

磁强计调查总结

1、什么是磁强计：

磁强计（magnetometer）：普通指是测量给定方向磁感应强度仪表。按照全国科学技术名词审定委员会发布概念，磁强计：矢量型磁敏感器。用于测定地磁场大小与方向，即测定航天器所处地磁场强度矢量在本体系中分量。是测量磁感应强度仪器。依照小磁针在磁场作用下能产生偏转或振动原理制成。而从电磁感应定律可以推出，对于给定电阻 R 闭合回路来说，只要测出流过此回路电荷 q ，就可以懂得此回路内磁通量变化。这也就是磁强计设计原理，用途之一是用来探测地磁场变化。

2、磁强计发展历史、现状以及磁强计发展趋势^{[1]~[3]}

磁场测量有着悠久历史。在国内东汉时期学者王充著作《论衡》中就有司南记载。司南是磁罗盘雏形，也是最原始磁场测量仪器。12 世纪初，国内已把磁罗盘用于航海。然而在漫长几千年内，人们只懂得磁力及方向。

在西方，磁场测量最早可以追溯到 15 世纪。16，英国医生 Gilbert 在她著作中一方面用应用科学办法对磁现象进行了系统摸索，同步发现了地球自身是一种大磁体。1785 年，库伦提出了用磁针在磁场中自由震荡周期来拟定地磁场办法。18 丹麦科学家奥斯特发现了电流磁效应。1832 年高斯提出了以长度、质量、时间为基本绝对测量地磁场强度办法，由此磁感应强度单位与长度、质量和时间单位建立了一定关系，使磁感应强度单位成为重要物理单位。1831 年，法拉第发现了电磁感应现象，使磁现象与电现象建立了一定量关系。1873 年，英国物理学家麦克斯韦在她典型著作《论电与磁》中创立了严密电磁场理论，从而为电磁场测量奠定了理论基本。

20 世纪 30 年代初,浮现了运用磁性材料自身磁饱和特性磁通门磁强计。1946 年由布格赫(F.Bleeh)和珀塞尔(E.M.Purcell)同步发现核磁共振现象,使磁场测量精准度也许达到 10^{-8} T; 1962 年约瑟夫逊(B.D.Josephson)预言了超导结隧道效应,并于次年得到实验证明,从而使磁场测量下限达到 10^{-15} T。近年来,由于有效地运用了自然现象物理定律和物质物理效应,加之半导体和电子技术飞速发展,运用各种磁效应进行磁场测量办法有了很大进步,各种磁强计应运而生例如霍尔磁强计、磁通门磁强计、磁阻效应磁强计、磁敏效应磁强计、磁光效应磁强计、超导量子干涉磁强计等测。

当前比较成熟磁场测量办法有:磁力法、电磁感应法、磁饱和法、电磁效应法、磁共振法、超导效应法和磁光效应法等。根据这些办法,相继实现了不同原理各种磁强计。到当前为止,磁场测量范畴已达到 $10^{-15} \sim 10^3$ T。随着当代科技进步,磁强计应用越来越广泛,已经广泛应用于地球物理、空间技术、军事工程、工业、生物学、医学、考古学等许多领域。随着磁场应用范畴不断拓展,为满足特定工作环境下磁场测量、强磁场及超强磁场测量、弱磁场及薄弱磁场测量,以及间隙磁场和不均匀磁场测量需求,必要谋求和应用新效应、新现象、新材料和新工艺,进一步提高磁场测量仪器水平,更新和发展精密磁场测量仪器,如今磁强计正向着高精度度、高稳定度、高辨别率、微小型化、数字化和智能化方向发展。

3、磁强计分类

按照磁强计发展历史和物理原理,磁强计可以分为三代:

(1)、第一代磁强计：运用永磁体与磁场之间互相力矩作用原理或者运用感应线圈和辅助机械装置制作例如：机械式磁强计，感应式航空磁强计。

(2)、第二代磁强计：依照核磁共振特性，高磁导率软磁合金磁通门原理，运用复杂电子线路制作，如核磁共振磁强计、磁通门磁强计等。

(3)、第三代磁强计：依照量子效应原理制作，如核子旋进磁强计、质子磁强计、光泵磁强计、原子磁强计、超导量子干涉磁强计。

磁强计还可以按照其他分类原则进行分类，例如：按照内部构造和工作原理磁强计可以分为机械式磁强计和电子式磁强等；按照磁强计所测得地磁参数和量值可以分为相对测量磁强计和绝对测量磁强计；按照磁强计使用领域可以分为地面磁强计、航空磁强计、海洋磁强计以及井中磁强计等。

