

永磁理论与技术及其 在油田中的应用

周存忠 曹毓娟 李周 编著

工业出版社

登录号	087513
分类号	TE34
种次号	024

永磁理论与技术 及其在油田中的应用

周存志 曹毓娟 李 周 编著



200422006



石油工业出版社

(京)新登字082号

内 容 提 要

本书是石油工业第一本系统介绍永磁理论、各种永磁材料的性能特征、磁路设计原则、常用公式、系数、计算方法和永磁技术在油田应用中一些机理的著作。书中列举了油田应用永磁材料性能的测量技术。

本书主要供在石油工业领域从事研究和应用磁技术的工程技术人员和管理人员阅读，也可提供从事磁技术应用的高级工人参考。

永磁理论与技术 及其在油田中的应用

周存忠 曹毓娟 李 周 编著

*

石油工业出版社出版
(北京安定门外安华里二区一号楼)
北京通县印刷厂排版印刷
新华书店北京发行所发行

*

850×1168毫米32开本 14¹/₂印张 2插页 383千字 印1-3000

1994年6月北京第1版 1994年6月北京第1次印刷

ISBN 7-5021-0851-8/TE·796

定价：13.40元

前 言

永磁材料已经成为现代科学技术及工业中的基础材料之一。它的品种繁多、性能各异，广泛用于各类永磁电机、电声器件、仪表、磁力机械、磁性轴承和磁悬浮系统、高能粒子束和电真空器件、磁控、电镀、磁选机、医疗和环保等诸多方面。

自七十年代以来，世界永磁体的产量迅速增加，应用范围日益扩大，尤其在能源的开发和有效利用方面，起到了相当重要的作用。进入八十年代，出现了高性能的永磁材料，使永磁理论与技术又一次获得了突飞猛进的发展。

随着磁技术在石油工业中的不断应用，在这一新领域中工作的众多的工人、科技人员和管理干部，都渴望了解这方面的知识。本书将是满足这种需求的第一部专著。

本书第一章首先概括地介绍了永磁材料的发展简史、应用和物质磁性的基本概念。第二章着重阐述磁畴理论及矫顽力机理，可使读者对永磁理论有个较系统的了解。第三章主要介绍永磁铁氧体、稀土钴、铝镍钴、钕铁硼、复合及粘结等永磁材料的物理特性。第四章比较系统地介绍了常用永磁材料的制造工艺与技术。便于读者从使用的角度，对永磁体的制造、加工等有一个基本的认识。第五章系统介绍磁路的类型、磁路设计、磁路分析以及充磁、退磁和磁性测量技术。本章的内容新颖，可供读者对应用和设计各种磁化器件，掌握必备的知识和技能。第六章列举了永磁技术在油田应用的各种实例，对应用中的一些理论问题，进行了较为深入的分析和探讨。

本书由周存忠研究员、曹毓娟高级工程师和李周研究员共同编写。成都传感换能技术研究所的窦志强工程师帮助校核全文，谢军、张璐、邓艳、张蕾等同志协助完成插图和誊抄工作。

在本书编写过程中，曾得到中国科学院成都分院院长高福晖、成都地质学院石油地质学教授童崇光(博士生导师)、玉门石油管理局总工程师翟树仁、中原石油勘探局总工程师纪树培等的热情指导和支持；本书中有的数据、插图引自冶金部钢铁研究总院、北京冶金研究所、西南应用磁学研究所、大庆石油管理局等单位有关同志所写的文章和研究报告，对此，在这里一并表示衷心的感谢。

由于编者水平所限，书中定有不少不妥之处，欢迎指正。

目 录

第一章 永磁材料	(1)
第一节 永磁材料发展简史.....	(1)
第二节 永磁材料的应用.....	(6)
第三节 物质磁性及其主要参数.....	(10)
第二章 磁畴理论及矫顽力机理	(15)
第一节 单畴理论.....	(15)
第二节 不稳态分解.....	(25)
第三节 矫顽力的新理论.....	(29)
第三章 各种永磁材料的特性	(43)
第一节 永磁材料的分类及其派生规律.....	(44)
第二节 永磁铁氧体.....	(48)
第三节 稀土钴永磁.....	(72)
第四节 铝镍钴永磁.....	(91)
第五节 钕铁硼永磁.....	(128)
第六节 复合永磁材料.....	(194)
第七节 其它永磁材料.....	(217)
第四章 永磁材料的制造技术	(234)
第一节 永磁铁氧体的制造.....	(234)
第二节 铝镍钴永磁的制造.....	(246)
第三节 铁铬钴永磁合金的制造.....	(257)
第四节 稀土钴永磁合金的制造.....	(261)
第五节 钕铁硼永磁的制造.....	(280)
第六节 复合永磁-粘结永磁的制造.....	(295)
第五章 磁路及其设计原则	(302)
第一节 磁路的基本类型.....	(302)
第二节 磁路设计基础.....	(307)
第三节 基本磁路分析.....	(332)

