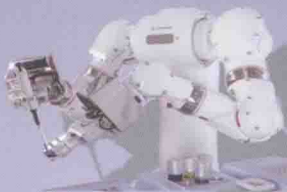
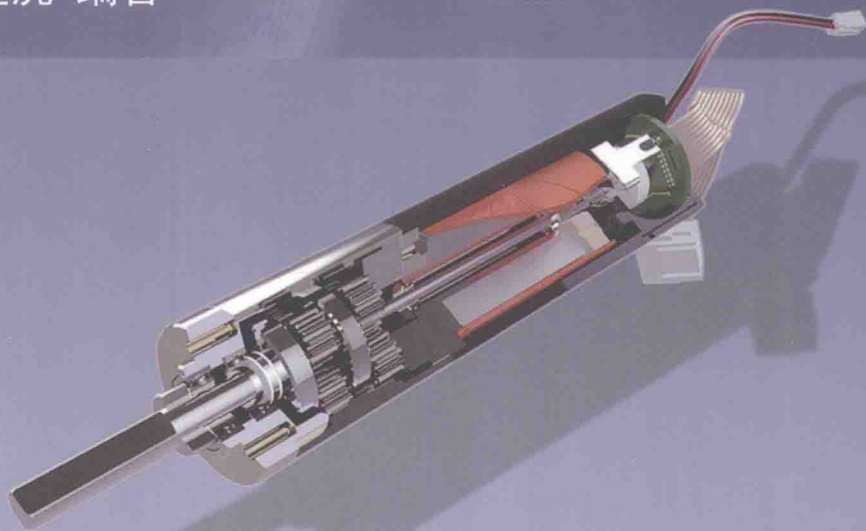


# 精密直流永磁电动机

叶金虎 编著



科学出版社

# 精密直流永磁电动机

叶金虎 编著

科学出版社

北京

## 内 容 简 介

本书在分析含有永磁体的磁路和不同类型的电枢绕组的基础上,从基本概念、工程设计、生产制造和应用的观点出发,比较详细地论述了空心杯电枢有刷直流永磁电动机和无槽无刷直流永磁电动机的工作原理、运行特征和设计要点,这两类电动机的振动和噪声,以及它们的伺服控制系统。本书共分五章,主要内容是永磁材料、永磁体、磁路和磁铁工作图;空心杯电枢有刷直流永磁电动机;无槽无刷直流永磁电动机;直流永磁电动机的振动和噪声;直流永磁电动机的锁相伺服控制。为了便于读者阅读、分析和理解,本书备有四个附录。我们期望本书的出版能对我国微特电机行业的进一步发展做出一定的贡献。

本书可供从事空心杯电枢有刷直流永磁电动机、无槽无刷直流永磁电动机及其控制系统的科研、开发、设计、制造、测试和应用等研究的科技人员参考,也可作为高等学校电机和自动控制等专业的高年级本科生、研究生和教师的自学参考书。

### 图书在版编目(CIP)数据

精密直流永磁电动机/叶金虎编著. —北京:科学出版社, 2017

ISBN 978-7-03-052686-1

I. ①精… II. ①叶… III. ①直流电机—永磁式电机 IV. ①TM351

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 099662 号

责任编辑:童安齐 王杰琼 / 责任校对:王万红

责任印制:吕春珉 / 封面设计:耕者设计工作室

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>

北京中科印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2017年6月第一版 开本: B5 (720×1000)

2017年6月第一次印刷 印张: 25 1/4

字数: 500 000

定价: 100.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换〈中科〉)

销售部电话 010-62136230 编辑部电话 010-62137026

版权所有, 侵权必究

举报电话: 010-64030229; 010-64034315; 13501151303

## 前 言

空心杯电枢有刷直流永磁电动机和无槽无刷直流永磁电动机是精密仪表微型电动机。空心杯电枢有刷直流永磁电动机的主要优点在于：①永磁体通常被放置在内定子上，结构紧凑；在闭合磁路中，相对总的磁路长度而言，永磁体沿着磁化方向的长度所占比例高、漏磁通小、气隙磁通密度高、功率密度比较高。②换向回路电感量小、换向火花小、电磁干扰小、电磁兼容（EMC）性能好。③软磁铁心上没有齿，气隙磁导均匀，因而定转子之间没有因齿与磁极相互作用而产生的齿槽效应力矩，转子没有停留在那些气隙磁导大的空间位置上的趋向；机械特性的线性度好，能够在低速情况下平稳光滑地旋转，便于控制；运行过程中没有抖动、振动小、噪声小。④转动惯量低，机电时间常数小，可以低至 1 毫秒，频带宽、响应快、伺服控制性能好。⑤不存在铁心齿层的磁饱和问题，电枢反应对主磁场的影响小，气隙磁通密度恒定，因此电磁转矩与输入电动机的电流之间能够确切地保持正比例关系。⑥没有铁心损耗，空载电流小，一般小于 50 毫安，运行效率高。⑦寿命长。当然，它也有不足之处，例如空心杯电枢的热容量小，耐热性能比较差，抵抗冲击负荷的能力差，发热后容易变形。此外，电枢回路电感小也存在负面效应，例如在采用脉宽调制（PWM）方式对电动机的输出功率或转速实施控制时，电流反应很快，电枢绕组内将出现电流脉动，它将会使电动机严重发热；同时，快速变化的电流反应也将影响到电流控制回环的稳定性。