4、当前比较成熟磁强计原理^[1~8]

(1)、磁力法磁强计

原理：磁力法磁强计是运用被测磁场中磁化物体或通电线圈与被测磁场之间互相作用机械力(或力矩)来测量磁场一种典型办法。按磁力法原理制成磁场测量仪器可分为磁强计式和电动式两类。其中，以可动小磁针(棒)与被测磁场之间互相作用使磁针偏转而构成磁场测量仪器，按习惯叫法称为“磁强计”。这种磁强计可以把磁场测量直接归结为对磁针在所处水平面内运动振荡周期和偏转角测量。运用磁强计可以测量较弱均匀、非均匀以及变化磁场，其辨别力可达 10^{-9} T 以上。而运用通电线圈与被测磁场之间互相作用使线圈偏转原理构成电动法磁场测量仪器。

(2)、感应线圈（电子积分器）式磁强计

原理：电磁感应法是以法拉第电磁感应定律为基本磁场测量办法，其应用十分广泛，随着电子积分器和电压－频率变换器应用于以此法实现，其测量磁场范畴已扩大为 $10^{-13} \sim 10^3 \text{ T}$ ，测量精确度约为 $\pm (0.1 \sim 3)\%$ 。探测线圈是电磁感应法磁强计传感器，它敏捷度取决于铁心材料磁导率、线圈面积和匝数。依照探测线圈相对于被测磁感应强度变化关系，电磁感应法可以分为固定线圈法、抛移线圈法、旋转线圈法及振动线圈法。固定线圈法重要用于测量交变磁场，也可测量恒定磁场。由于探测线圈不动，线圈中感应电动势是由被测磁场变化引起。抛移线圈法重要用于测量恒定磁场磁感应强度。当把探测线圈由磁场合在位置迅速移至没有磁场作用位置时，线圈中感应电动势积分值与线圈所在位置磁感应强度值成正比。旋转线圈法(又称测量发电机法)和振动线圈法是电磁感应法直接应用，它们重要用于测量恒定磁场。

(3)、霍尔效应磁强计

原理：霍尔效应，霍尔效应是指当外磁场垂直于金属或半导体中流过电流时，会在金属或半导体中垂直于电流和外磁场方向产生电动势现象。

(4) 磁阻效应磁强计

原理：磁阻效应，是指某些金属或半导体材料在磁场中其电阻随磁场增长而升高现象。而所谓“磁阻”，就是由外磁场变化而引起电阻变化。磁阻效应在横向磁场和纵向磁场中都能观测到。运用这一效应，可以很以便地通过测量相应材料电阻变化间接实现对磁场测量。磁阻效应和霍尔效应同样，都是由作用在运动导体中载流子洛伦兹力引起。不同材料磁阻是不同。基于上世纪七十年代问世薄膜技术，磁阻效应磁强计有了很大发展，随之浮现薄膜磁阻效应磁强计。随着某些新材料研制，人们又相继发现了巨磁阻(Giant Magneto-resistance——GMR)效应和巨磁阻抗(Giant Magneto-

impedance——GMI)效应，基于它们磁测量技术也得到了较进一步研究。巨磁阻效应是指在一定磁场下电阻急剧减小现象，普通电阻减小幅度比普通磁性金属及合金材料磁电阻数值高一种数量级。以巨磁阻效应为基本制成超微磁场传感器。

(5)、磁通门磁强计

原理 磁通门磁强计运用材料磁饱和特性制造磁强计，基于磁调制原理，即运用在交变磁场饱和勉励下处在被测磁场中磁芯磁感应强度与被测磁场磁场强度间呈非线性关系来测量磁场办法。这种办法重要用于测量恒定或缓慢变化磁场；其测量电路稍加变化，也可测量低频交变磁场。磁饱和法分为谐波选取法和谐波非选取法两类。谐波选取法就是只考虑探头感应电动势偶次谐波(重要是二次谐波)，而滤去其他谐波，详细还可细分为二次谐波选取法和偶次谐波选取法。谐波非选取法是不经滤波而直接测量探头感应电动势所有频谱，它又可细分为幅度比例输出法和时间比例输出法。其中幅度比例输出法因所需测量仪器设备构造比较复杂、稳定性较差，没有得到推广。近年来，随着磁通门传感器应用领域拓展，为满足磁场“点”测量需要，运用微机械技术，如各向异性腐蚀、牺牲层技术和 LIGA 工艺以及 MEMS 技术制作微型磁通门传感器，已经成为磁通门传感器构建和制造发展必然趋势。当前按基片材料划分微型磁通门传感器重要有三种，分别是运用 PCB 板、在非半导体(如钽、玻璃等)衬底上以及在半导体材料特别是硅衬底上加工制作磁通门传感器。