第四节	实用磁路分析·····	(355)
第五节	磁体尺寸、性能与气隙间的关系·····	(380)
第六节	磁路设计的线性叠加原理·····	(389)
第七节	充磁、退磁和磁性测量技术·····	(394)
第六章	永磁技术在油田中的应用·····	(404)
第一节	应用情况综述·····	(404)
第二节	强磁防蜡技术·····	(408)
第三节	磁场处理降粘与防蜡的机理分析·····	(419)
第四节	磁化处理后水系性质的变化·····	(425)
第五节	其它应用·····	(441)
附录	电磁学国际单位制的换算和使用·····	(447)
参考文献	·····	(454)

第一章 永磁材料

第一节 永磁材料发展简史

永磁材料的原始形态，就是民间俗称的“吸铁石”。永磁材料是磁性材料中的一个重要分支。由永磁材料制成的永磁体经过充磁以后，能在其周围空间建立一个静磁场。

人们对磁现象和永磁材料的认识，由来已久。在人类历史的早期，我们的祖先已经懂得将天然磁铁矿(Fe_3O_4)当做磁石，磨制成指南针。进入铁器时代以后，人们虽然逐渐学会了将碳钢淬火做成永磁体，但由于没有电流充磁器，而只能凭借地球磁场或天然磁石对永磁体充磁，所以永磁材料依然长期处于极其缓慢的发展状态中。

随着电流的发现和电磁感应定律的广泛应用，永磁材料得到了迅速发展，人们首先对碳钢进行仔细研究，制成的永磁材料为含碳量1~1.5%的高碳钢。例如法国物理学家居里夫人，对钼钢淬火后的磁性曾作了详细研究，于1898年在法国《工程促进会报》发表《淬硬钢的磁性》一文，指出淬火钼钢具有高矫顽力(表1—1)。

接着在1900年发现了钨钢，其磁能积达到 2.7kJ/m^3 。又过了十几年，1917年发现了钴钢，其磁能积达到 7.2kJ/m^3 。本世纪三十年代，铝镍钴磁钢问世，起初磁能积仅有 14.3kJ/m^3 ，后来由于在磁控管雷达系统应用的推动下，晶粒定向的铝镍钴磁钢很快被创制出来，磁能积逐渐跃升到 39.8kJ/m^3 。同期，有许多研究者进行了铝镍钴磁场冷却实验，其中最有成就的人为乔纳斯(Jonas)。他和他的同事在荷兰菲利普斯工厂的实验室进行了这一研究，他们调整合金成份，找出在磁场冷却后，把磁能积从

表 1—1 铝钢淬火后的磁性

试件	化学成份(%)		淬火温度 (℃) (水淬)	剩磁值 Br (mT)	矫顽力 H_c (kA/m)	$Br \times H_c$ (kJ/m ³)
	Mo	C				
A	3.48	0.5	850	670	4.8	3.2
B	4.05	1.24	800	600	6.5	3.9
B	4.05	1.24	800	670	6.8	4.6
C	3.90	1.72	700	600	5.8	3.5
C	3.90	1.72	830	620	6.3	3.9
C	3.90	1.72	800	700	6.2	4.3

11.1~15.9kJ/m³提高到35.8~41.4kJ/m³的技术和方法,这一实验是对磁性材料发展做出的突出贡献。从此以后,铝镍钴磁钢在永磁领域中占据了统治地位,并且一直保持到七十年代。在这四十余年内,人们又陆续发明了永磁铁氧体、铁钴微粉永磁体、铂钴永磁体、锰铋永磁体、锰铝碳永磁体、铁铬钴永磁体和稀土钴永磁体等,使永磁材料开始出现了一个相当兴旺的“大家族”。