无槽无刷直流永磁电动机，虽然在结构上类似三相永磁同步电动机，如永磁体被放置在转子上，三相绕组被放置在定子上，采用预先施加负荷的滚珠轴承，然而，它与同步电动机还是有着很大的差异：电源将依据电动机内部转子的空间电气角位置对三相电枢绕组实施供电，而不是由外部强加的；恰恰相反，它的运行机制十分类似于三个换向片的有刷直流永磁电动机，因而它具有一般有刷直流永磁电动机同样的机械特性，拥有高的起动转矩和良好的动态性能。此外，它的主要优点在于：①由于它采用电子换向来替代机械换向，转速不受电刷/换向器机械构件的限制，能够在高达 100 000 转/分的转速条件下运转。②采用无槽的外定子铁心，因而它没有齿槽效应力矩，运转平稳光滑、振动小、噪声小。③工作寿命长。当然，无槽无刷直流永磁电动机也存在一些不足之处，例如，它的运行离不开控制器，控制器除了被用来实现电子换向外，还被用来控制电动机的转速或位置，从而增加了生产成本，同时，又增加了电子元器件和电气线路的可靠性问题；定子铁心内的交变磁通将产生铁心损耗，影响到电动机的运行效率。

随着社会经济的发展和科学技术的进步，上述两类精密直流永磁电动机以其

优越的性能，在仪器仪表、机器人、医疗器械、工农业生产自动化、消费类机电产品、国防工业和航空航天等领域得到了日益广泛的应用。

本书作者于2009年开始至今，一直受聘于深圳市万至达电机制造有限公司，期间与张松、翁孟坤、张子茂、齐志虎、胡佳和阮国辉等工程师一起，从事铁心电枢有刷直流永磁电动机、空心杯电枢有刷直流永磁电动机、无槽无刷直流永磁电动机和微型永磁步进电动机等产品的研究和开发，我们相互学习，相互讨论，认真分析，受益匪浅。

长期以来，深圳市万至达电机制造有限公司十分重视电动机的基础理论和设计制造技术的提高，坚持对工程技术人员进行技术培训，脚踏实地、安心定心、一丝不苟、精益求精，致力于提高人才的素质和产品的品质。2016年春节后，该公司为了进一步提高本公司工程技术人员的基础理论、设计能力和产品质量，亲自组织和领导工程技术人员，认真总结十余年来在新产品开发、设计制造和品质管理中获得的经验和成果，在此基础上，由本人执笔编著《精密直流永磁电动机》一书。

全书共分五章：在第1章中，着重分析了永磁材料、永磁体、磁路和磁铁工作图；在第2章中，着重于空心杯电枢有刷直流永磁电动机的直绕组、斜绕组、菱形绕组和六角形绕组的基本公式的推导，同时，对它的稳态运行性能、电枢反应、换向和有关设计问题做了比较详细的说明，并给出了一个具体的设计例子；在第3章中，着重于三相对称菱形电枢绕组成星形连接和成三角形连接的无槽无刷直流永磁电动机的基本公式的推导，同时，对它的稳态运行性能、电枢反应、转矩脉动、电子换向和有关设计问题做了比较详细的说明，并给出了一个具体的设计例子；在第4章中，对有刷直流永磁电动机和无刷直流永磁电动机内产生振动和噪声的根源，以及抑制振动和噪声所采用的方法进行了详细的分析，并介绍了振动和噪声的物理度量 and 测量方法；在第5章中，在详细介绍锁相回环基本理论的基础上，描述了如何构建锁相伺服系统来控制电动机的输出转矩和转速，如何利用根轨迹法来分析和设计电动机的锁相伺服系统，并给出了三个实施例子。为了便于读者分析和理解，本书备有四个附录：二阶常系数线性微分方程式；控制系统的一些基本概念和分析方法；直流永磁电动机的选择；旋转编码器等。

