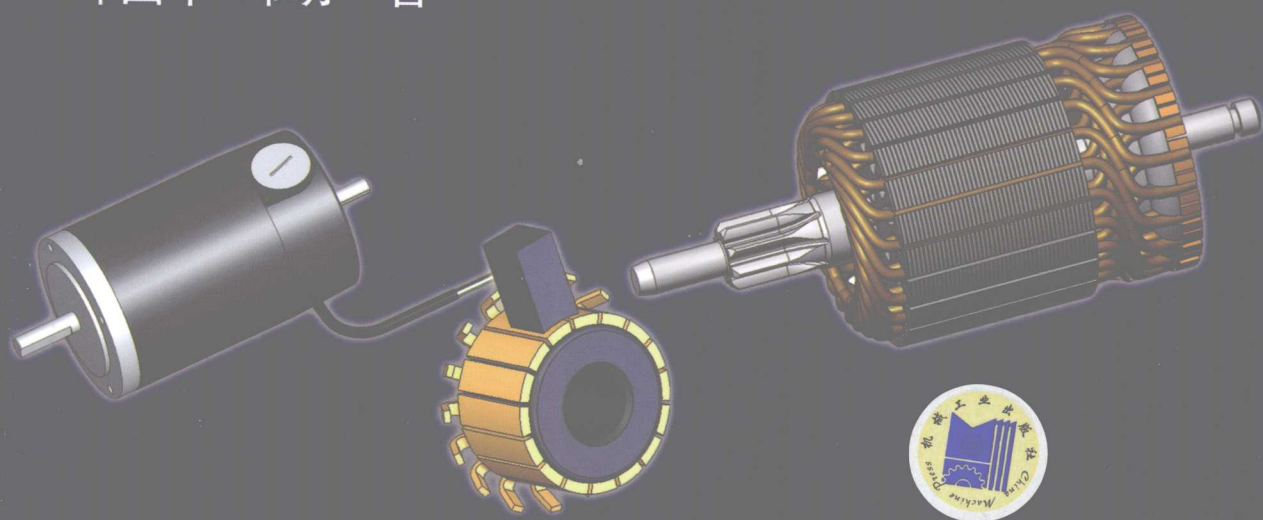


永磁直流电机 实用设计 及应用技术

YONGCI ZHILIU DIANJI SHIYONG SHEJI
JI YINGYONG JISHU

邱国平 邱明 著



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

永磁直流电机实用设计及应用技术

邱国平 邱明 著



机械工业出版社

本书介绍了永磁直流电机设计的实用方法,介绍了多种典型电机的设计技术、齿轮电机的等功率曲线、齿轮箱的效率求取方法,并讲述了用直流电机的实用设计方法来设计无刷电机、串励电机和永磁交流同步测速发电机等电机的方法及技巧;还包括计算机辅助设计技术、电机主要参数控制技术 and 电机测量技术,如无负载电机机械特性测试技术,电机非常规测量和虚拟测量技术,及电机典型工艺和电机检验、认证等内容。

善 图 平 国 院

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)

策划编辑:吉玲 责任编辑:吉玲 关晓飞 版式设计:张世琴

责任校对:刘志文 封面设计:马精明

责任印制:洪汉军

三河市国英印务有限公司印刷

2009年4月第1版第1次印刷

184mm×260mm·22.5印张·557千字

0 001—3000册

标准书号:ISBN 978-7-111-26154-4

定价:49.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

销售服务热线电话:(010) 68326294

购书热线电话:(010) 88379639 88379641 88379643

编辑热线电话:(010) 88379768

封面无防伪标均为盗版

机械工业出版社

前 言

永磁直流电机在国内外的生产量、需求量都非常大,我国有许多厂家能生产各类永磁直流电机。对于从事电机设计、生产的工作者来讲,在电机设计实践中经常会遇到电机仿制、电机按性能要求进行改制、电机按技术参数全新设计等问题,因此就需要有一套比较实用的能够进行永磁直流电机设计的思路和方法,以便有效、简便、正确地对电机进行设计。作者认为:对电机各种理论的研究是为了加深对电机的认识,因此研究得越深越透彻越好,应用这些理论进行电机设计却应该越实用、越简单越好,而且应该是正确可行的。

作者从事电机设计工作多年,对永磁直流电机的设计有了一些经验和体会,并提出了一些实用的设计方法。作者在实际的设计工作中摒弃了一些繁琐的设计公式及一些数学计算,用较实用简捷的方法有目的地设计出令人满意的电机。这些都是作者多年工作经验的积累,有些写过论文,发表在国内外的杂志和论文集中,有的方法仅自己在设计时应用而已。有许多公式和理论的推导就写在一些纸上,多年来忙于工作,无暇把这些思想总结起来,散落了很多,有些再不写下来可能连基本的思路都理不出来了。如果这样,觉着挺可惜的,为此我尽量回忆、总结,想整理成册,出版成书,奉献给大家。

本书除介绍了永磁直流电机设计的实用方法、电机目标设计法、线负荷的正确求取法、电机机械特性关系公式、各类型电机的通用设计公式、转子体积双曲线公式、无刷电机机械特性的计算公式等外,也介绍了多种典型电机的设计技术、齿轮电机的等功率曲线、齿轮箱效率新的求取方法,以及怎样用直流电机的实用设计思路方法来设计无刷电机、串励电机和永磁交流同步测速发电机等电机。另外,本书还介绍了计算机辅助设计技术、电机主要参数控制技术和电机测量技术,如无负载电机机械特性测试技术、电机非常规测量和虚拟测量技术,以及电机的典型工艺和电机检验、认证等知识。因此,本书的内容比较丰富、新颖和实用。书中有许多内容是传统的电机理论著作中还没有分析过的问题,反映了作者的实际工作经验和研究成果。

