



高等院校自动化新编系列教材

控制电机及其应用

KONGZHI DIANJI JI QI YINGYONG

吴朝霞 张瑾 化建宁 宋爱娟 蔡璐璐 编著



北京邮电大学出版社
www.buptpress.com

高等院校自动化新编系列教材

控制电机及其应用

吴朝霞 张 瑾 化建宁 宋爱娟 蔡璐璐 编著

北京邮电大学出版社

·北京·

内 容 简 介

本书全面系统地介绍了各种控制电机的基本原理、特性、典型应用以及相关的自动控制技术,反映了当代控制电机发展的新成果,内容丰富、新颖,理论联系实际,提供的基础知识便于读者自学或复习,提供的实例便于读者在实际应用中参考。本书涉及电学、磁学、力学、电子学、计算机及控制技术等多门学科,该课程的教学对于培养自动化领域的高级应用型技术人才具有十分重要的意义。

本书可作为高等院校自动化、测控技术与仪器、过程装备和自动化、机械设计及自动化等专业的基础课或专业基础课教材,也可作为相关科技人员的自学和参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

控制电机及其应用/吴朝霞等编著. --北京:北京邮电大学出版社,2012.1

ISBN 978-7-5635-2801-1

I. ①控… II. ①吴… III. ①微型控制电机—高等学校—教材 IV. ①TM383

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 216331 号

书 名:控制电机应其应用

编 著 者:吴朝霞 张 璿 化建宁 宋爱娟 蔡璐璐

责任编辑:陈岚岚

出版发行:北京邮电大学出版社

社 址:北京市海淀区西土城路 10 号(邮编:100876)

发 行 部:电话:010-62282185 传真:010-62283578

E-mail: publish@bupt. edu. cn

经 销:各地新华书店

印 刷:北京联兴华印刷厂

开 本:787 mm×1 092 mm 1/16

印 张:16.5

字 数:386 千字

印 数:1—3 000 册

版 次:2012 年 1 月第 1 版 2012 年 1 月第 1 次印刷

ISBN 978-7-5635-2801-1

定 价:34.00 元

· 如有印装质量问题,请与北京邮电大学出版社发行部联系 ·

高等院校自动化新编系列教材

编委会

主任 汪晋宽

副主任 金海明 罗云林 张美金 崔光照 王宏文

委员 (排名不分先后)

于丁文 王凤文 王建国 马淑华 石云霞

齐世清 任彦硕 张家生 张健 杨建忠

柳明丽 罗长杰 金伟 赵宏才 赵一丁

顾德英 舒冬梅 藏小杰 郑安平

秘书 顾德英(兼) 马淑华(兼)

编写说明

一本好的教材和一本好的书不同,一本好的书在于其内容的吸引力和情节的魅力,而一本好的教材不仅要对所介绍的科学知识表达清楚、准确,更重要的是在写作手法上能站在读者的立场上,帮助读者对教材的理解,形成知识链条,进而学会举一反三。基于这种考虑在充分理解自动化专业培养目标和人才需求的前提下,我们规划了这套《高等院校自动化新编系列教材》。

本套系列教材共包括 22 册,在内容取舍划分上,认真分析了各门课程内容的相互关系和衔接,避免了不必要的重复,增加了一些新的内容。在知识结构设计上,保证专业知识完整性的同时,考虑了学生综合能力的培养,并为学生继续学习留有空间。在课程体系规划上,注意了前后知识的贯通,尽可能做到先开的课程为后续的课程提供基础和帮助,后续的课程为先开的课程提供应用的案例,以便于学生对自动化专业的理解。

《高等院校自动化新编系列教材》编委会

2005 年 8 月

前 言

控制电机作为微特电机的主要分支已经成为现代工业自动化系统、现代军事装备和科学技术研发不可缺少的重要执行元件。特别是随着光机电仪一体化的进程,控制电机得到快速发展,其使用领域不断拓宽,用量大幅增加。控制电机的应用范围从照相机、摄像机、钟表、洗衣机等与生活密切相关的家电产品到打印机、复印机、传真机以及计算机外围设备等办公自动化控制系统,从机床加工过程的自动控制到汽车、舰船、飞机、火炮的自动操作等,以及机器人的运动机构都需要用到各种各样的控制电机及其电机控制装置。