本书作者在撰写中力求理论联系实际，在阐明基本原理和基本概念的基础上，提供在设计制造和运行中需要的基本公式，并附有电磁计算的实例。

本书中涉及的物理参数的计算量纲尽量采用国际单位制。在沿用我国传统的物理参数的习惯计算量纲时，都将会标明具体的单位。

在编写本书的过程中，得到了中国电子科技集团第二十一研究所冷小强、周醒夫、何金泽和丁正民等工程师的热情协助，在此一并致谢。

在本书的编写过程中，除依据该公司十余年来在产品开发和生产制造方面积

累起来的实践经验，以及作者本人在多年从事永磁电动机科研工作中的心得和体会之外，作者还参考了不少相关的书籍和资料，在此对其原作者表示真诚的谢意。

本书由上海交通大学金如麟教授仔细审阅，并提出了许多宝贵的意见，在此表示衷心的感谢。

由于作者受知识和实践所限，书中难免有不当之处，恳请读者批评指正。

叶金虎

2017年1月1日

于深圳市万至达电机制造有限公司

# 目 录

第 1 章 永磁材料、永磁体、磁路和磁铁工作图 .....	1
1.1 永磁材料 .....	1
1.1.1 物质的磁化 .....	3
1.1.2 磁滞回环和去磁曲线 $B(H)$ .....	4
1.1.3 回复线 .....	6
1.1.4 本征去磁曲线 $J(H)$ .....	7
1.2 永磁体 .....	8
1.2.1 如何选择永磁材料 .....	9
1.2.2 如何估算永磁体的中性截面积和沿着磁化方向的长度 .....	9
1.3 磁路、磁铁工作图和永磁体的最佳工作点 .....	16
1.4 永磁体的稳定 .....	20
1.4.1 永磁体的理化稳定性 .....	20
1.4.2 永磁体在电动机运行过程中的稳定问题 .....	22
第 2 章 空心杯电枢有刷直流永磁电动机 .....	25
2.1 空心杯电枢有刷直流永磁电动机的结构 .....	25
2.2 一般有刷直流电动机的电枢绕组 .....	27
2.3 空心杯电枢绕组 .....	37
2.3.1 直绕组 .....	38
2.3.2 斜绕组 .....	40
2.3.3 菱形绕组 .....	40
2.3.4 六角形绕组 .....	41
2.4 空心杯电枢有刷直流永磁电动机的基本公式推导 .....	42
2.4.1 直绕组的基本公式 .....	44
2.4.2 斜绕组的基本公式 .....	46
2.4.3 菱形绕组的基本公式 .....	49
2.4.4 六角形绕组的基本公式 .....	58
2.5 空心杯电枢有刷直流永磁电动机的稳态运行性能 .....	61
2.5.1 机械特性 $n(T)$ .....	61
2.5.2 输出功率特性曲线 $P_2(T)$ .....	63
2.5.3 效率特性曲线 $\eta(T)$ .....	65
2.6 起动过程 .....	67
2.7 空心杯电枢有刷直流永磁电动机的发热和冷却 .....	69
2.7.1 最大耗散功率 .....	70
2.7.2 最大负载电流 .....	71
2.7.3 发热和热时间常数 .....	73

2.7.4	冷却	76
2.7.5	间歇运行状态	77
2.8	电枢反应	78
2.9	换向	81
2.9.1	换向元件内的电动势	83
2.9.2	换向元件内的电阻	85
2.9.3	换向元件内的电流	86
2.9.4	换向区域的宽度	87
2.9.5	改善换向的方法	88
2.10	空心杯电枢有刷直流永磁电动机的设计考虑	93
2.10.1	主要技术要求	93
2.10.2	主要尺寸的决定	103
2.10.3	所需永磁体体积的估算	106
2.11	设计例题	108
<b>第3章</b>	<b>无槽无刷直流永磁电动机</b>	<b>123</b>
3.1	无槽无刷直流永磁电动机的结构	123
3.2	无刷直流永磁电动机的运行机制	124
3.2.1	有转子位置传感器的无刷直流永磁电动机的运行机制	124
3.2.2	无转子位置传感器的无刷直流永磁电动机的运行机制	130
3.3	基本公式的推导	133
3.3.1	星形连接的三相对称菱形电枢绕组的基本公式	133
3.3.2	三角形连接的三相对称菱形电枢绕组的基本公式	146
3.4	无槽无刷直流永磁电动机的稳态运行性能	164
3.4.1	机械特性 $n(T)$	164
3.4.2	输出功率特性曲线 $P_2(T)$	168
3.4.3	效率特性曲线 $\eta(T)$	169
3.5	起动过程和振荡特性	171
3.6	无槽无刷直流永磁电动机的发热特性	173
3.6.1	最大耗散功率	173
3.6.2	最大负载电流	174
3.6.3	发热和热时间常数	175
3.7	无槽无刷直流永磁电动机的设计考虑	176
3.7.1	无槽无刷直流永磁电动机的主要尺寸的决定	176
3.7.2	估算所需永磁体的体积	177
3.8	设计例题	179
<b>第4章</b>	<b>直流永磁电动机的振动和噪声</b>	<b>192</b>
4.1	有刷直流永磁电动机的噪声	193
4.1.1	有刷直流永磁电动机的机械噪声	193
4.1.2	有刷直流永磁电动机的电磁噪声	204