作者力求把本书写得通俗易懂、内容丰富、实用性强、有理有据、图文并茂且有新意,使读者通过阅读本书就能对永磁直流电机及其设计有一个新的清晰的了解,使设计电机成为一种简单、轻松的工作。当读者阅读完本书,并用书中新颖实用的设计公式与技术,以及各种电机的设计、测试、控制技术,就可非常方便和正确地设计、制造出所需要的各种电机时,心中便会涌现出一种难以言语的快感。

永磁直流电机实用设计技术是一门应用科学,一般具有中等文化程度的人都能接受和理解,并能迅速地初步掌握这门设计技术。

在这里作者向读者说明一些情况,就是出版本书的目的是写一本通俗的、有理论支撑的电机设计的实用电机设计书籍,本书不想花太大的篇幅介绍和阐述电机基础理论,所以有关这方面的内容作者采取了实用主义的态度,把要想说的理论尽量通俗化、简单

化、实用化，能省略的尽量省略，能不说的尽量不说，尽量多讲一些实用的电机设计、制造的新理念和经验。在某些章节，作者花了较多功夫，比较详细地从理论上推导出一系列的计算公式，其目的是为了找出电机设计规律，使电机设计更直观、方便，更符合设计道理。

作者在介绍永磁直流电机实用设计方法、思想和理念时用了许多实例来证明，这些都是作者经历的电机设计内容，部分由友人提供，这些都是真实可信的。如引用的是其他电机设计书上的内容也注明了出处。

作者认识世界有限，对电机的认识仅是沧海一粟。作者不想太多地重复介绍与其他电机设计书上类同的内容，故有些知识读者可以参看相关书籍。因此，本书不可能包罗万象，本书仅能把作者对永磁直流电机通过实践认识的一些东西写出来，认识得多该章节就多写了些，认识得少就少写了些，重要的就多写，次要的就少写。然而由于篇幅关系，不可能在一本书中将各方面知识都讲述得那么清楚和细致，但这是作者数十年设计永磁直流电机的部分工作经历的小结。本书中作者直言不讳地提出了个人对电机设计的看法，以与大家探讨。

总的来说，本书仅能起到抛砖引玉的作用，以供读者参阅。一个人很难完全、正确地认识世界，故本书一定会有谬误，在些敬请读者指正。如果读者能用作者介绍的理论、经验、方法去分析和设计电机，那么作者本人就觉得无限的宽慰了。

作者在写作过程中，得到了厂家、同行及机械工业出版社的支持，在此作者表示诚挚的感谢。

本书主要由邱国平和邱明著述。徐建华、胡金怀、虞南平、周运建参加了第10、11章的撰写，第12章由徐建华编写。本书中的图、表和三维造型主要由邱明完成。胡金怀对本书进行了校核，邱国平、邱明对全书作了增补和修改。

邱国平

于常州戚墅堰

目 录

前言

第1章 永磁直流电机简介 1

- 1.1 永磁直流电机的用途与特点 1
- 1.2 电机是能量转换的装置 1
- 1.3 电机的结构 4
- 1.4 电机的工作原理 5
- 1.5 电机的电磁转矩 6
- 1.6 电机的感应电动势 7
- 1.7 电机的电磁功率 7
- 1.8 电机的基本技术要求 8
- 1.9 电机的性能与技术指标的确定 10
- 1.10 电机的国家标准简介 11

第2章 电机的结构与主要零部件 13

- 2.1 电机的结构形式 13
- 2.2 电机的主要零部件及其选取 13

第3章 电机的负载与选取 30

- 3.1 电机的负载 30
- 3.2 电机负载的计算 31
- 3.3 电机与负载的匹配 33

第4章 电机的电路与磁路 35

- 4.1 电机的电路 35
- 4.2 电枢的绕组 35
- 4.3 电机的换向 37
- 4.4 电机的移刷 39
- 4.5 移刷对电机性能的影响 40
- 4.6 电机电枢绕组的画法 41
- 4.7 影响电刷火花大小的一些因素 42
- 4.8 电刷的火花等级与火花等级的判断 42
- 4.9 电机的磁路 43
- 4.10 电机的磁通 44
- 4.11 电机的磁钢 44
- 4.12 电机的工作磁通 46
- 4.13 磁钢的表面磁通密度 47
- 4.14 磁通的计算 48
- 4.15 各种磁钢有效磁通的分析 49
- 4.16 磁钢磁通分布的测定 51

第5章 电机的主要常数与特性 52

- 5.1 电机的转矩常数 52
- 5.2 电机的电动势常数 53
- 5.3 电机的 K_T 、 K_E 与电机工作电压的关系 54
- 5.4 电机的主要尺寸数据 55
- 5.5 电机的机械特性曲线 56
- 5.6 电机机械特性曲线的分析 58
- 5.7 电机的调节特性 60
- 5.8 电机机械特性曲线的数值分析 62
- 5.9 电机的动态特性 65
- 5.10 电机的损耗 69

第6章 电机的实用设计方法 72

- 6.1 电机设计综述 72
- 6.2 电机额定点的分析与确定 74
- 6.3 电机最大效率的确定 75
- 6.4 最大效率点与电机性能的关系 78
- 6.5 额定工作点与机械特性曲线的关系 82
- 6.6 电机空载转速的确定 83
- 6.7 从 $T-n$ 曲线上任意一点求取最大效率点 83
- 6.8 N 、 Φ 与电机结构参数的关系 89
- 6.9 D 、 L 关系的分析与确定 90
- 6.10 电机轴径的选取 91
- 6.11 电枢铁心冲片的槽数、形状的分析与确定 91
- 6.12 槽满率和槽利用率的分析与确定 94
- 6.13 电流密度、线负荷和发热因子的选取 95
- 6.14 电机工作磁通的分析与确定 97
- 6.15 磁钢厚度及气隙长度的分析与确定 101
- 6.16 电机设计的思路 102
- 6.17 常规的电机设计与核算方法的一些说明 106
- 6.18 永磁直流电机的目标设计法 107
- 6.19 电机冲片形状的目标设计法 112

