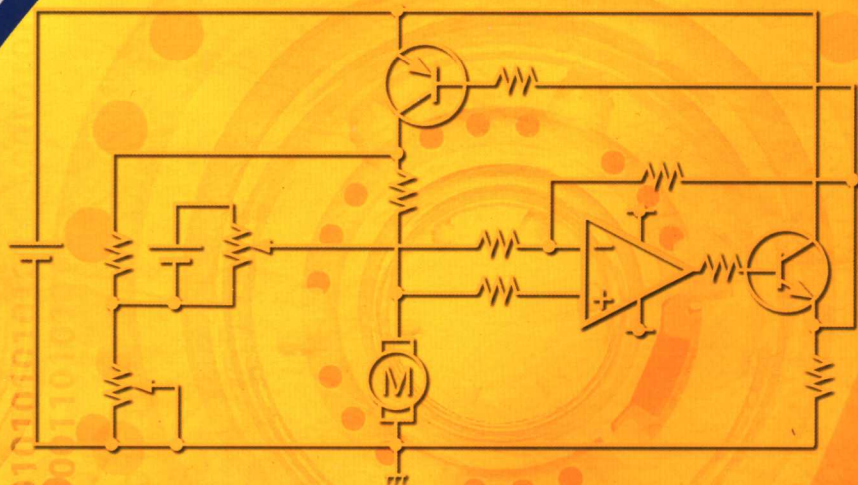


图解实用电子技术丛书

直流电动机 实际应用技巧

[日] 谷腰欣司 著
王益全 译



科学出版社

www.sciencep.com

图解实用电子技术丛书

直流电动机实际应用技巧

〔日〕 谷腰欣司 著

王益全 译

科学出版社

北 京

图字: 01-2006-0586 号

内 容 简 介

本书是“图解实用电子技术丛书”之一。本书汇集了电动机控制所需要的基础知识,介绍了近年来直流电动机控制领域的最新技术成果,反映了机电一体化技术的进步及其应用领域的变化。

本书共 11 章,以大量图表介绍电动机的基本特性,转速控制方法,利用电动机自身特性的转速检测与控制,采用伺服控制技术的正规转速控制,具有高稳定性的数字控制方法,伺服控制系统灵敏度极稳定度的提高技术,基于 PWM 控制的电动机节能驱动方法,电动机的正、反转控制及其在位置控制中的应用,基于微型计算机的电动机控制基础知识,直流电动机的计算机控制系统等,并列举了几种电动机控制实用技术。

本书可供从事控制电路设计及研发人员参考,也可作为大专院校自动化、机电一体化等相关专业师生的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

直流电动机实际应用技巧/(日)谷腰欣司著;王益全译. —北京:科学出版社,2006

(图解实用电子技术丛书)

ISBN 7-03-017498-4

I. 直… II. ①谷…②王… III. 直流电机-应用-图解 IV. TM33-64

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 069770 号

责任编辑:杨 凯 崔炳哲 / 责任制作:魏 谨

责任印制:刘士平 / 封面设计:李 力

北京东方科龙图文有限公司 制作

<http://www.okbook.com.cn>

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

源海印刷有限责任公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2006 年 8 月第 一 版 开本: B5(720×1000)

2006 年 8 月第一次印刷 印张: 15 1/4

印数: 1—4 000 字数: 222 000

定 价: 35.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换<明辉>)

前言

目前,以小型电动机为中心的机电一体化技术已经获得了显著的进步,其应用领域也在不断扩展。例如,家用电器领域中的空调、换气扇、各种送风机、洗衣机、全自动餐具洗涤剂、搅拌机、咖啡机等;办公室自动化(OA)装置中的个人计算机、打印机、FAX、复印机、各种磁盘存储装置等;音频-视频(AV)系统中的磁带录像机(VTR),CD,DVD,CD-R/W,微型激光唱片(MD)等;以及其他以电动机作为驱动源的机械装置,如电动自行车、电动汽车和儿童玩具等。可以说,机电一体化技术的应用实例不胜枚举。