4.2	无刷直流永磁电动机的噪声	209
4.2.1	高次谐波电磁转矩脉动	210
4.2.2	齿槽效应力矩	212
4.2.3	高次谐波电磁转矩与齿槽效应力矩之间的关系	213
4.2.4	减小无刷直流永磁电动机的齿槽效应力矩和电磁转矩脉动的方法	213
4.2.5	磁场取向电磁转矩脉动	222
4.2.6	换相电磁转矩脉动	232
4.2.7	脉宽调制 (PWM) 驱动过程中引发的振动和噪声	236
4.2.8	单向磁拉力	236
4.3	振动和噪声的测量	242
4.3.1	噪声的测量	242
4.3.2	振动的测量	249
4.3.3	振动和噪声测量的实施	255
<b>第 5 章</b>	<b>直流永磁电动机的锁相伺服控制</b>	<b>256</b>
5.1	锁相回环的基本概念	257
5.1.1	锁相回环的传递函数	258
5.1.2	锁相回环的根轨迹图	266
5.1.3	锁相回环的跟踪性能	271
5.1.4	锁相回环的过渡过程	273
5.1.5	锁相回环的锁定和捕捉	276
5.1.6	锁相回环设计的若干问题	285
5.2	锁相伺服系统的基本理论	289
5.2.1	锁相伺服系统的基本环节	290
5.2.2	锁相伺服系统的传递函数	295
5.2.3	锁相伺服系统的扰动	297
5.2.4	速度的捕获和锁定	299
5.2.5	电动机速度控制系统设计的若干问题	300
5.2.6	系统的补偿	305
5.3	采用锁相伺服系统来稳定直流永磁电动机转速的实例	308
5.3.1	连续线性调节的锁相伺服系统	309
5.3.2	脉宽调制 (PWM) 方式的锁相伺服系统	314
5.3.3	无刷直流永磁电动机的无转子位置传感器的驱动	317
<b>附录 A</b>	<b>二阶常系数线性微分方程式</b>	<b>325</b>
A.1	几个典型的物理现象	325
A.1.1	弹簧的机械振动	325
A.1.2	$R-L-C$ 电路的电磁振荡	327
A.2	二阶常系数线性齐次微分方程式的解法	328
A.2.1	解的性质	328
A.2.2	特征方程式法	329
A.3	二阶常系数线性非齐次微分方程式的解法	331
A.4	弹簧的机械振动和 $R-L-C$ 电路的电磁振荡的分析	334

A.4.1	分析弹簧的机械振动	334
A.4.2	分析 $R-L-C$ 电路的电磁振荡	338
<b>附录 B</b>	<b>控制系统的一些基本概念和分析方法</b>	<b>340</b>
B.1	分贝和对数坐标	340
B.1.1	分贝	340
B.1.2	对数坐标	341
B.2	拉普拉斯正变换和反变换	345
B.3	传递函数	350
B.4	方框图	353
B.5	频率响应	354
B.6	系统的稳定性	356
B.6.1	系统稳定性与特征方程式根的关系	356
B.6.2	对数频率特性法	358
B.7	根轨迹法	359
B.7.1	根轨迹法的基本数学关系	360
B.7.2	绘制根轨迹图的基本规则	361
B.7.3	用根轨迹法来分析和设计系统	368
B.8	闭环系统的时间域响应	371
B.8.1	时间域响应的特性参数	372
B.8.2	二阶系统的阶跃响应特性	374
B.8.3	系统的瞬变参数	375
<b>附录 C</b>	<b>直流永磁电动机的选择</b>	<b>377</b>
<b>附录 D</b>	<b>旋转编码器</b>	<b>382</b>
D.1	光电编码器	382
D.1.1	增量式光电编码器	383
D.1.2	绝对式光电编码器	385
D.2	磁性编码器	387
D.2.1	磁阻传感器	387
D.2.2	磁鼓	388
D.3	旋转变压器	389
D.3.1	电磁感应式无接触旋转变压器	390
D.3.2	磁阻式无接触旋转变压器	391
<b>主要参考文献</b>		<b>393</b>

# 第 1 章 永磁材料、永磁体、磁路和磁铁工作图

本书主要分析和讨论的空心杯电枢有刷直流永磁电动机和无槽无刷直流永磁电动机的设计制造方法、运行性能、应用领域和产品价格等都与永磁材料的性能密切相关，不同的技术要求和不同的应用领域应该选用不同的永磁材料、不同的永磁体和不同的磁路结构。因此，永磁材料和永磁体是设计制造永磁电动机的基础，我们必须首先了解、熟悉和掌握它们。

磁铁工作图描绘了永磁体在磁路中所处的磁状态，它能够经受多大的去磁作用和能够向外磁路提供多大的磁通量。因此，磁铁工作图是永磁电动机设计的核心。

## 1.1 永 磁 材 料

目前被广泛采用于电动机的永磁材料主要有铁氧体、铝镍钴和稀土等三大类，它们的主要性能和特点如表 1.1.1 所列，图 1.1.1 展示了这三大类永磁材料的特性曲线。

