

Engineering Industry and Technics

磁钢设计与应用

Industrie Mécanique et Technipue

〔日〕牧野 昇編

きかいこうぎょうぎじゅつとしょ

Industrie und Technologie

Промышленности и Технике

机械工业出版社

四 版 原 序

“磁钢设计与应用”于1966年发行以来，在好评中已经再版了四次。现在几乎未看到其他有关磁钢方面的书籍，特别是关于磁钢设计和应用的专业书籍，可以说这是唯一的一本。

磁钢是一种功能材料，它构成电子设备和仪器仪表的重要零件，并影响其性能、磁特性的优劣和老化以及温度系数等特性，对设计者来说也是不可缺少的。最近，随着新技术的发展以及资源方面的原因，对主要永磁材料可以看出替换的苗头，同时，磁性能极高的特殊材料也正在出现。

在本书增印的时候，追补了前版之后新的进步。磁钢的基本设计思想不变，但把应用和材料方面的改进吸收进来了。

执笔者都是各界的专家，工作很繁忙，请求补笔却慷慨应诺，谨此致谢。

牧野 昇

1975年7月

译者的话

磁钢是一种功能材料，几乎遍及一切应用领域，随着永磁材料的迅速发展，其应用越来越受到人们的重视。

本书根据牧野 昇主编的《永久磁石——その設計と応用》1975年第四次修订版译出。全书分为设计、应用及资料三篇。设计篇阐述磁钢的特性以及铝镍钴磁钢和铁氧体磁钢的设计理论；应用篇介绍磁钢在收音机、电视机、通讯设备、电子器械、计测仪表、微电机中的应用，并通过实例讲述设计程序和方法；资料篇介绍磁钢的测试方法，收录了日、美、德、法等国的磁钢资料及其他各种图表。

本书有一定实用价值，可供从事电声、电信、电机、电子器械、测量仪表等研究、设计工作的技术人员参考，对磁性材料厂和研究所的技术人员有一定参考价值，也可供高等院校有关专业师生参考。

承蒙北京冶金试验厂牛照祥等有关同志审校，上海交通大学吴硕麟副教授在百忙中校阅了部分章节，谨在此表示谢意。

由于译者专业知识和外语水平有限，错误和不妥之处在所难免，恳请读者批评指正。

目 录

第一篇 设 计

第一章 现用磁钢及其特性	1
§ 1 总论	1
1. 磁钢的发展史	1
2. 磁钢应具备的特性	2
3. 磁钢的用途和功能	4
4. 磁钢工业的现状	6
5. 稀土钴磁钢	8
§ 2 永磁材料的特性	9
1. 实用磁钢的种类	9
2. 铝镍钴磁钢(MK 钢)	11
3. 铁氧体磁钢	19
4. 其他永磁材料	21
5. 按用途的选择方法	22
§ 3 磁钢的稳定性	23
1. 磁稳定性的基础	23
2. 内部因素引起的老化	26
3. 外部的去磁因素	29
§ 4 使用磁钢的注意事项	33
1. 尺寸和形状的限制	33
2. 磁化与消磁	35
第二章 铝镍钴磁钢的设计	37
§ 1 设计的基本态度	37
§ 2 通过具体例子进行分析	39

1. 磁棒	39
2. 扬声器磁路	39
3. 磁控管用磁钢	42
4. 吸引磁钢	46
5. 发电机用磁钢	50
第三章 钡铁氧体磁钢的设计	55
§ 1 钡铁氧体磁钢的特性	55
1. 历史	55
2. 钡铁氧体磁钢的制造	55
3. 钡铁氧体磁钢的特性	57
4. 磁稳定性	59
§ 2 钡铁氧体磁钢的设计	64
1. 单体磁钢的设计	64
2. 磁路设计的基础	66
3. 无回复或局部回复的场合	67
4. 完全回复的场合	73
5. 动态磁路的设计	78
§ 3 钡铁氧体磁钢的应用	78
1. 吸引用磁钢	79
2. 小型直流电动机	87
4. 小型发电机	92
4. 扬声器	93
5. 橡胶磁钢	96
§ 4 锶铁氧体磁钢	98
§ 5 锶铁氧体磁钢的设计	101
§ 6 SrM 直流电动机的设计	106
§ 7 铁氧体磁钢的今后动向	115