控制电机是一种机电元件,在各类自动控制系统中具有执行、检测和解算的功能。根据在自动控制系统中的作用,控制电机分为两种类型,一类作为执行元件,如直流伺服电动机、交流伺服电动机、步进电动机、无刷直流电动机、直线电动机、超声波电动机等,其任务是将控制器输出的电信号转换成轴上的角位移或角速度以及直线位移或线速度,并带动控制对象运动;另一类作为测量元件,其主要功能是将转轴的速度或位置等机械信息转换成电信号,如自整角机、旋转变压器、交流测速发电机、直流测速发电机等,用它们能够测量机械转角、角差或转速,一般在自动控制系统中作为敏感元件和校正元件。

从基本的电磁感应原理来说,控制电机与普通旋转电机没有本质上的差别,但普通旋转电机的主要任务是能量转换,例如,发电机是把机械能转换成电能,电动机是把电能转换成机械能,主要问题是提高能量转换的效率,着重于对电机力能指标的要求。而控制电机的主要任务是完成控制信号的传递和转换,主要是以信息转换为目的,更侧重于对高精度、快速响应、运行可靠、微型化等方面的要求。一方面,传统的控制电动机和新的控制技术与控制芯片的结合,使传统控制电机(如伺服电动机、步进电动机等)的应用更为广泛。另一方面,传统控制电机和新的控制技术结合,为满足控制系统的更多更高要求提供了技术保障。随着高性能稀土永磁材料的问世和电力电子器件的发展,涌现出许多性能优越的新型控制电机,如无刷直流电动机、永磁伺服电动机和开关磁阻电动机等。与此同时,开发具有非电磁原理的特种电机,如超声波电机、微波电机、静电电机、分子马达、光热电机、仿生电机和记忆合金电机等特种电机已成为重要研究方向。

本书在借鉴现有教材的精华,总结作者在该领域多年的教学和科研成果的基础上,以加强基础、拓宽知识面、注重应用、提高能力为原则,按照循序渐进的方式进行教材的组织并完成编著工作。全书共8章,主要介绍交直流测速发电机、交直流伺服电动机、角位传感电机、步进电动机、永磁无刷直流电动机、开关磁阻电动机、直线电动机、超声波电动机等控制电机的基本原理、结构、特性、应用以及相关的自动控制技术,内容涉及电学、磁学、力学、电子学、计算机及控制技术等多学科。在选材、内容安排和内容阐述方面力求做到重点突出、联系实际、融合现代技术。可作为电气工程及其自动化、测控技术及仪器、机

械电子工程等专业及其他相近专业的教材或教学参考书。

汪晋宽教授在百忙之中仔细地审阅了书稿,并对本书的结构和内容提出了许多宝贵的指导意见,在此表示衷心感谢。同时感谢李芬、崔玉洁、何成金、刘丽、李文超等老师对编写本书提供的支持和帮助。研究生付斌、朱广帅等同学参与了本书的资料收集与整理、文字输入、图形绘制和文字校对等工作,在此一并致以谢意。

尽管作者在取材和立意上做了许多工作,但也难免出现不妥和错误之处,敬请读者批评指正,不吝赐教。

作 者

目 录

第 1 章 测速发电机	1
1.1 概 述	1
1.2 直流测速发电机	2
1.2.1 基本结构	2
1.2.2 工作原理	4
1.2.3 误差分析及其减小方法	6
1.2.4 直流测速发电机的选择和使用.....	10
1.3 交流异步测速发电机.....	12
1.3.1 基本结构.....	12
1.3.2 工作原理.....	12
1.3.3 输出特性.....	13
1.3.4 交流异步测速发电机的选择和使用.....	14
1.4 霍尔无刷直流测速发电机.....	21
1.4.1 霍尔电势产生.....	21
1.4.2 基本结构及工作原理.....	21
1.5 测速发电机应用.....	23
1.5.1 旋转机械恒速控制.....	23
1.5.2 自动控制系统的解算元件.....	24
思考题与习题	25
第 2 章 伺服电动机与伺服系统	27
2.1 概 述.....	27
2.2 直流伺服电动机	28
2.2.1 结构及工作原理.....	28
2.2.2 电磁转矩和转矩平衡方程式	29
2.2.3 电压平衡方程式.....	30
2.2.4 控制方式和稳态特性.....	31
2.2.5 直流伺服电动机的动态特性.....	36
2.3 特种直流伺服电动机.....	38
2.3.1 直流力矩电动机.....	38
2.3.2 低惯量直流伺服电动机.....	39
2.4 直流伺服电动机的选择和使用	41