表 1.1.1 几种典型的永磁材料的主要性能和特点

分类	商业化时间	主要性能	特点
铝镍钴类	1931 年	$B_r$ : 6000~12 000 高斯 <sup>①</sup> ; $H_c$ : 600~1500 奥斯特 <sup>②</sup> ; $(BH)_{\max}$ : 3~9 兆高奥 <sup>③</sup>	① 剩余磁通密度比较高, 但矫顽力比较低, 相对回复磁导率比较大; ② 硬而脆, 机械性能较差; ③ 居里点高达: 850℃; ④ 最大工作温度: 550℃; ⑤ 温度稳定性比较好; ⑥ 化学稳定性比较好
铁氧体类	1938 年	$B_r$ : 2000~5000 高斯; $H_c$ : 1600~3000 奥斯特; $(BH)_{\max}$ : 2~3 兆高奥	① 剩余磁通密度比较低, 但矫顽力比较高, 相对回复磁导率比较小; ② 硬而脆, 机械性能较差; ③ 最高居里点: 450℃; ④ 最大工作温度: 250~350℃; ⑤ 化学稳定性比较好; ⑥ 重量轻, 电阻率高; ⑦ 价格便宜

① 1 高斯 =  $10^{-4}$  特斯拉, 下同。

② 1 奥斯特 = 79.5775 安/米, 下同。

③ 1 兆高奥 = 400 千焦/立方米, 下同。

续表

分类	商业化时间	主要性能	特点
稀土类	第一代 SmCo <sub>5</sub>	$B_r$ : 8000~9500 高斯; $H_c$ : 7000~8500 奥斯特; $(BH)_{max}$ : 16~24 兆高奥	① 剩余磁通密度比较高, 矫顽力比较高, 相对反复磁导率比较小; ② 硬而脆, 机械性能较差; ③ 最高居里点: 720℃; ④ 最大工作温度: 250℃; ⑤ 温度稳定性比较好; ⑥ 化学稳定性比较好; ⑦ 价格贵
	第二代 Sm <sub>2</sub> Co <sub>17</sub>	$B_r$ : 9500~10 800 高斯; $H_c$ : 8500~10 000 奥斯特; $(BH)_{max}$ : 22~30 兆高奥	① 剩余磁通密度比较高, 矫顽力比较高, 相对反复磁导率比较小, 磁性能优于 SmCo <sub>5</sub> ; ② 硬而脆, 机械性能较差; ③ 最高居里点: 825℃; ④ 最大工作温度: 350℃; ⑤ 温度稳定性比较好; ⑥ 化学稳定性比较好; ⑦ 价格贵
	第三代 NdFeB	$B_r$ : 10 300~15 000 高斯; $H_c$ : 10 000~13 000 奥斯特; $(BH)_{max}$ : 25~53 兆高奥	① 磁性能高; ② 机械性能较好; ③ 居里点: 310℃; ④ 最大工作温度: 110~175℃; ⑤ 温度稳定性较差; ⑥ 化学稳定性较差, 易锈蚀

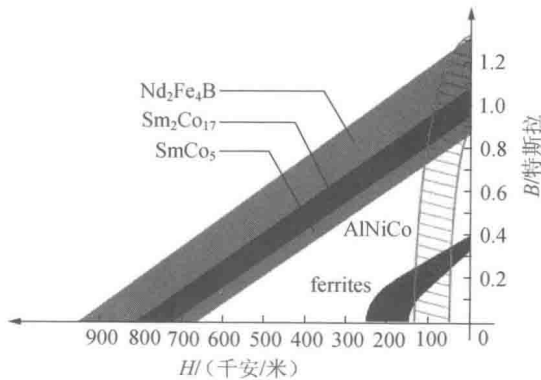


图 1.1.1 三大类永磁材料的特性曲线

下面, 我们就永磁材料的性能, 以及永磁体、磁路、磁铁工作图和最佳工作点进行的分析和说明, 这也是永磁电动机的工作原理和设计的基础。

### 1.1.1 物质的磁化

根据电磁学原理, 图 1.1.2 所示的真空中的某一点  $O$  上的磁场强度和磁感应强度之间存在着如下的关系式, 一般可用矢量来表示为

$$\vec{B}_0 = \mu_0 \vec{H}, \quad (1-1-1)$$

式中,  $\vec{B}_0$  为该点的磁感应强度, 特斯拉;

$\vec{H}$  为该点的磁场强度, 安/米;

$\mu_0$  为真空的磁导率,  $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ , 亨利/米.

