

摘 要

作为国家“十五”科技攻关计划“稀土永磁材料在高性能电机应用的共性关键技术”中的一个重要子课题，本课题对钕铁硼（NdFeB）永磁材料热稳定性的快速检测方法进行了逐步的探讨和研究，以期待开发出适用于电机用烧结 NdFeB 永磁材料热稳定性的快速检测方法及装置。

概括起来，本文的内容可分为以下几部分：

第一部分是根据烧结 NdFeB 材料的 IEC 标准和中国国家标准，结合收集到的中国有一定代表性的二十个材料厂家生产的近 200 块电机用烧结 NdFeB 永磁体常温和高温下磁性能参数的测量，对其热稳定性进行了分析，得出国产 SH 系列烧结 NdFeB 永磁材料热稳定性的性能结论。

第二部分是在对原有检测系统 NIM-10000H 进行分析和研究的基础上，逐步摸索出施加退磁电流的方法和实测磁通的快速检测方法，并设计出实验用的装置，加以实验验证是否可行，是否能达到快速检测，最终给出初步的结论，该方法可行，只是速度还不够快，而且电流大小的确定还有待进一步的研究和完善。

第三部分改变了传统的检测方法，即不用施加退磁电流，而是通过改变磁体工作点的方法来展开研究，该方法理论可行，而且还能够实现逐块测量并能保证快速，只是该方法对永磁体的厚度有一定的要求，目前还在进一步的研究中。

第四部分是建立在第一部分所测试曲线的基础上的，是通过常温下的磁性能来间接推算出磁体热稳定性的方法。首先给出理论推导，然后通过实例加以验证，最终给出结论，只要判断磁体是否满足规定的磁性能参数值的要求，即可推测出被检测的产品是否合乎要求。

关键词：NdFeB，热稳定性，快速检测

Research on Fast Measurement Methods for Thermal Stability of NdFeB Permanent Magnet Materials

Abstract

As an important sub project supported by the National Key Technologies R&D Program, this dissertation is devoted to the research on the fast measurement methods for thermal stability of sintered NdFeB materials in order to study some fast measurement methods and devices for thermal stability of sintered NdFeB materials for electrical machines.

Four parts are included as follows:

First of all, basing on IEC standards and Chinese national standards about sintered NdFeB materials, in the paper the high-temperature, room-temperature properties and thermal stability of about two hundred samples of NdFeB materials for electrical machines produced by twenty representative manufactories in China are measured and analyzed. Combining with the analysis results, properties conclusions of sintered NdFeB materials produced in China are concluded.

Secondly, basing on the analysis and research to the original measurement system NIM-10000H, the methods of exerting demagnetizing electric current and measuring flux are found out and the device is designed. Experiments are made to prove the feasibility of the device. Although there is feasibility in theory, it should be further research and perfection on making sure the exact electrical current.

In the third part, it is researched that no exerting electrical current but changing materials' working point to realize fast measurement. Permanent magnetic materials can be measured fast by the method which has been analyzed in theory. But this method is going on research because it is limited by the thickness of materials.

The method that calculating thermal stability by the known room-temperature properties of materials is brought forward in the forth part of the dissertation. The method is basis on the curves measured in the first part. Combining with the calculative formulas, experiments are made on samples of NdFeB materials to prove the feasibility of this method. By using this

method, it can be concluded whether the samples is regular as long as the room-temperature properties of materials is known.

Key Words : NdFeB, Thermal stability, Fast measurement

独 创 性 说 明

本人郑重声明：所呈交的论文是我个人在导师指导下进行的研究工作及取得的研究成果。尽我所知，除了文中特别加以标注和致谢的地方外，论文中不包含其他人已经发表或撰写过的研究成果，也不包含为获得沈阳工业大学或其他教育机构的学位或证书所使用过的材料。与我一同工作的同志对本研究所做的任何贡献均已在论文中做了明确的说明并表示了谢意。

此说明在论文送审时，对于这点作者已做出承诺，鉴于保密原则，此处没有作者本人签字。

日期：_____

关于论文使用授权的说明

本人完全了解沈阳工业大学有关保留、使用学位论文的规定，即：学校有权保留送交论文的复印件，允许论文被查阅和借阅；学校可以公布论文的全部或部分内容，可以采用影印、缩印或其他复制手段保存论文。

此说明在论文送审时，对于这点作者和导师已做出承诺，鉴于保密原则，此处没有作者和导师本人的签字。

日期：_____

1 绪论

1.1 课题的背景、意义及来源

稀土永磁材料由于其优异的磁性能（具有高的剩磁密度，高的矫顽力和高的磁能积）和良好的性能价格比，在许多领域得到愈来愈广泛的应用^[1, 2, 3]。尤其应用在各种电机的开发上，不但可以明显的减轻电机的重量，使电机的外型尺寸减小，而且还可以获得高效的节能效果和提高电机的性能。再结合电力电子新技术，使稀土永磁电机的性能可以实现传统励磁电机难以达到的高性能。可以说稀土永磁材料对电机的应用与发展起着重大作用，各种用途的新型稀土永磁电机的相继出现使电机行业进入了一个崭新的发展阶段^[4]。

磁路设计时永磁体的参数直接影响到电机的整体性能，因此永磁电机的性能、设计制造特点和应用范围都与永磁材料的性能密切相关。我们必须全面了解磁体的使用特性，例如磁体室温、工作温度和最高温度下的磁参数，磁性能稳定性等，才能够做到设计合理，使用得当^[1, 5]。

NdFeB 永磁材料是第三代稀土永磁材料，是在 20 世纪 80 年代初，由日本住友特殊金属公司和美国通用汽车公司分别研制成功的^[4]。由于 NdFeB 永磁材料的磁性能非常优越，具有较高的最大磁能积 $(BH)_{\max}$ 、剩余磁感应强度 B_r 和矫顽力 H_{cB} 。其室温下剩磁 B_r 可达到 1.47T，约是铁氧体永磁的 3~4 倍，铝镍钴永磁的 1~1.5 倍；内禀矫顽力 H_{ci} 可达到 2786kA/m (35kOe)，约是铁氧体永磁的 5~10 倍，铝镍钴永磁的 5~15 倍；最大磁能积高达 421.8kJ/m³ (53MG · Oe)，约是铁氧体永磁的 10 倍，铝镍钴永磁的 8 倍，通俗的说，就是 1cm³ 的 NdFeB 永磁体可吸起 5Kg 重的铁块^[6, 7, 8]。可见，NdFeB 永磁材料的磁性能远远高于其他永磁材料，目前被认为是磁性能最高的产品^[4]。此外，近年来随着该磁体的耐热性和抗腐蚀性等性能大为提高，从而使其在应用方面成为性能价格比很高的材料，因此，被人们称为“一代磁王”（或是“磁中之王”），预计在今后相当长的时间内将仍然如此^[9]。

我国稀土资源丰富，稀土不稀，稀土矿的储藏量为世界其他国家总和的 4 倍左右，号称“稀土王国”^[4, 10]，稀土永磁的产量正以每年超过 35% 的速度大幅度递增^[11]，但每

年我国生产的 NdFeB 永磁材料的 2/3 都用来出口，出口到日本、美国和欧洲，仅余下的 1/3 用于国内产品的应用，而且用得最多的是音响器件（中国是全球最大的扬声器生产者，国产 NdFeB 有近一半用于制造扬声器），其次是磁化器和电机。而国外厂家利用从我国进口的材料进行加工，并广泛应用于为计算机硬盘配套的音圈电机 (VCM) 和数控机床用电机等一些高技术含量的领域，而我国在这些领域很大程度上仍然依赖进口。例如，我国每年生产 1000 多万台计算机，为其配套的磁盘驱动器全部依赖进口，或购进零部件在国内组装，如果以美国为首的西方国家对我国进口磁盘驱动器加以限制，那么我国计算机生产将受到严重影响；在数控机床方面，我国因电机和传动控制系统不合要求而每年进口花费 22 亿美元以上^[12]。表 1.1 是中国、日本和欧洲烧结 NdFeB 永磁体的主要应用范围。

表 1.1 中国、日本和欧洲烧结 NdFeB 永磁体的主要应用范围

国家	音圈电机	电机	磁共振成像	通信	音响	磁化器	轴承	其他
日本	55%	15%	14%	8%	3%			5%
欧洲	69%				10%	8%	5%	8%
中国	4%	10%			52%	28%	4%	2%

由表 1.1 可以看出，中国和日本、欧洲烧结 NdFeB 永磁体的主要应用范围存在很大的差距，其原因在于电机应用领域所用的永磁体，不仅要求磁性能高，均匀性、一致性好，而且要求加工精度高，镀层质量好。到目前为止，国内大多数厂家的产品还难于满足这些使用要求。究其原因，除了磁性材料的生产技术和工艺条件相对落后外，磁性材料的磁性能测量技术方面也存在很大的问题。

正是因为 NdFeB 永磁体磁性能检测方面的不完善，还没有快速检测的方法和装置，造成电机厂在制造电机时，只能将估计合格的永磁材料装入电机，结果使电机的可靠性降低，在运行时出现电机的实际运行参数和设计参数相差很大，从而大大限制了国产永磁电机在很多领域的广泛应用。

因此,充分发挥我国稀土永磁资源丰富的优势,大力提高稀土永磁材料性能指标,早日研究出快速检测的方法和装置,积极推广国产稀土永磁电机的更广泛应用,将有助于加快我国从稀土资源优势到经济优势的转变,对推进我国生产技术发展具有重要的理论意义和实用价值。

作为国家“十五”科技攻关计划“稀土永磁材料在高性能电机应用的共性关键技术”中的一个重要子课题,本课题重点对 NdFeB 永磁材料热稳定性的快速检测方法展开研究。

1.2 NdFeB 永磁材料磁性能的相关知识介绍

1.2.1 基本磁性能

永磁材料磁性能^[4, 13]用一些磁参数来表示,如剩余磁感应强度 B_r 、矫顽力 H_{cB} 、内禀矫顽力 H_{cJ} 和最大磁能积 $(BH)_{\max}$ 等,这些参数由退磁曲线和内禀退磁曲线所决定。

图 1.1 是永磁材料内禀退磁曲线和退磁曲线的关系示意图。图中的 H_K 是临界场强,是用来表示内禀退磁曲线形状的重要参数。

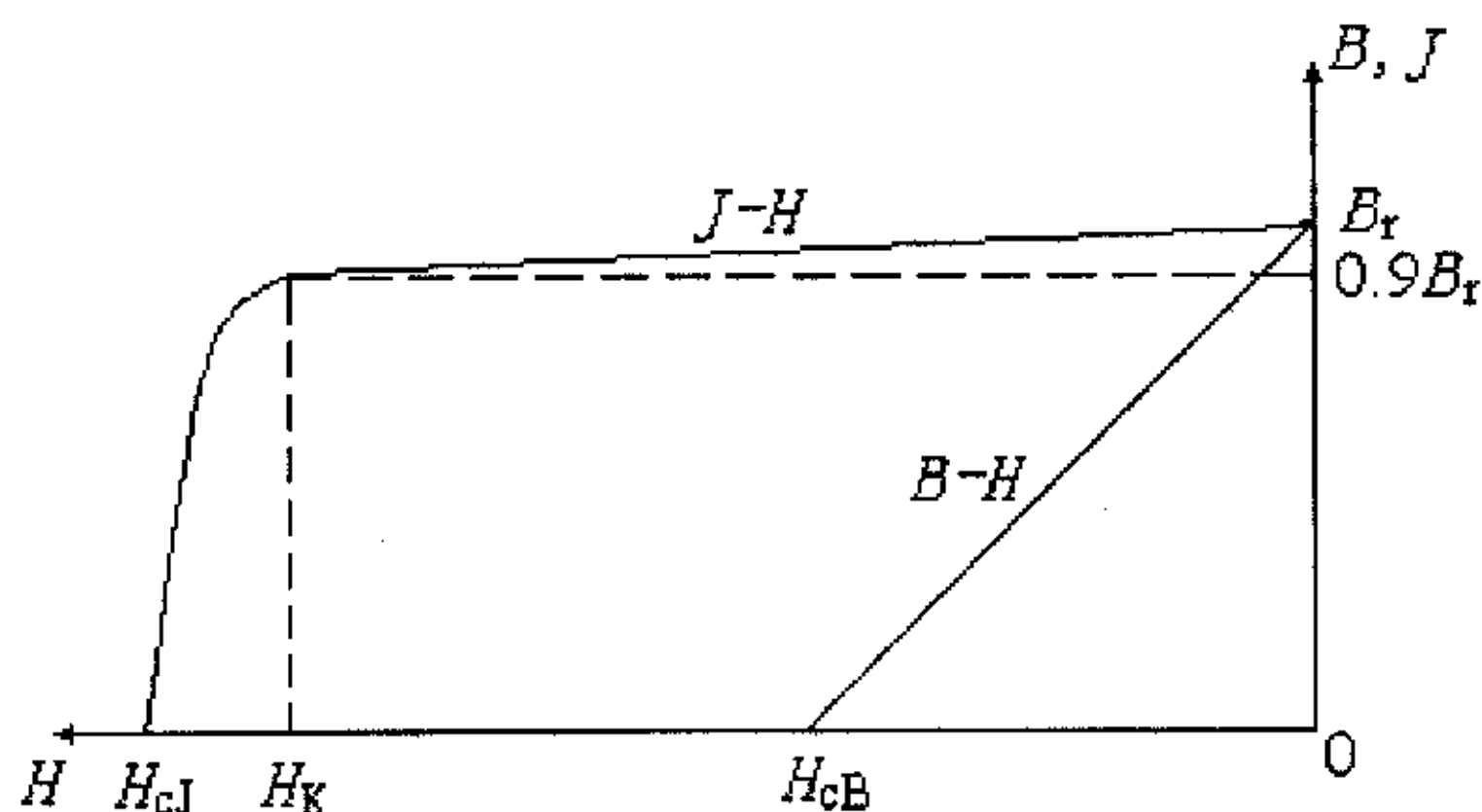


图 1.1 内禀退磁曲线与退磁曲线的关系示意图

对于 NdFeB 永磁材料来说,常温或者较低温度下,退磁曲线 $B-H$ 为一直线,如图 1.2 中曲线 1 所示。但是在温度较高的情况下,由于 NdFeB 永磁材料温度系数较高, B_r 的温度系数达 $-0.13\%/^{\circ}\text{C}$, H_{cJ} 的温度系数达 $-(0.6\sim0.7)\%/^{\circ}\text{C}$,因而在高温下使用时磁损失较大,磁性能热稳定性较差,从而导致 NdFeB 永磁材料在高温下使用时,其退磁曲

线的下半部分要产生弯曲, 见图 1.2 中曲线 2 和 3 所示 (1、2、3 分别表示随温度升高的 $B-H$ 曲线)。

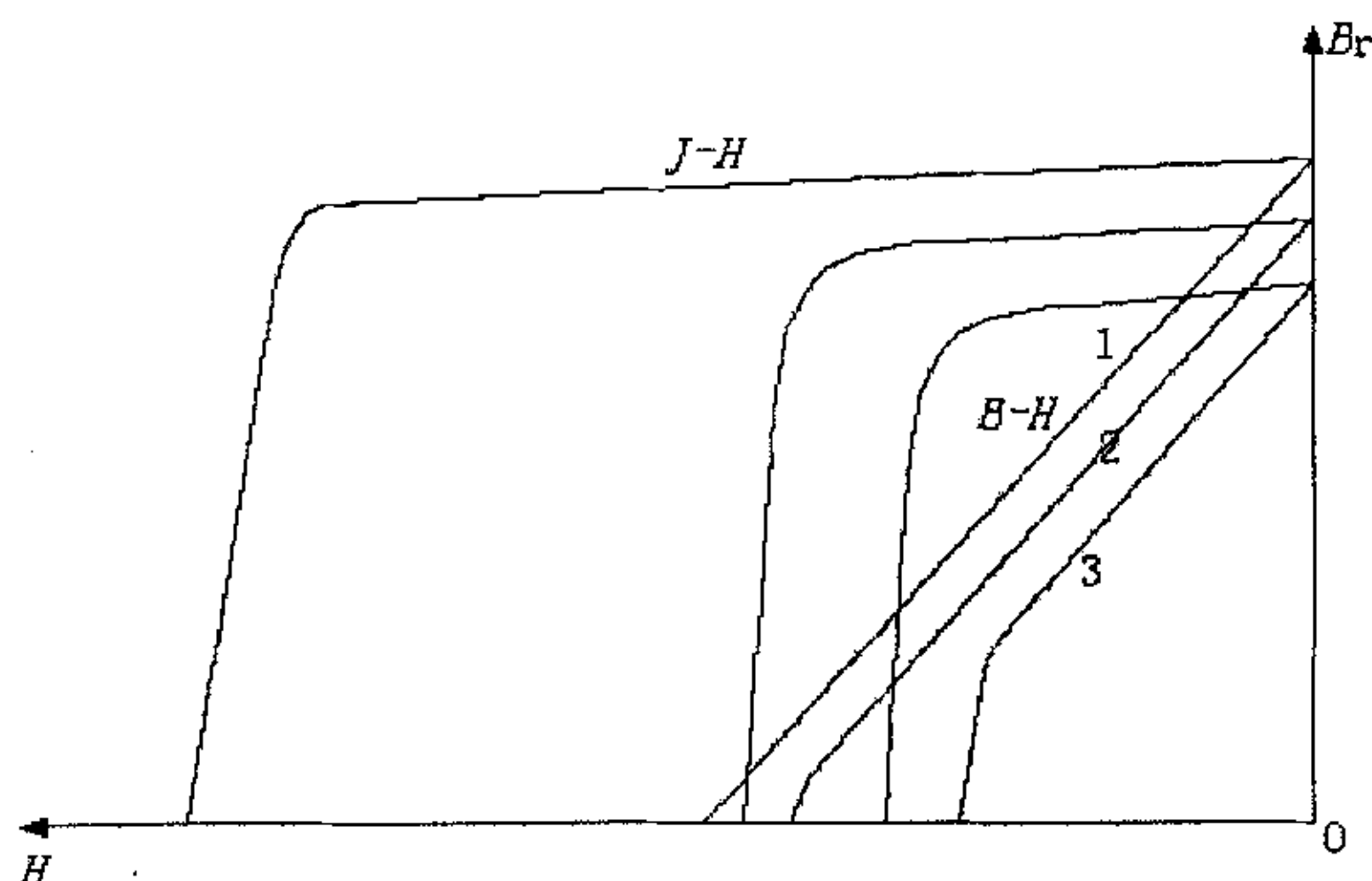


图 1.2 NdFeB 永磁材料不同温度下的退磁曲线示意图

1.2.2 NdFeB 磁性能对电机设计的影响

NdFeB 永磁材料在高温情况下, 其退磁曲线出现拐点 (高温情况下退磁曲线开始拐弯的点, 有时也称为膝点^[4])。例如, 图 1.3 中 K 点即为某一温度下的拐点) 的这种缺点增加了永磁电机设计的复杂性, 也大大降低了电机运行的可靠性。因为永磁电机在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, 磁通密度将会沿着图 1.3 中的退磁曲线 B_rK 下降。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 就不再与退磁曲线重合了。这样当退磁磁场强度消失时, 永磁体的剩余磁感应强度 B_r 将下降, 永磁体的磁性参数将发生变化, 直接影响了电机的运行性能, 称这种现象为不可逆退磁, 又叫失磁。永磁体失磁后, 只有对其重新充磁才能够恢复其性能, 这样会造成相当大的损失^[4]。因此, 在使用 NdFeB 永磁材料时, 一定要校核永磁体的最大去磁工作点, 也就是拐点, 以增强其可靠性。只有准确知道了每一种型号 NdFeB 永磁材料在最高工作温度下退磁曲线拐点的位置, 才能来设计电机参数, 从而使电机在最大限度情况

下（包括高温、大电流），磁通密度仍然会在永磁体退磁曲线拐点的上方往返变化，结果当电机停止运行时，永磁材料的剩余磁感应强度 B_r 将保持不变。

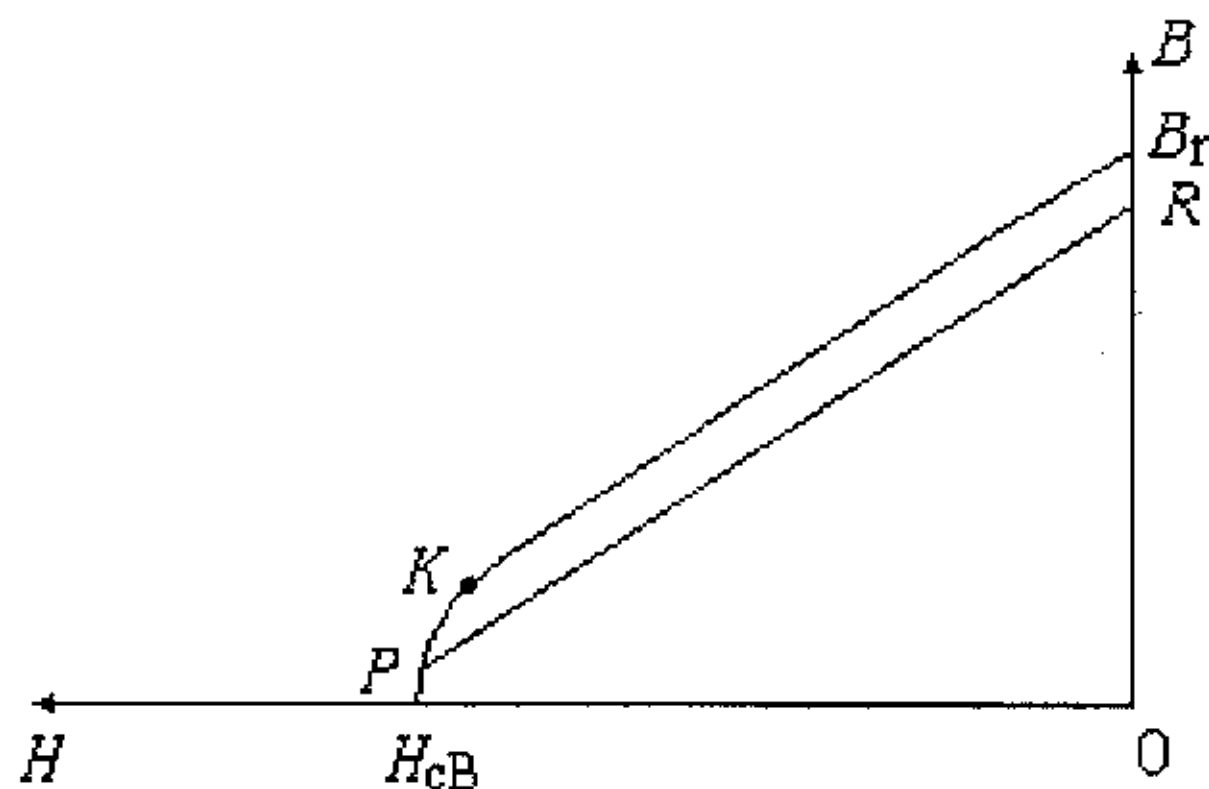


图 1.3 永磁材料的退磁曲线和回复线示意图

为保证永磁体高温下工作在退磁曲线的直线段，通常根据永磁体的 H、SH、UH 和 EH 等不同牌号来制定不同工作温度，这样在进行电机设计时就可以找出最佳工作点，充分利用永磁体的磁性能。根据绝缘材料的耐温等级不同，电机的最高工作温度有个上限，B 级绝缘为 $130\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，F 级为 $155\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，H 级为 $180\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。电机设计常用的 B 级绝缘，采用 SH 系列 NdFeB 永磁体要求的最高工作温度为 $120\text{ }^{\circ}\text{C}$ ^[14]。