6.20	用目标设计法的电机设计举例	113
6.21	简易电机设计法	119
6.22	电机效率的分析与计算	119
6.23	各类型电机的通用设计公式	121
6.24	电机的实验修正法	123
第7章	典型电机的设计	125
7.1	铁氧体电机的设计	125
7.2	稀土有槽电机的设计	134
7.3	三槽电机的设计	138
7.4	摩托车起动电机的设计	142
7.5	少冲片系列电机的设计	149
7.6	盘式电机的设计	154
7.7	永磁测速发电机的设计	166
7.8	交流整流直流电机的设计	175
7.9	齿轮电机的设计	181
7.10	直流无刷电机的设计	204
7.11	交流串励电机的设计	225
第8章	电机的计算机辅助设计	233
8.1	电机的CAD简介	233
8.2	数据的读入	239
8.3	数据的输出	241
8.4	算法语言	246
8.5	编程技巧	259
第9章	电机的测量技术	263

9.1	电机转速的测量技术	263
9.2	电机温度的测量技术	269
9.3	电机性能的常规测量技术	273
9.4	电机性能的非常规测量技术	275
9.5	电机的虚拟测量技术	278
9.6	电机磁性能的测量	282
第10章	电机主要参数的控制	288
10.1	电机火花的控制	288
10.2	电机噪声的控制	290
10.3	电机空载电流的控制	299
10.4	电机的绝缘与击穿	303
10.5	电机电磁干扰的抑制	308
10.6	电机温升的控制	312
第11章	电机的典型工艺	317
11.1	磁钢的固持	317
11.2	转子绕组的浸渍	322
11.3	磁钢的充磁与退磁	325
11.4	转子的动平衡	334
第12章	电机的检验与认证	343
12.1	电机的检验	343
12.2	电机的出厂检验与型式试验	343
12.3	电机的国内外认证	344
参考文献		353

第1章 永磁直流电机简介

1.1 永磁直流电机的用途与特点

永磁直流电机是用永磁体建立磁场的一种直流电机。永磁直流电机广泛用于各种便携式的电子设备或器具中,如录音机、VCD机、电唱机、电动按摩器及各种玩具,也广泛用于汽车、摩托车、电动自行车、蓄电池车、船舶、航空、机械等行业,在一些高精尖产品中也有广泛应用,如录像机、复印机、照相机、手机、精密机床、银行点钞机、捆钞机等。在舞台灯光方面,永磁直流电机,特别是小型永磁直流齿轮电机的用量非常大。计算机行业中的打印机、扫描仪、硬盘驱动器、光盘驱动器、刻录机、冷却风扇等都要用到大量的永磁直流电机。汽车行业中的各种风扇、刮水器、喷水器、熄火器、后视镜、打气泵更是用到各种永磁直流电机。宾馆中的自动门、自动门锁、自动窗帘、自动给水系统、柔巾机等都用到永磁直流电机。在武器装备中,永磁直流电机广泛用于导弹、火炮、人造卫星、宇宙飞船、舰艇、飞机、坦克、火箭、雷达、战车等场合。在工农业方面,永磁直流电机也广泛用于电气和自动化控制及仪器仪表中。在医用方面,永磁直流电机用处更不小,如医用的各种仪器、手术工具,如开脑术中的电动锯骨刀,特别是野外手术中的各种仪器基本上都是用的永磁直流电机。在残疾人用品方面,如机械手、残疾车等都用到永磁直流电机。在生活方面,用处更多,现在连牙刷也用永磁直流电机做成电动牙刷了。永磁直流电机的应用真是举不胜举,可以说是无处不在。随着时代的发展,永磁直流电机的应用会更多,原先用交流电机的许多场合均被永磁直流电机所替代。特别是出现永磁无刷电机后,永磁直流电机的生产数量在不断地上升。我国每年生产的各种永磁直流电机达数十亿台以上,生产永磁直流电机的厂家不计其数。

永磁直流电机具有很好的机械特性和调节特性。它具有体积小、效率高、转速变化范围大、有较大的起动转矩、励磁方法简单、价格适中,以及其他形式不可以替代的特点。随着国民经济的发展及人民生活水平的提高,家庭拥有微电机的数量必定增长,其中很大一部分是永磁直流电机。本书把电动机习惯称为电机,在第7章谈到发电机时,称为发电机以示区别。

1.2 电机是能量转换的装置

电机是把电能转换成机械能的一种装置。直流电机是把直流电能转换成机械能的一种装置。如果把交流电通过整流转换成直流电供给直流电机,则直流电机就能把这样的交流电能转换成机械能。

电机输入的是电能,以每小时输入的功(即功率)来表示,称为输入功率。

$$P_1 = UI$$

(1-1)

式中, P_1 为输入功率 (W); U 为额定电压 (V); I 为输入电流 (A)。

由物理学知, 圆柱旋转物体在单位时间内所做的功为

$$P = Fr\omega \tag{1-2}$$

单位时间内旋转电机输出的机械能 P_2 为

$$P_2 = Fr\omega = T \frac{2\pi n}{60}$$

用牛·米表示转矩的话:

$$P_2 = nT/9.5493 \tag{1-3}$$

式中, P_2 为输出功率 (W); n 为额定转速 (r/min); T 为额定转矩 (N·m)。

用克力·厘米表示转矩的话:

$$P_2 = nT/97375 \tag{1-4}$$

式中, P_2 为输出功率 (W); n 为额定转速 (r/min); T 为额定转矩 (gf·cm)。

在电机的测试中, 一般用吊砝码或测功机进行测量, 吊砝码的力用的是重力 mg , 测功机用的是扭力 F 。重力加速度 g 在不同地方是不同的, 所以同样质量物体的重力在不同的地方略有差别。为此, 理论上讲, 力不能用重量来替代。表 1-1 为随纬度的不同而不同的重力加速度。

