

电动机原理 与实用技术

王益全 编著



科学出版社

www.sciencep.com

(TM-0336.0101)

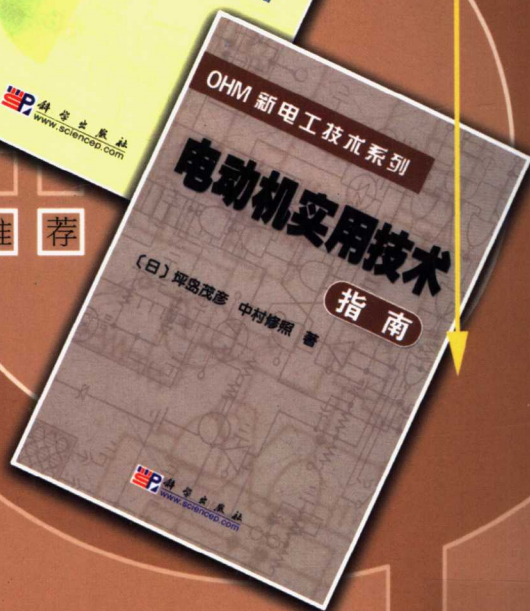
责任编辑：赵方青 崔炳哲

责任制作：魏 谨

封面设计：朱 平

电动机原理与实用技术

■ 王益全 编著



相 关 书 籍 推 荐

建议放架类别：工业技术 / 电动机

科学出版社 东方科龙

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

E-mail:bjb_cbz@okbook.com.cn

ISBN 7-03-015036-8



9 787030 150363 >

ISBN 7-03-015036-8

定 价：25.00元

电动机原理与实用技术

王益全 编著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书在介绍电动机实用技术基础知识和电机机电能量转换基本原理的基础上,分别介绍了直流电动机、感应电动机、同步电动机以及永磁电动机和小功率电动机的结构、工作原理、运行特性及其起动、制动、调速特性。在介绍电动机原理与特性的同时,着重分析和介绍了这些原理与特性在电力拖动与自动控制系统中的应用,以帮助电气工程师分析和解决实际工程中遇到的问题。

本书结构新颖,内容深入浅出,实用性强。可供从事电气工程及其自动化和电力拖动与自动控制工作的技术人员及其他有关技术人员参考,也可作为电气类专业本科、专科高年级学生和研究生的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

电动机原理与实用技术/王益全编著. —北京:科学出版社,2005

ISBN 7-03-015036-8

I. 电… II. 王… III. 电动机-技术 IV. TM.32

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 018429 号

责任编辑:赵方青 崔炳哲 / 责任制作:魏 谨

责任印制:刘士平 / 封面设计:朱 平

北京东方科苑图文有限公司 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

*

2005 年 7 月第 一 版	开本: B5(720×1000)
2005 年 7 月第一次印刷	印张: 15 1/2
印数: 1—5 000	字数: 296 000

定 价: 25.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈新欣〉)

前 言

随着科学技术的发展,电气工程类学科涉及的领域愈来愈宽,对电气工程师素质的要求也越来越高,除了需要掌握和了解有关电动机、电器方面的知识以外,还需要了解并掌握有关电子、控制、计算机以及机械、材料等方面的知识,以便适应日新月异的技术环境。

电动机原理与应用技术是一名电气工程师必须掌握的基础知识与基本技能。然而,真正掌握电机学原理并不是一件容易的事。应用这些原理解决实际工程问题需要反复学习和思考,并不断通过实践积累经验。

电机学科已经有超过百年的历史,有关电动机的文献资料极为丰富。然而,这些文献和资料大多以研究电动机理论和设计计算方法为目的,面向的读者也主要是从事电动机理论研究和设计计算的科技人员。对于从事电气工程及其自动化和电力拖动与自动控制工作的工程技术人员来说,能够从电动机的理论和实践上给予指导的实用型书籍并不多见。

本书作者结合多年的教学和工程实践经验,力求深入浅出地对各种常用电动机的原理与应用技术进行分析,并对其中的基本概念进行了必要的归纳和总结。书中略去了详细的理论推导,而着重对电动机的基本原理、基本概念以及在工程实际中的应用技术进行分析与说明,以便提高读者在电动机理论的指导下解决工程实际问题的能力。本书把读者定位在已经有了一定电机理论基础和实践经验,但有关电磁关系尚未理顺,有些概念尚不清楚,解决工程实际问题能力尚显欠缺的部分电气工程师。