NdFeB 永磁电机的设计常常要求永磁材料的生产厂家要保证 NdFeB 永磁材料在电机的最高工作温度 $120\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时，退磁曲线为直线，或其拐点处的磁通密度低于某一值（例如 $10\%B_r$ ， B_r 为最高工作温度时的剩磁密度）。为使电机在最高工作温度下正常运行，不失磁，则电机设计时要使 NdFeB 永磁的最大去磁工作点高于拐点且有一定裕量，应在 $15\%B_r$ 以上。如果 NdFeB 永磁材料性能达不到要求，例如电机最高工作温度时拐点处的磁通密度为 $15\%B_r$ 或是 $20\%B_r$ ，则电机的最高去磁工作点应相应提高到 $20\%B_r$ 或 $20\%B_r$ 以上。而提高最大去磁工作点是靠增加永磁体的厚度（即磁化方向上的长度）来保证的，因此需要增加永磁体的用量^[15]。图 1.4 为三个规格的 NdFeB 永磁电机永磁体用量与永磁材料退磁曲线中拐点的磁通密度之间的关系曲线。

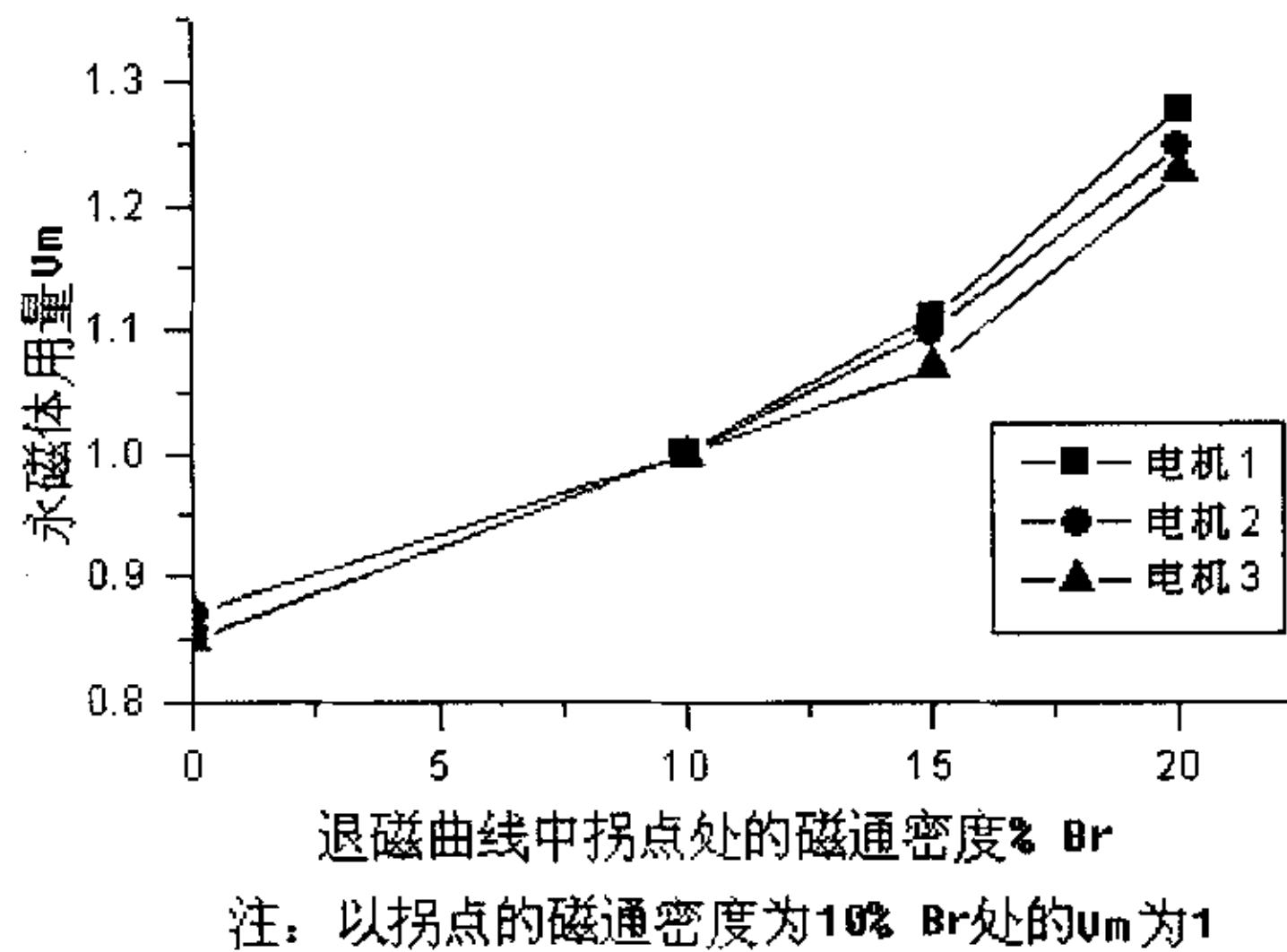


图 1.4 永磁体用量与永磁材料退磁曲线中拐点的磁通密度之间的关系曲线

从图 1.4 中可以看出，永磁材料退磁曲线中的拐点提高到 $15\%B_r$ 时永磁体用量将比拐点为 $10\%B_r$ 时增加 10% 左右，而永磁材料退磁曲线中的拐点提高到 $20\%B_r$ 时永磁体用量将比拐点为 $10\%B_r$ 时增加 25%~30% 左右，另一方面，如果退磁曲线为直线时永磁体的用量将比拐点为 $10\%B_r$ 时少用 15% 左右。换句话说，最高工作温度时退磁曲线拐点处磁通密度为 $20\%B_r$ 时的永磁体用量比退磁曲线为直线时多用 47%~53%。不仅如此，稀土永磁电机的优点之一是体积小，从而使电机转子安放永磁体的空间有限。如果增加永磁体用量有可能导致安放永磁体的空间不够，以致 NdFeB 永磁电机的高性能难以实现。

因此综合考虑各种因素，通常要求 NdFeB 永磁材料在电机最高工作温度下退磁曲线中拐点处的磁通密度应控制在 $10\%B_r$ 以下。

1.3 国内外研究现状及发展趋势

1.3.1 永磁磁性能的测量方法

目前应用较为广泛的磁性材料磁性参数测量主要有两种方法：电磁感应法和霍尔效应法^[16、17、18~22]；

(1) 电磁感应法是以电磁感应定律为基础测量磁场的一种经典方法。当把绕有匝数为 N 、截面积为 A 的探测线圈放在磁感应强度为 B_0 的被测磁场中时, 如果采用某种办法使线圈中所耦合的磁通 ϕ 发生变化, 那么根据电磁感应定律, 就会在线圈中产生感应电动势, $e = -N d\phi/dt = -NA dB_0/dt$ 。探测线圈 NA 的乘积是一常数(称线圈常数)。只要测量出感应电动势对时间的积分值, 便可求出磁感应强度 B_0 的改变量,

$$|\Delta B_0| = \int \frac{e}{NA} dt。$$

在电磁感应法中实现测量线圈中感应电动势对时间积分的积分器有冲击检流计、磁通计、光电积分器、电子积分器和数字积分器等多种方法。冲击检流计法是一种在理论上和实践上都比较成熟的方法, 它适合于测量不同材料和多种样品的磁性, 而且有着足够高的灵敏度和足够高的准确度, 测 B 和 H 可达 $1\% \sim 3\%$; 当按一定操作方式工作时, 其重复性也比较好, 因此被国际电工委员会推荐为静态磁性的标准测试方法。我国在 1974 年首次制定的《永磁材料磁性试验方法》及以后在此基础上制定的国家标准中, 都是以冲击检流计法作为基本的测量方法。但是影响冲击检流计法测量的因素很多, 主要有:

- 1) 磁通非瞬时变化的影响;
- 2) 磁化电流暂态振荡现象的影响;
- 3) 周围变化的杂散磁场的影响;
- 4) 漏电和热电动势的影响;
- 5) 检流计读书标尺的非线性修正;
- 6) 试样和测量线圈间存在气隙时的影响和修正。

(2) 霍尔效应法的原理是基于导体内移动的电子在磁场作用下受到洛伦兹力的作用, 使电子向一侧偏转, 形成了电子的积累, 积累起来的电子将建立电场, 电子在受到洛伦兹力的同时, 还受到与其方向相反的电场力作用, 当二力相等时, 电子的积累达到动态平衡, 这时在两横端面间建立的电场称为霍尔电场, 相应的电动势称为霍尔电动势。通常霍尔电动势 U_H 可表示为: $U_H = IB_0 \frac{R_H}{d} = IB_0 R_{Hl}$, 式中 d ——霍尔器件的厚

度； R_H ——霍尔常数； R_{HH} ——霍尔器件常数； I ——通过霍尔器件的电流； B_0 ——被测磁场的磁感应强度。对于一定的霍尔器件，只要通过的电流恒定不变，便可以通过霍尔电动势的测量而测定磁场 B_0 。

由于用霍尔效应法测量磁场时可连续的和线性的读数，方法简便，使用寿命长，并能测量小空间和小间隙的磁场，还可以使用多探头，易于实现测量自动化和数据处理，因此，霍尔效应法已经成为磁场测量中的一种重要方法。霍尔效应法的主要缺点是，使用不当时会引入较大的测量误差。这些测量误差的来源包括：

- 1) 测量仪表的显示误差；
- 2) 电流的不稳定性误差；
- 3) 仪器的定标校正误差；
- 4) 霍尔器件的材料和形状影响的误差；
- 5) 磁阻效应影响的误差；
- 6) 温度影响的误差；
- 7) 不等位电动势影响的误差等等。

上述两种方法都有其明显的缺点。冲击检流计法的不能自动连续测量和霍尔效应法误差影响因素太多限制了它们在稀土永磁磁性测量方面的应用。

1.3.2 国内外发展现状

目前国内^[23、24、25]很多科研单位和厂家都在积极努力研制开发新的稀土永磁磁性能测量设备，根据上述两种方法存在的缺点，以现代电子技术为基础，提出了很多新的观点，开发了一些自动测量装置，如采用电子积分器或数字磁通计代替冲击检流计，实现了自动记录和数字显示；后又出现带微处理器或用微型计算机的测量装置。

目前在国内有代表性的磁性测量设备是中国计量科学研究院磁性测量实验室研制的 NIM-10000H 稀土永磁无损检测系统^[26]。这套系统在测量过程中通过缓慢增加磁化电流使磁通变化量 $d\phi/dt$ 为一常量，从而避免测量过程中产生涡流以及产生磁场和磁极化强度之间的相角；在测量中采用 H 线圈代替霍尔片测量磁场，消除了人为因素和霍尔非线性的影响；并且对积分器的漂移采取了措施，通过软件进行线性修正以及硬件的设计来消除积分器的线性漂移和非线性漂移。

国际上^[27、28、29~32]有代表性的产品是德国科伦磁物理公司研制的 PERMAGRAPH-REMAGRAPH 型磁性测量仪,该仪器可以说是目前国际上最先进的永磁及软磁测量仪器之一。该仪器操作简单,精确度高,稳定性、重复性好,其基本测量原理与 NIM-10000H 稀土永磁无损检测系统基本相同。

永磁材料的检验分为材料检验和成品检验^[11],虽然目前国内材料检验具有国际先进水平,并且在测量过程中能得到永磁体较为完整的技术参数,但是这些设备只是适合于那些要求准确测量标准样品磁性参数的场合,对于永磁材料生产厂家来说,用这些设备进行永磁材料的逐块测量是不可能做到的;同时价格昂贵也是限制其推广应用的一个原因,例如德国科伦磁物理公司的磁滞回线测试仪至少需要十几万欧元,国内购买的少数几家单位也只是用来进行标准样品的测量以及研究之用。

对永磁材料的成品检验虽然可以通过使用磁通计、特斯拉计或亥姆赫兹线圈+磁通计来进行,但都只能对永磁材料常温特性进行检验,而对电机生产厂家最为关心的高温磁性能,也就是热稳定性的快速检验仍然存在着很大的困难^[11],迄今还没有一种快速检测方法和装置能够实用。

1.3.3 电机用烧结 NdFeB 磁性能参数测试的国内状况

磁测量技术发展至今,可以说各种检测方法层出不穷,无论是弱磁场、中磁场,还是强磁场的测量,都有其相应的测量方法和技术。稀土永磁材料的测量作为新兴的检测技术,多年来也取得了相当大的成就。但是随着 NdFeB 等高矫顽力的新型永磁材料的出现并且在工业生产中的普遍应用,检测方法和检测技术及设备越来越不能满足一般生产厂家的要求。特别是 NdFeB 磁体投入批量生产以后,每块产品磁性能的无损检验一直是生产者必须解决的难题,这也成为制约我国稀土工业发展的瓶颈之一。

目前由于生产工艺和技术上的差距,同一型号、同一批 NdFeB 永磁体的均匀性和一致性都还存在着很大的差距,因此电机生产厂家在使用永磁体之前,都会对每一块永磁体进行检测,包括常温和高温下磁性能参数的检测,只有这样才能保证电机用的要求,保证电机运行可靠。

现有的磁测量装置就是对 NdFeB 永磁材料施加退磁场,测定永磁材料的退磁曲线 $B-H$ 和内禀矫顽力曲线 $J-H$,然后据此得到所需要的各种参数,这些参数包括最大磁能

积 $(BH)_{\max}$ 、剩磁 B_r 、矫顽力 H_{cB} 和内禀矫顽力 H_{cJ} 等等,然后根据这些参数来判断该磁体是否满足电机用的要求。但是这种方法决定了现有的磁测试装置耗时多,尤其是高温下无法做到快速检测。

结合实际情况,要求测磁设备应该能够快速测量永磁材料高温下的磁特性,同时检测仪器价格低也是要求之一。在做到快速的同时,对仪器的要求有其特殊性^[33]:第一,不需要准确知道每一点的磁特性参数,但要求快速测出产品合格与否;第二,测量设备的重复性要好。

综上所述,为了避免 NdFeB 永磁体在永磁电机使用过程中出现高温退磁现象,不仅要检测标准试样,还必须对磁体的高温磁性能进行逐块的检测,挑出不合格产品;同时为了满足电机生产厂家对永磁体的需求量,检测时间应尽可能的短,完成快速检测。

1.4 本课题的主要工作内容

根据前面提到的两点测量要求,即既要逐块又要快速的要求,本课题通过对国内大量 NdFeB 永磁体热稳定性的测试与分析,提出了三种快速检测方法,分别加以实施验证。

具体工作分为以下几方面:

(1) 国产 SH 系列烧结 NdFeB 永磁体热稳定性的测试与分析

通过 NIM-10000H 检测系统,我们对收集到的国内二十个厂家、近 200 块的 SH 系列烧结 NdFeB 永磁体的常温和高温下磁性能参数进行了测试,根据测试结果及 IEC 标准和中国国家标准,得出其热稳定性的性能分析结果,从而对国内 SH 系列烧结 NdFeB 永磁体的热稳定性有个初步的了解,为快速检测方法的研究打下一个坚实的基础。

(2) 快速检测方法的研究

通过对已有仪器 NIM-10000H 的使用、分析及研究,根据电机用永磁体高温不失磁的要求,不需要准确知道永磁体上每一点的磁特性参数,只要测出磁体合格与否即可,探索出加退磁电流和实测磁通的办法。

(3) 工作温度下改变磁体工作点的快速检测方法

该方法是在不加退磁电流的情况下,用改变外磁路磁导的方法来改变永磁体的工作点以确定永磁体退磁曲线拐点的位置。

(4) 根据室温下磁性能间接推算热稳定性的方法

根据目前材料厂家能够给出室温下磁体的磁性能参数值，对磁体的热稳定性进行理论分析，得出的结论与实测结论相比较，看是否能够根据室温下的磁性能推算出磁体热稳定性的方法。

2 国产 SH 系列烧结 NdFeB 永磁体热稳定性的测试与分析

2.1 引言

我国生产的 NdFeB 永磁体和国外相比，性能上存在着差距。经常听到用户反映由于永磁体的质量不合格而造成经济损失，例如：高效永磁同步电动机在高温下启动后，效率和功率因数会降低；电动自行车经过几次上坡和顶风行驶后，车速会明显下降；磁力传动器使用一段时间后传动力矩下降；手机话筒使用一段时间后灵敏度下降；安装于汽车上的扬声器在使用一段时间后同样出现输出下降的现象^[34]。

针对目前我国生产的 NdFeB 永磁体存在的问题及电机用 NdFeB 永磁体方面的要求，为了弄清国内产品质量情况和探索低温磁性能与高温磁性能间的关系，我们收集了国内二十个厂家近 200 块的 SH 系列烧结 NdFeB 永磁体，并对其热稳定性进行了性能测试分析，根据 IEC 标准和中国国家标准及测试分析结果，得出国产 SH 系列烧结 NdFeB 永磁体热稳定性的性能结论。

2.2 实验所用的测试仪器

2.2.1 原理框图

实验所用的测试仪器是前面提到的由中国计量科学研究院磁性测量实验室研制的 NIM-10000H 型稀土永磁无损检测系统。该系统构成原理框图如图 2.1 所示。

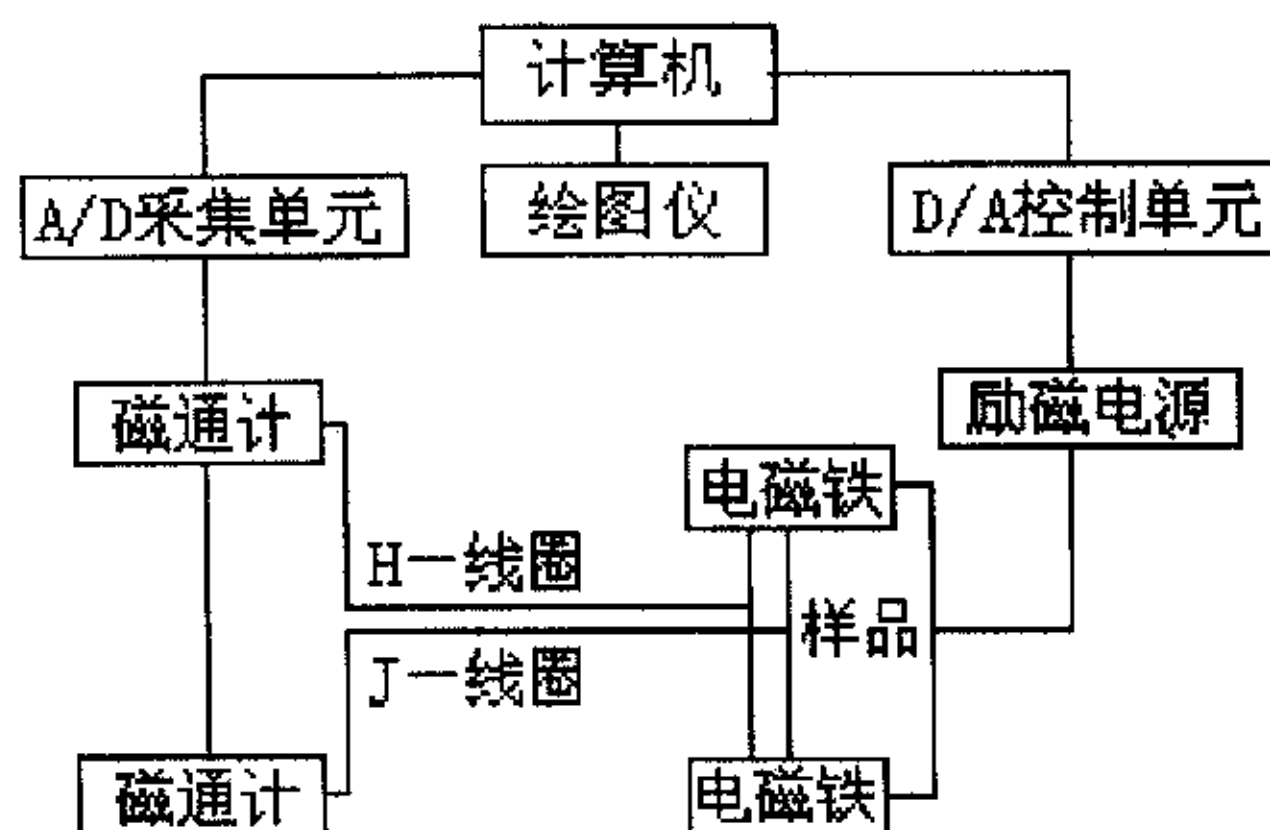


图 2.1 NIM-10000H 系统构成原理框图

由该系统构成原理框图中，我们可以看出，该系统所用的测量线圈是 J - H 线圈，而不是 B - H 线圈，这是因为该系统是通过测出的 J - H 曲线来计算出 B - H 曲线。如果按照以往的方法直接测 B 值，那么由于需要通过紧贴磁体表面绕制的测试线圈来测试穿过磁体横截面的磁通，对线圈的绕制要求非常严格，很容易产生误差，而测 J 值由于采用的是双线圈法，对线圈的大小要求不是很严格，所以现在都是测取 J 值，而不直接测 B 值。下面给出标准中对 J 线圈和 H 线圈的要求及其公式推导。