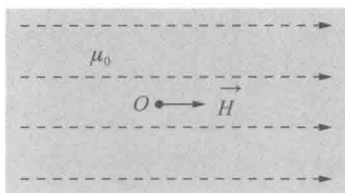


图 1.1.2 真空中某一点的磁场强度与磁感应强度之间的关系

如果把某种磁导率为  $\mu$  的介质填充入如图 1.1.1 所示的同一个磁场内, 这时虽然磁场强度  $\vec{H}$  保持不变, 但磁感应强度要发生变化, 其规律为

$$\vec{B} = \mu \vec{H}. \quad (1-1-2)$$

把方程式 (1-1-2) 减去方程式 (1-1-1), 便可以求出当磁场介质从  $\mu_0$  变化到  $\mu$  时磁感应强度的增量, 即

$$\Delta \vec{B} = \vec{B} - \vec{B}_0 = \mu \vec{H} - \mu_0 \vec{H} = (\mu - \mu_0) \vec{H}. \quad (1-1-3)$$

把方程式 (1-1-2) 除以方程式 (1-1-1), 就可以求得它们两者之间的比值, 即

$$\frac{\vec{B}}{\vec{B}_0} = \frac{\mu \vec{H}}{\mu_0 \vec{H}} = \frac{\mu}{\mu_0} = \mu_r, \quad (1-1-4)$$

式中,  $\mu_r$  为该介质的相对磁导率.

根据方程式 (1-1-3), 即  $\Delta \vec{B} = \vec{B} - \vec{B}_0 = \mu \vec{H} - \mu_0 \vec{H}$ , 我们便可以获得

$$\vec{B} = \mu_0 \vec{H} + \Delta \vec{B}. \quad (1-1-5)$$

方程式 (1-1-5) 表示: 一个磁场在某种磁导率为  $\mu$  的介质中产生的磁感应强度, 即磁通密度  $\vec{B}$  等于该磁场在真空中产生的磁感应强度  $\mu_0 \vec{H}$  和当磁场介质从  $\mu_0$  变化到  $\mu$  之后的磁感应强度的增量  $\Delta \vec{B}$  之和, 增量  $\Delta \vec{B}$  实质上是介质磁化后产生的附加磁场的磁感应强度.

真空中填充入介质后磁场的变化, 应归结为介质分子对外磁场的反应, 构成分子的各个电子对外界所产生的磁效应的总和可以用一个等效的圆电流来表

示. 这种等效的圆电流称为分子电流, 它具有一定的磁矩, 被称为分子磁矩或磁偶极子, 并用符号  $\vec{P}_m$  来表示. 在没有外磁场时, 虽然介质中也存在着许许多多的磁偶极子, 但是它们的磁矩具有各种不同的方向, 因而互相抵消, 使得合成磁矩为零, 物质对外界不显示任何磁性. 反之, 在外磁场的作用下, 各个磁偶极子的轴, 也就是分子磁矩向量的方向, 由于受到磁力的作用要向外磁场方向偏转, 这种现象被称之为取向. 取向的过程就是物质被磁化的过程, 外磁场越强, 分子磁矩取向排列得越整齐. 在这种情况下, 如果在被磁化的介质内任意截取一个体积元  $\Delta V$ , 则在这个体积元内各分子磁矩的矢量之和  $\Sigma \vec{P}_m$  将有一定的量值, 对外界就要产生磁场. 我们把单位体积内的磁矩称为磁化强度, 磁化强度是表征介质被磁化的程度的一个物理量, 用符号  $\vec{J}$  来表示, 则

$$\vec{J} = \frac{\Sigma \vec{P}_m}{\Delta V}. \quad (1-1-6)$$

根据电磁学原理, 在介质中的磁感应强度, 磁场强度和磁化强度之间, 存在着一个普遍的关系式, 即

$$\vec{B} = \mu_0 \vec{H} + \vec{J}. \quad (1-1-7)$$

比较方程式 (1-1-5) 和式 (1-1-7), 可以得到

$$\vec{J} = \Delta \vec{B}. \quad (1-1-8)$$

由此可见, 磁化强度  $\vec{J}$  就是介质被磁化后产生的附加磁场的一种度量, 它又可以被称为该介质的本征磁感应强度或内禀磁感应强度.

按照目前铁磁学的观点, 对于顺磁体而言,  $\vec{J}$  的方向与外磁场  $\vec{H}$  的方向一致; 对于抗磁体而言,  $\vec{J}$  的方向和外磁场  $\vec{H}$  的方向相反. 对于铁磁材料而言, 在它的内部天然地存在着许多细小的磁化区, 有时被称为磁畴. 当外磁场不存在时, 各自然磁化区具有各自不同的方位, 它们的磁场相互抵消, 合成磁场表现为零. 在外磁场作用下, 各自然磁化区的磁场方向和范围都会发生变化, 即自然磁化区按外磁场取向, 自然磁化区的范围被扩大, 其结果便出现了附加磁场.

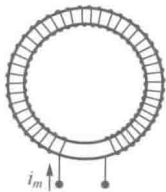


图 1.1.3 闭合电磁铁

### 1.1.2 磁滞回环和去磁曲线 $B(H)$

首先我们来考察一个绕有线圈的闭合磁环, 磁环由磁性材料制成, 如图 1.1.3 所示.