表 1-1 世界主要地区的重力加速度值

地名	纬度	重力加速度值/ (m/s ²)	海拔/m
北极		9.83216	
柏林	北纬 52°31'	9.81280	
伦敦	北纬 51°31.1'	9.81199	30
巴黎	北纬 48°50.2'	9.80934	61
罗马	北纬 41°54'	9.80348	59
芝加哥	北纬 41°50'	9.80283	182
纽约	北纬 40°48.5'	9.80247	38
旧金山	北纬 37°47.5'	9.79996	114
东京	北纬 35°42'	9.79801	18
南京	北纬 32°3.6'	9.79442	270
上海	北纬 31°11.5'	9.79436	7
广州	北纬 23°	9.78360	13
台北	北纬 25°2'	9.78707	8
高雄	北纬 22°37'	9.77896	29.1
南极		9.83216	

在南京, 0.050kg 的物体所受的重力为

$$G = mg = 0.05 \times 9.79442\text{N} = 4.8972 \times 10^{-2}\text{N}$$

而在柏林, 0.05kg 的物体所受的重力为

$$G = mg = 0.05 \times 9.8128 \text{ N} = 4.9064 \times 10^{-2} \text{ N}$$

其相对误差为

$$\Delta G = \frac{(4.9064 - 4.8792) \times 10^{-2}}{4.8792} = 0.557\%$$

所以在对电机测量要求不高时, 可以用重量来替代重力。现在, 测功机转矩的校验还是用吊砝码的方法来进行的。许多工厂没有考虑因各地区重力加速度不同而需要进行修正的问题。

但为了使测量规范化, 应用国际单位制单位 $\text{N} \cdot \text{m}$ 、 $\text{mN} \cdot \text{m}$ 来表示。

式 (1-3) 应该这样理解: 当电机施加额定电压, 电机出轴受到圆周力 F (N), 产生 T ($\text{N} \cdot \text{m}$) 的转矩时, 电机的转速为 n (r/min), 这时电机输出的功率为 $P_2 = Tn/9.55$ 。可以看出, 电机是以转矩及转速的形式来输出机械能的。电机把电能转换到机械能是有损耗的, 损耗的大小用效率 η 来表示:

$$\eta = P_2/P_1 \times 100\% \quad (1-5)$$

这里值得指出的是, 电机空载时的参数 (n_0 、 I_0) 与电机性能有密切的关系。因此, 研究电机时必须注意以下基本参数: 额定电压 U (V)、输入电流 I (A)、输入功率 P_1 (W)、输出功率 P_2 (W)、输出转矩 T ($\text{N} \cdot \text{m}$)、额定转速 n_N (r/min)、效率 η (%)、空载转速 n_0 (r/min)、空载电流 I_0 (A)。例: 某电机铭牌如图 1-1 所示。

60SY-001 永磁直流电机	
电压	115 V
转速	2500r/min
电流	0.67A
转矩	0.142 N·m
绝缘等级	E
编号	
(工厂厂名)	

图 1-1 某电机铭牌

$$T = 0.142 \text{ N} \cdot \text{m}$$

$$P_1 = UI = 115 \times 0.67 \text{ W} = 77.05 \text{ W}$$

$$P_2 = nT/9.5493 = 2500 \times 0.142/9.5493 \text{ W} = 37.18 \text{ W}$$

$$\eta = P_2/P_1 \times 100\% = 37.18/77.05 \times 100\% = 48.3\%$$

通过以上计算, 知道该电机的输入功率为 77.05W, 输出功率为 37.18W, 转换效率为 48.3%。

电机转动时, 把电能转换成机械能在轴上以转矩及转速的形式输出。电机转矩即电机旋转运动的动转矩或阻转矩。图 1-2 为测试电机输出转矩及性能的最常用最简单的测试方法之一。

电机出轴安装的测试盘称转矩盘, 转矩盘的半径 r (cm) 是给定的, 尼龙绳下吊的砝码受到的重力为 W , 弹簧秤读数为 F , 则电机的转矩为

$$T = (F - W)r \quad (1-6)$$

在国际单位制 (SI) 中, 力的单位为 N, 长度单位为 m, 故转矩单位为 $\text{N} \cdot \text{m}$ 。当砝码的质量值与重量值相等时, 用式 (1-4) 计算较为方便 (即用 MSK 制进行计算)。当电机转速为 n 时, 该电机克服摩擦力而产生的动转矩为