(6)、磁共振磁强计

基本原理：塞曼(

P.Zee-man)效应原理，即在外磁场作用下原子能级将发生分裂；如果交变磁场作用到原子上，当交变磁场频率与原子自旋系统自然频率同步时，原子自旋系统便会从交变磁场中吸取能量，这种现象就被称为磁共振。由于频率测量可以做到非常精确，从而，运用磁共振法便可大大提高测量磁场精确度。用磁共振原理测量磁场办法主要有核磁共振 (NMR)、顺磁共振(EPR)和光泵磁共振等办法。核磁共振法是运用具有角动量(自旋)及磁矩不为零原子核作共振物质(样品)，依照核激励方式和样品不同，它又可分为核吸取法(逼迫核进动)、核感应法(自由核进动)及章动法(流动水样品)。顺磁共振法是指运用顺磁物质中电子或由抗磁物质中顺磁中心电子所引起磁共振办法。光泵磁共振法是运用原子塞曼效应原理绝对测量弱磁场一种精密办法，它是通过光(红外线或可见光)照射物质，使物质原子产生往复能级跃迁，并最后使原子由低能级升到高能级。

(7)、超导量子磁强计 (SQUID)

原理：约瑟夫逊效应，运用弱耦合超导体中超导电流与外部磁场间函数关系而测量恒定或交变磁场一种磁强计，重要用于测量恒定弱磁场。其特点是具备极高敏捷度和辨别力。超导量子干涉器件(SQUID)是超导量子干涉磁强计重要构成某些，就其功能来说是一种磁通传感器。SQUID 依照所使用超导材料，可分为低温超导 SQUID 和高温超导 SQUID；又可依照超导环中插入约瑟夫森结个数，分为直流超导量子干涉器件(DC- SQUID)和交流超导量子干涉器件(RF- SQUID)。直流超导量子干涉器件(DC- SQUID)加有直流偏置，制成双结形式；交流超导量子干涉器件(RF- SQUID)由射频信号作偏置，详细采用是单结形式。

(8)、磁光效应磁强计

原理：基于磁光效应当偏振光通过磁场作用下某些各向异性介质时，会导致介质电磁特性变化，并使光偏振面(电场振动面)发生旋转，这种现象被称为磁光效应。磁光效应法即是运用磁场对光和介质互相作用而产生磁光效应来测量磁场一种办法。依照产生磁光效应时通过介质(样品)光是透射还是反射，磁光效应详细又有法拉第(Farady)磁光效应和克尔(Kerr)磁光效应之分。磁光效应法可用于恒定磁场、交变磁场和脉冲磁场测量。近年来，随着基于磁致伸缩效应光纤薄弱磁场传感技术发展，光纤磁场测量仪器敏捷度已可做得很高。

(9) 震动样品磁强计 (VSM)

原理：VSM 采用电磁感应原理，测量在一组探测线圈中心以固定频率和振幅作微振动样品磁矩。对于足够小样品，它在探测线圈中振动所产生感应电压与样品磁矩、振幅、振动频率成正比。在保证振幅、振动频率不变基本上，用锁相放大器测量这一电压，即可计算出待测样品磁矩。震动样品磁强计事实上是一种感应线圈式磁强计。