第二篇 应 用

第四章 在电视、收音机中的应用	118
------------------------------	------------

§ 1	工作原理	118
1.	电动式换能器	118
2.	电磁式换能器	119
§ 2	电动式扬声器	122
1.	扬声器的结构	122
2.	扬声器的性能和磁路	123
3.	磁路的设计	128
4.	使用铁氧体磁钢的扬声器	134
§ 3	耳机	137
§ 4	混响装置	139
§ 5	电视部件	140
1.	偏转畸变校正磁钢	140
2.	静聚焦磁钢	140
§ 6	新的磁钢及其应用	142
第五章 在通信设备中的应用		146
§ 1	在音响装置中的应用	146
1.	送话器	146
2.	受话器	149
3.	扬声器	152
4.	水下发射接收机	152
§ 2	振动计	153
§ 3	在录音机中的应用	154
1.	圆盘式录音机	154
2.	磁性录音机	155
3.	光学录音装置	156
§ 4	在电话信号机中的应用	157
1.	永磁发电机	157
2.	极化电铃	157
§ 5	在电磁继电器中的应用	159
1.	极化继电器	159

2. 自保式继电器	159
3. 笛簧接点管和笛簧继电器	161
4. 功率(大电流用)继电器	163
5. 限时继电器	164
第六章 在电子器械中的应用	167
§ 1 在电子显微镜中的应用	167
1. 电子透镜的励磁磁钢	167
2. 一级电子透镜系统及其特性	168
3. 二级电子透镜系统及其设计	168
4. 三级电子透镜系统及其特性	171
5. 焦距变化方式	172
6. 磁化	174
7. 典型电子透镜系统的构成	175
§ 2 在高性能理化仪器中的应用	178
§ 3 在电子管中的应用	180
1. 在磁控管中的应用	180
2. 在行波管中的应用	181
第七章 在测量仪器中的应用	185
§ 1 动圈式计量仪器	185
1. 使用范围	185
2. 气隙磁通所要求的条件	185
3. 永磁材料的选择	186
4. 磁路设计	187
5. 去磁 (Knock down)	188
6. 设计例	189
7. 磁钢结构的演变和目前趋势	190
§ 2 制动磁钢	193
§ 3 测量用发电机	194
1. 兆欧表	194

2. 转速表	194
§ 4 磁化	196
1. 关于磁化的一般注意事项	196
2. 磁化器	197
§ 5 其他应用例	200
1. 位移-电压变换器	201
2. 自动描笔式记录器	201
3. 马格诺螺旋 (Magnehelix)	203
4. 振簧式频率计	204
第八章 在电动机中的应用	206
§ 1 微型电动机的用途	206
§ 2 微型电动机的一般构造和原理	207
§ 3 电动机的设计	209
1. 主要尺寸的决定	209
2. 磁路结构和种类	211
3. 微型电动机磁路设计概要	214
§ 4 磁路的测定	215
1. 环状磁钢内部有效磁通的测定	215
2. 外部漏磁通的测定	216
3. 磁钢工作点的测定	217
4. 磁路的磁通分布及其测定	220
§ 5 微型电动机的磁化	224
§ 6 电动机的基本特性	227
1. 转矩	227
2. 转速	227
3. 性能曲线的表示法	228
§ 7 磁通量与电动机效率	230
第九章 在发电机中的应用	233
§ 1 概述	233

1. 永磁发电机的种类	233
2. 工作分析的程序	234
§ 2 电路分析	234
1. 等效电路	234
2. 电路电流	235
3. 电能与磁能的关系	238
4. 交流发电机的负载特性	239
§ 3 磁路分析	241
1. 动态永磁磁路的处理	241
2. 磁钢的工作分析	243
3. 电路与磁路的关联	247
§ 4 磁路设计	249
1. 磁路结构	249
2. 磁路设计上的问题	251
3. 设计、计算方法及其实例	254
4. 交流负载特性的计算	256

第三篇 资 料

第十章 试验与测定	262
§ 1 整个磁滞回线的测定方法	262
1. 利用电磁铁和磁通计的方法	262
2. 日本工业标准 (JIS) 的测定方法	271
3. 自记磁通计	272
4. 英国标准磁性测试仪	272
5. AEG 双轭法	274
§ 2 求磁滞回线上 1 点的方法	274
1. 矫顽力计	274
2. 抽拉磁通法	275
3. 利用制品磁路的方法	275