钕铁氧体($BaO \cdot 6Fe_2O_3$)和锶铁氧体($SrO \cdot 6Fe_2O_3$)均于本世纪三十年代发现,并分别在本世纪五十和六十年代达到31.8kJ/m³的磁能积水平。由于原料易得,工艺不难,性能适中,综合效果不错,所以在七十年代得到迅速发展。至八十年代初,在永磁领域中,它们的总产量仍占据第一位,超过总产量的90%。

铁钴微粉永磁体的制造工艺较复杂,并且磁能积远低于理论值,使其应用受到限制。

铂钴永磁体属于贵金属合金材料,磁能积可达79.6kJ/m³以上,矫顽力高,不易退磁,极耐腐蚀,有良好的延展性。所以虽然价格贵,但仍然有一定的用处。

锰铋合金和锰铝合金,都是由两种非铁磁性元素合成的永磁材料,这在理论上是极有意义的,因此它们在五、六十年代曾吸引了许多人的注意。锰铋永磁材料由于腐蚀问题不易解决,所以至

今未能投入应用。在锰铝两元素中加入少量的碳，辅之以适当的中温挤压，已成功地生产出各向异性的永磁棒材。由于中温挤压工艺成本较高，所以成品的价格仍然偏高，使应用受到一定限制。

铁铬钴永磁体的磁性能不亚于铝镍钴，有韧性，可切削加工。铁铬钴作为永磁材料发现得比铝镍钴早，但由于它对工艺比较敏感，制备时所需的工艺条件比较严格，所以直到七十年代末才得到大量的应用。

稀土钴永磁是永磁材料中的后起之秀。它是稀土元素和铁元素构成的一系列金属间化合物。自第一个实用的稀土钴永磁体于六十年代中期间世以来，短短的十多年间，磁能积突破 $240\text{kJ}/\text{m}^3$ ，逼近 $320\text{kJ}/\text{m}^3$ ，矫顽力高达 $800\text{kA}/\text{m}$ 以上，剩磁的温度系数在正、负零之间可任意调节。显然，这是一类相当理想的永磁材料。但由于它的价格较贵，且钴为稀缺资源，因此限制了它的应用。在合理设计条件下，与铝镍钴相比，稀土钴永磁不仅技术性能优异，而且经济效果亦可。随着人们对稀土永磁的广泛研究和应用，使永磁材料的发展又达到了一个新的阶段，出现突破性进展。

1983年11月，日本住友特种金属公司，在匹兹堡召开的国际磁学会议上，正式宣布研制成功一种新型钕铁硼永磁材料，并已将磁能积为 $279\text{kJ}/\text{m}^3$ 的产品投入商业生产。与此同时，美国通用汽车公司也宣布采用快速淬冷法，制成铁钕硼永磁体。这一引人注目的成果，立即引起了国际磁学界和商业界的极大重视。一些报道和评论，称此为“引起轰动的突破”，认为“这种材料将作为起点，其发展将具有巨大的潜力”。世界各国主要永磁制造商和研究机构，纷纷制定自己的研究发展计划，很短时间内便形成了在世界范围内对钕铁硼的广泛研究。目前，实验室条件下已制成磁能积达 $402.7\text{kJ}/\text{m}^3$ 以上的钕铁硼永磁体。全世界年产量已达上千吨。人们把这种永磁体称为“永磁之王”，它已是取代铁氧体永磁成为目前应用最广泛的一类永磁材料。

中国科学院物理所和电子所，在长期从事钕铁硼合金和稀土

永磁的基础上，共同合作，于1984年2月研制成磁能积达 $302\text{kJ}/\text{m}^3$ 的钕铁硼永磁材料。接着又于同年5月，以低纯钕稀土为原料，制成磁能积达 $326\text{kJ}/\text{m}^3$ 的永磁体。与此同时，我国一些研究机构，如包头冶金研究所、北京钢铁研究院、北京钢铁学院以及有色金属研究院等，也先后宣布研究成功这种高性能磁体^[1]。这些成果，标志着我国钕铁硼永磁的研究和生产，进入了世界先进国家的行列。

钕铁硼永磁材料之所以引起人们极大兴趣，其主要原因是：第一，它是迄今为止所发现的永磁材料中磁性最强的一种，最大磁能积已达到 $406\text{kJ}/\text{m}^3$ 。从表1—2可见，钕铁硼的磁能积是铁氧体的10倍，比钐钴永磁至少高1/3。由于这一特点，使它成为制造高性能、小体积、轻重量磁性器件的最好材料。第二，以铁取代了昂贵的钴，有利于降低成本，使广泛应用成为可能。第三，以钕代钐，不仅价格可以大幅度降低，而且原料来源丰富，使大规模生产稀土永磁易于实现。据1985年3月在美国加利福尼亚州召开的国际钕铁硼会议上，分析钕铁硼永磁体的潜在市场，估计1990年世界产量将达到3000吨，十年后将超过6000吨，达到永磁材料总产量的40%以上。