根据标准规定，测量线圈应采用绝缘良好的细软铜线，均匀地绕在无磁的线圈骨架上。对于 J 值的测试，通常采用双线圈法^[35、36]，所谓的双线圈包括磁通测量线圈和磁场补偿线圈，二者串联反接，根据电磁铁极面的大小和磁体尺寸，两个线圈采用同心形或者双心形，如图 2.2 所示。

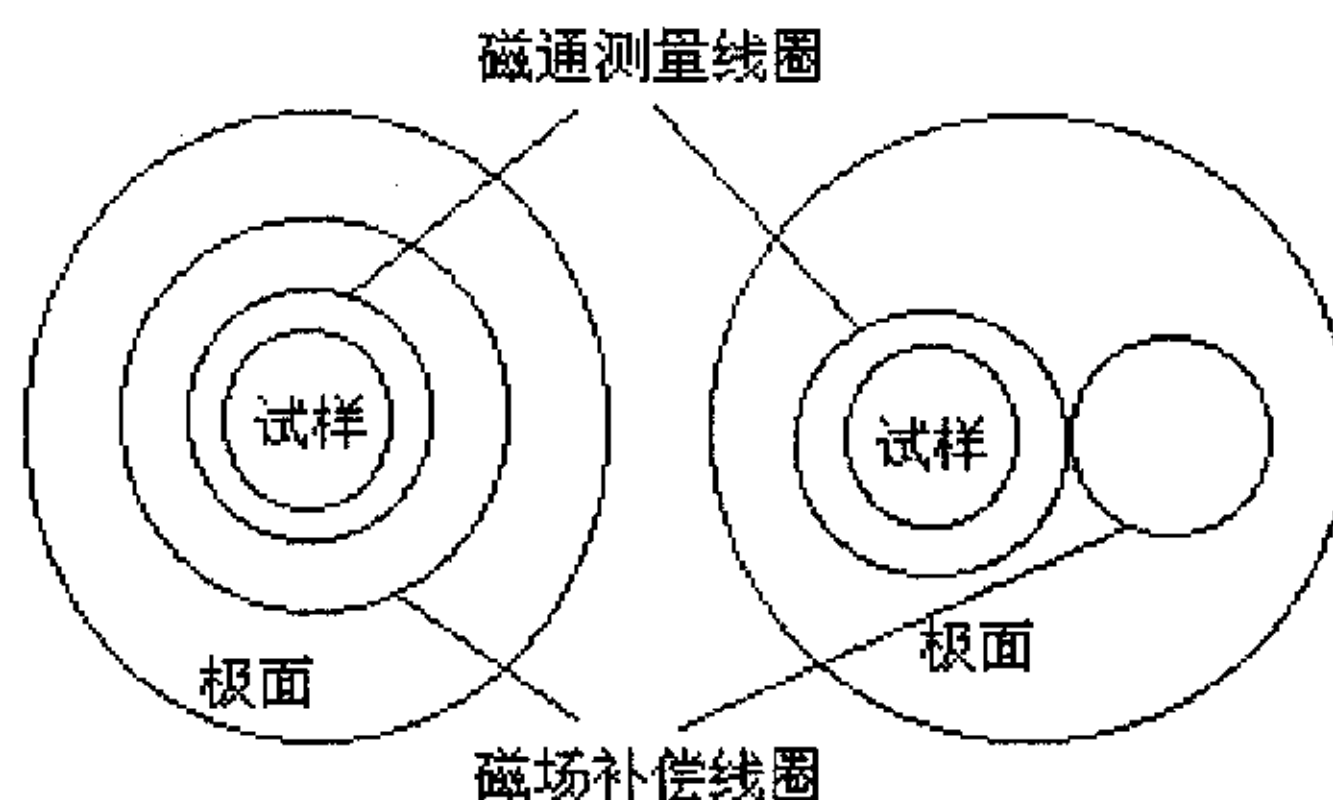


图 2.2 J 测量线圈

磁通测量线圈和磁场补偿线圈应该满足如下的关系：

$$N_1 A_1 = N_2 A_2 \quad (2.1)$$

式中： N_1 ——磁通测量线圈的匝数；

A_1 ——该线圈的横截面积；

N_2 ——磁场补偿线圈的匝数；

A_2 ——该线圈的横截面积；

e ——线圈两端感生电动势。

J 值可由下式推导计算得出：

$$\begin{aligned} e &= -d\psi/dt = -N d\phi/dt \\ \phi_1 &= BA_0 + \mu_0 H(A_1 - A_0) \\ \phi_2 &= BA_0 + \mu_0 H(A_2 - A_0) \quad (\text{同心形}) \end{aligned} \quad (2.2)$$

或

$$\phi_2 = \mu_0 HA_2 \quad (\text{双心形}) \quad (2.3)$$

对两个线圈两端的电动势差积分得：

$$\begin{aligned} U_0 &= -\frac{1}{RC} \int (e_1 - e_2) dt \\ &= -\frac{1}{RC} \int \{N_1 d[BA_0 + \mu_0 H(A_1 - A_0)]/dt - N_2 d[BA_0 + \mu_0 H(A_2 - A_0)]/dt\} dt \\ &= -\frac{1}{RC} [(N_1 - N_2)BA_0 - (N_1 - N_2)\mu_0 HA_0] \\ &= (N_1 - N_2)A_0(B - \mu_0 H)/RC \end{aligned} \quad (2.4)$$

或

$$\begin{aligned} U_0 &= -\frac{1}{RC} \int \{N_1 d[BA_0 + \mu_0 H(A_1 - A_0)]/dt - N_2 d(\mu_0 HA_2)/dt\} dt \\ &= -\frac{1}{RC} (N_1 BA_0 + N_1 \mu_0 HA_1 - N_1 \mu_0 HA_0 - N_2 \mu_0 HA_2) \\ &= -N_1 A_0 (B - \mu_0 H)/RC \end{aligned} \quad (2.5)$$

在第二象限， H 为负值，取绝对值得：

$$U_0 = K(B + \mu_0 H) \quad (2.6)$$

即

$$J = U_0 / K \quad (2.7)$$

场强 H 的测量也有两种方法：扁平线圈测 H 法和双层同轴测 H 法^[37]。设测 H 线圈的面积为 A_3 ，线圈匝数为 N_3 ，由下列公式可以推出 H 值的大小：

$$\begin{aligned} e &= -d\psi/dt = -N_3 d\phi/dt \\ \phi &= A_3 \mu_0 H \end{aligned} \quad (2.8)$$

对电动势信号积分得:

$$U_1 = -N_3 A_3 \mu_0 H$$

则

$$H = -U_1 / N_3 A_3 \mu_0 \quad (2.9)$$

2.2.2 测试过程

该系统的具体测试过程^[38]如下:

在测量常温下的 $J-H$ 曲线时, 根据试样的形状 (如长方体、圆柱体等), 先测量出试样的几何参数 (如长、宽、直径等), 然后在充磁机上饱和充磁; 接下来是对仪器进行初始化, 其中包括根据试样设定参数、调整仪器漂移和把仪器设在开始测试状态等; 第三步是把试样放在极头之间, 装好 $J-H$ 线圈, 再通过电磁铁把试样夹紧, 启动测试程序进入测试阶段, 测试结果的曲线通过计算机记录并打印。

在测量高温下的 $J-H$ 曲线时, 与常温测量基本一样。唯一不同的是要把试样在极头中通过温控仪先加热到预定的温度, 保温 10 分钟。由于磁体是热的良导体, 我们有理由认为, 这时极头的温度就是试样的温度, 然后再进行测量。而且对于每一个温度值, 在加热前都必须对试样重新饱和充磁。

该系统不但可以测量常温和 200 °C 以下不同高温的 $J-H$ 和 $B-H$ 曲线, 而且还可以把所测高温曲线在一个坐标系下用相同的比例画出来, 并显示相应的内禀矫顽力 H_{ci} 、剩磁 B_r 和最大磁能积 $(BH)_{max}$ 等磁性能参数值, 非常方便分析与研究。图 2.3 所示的是某一试样在 100 °C 和 120 °C 下所测的 $J-H$ 和 $B-H$ 曲线显示结果。

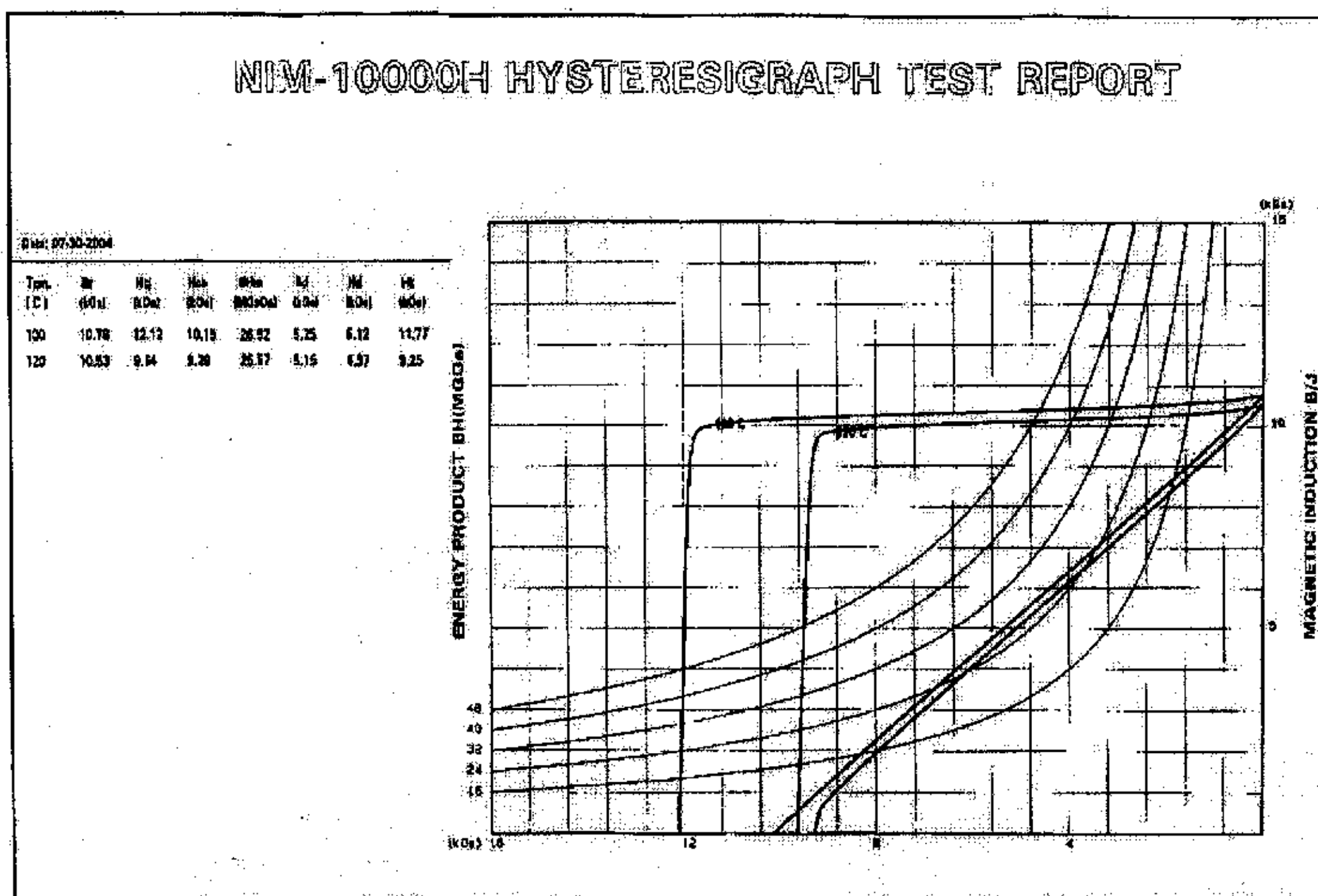


图 2.3 某一试样在 100°C 和 120°C 下所测的 $J-H$ 和 $B-H$ 曲线示意图

本章所提到的实验是在边做实验边调整仪器的基础上来完成的，而且每个实验数据都是经过重复验证才得到的，所以保证了实验数据的可靠性。

2.3 测试结果与分析

2.3.1 基本概念

热稳定性^[4, 39]是指永磁体由所处环境温度改变而引起磁性能变化的程度，也称为温度稳定性。温度系数 α 是反映永磁体热稳定性的重要性能指标。永磁材料剩余磁感应强度 B_r 和内禀矫顽力 H_{cj} 随温度可逆变化的程度分别用温度系数 $\alpha(B_r)$ 和 $\alpha(H_{cj})$ 来表示，单位为%/°C。

若永磁体的温度从 t_0 升至 t_1 时，磁密从 B_0 降为 B_1 ，内禀矫顽力从 H_{cj0} 降为 H_{cj1} ，则该磁体温度系数为：
$$\alpha(B_r) = \frac{B_{r1} - B_{r0}}{B_{r0}(t_1 - t_0)} \times 100\%, \quad \alpha(H_{cj}) = \frac{H_{cj1} - H_{cj0}}{H_{cj0}(t_1 - t_0)} \times 100\%。$$

烧结 NdFeB 永磁材料的温度系数很高。中国国家标准 GB/T13560—2000^[40]给出 $\alpha(B_r)$ 典型值为 $-0.12\%/^{\circ}\text{C}$ 、 $\alpha(H_{cj})$ 为 $-0.6\%/^{\circ}\text{C}$ ($25\sim 140^{\circ}\text{C}$)，而 IEC60404-8-1^[41]给出 $\alpha(B_r)$ 为 $-0.1\%/^{\circ}\text{C}\sim -0.12\%/^{\circ}\text{C}$ ， $\alpha(H_{cj})$ 为 $-0.45\%/^{\circ}\text{C}\sim -0.6\%/^{\circ}\text{C}$ ($20\sim 100^{\circ}\text{C}$)。

2.3.2 测试结果与性能分析

通过对沈阳、北京、山东和西安等二十个国内材料厂生产的近 200 块 SH 系列烧结 NdFeB 标准试样 ($\phi 10\times 10\text{mm}$) 的常温和不同高温下的 $J-H$ 和 $B-H$ 曲线进行测试, 根据测试结果, 从这二十个厂家里选取了十家比较有代表性的、无明显测试误差的共 57 块试样, 其测试结果见附录 A 所示。下面重点对这 57 块试样进行性能分析比较:

(1) 表 2.1 是附录 1 所示的各个厂家的试样在 100°C 和 120°C 时退磁曲线上拐点的 B 值占剩磁 B_r 值的百分比的统计情况。

表 2.1 各个厂家所测的永磁体样品在 100℃ 和 120℃ 时拐点位置情况

厂家	100℃ 时拐点 k 的 B 值所占 B_r 值的百分比	120℃ 时拐点 k 的 B 值所占 B_r 值的百分比
沈阳 1 厂 (13 个)	8 个不弯; 5 个弯 (15.9%、22.0%、24.8%、6.1%、5.1%)。	2 个 <10%, 6 个 >10% (19.0%、17.3%、19.4%、20.3%、21.5%、13.1%) ; (26.7%、34.6%、37.0%、21.1%、21.9%)。
沈阳 2 厂 (12 个)	8 个不弯; 4 个弯 (11.7%、8.3%、7.9%、7.2%)。	3 个 <10% , 5 个 >10% (16.3%、15.3%、18.0%、10.7%、10.9%) ; (24.6%、21.4%、11.0%、24.0%)。
浙江某厂 (5 个)	1 个不弯; 4 个弯 (17.4%、9.2%、7.5%、4.4%)。	1 个 >10% (14.0%) ; (34.1%、23.2%、27.3%、22.3%)。
北京 1 厂 (3 个)	3 个全弯 (18.2%、21.3%、21.0%)。	(31.0%、32.6%、40.2%)。
北京 2 厂 (6 个)	6 个全弯 (12.4%、24.4%、22.2%、12.4%、16.5%、17.2%)。	(30.4%、37.5%、36.0%、32.1%、33.4%、38.8%)。
北京 3 厂 (6 个)	6 个全弯 (30.5%、31.7%、34.0%、22.9%、11.1%、9.1%)。	(46.2%、49.7%、51.0%、48.5%、28.5%、31.0%)。
北京 4 厂 (5 个)	5 个全弯 (27.2%、34.0%、26.1%、32.1%、30.2%)。	(33.5%、46.5%、35.5%、37.6%、34.6%)。
山东某厂 (4 个)	4 个全弯 (28.8%、24.2%、14.8%、28.0%)。	(42.3%、38.4%、34.9%、42.9%)。
湖南某厂 (2 个)	2 个全弯 (24.7%、18.3%)。	(37.2%、32.8%)。
西安某厂 (1 个)	1 个弯 (19.9%)。	(38.8%)。

从表 2.1 所示的统计情况可以看出, 这 57 块被测试样中, 大部分试样都未满足电机行业的要求 (100 °C 时退磁曲线是直线和 120 °C 时退磁曲线拐点低于 10% B_r), 其中 100 °C 时退磁曲线为直线的仅占 29.82%; 120 °C 拐点低于 10% B_r 的仅占 8.77%。图 2.4 和图 2.5 分别表示 57 块试样在 100 °C 和 120 °C 时拐点位置的分布情况。

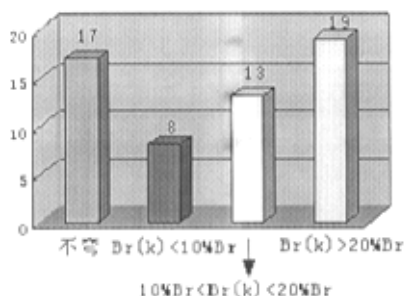


图 2.4 100 °C 时拐点的分布情况

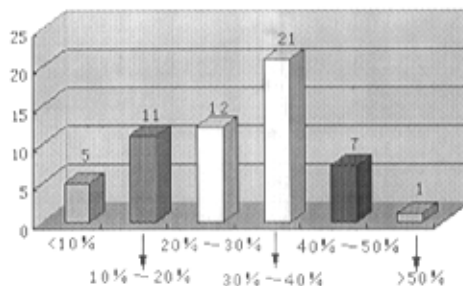


图 2.5 120 °C 时拐点的分布情况

(2) 从附录 A 中选取了 7 种比较典型 (包括性能好的、性能差的和一般的) 的测试结果, 见表 2.2 所示。

表 2.2 7 种典型样品各磁性能参数实测值

性能参数	温度	1#	2#	3#	4#	5#	6#	7#
B_r T	常温	1.23	1.23	1.19	1.20	1.18	1.01	1.20
	100℃	1.13	1.16	1.09	1.10	1.12	0.93	1.10
	120℃	1.10	1.13	1.06	1.06	1.10	0.90	1.07
$\alpha(B_r)$ %/℃	100℃	-0.108	-0.062	-0.102	-0.095	-0.059	-0.093	-0.101
	120℃	-0.110	-0.078	-0.106	-0.110	-0.069	-0.104	-0.106
H_{cj} kA/m	常温	1579	1821	1984	1849	1622	1779	1631
	100℃	680	985	1038	945	625	781	824
	120℃	552	790	843	830	461	594	665
$\alpha(H_{cj})$ %/℃	100℃	-0.712	-0.574	-0.596	-0.611	-0.769	-0.701	-0.618
	120℃	-0.650	-0.566	-0.575	-0.551	-0.716	-0.666	-0.592
H_k/H_{cj}	常温	0.975	0.941	0.913	0.825	0.851	0.551	0.961
	100℃	0.973	0.954	0.962	0.958	0.939	0.788	0.973
	120℃	0.973	0.953	0.955	0.965	0.943	0.847	0.971
拐点 k 占 B_r 百分比	100℃	22.0%	不弯	不弯	7.9%	34.0%	18.3%	8.3%
	120℃	34.6%	13.1%	3.3%	11.0%	51.0%	32.8%	22.6%
μ_r	常温	1.05	1.05	1.04	1.05	1.06	1.08	1.03

目前有的厂家认为 SH 系列烧结 NdFeB 永磁体只要其常温下的曲线矩形度 $H_k/H_{cj} \geq 0.9$ 和内禀矫顽力 $H_{cj} \geq 1600 \text{ kA/m}$ (20kOe) 都满足的条件下, 就可以判断该磁体的热稳定性合乎要求, 但是在我们的测试结果中发现, 在这两个条件都满足要求的范围内, 不能保证 100℃ 时退磁曲线是直线, 120℃ 时拐点小于 10% B_r 。例如表 2 所示的试样 5# 和 6#, 它们的退磁曲线在 100℃ 时都弯曲, 而且 120℃ 时拐点所占的百分比都超过了 20% B_r 。

究其原因, NdFeB 材料生产厂没有把内禀矫顽力 H_{cj} 的温度系数 $\alpha(H_{cj})$ 作为验收标准。国家标准 GB/T13560-2000《烧结钕铁硼永磁材料》^[40] 规定 $\alpha(H_{cj}) = -0.6\%/^\circ\text{C}$ (25~140℃); 而国际标准 IEC60404-8-1 (2001 版)^[41] 规定: $\alpha(H_{cj}) = -(0.45 \sim 0.6)\%/^\circ\text{C}$ (20~100℃)。