显然,电动机和机电一体化技术的应用给我们的生活带来很多便利,也使人们的生活方式发生了变化。机电一体化技术的发展还促进了以电动机为中心的控制技术的进步,也为电动机技术、微电子技术以及电力电子技术等的发展做出很大贡献。

本书在作者前期出版的直流电动机控制方面的有关文献的基础上,汇集了电动机控制所需要的基础知识,介绍了近年来直流(DC)电动机控制领域的最新技术成果,对于一些适应时代需要的内容作了重点介绍,以便使本书能够反映机电一体化技术的进步及其应用领域的变化。即使在专用集成电路(ASIC)已经成为主流的今天,通用IC因其良好的灵活性和有效性而继续获得广泛的应用。考虑到初学者的阅读需要,本书中的直流电动机控制电路采用了专用IC,为了使读者能够很好地理解和应用这些电路,对这些具体的电路实例进行了充分的展开说明。

本书的内容安排如下:

第1章介绍了直流电动机的转速、转矩、反电动势、电枢电阻以及电枢电流等基本概念及其相互之间的关系等,以便读者理解直流电动机的特性。

第2章对电动机控制的意义和目的以及直流电动机的基本控制技术作了简要的说明。

第3章介绍了实现转速稳定化控制时的基本电路构成,对最简单的转速稳定化控制方法及其具体控制电路进行了说明。

通过第1章至第3章的学习,读者可以初步掌握能够使直流电动机稳定旋转的简单控制电路的设计方法。

第4章介绍了使用测速发电机或频率发电机FG来检测转速的伺服控制电路,同时,说明了采用分立元件时和采用专用IC时电路的不同点。

第5章介绍了实现高稳定性转速控制的数字控制方法,采用电动机PLL控制专用IC的电路设计方法。

至此,对于直流电动机转速稳定化的控制(常称为定速控制)方法已经有有了一个比较全面的了解。

第6章就伺服控制系统(反馈控制系统)的控制特性提高技术作了说明。一般说来,在改善伺服控制系统特性时,以及对伺服控制系统的响应特性做出评价时,都需要应用伺服控制理论。这里,尽可能避开那些深奥的控制理论,而介绍了使伺服控制系统稳定化的电路参数设计法。通过具体电路实例及其波形照片等,可以使读者更好地理解伺服控制系统的稳定与不稳定的意义。

第7章介绍了基于PWM控制的节能化驱动控制方法。对PWM控制的原理与应用技术进行了说明,并就其节能效果进行了分析。

第8章介绍了直流电动机的位置伺服控制。主要以模拟位置控制的基本原理和具体电路及其实际应用为例进行了说明。

第9章就采用微型计算机时的基本控制技术作了说明。通过本章的学习,读者可以了解采用微型计算机进行电动机控制时的诸多优点,以及必要的接口方法。

第10章介绍了直流电动机的数字控制方法。在所介绍的控制系统例子中,采用了控制用微型计算机KL5C8012(Z80),直流电动机的脉冲驱动法,以及基于D/A转换器的直流电动机转速控制方法。本章由西野聪氏和神野勉氏共同撰写。

最后,在第11章中,介绍了直流电动机控制时经常遇到的问题,并结合具体实例作了说明。

通过本书的学习,相信读者已基本具备了从事直流电动机控制电路的实际设计能力,也可以为今后进一步深入学习电动机控制技术打下基础。

在执笔本书时,参考了很多有关文献和资料,在此,对这些文献和资料的作者深表谢意。在本书出版之际,对以CQ出版社的山形孝雄先生等有关各位的悉心指导和鼎力协助表示衷心感谢。