表1—2 几种常用永磁材料磁性能比较

材料 \ 性能	剩磁 (mT)	矫顽力 (kA/m)	磁能积 (kJ/m ³)	备 注
铁氧体	420~440	167~199	32~36	
钕钴-72	105	11	72	
钐钴(1:5)	980~1050	716~796	207~215	日立金属H-26A商品
钐钴(2:17)	1040~1100	438~557	207~239	日立金属H-27商品
钕铁硼	1200~1250	597~875	302~326	中国科学院制品

当然，任何一种新材料都不可能是完美的，钕铁硼也如此。目前，其居里温度较低，高温使用受到一定限制；价格还偏高，在

短期内取代铁氧体还有一定困难。但是，由于钕铁硼永磁体所具有的突出优点，随着今后不断提高性能，它将成为主要的永磁材料并大规模进入市场，这将是毫无疑义的。

图 1—1 表示出自 1880 年以来永磁材料性能随年份的增长概况。由图可见，磁能积的增长实际上是矫顽力提高的结果。因为剩磁从碳钢开始就达到 1T 左右了，这一百多年来，并无太多的增长，而矫顽力却从几个 kA/m 增至 800 kA/m 以上，增加了

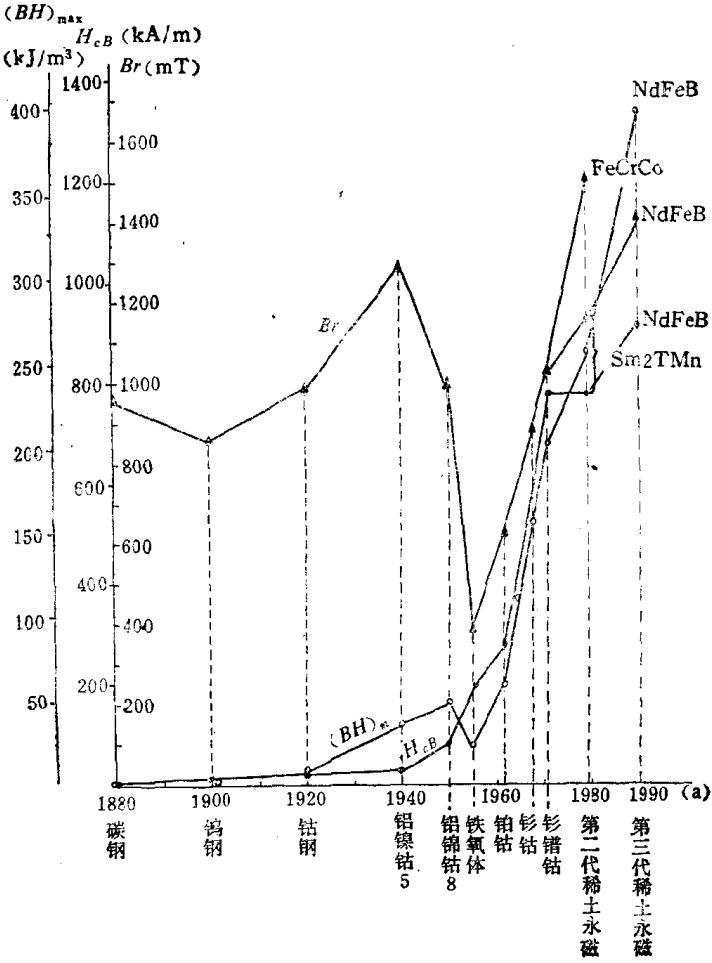


图 1—1 永磁材料的发展概况

二百多倍。1940年以后，永磁材料在品种和质量两方面的发展显著加快，尤其是矫顽力近似呈抛物线加速提高。其原因主要在于：

(1) 从理论上认识到磁性晶体内部的各种各向异性对矫顽力具有决定性影响；

(2) 电子自动控制系统的发展，逐步改变了永磁制造业中粗糙的工艺规范，实现了对各工艺环节比较精确地控制。自七十年代以后，由于科学技术各方面迅猛发展，出现了第二代和第三代稀土永磁，使永磁材料的性能提高到一个新水平，产生了突破性进展。完全可以预计，在不久的将来，还会有性能更优异的永磁材料出现，它将使电子工业、国防、化工、医疗、仪器制造、电机等产品发生重大变革，产生深远影响。