但是从附录 A 所示的测试结果可以看出，所测试样的温度系数 $\alpha(H_{cj})$ 不满足标准的要求。图 2.6 是 57 块所测试样 $\alpha(H_{cj})$ 的绝对值的分布情况。

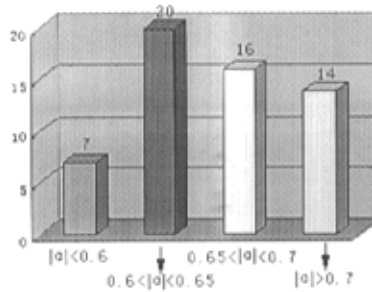
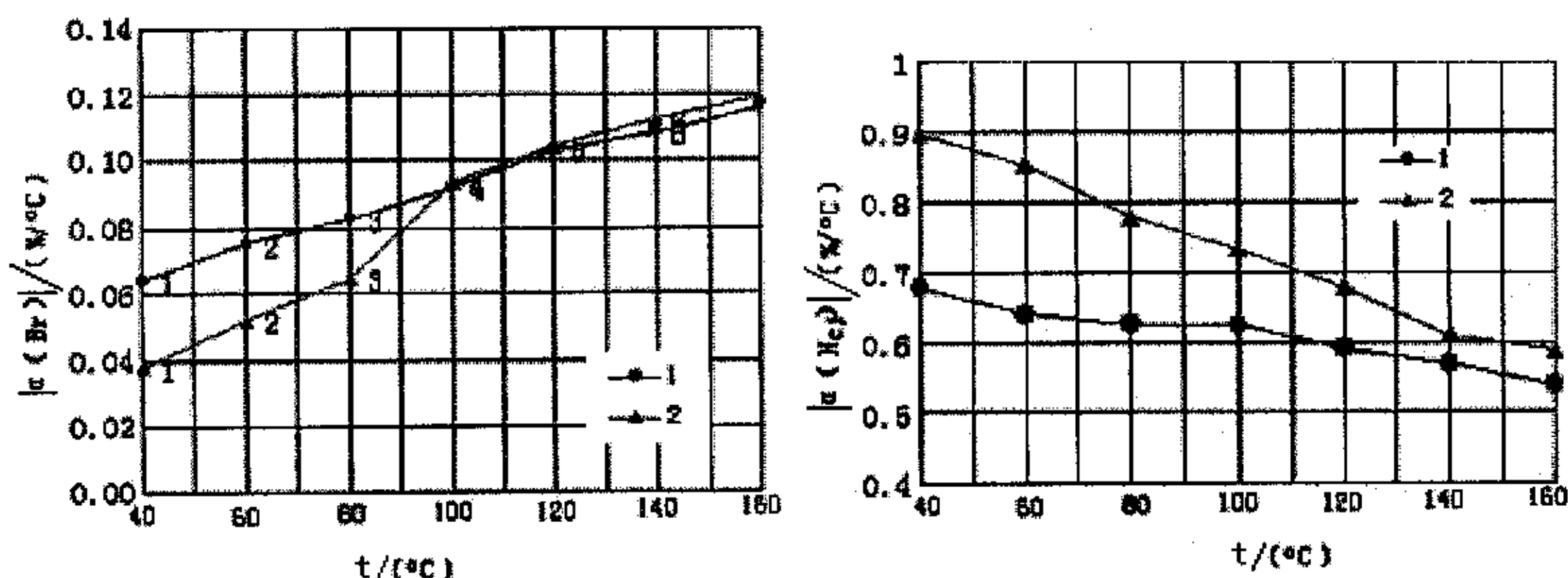


图 2.6 所测试样 $|\alpha(H_{cj})|$ 的分布情况

由图 2.6 所示的数据计算得， $|\alpha(H_{cj})| < 0.6\%/^{\circ}\text{C}$ 的占 12.3%，其中 $|\alpha(H_{cj})|$ 最小为 $0.55\%/^{\circ}\text{C}$ （见表 2.2 中试样 4#）； $0.6\%/^{\circ}\text{C} < |\alpha(H_{cj})| < 0.7\%/^{\circ}\text{C}$ 的占 63.2%； $|\alpha(H_{cj})| > 0.7\%/^{\circ}\text{C}$ 的占 24.5%，最大为 $0.769\%/^{\circ}\text{C}$ （见表 2.2 中 5#）。可见，绝大部分磁体的 $\alpha(H_{cj})$ 值不在标准要求范围之内。

(3) 对于每块试样来说，随着试样温度的升高，其 B_r 温度系数 $|\alpha(B_r)|$ 呈现上升趋势， H_{cj} 温度系数 $|\alpha(H_{cj})|$ 呈现下降趋势。图 2.7 是任选两种试样的 $|\alpha(B_r)|$ 和 $|\alpha(H_{cj})|$ 的变化趋势图。


 图 2.7 两种试样的 $|\alpha(B_r)|$ 和 $|\alpha(H_{cj})|$ 的变化趋势图

(4) 所测样品回复磁导率 μ_r 在常温下最小值 1.03 (见表 2.2 中 7#), 最大值 1.08 (见表 2.2 中 6#), 国家标准为 1.05。

(5) 曲线矩形度 H_K/H_{cj} 随温度的升高, 其值逐渐增大, 高温矩形度比常温矩形度好。

2.4 结论

通过对国产 SH 系列烧结 NdFeB 永磁体的测试分析, 我们知道了目前国内永磁体磁性能的大致情况, 电机用 SH 系列烧结 NdFeB 永磁体仅满足标准要求不能保证电机运行时不失磁。若要保证高温不失磁, 120°C 时曲线弯曲拐点小于 $10\%B_r$, 则可以考虑满足下列要求:

(1) 在室温 $H_{cj} \geq 1600\text{kA/m}$ 的条件下, 要求 $|\alpha(H_{cj})|$ 绝对值小于 $0.5\%/^{\circ}\text{C}$ 且室温下 $H_K/H_{cj} \geq 0.9$ (目前大多数厂家生产的 NdFeB 永磁材料 $|\alpha(H_{cj})|$ 不满足这个要求)。

(2) 若按中国国家标准给出的 $|\alpha(H_{cj})|$ 绝对值小于 $0.6\%/^{\circ}\text{C}$ 的要求, 则应满足 $H_{cj} > 1900\text{kA/m}$ 且室温下 $H_K/H_{cj} > 0.95$, 或者 $H_{cj} > 2000\text{kA/m}$ 且室温下 $H_K/H_{cj} > 0.9$ 。

上述要求是针对磁体牌号 NdFeB280/160 提出的, 如果考虑降低 $(BH)_{\max}$, 例如采用 240/160 材料, 那么要求 $H_{cj} > 1600\text{kA/m}$ 和 $|\alpha(H_{cj})|$ 绝对值小于 $0.6\%/^{\circ}\text{C}$ 即可, 但是由于磁能积的降低, 导致永磁体用量将会加大, 到时需要考虑转子安放空间是否允许。

3 快速检测方法的研究

3.1 NIM-10000H 检测系统的分析研究

通过对实验室现有仪器 NIM-10000H 检测系统的使用,我们认为该仪器能够很好的测量出常温和高温曲线,能够很好的显示出磁体的各个参数值,对于想准确知道永磁材料的各个参数值的用户来说,该仪器如果价格(大约 20 万元人民币)不是问题,很显然是一个可以优先考虑的产品。但是对于电机用永磁体的要求来说,该仪器就存在一个很大的缺点,检测时间过长,对于高温曲线的测试来说,平均一块标准永磁体一条曲线大约需要 15 分钟,包括加温时间和测试时间,很显然这样的检测速度对于一台电机所需大量永磁体来说,若想准确知道所用的每块磁体是否都满足要求是不可能做到的。

在测试永磁体的过程中,我们发现在永磁体和电磁铁构成的磁路逐渐闭合的过程中, B 通道上积分器显示的数值逐渐增大,当永磁体被夹紧后, B 通道显示的数值稳定下来,并且保持不变。这时 B 通道显示的数值与将永磁体正向充磁完成、电流为零时显示的数值相差不大,变化范围在 2~6 之间。这就给我们一启示,为完成永磁体的快速检测,可以将正向充磁过程忽略,而采用计算上的修正,这样就可以通过在将永磁体夹紧后 B 通道上显示的数值来推算出该永磁体的剩磁 B_r 。

通过上述分析研究,我们初步提出的方法为:通过设计一装置来模拟永磁体在电机中,处于最高工作温度时有可能发生的最大去磁的实际工作情况,以考核永磁体在该工作情况下是否发生不可逆退磁。具体点说,就是将永磁体放在设计的装置中,加温到电机允许的最高工作温度(例如,SH 系列永磁体的最高工作温度定位 120°C),稳定后施加电机运行时有可能发生的最大去磁电流(例如,永磁同步电动机运行时最大去磁电流为 $I_h = (U + E)/X_d^{[4]}$),移去电流且冷却后检查该永磁体的工作磁通是否与加温前一样,来考核有无发生不可逆退磁。

但是由于电机种类繁多,不可能设计出通用的装置来模拟所有的电机,所以我们采用原有仪器中的电磁铁部分来模拟电机的工作状态,通过设计一磁化电源来施加退磁电流。下面对电磁铁和磁化电源部分进行详细阐述。

3.2 电磁铁

电磁铁^[36、37]是一种能产生较强磁场的装置。原理上它相当于一个带有空气隙的铁芯线圈，由于铁芯的饱和磁感应强度很高，因而能产生很强的磁场。图 3.1 所示的是一双轭型电磁铁。

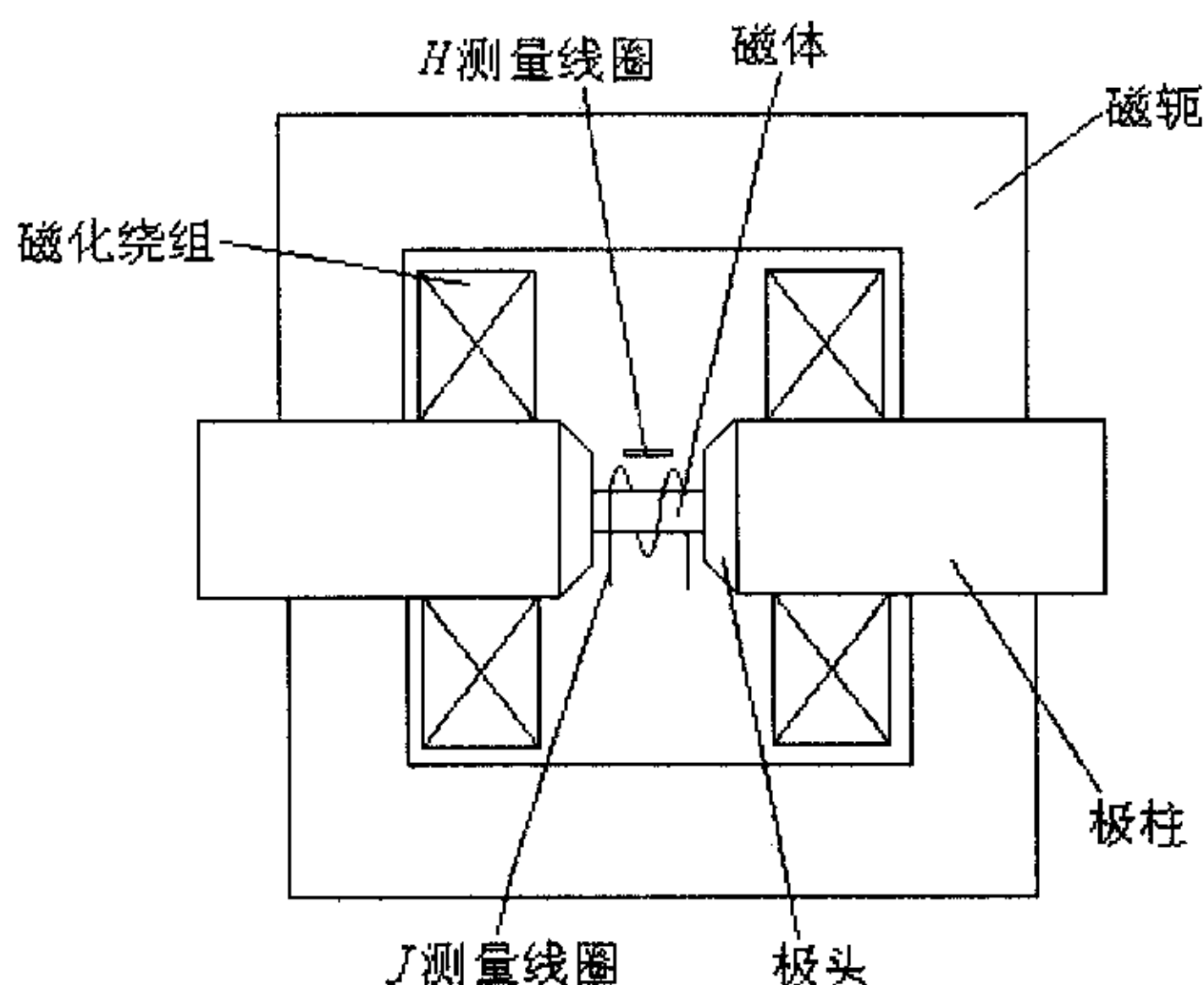


图 3.1 双轭型的电磁铁

为了能够准确测试稀土永磁材料，国家标准 GB/T3217—92《永磁（硬磁）材料磁性试验方法》^[36]中规定电磁铁应满足以下要求：

（1）磁轭、极柱和极头应由矫顽力不大于 100A/m 的软磁材料制成，其结构应对称。为了减小因磁通迅速变化而产生的涡流，磁轭最好是叠片铁心制成；为了测量不同厚度的永磁体，极间距离在 $0\sim 10\text{cm}$ 范围内应连续可调；

（2）极面应为平面，表面粗糙度参数 R_a 值应为 $3.2\mu\text{m}$ ；两极面应平行并与磁场方向垂直，如果两极面不平行，那么在夹紧永磁体的过程中，由于永磁体表面各部分受力大小不一样，永磁体很容易碎；

（3）磁化绕组的位置应尽量靠近磁体并互相对称，保证其轴线与极头轴线一致。

(4) 为了保证测量过程中的准确性, 在磁体、 B 测量线圈和 H 测量线圈所占的整个空间内, 电磁铁产生的磁场应足够均匀。因此极面几何尺寸必须满足下式:

$$D \geq d + 1.2L \quad (3.1)$$

$$D \geq 2.0L \quad (3.2)$$

式中: D ——圆形极面直径;

L ——极间距离;

d ——垂直于磁场方向均匀区的最大尺寸。

(5) 工作时, 极头中的磁通密度应比其饱和磁通密度低的多, 以保证极面近似于磁等位面, 一般选用铁钴合金极头以产生比纯铁极头更大的磁通密度;

(6) 因为所检测的都是矫顽力较高的稀土永磁材料, 所以应选择圆台形极头而不采用圆柱形极头, 虽然圆台形极头产生的磁场均匀区比圆柱形小, 但是产生的磁场强度要比圆柱形大。

3.3 磁化电源

测试过程中退磁磁场是由磁化电源提供的退磁电流产生的。在对稀土永磁材料进行测试时, 由于在装置的电磁铁中无法将其磁化到饱和, 所以一般先将其在开路下放到脉冲线圈中充磁到饱和后, 再放到磁化装置中测试。由于退磁场的作用, 此时永磁体的磁状态是在其退磁曲线的某一点上, 这就要求在测试中应预先施加足够大的正向磁化场, 在 GB/T3217-92《永磁(硬磁)材料磁性试验方法》^[36]中规定正向磁场强度应大于 200kA/m , 以使测试真正是从其剩磁点开始的。还有需要注意的是, 在施加反向磁场时, 电磁铁电流一般很大, 扫描速度就不能太慢, 由于磁滞, 即磁化的变化滞后于外磁场的变化, 使得测试速度或外磁化场扫描速度成为影响 H_0 测量结果的一个不可忽视的因素。因此在进行磁化电源设计时, 必须考虑到这些因素。

设计的磁化电源原理框图见图 3.2 所示。

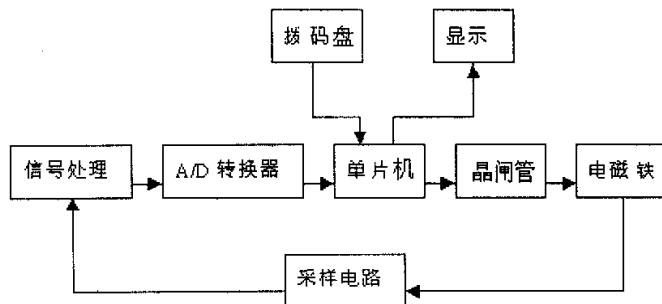


图 3.2 磁化电源原理框图

其工作原理为：

将采样电路得到的信号通过信号处理电路变为 0~10V 范围内的直流电压信号，再将此信号接入 A/D 转换器中，转换为数字信号后接入单片机。然后单片机再从拨码盘上读取给定值，与 A/D 转换器的值进行比较，控制单片机输出脉冲的时间来控制晶闸管的导通角来调节电磁铁线圈中的电流，从而完成磁场强度的变化。

磁化电源的硬件电路图（其中显示部分电路图见图 3.3 所示）见附录 B 所示。

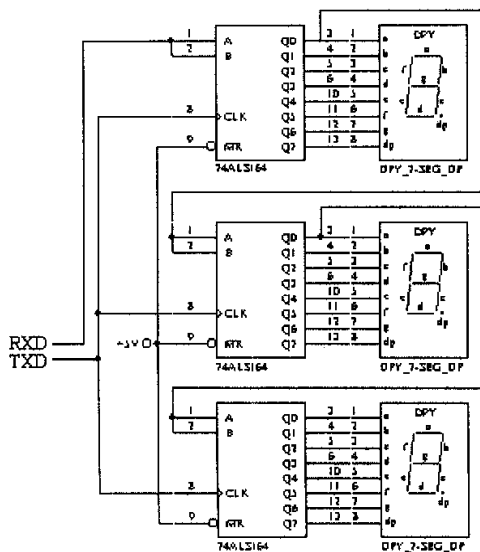


图 3.3 磁化电源显示部分电路图

下面就设计过程中涉及到的几个重点部分进行详细阐述。

(1) 采用电流传感器 WBI222E1 代替以前设计的 $75\text{m}\Omega$ 的分流器从主回路中检测电流的大小, 避免单机电源与主回路共地, 强电与弱电混在一起, 以防止危害到装置的稳定性。

(2) 主电路的换向电路。图 3.4 和图 3.5 分别是主电路的换向电路以及换向用继电器的控制驱动电路。

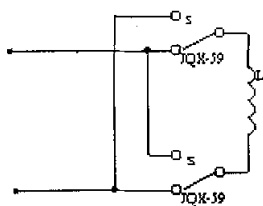


图 3.4 主电路的换向电路

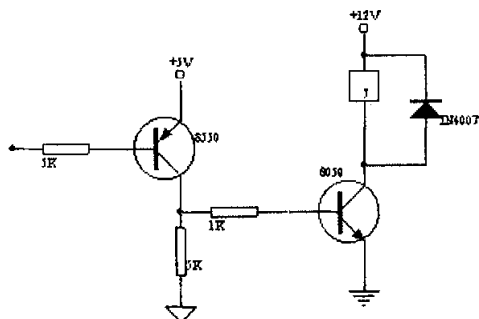


图 3.5 换向用继电器的控制驱动电路

(3) A/D 转换器的选取^[42, 43]。选用美国模拟器件公司生产的 12 位逐次逼近型 A/D 转换器 AD574。主要原理是: 将待转换的模拟输入信号与一个推测信号(由 D/A 转换器的输出获得)相比较, 根据推测信号是大于还是小于输入信号来决定是增大还是减小推测信号, 逐渐向模拟输入信号逼近。当推测信号与模拟信号相等时, 向 D/A 转换器输入的数字量就是对应模拟输入量的数字量。

AD574 是一个完整的 12 位逐次逼近型带三态缓冲器的 A/D 转换器, 它可以直接与 8 位、12 位或 16 位微机总线进行接口, 无需任何附加逻辑接口电路; 其内部还含有高精度的参考电压源和时钟电路, 即不需要任何外部电路和时钟信号的情况下完成一切 A/D 转换功能。它的转换速度最大为 $35\mu\text{s}$, 转换精度 $\leq 0.1\%$ 。

(4) 晶闸管的控制电路。首先来了解一下晶闸管的相关知识^[44]。

晶闸管是目前工业中实现大容量功率变换和控制的主要电力电子器件, 实现了弱电对强电的控制。其符号见图 3.6 所示, K 为阴极; A 为阳极; G 为门极。

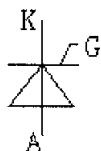


图 3.6 晶闸管的符号

晶闸管相当于一个可以控制接通的导电开关，其通和断的规律为：

- 1) 当晶闸管承受反向阳极电压时，不论门极承受何种电压，晶闸管都处于关断状态；
- 2) 当晶闸管承受正向阳极电压时，仅在门极承受正向电压的情况下晶闸管才能导通，正向阳极电压和正向门极电压两者缺一不可；
- 3) 晶闸管一旦导通，门极就失去控制作用，不论门极电压是正还是负，晶闸管保持导通，故导通的控制信号只需正向脉冲电压即触发脉冲即可；
- 4) 要使晶闸管关断，必须去掉阳极正向电压，或者给阳极加反压，或者降低正向阳极电压，使通过晶闸管的电流降低到一定数值以下。能保持晶闸管导通的最小电流，称为维持电流；
- 5) 当门极电压未加触发电压时，晶闸管具有正向阻断能力，它是一般二极管所不具有的。

本设计是通过控制晶闸管的导通角来改变电流的大小。晶闸管的选取主要是考虑其门极触发电压和电流的大小。本设计选取的晶闸管型号为 KP50，该晶闸管的基本参数为通态平均电流 $I_T=50\text{A}$ ，通态峰值电压 $U_{TM}\leq 2.4\text{V}$ ，维持电流 $I_H\leq 200\text{mA}$ ，门极触发电流 $I_{GT}\leq 200\text{mA}$ ，门极触发电压 $U_{GT}\leq 3.5\text{V}$ 。晶闸管与触发电路的连接电路如图 3.7 所示。