著 者

目 录

第 1 章 直流电动机基础知识	1
1.1 电动机的类型与分类	1
1.1.1 电动机的大小与输出功率的关系	1
1.1.2 电动机的输入功率	1
1.1.3 电动机输出功率的表达式	3
1.1.4 电动机输出功率与效率关系的表达式	3
1.1.5 直流电动机的结构	4
1.1.6 有关电动机的名词术语	5
1.2 电动机的运行特性	7
1.2.1 转矩-转速特性	7
1.2.2 电动机的电流波形	9
1.3 电动机的转速调节	11
1.3.1 电枢回路串电阻调速	11
1.3.2 用串联二极管来调速	12
1.3.3 利用三极管的电流放大作用来调速	13
1.3.4 使用运算放大器时的电动机调速	15
1.4 电动机控制基础知识	16
1.4.1 电动机的发电机运行	16
1.4.2 反电动势观测	17
1.4.3 电动机的基本特性	19
1.4.4 转速与转矩及电流的关系	20
1.4.5 电动机电流和转速的计算	20
1.5 实现电动机正、反转运行的方法	21
 第 2 章 转速控制方法	 25
2.1 如何使直流电动机的转速稳定	25
2.1.1 电动机内部压降补偿法	26
2.1.2 伺服控制技术的应用	26

2.2 电动机转速的检测方法	27
2.2.1 测定电动机电流的脉动来检测转速	27
2.2.2 利用电动机的反电动势来检测转速	28
2.2.3 利用直流测速发电机来检测转速	29
2.2.4 利用交流测速发电机或频率发电机来检测 转速	29
2.2.5 使用光电式转速传感器来检测转速	30
2.3 电动机的转矩	33
2.4 用转矩仪测试电动机的特性	34
2.5 常用电动机特性的测试	35
 第3章 利用电动机自身特性的转速检测与控制	37
3.1 基于桥式伺服控制(电子调速器)的转速稳定性 控制	37
3.1.1 桥式电路的转速检测原理	37
3.1.2 桥式伺服控制电路原理	38
3.1.3 桥式伺服控制电路实例	39
3.1.4 晶体管桥式伺服控制电路	40
3.1.5 晶体管桥式伺服控制实用电路的实验	41
3.2 基于比例电流控制的转速稳定性控制	45
3.2.1 比例电流控制的基本原理	45
3.2.2 实现比例电流控制的电路	46
3.2.3 使用 IC 芯片的比例电流控制电路设计	47
3.2.4 电动机的选择是比例电流控制法的关键	50
3.2.5 温度对电动机常数的影响	51
【专栏】明智的电动机选择方法——为了改善控制 性能,宜选用机械时间常数小的电动机	52
 第4章 采用伺服控制技术的正规转速控制	55
4.1 实现转速稳定性控制的直流伺服控制	55
4.1.1 采用直流伺服控制来实现转速稳定的方法	55
4.1.2 基于晶体管的简单控制电路	56
4.1.3 基于晶体管的实用 DC 伺服控制电路	57
4.1.4 基于运算放大器的直流伺服控制电路	58
4.2 比直流伺服控制更进一步的 F-V 伺服控制	59

4.2.1	FG 伺服控制的基本构成	59
4.2.2	F-V 转换器的构成	60
4.2.3	实用 F-V 伺服控制电路的构成	61
4.2.4	F-V 伺服控制电路的实用设计举例	62
4.3	使用 F-V 伺服控制专用 IC 芯片的电动机控制电路	64
4.4	使用 F-V 控制专用 IC 芯片的恒速控制电路	67
4.5	在调试实验中学习 F-V 控制电路	71
4.5.1	有关参数的调整	72
4.5.2	主要环节的信号波形	72
第 5 章 具有高稳定性的数字控制方法		75
5.1	数字伺服控制简介	75
5.1.1	数字控制与模拟控制	75
5.1.2	数字控制方法	76
5.2	用数字方式进行比较控制的 PLL 控制	77
5.2.1	普通 PLL 与电动机控制用 PLL 的区别	78
5.2.2	PLL 控制系统的构成方法	79
5.2.3	PLL 控制与 FG 伺服控制的组合控制	80
5.2.4	采用石英晶体振荡器的 PLL 控制	81
5.3	PLL 控制理论简述	82
5.4	电动机控制电路设计举例	84
5.4.1	PLL 控制电动机的实验	84
5.4.2	PLL 控制时的同步范围	88
5.4.3	F 伺服控制和 P 伺服控制的 D/A 转换器	89
5.4.4	电动机转速决定于晶体振荡频率	90
5.4.5	PLL 控制电路各主要环节的信号波形	91
5.4.6	用于电动机控制的一体化型 PLL IC	93
第 6 章 伺服控制系统灵敏度及稳定度的提高技术		97
6.1	伺服控制系统增益的确定	98
6.1.1	电动机基本特性的确认	98
6.1.2	为抑制负载变化率而需要的系统增益	99
6.1.3	系统增益是负载变化率的倒数	100
6.2	伺服控制系统动态特性的改善	101
6.2.1	电动机本身的响应特性	102

