



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

特种电机原理及应用

唐任远 主编

第2版



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

特种电机原理及应用

第 2 版

主 编 唐任远
参 编 陆永平 王成元 詹琼华
王益全 杨贵杰



机械工业出版社

本教材为普通高等教育“十一五”国家级规划教材。全书共分9章,包括具有一般用途的永磁直流电动机和永磁同步电动机(第1章)、伺服控制类电机(第2、3、6章)、开关磁阻类电机(第4、5章)、信号检测类电机(第7、8章)以及非传统电磁原理电机(第9章)等。

本书着重说明特种电机的基本理论及其典型应用,力求文字简练,尽量避免繁琐的论证和公式推导,力求反映当代特种电机发展的新成果。

本书可作为“电气工程及其自动化”、“自动化”、“机械电子工程”等专业以及其他相近专业讲授“特种电机及应用”课程的教材或教学参考书,也可作为有关科技人员的自学和参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

特种电机原理及应用/唐任远主编.—2版.—北京:机械工业出版社,2010.4

普通高等教育“十一五”国家级规划教材
ISBN 978-7-111-28796-4

I. ①特… II. ①唐… III. ①电机—高等学校—教材 IV. ①TM3

中国版本图书馆CIP数据核字(2010)第061892号

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:闫晓宇 责任编辑:闫晓宇 蔡家伦

版式设计:霍永明 责任校对:刘怡丹

封面设计:张静 责任印制:杨曦

保定市中国画美凯印刷有限公司印刷

2010年8月第2版第1次印刷

184mm×260mm·14.75印张·360千字

标准书号:ISBN 978-7-111-28796-4

定价:29.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

网络服务

社服务中心:(010)88361066

门户网:<http://www.cmpbook.com>

销售一部:(010)68326294

销售二部:(010)88379649

教材网:<http://www.cmpedu.com>

读者服务部:(010)68993821

封面防伪标均为盗版

前 言

本书为普通高等教育“十一五”国家级规划教材，是根据教育部的相关要求和精神组织编写的。

与传统感应电机、同步电机和直流电机相比，在工作原理、励磁方式、技术性能或功能以及在结构上有较大特点的电机统称为特种电机。特种电机的种类繁多，而且发展很快。经过反复斟酌取舍，本书确定了以“反映当代新技术、应用广泛、兼顾传统”作为选材原则。全书共分9章，包括具有一般用途的永磁直流电动机和永磁同步电动机（第1章）、伺服控制类电机（第2、3、6章）、开关磁阻类电机（第4、5章）、信号检测类电机（第7、8章）以及非传统电磁原理电机（第9章）等。

本书虽作为1998年5月由机械工业出版社出版的普通高等教育机电类规划教材《特种电机》的第2版，但与原书相比已有很大不同。原书是为“电机及其控制”专业《特种电机》选修课而组织编写的，在介绍特种电机结构和工作原理的基础上，着重介绍了特种电机的设计技术。本书的适用专业则广泛得多，对于“电气工程及其自动化”、“自动化”、“机械电子工程”等专业以及其他相近专业，均可作为教材或教学参考书选用。本书内容主要包括特种电机的结构、原理、特性、控制及应用，基本上不涉及电机的设计制造。因此，与原书相比，无论是书名、适用专业，还是其内容和侧重点，都已经是一本全新的教材。

本书是在各位编者所在单位科研成果的基础上编写的，同时参考了国内外有关的最新科研成果和文献，反映了这几种电机国内外的最新科研成果和应用动态。

本书着重说明特种电机的基本理论及其典型应用，在编写中力求贯彻理论联系实际的原则，力求文字简练，尽量避免繁琐的论证和公式推导。

本书由沈阳工业大学唐任远院士担任主编并编写绪论和第1章，哈尔滨工业大学陆永平教授和杨贵杰教授编写第2章，沈阳工业大学王成元教授编写第3章和第6章，华中科技大学詹琼华教授编写第4章和第5章，沈阳工业大学王益全教授编写第7~9章。

本书由浙江大学陈永校教授和天津大学杨渝钦教授担任主审。两位教授对本书的结构和内容提出了很多宝贵意见，在此表示衷心感谢。

由于编著者水平有限，书中缺点和错误在所难免，欢迎读者批评指正。

目 录

前言

绪论	1
0.1 特种电机发展概况	1
0.2 永磁材料及其特性	4
0.2.1 永磁材料特性	4
0.2.2 几种常用的永磁材料	8
0.3 永磁磁路计算基础	15
0.3.1 永磁体等效成磁通源或磁动势源	15
0.3.2 空载和负载时的等效磁路	17
0.3.3 永磁体工作点的确定	18
0.3.4 永磁体的最佳工作点	19
0.4 本课程的性质与任务	20

第1章 永磁直流电动机与永磁

同步电动机

1.1 概述	21
1.1.1 永磁同步发电机	21
1.1.2 高效永磁同步电动机	22
1.1.3 调速永磁同步电动机和永磁无刷电动机	22
1.1.4 永磁直流电动机	22
1.1.5 永磁特种电机	23
1.2 永磁直流电动机	23
1.2.1 基本结构	24
1.2.2 基本方程和运行特性	27
1.2.3 动态特性	33
1.3 永磁同步电动机	33
1.3.1 转子磁极结构	34
1.3.2 稳态运行分析	37
1.3.3 稳态运行特性	43
1.3.4 起动过程分析	45
思考题与习题	49