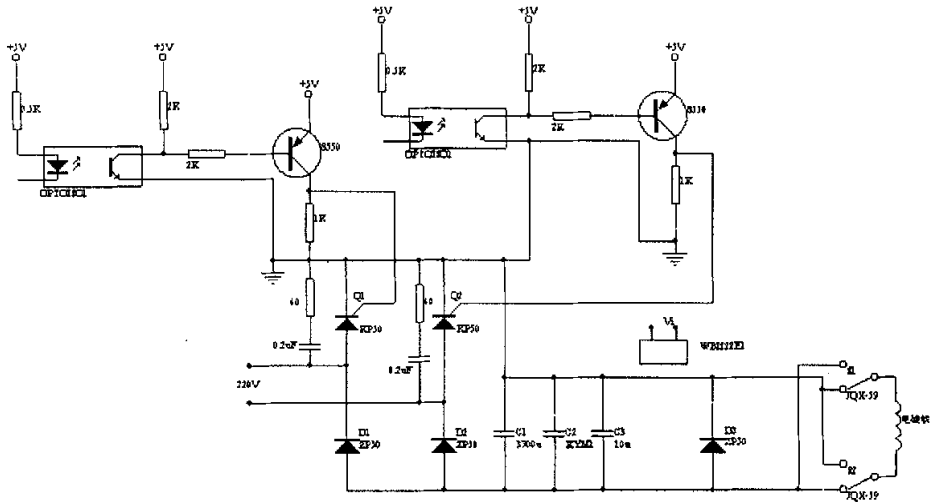


图 3.7 晶闸管与触发电路的连接电路

(5) 为减小干扰，在单片机的输入采用了通道隔离技术，除了具有一般的隔离器件，抑制噪声的作用外，还可以有效的抑制尖峰脉冲和多种噪声。

(6) 软件设计^[45]。软件流程图如图 3.8 所示。

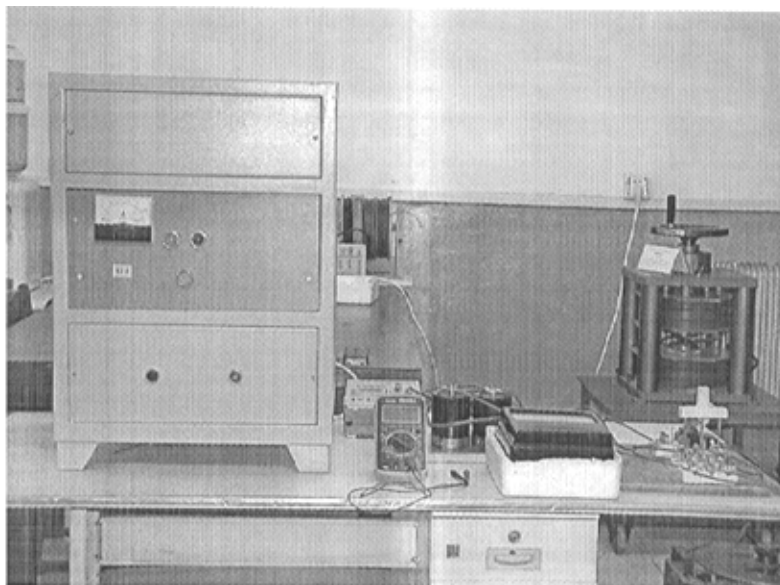


图 3.9 磁化电源实物图

3.4 初步实验

利用设计的磁化电源进行初步实验。

由于电流大小还未能准确确定，所以想通过实验的方法看是否能确定永磁体退磁所需施加电流的大小。对 3 块标准试样的磁体在 120℃ 下进行了实验，初步判断一下退磁电流的大小与试样退磁情况之间的关系。

表 3.1 3 块标准试样的磁体施加不同电流后的退磁情况

代号	充磁后测得 磁通值	施加不同电流后测得磁通值			
		3A	4A	5A	6A
At1-35	20	19	10	-11	-12
Xh5-35	20		1	0	-9
Xh2-38	21	20	-4	-10	

由表 3.1 所示的数据，我们可以看出，这 3 块磁体在拐点附近需要施加的退磁电流大小分别为 4~5A, 5A 和 3~4A。可见，对于不同的永磁体来说，即使形状完全相同，所需退磁电流的大小也不相同。在探讨电流大小如何确定之前，我们先来介绍一下电子积分器的设计。

3.5 电子积分器

电子积分器^[37, 46]的特点是，能对缓慢变化的磁场进行连续积分运算，也就是能完成对测 J 和测 H 线圈两端电动势的积分。图 3.10 所示的是简单的 RC 积分电路。

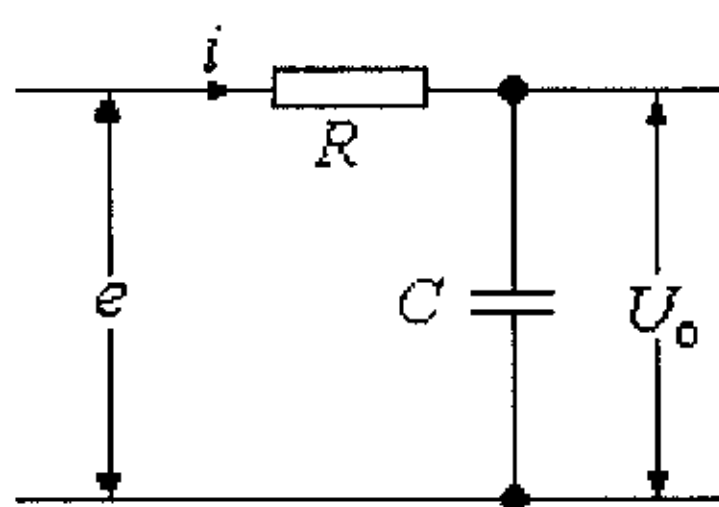


图 3.10 简单的 RC 积分电路

设在 RC 回路中电流为 i ，则电路方程为：

$$e = iR + \frac{1}{C} \int i dt \quad (3.3)$$

$$U_0 = \frac{1}{C} \int i dt \quad (3.4)$$

当电路的时间常数 $RC \gg T$ (T 为电动势 e 的周期) 时， $iR \gg \frac{1}{C} \int i dt$ ，

所以

$$e \approx iR \quad (3.5)$$

将式 (3.5) 代入式 (3.4)，得

$$U_0 = \frac{1}{RC} \int e dt \quad (3.6)$$

由式 (3.6) 可以看出, 当电路时间常数 RC 很大时, 输出电压 U_o 近似与输入电压的积分成正比。但若 RC 值太大, 则会使输出信号减小, 导致测量灵敏度降低。而当 RC 不是很大时, 这个积分也存在着误差。

为了提高积分精度, 我们采用电容反馈式电子积分器, 如图 3.11 所示。

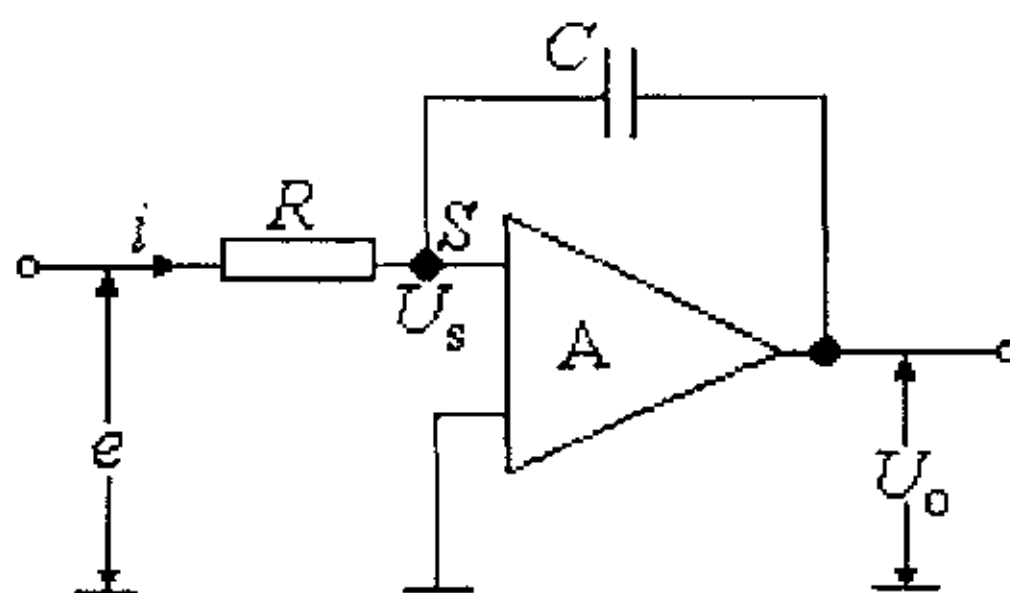


图 3.11 电容反馈式积分电路

这种积分器由运算放大器、电容和电阻组成。由于运算放大器的输入阻抗极高, 可以认为流过电阻 R 的电流等于电容 C 的充电电流, 这样保证了充电过程中电容 C 的电流维持恒定。运算放大器电路方程为

$$e = iR + \frac{1}{C} \int i dt + U_o \quad (3.7)$$

$$U_o = -KU_s \quad (3.8)$$

$$e = iR + U_s \quad (3.9)$$

解由式 (3.7)、(3.8) 和 (3.9) 构成的方程组, 得

$$U_o = -\frac{K}{(1+K)C} \int i dt \quad (3.10)$$

由于运算放大器的开环增益 K 很高, 输出电压又通过电容反馈到反相输入端, 形成很强的电压并联负反馈, 迫使 S 点电位接近地点电位, 即 S 点为“虚地”点, 也就是

$$U_s \approx 0 \quad (3.11)$$

将式 (3.11) 代入式 (3.9), 得

$$e \approx iR \quad (3.12)$$

将式 (3.12) 代入式 (3.10)，得

$$U_o \approx -\frac{K}{RC(1+K)} \int e dt \quad (3.13)$$

又因为运算放大器的开环增益 K 很高，所以由式 (3.13) 得

$$U_o \approx -\frac{1}{RC} \int e dt \quad (3.14)$$

从式 (3.14) 可以看出，电容反馈式电子积分器是一个比较理想的积分器，它很容易实现输出电压 U_o 为输入信号 e 对时间 t 的积分。

与简单 RC 积分器相比，电容反馈式电子积分器因电容 C 折合到输入端的等效电容为 $(1+K)C$ ，故等效的积分时间常数为 $RC(1+K)$ 。这样，即使 R 和 C 的值不能取得很大，但因为运算放大器开环增益很高，所以也很容易满足等效积分时间常数大于信号周期的条件，因此保证了电子积分器的积分精度高，而且即使是测量缓慢变化的信号，也不会由于积分不完整而引入误差。

图 3.12 是根据上述原理设计的电子积分器的主要电路图，包括积分电容的复位电路及量程转换电路。

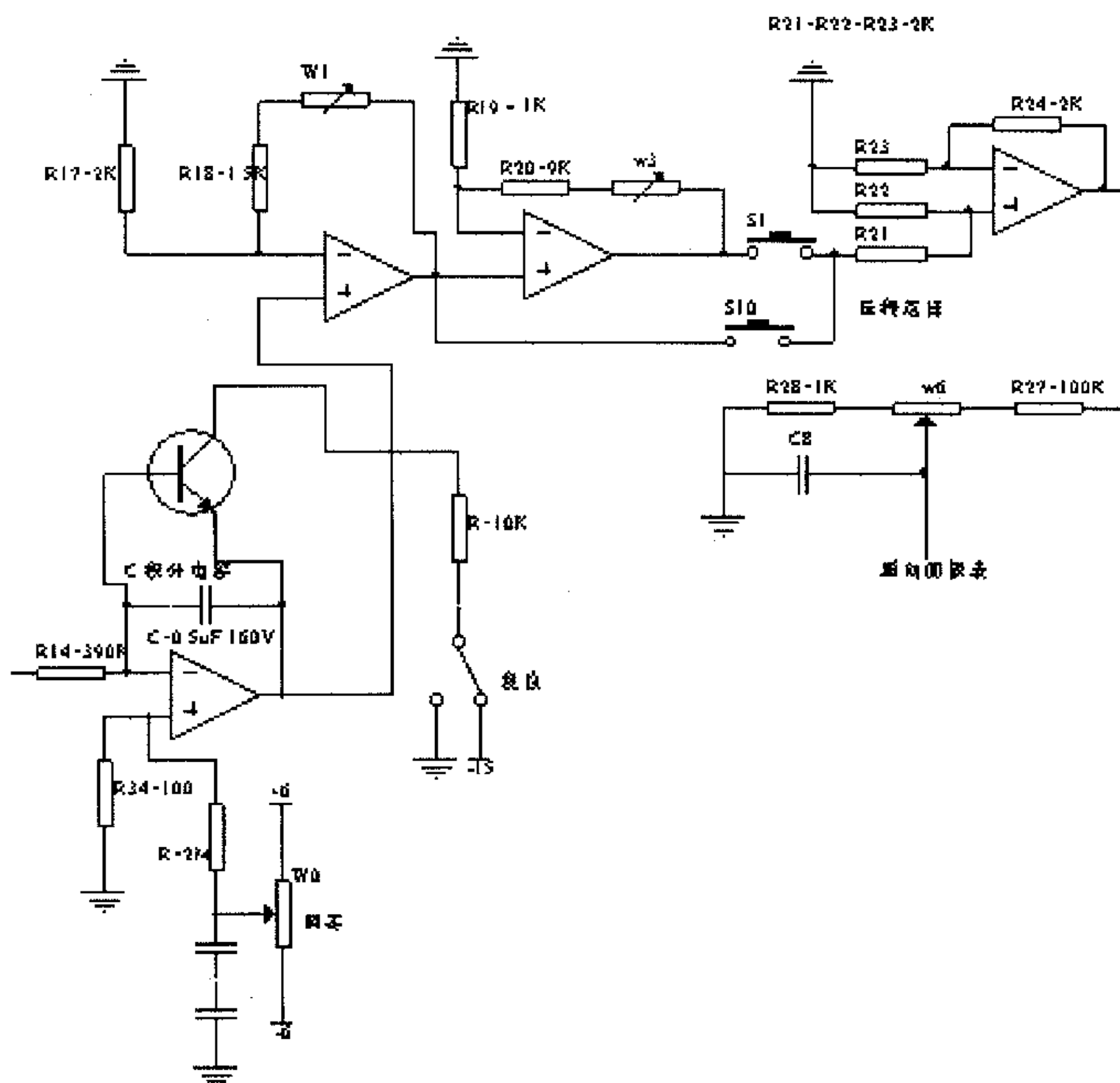


图 3.12 实际应用的电子积分器电路图

虽然积分器的漂移是不可避免的，但是我们在使用积分器时，应尽量克服积分器漂移所造成的对测试结果的影响。每次测试前都应注意积分器的零点漂移情况，每次都应调节积分器，尽量使其漂移最小，特别是更换测量线圈后，应等待 1~2 分钟，使其达到热平衡后，再调节漂移；积分器开路也会造成积分器的严重漂移，因而积分器尽量不要开路。

下面通过前面介绍的电磁铁、磁化电源和积分器，我们来进一步探讨电流的确定问题。

3.6 电流的确定

采用上述电磁铁，在极间气隙为 10mm 时，用特斯拉计测出通入不同的电流产生的磁场大小见表 3.2 所示。由表可以看出，在采用该电磁铁和该气隙大小的情况下，通入的电流每增加 1A 时，磁感应强度相应的增加 0.15T，也就是 1.5kGs。

表 3.2 电流大小与磁场的关系

电流 (A)	1	2	3	4	5	6	7	8
磁场 (T)	0.153	0.317	0.460	0.604	0.734	0.855	1.000	1.102
磁场 (kGs)	1.53	3.17	4.60	6.04	7.34	8.55	10.00	11.02

我们选取 9 块磁体进行实验。首先我们利用 NIM-10000H 测出它们的 $J-H$ 和 $B-H$ 曲线，得出磁性能参数值，见表 3.3 所示。在做实验的过程中发现，积分器的显示数值和所测出的剩磁是一一对应的关系，比如，当积分器的显示数值为 764 时对应的剩磁大小为 12.05T，由表 3.3 可以看出，它们的数值之间存在一定的比例关系。

设永磁体常温下的实际剩磁为 B_{r0} ；120 °C 时的剩磁为 B_r ；根据积分器显示数值推算出的常温下剩磁为 B'_{r0} ；取 $|\alpha(B_r)| = 0.11 \% / ^\circ\text{C}$ （根据测试结果 9 块磁体的普遍值），推算出永磁体 120 °C 时的剩磁为 B'_r ； $\mu_r = 1.05$ ，那么 120 °C 时退磁曲线为直线时的矫顽力 $H'_{cB} = B'_r / 1.05$ 。

根据电机用的要求，即拐点位置不超过 $10\% B_r$ ，那么根据退磁曲线在 120 °C 时为直线时矫顽力为 H'_{cB} ，可知 $10\% B_r$ 拐点处的磁场强度为 $0.9 H'_{cB}$ ，这样就可以对永磁体施加使之产生 $0.9 H'_{cB}$ ，即 $0.9 B'_r / 1.05$ 大小的磁场所需的退磁电流。

具体办法为：根据积分器显示的数值和比例关系推算出常温下 B'_{r0} ，再根据温度系数推算出高温下的 B'_r ，由 B'_r 推算出高温下的 H'_{cB} ，算出 $0.9 H'_{cB}$ 。按照表 3.2 所示的关系，根据推算出的 B'_r 的大小来施加电流进行测试，测试完待样品冷却后看积分器的显示值，如果明显减小，说明永磁体的拐点位置大于 $10\% B_r$ ，反之，则小于 $10\% B_r$ 。表 3.3 是对来自 4 个厂家的 9 块磁体进行测试的结果。

表 3.3 9 块样品的实测值与实际值的比较

样品	B_{i0} kGs	积分 器显 示值	B'_{i0} kGs	B_{ri} kGs	B'_{ri} kGs	H'_{cB} kOe	$0.9H'_{cB}$ kOe	I A	样品冷却 后积分器 的显示值	120°C 时样品 实际拐 点位置
Z1	11.83	750	11.83	10.63	10.59	10.08	9.08	6.05	550	7.1%
Z2	11.85	748	11.80	10.56	10.57	10.07	9.06	6.04	710	直线
B1	12.07	766	12.08	10.80	10.82	10.30	9.27	6.18	-270	17.3%
B2	12.05	761	12.00	10.67	10.75	10.24	9.22	6.15	46	24.0%
S1	12.07	767	12.10	10.79	10.84	10.32	9.29	6.19	745	直线
S2	11.9	756	11.92	10.64	10.67	10.16	9.14	6.09	733	直线
61	12.05	764	12.05	10.82	10.79	10.28	9.25	6.17	-70	12.5%
62	12.11	768	12.11	10.89	10.84	10.32	9.29	6.19	-45	13.4%
63	11.97	757	11.94	10.78	10.69	10.18	9.16	6.11	-56	12.0%

从表 3.3 的实测结果来看, 在对 9 块永磁体施加退磁电流后, 其积分器显示值与起始时的显示值相差很大。对于 120°C 时拐点位置大于 10% B_r 的样品来说, 冷却后的显示值都已经出现负值, 分析其原因可能是因为在实验过程中已反向充磁。

对于在 120°C 下退磁曲线为直线的 Z2、S1 和 S2 来说, 施加退磁电流前后, 积分器显示值按理论上应该是保持不变, 但是现在出现明显的误差, 积分器显示值最大相差达 38, 究其原因可能是与材料的本身有关, 因为该永磁体的退磁曲线并不是理想的直线, 而是在直线的起始部分有突出, 如图 3.13 所示。如果退磁曲线不是理想的直线, 那么在进行推导的过程中会导致推算的电流值偏大。

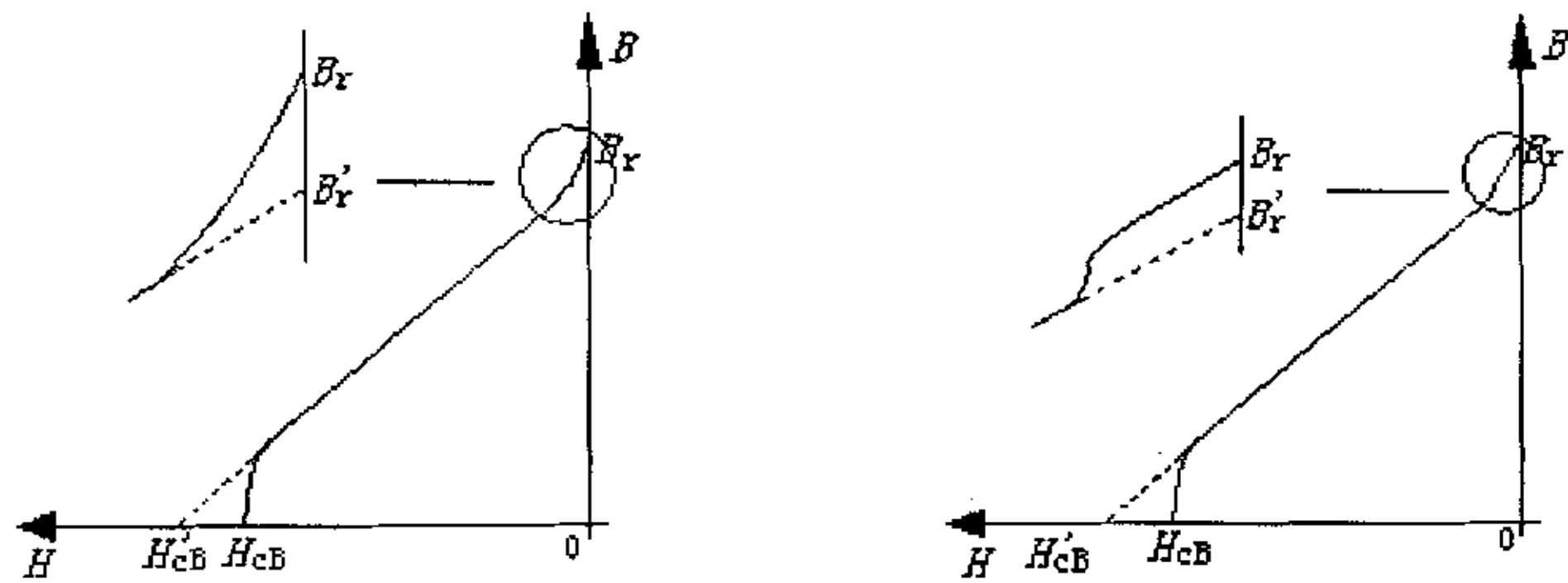


图 3.13 起始部分有突出的退磁曲线示意图

还有一个很重要的原因，由于在测量过程中是闭路测量，永磁体在电磁铁极头间被夹紧后，磁路的结构会发生改变，相应的磁场大小及分布都会发生改变。永磁体放入电磁铁极头后，由于永磁体的磁导率要比无磁体时也就是空气隙时大的多，因此产生同样大小的磁场所需电流就会相应的减小。也就是说，表 3.2 中所施加的电流要比实际的电流大，这也是 Z1 永磁体拐点位置小于 $10\%B_r$ ，而实测退磁现象明显的原因。