6.2.2	二阶延迟的伺服控制系统	103
6.2.3	二阶延迟系统的控制特性	103
6.2.4	伺服控制系统的相位补偿	105
6.2.5	相位超前电路的构成方法	106
6.3	相位补偿特性的实验认定	106
6.3.1	无相位补偿时	107
6.3.2	施加合适的相位补偿时	108
6.3.3	相位补偿不合适时	108
6.4	实际伺服系统的相位补偿	109
6.4.1	发生扰动时的频率特性	109
6.4.2	FG 伺服控制的相位补偿实例	110
6.4.3	相位的滞后-超前补偿	111
6.4.4	动态响应特性研究的阶跃响应法	113
6.4.5	伺服控制系统的波特图	114
6.5	直流电动机的特性分析与传递函数	115
6.5.1	直流电动机的特性分析	115
6.5.2	电动机的传递函数	116
6.5.3	求 K_M 和 ω_M 的方法	117

第 7 章 基于 PWM 控制的电动机节能驱动方法 119

7.1	对 PWM 控制的介绍	119
7.1.1	直流电动机的脉冲驱动	120
7.1.2	直流电动机的高频脉冲列驱动	121
7.1.3	电动机开关控制的优点	122
7.1.4	通过改变占空比来控制电动机的转速	123
7.2	使用通用 IC 芯片构成的 PWM 电路	124
7.3	PWM 控制提高了电动机运行效率	125
7.3.1	线性控制时的功率消耗	126
7.3.2	PWM 控制时的功率消耗	127
7.3.3	PWM 控制的实际节能效果	128
【专栏】	电动机的输出功率和效率	128
7.4	使用专用 IC 芯片的 PWM 控制电路设计	129

第 8 章 电动机的正、反转控制及其在位置控制中的应用	133
8.1 电动机正、反转控制技术	133
8.1.1 双电源的正反转控制基本电路	133
8.1.2 单电源的正反转控制电路	134
8.1.3 采用专用 IC 芯片的正、反转控制	135
8.2 电动机的轴位置检测技术	137
8.3 位置控制的实现	139
【专栏】适用于位置控制的电动机	140
8.4 位置伺服控制理论概要	142
8.5 各种正、反转控制电路	144
8.5.1 使用运算放大器和功率三极管的正、反转控制电路	144
8.5.2 使用电动机正、反转控制专用 IC 的驱动电路 ...	145
8.5.3 使用厚膜混合 IC 的正反转控制电路	146
【专栏】Cool MOS FET	148
第 9 章 基于微型计算机的电动机控制基础知识	151
9.1 怎样使用微型计算机	151
9.1.1 最简单的 ON/OFF 控制	151
9.1.2 典型的基于微型计算机的电动机转速控制 ...	151
9.1.3 基于微型计算机的位置控制	152
9.2 微型计算机与电动机的接口电路	153
9.2.1 I/O 接口电路的准备	154
9.2.2 电动机的 ON/OFF 控制	154
9.2.3 基于 D/A 转换器的电动机驱动	157
9.2.4 微型计算机与 FG 及光电编码器的接口电路 ...	160
9.2.5 绝对位置检测用绝对编码器	161
9.3 适用于微型计算机的位置检测传感器	161
9.4 位置编码器与微型计算机的接口电路	164
第 10 章 直流电动机的计算机控制系统	167
10.1 电动机控制常用的 KL5C8012 型微型计算机	167
10.2 直流电动机的脉冲电压驱动	170
10.2.1 电动机控制系统的构成	170