当线圈中通入正向激磁电流 ( $+i_m$ ) 时, 磁环内建立起正向磁场强度 ( $+H$ ), 磁性材料被逐渐磁化, 直至达到饱和状态  $+B_s$ . 然后, 再逐渐减小激磁电流, 直至  $i_m = 0$ , 这时磁环中的磁场强度  $H$  就等于零, 但磁感应强度 (通常称为磁通密度)  $B$  并不等于零. 我们把磁性材料的这一特性称为磁滞现象. 把  $H = 0$  时, 留存在磁环中的磁感应强度, 被称为制成磁环的磁性材料的剩余磁感应强度, 用符号  $B_r$  来标记. 在此情况下, 如果进而在反方向施加激磁电流 ( $-i_m$ ), 在磁环中便出现反方向的磁场强度 ( $-H$ ), 我们把这种反方向的磁场强度称为去磁磁场强度, 随着去磁磁场强度的逐渐增加, 磁感应强度  $B$  便按照一定的规律下降. 当去磁磁场强度 ( $-H$ ) 增大到某一数值时, 磁感应强度  $B$  就下降到零值, 我们把  $B = 0$  时的去磁磁场强度称为制成磁环的磁性材料的矫顽力, 并用符号  $H_c$  来标记. 当反方向的激磁电流 ( $-i_m$ ) 继续增大时, 在磁环中便出现反方向的磁感应强度 ( $-B$ ), 直至达到负的饱和磁感应强度  $-B_s$ . 如果在磁性材料达到负饱和状态之后, 开始减小反方向的激磁电流 ( $-i_m$ ), 又逐渐回到  $i_m = 0$ , 然后, 再施加正向激磁电流 ( $+i_m$ ), 直至又回复到正向饱和状态  $+B_s$ . 如此反复多次, 磁环内的磁状态 ( $H$  和  $B$ ) 便沿着图 1.1.4 中所示闭合曲线在第 I、第 II、第 III 和第 IV 象限内循环移动, 我们把这条闭合曲线称为制成磁环的磁性材料的磁滞回环.

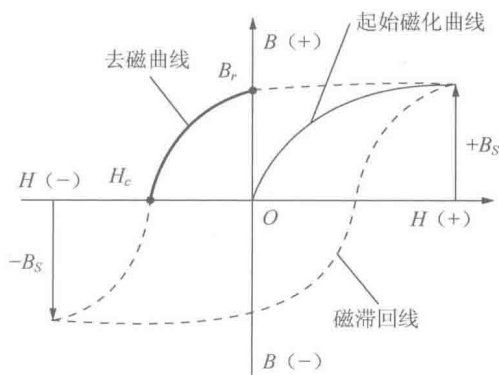


图 1.1.4 磁滞回线和去磁曲线

对于软磁材料 (例如硅钢片和电工纯铁等) 而言, 我们希望磁滞回线所包围的面积越小越好, 以便降低电动机的铁心损耗 (磁滞损耗); 而对于硬磁材料 (例如铝镍钴、铁氧体、钕钴和钕铁硼等永磁材料) 而言, 我们希望磁滞回线所包围的面积越大越好, 以便向外磁路提供足够的磁动势和磁通. 磁滞回环的第 II 象限内的曲线部分描述了磁路系统中的永磁体内的磁感应强度  $B_m$  随着磁场强度  $H_m$  的变化而变化的规律, 我们把第 II 象限内的这段曲线称为永磁材料的去磁曲线, 它是永磁材料的基本特性曲线. 由于去磁曲线处于第 II 象限内, 磁感应强度  $B_m$  为正值, 而磁场强度  $H_m$  为负值. 这表示永磁材料内的磁感应强度  $B_m$  与磁场强度  $H_m$  的

方向是相反的，当磁通经过永磁体时，沿着磁通方向的磁位差不是下降而是上升。这说明：永磁体是一个磁源，类似于电路中的电源。磁场强度  $H_m$  为负值还表示：此时，作用于永磁体的磁场强度是去磁磁场强度，去磁磁场强度越大，永磁体内的磁感应强度就越小。有时，为了表述方便起见，把第 II 象限内  $H(-)$  在形式上改为  $H(+)$ 。