在本书的结构上,把电机实用技术中的一些带有普遍意义的工程问题以及把机电能量转换基本原理设为独立章节,以便突出这些电气工程中常用的基本概念和基本原理。在电动机原理与特性分析中,难度适中,并同时介绍这些原理与特性的特点及其在工程实际中的应用。本书既适合电气工程师阅读,也适合电气工程类专业高年级大学生和研究生在学习电机理论时参考。

本书共分7章,第1章介绍电气工程中常用的一些电机实用技术,第2章讲解电机机电能量转换的基本原理,第3~5章分别论述了直流电动机、三相感应电动机和同步电动机的基本原理与实用技术,第6章介绍永

磁电动机的基本原理与实用技术,第7章介绍小功率电动机的基本原理与实用技术。

在编著本书的过程中所参考的主要著作和论文已列入书后的参考文献,以便读者进一步学习时查阅,对于这些文献作者对本书的贡献,作者谨致衷心的感谢。

从本书的创意到本书完成过程中,得到了科学出版社相关人员的很多指导和帮助,在此表示诚挚的谢意。

由于作者水平有限,书中缺点和错误之处在所难免,敬请读者批评指正。

作 者

目 录

第 1 章 电机实用技术基础	1
1.1 电机的分类、功能与产品型号	1
1.1.1 电机的分类	1
1.1.2 电机的功能	2
1.1.3 电机的产品型号	2
1.2 电机的结构型式	4
1.2.1 电机的外壳防护型式	4
1.2.2 电机的冷却方法	5
1.2.3 电机的结构及安装型式	6
1.3 电机的工作制、定额与额定值	8
1.3.1 工作制与定额	8
1.3.2 额定值	10
1.4 电机的绝缘结构与温升	11
1.4.1 绝缘结构	11
1.4.2 温升与温升限值	13
1.4.3 温升测量方法	15
1.5 系列电机	18
1.6 电机的技术标准	20
1.7 电动机的选择	22
1.7.1 电动机选择的基本要求与主要内容	22
1.7.2 电动机功率的选择	26
1.8 电动机节能技术	31
1.8.1 概 述	31
1.8.2 高效率电动机	33
1.8.3 电动机的调速节能技术	36
第 2 章 电机机电能量转换的基本原理	40
2.1 概 述	40

2.1.1 电机基本工作原理	40
2.1.2 电机的电系统、机械系统及其能量转换	41
2.1.3 电机分析的一般方法	41
2.2 电机的绕组	43
2.2.1 电机绕组的分类	43
2.2.2 直流电机的电枢绕组	44
2.2.3 交流电机的绕组	49
2.3 电机的磁场与磁动势	57
2.3.1 直流电机的磁场与磁动势	57
2.3.2 交流电机的磁动势	60
2.4 电机绕组的感应电动势	62
2.4.1 直流电机电枢绕组的感应电动势	62
2.4.2 交流电机绕组的感应电动势	63
2.5 电动机的电磁转矩	66
2.5.1 直流电动机的电磁转矩	66
2.5.2 感应电动机的电磁转矩	67
2.5.3 同步电动机的电磁转矩	70
2.5.4 电动机的转矩平衡关系	70
2.6 电机的能量转换	71
2.6.1 输入功率与输出功率	71
2.6.2 电磁功率(转换功率)	72
2.6.3 损耗与效率	74
2.6.4 电机机电能量转换的可逆性	75

第3章 直流电动机 78

3.1 直流电动机的分类、结构与工作原理	78
3.1.1 直流电动机的分类	78
3.1.2 直流电动机的基本结构	79
3.1.3 直流电动机的工作原理	81
3.2 直流电动机的运行特性	84
3.2.1 直流电动机的工作特性	84
3.2.2 直流电动机的机械特性	88
3.3 直流电动机的起动与制动	91
3.3.1 直流电动机的起动	91