10.2.2	脉冲驱动方法	171
10.2.3	使用软件控制时的程序编制	172
10.2.4	电动机驱动器的中断处理	175
10.2.5	使用微型计算机的实际控制电路	177
10.3	使用 D/A 转换器的直流电动机转速控制	178
10.3.1	系统构成框图	178
10.3.2	微型计算机控制的直流电动机驱动电路	179
10.3.3	程序执行时的动作	182
10.3.4	转速控制的基本方法	182
10.3.5	存储器地址图与各程序的相互关系	183
10.3.6	程序流程图	184
10.3.7	转速控制时的控制数据运算	188
10.3.8	程序的功能及其说明	190
第 11 章	几种电动机控制实用技术	209
11.1	噪声抑制技术	209
11.2	电子线路侧的电源变动抑制技术	211
11.3	启动时的冲击电流抑制技术	212
11.4	快速启动技术	214
11.5	直流电动机制动技术	215
11.5.1	直流电动机的制动原理	215
11.5.2	对反电动势的积极利用	216
11.6	步进驱动与低速驱动方法	217
11.7	容量较大时的功率三极管并联技术	220
11.8	与电源直接连接时的保护对策	221
11.9	电池的内阻与放电特性	221
11.10	与电源极性无关的单方向旋转电动机	223
11.11	直流电动机的分时驱动法	224
11.12	多台电动机的同步运行	225
参考文献		229

第 1 章

直流电动机基础知识

1.1 电动机的类型与分类

电动机的种类十分繁多,电动机技术所涉及的领域极其广泛。若把电动机与控制电路相结合,所涉及的内容和领域将更加广泛、更为复杂。近年来,又出现了不依靠磁场能量作为媒介,而依靠新的原理工作的电动机,使电动机的理论和应用领域得到了进一步扩展。

所谓电动机就是能够把电能转换成机械能的装置。通俗地说,所有依靠电能工作的动力源都是电动机。电动机的运行形态可以是旋转运动的,也可以是直线运动的,还可以是振动的,无论运动形态如何,电动机之所以能够带动机械负载做功,其根源都在于电动机能够产生电力或电磁力。

按电动机的类型进行分类时,可以有多种分类方法。一般情况下,可以按电源类型、电动机的结构、工作原理、转矩的产生原理、电动机的用途以及动作形态等进行分类。图 1.1 是汇总了上述分类方法后的电动机的分类。

