传统电机技术、电子技术、机械制造技术以及自动控制技术的高度融合,又推出了很多新型的电机,如开关磁阻电机。同时也推动了传统电机技术的飞速发展,如现代步进电动机的控制精度已达到 0.1 $\mu$ m 级。

在伺服系统中,最初流行的是两相交流伺服电动机,后来的主流是有刷直流伺服电动机,其中又以永磁机为主,现在使用较多的是永磁无刷直流电动机和开关磁阻电动机。由普通低转子阻抗的感应电动机配套变压变频调速器构成的感应伺服

电动机也得到大量应用,而通用的交流伺服电动机和磁滞电动机的使用已越来越少。

结合现代控制理论,控制电机的控制方式也逐渐由电压、磁通或相位等模拟量控制,演变为具有数字接口的数字控制,可直接用于数字控制系统。发展的基本方向仍然是提高精确度、灵敏度和可靠性,尺寸小型化,尽量由电机本身来满足系统提出的特殊性能和特殊用途指标,以达到经济性的要求。

在航空上,随着多电飞机和全电飞机的出现,对高精度、高可靠性、控制方式灵活的控制电机的需求更为突出,电传操纵系统和舵面的直接驱动机构,都要大量使用控制电机,其主要特征是实现无刷化、数字控制和容错/余度技术。

图 1-1 所示为先进飞机舵面控制系统中一个控制通道的原理框图。其中,数字控制器的功能是闭合伺服响应的内环和外环,给逆变器提供指令,与飞控计算机接口等;逆变器的功能是对无刷电动机进行换向控制、转矩/转速控制,并对电动机进行限流控制等;机电作动器是电动机与执行机构的组合,用于将电能转换成机械能输出,驱动飞机舵面。

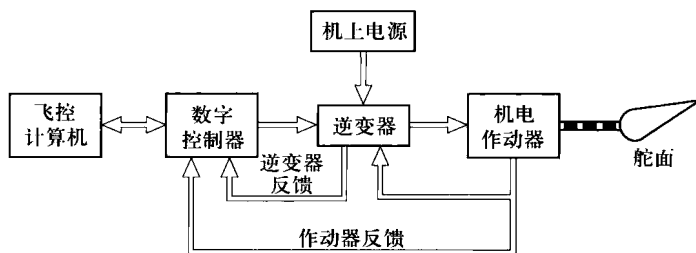


图 1-1 先进飞机舵面控制系统原理框图

与之相适应,控制电器向着高可靠性、长寿命、控制方式灵活、具有自检测和自修复能力、适应数字控制需求的方向发展。如近年来发展的固态继电器、固态接触器、可编程控制器等控制电器就具备这些特点。

### 1.3 本书的结构、各章节内容

本书的内容主要包括两部分:控制电机和控制电器。控制电机部分主要介绍飞机上常用的测速发电机、同位器、旋转变压器、伺服电动机、永磁无刷电动机、磁滞电动机、步进电动机和开关磁阻电动机的基本结构、工作原理、分析方法、运行性能、特性及其典型应用等。控制电器部分主要介绍飞机中常用的低压电器和可编程控制器 PLC 的基本结构、原理及其使用特点。

本书共分 10 章。第 1 章为绪论。主要介绍课程的特点和学习方法,介绍控制电机与电器的发展,介绍常用控制电机与电器的分类和应用特点,目的是使读者宏

观了解课程的主要教学内容,为后续学习奠定基础。第2章~第3章分别介绍调速发电机、单相同位器和旋转变压器这三类检测信号控制电机的结构、原理、特性和使用。第4章~第9章分别介绍伺服电动机、永磁无刷电动机、磁滞电动机、步进电动机和开关磁阻电动机等功率控制电机的结构、原理、特性和使用。第10章介绍飞机上常用控制电器的通用工作原理、分类、典型结构及其使用,以及可编程控制器的基本知识。

## 1.4 本课程的主要特点和学习方法

控制电机是在普通电机的基础上发展起来的,因而它们并没有多少特别的基本工作原理,无非是针对具体应用有一些结构上的特殊性。电机是一种机电能量转换的电磁机械,普通电机一般更着重于对电机力能指标方面的要求,而控制电机则着重于对电机控制性能的要求。控制系统要求所使用的控制电机应该具有高精度、高灵敏度和高可靠性。