$$T = (F - W)r$$

输出的机械功率为

$$P_2 = Tn/9.5493$$

表 1-2 为转矩单位换算。表 1-3 为功率单位换算。

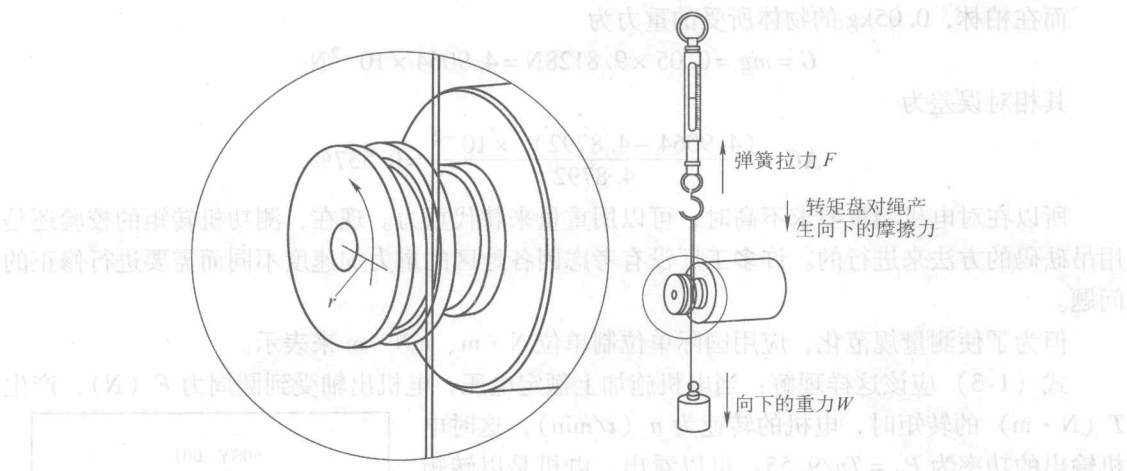


图 1-2 测试电机输出转矩及性能的最常用最简单的测试方法之一

表 1-2 转矩单位换算

数值	单位	gf · cm	mN · m	N · cm	N · m
1	oz · in	72.012	7.060	0.706	0.0071
1	ft · lbf	13827.132	1356.000	135.600	1.3560
1	N · m	10197.000	1000.000	100.000	1.0000
1	N · cm	101.970	10.000	1.000	0.0100
1	mN · m	10.197	1.000	0.100	0.0010
1	kgf · m	10196798.200	101.968	10.197	0.1020
1	gf · cm	1.000	0.098	0.010	0.0001

表 1-3 功率单位换算

瓦 (W)	千克力 · 米/秒 (kgf · m/s)	马力	英尺 · 磅力/秒 (ft · lbf/s)	英马力 (hp)
1	0.101972	1.35962×10^{-3}	0.737562	1.34102×10^{-3}
9.80665	1	1.33333×10^{-2}	7.23301	1.31509×10^{-2}
735.499	75	1	542.476	0.986320
1.35582	0.138255	1.84340×10^{-3}	1	1.81818×10^{-3}
745.700	76.0402	1.01387	550	1

负载不同，电机的选取也不同。许多用户因为平时对电机接触不多，不知道如何正确选用电机，有些负载需要电机输出很大的转矩，而对转速要求较低，例如摩托车起动电机。有些负载需要电机输出的转速较高，对转矩却要求不高，例如电动剃须刀电机和电磨头电机等。随负载情况的不同，电机输出功率的形式也不同。因此有些电机每分钟达数万转，有些电机每分钟仅千转或更低，而转矩达数十牛·厘米以上。

1.3 电机的结构

一台传统的永磁直流电机必须要有产生磁场的磁钢、导磁环、转子、换向器及电刷等主

要零部件。图 1-3 为永磁直流电机的结构。

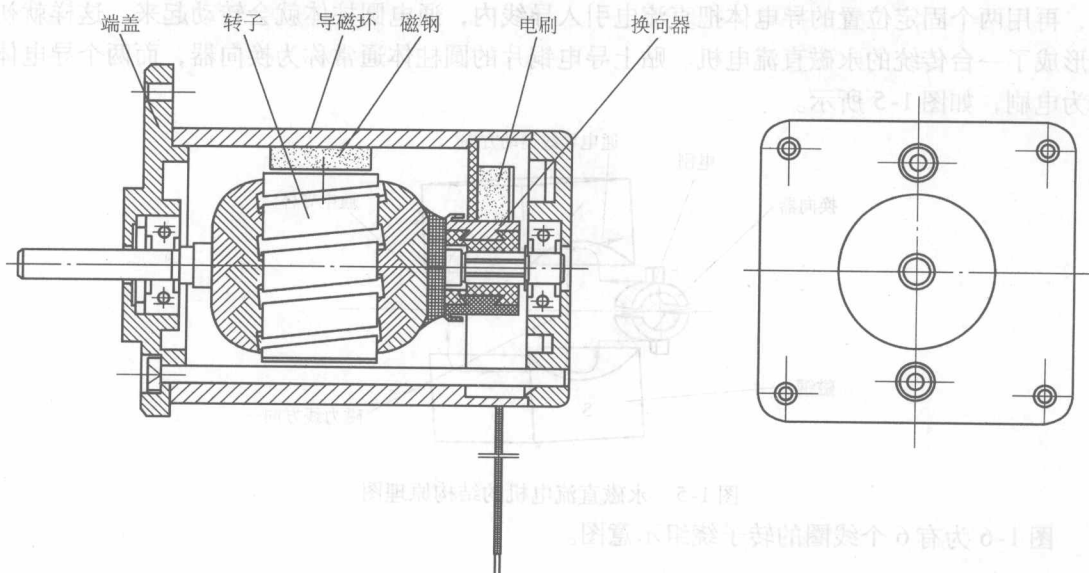


图 1-3 永磁直流电机的结构

市场上看到的永磁直流电机大都为圆形的有槽电机，某些场合也会有方形电机、无刷永磁直流电机和杯形无铁心电机等特殊结构的电机，但这些电机的原理还是相同的。

1.4 电机的工作原理

实验表明，载流导体在磁场中会受到力的作用，由于这种力是磁场和电流相互作用产生的，所以称为电磁力。若磁场与导体互相垂直，则作用在导体上的电磁力为

$$F = Bli_a \quad (1-7)$$

式中， B 为磁场中的磁通密度 (Wb/m^2)； i_a 为导体中的电流 (A)； l 为导体在磁场中的长度 (m)； F 为作用在导体上的电磁力 (N)。

电磁力的方向可以用图 1-4 所示的方法来判别，也可以用左手定则来判断。电磁力产生的基本原理是电机设计的最基础知识。

在旋转电机中，如果一根通电导线在磁场中按一定的规律围绕着一根轴心转动，通电导线所产生的力 F 和该导线到轴心的距离 r 的乘积就是转矩。这个转矩因电磁相互作用而产生，因此称这种产生在电机通电导线上的转矩为电磁转矩。因为这也是一种力矩，所以它的计量单位就是力矩的计量单位。