第十一章 磁钢的日本工业标准	277
§ 1 永磁材料 JIS C2502-1975	277
§ 2 磁钢试验方法 JIS C2501-1975	281
第十二章 美国的永磁材料	288
1. 磁特性	288
2. 成分及特性	290
3. 去磁曲线	292
第十三章 欧洲的永磁材料	295
§ 1 德国永磁材料标准 DIN	295
§ 2 法国的磁钢	298
第十四章 铝镍钴磁钢的状态图	300
第十五章 说明及换算表	301
1. 有关磁钢的符号说明	301
2. 磁钢单位对照表	302
3. 磁钢的单位换算表	302
4. 术语说明	303
第十六章 各种图表	308
1. 求磁导系数 (B/H) 的图表	308
2. 各向同性铁氧体磁钢的去磁曲线和小磁滞回线	314
3. 磁化	315
4. 扬声器磁路计算图	317

第一篇 设 计

第一章 现用磁钢及其特性

§ 1 总 论

1. 磁钢的发展史

日本对磁性的研究是卓有成效的。在有关磁性的基础物性研究方面，有长冈半太郎、本多光太郎、茂诚司等著名学者，他们为强磁性材料理论的发展做出了很大贡献。可是，从磁钢的发展史看，自磁钢初期产品的碳素钢发展到现在高强度磁钢，应该指出三位伟大的发明家。

首先是 KS 钢的发明者——本多光太郎及其合作者。这种磁钢系高钴碳素钢，发明于 1917 年，与当时一般使用的铬钢和钨钢相比较，矫顽力达到 4 倍以上，磁性能取得了飞跃进步。这是堪称当时世界十大发明的头等发明，为显著提高电气仪表精度起过重要作用。

其次是加藤与五郎及其合作者，他们开发了与陶磁器有相同氧化物的磁性材料这一独创性领域。氧化物磁钢发明于 1931 年，作为 OP 磁钢，最初研制出的是钴铁氧体磁钢。高导磁率材料以铁氧体磁心投入工业生产，为现在畅销铁氧体磁钢奠定了基础。

最后是三岛德七，他为磁钢引入了析出硬化这种崭新的表面硬化原理，成功地获得了划时代的磁性。于 1932 年发

明的这种磁钢系铁镍铝合金，命名为MK钢，包括现在添加钴、铜、钛等元素而被改进的磁钢在内，它在世界上居磁钢的首位，作为优质磁钢，质和量都超过其他磁钢。

现在统称为铝镍钴合金(Alnico)，大大推动了相关工业的发展。

回顾过去，再看现在，在这十年前后，曾发现过几种新型磁钢。例如，各向异性铝镍钴磁钢、钡铁氧体磁钢、ESD磁钢（粉末磁钢）等，都相继投入生产，这些磁钢是荷兰、法国和美国研制出来的。

2. 磁钢应具备的特性

为了在外界建立强磁场，可采用磁钢。尺寸尽量小而有强磁能者称为优质磁钢。

这里假定把两根棒置于磁场中，一根是永磁材料，另一根是纯铁。然后除去磁场进行比较，发现前者还有很强磁性，后者几乎无磁。这是什么原因呢？

这是因为，强磁性材料棒置于磁场中，就在两端产生了N与S磁极，如图1.1上部所示。必然产生一个从N极指向S极的磁场，该磁场从N极放射到周围，也有一部分贯穿磁钢内部。在这种情况下，磁场是减弱磁化的自去磁场，因此，强磁性材料棒被自去磁场退磁。纯铁棒磁畴容易移动，被自去磁场退磁，磁性失尽。但磁钢能够抗拒去磁场，磁畴仍坚持最初方向。假如把磁钢做成马蹄形，如图1.1下部所示，则从N极到S极的去磁磁势在相对的空间流动，使磁钢去磁的磁场因迂回而减弱，使用弱的磁钢也就足够了。