2.4.1	主要技术数据	41
2.4.2	直流伺服电动机使用原则	42
2.5	交流异步伺服电动机	43
2.6	交流同步伺服电动机	58
2.6.1	永磁同步电动机的结构与工作原理	58
2.6.2	磁阻式同步电动机的结构与工作原理	63
2.6.3	磁滞同步电动机的结构与工作原理	65
2.7	数字化交流伺服系统	68
2.7.1	数字化交流伺服控制系统的基本概念及分类	68
2.7.2	数字化交流伺服控制系统的特点	71
2.8	伺服电动机应用	72
2.8.1	在重型龙门移动式镗铣床双立柱同步进给中的应用	72
2.8.2	在电梯驱动系统中的应用	75
	思考题与习题	76
第3章	角位传感电机	77
3.1	概 述	77
3.2	自整角机	78
3.2.1	功能与分类	78
3.2.2	基本结构	79
3.2.3	工作原理	80
3.2.4	自整角机的选择和使用	87
3.3	旋转变压器	88
3.3.1	基本结构	89
3.3.2	工作原理	89
3.3.3	旋转变压器的选择和使用	91
3.4	固态角位传感电机	93
3.4.1	固态自整角变压器	93
3.4.2	固态自整角差动发送机	94
3.5	角位传感电机的应用	94
	思考题与习题	99
第4章	步进电动机	100
4.1	概 述	100
4.2	反应式步进电动机	101
4.2.1	结构及工作原理	101
4.2.2	运行特性	106
4.3	步进电动机的驱动与细分控制	115

4.3.1 驱动电源构成	115
4.3.2 角度细分控制	119
4.4 步进电机单片机控制	123
4.4.1 脉冲分配	123
4.4.2 速度控制	127
4.4.3 加减速与定位控制	127
4.5 特种步进电动机	129
4.5.1 多段反应式步进电动机	129
4.5.2 永磁式步进电动机	130
4.5.3 感应子式永磁步进电动机	131
4.5.4 直线和平面式步进电动机	132
4.6 步进电动机的选用	134
4.6.1 主要技术数据	134
4.6.2 选用原则	135
4.7 步进电动机应用	135
思考题与习题	136
第 5 章 开关磁阻电动机	137
5.1 概 述	137
5.1.1 SRD 系统的组成	137
5.1.2 SRD 系统的特点	139
5.2 SR 电动机的工作原理与结构	139
5.2.1 SR 电动机的工作原理	139
5.2.2 SR 电动机的结构	142
5.3 SR 电动机的基本电磁关系	146
5.3.1 理想 SR 电动机的基本电磁关系	146
5.3.2 磁路饱和时 SR 电动机的物理状态	152
5.4 SR 电动机的运行状态与控制方式	154
5.4.1 SR 电动机的运行特性	154
5.4.2 SR 电动机的起动运行	155
5.4.3 SR 电动机的稳态运行	157
5.4.4 SR 电动机的制动运行	159
5.5 SRD 系统的控制	160
5.5.1 SR 电动机控制系统结构及控制算法	160
5.5.2 SR 电动机的功率变换器	161
5.5.3 SRD 系统的反馈信号检测	168
5.6 SR 电动机 DSP 控制	175
5.6.1 基于 TMS320LF2407 的 SRD 系统控制器硬件系统	175

5.6.2 基于 TMS320LF2407 的 SRD 系统控制策略实现	177
5.7 SR 电动机的应用	178
5.7.1 在龙门刨床中的应用	178
5.7.2 在电动车中的应用	179
5.7.3 在全电飞行的起动/发电系统中的应用	180
思考题与习题	180
第 6 章 永磁无刷直流电动机	182
6.1 概 述	182
6.2 永磁无刷直流电动机结构和工作原理	183
6.2.1 基本结构	183
6.2.2 工作原理	185
6.2.3 三相无刷直流电动机的主电路及其工作方式	187
6.3 运行特性及控制原理	192
6.3.1 无刷直流电动机的运行特性	192
6.3.2 无刷直流电机的控制原理	194
6.4 集成专用控制电路	199
6.4.1 无刷直流电动机控制器 MC33033 集成电路的应用	200
6.4.2 LM4428 集成电路的应用	202
6.5 永磁无刷直流电动机的选择和使用	206
6.5.1 选用原则	206
6.5.2 使用注意事项	207
6.6 永磁无刷直流电机的应用	207
6.6.1 无刷直流电机在变频空调中的应用	207
6.6.2 无刷直流电机在电动汽车中的应用	209
6.6.3 无刷直流电机在电动自行车中的应用	210
思考题与习题	212
第 7 章 直线电动机	214
7.1 概 述	214
7.2 直线感应电动机	215
7.2.1 基本结构	215
7.2.2 工作原理	217
7.2.3 直线感应电动机的结构特点	218
7.2.4 直线感应电动机的工作特性	219
7.3 直线直流电动机	220
7.3.1 永磁式直线直流电动机	220
7.3.2 电磁式直线直流电动机	221