第2章 永磁无刷电动机

2.1 永磁无刷电动机的构成和工作原理	50
2.1.1 永磁无刷电动机的构成	50
2.1.2 空载气隙磁场	50

2.1.3 绕组与电动势	51
2.1.4 电磁力和电磁转矩	53
2.1.5 永磁无刷电动机的工作原理	55
2.2 位置传感器	57
2.2.1 霍尔位置传感器	57
2.2.2 旋转变压器	59
2.2.3 光电编码器	62
2.2.4 磁性编码器	63
2.3 方波电压驱动永磁无刷电动机——永磁无刷直流电动机	65
2.3.1 电压方程式和转矩公式	65
2.3.2 方波驱动和驱动模式	66
2.3.3 简化情况下方波驱动永磁无刷电动机的特性	66
2.3.4 方波驱动永磁无刷电动机的控制	76
2.4 正弦波电压驱动永磁无刷电动机——永磁交流伺服电动机	82
2.4.1 电压方程式和转矩公式	83
2.4.2 驱动模式	84
2.4.3 正弦波电压驱动永磁无刷电动机的驱动控制	89
2.5 无独立位置传感器的永磁无刷电动机	95
2.5.1 引言	95
2.5.2 基于反电动势的位置预估	95
2.5.3 利用定子电压、电流估算转子位置	96
2.5.4 无独立位置传感器的永磁无刷电动机的矢量控制	97
2.5.5 无独立位置传感器的永磁无刷电动机的起动问题	97
2.6 永磁无刷电动机的定位力矩和波动力矩	98
2.6.1 定位力矩	98
2.6.2 波动力矩	101

思考题与习题	105	和结构	148
第3章 直流伺服电动机与两相交流		5.2.1 工作原理	148
伺服电动机	106	5.2.2 相数与定子、转子齿极数的	
3.1 概述	106	关系	149
3.2 直流伺服电动机	107	5.2.3 绕组的联结方式与	
3.2.1 工作原理与结构特点	107	极性分布	149
3.2.2 控制方式	112	5.3 基本电磁关系	150
3.2.3 稳态特性	113	5.3.1 基本电路方程	151
3.2.4 动态特性	114	5.3.2 相绕组电流	152
3.3 两相交流伺服电动机	116	5.3.3 转矩、功率与能量传递	152
3.3.1 基本结构与工作原理	116	5.3.4 机械特性	154
3.3.2 控制方式	118	5.4 功率变换器	155
3.3.3 稳态特性	119	5.4.1 主电路拓扑结构	155
3.3.4 动态特性	122	5.4.2 功率变换器的容量	156
思考题与习题	122	5.4.3 开关器件的选择	156
第4章 步进电动机	124	5.4.4 辅助电路	156
4.1 概述	124	5.5 控制系统	157
4.2 步进电动机的结构	125	5.5.1 电流斩波控制	158
4.2.1 反应式步进电动机的结构	125	5.5.2 角度位置控制	158
4.2.2 永磁式步进电动机的结构	126	5.6 反馈信号检测	159
4.2.3 混合式步进电动机的结构	127	5.6.1 位置检测	159
4.3 反应式(磁阻式)步进电动机的		5.6.2 相电流检测	160
工作原理	127	5.6.3 转速检测	160
4.3.1 三相单三拍通电方式	127	5.7 制动运行与发电运行	161
4.3.2 三相双三拍通电方式	128	5.7.1 制动运行原理	161
4.3.3 三相单、双六拍通电方式	129	5.7.2 发电运行	161
4.4 反应式步进电动机的运行特性	131	5.8 开关磁阻电机驱动系统的应用	163
4.4.1 静态运行特性	131	思考题与习题	164
4.4.2 单步运行状态	134	第6章 直线电动机	166
4.4.3 连续脉冲运行状态	137	6.1 概述	166
4.5 驱动电源	139	6.2 直线感应电动机	167
4.5.1 对驱动电源的基本要求	139	6.2.1 基本结构	167
4.5.2 驱动电源的构成	140	6.2.2 工作原理	169
4.6 步进电动机的应用	143	6.2.3 运行特性	170
思考题与习题	145	6.2.4 边端效应	171
第5章 开关磁阻电机驱动系统	146	6.3 永磁直线电动机	173
5.1 概述	146	6.3.1 基本结构	173
5.1.1 开关磁阻电机驱动系统的		6.3.2 工作原理与运行特性	176
基本构成	146	6.3.3 齿槽推力	177
5.1.2 开关磁阻电机驱动		6.3.4 边端效应	179
系统的特点	147	6.4 直线电动机的应用	181
5.2 开关磁阻电动机的基本工作原理		思考题与习题	182
		第7章 角位传感电机	183

7.1 概述	183	8.3.2 杯形转子异步测速发电机	207
7.2 自整角机	184	8.4 其他类型测速发电机	209
7.2.1 基本结构	184	8.4.1 永磁直流直线测速发电机	209
7.2.2 工作原理	185	8.4.2 无刷直流测速发电机	209
7.2.3 无接触式自整角机和双通道 自整角机	190	8.4.3 脉冲测速发电机	210
7.3 旋转变压器	192	8.5 测速发电机的应用	212
7.3.1 基本结构	192	思考题与习题	213
7.3.2 工作原理	193	第9章 超声波电机	214
7.3.3 无接触式旋转变压器和双通道 旋转变压器	195	9.1 概述	214
7.4 固态角位传感电机	197	9.2 压电陶瓷的超声频振动机理	214
7.4.1 固态自整角变压器	197	9.2.1 压电效应	214
7.4.2 固态自整角差动发送机	198	9.2.2 机电耦合效应	215
7.4.3 固态自整角发送机和数字自整 角机(旋转变压器)转换器	199	9.2.3 振动模态	216
7.5 角位传感电机的应用	200	9.2.4 压电陶瓷的系统方程及 等效电路	216
思考题与习题	203	9.3 超声波电机的基本结构 和工作原理	218
第8章 测速发电机	204	9.3.1 基本结构	218
8.1 概述	204	9.3.2 工作原理	219
8.2 直流测速发电机	205	9.4 驱动控制技术	223
8.2.1 基本结构与工作原理	205	9.4.1 控制方式	223
8.2.2 输出特性分析	205	9.4.2 控制技术	224
8.3 交流测速发电机	206	思考题与习题	226
8.3.1 特点与分类	206	参考文献	227