综上所述，磁场测量设备由于测量原理、测量范畴、应用范畴不同而分诸各种，将其特性列下表 1 所示：

表 1 各种物理原理的磁强计简介

形式		特 点	测量范围 / T	最高分辨 力/ T	最高不 确定度	应 用
磁力仪	磁变仪	磁针磁矩在磁场中受力矩偏转	地磁场	10^{-9}	10^{-2}	地磁场各参数及变化
	摆荡式	测量磁针在磁场中的摆荡周期	地磁场	10^{-9}	10^{-4}	地磁水平分量
	无定向	双磁系、无定向	$10^{-11} \sim 10^{-7}$	10^{-12}	10^{-2}	岩石磁性、古地磁
电磁效应	霍尔效应	输出霍尔电压正比垂直霍尔片磁场值与输入电流之积	$10^{-7} \sim 10^1$	10^{-7}	10^{-4}	交、直流和脉冲磁场各种分量、缝隙磁场
	磁阻效应	磁场中载流子迁移率变化,传感器电阻与方向不敏感	$10^{-5} \sim 10^1$	10^{-5}	10^{-4}	超导体磁场、磁传感器
感应式	固定线圈	采用测量线圈耦合磁链变化测场	$10^{-10} \sim 10^{-1}$	10^{-10}	10^{-3}	测交变场、地磁微变
	运动线圈	采用旋转或振动线圈感应	$10^{-6} \sim 10^1$	10^{-4}	10^{-4}	测量恒定场
	积分式	测量线圈感应电势积分测磁通	$10^{-8} \sim 10^2 \text{ Wb}$	10^{-8} Wb	10^{-3}	测量恒定磁场、磁通
磁通门	偶次谐波式	磁心激励饱和,提取二次或偶次谐波信号	$10^{-11} \sim 10^{-3}$	10^{-12}	10^{-3}	弱磁场、地磁、梯度测向、卫星、探雷
	峰差检波式	磁心激励饱和,用峰差检波器	$10^{-9} \sim 10^{-1}$	10^{-9}	10^{-2}	弱磁场、梯度、测向
核磁共振式	边缘振荡法	样品共振吸收改变边缘振荡幅	$10^{-2} \sim 10^1$	10^{-6}	10^{-6}	测强磁场模、标准
	流水章动	流水强磁场予极化	$10^{-5} \sim 10^1$	10^{-8}	10^{-6}	测中强磁场模、标准
	自由进动	极化样品原子在磁场中自由进动	$10^{-5} \sim 10^{-3}$	10^{-11}	10^{-7}	地磁场、计量标准
	普通光泵	用光泵产生塞曼能级粒子数差	$10^{-8} \sim 10^{-4}$	10^{-11}	10^{-5}	地磁、外空磁场
	增量共振	横向光泵,参量共振	$10^{-14} \sim 10^{-4}$	10^{-14}	10^{-5}	极弱磁场各分量
超导	直流 SQUID	双结直流偏置,磁通量子化	$10^{-4} \sim$	10^{-4}		生物医学、极弱磁场、
	交流 SQUID	单结射频偏置,磁通量子化	量子磁通 Φ_0	Φ_0		地磁波动、计量
磁光法	法拉第效应	透光介质偏振面旋转,有方向性	$10^{-1} \sim 10^1$	10^{-4}	10^{-2}	测强磁场、激光器件
	克尔效应	克尔旋转角正比入射面磁化分量	$10^{-2} \sim 10^{-1}$	10^{-4}	10^{-2}	热核、高能、超导
	光纤干涉	用干涉仪测磁场对光程的改变	$10^{-9} \sim 10^{-4}$	10^{-9}	10^{-2}	生物医学、弱磁

6、几种 MEMS 磁强计原理工艺及有关单位^{[9]-[21]}

与老式磁强计相比，微磁强计具备重量轻、研制周期短、造价低等特点。当前 MEMS 磁强计主要有霍尔效应式磁强计、磁阻式磁强计、磁通门式磁强计、隧道效应式磁强计、谐振式磁强计等。

(1)、MEMS 磁通门式磁强计 (MFGM) [13]

- 研究单位：(1. 清华大学精密仪器与机械学系；
2. 中华人民共和国科学与技术大学国家同步辐射实验室)

作者：杨建中 1，尤政 1，刘刚 2，康春磊 2，田扬超 2

原理: MFGM 从原理上而言，是遵循法拉第电磁感应定律和磁通门效应。MFGM 基本构造涉及三个某些：磁芯、勉励线圈和检测线圈，见图 1。磁芯采用高磁导率、低矫顽力软磁材料做成。勉励和检测线圈都以螺线管形式螺绕在磁芯上。这种单磁芯简朴构造形式，测量是环境磁场矢量沿传感器敏感轴方向磁场分量。