7.4 直线同步电动机	222
7.5 直线步进电动机	223
7.5.1 反应式直线步进电动机	223
7.5.2 混合式直线步进电动机	223
7.6 直线电动机的应用	225
思考题与习题	229
第8章 超声波电动机	230
8.1 概 述	230
8.2 超声波电机的工作原理	231
8.2.1 压电效应	231
8.2.2 椭圆运动	232
8.3 环形行波型超声波电机的结构与工作原理	234
8.3.1 电机结构	234
8.3.2 工作原理	235
8.3.3 工作特性	237
8.4 行波型超声波电机的驱动控制	238
8.4.1 调速控制方法	238
8.4.2 驱动控制电路	240
8.5 其他类型超声波电机	241
8.5.1 直线型超声波电机	241
8.5.2 非接触型超声波电机	242
8.5.3 球型超声波电机	242
8.5.4 驻波型超声波电机	244
8.6 超声波电机的应用	245
8.6.1 超声波电机和传统电磁式电机的比较	245
8.6.2 超声波电机应用实例	246
思考题与习题	248
参考文献	249

第 1 章 测速发电机

1.1 概 述

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,电机的输出电压与转速成正比关系,其输出电压正比于转子转角对时间的微分。因此,在解算装置中也可以把它作为微分或积分元件。测速发电机在自动控制系统和计算装置中通常作为测速元件、校正元件、解算元件和角加速度信号元件。

测速发电机按工作原理不同可分为以下几类。

- ① 直流测速发电机:永磁式直流测速发电机、电磁式直流测速发电机。
- ② 交流测速发电机:同步测速发电机、异步测速发电机。
- ③ 霍尔效应测速发电机。

测速发电机按输出信号的形式,可分为直流测速发电机和交流测速发电机两大类。直流测速发电机有电磁式和永磁式两种,虽然直流测速发电机存在机械换向问题,使用时会产生无线电干扰,但其输出不受负载性质的影响,也不存在相角误差,因此在实际中应用较广泛。

交流测速发电机可分为交流同步测速发电机和交流异步测速发电机两类。同步测速发电机输出电压的幅值和频率均随转速的变化而变化,导致发电机本身的内阻抗和负载阻抗的大小也随转速而改变,所以只作指示元件。交流异步测速发电机输出电压的频率和励磁电压的频率相同,而与转速无关,其输出电压与转速成正比,这正是自动控制系统所要求的,由于空心杯转子异步测速发电机性能较好,因而在实际应用中应用较广泛。

直流测速发电机具有输出电压斜率大,没有剩余电压及相位误差,温度补偿容易实现等优点;而交流测速发电机的主要优点是不需要电刷和换向器,不产生无线电干扰火花,结构简单,运行可靠,转动惯量小,摩擦阻力小,正、反转电压对称等优点。

自动控制系统对直流测速发电机的要求主要是精确度高、灵敏度高、可靠性好等。所以,直流测速发电机在电气性能方面应满足以下几项要求:

- ① 输出电压和转速的关系曲线应为线性;
- ② 温度变化对输出特性的影响要小;
- ③ 输出特性的斜率要大;
- ④ 输出电压的纹波要小,即要求在一定的转速下输出电压要稳定,波动要小;
- ⑤ 正、反转两个方向的输出特性要一致,实际应用中一般都是不一致的,稍有差别。

可以看出,第③项要求是为了提高测速发电机的灵敏度,因为输出特性斜率大,即速度变化相对电压的变化大,这样,测速发电机的输出对转速的变化就灵敏。第①、②、④、⑤项的要求是为了提高测速发电机的精度,因为只有输出电压和转速成线性关系,并且