3.3.2 直流电动机的制动	96
3.4 直流电动机的速度控制	98
3.4.1 电枢调压控制	98
3.4.2 磁场控制	100
3.4.3 电枢回路串电阻控制	101
3.5 整流电源供电直流电动机	103
3.5.1 整流电源的电路型式选择	103
3.5.2 整流电源供电直流电动机	104
3.6 直流电动机的基本系列	106
3.6.1 Z_3 系列直流电动机	106
3.6.2 Z_4 系列直流电动机	107
第 4 章 三相感应电动机	109
4.1 感应电动机的分类、结构与工作原理	109
4.1.1 感应电动机的分类	109
4.1.2 感应电动机的结构	109
4.1.3 感应电动机的工作原理	112
4.2 三相感应电动机的运行特性	117
4.2.1 三相感应电动机的工作特性	117
4.2.2 三相感应电动机的机械特性	121
4.3 三相感应电动机的起动与制动	124
4.3.1 三相感应电动机的起动	124
4.3.2 三相感应电动机的制动	134
4.4 三相感应电动机的调速	138
4.4.1 变极调速	139
4.4.2 变频调速	142
4.4.3 调压调速	145
4.4.4 绕线型电动机转子串电阻调速	147
4.4.5 串级调速	148
4.4.6 电磁调速电动机	149
4.5 三相感应电动机的基本系列	152
4.5.1 Y 系列三相感应电动机	152
4.5.2 Y_2 系列三相感应电动机	152

第 5 章 同步电动机	155
5.1 同步电动机的基本结构与工作原理	155
5.1.1 同步电动机的基本结构	155
5.1.2 同步电动机的工作原理	156
5.1.3 同步电动机的励磁方式	157
5.2 同步电动机的运行原理	159
5.2.1 电枢反应	159
5.2.2 隐极同步电动机基本电磁关系与电压方程式	161
5.2.3 凸极同步电动机基本电磁关系与电压方程式	162
5.3 同步电动机的特性	163
5.3.1 工作特性	163
5.3.2 功角特性	164
5.3.3 V 形曲线	165
5.4 同步电动机的起动与制动	166
5.4.1 异步起动法	167
5.4.2 其他起动方法	170
5.4.3 同步电动机的制动	171
 第 6 章 永磁电动机	 174
6.1 永磁材料	174
6.1.1 永磁材料的特性	174
6.1.2 常用永磁材料	179
6.2 永磁直流电动机	182
6.2.1 概 述	182
6.2.2 永磁直流电动机的结构	183
6.2.3 运行原理	186
6.2.4 运行特性	188
6.3 永磁同步电动机	192
6.3.1 永磁同步电动机的结构	193
6.3.2 运行原理与特性	195
6.3.3 永磁同步电动机的起动	198
 第 7 章 小功率电动机	 201
7.1 概 述	201

7.2 单相感应电动机	202
7.2.1 单相感应电动机的结构、分类与特性	202
7.2.2 单相感应电动机的绕组	205
7.2.3 单相感应电动机的磁动势与磁场	210
7.2.4 单相感应电动机的功率与损耗	213
7.2.5 单相罩极电动机	214
7.2.6 单相串励电动机	216
7.3 小功率直流电动机	218
7.3.1 小功率直流电动机	218
7.3.2 无刷直流电动机	222
7.4 小功率同步电动机	226
7.4.1 永磁式小功率同步电动机	226
7.4.2 磁阻式同步电动机	227
7.4.3 磁滞式同步电动机	230
7.4.4 电磁减速同步电动机	231
参考文献	235

第 1 章 电机实用技术基础

1.1 电机的分类、功能与产品型号

1.1.1 电机的分类

电机是一种实现机电能量转换的电磁机械装置。按能量转换方向的不同,电机可分为两大类:第一类是发电机,可实现将轴上输入的机械能转换成线端输出的电能;第二类是电动机,可实现将线端输入的电能转换成轴上输出的机械能。根据电源性质及应用场合的不同,电机又可分为直流电机和交流电机两大类。根据结构与工作原理的不同,交流电机还可分为感应电机、同步电机和交流整流子电机三种类型,电机的基本分类方法如图 1.1 所示。

电机除作为发电机和电动机使用以外,在自动控制系统中还使用了各种控制电机,用来完成各种讯号的转换。

电机的分类还可以有其他方法。例如,按机座号的大小或功率的大小,电机可分为大型、中型、小型和小功率电机。

一般说来,电枢铁心外径大于 990mm 的电机为大型电机,中心高 H 在 400~630mm 范围内的电机为中型电机,中心高 H 在 80~355mm 范围内的电机为小型电机。小功率电机是指转速折算至 1500r/min 时,其连续定额时的额定功率不超过 1.1kW 的电机。