1.1.1 电动机的大小与输出功率的关系

电动机的大小一般用电动机轴上输出的机械功率来表示。因此,即使电动机的外形较大,若其输出功率很小,仍应称作为小型电动机。

实际上,如果不是设计水平过低的话,体积大的电动机其输出功率也大。在转速不变的情况下,电动机的输出功率基本上与电动机的体积成比例变化。

1.1.2 电动机的输入功率

图 1.2(a)为一台直流电动机接到直流电源的电路。这时,电

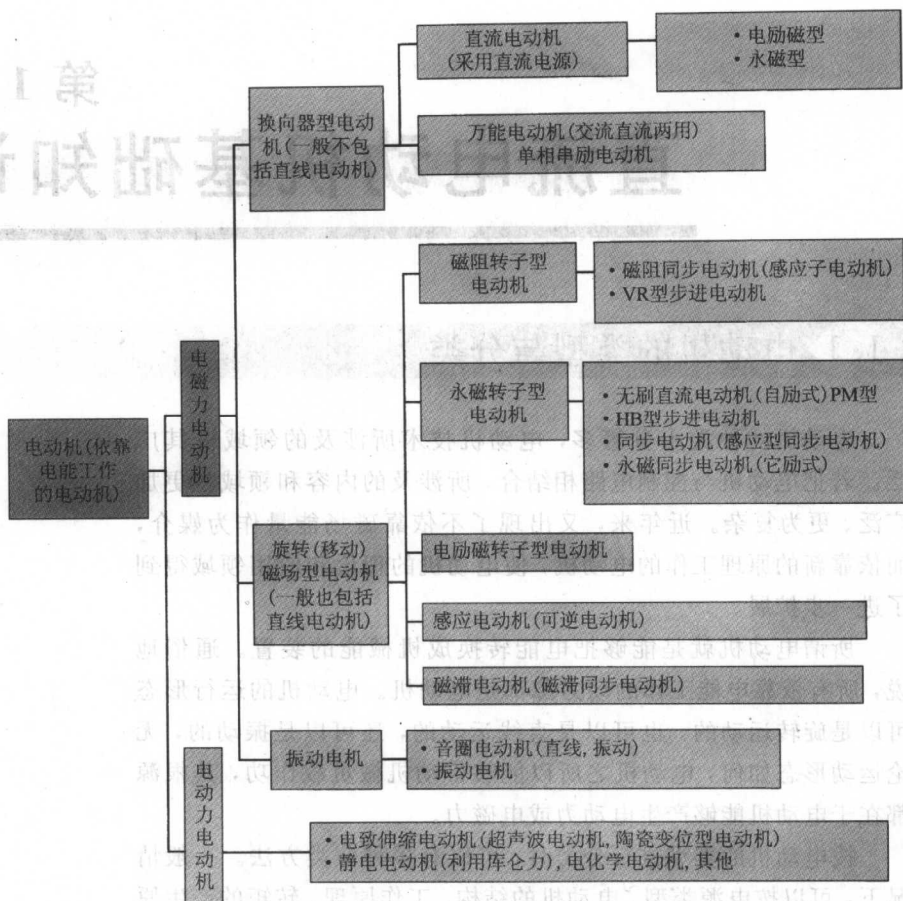


图 1.1 电动机的分类

路中将有电流流过,电动机从直流电源输入了电能,并转换成机械能从轴上输出,从而能够带动机械负载作功。

因此,用来做功的电能常称为“电力”。电能常用电功率来表示。直流电动机从直流电源输入的电功率与电压和电流的关系如下式所示:

$$P_m = E \cdot I \quad (1.1)$$

式中, P_m 为电动机从电源输入的电功率(W); E 为电源电压(V); I 为负载电流(A)。

图 1.2(b)为一台单相交流电动机接到单相交流电源时的电路。这时,电动机输入的电功率与功率因数 $\cos\phi$ 有关。一般说来,电动机的电流在相位上要滞后于电压,在交流电路中,这种

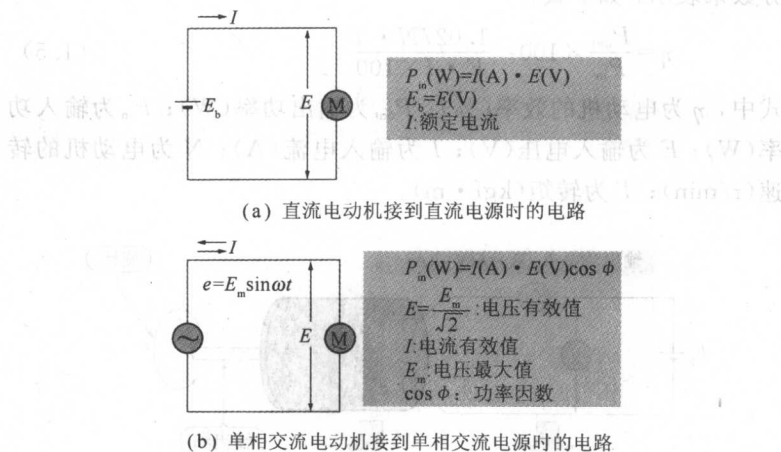


图 1.2 DC 电动机与 AC 电动机

滞后的相位关系用电角度 ϕ 来表示，电角度 ϕ 的余弦 $\cos\phi$ 就称为交流电动机的功率因数。

因此，求取交流电动机从电源输入的电功率时，必须考虑到功率因数 $\cos\phi$ 的影响。对于三相交流电动机，其输入电功率可表示成下式：

$$P_m = 3E \cdot I \cos\phi$$

1.1.3 电动机输出功率的表达式

电动机轴上输出的机械功率 P 可以用电动机的转速 N 与负载转矩 T 的乘积来表示，即

$$P(W) = 1.027N(\text{r/min}) \cdot T(\text{gf} \cdot \text{cm}) 10^{-5} \quad (1.2)$$