绪 论

0.1 特种电机发展概况

与传统感应电机、同步电机和直流电机相比，在工作原理、励磁方式、技术性能或功能以及在结构上有较大特点的电机统称为特种电机。从 19 世纪末到 20 世纪前半叶是电机实用化技术的成熟期，继直流电机、感应电机和同步电机以后，各种特种电机纷纷问世。20 世纪后半叶，随着社会进步和科学技术的发展，人们对特种电机及传动系统的性能提出了越来越高的标准和新的特殊要求。而新材料，特别是高性能的稀土永磁材料的问世和发展，以及新技术，特别是电力电子技术、计算机技术和现代控制理论的发展，为特种电机实现这些要求提供了可能，极大地促进了特种电机的快速发展。电机技术的发展和應用已成为人类社会步入现代化、信息化和智能化时代最基本的技术支撑之一，而特种电机目前是电机技术中最具发展潜力和最活跃的领域。特种电机技术已成为许多学科技术进步的关键技术之一，必将发挥越来越重要的作用。我国目前已具有独立的特种电机技术体系、产业体系和技术标准，每年生产各种特种电机数十亿台（套），上万种规格，已成为世界特种电机生产第一大国。

与传统电机相比，特种电机的特点还表现在种类繁多（目前约有 5000 多个品种）和功能多样化上，而且不断产生功能特殊、性能优越的新颖电机，因此不论从原理和结构，还是从功能和使用等方面对其进行严格的分类都是比较困难的。通常，将特种电机大致划分为如下几类：永磁电机、伺服电动机、磁阻类电机、信号检测与传感电机以及非传统电磁原理电机等。下面简要介绍这几类特种电机的发展概况。

永磁电机的发展是与永磁材料的发展密切相关的。19 世纪 20 年代出现的世界上第一台电机就是由永磁体产生励磁磁场的永磁电机。但当时所用的永磁材料是天然磁铁矿石（ Fe_3O_4 ），磁能密度很低，用它制成的电机体积庞大，不久被电励磁电机所取代。到 20 世纪 30 年代和 50 年代，先后出现了铝镍钴永磁材料和铁氧体永磁材料，磁性能有了很大提高，各种微型和小型电机又纷纷使用永磁体励磁，永磁电机的功率小至数毫瓦，大至几十千瓦。

然而，铝镍钴永磁材料的矫顽力偏低（ $36 \sim 160\text{kA/m}$ ），铁氧体永磁材料的剩磁密度不高（ $0.2 \sim 0.44\text{T}$ ），限制了它们在电机中的应用范围。一直到 20 世纪 60 年代和 80 年代，稀土钴永磁材料和钕铁硼永磁材料（二者统称稀土永磁材料）相继问世，它们具有高剩磁密度、高矫顽力、高磁能积和线性退磁曲线等优异的磁性能，特别适合于制造电机，从而使永磁电机的发展步入了一个新的历史时期。

进入 20 世纪 90 年代后，随着稀土永磁材料性能的不斷提高和完善，特别是钕铁硼永磁材料的热稳定性和耐腐蚀性的改善和价格的逐步降低，以及电力电子器件的进一步发展，加之永磁电机理论和技术的逐步成熟，使永磁电机进入了一个快速发展的阶段。在特种电机中，永磁电机使用最为广泛，产量也最大，占特种电机总量 85% 以上。目前，稀土永磁电

机正向着大功率化（高速、高转矩）、高功能化和微型化方向发展，其单台容量已超过 1000kW，最高转速已超过 300000r/min，最低转速低于 0.01r/min，最小电机的外径只有 0.8mm，长度仅为 1.2mm。

我国的稀土资源丰富，稀土矿的储藏量为世界总储量的一半以上，稀土永磁材料和稀土永磁电机的科研水平也都达到了国际先进水平。因此，充分发挥我国稀土资源丰富的优势，大力研究开发和推广应用以稀土永磁电机为代表的各种永磁电机，对我国现代化建设具有重要的理论意义和实用价值。

与传统的电励磁电机相比，稀土永磁电机具有结构简单、运行可靠、体积小、质量轻、损耗少、效率高、电机的形状和尺寸可以灵活多样等显著优点，因而应用范围极广，几乎遍及航空航天、国防、工农业生产和日常生活的各个领域。永磁电机可以按运行原理、结构、用途和采用的永磁材料进行区分，其类型多种多样，主要包括一般用途的永磁直流电动机和永磁同步电动机、永磁同步发电机、永磁无刷电动机（主要指永磁无刷直流电动机和永磁交流伺服电动机）、永磁步进电动机和永磁直线电动机以及其他类型特种永磁电动机等。由于篇幅的限制，本书着重介绍了一般用途的永磁直流电动机和永磁同步电动机、永磁无刷电动机以及其他几种典型的特种永磁电动机。

伺服电动机最早是因军事机械装备的需要而发展起来的，按其使用电源的性质不同，可分为直流伺服电动机和交流伺服电动机，因为在自动控制系统中常作为执行元件，所以又称为执行电动机。本书对这两种伺服电动机做了简要介绍。

事实上，随着自动化水平的提高，伺服电动机的类型和应用范围也不断拓展。目前，多数情况下，将用于位置随动系统（又称伺服系统）的特种电机统称为伺服电动机。此类特种电机还主要包括矢量控制感应电动机和永磁无刷电动机，还有步进电动机、有限转角电动机、直线电动机和磁滞电动机等。

我们知道，电磁转矩是电机实现机电能量转换的重要物理量。从电机的基本理论分析得知，电磁转矩有两个分量，一是由定、转子磁动势相互作用产生的基本电磁转矩，二是由于沿气隙周围的磁阻不相等而产生的磁阻转矩。利用磁阻转矩运行的电动机，称为磁阻电动机，也已经有 100 多年的历史。但由于它的转子上没有绕组，仅由定子侧励磁，因此电动机的效率、功率因数和功率密度都较低，长期以来，仅用作微型电动机，如电钟用同步电动机等。