到目前为止，退磁电流大小的确定还有待进一步的探讨。

3.7 实测磁通的方法

快速检测方法需要逐步的探索，我们在施加一定退磁电流的基础上，还自己缠制单线圈，利用单线圈进行测量，通过手动来逐步施加电流的大小，利用积分器来显示磁通值，看实测磁通的方法是否可行。

将永磁体放入电磁铁之间，套入线圈，连接线圈的积分器会有一定的读数 ϕ ，在将电磁铁夹紧的过程中，积分器的读数 ϕ 会逐渐的增大。原因在于将线圈套入磁体后，通过线圈的磁通，除了通过磁体面积 A_1 的主磁通之外，还有通过面积 $A_2 - A_1$ 的漏磁通，漏磁通方向与主磁通方向相反；在将电磁铁夹紧的过程中，随着永磁体与电磁铁极头之间气隙的减小，漏磁也在逐渐的减小，所以积分器的读数就会逐渐的增大。将电磁铁夹紧以后，永磁体的磁通全部都集中在电磁铁的回路中，此时积分器的显示值 ϕ 就可以认为是永磁体的磁通值。

对电磁铁施加电流 I 后产生的磁场与永磁体产生的磁场方向相反，在这一永磁体实行退磁的过程中，积分器的读数 ϕ 会逐渐的减小。减小的原因分为两部分：一是由于永磁体本身的退磁；二是由于线圈的面积大于永磁体的面积，穿过线圈多余部分的磁通是由退磁电流引起的，方向与主磁通方向相反。随着所施加电流的逐渐增大，永磁体会沿着退磁曲线逐渐下降，而与主磁通方向相反、由电流引起的磁通也会逐渐的增大，二者的综合作用使得穿过线圈的磁通值下降很快，这时积分器显示的数值就不能真实的反映永磁体自身的磁通变化。如果线圈刚好套进磁体，也就是线圈的面积 A_2 和磁体的面积 A_1 相等，那么在施加退磁电流的过程中，积分器显示的数值变化就可以认为是永磁体本身的磁通变化。

由于线圈的面积不可能和磁体的面积完全相等，现采取计算上的修正。

设 B_1 为磁体的剩磁， A_1 为磁体的面积， B_2 为电磁铁施加电流时产生的退磁磁感应强度， A_2 为测试线圈的面积， ϕ 为积分器的显示值，那么

$$\phi = B_1 A_1 - B_2 A_2 \quad (3.15)$$

令

$$B_2 = B_1 x \quad (x \text{ 为退磁程度系数}) \quad (3.16)$$

$$\phi = y B_1 A_1 \quad (y \text{ 为加退磁电流后积分器的显示值占 } B_1 A_1 \text{ 的比值}) \quad (3.17)$$

将式 (3.16) 和 (3.17) 代入式 (3.15)，得

$$y B_1 A_1 = B_1 A_1 - \frac{A_2}{A_1} B_1 A_1 x \quad (3.18)$$

整理式 (3.18)，得

$$y = 1 - \frac{A_2}{A_1} x \quad (3.19)$$

下面就标准磁体，其直径为 d_1 ，不同的线圈，其直径为 d_2 进行讨论：

(1) 令 $d_1=10\text{mm}$, $d_2=11.18\text{mm}$

那么

$$\frac{A_2}{A_1} = \left(\frac{d_2}{d_1}\right)^2 = 1.25$$

(2) 令 $d_1=10\text{mm}$, $d_2=11.4\text{mm}$

那么

$$\frac{A_2}{A_1} = \left(\frac{d_2}{d_1}\right)^2 = 1.3$$

(3) 令

$$d_1=10\text{mm}, d_2=11.83\text{mm}$$

那么

$$\frac{A_2}{A_1} = \left(\frac{d_2}{d_1}\right)^2 = 1.4$$

(4) 令

$$d_1=10\text{mm}, d_2=12.65\text{mm}$$

那么

$$\frac{A_2}{A_1} = \left(\frac{d_2}{d_1}\right)^2 = 1.6$$

根据上述过程，我们给出不同比值的线圈和磁体在不同剩磁的条件下 y 值的大小，见表 3.4 所示。

表 3.4 线圈和磁体大小不同的比值在不同剩磁的条件下 y 值的大小

<div style="text-align: center;"> $\begin{matrix} & & A_2/A_1 \\ & y & \\ x & & \end{matrix}$ </div>					
	1.25	1.3	1.4	1.5	1.6
1.0	-0.25	-0.3	-0.4	-0.5	-0.6
0.9	-0.125	-0.17	-0.26	-0.35	-0.44
0.8	0	-0.04	-0.12	-0.20	-0.28
0.7	0.125	0.9	0.02	-0.05	-0.12
0.6	0.25	0.22	0.16	0.10	0.04

具体测试过程为：

根据要求磁体加热到 120°C 之后，先用积分器测出磁体施加退磁电流前的闭路磁通 ϕ_1 ，然后根据实验所用的线圈及上述公式算出 ϕ ，也就是积分器显示到该值时，停止施加退磁电流，最后将退磁电流平稳的逐渐减小到零，这时看积分器上所显示的值 ϕ_2 ，如果与测量前的磁通值 ϕ_1 相等或者相差不大（根据测试认为是 5% 范围内），说明该磁体的拐点位置要小于 $10\%B_r$ ，符合要求；如果显示的磁通 ϕ_2 与 ϕ_1 差很多，那么说明该磁体的拐点位置大于 $10\%B_r$ ，不符合要求。

3.8 实验

实验所测试的磁体 $d_1=10\text{mm}$ ，缠制的单线圈 $d_2=11.18\text{mm}$ ，即 (1) 所示数据，比值为 1.25，根据测试要求 10%，所以 $x=0.9$ ，从而 $y=-0.125$ ，现根据上述测试过程给出所测磁体中的某两块磁体的测试结果，见表 3.5 和表 3.6 所示。实际做实验时，分别测试了所计算的 ϕ 值附近的一些值，即表中所示的 ϕ' ，从而保证了实验的可靠性。

表 3.5 磁体 T1 的测试结果

$\phi_1=276$ ($\phi=-35$)						
ϕ'	40	18	-8	-35	-42	-56
ϕ_2	272	271	272	272	270	262

表 3.6 磁体 X1 的测试结果

$\phi_1=292$ ($\phi=-37$)					
ϕ'	45	20	-10	-37	-49
ϕ_2	292	290	291	270	243

由表我们可以看出，该方法验证了磁体 T1 是合格的产品，在所计算的 ϕ 值附近，它的磁通前后没有发生明显的变化，符合规定的要求，这与我们利用仪器 NIM-10000H 所测试的退磁曲线拐点为 5%（小于 10%）的结果相符合；而磁体 X1 在所计算的 ϕ 值附近，它的磁通前后发生了明显的变化，与利用仪器所测试的退磁曲线拐点为 20%（大于 10%）的结果，即为不合格产品相符合。

实验过程中难免存在各种各样的误差，比如积分器的漂移等，所以实验数据的准确性还有待进一步的完善，但是通过实验，我们验证了该方法是可行的，只是该方法的检测速度很慢，需要逐块的测量。

3.9 本章小结

通过对原有仪器的使用和研究，我们逐步摸索出施加退磁电流和实测磁通的方法，这两种方法都已经经过实验验证，理论上和实际上都可行，只是检测速度都不够快。施加退磁电流的方法需要事先确定电流的大小，但是到目前为止，由于计算过程中涉及到漏磁的问题，所施加退磁电流的大小还难以准确确定。实测磁通法不需要事先确定退磁电流的大小，而且通过实验证明可以利用修正系数进行计算上的修正，从而有效的消除了由于测量线圈和被测磁体面积不同所带来的误差。

4 工作温度下改变磁体工作点的快速检测方法

4.1 引言

第 3 章所阐述的改进的方法,总的来说就是在工作温度下施加退磁电流以模拟电机实际工作情况的方法,此方法虽然可以达到事先检测永磁体的热稳定性以剔除不合格产品的目的,但由于要模拟电机的实际磁路,装置仍嫌复杂,而且要在高温下逐块施加退磁电流,仍然费时。虽然此方法比过去的检测装置的检测速度有所提高,但仍需进一步探讨新的方法。

本章将要阐述的方法是在不施加退磁电流情况下,用改变外磁路结构的办法来改变永磁体的工作点,以确定永磁体退磁曲线拐点的位置。

4.2 磁路计算原理

永磁电机与电励磁电机的最大区别在于它的励磁磁场是由永磁体产生的^[4]。永磁体在电机中既是磁源,又是磁路^[4, 47]的组成部分。为了简化分析计算,目前在许多工程问题中常采用“场化路”的方法,将空间实际存在的不均匀分布的磁场转化成等效的多段磁路,并近似认为在每段磁路中磁通沿截面和长度均匀分布,将磁场的计算转化为磁路的计算,然后用各种系数来进行修正,使各段磁路的磁位差等于磁场中对应点之间的磁位差。

工程上有两种方法进行磁路计算:用计算机进行解析法求解和图解法求解。当退磁曲线具有拐点和磁路饱和程度较高时,用计算机解析法求解不够直观,故采用图解法。用图解法直接画出永磁体工作图,可以清晰的看出各种因素的影响程度和工作点与拐点之间的关系。

用图解法求解等效磁路就是求出回复线与合成磁导线的交点,如图 4.1 所示。

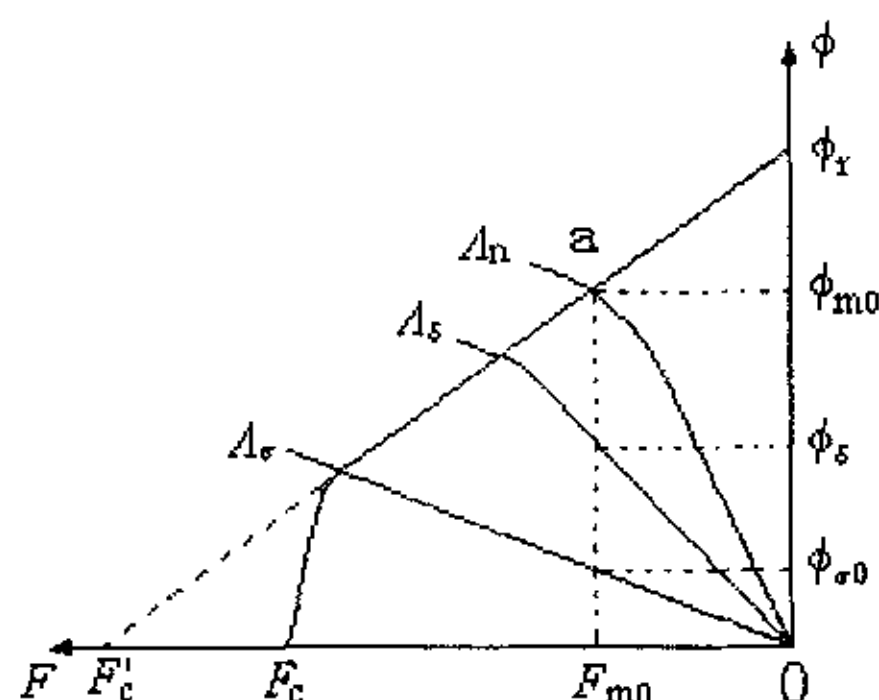


图 4.1 空载时等效磁路图解法

永磁电机在空载运行情况下，外磁路的 $\phi_m = f(F_m)$ 曲线反映的是主磁路和漏磁路总的磁化特性，也可以表示成 $\Lambda_n = f(\phi_m)$ 曲线，在磁路计算中称为合成磁导线。而 ϕ_m 和 F_m 是由永磁体作为磁源所提供的，二者关系由回复线所决定的。

对图 4.1 所示的图解法作一详细介绍。作图时先在 $\phi-F$ 坐标中画出永磁体的回复线，再根据外磁路的结构、尺寸及饱和程度画出主磁导线 $\Lambda_s = f(\phi_m)$ ，即主磁路的磁化特性曲线 $\phi_s = f(\sum F)$ ，并根据漏磁通情况，画出漏磁导线 $\Lambda_\sigma = f(\phi_m)$ ，即漏磁路的磁化特性曲线 $\phi_\sigma = f(\sum F)$ 。然后将二条磁导线沿纵轴方向相加，得合成磁导线 $\Lambda_n = f(\phi_m)$ ，即外磁路合成磁化特性曲线 $\phi_m = f(\sum F)$ ，它与回复线的交点 a 即为空载时永磁体的工作点。图中纵坐标表示永磁体所提供的磁通 ϕ_{m0} ，横坐标表示永磁体所提供的磁动势 F_{m0} ，a 点的垂线与 Λ_s 和 Λ_σ 线的交点分别表示空载主磁通 ϕ_{s0} 和空载漏磁通 $\phi_{\sigma0}$ 。

从上面的 $\phi-F$ 坐标图中，可以很清楚地看到由于磁路结构的改变，负载线的变化导致工作点在 $\phi = f(F)$ 曲线上的变化情况。在设计计算中为了便于对各种永磁材料和外磁路进行比较，更常采用 $B-H$ 坐标，相应地将磁导 Λ 乘以 h_M/A_m 得到其对应值，称为比磁导 P_c ， A_m 和 h_M 分别为磁体的面积和磁化方向长度。在确定永磁体工作点的时候，必须考虑磁体的形状及其在磁路中的位置，也就是磁体的退磁作用，可以说比磁导 P_c 与磁体的退磁因子 N 是关系很密切的两个物理量。在已知比磁导 P_c 的情况下，在 $B-H$

坐标中，我们可以根据公式 $\theta = \arctg P_c$ 来确定永磁体的负载线， θ 为负载线与 H 轴的夹角，负载线与退磁曲线的交点 a 就是永磁体的工作点，见图 4.2 所示。

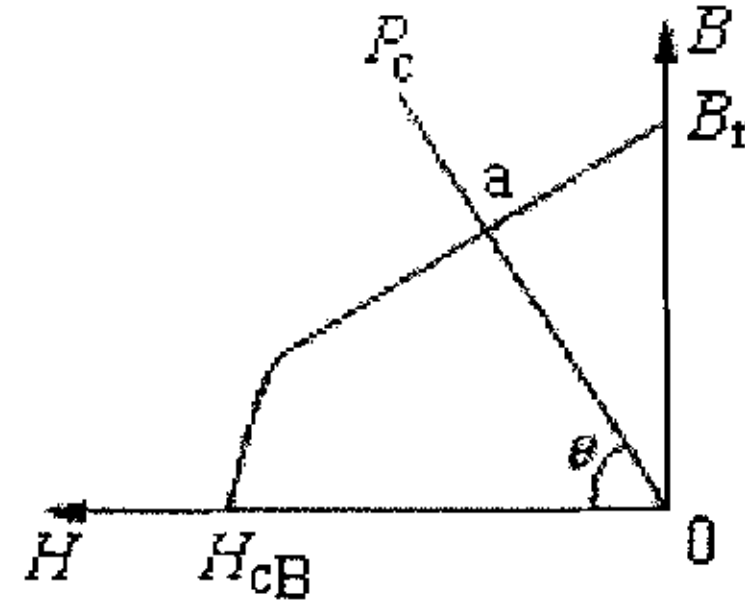


图 4.2 $B-H$ 坐标中永磁体工作点示意图

可见，本方法能否实现的关键就是如何准确确定比磁导 P_c 值。对于比磁导 P_c 的计算，可以分为两种情况：一是孤立磁体的 P_c 值计算；二是在磁路中磁体的 P_c 值计算。

对于图 4.3 所示的孤立磁体，比磁导 P_c 的计算公式分别为：

$$P_c = \mu_0 \frac{h_M}{R^2} \sqrt{R(R + h_M)} \quad (\text{圆柱体}) \quad (4.1)$$

$$P_c = \mu_0 \frac{h_M}{ab} \sqrt{\pi[ab + (a + b)h_M]} \quad (\text{长方体}) \quad (4.2)$$

式中各参数代表的含义见图 4.3 所示。

根据式 (4.1) 和式 (4.2) 计算所得实验测试用的 $\phi 10 \times 10 \text{mm}$ 标准样和 $45 \times 48 \times 9.5 \text{mm}$ 大块磁体的 P_c 值分别为：4.35 和 0.43。

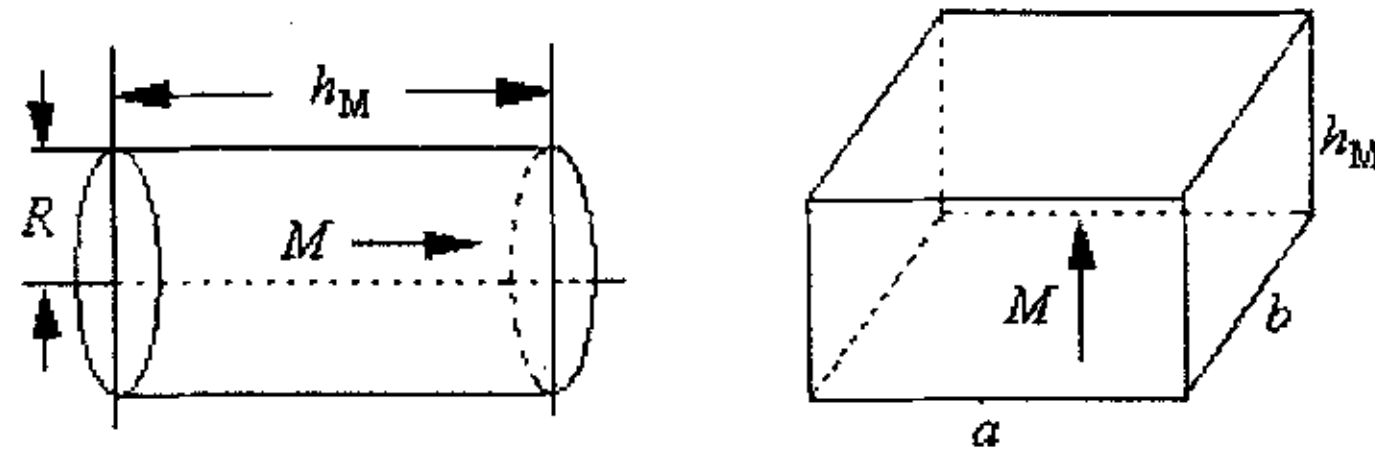


图 4.3 圆柱体和长方体永磁体

对于图 4.4 所示的磁路， P_c 值的计算较为复杂：

$$P_c = \frac{\mu_0 \sigma h_M A_g}{k_s L_g A_m} \quad (4.3)$$

式中： A_g ——气隙的面积；

L_g ——气隙的长度；

σ ——漏磁系数；

k_s ——磁路饱和系数。

σ 和 k_s 需要用电磁场计算或磁路计算得出，并用实验值加以修正。若改变图 4.4 中气隙的大小，则式 (4.3) 中的 σ 和 L_g 将发生变化， P_c 值的大小也会相应地发生变化，工作点的位置就会沿着退磁曲线上下变化。

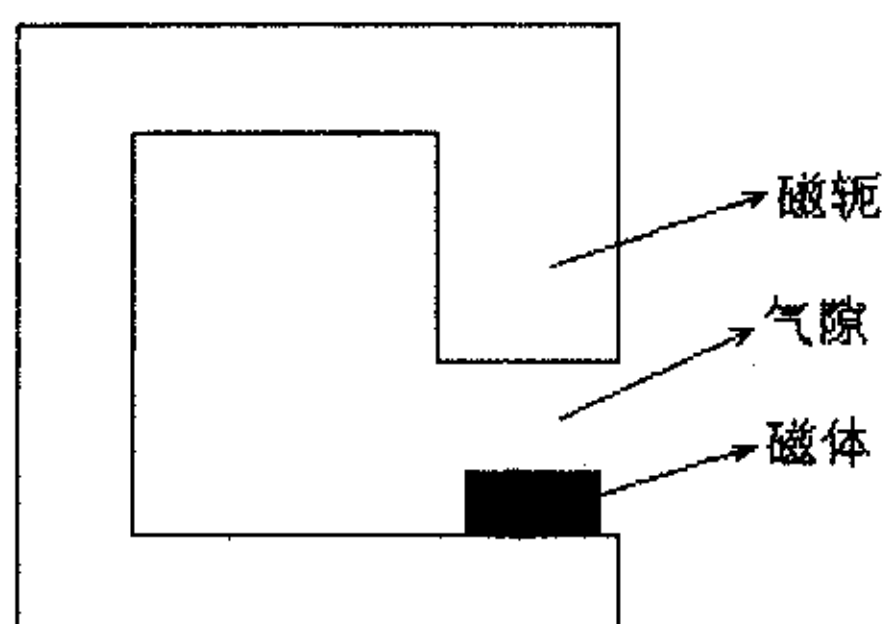


图 4.4 磁路结构图

4.3 检测原理

根据上述原理设计一如图 4.4 所示的装置。如果改变气隙的大小，整个磁路结构的比磁导线的斜率就会发生变化，工作点也会相应沿着退磁曲线来回变化。在高温情况下，永磁体退磁曲线将发生弯曲，如果永磁体的工作点始终在直线段移动，则加温后永磁体不会失磁；如果工作点落在拐点以下部分，则永磁体就会失磁。永磁体工作点改变示意图见图 4.5 所示。