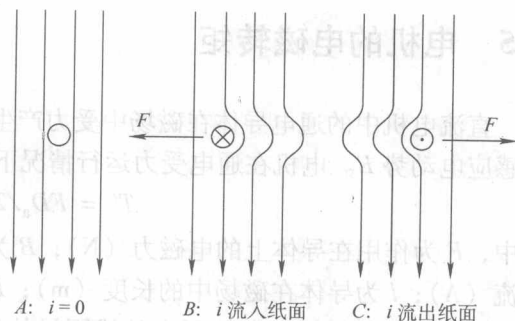


图 1-4 判断电磁力方向的方法

在磁场中，如果把许多根有支撑轴的通电导体组成圆柱形，而且用某一装置使通电导体在特定位置时受到同一方向、同一大小的力的作用，那么这一圆柱体就会旋转起来。

如果在一个绝缘圆柱体表面贴有许多导电铜条片,用某些特殊的方式将它们连接起来后,再用两个固定位置的导电体把直流电引入导线内,通电圆柱体就会转动起来。这样就初步形成了一台传统的永磁直流电机。贴上导电铜片的圆柱体通常称为换向器,而两个导电体称为电刷,如图 1-5 所示。

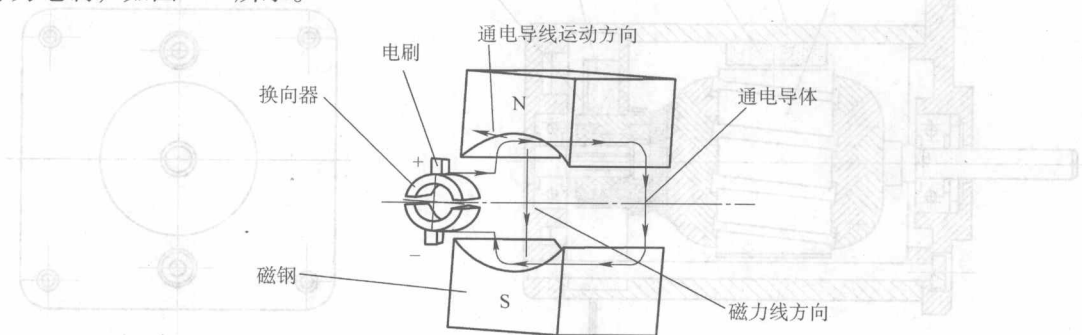


图 1-5 永磁直流电机的结构原理图

图 1-6 为有 6 个线圈的转子绕组示意图。

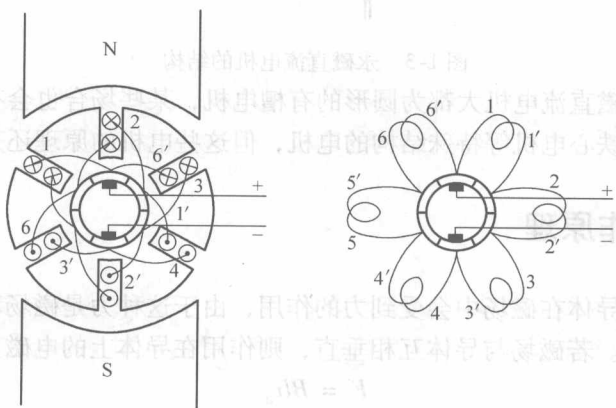


图 1-6 电机转子绕组示意图

1.5 电机的电磁转矩

直流电机中的通电导体在磁场中受力产生电磁转矩,而该导体在磁场中切割磁力线会产生感应电动势 E 。电机在通电受力运行情况下单根导体的电磁转矩为

$$T' = FD_a/2 = Bli_a D_a/2 \quad (1-8)$$

式中, F 为作用在导体上的电磁力 (N); B 为磁场中的磁通密度 (Wb/m^2); i_a 为导体中的电流 (A); l 为导体在磁场中的长度 (m); D_a 为电机转子的直径 (m)。

电机的电磁转矩为电机所有的线圈导体所产生的转矩总和。若用电机的平均磁通密度 B_{av} 代替电机的磁通密度,再乘以线圈导体数 N 得电磁转矩为

$$T' = B_{av} li_a D_a N/2 \quad (1-9)$$

如果电机每极的磁通 Φ 已知, $\Phi = B_{av} \pi D_a l / (2p)$, $i_a = I / (2a)$, 则电磁转矩为

$$T' = \frac{pN}{2\pi a} \Phi I = \frac{p}{a} \frac{1}{2\pi} N \Phi I \quad (1-10)$$

式中, a 为电枢线圈并联支路对数; p 为电机定子极对数; N 为电机线圈总导体数。

若 I 用 A、 Φ 用韦 (Wb) 来表示, 则算得的 T 的单位为 $N \cdot m$ 。

如果式 (1-10) 改写为

$$T' = K_T I$$

则

$$K_T = \frac{p}{a} \frac{1}{2\pi} N \Phi \quad (1-11)$$

微电机中力和转矩比较小, 选大单位好像是用磅秤去称金子, 建议用以下公式:

$$T' = \frac{p}{a} \times 1622.9288 N \Phi I \times 10^{-8} \approx \frac{p}{a} \times 1623 N \Phi I \times 10^{-8} \quad (1-12)$$