第二节 永磁材料的应用

我国是世界上最早把永磁材料应用于生产、生活、国防的国家和民族。众所周知，闻名于世的四大发明之一——指南针，就是用天然磁铁矿磨制而成的。我国古书中还有“慈石召铁”（即永磁体吸引铁）的记载。李时珍在《本草纲目》中，把永磁体作为治疗某些疾病的药物。时至现代，永磁材料已成为各部门、各个领域不可缺少的重要材料，其用量已常作为一个国家工业化程度，特别是电子工业发展水平的重要标志之一。

2.1 永磁材料产量迅猛增长

能量开发和有效利用是人类长期的重大战略任务。除能量而外，别的东西都可以再生，再生过程中要消耗能量，所以能量的开发和利用极为重要。用永磁体在空间建立一个磁场，除了制造该永磁体时消耗掉一定的能量外，在长期使用过程中就不再另外消耗能量了。显然，这是永磁材料的一大突出优点。近几年来，随着人们对能源问题重要性的认识日益深化，尽量利用永磁体以节省电能，已成为许多设计工作中的原则。世界各国永磁体生产量增长很快，近十年即增长一倍以上（表1—3）。

表 1—3 各国永磁体产量增长的统计和估计^[3](t/a)

国 家 或 地 区	1975年 产量	1980年 产量	1985年 产量	1990年 产量	1995年 产量
加 拿 大	1800	2500	3000	4000	5200
美 国	55000	60000	75000	95000	125000
墨 西 哥	/	600	2000	3500	5500
巴 西	6000	10000	12000	15000	25000
阿 根 廷	400	800	2000	3000	4500
智 利	100	200	300	600	900
英 国	4600	5200	8000	10000	14000
西 班 牙	800	1300	2000	3000	4500
法 国	6000	10000	12000	13500	15500
原 西 德	7000	9000	11500	12500	15400
意 大 利	8000	13000	16000	20000	25000
荷 兰	1200	2000	2000	2500	3000
原南斯拉夫	200	400	1000	1600	2200
保 加 利 亚	100	500	1000	1200	1800
罗 马 尼 亚	200	600	1200	1500	1900
匈 牙 利	400	600	1000	1500	2200
原 捷 克	1800	2000	2500	3000	3600
波 兰	1500	2000	3000	4000	5200
东 德	8000	16000	14000	16000	20000
原 苏 联	15000	20000	26000	36000	35000
埃 及	/	200	400	1500	1900
南 非	200	400	600	1000	1600
中 国 (大陆)	4000	5500	10000	20000	32000
日 本	45000	55000	70000	85000	105000
印 度	600	1000	4000	6000	9000
印 度 尼 西 亚	500	1000	1500	2500	4000
菲 律 宾	300	500	1000	1500	2200
澳 大 利 亚	300	400	800	1200	1700
土 耳 其	/	200	800	1000	1300
以 色 列	/	300	400	600	900
伊 朗	/	200	1000	1500	2200
韩 国	1500	4000	5000	6000	7200
朝鲜民主主义人民共和国	300	1000	1500	2000	2500
中 国 台 湾 省	1000	4000	5000	6000	7200
世 界 产 量	171800	225700	300500	382200	493900

2.2 永磁应用的广泛性

永磁体的应用领域越来越广泛，不但用于仪器、仪表、自动化控制、计算机、电声等方面，而且是家用电器、电动机、发电机、磁悬浮轴承、微波器件、粒子加速器、生物医学工程以及石油、化工、交通车辆等方面不可缺少的基本材料之一，使用量不断扩大。

被人们称为“第三代永磁”的钕铁硼出现以后，更加扩大了永磁材料的应用领域。根据世界永磁行业的资料，分析预测钕铁硼永磁的应用前景，仅西方诸国，年用量将达到2000余吨(表1—4)。