20 世纪中叶以来，由于电力电子器件的迅猛发展，磁阻电动机与电力电子器件相结合，组成了一种机电一体化的新型电动机——反应式步进电动机。步进电动机是一种用脉冲信号进行控制，并将电脉冲信号转换成相应的角位移或线位移的控制电机。可将它看作是一种特殊运行方式的同步电动机，专用电源每输入一个脉冲，电动机就移进一步，由于运动方式是步进式的，因此又称为步进电动机。步进电动机可作为自动控制系统中的执行部件，是随着计算机控制系统的发展而逐步发展起来的，自 20 世纪 50 年代至今已有近 60 年的历史。目前步进电动机已广泛应用于数字控制系统中，例如数控机床、绘图机、计算机外围设备、自动记录仪和数/模转换装置等。步进电动机的研发工作已取得了重大进展，如采用高性能永磁体后所形成的永磁步进电动机和混合式（又称永磁感应子式）步进电动机，其技术经济性能、动态响应特性等都有明显的改进和提高，随着电子技术的发展，相继开发了多种性能优良的控制电源，为步进电动机扩大应用领域创造了条件。

自 20 世纪 70 年代以来,磁阻电动机与电力电子器件相结合,组成了又一种机电一体化新型电动机——开关磁阻电动机。其优点是:电动机结构简单,制造维护方便;效率高,功率密度与普通感应电动机相近;只需单向电流供电,控制系统较简单。开关磁阻电动机主要用于调速传动系统。由开关磁阻电动机、功率变换器、控制器和位置检测器组成的传动系统(简称 SRD),综合了感应电动机传动系统和直流电动机传动系统的优点,总成本可低于同功率的其他传动系统,是非常有竞争力的传动系统。在国外不仅生产系列的通用型 SRD 产品,以供一般工业用,如风机、泵、卷绕机和压缩机等,还生产许多有特殊用途和性能的 SRD 产品,用于电动汽车、飞机发电系统和日用家电等场合。目前,在国内已有系列 SRD 产品,已在服装机械、食品机械、印刷机械、空调器生产线等传送机构或流水线上获得了应用。

属于磁阻类电机的还有低速同步电动机等多种特种电机。本书仅选择了步进电动机和开关磁阻电动机予以分析。

工农业生产和交通运输中有一部分机械是直线运动的。过去使用旋转电动机,再通过机械传动装置将旋转运动变为直线运动,使得整个装置体积庞大、成本较高而效率较低。如果采用直线电动机,就可能很好地解决这些问题。对直线电动机的探索性研究最早可追溯到 1840 年,至今已有 160 多年的历史,但由于技术和应用等方面的原因,始终没有突破性进展。近几十年来,人们对能够直接产生直线运动的直线电动机进行了深入研究,解决了其理论分析和计算中的许多难题,特别是高性能永磁材料的出现和应用,加快了直线电动机的发展。高性能永磁材料在许多领域获得了应用并取得了良好的效果。例如,在计算机装置中,永磁直线直流电动机(又称音圈电动机)在外围设备方面获得了极广泛的应用,并且促进了计算机外围设备的小型化。在交通运输领域,利用直线电动机制成了时速高达 500km/h 的磁悬浮列车;在工业领域,直线电动机被用于生产输送线,以及需要进行各种横向或垂直运动的一些机械设备中(如数控机床的横向进给和电火花机床的垂直进给装置);在军事领域,利用直线电动机制成各种电磁炮。除此之外,直线电机还被用于各种各样的民用装置,如电动门窗等。

直线电机不仅在结构上相当于从旋转电机演变而来,而且在工作原理上也与旋转电机相似,几乎每种旋转电机都有与之相对应的直线电机。因此,直线电机作为特种电机,其分类也与旋转的特种电机大致相同,可以说是多种多样的。本书重点介绍了基本的常用的直线感应电动机和永磁直线电动机。

信号检测与传感电机的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,或者将输入的电信号转换成转子角位移,其特点是输入和输出具有严格的函数关系,或者输出能准确地反映输入。这类电机主要有测速发电机、自整角机、旋转变压器、转角编码器、旋转变压器/数字转换器、自整角机/数字转换器和电机扩大机等。它们广泛应用于人造卫星、宇宙飞船、飞机和舰船等航天、航空和航海领域,以及导弹、火箭、自动火炮和雷达战车等军事领域,用作各类自动化装置的定位与位置传感、坐标变换与解算、速度解算与反馈等;在工业自动化方面,这类电机用于自动控制、遥控、遥测和自动监控系统中的检测与解算。信号检测与传感电机种类繁多,本书着重介绍了自整角机、旋转变压器和测速发电机这 3 种特种电机。其中,旋转变压器自 20 世纪 60 年代起逐渐用于伺服系统,作为角位移的产生和检测元件,在数控机床等高性能机电一体化装置中获得了广泛应用;测速发电机可将运动速度

转换成电气信号（输出电压），是伺服系统中的基础元件之一，广泛用于各种速度或位置控制中。

随着现代科学技术的发展，近年来借助微电子技术、新材料技术、生物技术以及计算机技术等开发研究出许多基于新原理的特种电机。这些特种电机已经超出了传统电机理论的范畴，常将这类电机通称为非传统电磁原理的特种电机，如超声波电机、微波电机、静电电机、磁致伸缩驱动器、非晶合金电机、分子马达、光热电机、仿生电机和记忆合金电机等。本书对其中的超声波电机做了简要介绍。

目前，特种电机正向机电一体化方向发展，就是与电力电子技术、计算机技术、传感技术和现代控制理论结合，构成新型的一体化产品，最终实现智能化。与此同时，随着电机及相关学科理论与技术的发展以及新型材料的应用，又促使特种电机不断向高性能化方向发展。

特种电机的发展趋势之一是大功率化、小型化和微型化。在电力传动和交通运输等领域，很多应用场合，对特种电机提出了大功率化的要求，而很多信息产品、消费产品和国防产品又对特种电机提出了小型化和微型化的要求。

社会发展和科技进步对特种电机不断提出新的要求，需要不断拓展电机功能和研发新型电机，这是特种电机发展的重点。其中，开发具有非电磁原理的特种电机已成为重要发展方向。目前国内外都在积极探索和研发这类特种电机。另外，新材料如高性能稀土永磁材料、陶瓷合金、实心导磁体和高强度工程塑料等的应用将会对特种电机的技术与变革产生深远影响。