正、反转时特性一致,温度变化对特性的影响越小,输出电压越稳定,则输出电压就越能精确地反映转速,这样才能对提高整个系统的精度有利。

在实际应用中,不同的自动控制系统对测速发电机的性能要求各有所侧重。例如,作解算元件时,对线性误差、温度误差和剩余电压等都要求较高,一般允许在千分之几到万分之几的范围内,但对输出电压的斜率要求却不高;作校正元件时,对线性误差等精度指标的要求不高,而要求输出电压的斜率要大。

1.2 直流测速发电机

1.2.1 基本结构

直流测速发电机的结构与普通直流电机的结构基本相同,可分成定子和转子两大部分,其基本结构如图 1-1 所示。

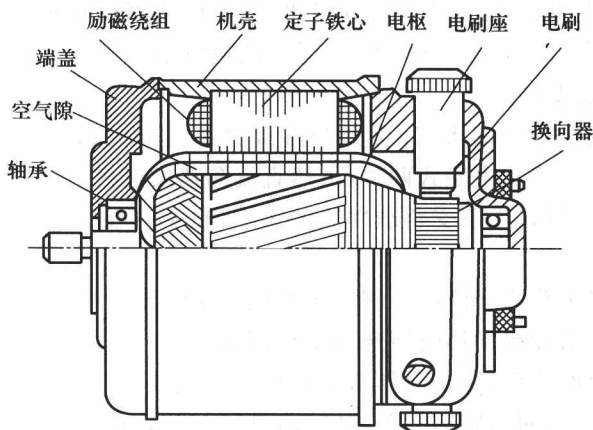


图 1-1 直流电机的基本结构

1. 定子

定子由定子铁心、励磁绕组、机壳、端盖和电刷装置等组成。定子结构可分为永磁式和电磁式两种,永磁式测速发电机在定子上安装永磁磁铁做成的磁极,而电磁式测速发电机的定子通常由硅钢片冲叠而成,磁极和磁轭整体相连,在磁极铁心上套有励磁绕组,定子冲片如图 1-2 所示。

定子作为电机的机械支撑并用来产生主磁场,通常将定子铁心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 1-2 所示。主磁极铁心分成极靴和极身。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。

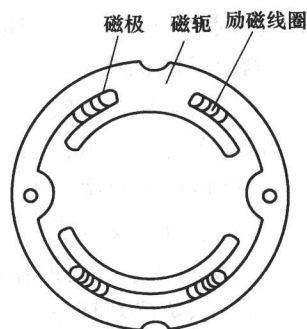


图 1-2 定子冲片结构

励磁绕组由铜线绕制而成,包上绝缘材料以后套在磁极上。当励磁绕组通以直流电时,产生磁场,形成 N、S 极,直流电机可以做成多对极,但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,并用弹簧将它压在换向器表面上,使之有良好的滑动接触。

2. 转子

直流测速发电机的转子通常称为电枢,由电枢铁心、电枢绕组和换向器组成。

电枢铁心是主磁路的一部分,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 1-3 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 1-4 所示。

换向器是改变电流方向的装置,发电机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能变成直流电。换向器的作用是把导体交流电变成直流电。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。常用的换向器有金属套筒式换向器与塑料换向器。如图 1-5 所示是塑料换向器的剖面图。