表 1—4 西方市场1990~1995年对NdFeB需求的预测

项 目	市场分额%								总计 (t/a)
	民用	工业	医疗	办公室	通讯	试验	计程	运输	
电 机	10	65		15			10		960
音响传感器	85			5			10		400
核 磁 共 振		5	90			5			400
磁 悬 浮		5					95		60
制 动 器		33		45			10	10	120
握 持 器	10	50	20	10				10	100
打 印 机				100					20
轴承/耦合		90		5			10		35
发 动 机		10					70	20	1
分 离 设 备	14	85	1						7
波 束 控 制		10				40	50		7
变换传感器	40			60					15
微 波					80	10	10		1
变 压 器		80		20					1
开关/继电器		60		20	10			10	5
传 感 器		20		20		50	10		1
用量(t/a)	433	770	300	260	90	25	116	120	2133

2.3 永磁应用的重要性

在人类的各种活动中,大量能量消耗在克服摩擦力做功上。尽量使摩擦力减少,一直是人们注重研究的方向。随着永磁材料矫顽力不断提高,现在可以利用永磁体之间的排斥力和吸引力,做成各种磁悬浮系统。如果把系统中的空气抽去,则摩擦力几乎接近于零。磁性轴承不仅摩擦力极小,而且不必加润滑油,所以没有污染,极其干净。在空间技术、交通运输、机电仪表等方面,磁悬浮系统必不可少,永磁体的使用已是其它材料无法替代的了。

利用磁力来分离不同磁化率物质的永磁分离技术,在七、八十年代有了很大发展。各种永磁分离装置,一般都是由永磁体提供磁化场(H),再利用一些巧妙的构造形成极高的磁场梯度(dH/dZ),广泛用于选矿、净化污水和空气、垃圾分选等方面。

磁场能穿透非超导态的各种物体。磁场对于磁矩的作用不必通过物体间的直接接触。这样,在磁性传动器的主动部件与被动部件之间,可以有一定的间隔。磁性传动器里所用的永磁体矫顽力越高,这个间隔可以越大。于是可以利用磁性传动器在密封系统外面来控制里面的操作,使操作过程中系统能够保持完全的密闭性。磁性传动器可做成多种形式,广泛应用于原子能工业、石化工业和其它领域,可以有效的保护环境和操作人员的安全。

在现代科学技术中,经常要利用电子束、离子束、质子束等带电粒子束。由于同性电荷之间静电斥力的作用,带电粒子束要散开(散焦),运动中的带电粒子在磁场中受到洛伦兹力的作用,恰当地配备一个静磁场,就能够控制带电粒子束的路径,所以永磁材料被广泛用于行波管、质子加速器和阴极溅射系统中。

此外,磁场能够改变分子、原子中电子和原子核的能级,由此做成的永磁防蜡器、防垢器等器件,在石油、化工生产中起到了意想不到的作用。磁场能使光的偏振面发生旋转,磁场与物质中一系列共振频率有确定的数量关系……。只要人们需要恒定磁场,就可以利用永磁体。

不论在理论上，还是在实践中，都已经证明，利用永磁体能够取得的主要效果是：节省能量，节约能源；结构简化，易于保养维修。永磁体的应用非常广泛，且相当重要。

第三节 物质磁性及其主要参数

一个永磁体总有两个极：N（北）极和S（南）极。这两个极不可分离，不能独立存在。到目前为止，还没有一个办法能把一块永磁体的N极和S极分别孤立起来，也没有发现单独存在的N极和S极。

电流*i*通过面积*A*的导体四周，其作用与一个小永磁体相像（图1—2）。磁矩 $\vec{m} = i\vec{A}$ 。这就是电流的磁效应，为瑞典人奥斯特于1820年所发现。若干年后，安培提出分子电流的假设来解释永磁体。如图1—3所示，在永磁体中存在着许多微小的*i*和*A*均相等的分子电流，其中只有永磁体边缘处的分子电流才未互相抵消。这些未抵消的分子电流相当于在永磁体的侧面有电流在永久地无阻滞的流动着，这样就产生了N极和S极。



图1—2

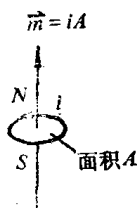


图1—3

随着科学技术的发展，人们在本世纪的许多实验中，认识到磁性与基本粒子的自旋紧密相联系，并以下列严格的数字式表达：

$$\mu_s^z = \pm \frac{e}{mc} \sigma_z \quad (1-1)$$

式中 μ_s^z ——基本粒子的自旋磁矩在*z*方向的投影；

e——基本粒子的电荷；

m——基本粒子的静止质量；