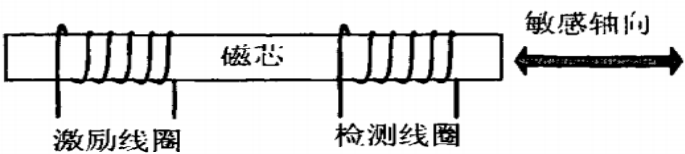
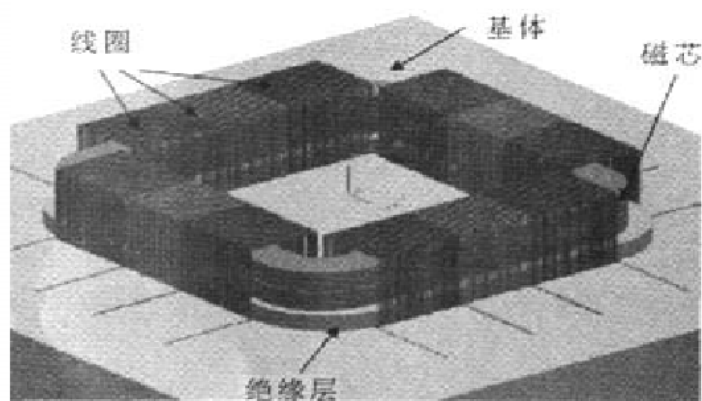


Fig. 1 Fluxgate effect of the elementary MFGM
图 1 MFGM 的基本结构示意图

Memsmag 设计：

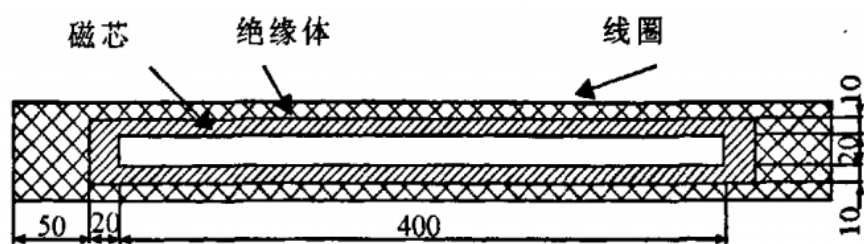
下图 2 是根据磁通门原理设计基于 MEMS 技术磁通门磁敏传感器 (MEMSMag)构造示意图。这种微型磁通门磁敏传感器构造具备对称构造、闭合磁路、差动形式、柔性连接等明显特点。



Sketch map of MEMSMag
MEMSMag 的结构示意图

图 2 MEMSMag 构造示意图

该微型磁通门磁敏感器采用氧化后硅做基底。磁芯呈方形形状环状构造。磁芯每边长 5mm，横截面长 400 μm ，厚 20 μm 。在拐角处为了减少磁感应强度变化激烈限度，进行倒圆角解决(内半径 20 μm ，外半径 420 μm)。



Cross section of MEMSMag's one side
MEMSMag 一边的横截面结构图(μm)

图 3 MEMSMag 横截面构造图

磁芯材料选用电镀工艺加工形成镍铁合金软磁薄膜，其磁性能为各向同性，保证 X 和 Y 方向磁芯构造、磁性能和电气性能等参数对称。采用电镀工艺，与溅射镀、蒸发镀等工艺比较，可以容

易实现 10 — 20um 等较大厚度软磁性磁芯薄膜加工, 获得更大磁芯横截面面积。由于磁敏感器敏捷度和磁芯横截面积成正比, 这样采用电镀工艺, 增大磁芯横截面积, 也就提高了敏捷度。另一方面, 磁通门式磁敏感器中, 规定磁芯具备较大有效磁导率、很小矫顽力和较小饱和磁场强度等磁性能。而电镀工艺形成镍铁合金镀膜, 具备良好软磁性磁学性能, 完全符合器件性能规定。