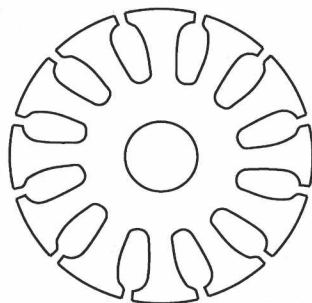


图 1-3 电枢铁心冲片

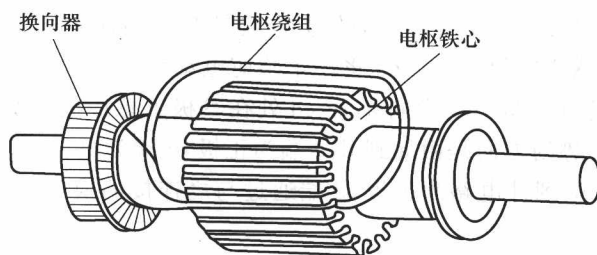


图 1-4 电枢铁心和绕组

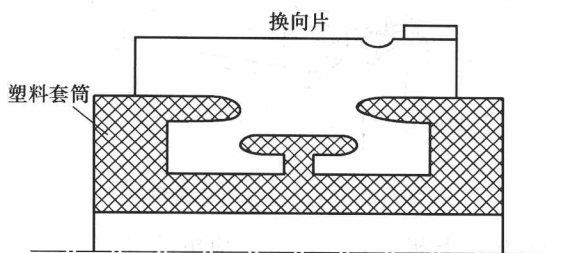


图 1-5 塑料换向器剖面图

直流测速发电机有两种基本形式:一种是电磁式,其定子激磁绕组由外部电源供电,

通电时产生磁场如图 1-6(a)所示;另一种是永磁式,其定子磁极由永久磁钢做成,没有激磁绕组,如图 1-6(b)所示。

永磁式直流测速发电机的优点是省略了励磁电源,结构简单、体积小、效率高;缺点是永磁体的磁性能会受到温度变化和电机振动的影响,长期使用电机性能会逐渐衰减。另外,高性能的永磁材料是这种测速发电机造价高的主要因素。这两种直流测速发电机的转子结构及电枢绕组与小功率直流发电机是一样的。

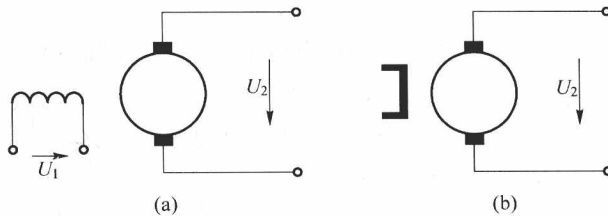


图 1-6 直流测速发电机的两种基本形式

1.2.2 工作原理

1. 直流电势的产生

直流发电机的工作是基于电磁感应定律,现用一个简单的两极电机模型来说明直流发电机的工作原理,如图 1-7 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、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。

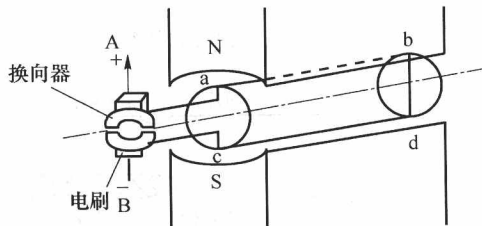


图 1-7 直流发电机原理图

当线圈旋转 180° ,ab 处于 S 极下,导线 ab 感应电动势的方向变为由 a 指向 b,同理导线 cd 处于 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的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的导线的换向片接触,所以由电刷引出的电动势的极性不变,经电刷

输出的电流为直流。

根据法拉第电磁感应定律,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

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

式中, B 为导体所处位置的气隙磁通密度,单位为 T; l 为导体有效长度(即电枢铁心的长度),单位为 m; v 为导体切割磁场的线速度(即电枢圆周速度),单位为 m/s。

由于气隙磁通密度沿圆周近似按梯形波分布,如图 1-8(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 1-8(b)所示。

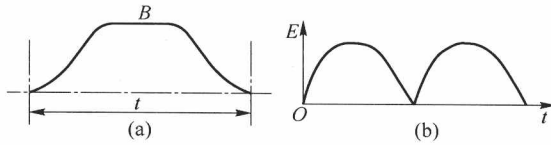


图 1-8 磁场分布和电刷电势

图 1-7 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。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。

2. 直流电机输出特性

直流测速发电机的输出特性是指输出电压 U_2 与输入转速 n 之间的函数关系。电磁式直流测速发电机的原理电路如图 1-9 所示。

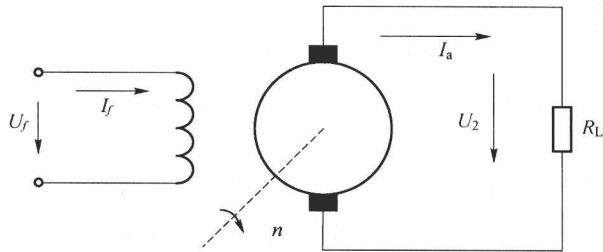


图 1-9 直流测速发电机原理电路

当直流测速发电机的输入转速为 n ,且励磁磁通恒定时,旋转的电枢绕组切割磁通,并产生感应电势,由电刷两端引出的电枢感应电动势为

$$E_a = C_e \Phi n = K_e n \quad (1-2)$$

式中, C_e 为直流电机的电动势常数,其值由电机本身的结构参数决定; Φ 为电机的每极磁通,单位为 Wb; n 为转速,单位为 r/min。

在空载时,即电枢电流 $I_a = 0$,直流测速发电机的输出电压和电枢感应电势相等,因此输出电压与转速成正比。

负载时,因电枢电流 $I_a \neq 0$,直流测速发电机的输出电压应为感应电势减去它的内阻压降,电压平衡方程式为