这里,精确度是指实际特性与理想特性之间的差异。对功率控制电机来说,主要指特性的线性度和死区;对信号控制电机来说,主要指静态误差、动态误差以及环境温度、电源的频率和电压的变化引起的漂移等。为了达到一定的精确度,控制电机可以在结构、材料与工艺上作出一些牺牲,以复杂的结构、高性能的材料、繁琐甚至昂贵的工艺来确保控制精确度。

灵敏度是指输出对输入信号的延迟。通常希望控制电机的输出能随时跟踪输入信号。但实际上,由于电机机械系统的转动惯量和电磁系统的绕组电感不可克服,因而输入与输出在时间上或多或少会存在差异。对控制电机来说,如不考虑这些问题,就可能会使系统工作不正常。解决的办法通常有为降低转子的转动惯量,采用空心杯转子;为降低电磁时间常数,采用无槽光滑转子等。

这恰恰是在课程学习中应注意把握的问题。学习过程中,通常应该在掌握普通电机结构和工作原理的基础上,从控制系统对控制电机的特殊要求入手,掌握控制电机在结构、原理和特性上的特殊性。

对于控制电机来说,控制性能是最基本的性能,因此各种控制电机的特性及其控制方法和原理是学习重点,应结合各种控制电机在系统中的作用,牢牢掌握控制电机中“控制”这一主线,来掌握其特性及特性下的控制方法和原理,努力把每一种电机结合到一个控制实例中去。

同时,本书的各章内容具有相对的独立性,结构上也缺乏连贯性。但是,由于各种控制电机的原理都是建立在基本的电磁规律基础上的,因而它们之间不是孤立的,既有共性,也有个性。一种电机与另一种电机之间在电磁关系上、基本特性上有很多相似的地方,但它们各自具有与众不同的特点。因此在学习过程中,要用

辩证的观点来学习,将各种控制电机联系起来,着重分析和掌握一些共同规律,同时也要研究各种电机所具有的特殊性质。为了便于学习和理解,本书即按电机在控制系统中的作用分类,同时也将电磁关系和作用原理比较接近的电机放在一起,按照由浅入深、循序渐进的原则安排章节顺序。

由于常用控制电器的种类和型号较多,本书主要介绍其通用原理,在理解掌握通用原理的基础上,重点介绍了各类控制电器的典型结构。在学习过程中应从通用原理和典型结构入手,以达到触类旁通的学习效果。



## 第 2 章 测速发电机

### 2.1 概 述

测速发电机是一种测量转速的信号元件,它能将输入的机械转速变换为电压信号输出,在自动控制系统中作为测量或自动调节电机转速的元件;在随动系统中用来产生反馈信号用以提高系统的稳定性和精度;在解算装置中作为微分和积分元件。在这些应用中,要求电机的输出电压与转速成正比关系,如图 2-1 所示。其输出电压可表示为

$$U = Kn$$

或

$$U = C'_e \Omega = C'_e \frac{d\theta}{dt}$$

式中: $\theta$  为测速发电机转子的转角; $K$ 、 $C'_e$  为比例系数。

由  $U = C'_e \frac{d\theta}{dt}$  可知,测速发电机的输出电压正比于转子转角对时间的微分。

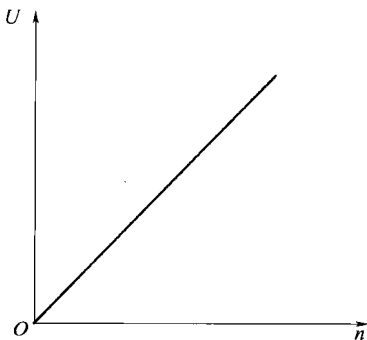


图 2-1 测速发电机输出电压与转速的关系

测速发电机按照所产生电流性质和激磁方式不同可分为以下几类:

(1) 直流测速发电机。又分为永磁式和电磁式两种类型,较为常用的是永磁式直流测速发电机。因为它结构简单,省去了激磁电源,便于使用,并且温度变化对激磁磁通的影响也小。

(2) 交流测速发电机。又分为同步测速发电机和异步测速发电机两种类型。