式中, I 用 A、 Φ 用麦克斯韦 (Mx) 来表示, 则算得的 T 的单位为克力·厘米 (gf·cm)。

每一个电机的 p 、 a 、 N 、 Φ 是确定的, 因此, K_T 是一个常数, 常称 K_T 为转矩常数。 K_T 的单位为 $N \cdot m/A$ 。这是一个非常有用的常数, 必须认真对待。

1.6 电机的感应电动势

电机的电枢线圈在定子磁场内旋转, 切割磁力线就会产生感应电动势, 根据电磁感应定律, 电枢绕组中一根导体的感应电动势可以用 $e = Blv$ 来表示。不同导体元件的电动势是不同的, 把电枢每条支路所有导体的总电动势 E 求出, B 用平均磁通密度 B_{av} 代替, 磁钢的极距为 τ , $v = 2p\tau n/60$ 。如果每极的磁通 Φ 已知, $B_{av} = \Phi / (l\tau)$, 则电动势 E 由下式决定:

$$E = B_{av} l v \frac{N}{2a} = \frac{\Phi}{l\tau} l v \frac{N}{2a} = \frac{Np}{60a} \Phi n \quad (1-13)$$

当每极磁通 Φ 用 Wb、转速 n 用 r/min 表示时, 电动势 E 的单位为 V。

如果式 (2-13) 改写成

$$E = K_E n$$

则

$$K_E = \frac{p}{a} \times \frac{1}{60} N \Phi \quad (1-14)$$

如果磁通 Φ 用 Mx、转速 n 用 r/min 表示时, 式 (1-14) 可改为

$$E = \frac{Np}{60a} \Phi n \times 10^{-8} = \frac{p}{a} N \Phi n \times \frac{10^{-8}}{60} \quad (1-15)$$

$$K_E = \frac{E}{n} = \frac{p}{a} N \Phi \times \frac{10^{-8}}{60} \quad (1-16)$$

每一个电机的 p 、 a 、 N 、 Φ 是确定的, 因此 K_E 是一个常数, 常称 K_E 为电动势常数。 K_E 的单位为 V/(r/min)。这是一个非常有用的常数, 必须认真对待。

1.7 电机的电磁功率

从电机外部看: 电机参加机电能量转换的功率为电磁功率 P' , 电磁功率是电磁转矩 T' 和电机转子的角速度 ω 的乘积, 即

$$P' = T'\omega \quad (1-17)$$

从电机内部看:电机绕组与负载组成的闭合回路中,存在着电枢电动势 E 和电枢电流 I ,并且 E 和 I 方向相同。电枢电动势 E 产生了电枢电流 I ,从而产生了电机的电磁功率 P' ,则

$$P' = EI \quad (1-18)$$

综合式 (1-17) 和式 (1-18) 得

$$\begin{aligned} T'\omega &= EI \\ T' &= \frac{EI}{\omega} = EI \times 60 / (2\pi n) \end{aligned} \quad (1-19)$$

把式 (1-19) 改为

$$\frac{T'}{I} = \frac{E}{n} \times \frac{60}{2\pi} \quad (1-20)$$

即

$$K_T = K_E \times \frac{60}{2\pi} \quad (1-21)$$

$$K_T = 9.5493 K_E \quad (1-22)$$

这个公式非常简洁,而且非常有意义。它从电机的电磁功率角度把电机的转矩常数和电机的电动势常数联系起来。

当电机被通以额定电压,并受到一个负载转矩后,电机运转起来,电机的转速会趋向恒定。由于电机的电枢回路有内电阻 R_a ,如果电机的端电压为 U ,根据电路定律可以得出电动势和电压的关系为

$$U = E + IR_a \quad (1-23)$$

用电枢电流 I 乘以式 (1-23) 各项得

$$UI = EI + I^2 R_a \quad (1-24)$$

式 (1-24) 表明:电机的输入功率等于电机的电磁功率与电机电枢回路内电阻所消耗的功率之和,即

$$P_1 = P_2 + \Sigma P \quad (1-25)$$

式中, ΣP 为电机的总损耗功率。

ΣP 是由几部分组成的,作者摘录了王宗培教授在《永磁直流微电机》一书中列出的一张“永磁直流电机的损耗”图(见图 1-7),这张图非常清楚地表明了总损耗。

从图中可以清楚地看到这些损耗的由来和它们之间的关系。在设计中经常要考虑到这些损耗,并考虑如何去减小这些电机中的损耗,从而使电机的工作效率更高一些,体积更小一些。

1.8 电机的基本技术要求

永磁直流电机的基本技术要求有统一的国家标准,即 GB/T 5171—2002《小功率电动机通用技术条件》。铁氧体永磁直流电机也有国家标准,即 GB/T 6656—2008《铁氧体永磁直流电动机》。有些永磁直流电机又属于伺服电机,对于伺服电机也有统一的国家标准。专业电机如汽车电机又有汽车电机的标准。标准不同,对电机的有些要求也不同。对照标准,主