式(1.2)还可以变换成以下两种形式：

$$P(W) = 1.027N(\text{r/min}) \cdot T(\text{kgf}^{(1)} \cdot \text{m}) \quad (1.3)$$

$$P(W) = 2\pi n(\text{r/s}) \cdot T(\text{N} \cdot \text{m}) \quad (1.4)$$

式中的各物理量单位的意义如下：r/s 为每秒转速；r/min 为每分钟转速；m 为米；gf 为克力；kgf 为千克力；N 为牛顿。

1.1.4 电动机输出功率与效率关系的表达式

电动机输入电能后，其输出轴就会产生机械能。这种能量转换关系以及电动机的输出功率与效率的关系如图 1.3 所示。

电动机的效率 η 等于其输出功率与输入功率之比，一般用百

1) kgf 千克力是非法定单位，1kgf=9.806 65N——编辑注

分数来表示,如下式:

$$\eta = \frac{P_{\text{out}}}{P_{\text{in}}} \times 100 = \frac{1.027 N \cdot T}{E \cdot I \times 100} \quad (1.5)$$

式中, η 为电动机的效率(%); P_{out} 为输出功率(W); P_{in} 为输入功率(W); E 为输入电压(V); I 为输入电流(A); N 为电动机的转速(r/min); T 为转矩(kgf · m)。

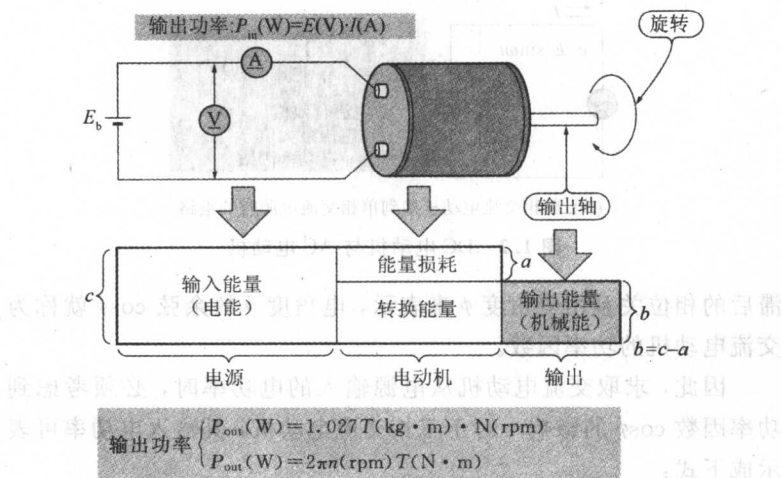


图 1.3 电动机的输出功率与效率的关系

随着驱动原理和结构的不同,电动机的效率将会在很大的范围内变化。例如,10W 左右的无刷电动机的效率约为 30%~70%,而有些 10W 左右的直流无铁心电动机的效率可以接近 95%。由于电动机的效率表示的是电动机能量转换的效率,因此,如果电动机的效率越低,表明在能量转换的过程中,电动机内部的能量损耗越大。

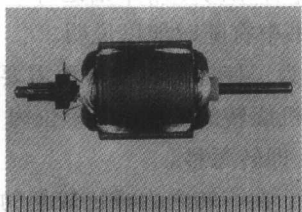
此外,电动机输出功率的单位还可以用“马力”来表示。马力还有英制马力和法制马力之分,它们与国际单位制(SI)的换算关系如下所示:

$$1\text{HP}(1\text{ 英制马力}) = 550(\text{ft} \cdot \text{lb/s}) = 745.7(\text{W}) \quad (1.6)$$

$$1\text{PS}(1\text{ 法制马力}) = 75(\text{kgf} \cdot \text{m/s}) = 735.5(\text{W}) \quad (1.7)$$

1.1.5 直流电动机的结构

直流电动机的结构大体上可分为磁极(定子)和电枢(转子)两大部分,见照片 1.1。磁极的作用是在电动机内部产生一定的磁场,由通过磁力线的磁极铁心和励磁绕组(或永磁体)等构成。