### 1.1.3 回复线

去磁曲线所描述的永磁体内部的磁感应强度与磁场强度之间的关系，只有在磁场强度单方向变化时才存在。实际上，永磁电动机运行时，永磁体经受到的去磁磁场强度的作用是反复变化的。当对已经充磁的永磁体施加去磁磁场强度时，磁感应强度沿着图 1.1.5 中的去磁曲线  $B_r O$  下降。如果在下降到  $O$  点时去掉外加的去磁磁场强度，但永磁体内的磁感应强度并不沿着去磁曲线回复，而是沿着另一条曲线  $OCR$  上升。若从  $R$  点开始再继续施加去磁磁场强度，则永磁体内的磁感应强度将沿着新的曲线  $RDO$  下降。如此多次反复后形成一个局部的小回环曲线，这个局部的小回环曲线被称为局部磁滞回线。由于局部磁滞回线的上升曲线  $OCR$  与下降曲线  $RDO$  很接近，可以近似地用一条直线  $\overline{OR}$  来代替，这条直线  $\overline{OR}$  就被称为回复直线，或被简称为回复线。 $O$  点为回复线的起始点。如果以后施加的去磁磁场强度不超过第一次  $O$  点的去磁磁场强度的数值  $H_o$ ，则磁感应强度将沿着回复线  $\overline{OR}$  作可逆变化。如果以后施加的去磁磁场强度  $H_o > H_o$ ，则磁感应强度将沿着去磁曲线下降到新的起始点  $Q$ ，并将沿着新的回复线  $\overline{QS}$  作可逆变化，而不会再沿着原来的回复线  $\overline{OR}$  作可逆变化了。这种永磁体的磁状态的不可逆变化将造成电动机运行性能的不稳定，在电动机的设计和制造过程中必须加以考虑。

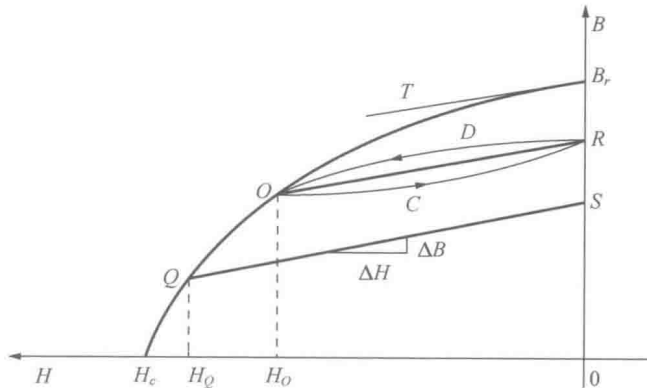


图 1.1.5 永磁材料的回复曲线



回复线的平均斜率与真空磁导率  $\mu_0$  的比值被称为相对回复磁导率，简称回复磁导率，用符号  $\mu_r$  来表示，其数学表达式为

$$\mu_r = \frac{1}{\mu_0} \times \left| \frac{\Delta B}{\Delta H} \right|, \quad (1-1-9)$$

式中， $\mu_0$  为真空磁导率， $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ ，亨/米。

从理论上讲，回复磁导率  $\mu_r$  是一个变数，随着回复线的起始点的位置的变化而变化。但是，通常情况下，回复磁导率  $\mu_r$  的变化不大，可以近似地认为是一个常数，并且近似等于去磁曲线上 ( $H=0, B=B_r$ ) 点处切线的斜率值。换言之，去磁曲线上各点的回复线可以近似地认为是一组平行线，它们都与去磁曲线上点 ( $H=0, B=B_r$ ) 处切线  $T$  相平行。

对于目前大量采用的铁氧体和稀土永磁材料而言，它们的去磁曲线的上边部分可以近似地认为是一条直线，如图 1.1.6 所示。只有当去磁磁场强度超过去磁曲线上的拐点  $K$  后才急剧下降。当永磁体在电动机的运行过程中所承受到的去磁磁场强度不起过拐点所对应的  $H_K$  数值时，回复线与去磁曲线的直线段相重合，这对电动机的设计和稳定运行都带来很大的好处。

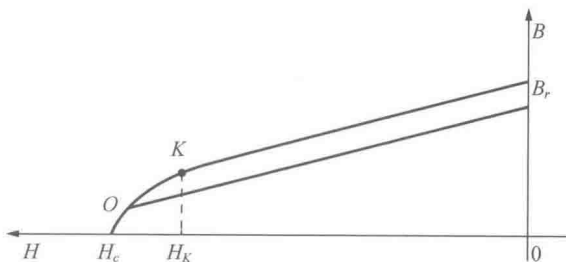


图 1.1.6 铁氧体和稀土永磁材料的去磁曲线和回复线

#### 1.1.4 本征去磁曲线 $J(H)$

方程式 (1-1-7) 描述了介质中的磁感应强度  $\vec{B}$ ，磁场强度  $\vec{H}$  和磁化强度  $\vec{J}$  之间的关系，即

$$\vec{B} = \mu_0 \vec{H} + \vec{J},$$

它可以被改写成下面的形式

$$\vec{J} = \vec{B} - \mu_0 \vec{H}. \quad (1-1-10)$$

由此，在已知去磁曲线  $B(H)$  的情况下，就可以求得与  $B(H)$  曲线上每一点的  $\vec{B}$  和  $\vec{H}$  值相对应的磁化强度  $\vec{J}$ ，并画出磁化强度与磁场强度之间的关系曲线  $J(H)$ ，如图 1.1.7 所示。曲线  $J(H)$  就被称为该永磁材料的本征去磁曲线，或被称为该永磁材料的内禀去磁曲线。当  $\vec{H}=0$  时， $J_r = B_r$ ；当  $\vec{J}=0$  时的  $H$  就被称