电机还可按外壳防护型式、冷却方法、安装型式、使用环境条件、绝缘结构、励磁方式和工作制等特征进行分类。电机按结构型式的分类如表 1.1 所示。

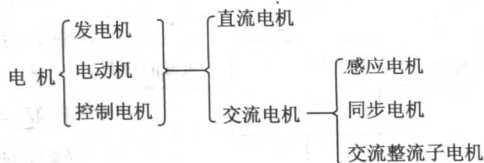


图 1.1 电机的基本分类方法

表 1.1 电机按结构型式的分类

分 类	类 型	类 型	分 类			
按外壳 防护型式	开启式、防护式、封闭式、防尘 式、防爆式等	按绝缘等级	A 级、E 级、B 级、F 级、H 级			
		按工作制	连续、短时、周期、非周期			
按通风 冷却方式	自冷式、自扇冷式、他扇冷式、 管道通风式等	按电机尺寸	大型	中型	小型	小功率
按安装 型式	卧式、立式、凸缘(带底脚或不 带底脚)	中心高/mm	>630	400~630	80~355	<90
		定子铁心外径/mm	>990	590~990	120~590	<160

1.1.2 电机的功能

实现机械能-电能之间的能量转换是电机的基本功能。发电机把从原动机输入的机械能转换成绕组端口输出的电能,而电动机则反之,它把绕组端口从电网输入的电能转换成轴上输出的机械能。当然,在进行能量转换的过程中,电机内部难免会产生一些损耗,这些损耗将转变成热能散发到电机周围的冷却介质中,同时也使电机的温度升高。由于这些损耗的存在,使电机的效率总是小于100%。

电机正常运行时,如果其中某些电气的或机械的输入量发生变化时,电机的运行状态和输出量也会按照一定的规律随之发生变化。例如,当交流电动机的频率、电压、磁场或负载等发生变化时,其感应电动势、电流、电磁转矩、功率和转速等也会随之变化。如果对交流电动机的频率、电压、磁场等进行控制,就可以使该电动机的运行状态和输出量按照控制要求而变化。因此,电机还具有根据输入量的改变而使输出量(例如转速、转矩、功率等)作出相应变化的功能。对于速度控制和伺服控制等自动控制系统,电机的这种受控功能十分重要。

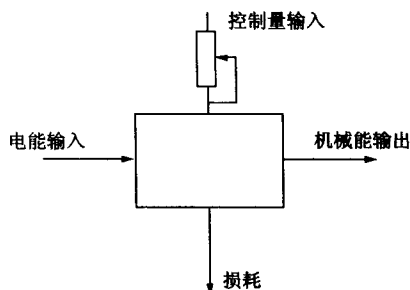


图 1.2 电动机的功能

电动机的机电能量转换功能和受控功能如图 1.2 所示。

控制电机是一类专门用来实现各种讯号变换的电机,在自动控制系统和计算装置中,主要用作检测、放大、执行、解算等功能。例如测速电机是一种速度检测元件,可以把轴上的转速信号转换成电压信号输出,可用于直流电动机或交流电动机的速度控制;伺服电动机是一种执行元件,可以把位置传感器检测到的位置信息转换成伺服电动机轴上输出的角位移或角速度,从而实现伺服系统的位置控制。

1.1.3 电机的产品型号

电机的产品型号由产品代号、规格代号、特殊环境代号以及补充代号等四个部分组成,并按以下顺序排列。

1 产品代号

电机产品代号又由电机类型代号、电机特点代号、设计序号和励磁方式代号等四个小节按顺序组成。

我国的电机类型代号采用汉语拼音字母来表示各种不同类型的电机,如表 1.2 所示。

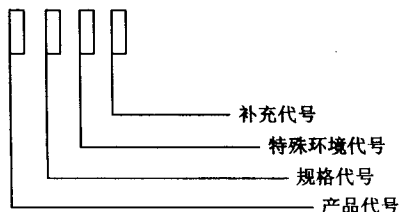


表 1.2 电机类型代号

序 号	电机类型	代 号
1	异步电动机(笼型及绕线转子型)	Y
2	同步电动机	T
3	同步发电机(除汽轮、水轮发电机外)	TF
4	直流电动机	Z
5	直流发电机	ZF
6	测功机	C
7	交流换向器电机	H
8	潜水电机	Q
9	纺织用电机	F

电机特点代号表示电机的性能、结构或用途等,采用汉语拼音字母标注。对于防爆电机,代表防爆类型的字母 A(增安型)、B(隔爆型)和 ZY(正压型)应标于电机的特点代号首位,即紧接在电机类型代号后面标注。