磁性材料的磁性状态，一般用 $B-H$ 曲线来表征，分别以磁场强度 H 和由磁场强度在磁性材料中产生的磁通密度

B 作为横轴及纵轴。

假设首先磁化到饱和之后，使磁场强度降到零，则材料的磁通密度等于 B_r （剩余磁通密度），如图 1.2 a) 所示。随后放在一个反向磁场上，则磁通密度经过 D' 点而变成零。这时的去磁场强度 H_c 称为矫顽力（也叫做顽磁力）。矫顽力是一种阻力大小的标准，它反抗减弱磁钢磁通的去磁场并企图保持磁通密度不变。

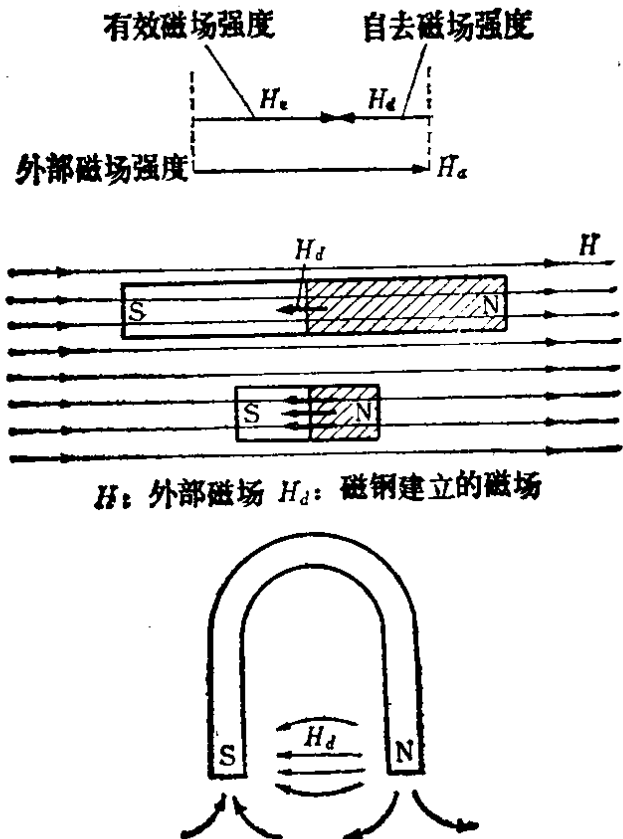


图 1.1 磁钢的去磁场与形状的关系
(去磁场在负方向起作用，即使磁钢的磁化强度减弱也指向正方向)