0.2 永磁材料及其特性

特种电机中，大多为永磁电机，因此，有必要将永磁电机有关共同的基础性问题作一个集中的说明。本节将介绍特种电机中常用的永磁材料及其特性，0.3节中将介绍永磁磁路计算基础。

0.2.1 永磁材料特性

用以描述永磁材料性能的主要有退磁曲线、回复线和内禀退磁曲线以及材料的稳定性。永磁材料的磁特性比较复杂，需用多项参数来表示，不同永磁材料的性能存在较大差异。

1. 退磁曲线

永磁材料的磁滞回线在第二象限的部分称为退磁曲线，如图0-1所示。它是永磁材料的基本特性曲线。

退磁曲线上的两个极限位置是表征永磁材料磁性能的两个重要参数。退磁曲线上磁场强度 H 为零时相应的磁感应强度（磁通密度）值称为剩余磁感应强度，简称剩磁密度或剩磁，符号为 B_r ，单位为 T（特斯拉）；退磁曲线上与磁感应强度 B 为零时对应的磁场强度值称为磁感应强度矫顽力，简称矫顽力，符号为 H_{cb} 或 H_c ，常简写为 H_c ，单位为 A/m（安/米）。

磁场能量密度 $\omega_m = BH/2$ ，因此退磁曲线上任一点的磁通密度与磁场强度的乘积可反映磁场能量密度，被称为磁能积（ BH ）。图0-2所示为两种不同形状的退磁曲线1和2，其磁能积与 B 的关系曲线，如曲线3和4所示，称为磁能积曲线。在磁能积曲线某个位置上的磁

能积为最大,称为最大磁能积,符号为 $(BH)_{\max}$,单位为 J/m^3 (焦/米³),它也是表征永磁材料性能的重要参数。对于退磁曲线为直线的永磁材料,显然在 $(B_r/2, H_c/2)$ 处磁能积最大,即有 $(BH)_{\max} = \frac{1}{4}B_rH_c$ 。

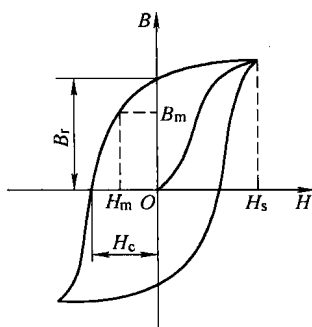


图 0-1 磁滞回线

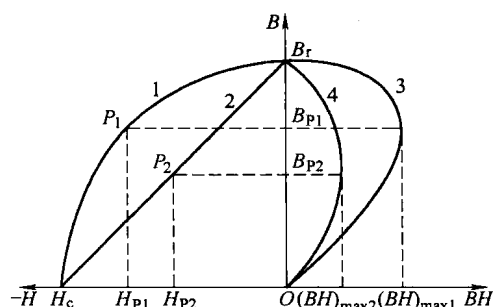


图 0-2 退磁曲线与磁能积曲线

1、2—退磁曲线 3、4—磁能积曲线

2. 回复线

退磁曲线所表示的磁通密度与磁场强度间的关系,只有在磁场强度单方向变化时才存在。实际上,在电机运行时受到作用的退磁磁场强度是反复变化的。当对已充磁的永磁体施加退磁磁场强度时,磁通密度沿图 0-3a 中的退磁曲线 B_rP 下降。如果在下降到 P 点时消去外加退磁磁场强度 H_p ,则磁通密度并不沿退磁曲线回复,而是沿另一曲线 PBR 上升。若再施加退磁磁场强度,则磁通密度沿新的曲线 $RB'P$ 下降。如此反复后形成一个局部的小回线,称为局部磁滞回线。由于该回线的上升曲线与下降曲线很接近,可以近似地用一条直线 PR 来代替,称为回复线。 P 点为回复线的起始点。如果以后施加的退磁磁场强度不超过第一次的值 H_p ,则磁通密度沿回复线 PR 可逆变化。如果以后施加的退磁磁场强度大于 H_p (见图 0-3a), $H_Q > H_p$,则磁通密度下降到新的起始点 Q ,沿新的回复线 QS 变化,不能再沿原来的回复线 PR 变化。

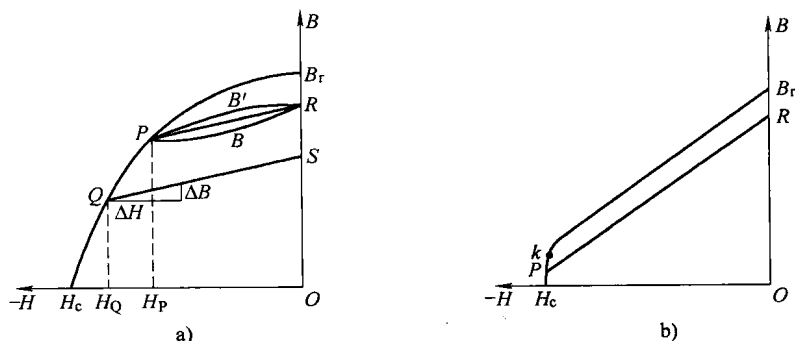


图 0-3 回复线

回复线的平均斜率 $|\Delta B/\Delta H|$ 与真空磁导率 μ_0 的比值称为相对磁导率,又称回复磁导率,记为 μ_r ,即有

$$\mu_r = \frac{1}{\mu_0} \left| \frac{\Delta B}{\Delta H} \right| \quad (0-1)$$

式中, μ_0 为真空磁导率, 又称磁性常数, $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{H/m}$ 。

有的永磁材料, 如部分铁氧体材料, 其退磁曲线的上半部分为直线, 当退磁磁场强度超过一定值后, 退磁曲线就急剧下降, 开始拐弯的点称为拐点。如图 0-3b 所示, 当退磁磁场强度不超过拐点 k 时, 回复线与退磁曲线的直线段相重合。当退磁磁场强度超过拐点 k 后, 新的回复线 PR 不会再与退磁曲线重合。