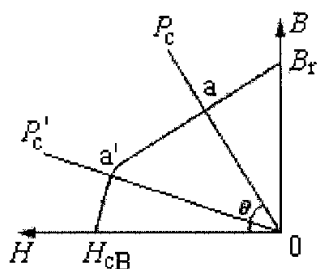


图 4.5 永磁体工作点改变示意图

为了满足课题的要求，即实现高温下永磁体磁性能的快速检测，我们把设计的这一装置放置在恒温箱内。恒温箱的可调温度范围为室温到 200°C ，以便能够满足不同牌号的永磁体在不同工作温度下的检测。

实现方法为：在实际测量时，首先测量永磁体常温下的开路磁通，然后放在装置中，按照永磁体的工作点情况，调整气隙的大小，在恒温箱中加温至要求的工作温度，过一段时间后取出永磁体待冷却后测量其开路磁通，看磁通值是否发生变化。如果磁通值基本保持不变，或是变化很小，说明没有发生失磁，产品合格；反之则产品不合格。进一步还可以在恒温箱中同时放置多块尺寸和性能相同的永磁体，这样可以做到一批产品同时测量，检测速度就会大大提高。

4.4 检测结果与对比分析

通过本方法所设计的检测装置，我们对 17 块长方体型的 $45 \times 48 \times 9.5\text{mm}$ 的大块永磁体进行了测量。首先考虑的是，永磁体在恒温箱中放置多长时间，既不会浪费时间，它的磁性能又能达到稳定状态。针对这个问题，我们分别对 1 小时、1.5 小时、2 小时、2.5 小时和 3 小时的 17 块永磁体进行了检测分析，经比较分析认为 2 小时为最佳时间。然后我们分别对永磁体在开路情况下、气隙分别为 3cm、2cm 和 1.5cm 四种情况下进行了测试试验。在 120°C 时处于不同情况下所测试的永磁体的磁通损失情况见表 4.1 所示。

表 4.1 120°C 时处于不同情况下的永磁体磁通损失情况

牌号	常温下 磁通值	开路保温 2 小时 冷却后测得值	拐点位置	气隙=3cm	气隙=2cm	气隙=1.5cm
at35-1	560	494	16.24	551/554	554/556	552/557
at35-3	561	534	10.43	554/553	552/558	555/556
at35-4	557	530	13.62	558/552	554/552	554/556
at38-1	587	396	47.15	460/475	467/489	504/542
at38-3	582	420	42.28	496/482	513/542	506/562
at38-4	586	397	39.58	468/486	473/504	484/536
xh35-3	592	441	40.88	527/506	518/580	544/573
xh35-4	588	538	19.09	577/552	567/578	577/581
xh38-1	619	513	18.40	570/531	559/573	579/593
xh38-2	621	497	23.11			
xh38-3	618	497	20.80	564/538	587/597	612/593
th35-1	588	517	30.17			
th35-2	584	526	32.34	567/546	553/542	566/563
th35-4	585	468	42.34	542/509	516/531	549/564
th38-1	594	558	31.93	580/543	573/568	583/579
th38-2	592	563	30.13	580/548	569/552	580/582
th38-4	603	425	21.85	513/507	555/571	549/559

根据表 4.1 所示的数据进行比磁导 P_c 值的计算。在计算中, 关键值漏磁系数 σ 大小的确定是采用 Ansoft 二维场软件计算分析, 结果分别见图 4.6、图 4.7 和图 4.8。从图中可以看出, 在气隙长度分别为 3cm、2cm 和 1.5cm 的情况下, 漏磁系数 σ 分别为 1.26、1.20、1.05, 从而计算出 P_c 分别为 0.48、0.91、1.51; 在永磁体的拐点分别为 $10\%B_r$ 、 $20\%B_r$ 、 $30\%B_r$ 、 $40\%B_r$ 和 $50\%B_r$ 的情况下, 工作点恰好处于拐点时的 P_c 值分别为 0.12、0.21、0.45、0.7 和 1.05。

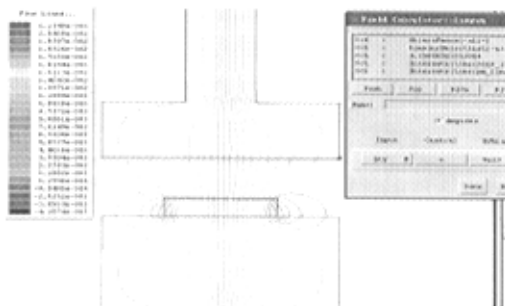


图 4.6 气隙为 3cm 时场分析结果

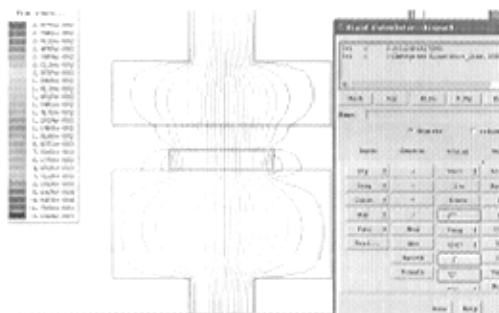


图 4.7 气隙为 2cm 时场分析结果

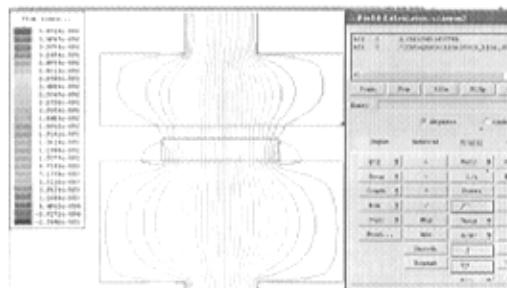


图 4.8 气隙为 1.5cm 时场分析结果

4.5 本章小结

本方法虽然在理论上可以成批进行测量，能够实现快速检测，但是实际实现还存在着难点：如何计算磁路结构的工作点，从而准确找到恰好使永磁体发生失磁即拐点的位置；如何针对不同规格的永磁体找到拐点处气隙的大小。

本方法的实现还与永磁体的厚度有关，因为当永磁体厚度达到一定程度时，磁体本身的开路 P_c 值已经足够的大，永磁体的开路工作点已经处于退磁曲线拐点上方，这时如果改变磁路结构只会使其工作点上移，所以这一方法的应用受到限制，即永磁体本身的开路工作点必须在其拐点下方，这样改变磁路结构才能使其工作点上移，到达拐点附近。由 P_c 值的计算公式可以看出，对不同截面积的永磁体，这一厚度的限定值是不同的，因而，在实践中可以根据产品的具体尺寸来改变磁路结构。到目前为止，本方法的实现还在进一步的研究中。

5 根据常温下磁性能间接推算热稳定性的方法

5.1 引言

无论是通过施加退磁电流还是改变磁体工作点的方法，从理论上分析是可行的，而且我们也都根据要求做出了相应的检测装置，但是到目前为止，每个方法中相关的计算问题都还有待进一步的研究和完善。所以在解决计算问题的同时，针对目前材料厂都能提供常温下永磁材料的磁性能参数这一特点，我们又提出了第 3 种方法，也就是在对国产的永磁体进行测试分析的基础上，又在理论上进行相应的推导，看是否能够通过给定永磁体常温下的磁性能来间接推算出其热稳定性是否符合要求。

该方法得以顺利实现的条件是，首先是对各厂家的产品性能进行测试，然后找出每一厂家产品测试结果中 $\alpha(H_{cj})$ 绝对值的最大值以及满足高温下拐点位置要求 ($10\%B_r$) 所对应的 H_{cj} 和 H_K 的值，并以此为根据制定各个厂家产品性能稳定的常温下的标准，最后根据制定的标准来判断该厂的永磁体常温下的磁性能是否合乎要求，从而推算出该磁体是否满足电机用的热稳定性的要求。

5.2 理论推导

设常温 t_0 时永磁体剩磁为 B_{r0} (单位 kGs)，矫顽力为 H_{cb0} (单位 kOe)，内禀矫顽力为 H_{cj0} (单位 kOe)，临界场强为 H_{K0} (单位 kOe)；工作温度 t 时相应参数为 B_r 、 H_{cbt} 、 H_{cjt} 和 H_{Kt} ；温度变化过程中，回复磁导率 $\mu_r = \frac{B_r}{H_{cb}}$ 不变，曲线矩形度

$Q = \frac{H_K}{H_{cj}}$ 不变，且 H_{Kt} 值近似为拐点时的 H_{cb} 值； $\alpha(B_r)$ 和 $\alpha(H_{cj})$ 取绝对值。则工作温度为

t 时的剩磁

$$B_r = [1 - \alpha(B_r)(t - t_0)]B_{r0} \quad (5.1)$$

设退磁曲线为直线时的矫顽力

$$H'_{cbt} = \frac{B_r}{\mu_r} \quad (5.2)$$

退磁曲线弯曲时拐点位置为

$$KB_{\pi} \text{ 或 } (1-K)H'_{\text{cBt}} \quad (5.3)$$

则

$$H_{\text{cJt}} = \frac{H_{\text{Kt}}}{Q} = \frac{(1-K)H'_{\text{ct}}}{Q} = \frac{(1-K)B_{\pi}}{\mu_r Q} = \frac{(1-K)[1-\alpha(B_r)(t-t_0)]B_{r0}}{\mu_r Q} \quad (5.4)$$

那么

$$H_{\text{cJ0}} = \frac{H_{\text{cJt}}}{1-\alpha(H_{\text{cJ}})(t-t_0)} = \frac{(1-K)[1-\alpha(B_r)(t-t_0)]B_{r0}}{\mu_r Q[1-\alpha(H_{\text{cJ}})(t-t_0)]} \quad (5.5)$$

现以电机制造行业常用的字符牌号是 NdFeB280/160 (最大磁能积 $(BH)_{\text{max}}$ 为 $35\text{MG} \cdot \text{Oe}$) 为例, 根据电机对磁体热稳定性的要求, 即 $t=120^{\circ}\text{C}$, 拐点位置 $K=10\%$ 。设 $t_0=20^{\circ}\text{C}$, $\mu_r=1.05$ (标准 IEC60404-8-1^[41]中指定的典型值), $\alpha(B_r)=0.10\%/^{\circ}\text{C}$, $B_{r0}=12.4\text{kGs}$ (标准 IEC60404-8-1^[41]中规定的 B_r 最小值) 和 $B_{r0}=11.8\text{kGs}$ (中国国家标准 GB/T13560-2000^[40]规定的 B_r 最小值), 就 IEC 标准 IEC60404-8-1^[41]中指定的 $\alpha(H_{\text{cJ}})$ 为 $-0.45\%/^{\circ}\text{C} \sim -0.6\%/^{\circ}\text{C}$ 这个范围, 我们就可能存在的几种典型情况分别进行讨论:

$$(1) \text{ 设 } \alpha(H_{\text{cJ}})=0.6\%/^{\circ}\text{C}, Q = \frac{H_{\text{K}}}{H_{\text{cJ}}} = 0.9$$

则式 (5.5) 简化为

$$H_{\text{cJ0}} = \frac{0.9 \times 0.9 B_{r0}}{1.05 \times 0.9 \times 0.4} = 2.143 B_{r0} \quad (5.6)$$

把 $B_{r0}=12.4\text{kGs}$ 代入式 (5.6), 计算得

$$H_{\text{cJ0}}=26.57\text{kOe}=2114\text{kA/m}$$

把 $B_{r0}=11.8\text{kGs}$ 代入式 (5.6), 计算得

$$H_{\text{cJ0}}=25.28\text{kOe}=2011\text{kA/m}$$

$$(2) \text{ 设 } \alpha(H_{\text{cJ}})=0.6\%/^{\circ}\text{C}, Q = \frac{H_{\text{K}}}{H_{\text{cJ}}} = 0.95$$

则式 (5.5) 简化为

$$H_{\text{cJ0}} = \frac{0.9 \times 0.9 B_{r0}}{1.05 \times 0.95 \times 0.4} = 2.03 B_{r0} \quad (5.7)$$

把 $B_{r0}=12.4\text{kGs}$ 代入式 (5.7), 计算得

$$H_{cJ0}=25.3\text{kOe}=2013\text{kA/m}$$

把 $B_{r0}=11.8\text{kGs}$ 代入式 (5.7), 计算得

$$H_{cJ0}=23.95\text{kOe}=1905\text{kA/m}$$

$$(3) \text{ 设 } \alpha(H_{cJ})=0.5\%/^{\circ}\text{C}, Q=\frac{H_K}{H_{cJ}}=0.9$$

则式 (5.5) 简化为

$$H_{cJ0}=\frac{0.9 \times 0.9 B_{r0}}{1.05 \times 0.9 \times 0.5}=1.714 B_{r0} \quad (5.8)$$

把 $B_{r0}=12.4\text{kGs}$ 代入式 (5.8), 计算得

$$H_{cJ0}=21.25\text{kOe}=1691\text{kA/m}$$

把 $B_{r0}=11.8\text{kGs}$ 代入式 (5.8), 计算得

$$H_{cJ0}=20.23\text{kOe}=1609\text{kA/m}$$

$$(4) \text{ 设 } \alpha(H_{cJ})=0.45\%/^{\circ}\text{C}, Q=\frac{H_K}{H_{cJ}}=0.9$$

则式 (5.5) 简化为

$$H_{cJ0}=\frac{0.9 \times 0.9 B_{r0}}{1.05 \times 0.9 \times 0.55}=1.558 B_{r0} \quad (5.9)$$

把 $B_{r0}=12.4\text{kGs}$ 代入式 (5.9), 计算得

$$H_{cJ0}=19.32\text{kOe}=1537\text{kA/m}$$

把 $B_{r0}=11.8\text{kGs}$ 代入式 (5.9), 计算得

$$H_{cJ0}=18.38\text{kOe}=1462\text{kA/m}$$

从以上分析可以看出:

(1) 若 $|\alpha(H_{cJ})|$ 仅控制在 $0.6\%/^{\circ}\text{C}$ 范围内, 则要求室温下永磁体 $H_{cJ}>1900\text{kA/m}$, $H_K/H_{cJ}>0.95$; 或者 $H_{cJ}>2000\text{ kA/m}$, $H_K/H_{cJ}>0.9$ 。而 H_{cJ} 的值根据式 (5.5), 即

$$H_{cJ0}=\frac{(1-K)[1-\alpha(B_r)(t-t_0)]B_{r0}}{\mu_r Q[1-\alpha(H_{cJ})(t-t_0)]} \text{ 来进行推算。}$$

(2) 若是在目前材料厂认为的常温下只要 $H_{cJ}\geq 1600\text{ kA/m}$ 和 $H_K/H_{cJ}\geq 0.9$ 都满足的条件即可, 现根据推导, 则还应要求 $|\alpha(H_{cJ})|$ 小于 $0.5\%/^{\circ}\text{C}$ 。因此材料厂家必须改进

生产技术来提高 H_{cj} 的温度系数, 以便使 SH 系列 NdFeB 永磁材料更为广泛地应用于电机行业。

下面根据具体的实例来判断上述理论推导得出的结论是否可以用来检测产品合格与否。

5.3 根据实例验证理论推导

为了判断此方法是否可行, 我们选取了所测试的沈阳 1 厂的全部所测试的磁体 (共 12 块) 进行验证。表 5.1 所示的是该厂 12 块磁体的磁性能参数测试结果。

表 5.1 沈阳 1 厂产品的磁性能参数测试结果

样品	$\alpha(B_r)$ %/°C	B_{r0} kG	$\alpha(H_{cj})$ %/°C	H_{cj0} kA/m	H_K/H_{cj} (常温)	H_K/H_{cj} (120°C)	120°C 时拐点 k 所占 退磁曲线的百分比
1	-0.10254	11.80	-0.59112	1917	0.893	0.977	6.52%
2	-0.10427	12.18	-0.58341	1650	0.914	0.961	18.94%
3	-0.10596	12.08	-0.5927	1613	0.907	0.962	26.67%
4	-0.11039	12.32	-0.6502	1579	0.975	0.973	34.56%
5	-0.11185	12.07	-0.62279	1844	0.949	0.971	17.33%
6	-0.11808	12.11	-0.63002	1802	0.920	0.961	19.43%
7	-0.11304	12.12	-0.62893	1821	0.925	0.968	20.34%
8	-0.10168	12.49	-0.59536	1715	0.959	0.970	21.07%
9	-0.10265	12.47	-0.60047	1711	0.961	0.976	21.90%
10	-0.08981	12.36	-0.59871	1733	0.937	0.961	21.46%
11	-0.09278	11.64	-0.57191	1881	0.742	0.923	4.60%
12	-0.07755	12.25	-0.56600	1821	0.941	0.953	13.05%

由表 5.1 所示的数据, 我们可以看出, 在这 12 块样品中, 只有样品 1 和样品 11 这两块样品满足电机用的要求, 即 120 °C 时拐点 k 所占退磁曲线的百分比小于 10%, 分别为 6.52% 和 4.60%。样品 1 符合理论推导得出的结论 (1) 所需满足的条件,

$|\alpha(H_{cj})|=0.59112\%/^{\circ}\text{C}<0.6\%/^{\circ}\text{C}$, $H_{cj}=1917\text{ kA/m}>1900\text{ kA/m}$, $H_K/H_{cj}=0.977>0.95$,
(H_K/H_{cj} 随温度的升高而增大,)。

样品 2 虽然满足 $H_{cj}=1650\text{ kA/m}>1600\text{ kA/m}$, 而且其矩形度 H_K/H_{cj} 无论是常温的 0.914 还是高温的 0.961 都大于 0.9, 但是其 $|\alpha(H_{cj})|=0.58341\%/^{\circ}\text{C}>0.5\%/^{\circ}\text{C}$, 结果 120 $^{\circ}\text{C}$ 时拐点 k 所占退磁曲线的百分比 18.94% 大于 10%。

按照上述的理论推导, 我们又分别推算出不同磁能积的磁体在 $\alpha(B_r)=-0.10\%/^{\circ}\text{C}$, $\alpha(H_{cj})=-0.6\%/^{\circ}\text{C}$ 和 $\mu_r=1.05$ 的情况下需满足的条件, 结果见表 5.2 所示。

表 5.2 不同磁能积的磁体在不同条件下其 H_{cj} 需满足的要求

$(BH)_{\max}$ MG · Oe		30	33	35	38	40	42
退磁曲线拐点 10% B_r 时 H_{cj} kA/m	$Q=0.9$	1910	2013	2077	2148	2212	2260
	$Q=0.95$	1830	1910	1990	2045	2109	2149
退磁曲线为 直线时 H_{cj} kA/m	$Q=0.9$	2125	2228	2308	2387	2459	2515
	$Q=0.95$	2021	2133	2188	2276	2348	2403

5.4 本章小结

根据常温下磁性能间接推算热稳定性的方法可以用来判断永磁体是否合格, 是否满足电机用的要求。但是为了保证产品性能的稳定, 必须不时的对各个厂家的产品进行抽测, 如果发现以上规定的磁性能参数值发生改变, 就应该及时修改相应的标准。

6 结论

通过对目前国内电机用烧结 NdFeB 永磁材料磁性能的分析来看,要想满足永磁材料在电机行业的应用,必须对永磁体进行逐块检测。为此,在本课题中提出了三种对 NdFeB 永磁材料热稳定性进行快速检测的方法。

第一种方法,即通过对原有仪器的使用和研究,提出的施加退磁电流和实测磁通的方法,虽然这两种办法可以更加真实的模拟电机的实际工作情况,但是速度都还不够快,而且所施加的退磁电流大小的准确确定还存在着很大的难度,计算方面涉及到很多磁路里的问题,到目前为止,还在进一步的探讨和完善过程中。

第二种方法,即不需要施加退磁电流,通过改变永磁体工作点的方法,它可以对成批的永磁体进行热稳定性的快速检测。但是由于永磁体的工作点和永磁体本身的大小有关,所以当永磁体的厚度超过一定值,永磁体的空载工作点就会高出拐点位置,这时该方法就不再适用,也就是该方法适用于一定厚度的永磁体进行检测。还有该方法也存在有计算方面的问题亟待解决。

第三种方法,即根据常温下磁性能间接推算热稳定性的方法,是通过对大量的实验数据进行分析研究得出的。该方法得以实现的前提是每个厂家的产品磁性能必须保证稳定。如果厂家产品的参数改变,那么必须对相关的检测程序 and 标准进行修改,而且为了保证产品的性能稳定,必须对每个厂家的产品进行不定期的抽测。

为了做到逐块检测以保证永磁体的磁性能,对于不同的场合应当采用不同的方法。由于迄今为止,还没有永磁材料的快速检测方法及装置,相关方面的参考资料也很少,上述三种方法是在经过逐步摸索的过程中提出来的,所以难免存在着各自的缺点,这有待于进一步的研究和完善,