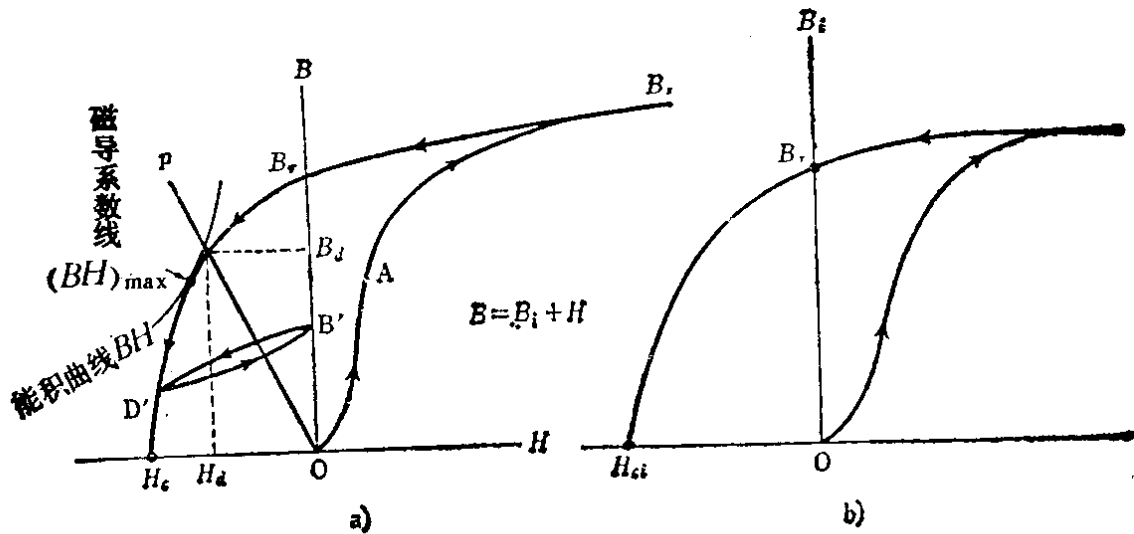


图 1.2 磁化曲线 (OAB_s) 与去磁曲线 ($B_r D' H_c$)
a) $B-H$ 曲线 b) B_i-H 曲线

N 与 S 磁极间距离短者, 即尺寸比 (长度/直径) 越小, 自去磁场就越大。要想减小磁钢的尺寸, 缩短长度, 又要保持强磁性, 先决条件是矫顽力要高。换句话说, 所谓磁钢, 就是矫顽力高的材料。

磁钢的性能, 当然不只是受矫顽力影响。如果说得更正确些, 由于为外界贮备的磁能是与 B 和 H 之积成比例, 所以还必须考虑剩余磁通密度和去磁曲线的张角是否适当。

去磁曲线除了图 1.2 a) 所示的 $B-H$ 曲线之外, 也可以使用 B_i-H 曲线。这条曲线纵轴以 $B_i = 4\pi I = B - H$ (I : 磁化强度) 来表示, 是扣除磁场强度 H 的“真磁通密度”, 仅用于物理或理论研究的场合。图 1.2b) 是 B_i-H 曲线, H_{ci} 是磁化强度等于零时的磁场强度, 必定有 $H_{ci} > H_c$, 工业上通常用 H_c 来讨论。

一般世界通用的磁钢特性都以 B_r 、 H_c 、 $(BH)_{\max}$ 来表征。在日本工业标准中, 只规定 B_r 、 H_c , 而 $(BH)_{\max}$ 作为参考值。其理由是, 因为早期磁钢是各向同性的, 如果知道了 B_r 和 H_c , 则 $(BH)_{\max}$ 就大体决定了。

可是, 最近几乎都使用磁各向异性材料, 去磁曲线的凸度各不相同, 所以有必要指出 $(BH)_{\max}$ 。日本工业标准也按照这条线于 1966 年做了修正。

$(BH)_{\max}$ 点之值表明该磁钢每单位体积为外部所能提供的最大磁能。

此外, 从去磁曲线上的点——例如 图 1.2 a) 的 D' 点, 在除掉磁场再回到原方向时, 将遵循着“小磁滞回线”, 以不回到去磁曲线上的 $D'B'$ 表示。其斜率系可逆导磁率 (μ_r), 对动态运行磁路的设计是一个重要的参数。

3. 磁钢的用途和功能

磁钢是用来建立磁场的材料。在建立磁场这一点上，它和线圈一样。但磁钢的一大优点是，调换其位置并不需要从外部通以电流，因此无能量损耗，而且小型，磁场也稳定。

应用磁钢必须利用换能器，以便把一种能量转换为其他能量。须注意，这时的磁钢并不消耗本身的能量。

现在，我们列举见得最多的用途，并说明其功能。

第一，把电能转变为机械能。应用如下作用原理，即将通电导体置于磁场中，导体上就会产生机械力，根据夫累铭左手定则，力的方向与磁场及电流方向垂直。其典型用例是收音机的扬声器。与此同样的原理被应用于检流计、电流电压表、曝光表、电动机、磁控管、阴极射线管等等。

第二，把机械能转变为电能。其原理是，与电路交链的磁通量发生变化时，或导体在磁场中移动时，导体中将产生电动势。其中最明显的例子便是自行车发电灯。与此相似的原理被应用于点火机（电磁式）、扩音器、拾音器、电话用送话器及各种点火装置等。

第三，把一种机械能转变为其他机械能。这是应用磁钢吸引或排斥其他强磁性材料和磁钢的原理。

最普通的用途是利用磁钢去吸附铁磁性材料，例如，主要有电磁吸盘，还有电磁输送带、磁选机、磁性过滤器等。

此外，应用磁钢和强磁性材料或磁场在空间隔开而能互相吸引的作用原理，使恒温器、瞬动开关、电池钟等的弹簧进行工作，也用于把两块磁钢对置来传递力的流量计、粘度计、水位指示器、混合器等。