设计序号是指电机产品设计的顺序,用阿拉伯数字表示。对于第一次设计的产品不标注设计序号,派生系列设计序号按基本系列标注,专用系列按本身设计的顺序标注。

励磁方式代号用汉语拼音字母标注,其中字母 S 表示三次谐波励磁、J 表示晶闸管励磁、X 表示相复励励磁,并应标注于设计序号之后。当不必标注设计序号时,则标于特点代号之后,并用短线分开。

② 电机规格代号

电机规格代号用轴中心高、铁心外径、机座号、机壳外径、轴伸直径、凸缘代号、机座长度、铁心长度、功率、电流等级、转速或极数等来表示。

机座长度采用国际通用字母符号表示,S 表示短机座、M 表示中机座、L 表示长机座。铁心长度按由短至长,依次用数字 1,2,⋯ 表示。极数用阿拉伯数字表示。

常用主要系列电动机产品的规格代号构成如表 1.3 所示。

表 1.3 常用主要系列电动机产品的规格代号构成

电动机类型	规格代号构成	举 例
小型异步电动机	中心高(mm)机座长度(字母代号)铁心长度(数字代号)-极数	YR132M1-4
	中心高(mm)机座长度(字母代号)-极数	Y2-112M-4
中大型异步电动机	中心高(mm)机座长度(字母代号)铁心长度(数字代号)-极数	Y400-2-6
小型同步电动机	中心高(mm)机座长度(字母代号)	T2-160S2
小型直流电动机	中心高(mm)铁心长度(数字代号)-端盖代号(数字代号)	Z4-180-21

③ 特殊环境代号

电机的特殊环境代号如表 1.4 所示。若同时适用于一个以上的特殊环境时,则按表 1.4 所示代号的顺序排列。

表 1.4 电机的特殊环境代号

特殊环境	高原用	船(海)用	户外用	化工防腐用	热带用	湿热带用	干热带用
代 号	G	H	W	F	T	TH	TA

④ 补充代号

补充代号仅适用于有此要求的电机,用汉语拼音字母(不应与特殊环境代号重复)或阿拉伯数字表示,所代表的意义应在产品标准中作具体规定。

1.2 电机的结构型式

电机的结构型式是指电机的固定用构件、轴承装置以及轴伸等部件的构成情况,主要包括电机的外壳防护型式、冷却方法以及安装方法等。不同结构型式的电机,可以适应不同的使用环境和不同的使用要求。同一种类型的电机,也可以有多种不同的结构型式,现分别说明如下。

1.2.1 电机的外壳防护型式

国家标准 GB/T 4942.1-2001《旋转电机-外壳防护分级》指出,电机的外壳防护应包括防止人体触及或接近机壳内带电部分和触及机壳内转动部分,以及防止固体异物进入电机内部的防护(第一类防护)和防止水进入电机内部而引起有害影响的防护(第二类防护)。在设计和使用电机时,必须充分考虑电机的使用环境和使用要求,以便设计和选用具有适当外壳防护等级的电机。

我国的电机外壳防护等级代号采用“国际防护”的英文缩写 IP(International Protection)以及附加在后面的两个表征数字组成。第一个表征数字表示防止人体触及和防止固体异物进入电机的防护,第二个表征数字表示防止水进入电机的防护,前者(第一位数字)分为 6 个等级(0~5),后者(第二位数字)则分为 9 个等级(0~8),如表 1.5 所示。

表 1.5 电机的外壳防护分级

对人体和固体异物的防护分级	对防止水进入的防护分级
0 无防护型	0 无防护型
1 半防护型(防止直径大于 50mm 的固体异物进入)	1 防滴型 1(防护垂直滴水)
2 防护型(防止直径大于 12mm 的固体异物进入)	2 防滴型 2(防护与电机倾斜角度 $\leq 15^\circ$ 时的垂直滴水)

续表 1.5

对人体和固体异物的防护分级	对防止水进入的防护分级
3 封闭型(防止直径大于 2.5mm 的固体异物进入)	3 防淋水型(防护与垂直线呈 $\leq 60^\circ$ 角的淋水)
4 全封闭型(防止直径大于 1mm 的固体异物进入)	4 防溅水型(防护任何方向的溅水)
5 防尘型	5 防喷水型(防护任何方向的喷水)
	6 防海浪型
	7 防浸水型
	8 潜水型

例如,我国小型三相感应电动机基本系列——Y 系列的外壳防护等级为 IP44,其中第 1 位数字“4”表示对人体触及和固体异物的防护等级(即电动机外壳能够防护直径大于 1mm 的固体异物触及或接近机壳内的带电部分或转动部分);而第 2 位数字“4”则表示对防止水进入电机内部的防护等级(即电动机外壳能够承受任何方向的溅水而无害影响)。Y₂ 系列的外壳防护等级为 IP54,其对人体触及和固体异物的防护等级提高为防尘型,而对防止水进入电机内部的防护等级与 Y 系列相同。