参 考 文 献

- [1] 周寿增. 稀土永磁材料及其应用. 北京: 冶金工业出版社, 1995
- [2] 邹光荣. 稀土永磁材料退磁曲线的计算及应用. 微电机, 1999, 32 (3): 44~46
- [3] Kaneko Y, Ishigaki N. Recent Developments of High-performance NEOMAX Magnets. J. Master. Engin. perfor., 1994, 3 (2): 228~230
- [4] 唐任远. 现代永磁电机理论与设计. 北京: 机械工业出版社, 1997
- [5] Xu Guangren, Guo Zhenhong, et al. Study on Computation Method of Pull-in Characteristic of Permanent Magnet Synchronous Motor. Proceedings of CICEM' 95, Beijing: International Academic Publishers, 1995: 278~280
- [6] 孙昌志, 李革, 耿连发. 钕铁硼永磁电机. 沈阳: 辽宁科学技术出版社, 1996
- [7] Tang Renyuan, Geng Lianfa, et al. The Application of NdFeB to Electrical Machines and Its Comparison with Some Other Permanent Magnets. Proceedings of the Eighth International Workshop on Rare Earth Magnets and Their Applications. Dyton: University of Dyton, 1985: 43~53
- [8] Sun Changzhi. The application of NdFeB Magnet in Electrical Machines and Its Outlook Analysis. CGCEA-90, Badhonef, 1990
- [9] 林河成. 国内钕铁硼永磁材料的高速发展. 金属材料研究, 1999, 25 (2): 15~22
- [10] 周静. 钕铁硼磁体的发展方向. 四川稀土, 1998, 4: 12~20
- [11] 林安利. 中国永磁磁性能测试现状. 见: 磁性材料专业论坛. 2004 中国国际新材料产业研讨会论文集, 北京, 2004: 19~22
- [12] 唐苏亚. 钕铁硼永磁的发展现状与应用市场.
<http://www.cre-ol.com/news/keji/nutpeng0415.htm>. 2003-4-15

- [13] 金瑞湘, 陈敏勤. 烧结钕铁硼永磁体的热稳定性. 电工合金文集, 1991, 3: 19~24
- [14] 陈世坤. 电机设计. 第2版. 北京: 机械工业出版社, 2000
- [15] 王季轶. 永磁电机中永磁材料的合理应用. 微特电机, 1992, 3: 36~40
- [16] H-ZIJLSTRA. Experimental Methods in Magnetism. Amsterdam: Nerth-Holland Publishing Co. . 1967
- [17] 刘兴民. 直流磁性测量. 北京: 机械工业出版社, 1989
- [18] 周世昌. 磁性测量. 北京: 电子工业出版社, 1994
- [19] 李大明. 磁场测量讲座-电磁感应法. 电测与仪表, 1989, 11: 39~44
- [20] 裴建民. 直流冲击法测磁中应注意的几个问题. 航天标准化, 2002, 2: 26~28
- [21] 余茂群. 冲击法在磁测中的影响因素探讨. 磁性材料及器件, 1996, 30 (3): 57~59
- [22] 石环英, 石琳. 利用霍尔元件测永磁材料的静态特征. 物理试验, 1995, 14 (6): 246~248
- [23] 姚云甫. 钕铁硼产品磁性能的无损检验. 磁性材料及器件, 2001, 32 (1): 55~59
- [24] 刘亚丕, 葛世慧. 稀土永磁测试中几个主要问题的讨论. 磁性材料及器件, 1999, 30 (5): 60~62
- [25] 贺超, 梁峰, 施乐平. 新型矫顽力精密测量仪的研制. 电测与仪表, 2001, 11: 13~16
- [26] 中国计量科学研究院磁性测量室. NIM-10000H 大块稀土永磁无损检测系统使用说明书. 北京: 中国计量科学研究院磁性测量室, 1999
- [27] M. G. Benz, D. Luther Martin. Measurement of Magnetic Properties of Cobalt-Rare Earth Permanent Magnets. IEEE Trans. Magn. , 1971, 7 (2): 285~291
- [28] D. C. Crew, P. G. McConmick, R. Street. Measurement of Magnetic Viscosity in NdFeB. IEEE Trans. Magn. , 1996, 32 (5): 4356~4358

- [29] E. A. Steingroever. Measurement of Permanent Magnets with a New Potential Measuring Coil. IEEE Trans. Magn. , 1972, 45 (1) : 616~620
- [30] Alexander Kusko, Noshirwan Medora, Donald Galler. Measurement of Permanent Magnet Rotor Magnetization Characteristics of DC Brushless Motors. IEEE Trans. Magn. , 1992, 5 (3) : 300~302
- [31] Jian Guo Zhu, Jin Jiang Zhong, Zhi Wei Lin, et al. Measurement of Magnetic Properties under 3-D Magnetic Excitations. IEEE Trans. Magn. , 2003, 39 (5) : 3429~3431
- [32] 刘亚丕. 德国科伦磁物理公司磁测仪简介. 磁性材料及器件, 2000, 31 (1) : 48~52
- [33] 王群. 永磁体工业生产检测与 PM11 磁体测量仪. 磁能应用技术, 1993, 1: 34~36
- [34] 姚燕, 姚云甫. 永磁产品使用过程中磁性能下降的原因及解决方法. 磁性材料及器件, 2003, 34 (2) : 41~44
- [35] 张福民. 稀土永磁材料磁性测量方法. 磁性材料及器件, 1999, 32 (2) : 40~42
- [36] 中国国家标准 GB/T3217-92: 永磁(硬磁)材料磁性试验方法. 北京: 中国标准出版社, 1992
- [37] 王德芳, 叶妙元. 磁测量. 北京: 机械工业出版社, 1990
- [38] 刘亚丕, 董明海, 唐任远. 电机用钕铁硼永磁高温下退磁特性的研究. 见: 中国电工技术学会永磁电机专业委员会等编. 1994 全国永磁电机学术交流会论文集, 北京, 1994: 152~156
- [39] 耿连发, 吴延忠, 赵丹群等. NdFeB 永磁材料在电机使用中的热稳定性. 见: 中国电工技术学会永磁电机专业委员会等编. 1994 全国永磁电机学术交流会论文集, 北京, 1994: 138~143
- [40] 中国国家标准 GB/T13560-2000: 烧结钕铁硼永磁材料. 北京: 中国标准出版社, 2000

- [41] IEC 60404-8-1: Magnetic Materials - Part 8-1: Specifications for Individual Materials-magnetically Hard Materials. Second edition. International Electrotechnical Commission, 2001
- [42] 金喜平, 郭雨梅, 李书平等. 智能仪器设计. 沈阳: 辽宁科学技术出版社, 1994
- [43] 阎石. 数字电子技术基础. 第四版. 北京: 高等教育出版社, 2000
- [44] 黄俊, 王兆安. 电力电子变流技术. 第 3 版. 北京: 机械工业出版社, 1999
- [45] 李群芳, 黄建. 单片微型计算机与接口技术. 北京: 电子工业出版社, 2001
- [46] 童诗白. 模拟电子技术基础. 第 2 版. 北京: 高等教育出版社, 1999
- [47] 易敬曾. 磁场计算与磁路设计. 成都: 成都电讯工程学院出版社, 1987

附录A 57 块磁体实测数据值

拐点k占退磁曲线 的百分比										厂家及型号	
高温											
常温											
$\alpha(B_r)$ %/℃	B_r kG	B_H kG	$\alpha(H_{c2})$ %/℃	H_{c2} kOe	H_{c1} kOe	H_{K0} kOe	H_{K1} kOe	H_{K0}/H_{c20}	H_{K1}/H_{c20}	100℃	120℃
-0.114	11.98	10.89	-0.679	23.61	10.79	20.73	9.67		0.896	18.2%	
-0.117	11.98	10.58	-0.635	23.61	8.61	20.73	7.65	0.878	0.889		31.0%
-0.100	11.92	10.97	-0.665	23.47	10.99	20.51	9.84		0.895	21.3%	
-0.110	11.92	10.61	-0.641	23.47	8.42	20.51	7.53	0.874	0.894		32.6%
-0.097	11.65	10.75	-0.720	21.86	9.26	19.12	8.72		0.942	21.0%	
-0.106	11.65	10.42	-0.683	21.86	6.93	19.12	6.5	0.874	0.938		40.2%
-0.107	11.65	10.65	-0.645	22.63	10.95	21.19	10.57		0.965	不弯	
-0.116	11.65	10.30	-0.607	22.63	8.89	21.19	8.54	0.937	0.961		14.0%
-0.116	11.45	10.39	-0.676	21.38	9.82	19.93	9.04		0.921	17.4%	
-0.119	11.45	10.09	-0.640	21.38	7.69	19.93	7.03	0.932	0.914		34.1%
-0.070	11.59	10.94	-0.619	20.99	10.59	20.22	10.29		0.972	9.2%	
-0.090	11.59	10.55	-0.601	20.99	8.38	20.22	8.12	0.963	0.969		23.2%
-0.075	11.59	10.89	-0.621	20.73	10.43	19.89	10.12		0.970	7.5%	
-0.088	11.59	10.57	-0.602	20.73	8.26	19.89	7.99	0.959	0.967		27.3%
-0.081	11.59	10.84	-0.615	20.60	10.46	19.69	10.05		0.961	4.4%	
-0.092	11.59	10.52	-0.592	20.60	8.40	19.69	8.09	0.956	0.963		22.3%
-0.128	11.64	10.45	-0.737	23.19	9.52	19.07	8.2		0.861	28.7%	
-0.119	11.64	10.25	-0.687	23.19	7.25	19.07	6.37	0.823	0.879		42.3%
-0.093	11.29	10.45	-0.733	22.97	9.50	18.83	8.39		0.883	24.2%	
-0.090	11.29	10.27	-0.679	22.97	7.38	18.83	6.62	0.820	0.897		38.4%
-0.109	11.53	10.52	-0.691	22.26	9.95	19.06	9.17		0.922	14.8%	
-0.121	11.53	10.13	-0.655	22.26	7.69	19.06	7.04	0.856	0.915		34.9%
-0.115	11.51	10.45	-0.726	21.79	9.14	17.42	8		0.875	28.0%	
-0.118	11.51	10.15	-0.689	21.79	6.78	17.42	6	0.799	0.885		42.9%
-0.115	10.35	9.40	-0.742	22.70	9.23	14.11	7.42		0.804	24.7%	
-0.108	10.35	9.23	-0.689	22.70	7.07	14.11	6.09	0.622	0.861		37.2%
-0.093	10.09	9.34	-0.701	22.35	9.82	12.33	7.74		0.788	18.3%	
-0.104	10.09	9.04	-0.666	22.35	7.47	12.33	6.33	0.551	0.847		32.8%
-0.092	11.80	10.93	-0.623	24.09	12.09	21.51	11.83		0.978	不弯	
-0.103	11.80	10.59	-0.591	24.09	9.85	21.51	9.62	0.893	0.977		6.5%
-0.105	12.18	11.16	-0.587	20.74	11.00	18.96	10.71		0.974	不弯	
-0.104	12.18	10.91	-0.583	20.74	8.64	18.96	8.3	0.914	0.961		18.9%

(续)

$\alpha(B_p)$ %/℃	B_p kG	B_H kG	$\alpha(H_d)$ %/℃	H_{dp} kOe	H_{dt} kOe	H_{dp} kOe	H_K kOe	拐点k占退磁曲线 的百分比		厂家及型号
								常温 H_{K0}/H_{K0}	高温 H_K/H_{K0}	
-0.094	12.08	11.17	-0.607	20.28	10.43	18.39	10.09		0.967	15.9%
-0.106	12.08	10.80	-0.593	20.28	8.26	18.39	7.95	0.907	0.962	26.7%
-0.108	12.32	11.26	-0.712	19.84	8.54	19.35	8.31		0.973	22.0%
-0.110	12.32	10.96	-0.650	19.84	6.94	19.35	6.75	0.975	0.973	34.6%
-0.110	12.07	11.01	-0.661	23.17	10.92	21.98	10.65		0.975	不弯
-0.112	12.07	10.72	-0.623	23.17	8.74	21.98	8.49	0.949	0.971	17.3%
-0.102	12.11	11.12	-0.643	22.65	11.00	20.85	10.61		0.965	不弯
-0.118	12.11	10.68	-0.630	22.65	8.38	20.85	8.05	0.920	0.961	19.4%
-0.111	12.12	11.04	-0.652	22.88	10.94	21.15	10.65		0.973	不弯
-0.113	12.12	10.75	-0.629	22.88	8.49	21.15	8.22	0.925	0.968	20.3%
-0.091	13.09	12.14	-0.618	20.31	10.27	18.09	9.24		0.900	24.8%
-0.100	13.09	11.78	-0.598	20.31	8.16	18.09	7.32	0.891	0.897	37.0%
-0.093	12.49	11.56	-0.629	21.55	10.71	20.67	10.4		0.971	6.1%
-0.102	12.49	11.22	-0.595	21.55	8.72	20.67	8.46	0.959	0.970	21.1%
-0.091	12.47	11.56	-0.622	21.50	10.80	20.66	10.53		0.975	5.1%
-0.103	12.47	11.19	-0.600	21.50	8.59	20.66	8.38	0.961	0.976	21.9%
-0.086	12.36	11.51	-0.591	21.78	11.49	20.41	11.1		0.966	不弯
-0.090	12.36	11.25	-0.599	21.78	8.74	20.41	8.4	0.937	0.961	21.5%
-0.081	11.64	10.89	-0.583	23.64	12.62	17.55	11.48		0.910	不弯
-0.093	11.64	10.56	-0.572	23.64	10.12	17.55	9.34	0.742	0.923	4.6%
-0.062	12.25	11.64	-0.574	22.88	12.38	21.52	11.81		0.954	不弯
-0.078	12.25	11.30	-0.566	22.88	9.93	21.52	9.46	0.941	0.953	13.1%
-0.113	12.00	10.92	-0.679	23.36	10.68	20.84	10.18		0.953	11.7%
-0.121	12.00	10.55	-0.647	23.36	8.24	20.84	7.85	0.892	0.953	24.6%
-0.110	12.12	11.05	-0.672	24.51	11.34	22.26	11.12		0.981	不弯
-0.109	12.12	10.80	-0.629	24.51	9.09	22.26	8.9	0.908	0.979	16.3%
-0.113	12.15	11.05	-0.669	24.52	11.40	21.98	11.1		0.974	不弯
-0.114	12.15	10.76	-0.621	24.52	9.30	21.98	9.06	0.896	0.974	15.3%
-0.108	12.16	11.11	-0.653	24.53	11.71	21.97	11.5		0.982	不弯
-0.113	12.16	10.79	-0.612	24.53	9.52	21.97	9.29	0.895	0.976	10.1%
-0.095	11.97	11.06	-0.615	22.81	11.58	20.23	11.22		0.969	不弯
-0.109	11.97	10.66	-0.609	22.81	8.92	20.23	8.64	0.887	0.969	18.0%
-0.102	12.18	11.19	-0.633	24.29	11.98	22.7	11.72		0.978	不弯
-0.113	12.18	10.80	-0.555	24.29	10.80	22.7	9.56	0.934	0.885	10.7%
-0.110	11.85	10.81	-0.597	24.59	12.85	22.68	12.15		0.946	不弯
-0.104	11.85	10.62	-0.577	24.59	10.40	22.68	9.82	0.922	0.944	6.7%

(续)

拐点k占退磁曲线										
$\sigma(B_p)$ %/℃	B_{10} kG	B_{11} kG	$\sigma(H_d)$ %/℃	H_{dB} kOe	H_{dH} kOe	H_{KH} kOe	H_{KT} kOe	常温		厂家及型号
								H_{KH}/H_{dB}	H_{KT}/H_{dH}	
的百分比										
								100℃	120℃	
-0.102	11.88	10.91	-0.596	24.93	13.04	22.76	12.54	0.962	不弯	2004-2-22沈阳2厂
-0.106	11.88	10.62	-0.575	24.93	10.59	22.76	10.11	0.913	3.3%	
-0.103	11.95	10.97	-0.583	24.09	12.85	21.57	12.26	0.954	不弯	2004-2-31沈阳2厂
-0.101	11.95	10.74	-0.577	24.09	10.18	21.57	9.66	0.949	10.9%	
-0.104	11.92	10.93	-0.620	23.56	11.87	19.85	11.07	0.933	8.3%	2004-2-5沈阳2厂
-0.094	11.92	10.80	-0.593	23.56	9.59	19.85	9.02	0.843	21.4%	
-0.095	11.93	11.02	-0.611	23.23	11.88	19.16	11.38	0.958	7.9%	2004-2-61沈阳2厂
-0.110	11.93	10.62	-0.551	23.23	10.43	19.16	10.06	0.825	11.0%	
-0.100	12.12	11.15	-0.645	23.01	11.13	20.47	10.73	0.964	7.2%	2004-2-62沈阳2厂
-0.117	12.12	10.70	-0.632	23.01	8.47	20.47	8.16	0.890	24.0%	
-0.075	12.29	11.55	-0.640	20.32	9.91	19.03	9.61	0.970	12.4%	2004-2-xh4-38-1北京2厂
-0.085	12.29	11.25	-0.618	20.32	7.77	19.03	7.53	0.936	30.4%	
-0.086	12.29	11.44	-0.648	20.25	9.75	17.55	8.6	0.882	24.4%	2004-2-xh4-38-2北京2厂
-0.098	12.29	11.08	-0.620	20.25	7.70	17.55	6.89	0.866	37.5%	
-0.065	12.24	11.60	-0.660	20.51	9.68	18.05	9.15	0.945	22.2%	2004-2-xh4-38-5北京2厂
-0.088	12.24	11.16	-0.621	20.51	7.77	18.05	7.34	0.880	36.0%	
-0.077	11.57	10.86	-0.655	21.82	10.39	19.74	9.49	0.913	12.4%	2004-2-xh1-35-1北京2厂
-0.084	11.57	10.60	-0.623	21.82	8.22	19.74	7.44	0.904	32.1%	
-0.082	11.62	10.86	-0.665	21.77	10.18	19.61	9.27	0.911	16.5%	2004-2-xh1-35-2北京2厂
-0.090	11.62	10.58	-0.625	21.77	8.17	19.61	7.33	0.900	33.4%	
-0.087	11.65	10.84	-0.672	21.90	10.12	19.17	8.92	0.881	17.2%	2004-2-xh1-35-5北京2厂
-0.094	11.65	10.56	-0.647	21.90	7.74	19.17	6.75	0.875	38.8%	
-0.074	11.80	11.10	-0.741	21.15	8.62	18.15	7.48	0.868	30.5%	2004-2-at2-38-1北京3厂
-0.076	11.80	10.90	-0.680	21.15	6.76	18.15	5.71	0.858	46.2%	
-0.065	11.94	11.32	-0.757	20.53	8.09	16.8	7.52	0.930	31.7%	2004-2-at2-38-2北京3厂
-0.074	11.94	11.06	-0.710	20.53	5.96	16.8	5.51	0.818	49.7%	
-0.059	11.80	11.24	-0.769	20.38	7.85	17.33	7.37	0.939	34.0%	2004-2-at2-38-5北京3厂
-0.069	11.80	10.99	-0.716	20.38	5.79	17.33	5.46	0.851	51.0%	
-0.061	11.39	10.83	-0.652	23.46	11.23	18.34	8.84	0.787	22.9%	2004-2-at2-35-1北京3厂
-0.091	11.39	10.35	-0.671	23.46	7.71	18.34	5.95	0.781	48.5%	
-0.075	11.36	10.68	-0.632	23.96	11.84	18.79	10.15	0.857	11.1%	2004-2-at2-35-2北京3厂
-0.077	11.36	10.48	-0.612	23.96	9.30	18.79	8.16	0.877	28.5%	
-0.055	11.35	10.85	-0.630	24.01	11.90	17.57	10.58	0.889	9.1%	2004-2-at2-35-5北京3厂
-0.078	11.35	10.47	-0.643	24.01	8.57	17.57	7.9	0.732	31.0%	
-0.091	11.90	11.03	-0.649	25.08	12.06	16.03	10	0.829	27.2%	2004-2-th3-38-1北京4厂
-0.096	11.90	10.76	-0.605	25.08	9.90	16.03	8.83	0.639	33.5%	

(续)

$\alpha(B_d)$ %/℃	B_{d0} kG	B_H kG	$\alpha(H_d)$ %/℃	H_{d0} kOe	H_{d1} kOe	H_{d2} kOe	H_{K1} kOe	常温		高温		拐点k占退磁曲线 的百分比		厂家及型号
								H_{K0}/H_{c20}	H_{K1}/H_{c20}	H_{K2}/H_{c20}	H_{K3}/H_{c20}	100℃	120℃	
-0.085	11.91	11.10	-0.652	24.94	11.93	16.11	10.18	0.646	0.853	0.893	0.853	34.0%	46.5%	2004-2-2h3-38-2北京4厂
-0.118	11.91	10.50	-0.683	24.94	7.91	16.11	7.06	0.646	0.853	0.893	0.853	34.0%	46.5%	2004-2-2h3-38-2北京4厂
-0.086	11.66	10.86	-0.726	24.60	10.31	15.73	8.98	0.640	0.871	0.911	0.871	26.1%	35.5%	2004-2-2h3-35-1北京4厂
-0.087	11.66	10.64	-0.670	24.60	8.13	15.73	7.41	0.640	0.871	0.911	0.871	26.1%	35.5%	2004-2-2h3-35-1北京4厂
-0.087	11.79	10.97	-0.721	24.53	10.39	15.6	9.12	0.636	0.878	0.912	0.878	32.1%	37.6%	2004-2-2h3-35-2北京4厂
-0.100	11.79	10.61	-0.686	24.53	7.71	15.6	7.03	0.636	0.878	0.912	0.878	32.1%	37.6%	2004-2-2h3-35-2北京4厂
-0.084	11.76	10.97	-0.704	24.96	10.90	15.56	9.21	0.623	0.845	0.877	0.845	30.2%	34.6%	2004-2-2h3-35-5北京4厂
-0.087	11.76	10.74	-0.661	24.96	8.46	15.56	7.42	0.623	0.845	0.877	0.845	30.2%	34.6%	2004-2-2h3-35-5北京4厂
-0.068	12.13	11.47	-0.658	20.15	9.55	19.32	9.36	0.959	0.980	0.980	0.980	19.9%	38.8%	2004-2-xg4-35-5西安某厂
-0.083	12.13	11.12	-0.637	20.15	7.32	19.32	7.15	0.959	0.977	0.977	0.977	19.9%	38.8%	2004-2-xg4-35-5西安某厂

附录B 磁化电源电路图