第四，利用其他各种物理现象。大家所熟知的指南针就是应用磁钢的指北性。阻碍磁钢与导体相对位移的涡流作用，被用于家庭厨房里电度表转盘的制动和速度计的转子，也

可以利用磁滞现象来制造磁滞式电动机等。这样说来，电磁作用就是为了阻碍变化而通以电流，发电机的情况也是如此。在这个意义上，可以说电磁现象总是企图维持现状。

磁钢的这些主要应用原理及基本计算公式汇总于表 1.1，并列举其实例。

4. 磁钢工业的现状[⊖]

日本的磁钢工业，随着收音机、电视机和测量仪器的需要量增加而迅速发展，现在仅次于美国，居世界第二位。

月产量，铸造磁钢约 450 吨，铁氧体磁钢超过 100 吨。可锻磁钢极少，冷轧钕铁钴磁钢和铜镍铁磁钢更微。

日本的磁钢生产厂家，可分为三大集团。即住友集团（住友特殊金属公司、新光磁钢公司）、三菱集团（三菱制钢公司、日本特殊钢公司、日本磁钢公司、三菱电机公司、三菱金属公司）和日立集团（日立金属公司），这三大集团约占日本永磁材料产量的 80% 左右。

国外磁钢工业情况根据笔者视察国外磁钢工业，看到了如下事实。

首先，美国磁钢产量约为日本的二倍，但大厂家的因得阿纳斯基尔公司和瑟内拉叶列库特利库公司的磁钢工厂，其规模与日本大厂家相差无几，生产品种也相类似，铸造铝镍钴磁钢为主，约占 80%，钕铁氧体磁钢次之，超过 10%。烧结铝镍钴磁钢的产量只有百分之几，但铜镍铁永磁合金和钕铁钴磁钢用得更多，比率比日本超过 1 位数。

在欧洲，德国磁钢工业的特点最明显。钕铁氧体磁钢产量约占 50%，剩下的是烧结铝镍钴磁钢占 25%。在日本和美国占绝对优势的铸造铝镍钴磁钢不过占 20%。一般认为烧结

⊖ 1966 年当时的情况。

表 1.1 磁钢的功能和实例 (J. E. Gould 及其他)

功 能	原 理	基本公式	实 例
电能转变为机械能	电流与正交磁通之间的力	$力 = BI\Delta l / 10$ (达因)	扬声器、振动式发电机、动圈式仪表、电动机、电磁泵、磁控管、TV 管、分光镜、电子显微镜
机械能转变为电能	与磁通相交的导体上感生电压	$电压 = N d\phi / dt \times 10^{-8}$ (伏特)	发电机、永磁发电机、转速表、动圈式及铝带式话筒
机械能的转换 (吸引、有向性吸附、排斥)	力矩与磁场之间的转矩	$转矩 = VmJH \sin\theta$ (达因·厘米)	罗盘、高斯计、内磁式仪表、电车控制、驱动装置、搅拌机
	力矩与磁场之间的力	$力 = Vm JdH/dx$ (达因)	仪表架、叉齿
	磁钢与铁之间的吸引力	$力 = B_g^2 Ag / 8\pi$ (达因)	电磁吸盘、夹具、输送机、继电器、瞬动开关、玩具、电话听筒、活塞泵
	磁钢与铁粉之间的吸引力	$力 = Vp KHedH/dx$ (达因)	分选机、过滤器
应用其他物理现象	阻止磁场中导电盘移动的力	$力 = \alpha B_g^2 AgvS/\rho$ (达因)	电度表、速度表、功率计、涡流驱动装置
	磁钢在局部或脉动磁化下工作	—	磁滞电动机、磁滞驱动、磁力记录、计算机、存贮装置

注: Vm : 磁钢体积(厘米³) Vp : 粒子体积(厘米³) Ag : 气隙面积 (厘米²) Δl : 零件长度(厘米) S : 盘厚(厘米) v : 盘的速度(厘米/秒) I : 电流(安) : 导体数 ρ : 电阻系数(欧·厘米) B_g : 气隙磁通密度(高斯) H : 磁场强度(奥斯特) He : 有效磁场强度 (奥斯特) ϕ : 磁通 (麦克斯韦) J : 磁化强度 $(B-H)/4\pi$ K : 体积磁化率 J/H