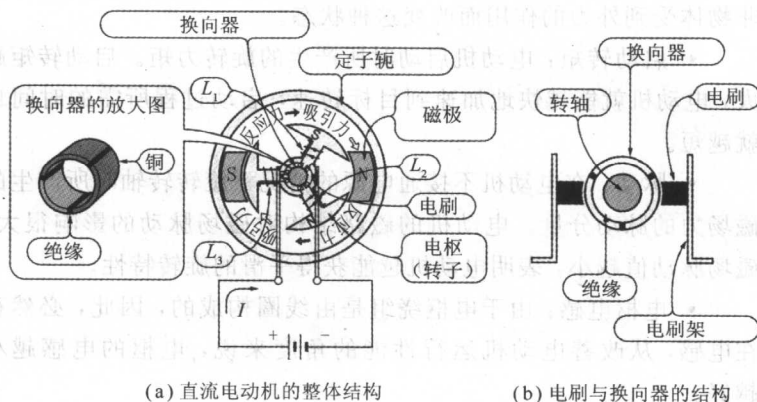


照片 1.1 DC 电动机的电枢(转子)

如果从外部为电枢提供电流的话,电枢将形成旋转的磁极,因此,电枢中需要有驱动绕组,一般称为电枢绕组。为了实现电枢的连续旋转,电枢上还需要设置换向器。

换向器的作用是与电刷相配合,使电枢绕组元件中的电流依次换向,并产生恒定方向的转矩,使电枢在任意位置时都能够按照一定方向连续旋转。

图 1.4 为直流电动机的整体结构。由于电刷和换向器的作用,使旋转电磁铁(电枢)的极性不断改变,重复地与定子侧的磁极产生吸引力和排斥力,使电动机能够按一定的方向连续旋转。



(a) 直流电动机的整体结构

(b) 电刷与换向器的结构

图 1.4 DC 电动机的结构

1.1.6 有关电动机的名词术语

在使用直流电动机时,会用到很多专用术语,如果对这些术语的意义搞不清楚的话,在进行以后各章节中的电路设计时,将会遇到很多障碍。下面,将对一些直流电动机常用的专用术语作简要的说明。

当然,除本节中介绍的专用术语之外,本书中还将用到一些其他的专用术语,书中将随时加以说明。

- 旋转磁场:为了使电动机旋转而需要产生的磁场。
- 转速:电动机旋转的速度,其单位为 r/min,即转每分,在 SI 单位制中为 r/s,即转每秒。
- 旋转稳定度:在一转之内或比较短的时间内电动机的转速变化。
- 机械时间常数:电动机从启动到转速达到稳定空载转速的 63.2% 时所经历的时间。测定机械时间常数时,电动机应处于空载运行状态并施加阶跃状的电源电压。机械时间常数也可以利用电动机转子的惯性、电枢绕组电阻,以及电动机的转矩系数和反电动势系数,通过式(1.8)计算求得,即

$$T_m = \frac{J \cdot R_a}{K_e \cdot K_t} \quad (1.8)$$

式中, T_m 为机械时间常数(s); J 为转子的转动惯量; R_a 为电枢电阻(Ω); K_t 为转矩系数(gf·cm/A 或 N·m/A); K_e 为反电动势系数(V/1 krpm)。

- 惯性:表明物体总要维持其固有运动状态的一种性质,除非物体受到外力的作用而改变这种状态。
- 启动转矩:电动机启动时所产生的旋转力矩。启动转矩越大,电动机就能越快地加速到目标转速,启动过程所需的时间也就越短。
- 脉动:在电动机不接通电源的情况下旋转转轴时所产生的磁场力的脉动分量。电动机的磁路结构对磁场脉动的影响很大。磁场脉动值越小,表明电动机越能获得平滑的旋转特性。
- 电枢电感:由于电枢绕组是由线圈构成的,因此,必然存在电感,从改善电动机运行性能的角度来说,电枢的电感越小越好。
- 电枢电阻:电枢绕组内部的电阻,一般应包括电刷与换向器之间的接触电阻。由于电阻中流过电流时将产生焦耳热,因此,总希望电枢电阻要小些。
- 电气时间常数:电枢电流从零开始达到稳定值的 63.2% 时所经历的时间。测定电气时间常数时,电动机应处于堵转状态并施加阶跃状的电源电压。电气时间常数也可以利用电枢绕组电阻和电枢电感通过式(1.9)计算求得,即