如上所述, 退磁曲线的形状非常重要。在永磁电机应用中, 希望永磁材料的退磁曲线尽量接近为一条直线, 而其中大部分稀土永磁材料的退磁曲线全部为直线, 回复线与退磁曲线重合, 可以使电机的磁性能在运行过程中保持稳定, 这是电机使用时最理想的退磁曲线。此时, 相对磁导率 μ_r 为常值, 且有

$$\mu_r = \frac{1}{\mu_0} \left| \frac{B_r}{H_c} \right| \quad (0-2)$$

3. 内禀退磁曲线

在外磁场的作用下, 磁性材料被磁化后产生的内在磁感应强度称为内禀磁感应强度 B_i , 又称磁极化强度 J 。

$$B_i = \mu_0 M \quad (0-3)$$

式中, M 为磁化强度 (A/m)。

由铁磁学原理可知, 在磁性材料中

$$B = \mu_0 M + \mu_0 H \quad (0-4)$$

在均匀的磁性材料中, 上式的矢量和可改写成代数和

$$B = \mu_0 M + \mu_0 H \quad (0-5)$$

由式 (0-3) 和式 (0-5) 可得

$$B_i = \mu_0 M = B - \mu_0 H \quad (0-6)$$

若退磁曲线中 H 取绝对值, 则式 (0-6) 可改写成

$$B_i = B + \mu_0 H$$

描述内禀磁感应强度 B_i 与磁场强度 H 之间关系的曲线 $B_i = f(H)$ 是表征永磁材料内在磁性能的曲线, 称为内禀退磁曲线, 简称内禀曲线, 如图 0-4 所示。图中同时表明了永磁材料的内禀退磁曲线与退磁曲线之间的关系。

内禀退磁曲线上内禀磁感应强度 B_i 为零时, 对应的磁场强度值称为内禀矫顽力 H_{cj} (单位为 A/m)。 H_{cj} 是反映稀土永磁材料抗去磁能力强弱的一个重要参数。

除 H_{cj} 值外, 内禀退磁曲线的矩形度 H_K/H_{cj} 越大, 磁性能越稳定。 H_K (A/m) 为内禀退磁曲线上当 $B_i = 0.9B_r$ 时所对应的退磁磁场强度值 (见图 0-4)。 H_K 为稀土永磁材料必须测定的参数之一。

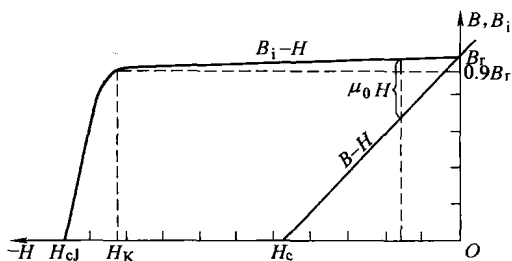


图 0-4 内禀退磁曲线与退磁曲线的关系

4. 稳定性

为了保证永磁电机的电气性能不发生变化及长期可靠运行,要求永磁材料的磁性能保持稳定。永磁材料磁性能的稳定性常用其磁性能随环境温度和时间的变化率来表示,主要包括热稳定性、磁稳定性、化学稳定性和时间稳定性等。

(1) 热稳定性 热稳定性是指永磁体由所处环境温度的改变而引起磁性能变化的程度,故又称温度稳定性。如图 0-5 所示,当永磁体的环境温度从 t_0 升至 t_1 时,磁通密度从 B_0 降至 B_1 ;当温度从 t_1 回到 t_0 时,磁通密度回升至 B'_0 ,而不是 B_0 ;以后温度在 t_0 和 t_1 间变化,则磁通密度在 B'_0 和 B_1 间变化。从图 0-5 可以看出,磁性能的损失可以分为两部分,即可逆损失和不可逆损失。

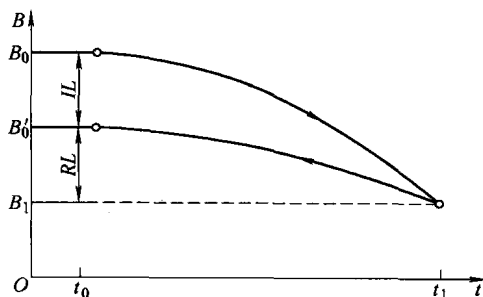


图 0-5 可逆损失和不可逆损失

可逆损失是不可避免的。各种永磁材料的剩余磁感应强度随温度可逆变化的程度可用温度系数 α_{Br} 表示,单位为 K^{-1} 。

$$\alpha_{Br} = \frac{B_1 - B'_0}{B'_0(t_1 - t_0)} \times 100\% \quad (0-7)$$

此外,还常用 $\alpha_{H_{cj}}$ 表示永磁材料的内禀矫顽力随温度可逆变化的程度,单位也是 K^{-1} 。

$$\alpha_{H_{cj}} = \frac{H_{cj} - H'_{cj}}{H'_{cj}(t_1 - t_0)} \times 100\% \quad (0-8)$$

温度恢复后磁性能不能回复到原有值的部分,称为不可逆损失,通常以其损失率 IL 表示,即

$$IL = \frac{B'_0 - B_0}{B_0} \times 100\% \quad (0-9)$$

永磁材料的温度特性还可居里温度和最高工作温度来表示。随着温度的升高,磁性能逐步降低,升至某一温度时,磁化强度消失,该温度称为该永磁材料的居里温度,又称居里点,符号为 T_c ,单位为 K 或 $^{\circ}C$ 。材料行业对最高工作温度的定义:将规定尺寸(稀土永磁体为 $\phi 10mm \times 7mm$)的样品加热到某一恒定的温度,长时间放置(一般取 1000h),然后将样品冷却到室温,其开路磁通不可逆损失小于 5% 的最高保温温度定义为该永磁材料的最高工作温度,符号为 T_w ,单位为 K 或 $^{\circ}C$ 。但这与电机中应用时所允许的最高温度有所区别。