1.2.2 电机的冷却方法

电机进行机电能量转换时,电机内部会产生铜耗、铁耗、机械损耗和杂散损耗等各种损耗。这些损耗将转换成热量,首先由热传导作用传递到部件表面,然后通过对流和辐射作用散发到周围冷却介质中。与此同时,也使电机内各部件的温度升高。当绕组和铁心温度超过一定限值时,绝缘材料将因过热而受损,严重时甚至被烧毁。电机的容量越大,其发热和冷却问题也就越突出。

要想降低电机内各部件(主要是绕组和铁心)的温度,一方面应增强电机内部的热传导能力,另一方面应增强部件表面的散热能力。前者主要依靠具有优良性能的绝缘材料和良好的浸漆、烘干技术,后者与部件表面(例如机壳表面)的散热面积、冷却介质与冷却表面的相对速度(例如风速)以及冷却介质温度等因素有关。

国家标准 GB/T 1993-1993《旋转电机冷却方法》中规定,电机冷却方法代号采用“国际冷却”的英文缩写 IC(international cooling)以及附加在后面的冷却回路布置的特征数字、冷却介质性质的特征字母以及冷却介质推动方法的特征数字等组成。表示冷却介质性质的特征字母如表 1.6 所示。若冷却介质为空气,则其特征字母“A”可以省略。

表 1.6 冷却介质的特征字母

特征字母	冷却介质
A	空气
F	氟利昂
H	氢气
N	氮气
C	二氧化碳
W	水
U	油
S	其他冷却介质
Y	待确定的冷却介质

冷却回路布置方式与冷却介质推动方法的特征数字及其简要说明如表 1.7 所示。

表 1.7 冷却回路布置方式与冷却介质推动方式

冷却回路布置方式	冷却介质推动方法
0 自由循环 (回路的出入口直接面向周围介质)	0 自由对流 (依靠温度差)
1 进口管或通道循环 (冷却介质从进口管或通道流入后自由流出)	1 自循环 (依靠转子本身的扇风作用或安装在转子上的风扇)
2 出口管或通道循环 (冷却介质自由流入电机后由出口管或通道流出)	2,3,4 备用
3 进、出口管或通道循环 (冷却介质从进、出口管或通道流入与流出)	5 内装式独立部件 (由安装在电机内部的独立部件驱动介质运动)
4 机壳表面冷却 (通过机壳表面把热量散发到周围环境介质)	6 外装式独立部件 (由安装在电机上的独立部件驱动介质运动)
5,6 内装式或外装式冷却器 (通过冷却器与周围环境介质交换热量)	7 分装式独立部件 (与电机分开安装的独立部件驱动介质运动)
7,8 内装式或外装式冷却器 (通过冷却器与二次冷却介质交换热量)	8 相对运动 (依靠电机与冷却介质之间的相对运动)
9 分装式冷却器 (通过独立安装的冷却器与周围环境介质或二次冷却介质交换热量)	9 其他部件 (冷却介质由上述方法以外的其他方法驱动)

例如, Y_2 系列三相感应电动机的冷却方法为 IC411, 这是一种简化标记法, 其完整标记法为 IC4A1A1。因初、次级的冷却介质均为空气, 故两个表征冷却介质性质的特征字母“A”均可略去不写。第一个特征数字“4”表示冷却回路的布置方式为“机壳表面冷却”, 第二个特征数字“1”表示初级冷却介质的推动方法为“自循环”, 第三个特征数字“1”表示次级冷却介质的推动方法亦为“自循环”。这里所谓的初级冷却介质是指电机内部的空气, 而次级冷却介质是指电机周围环境的空气。

1.2.3 电机的结构及安装型式

电机的结构及安装型式主要是指电机的轴承装置以及底脚、轴伸等的构成情况。GB/T 997-1981《电机结构及安装型式代号》规定, 旋转电机的结构及安装型式代号由“国际安装”的英文缩写 IM(international mounting)和附在后面的代表“卧式安装”的大写字母 B 或代表“立式安装”的大写字母 V 以及一位或两位阿拉伯数字组成。

常用卧式安装电机和立式安装电机的结构特点及安装型式如表 1.8 和表 1.9 所示。