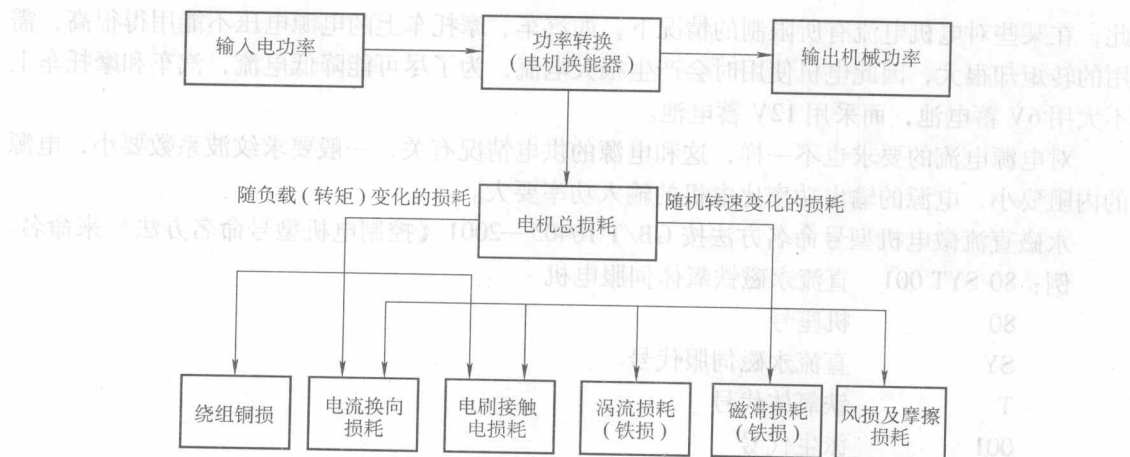


图 1-7 永磁直流电机的损耗

要看电机的使用场合。一般永磁直流电机的铭牌上应至少注明电机的基本技术要求。例如：

产品型号 55ZYT001

额定电压 $U_N = 24V$

额定功率 $P_N = 11W$

额定电流 $I_N = 0.7A$

额定转速 $n_N = 3000r/min$

绝缘等级 E

产品编号 20070818

制造厂名

有的铭牌注明了额定转矩 T_N ，代替了额定功率一项，其实是一样的。电机额定点的技术要求是给使用者作为选用电机时的参考，一般是指电机长时间工作时的额定技术参数。按照铭牌上的基本技术要求选用电机，则电机基本上会正常工作。如果使用的转矩大于或小于电机的额定转矩，则电机仍能转动，只是会出现容易发热或电机大马拉小车、效率不高等现象。

直流电机使用的电压等级是由国家标准规定的：

6V、9V、12V、24V、27V、48V、60V、110V、220V

当然特殊场合也可以不按以上规定，例如电动剃须刀和玩具电机的电压有 1.5V 或 3V 的，便携式袖珍收录机的使用电压有 1.7V 或 2.1V 的。现在由于锂电池和镍氢、镍镉电池的产生，电池的电压就会有 1.2V、4.1V、3.6V、7.2V、8.4V 等，用于计算机、数码相机等产品，所以直流电机的国家标准中估计应该会随电池的发展而增加新的标准电压等级。

总之，电机设计工作者设计电机时，选用电源电压的原则是既要适合使用要求，又要尽量采用标准电压。以后可以知道，电机选用较高电压或较低电压是不大适合的。选用高电压会带来换向片片间电压升高、换向火花增加、换向片间绝缘等级要求提高等电机设计和工艺上的问题。如果功率较大的电机选用了低电压电源，那么势必会使电机输入电流增加，使电枢线径加大，在绕线时会带来嵌线困难，槽满率会提高，给电机的制造和运行带来不利。选取电源电压还是有些原则的。电机电源电压越高，则电机产生单位转矩取用的电流越小。因

此,在某些对电机电流有所限制的情况下,如汽车、摩托车上的电源电压不能用得很高,需用的转矩却很大,因此电机使用时会产生很大电流,为了尽可能降低电流,汽车和摩托车上不大用6V蓄电池,而采用12V蓄电池。

对电源电流的要求也不一样,这和电源的供电情况有关,一般要求纹波系数要小,电源的内阻要小,电源的输出功率比电机的输入功率要大。

永磁直流微电机型号命名方法按GB/T 10405—2001《控制电机型号命名方法》来命名。

例:80 SYT 001 直流永磁铁氧体伺服电机

80 机座号

SY 直流永磁伺服代号

T 铁氧体代号

001 派生代号

机座号规定如下:

机座号 12、16、20、24、28、36、45、55、70、90、110、130

电机外径/mm 12.5、16、20、24、28、36、45、55、70、90、110、130

以上机座号及电机外径是我国制定的标准,选用电机时应尽量按国家标准选用,但平时看到的一些国内电机往往并不执行该标准。例如,生产量很大的玩具电机和力矩电机,其外径(mm)有17.1、21.3、23.8、24.4、27.5、29.2、33.5、35.8、42、48、51、51.9、63、78、82等;录音电机的外径有33.5mm和其他尺寸。有些直流电机的外径(mm)有15、25、42、57、60、76、80、90、110等。这里应该注意机座号的制定与国际接轨的问题。因为机座号及外径选得合理,既可以适合我国生产及应用,又可以替代国外电机,从而进行国产化。为了减少进口,发展民族工业,并使产品走出国门,认真选择机座号是必要的。国外制定机座号尺寸也有他们的道理,这点也需明白。

1.9 电机的性能与技术指标的确定

上节的产品铭牌表示的仅是电机的主要性能,特别是电机额定点的性能,所谓的额定点的性能就是电机满足外界的需要,正常工作所能达到的性能。

电机是一个把电能转换成机械能的能量转换器,所转换成的机械能就能够对外界做功。

电机对外界做功,一般常有三种形式:重物提升做功;对重物牵引做功;对重物旋转做功。

对物体做功和计算,在初中或高中物理书上都讲得非常清楚了,计算也简单,但关键是:电机要输出多少功才能对外界做相应的功。如果外界需要电机做功时,不需要其他力能转换设备,即外界需要的功就是电机要输出的功;否则,就要考虑其他机械的能量损耗。一般来讲,电机输出功率的大小和电机单位时间内做的功有极大的关系。在短时间和长时间内做同样的功,电机输出功率的大小是不同的。时间短则电机的输出功率大,时间长则电机的输出功率小。

不管怎样,电机的输出功率是通过电机的输出转矩和该转矩时的转速来输出的,因此电机在额定输出功率时必须确定电机的额定转矩、额定转速和额定电压。考虑到电机的供电电流,因此必须确定电机的额定电流。为了表征该电机的能量转换能力,必须对电机的效率提