手册或资料中通常提供的是室温 t_0 时的剩余磁感应强度 B_{r0} ,根据 t_0 和 B_{r0} ,可得工作温度在 t_1 时的剩余磁感应强度 B_{r1} 为

$$B_{r1} = B_{r0} \left(1 - \frac{IL}{100\%} \right) \left[1 - \frac{\alpha_{Br}}{100\%} (t_1 - t_0) \right] \quad (0-10)$$

式中, IL 和 α_{Br} 取绝对值。

(2) 磁稳定性 磁稳定性表示在外磁场干扰下永磁材料磁性能变化的大小。理论分析和实践证明,一种永磁材料的内禀矫顽力 H_{cj} 越大,内禀退磁曲线的矩形度越好(或者说 H_k 越大),则这种永磁材料的磁稳定性越高,即抗外磁场干扰能力越强。

(3) 化学稳定性 受酸、碱、氧气和氢气等化学因素的作用, 永磁材料内部或表面化学结构会发生变化, 将严重影响材料的磁性能。例如, 钕铁硼永磁的成分中大部分是铁和钕, 容易氧化, 故在生产过程中需采取各种工艺措施来防止氧化, 要尽力提高永磁体的密度以减少残留气隙来提高其抗腐蚀能力, 同时要在成品表面涂敷保护层。

(4) 时间稳定性 永磁材料充磁以后在通常的环境条件下, 即使不受周围环境或其他外界因素的影响, 其磁性能也会随时间的变化而变化, 通常以一定尺寸形状的样品的开路磁通随时间损失的百分比来表示, 叫做时间稳定性, 或叫自然时效。研究表明, 它与材料的内禀矫顽力 H_J 和永磁体的尺寸比 L/D 有关。对永磁材料而言, 随时间的磁通损失与所经历时间的对数基本上成线性关系, 因此可以从较短时间的磁通损失来推算出长时间的磁通损失, 从而判断出永磁体的使用寿命。

下面分别介绍电机中最常用的 3 种主要永磁材料的基本性能。

0.2.2 几种常用的永磁材料

1. 铝镍钴永磁材料

铝镍钴 (AlNiCo) 永磁材料是 20 世纪 30 年代研制成功的。当时, 它的磁性能最好, 温度系数又小, 因而在永磁电机中应用得最多、最广。60 年代以后, 随着铁氧体永磁材料和稀土永磁材料的相继问世, 铝镍钴永磁材料在电机中的应用逐步被取代, 所占比例呈下降趋势。

按加工工艺的不同, 铝镍钴永磁体分铸造型和粉末烧结型两种。铸造型的磁性能较高。粉末烧结型的工艺简单, 可直接压制成所需形状。在永磁电机中常用的是铸造型。

铝镍钴永磁材料的显著特点是温度系数小, α_B 仅为 $-0.02\% K^{-1}$ 左右, 因此随着温度的改变磁性能变化很小, 目前仍被广泛应用于仪器仪表类等要求温度稳定性高的永磁电机中。

这种材料的剩余磁感应强度较高, 最高可达 1.35T, 但是它的矫顽力很低, 通常小于 160kA/m。它的退磁曲线呈非线性变化, 如图 0-6 所示 (图中虚线为等磁能积曲线)。由于铝镍钴永磁材料的回复线与退磁曲线并不重合, 在磁路设计制造时要注意它的特殊性, 由它构成的磁路必须事先对永磁体进行稳磁处理, 即事先人工预加可能发生的最大去磁效应, 人为地决定回复线的起始点 P 的位置, 使永磁电机在规定或预期的运行状态下, 回复线的起始点不再下降。铝镍钴永磁电机一旦拆卸、维修之后再重新组装时, 还必须进行再次整体饱和充磁和稳磁处理, 否则永磁体工作点将下降, 磁性能大大下降。为此铝镍钴永磁电机的磁极上通常都有极靴且备有再充磁绕组, 使其可以再次充磁来恢复应有的磁性能。

依据铝镍钴永磁材料矫顽力低的特点, 在使用过程中, 严格禁止它与任何铁器接触, 以免造成局部的不可逆退磁或磁通分布的畸变。另外, 为了加强它的抗去磁能力, 铝镍钴永磁磁极往往设计成长柱体或长棒形。

铝镍钴永磁材料硬而脆, 可加工性能较差, 仅能进行少量磨削或电火花加工, 因此加工

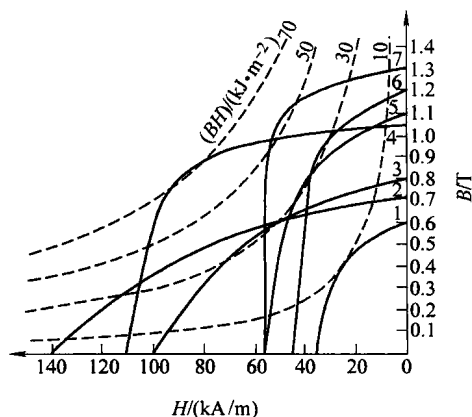


图 0-6 铝镍钴永磁的退磁曲线

成特殊形状比较困难。

表 0-1 列出了我国常用铝镍钴永磁材料的牌号及主要磁性能，表 0-2 列出部分牌号的物理和力学性能，供选用时参考。

表 0-1 国产铝镍钴永磁材料牌号及其主要磁性能

牌号	剩余磁感应强度 B_r		磁感应矫顽力 H_c		最大磁能积 $(BH)_{\max}$		B_r 温度系数 α_{Br}	回复磁导率 μ_r
	T	(kG)	kA/m	(kOe)	kJ/m^3	(MG · Oe)	% K^{-1}	
LN10	0.60	6.0	36	0.45	10	1.25	-0.022	6.0~7.0
LNG13	0.68	6.8	48	0.60	13	1.6		6.0~6.7
LNG32	1.20	12.0	44	0.55	32	4.0	-0.016	3.5~4.8
LNG32H	1.10	11.0	56	0.70	32	4.0		3.2~4.5
LNGT32	0.80	8.0	100	1.25	32	4.0	-0.020	2.4~3.6
LNGT40	0.72	7.2	140	1.76	40	5.0		
LNG52	1.30	13.0	56	0.70	52	6.5	-0.016	2.4~3.6
LNG60	1.35	13.5	60	0.75	60	7.5		2.4~3.6
LNGT56	0.95	9.5	104	1.30	56	7.0	-0.02~0.025	2.4~3.6
LNGT70	0.90	9.0	145	1.82	70	8.8		
LNGT72	1.05	10.5	111	1.40	72	9.0	-0.02~0.025	2.0~3.2
LNGT85	1.08	10.8	120	1.50	85	10.7		2.0~3.0
LNS9	0.5	5.0	35	0.44	9	1.1		6.0~6.7
LNGS25	1.05	10.5	46	0.58	25	3.1		3.2~4.3
LNGTS28	0.7	7.0	95	1.20	28	3.5		

- 注：1. 材料牌号中，L 代表铝，N 代表镍，G 代表钴，T 代表钛，S 代表烧结。
2. 括号内单位为非法定单位。

表 0-2 国产铝镍钴永磁材料部分牌号的物理和力学性能

牌号	密度	电阻率	线膨胀系数	硬度	抗拉强度
	g/cm^3	$\mu\Omega \cdot \text{cm}$	$\times 10^{-6} \text{K}^{-1}$	HRC	N/mm^2
LN10	7.0	60~65	13.0	45~47	
LNG13	7.2	65	12.4	52	2
LNG32	7.3	47	11.2	50	4
LNG52	7.3	50	11.2	50	
LNGT32	7.4	62	11.0	58~59	21
LNGT72	7.4		11.0	58~59	
LNS9	6.7~6.8		13.0	43	
LNGS25	7.0	50	11.3	45	

1971 年研制成功的铁铬钴（FeCrCo）永磁材料是与铝镍钴永磁材料的磁性能相近而具

有可加工优点的可塑性变形永磁材料，其典型磁性能见表 0-3。它的突出优点是具有韧性，可以热加工，也可以进行切削等机械加工，可以铸造、粉末冶金，也可以轧带或拉丝，而且加工后磁性能并不变化，但价格较贵。它可以制成特殊形状的永磁体用于永磁电机，还可用作磁滞材料用于磁滞电机。

表 0-3 铁铬钴永磁材料的主要磁性能

牌号	类别	剩磁密度 B_r	矫顽力 H_c	最大磁能积 $(BH)_{\max}$
		T	kA/m	kJ/m^3
2J83	各向异性	1.05	48	24 ~ 32
2J84	各向异性	1.20	52	32 ~ 40
2J85	各向异性	1.30	44	40 ~ 48

2. 铁氧体永磁材料

铁氧体永磁材料属于非金属永磁材料，在电机中常用的有两种，钡铁氧体 ($\text{BaO} \cdot 6\text{Fe}_2\text{O}_3$) 和锶铁氧体 ($\text{SrO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$)。它们的磁性能相差不多，而锶铁氧体的 H_c 值略高于钡铁氧体，更适于在电机中使用。

铁氧体永磁材料的突出优点是：价格低廉，不含稀土元素和钴、镍等贵金属；制造工艺也较为简单；矫顽力较大， H_c 为 128 ~ 320 kA/m，抗去磁能力较强；密度小，只有 4 ~ 5.2 g/cm³，质量较轻；退磁曲线接近于直线，或者说退磁曲线的很大一部分接近直线（见图 0-7），回复线基本上与退磁曲线的直线部分重合，可以不需要像铝镍钴永磁材料那样进行稳磁处理，因而在电机中应用最为广泛，是目前电机中用量最大的永磁材料。

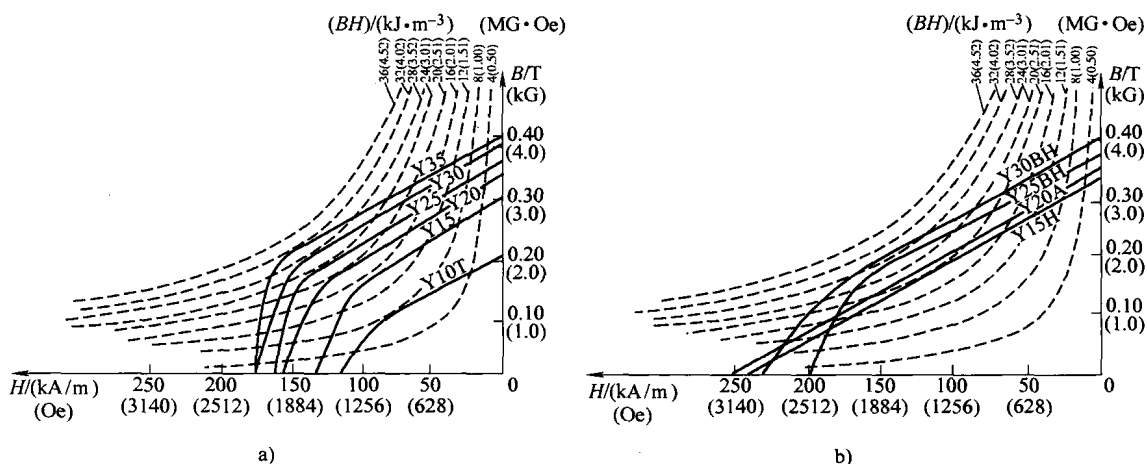


图 0-7 铁氧体永磁材料的退磁曲线

铁氧体永磁材料的主要缺点是：剩磁密度不高， B_r 仅为 0.2 ~ 0.44 T，最大磁能积 $(BH)_{\max}$ 仅为 6.4 ~ 40 kJ/m³。因而需要加大提供磁通的截面积，这使电机体积增大。环境温度对磁性能的影响大，剩磁温度系数 α_{Br} 为 $-(0.18 \sim 0.20) \% \text{K}^{-1}$ ，矫顽力温度系数 α_{Hc} 为