这种环形构造形状对磁通来说具备闭合磁路。和开路磁芯相比, 具备闭合磁路磁芯, 对于磁通来说, 由于软磁材料磁导率远远不不大于周边空间空气, 因此磁力线几乎都在磁芯内部聚合, 漏磁通极低, 退磁场系数几乎为零。因而闭合磁路方形环状磁芯几乎可以忽视退磁场影响。磁芯有效磁导率可以得到明显提高, 磁芯内磁化强度和磁感应强度更容易达到饱和, 形成更为陡峭动态磁滞回线, 只需要较小调制磁场就能实现对磁芯过饱和磁化和励磁功耗减少。磁芯四周共 12 个匝数和旋向都相似线圈, 每边 3 个, 每个 38 匝。以螺绕方式缠绕在被绝缘过磁芯上。在运用微细加工工艺时, 每个线圈都是在相似工艺环节中形成, 因此电气参数都是相似。每一种线圈都可以作为激励、检测或者补偿线圈。线圈旋向都相似, 对于构造中心和两条正交轴线来说具备对称性。线圈材料选用铜。底层直导线每根长 460um, 宽 15um, 厚(高)10um; 导线之间间距 30um, 形成节距(相邻两匝导线之间距离)为 45um。线圈具备立体螺绕形式。平面线圈只能将一某些磁通包围在线圈内部。如果采用平面线圈形式, 为了达到过饱和励磁, 就需要更大励磁电流或者是更多匝数励磁线圈, 这不利于功耗减少。此外, 对于检测线圈来说, 未能将磁通所有包围在线圈内, 为了获得感应电动势, 就需要更多匝数检测线圈, 不利于尺寸减小。尚有一种因素, 平面线圈多和开路磁芯联合使用。对于开路磁芯来说, 意味着较大退磁场, 和较小表观磁导率, 一方面减少了敏捷度, 另一方面不利于磁芯迅速饱和。在磁芯和线圈之间由绝缘体材料填充, 为一种

内含空腔封闭构造。绝缘材料选用光刻胶经解决后形成，起到隔离支撑和电气绝缘双层作用。在磁芯和底层导线之间绝缘层厚度为 10 μm ，磁芯和顶层导线之间绝缘层厚度也为 10 μm 。在磁芯侧面，磁芯和立柱导线之间绝缘层宽度为 20 μm 。设计中将磁芯和检测线圈做成对称差分形式，从构造上消除作为噪声奇次谐波分量，加倍增强偶次谐波分量，提高输出信号中信噪比。并且考虑到退磁场影响，将磁芯磁通途径设计成环状闭合形式，以此来减少退磁系数，提高视在磁导率，使磁芯更容易进入过饱和状态。构成差动构造方式有两种，如图 4 和 5 所示。一种方式是两个检测线圈分别螺绕在两个磁通反向磁芯上，这时检测线圈内部感应电动势正好是大小相等、极性相反，然后再将线圈同向串联。此外一种方式是单个检测线圈缠绕在两个内部磁通反向磁芯上。

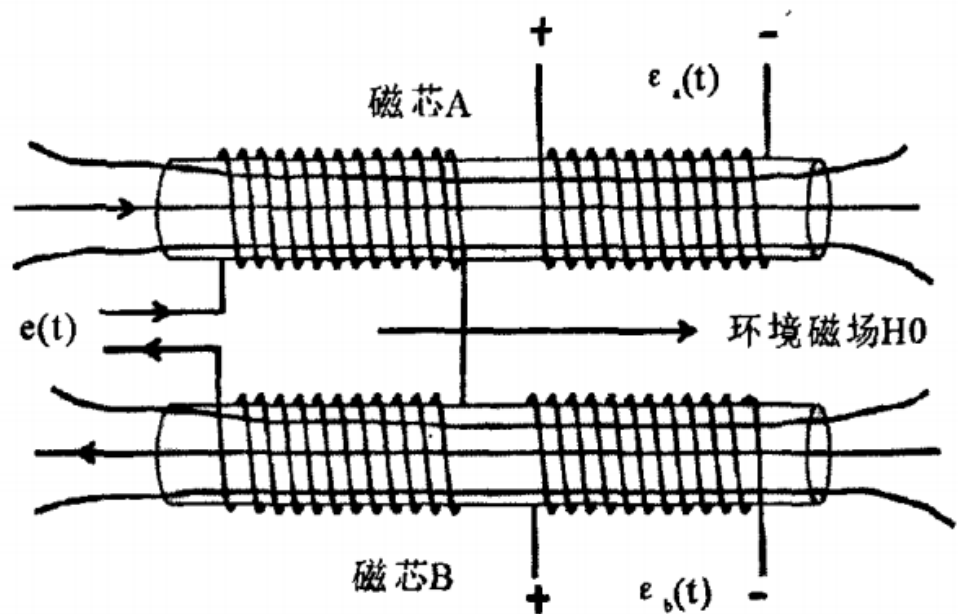


图 4 差动形式构成方式 (1)

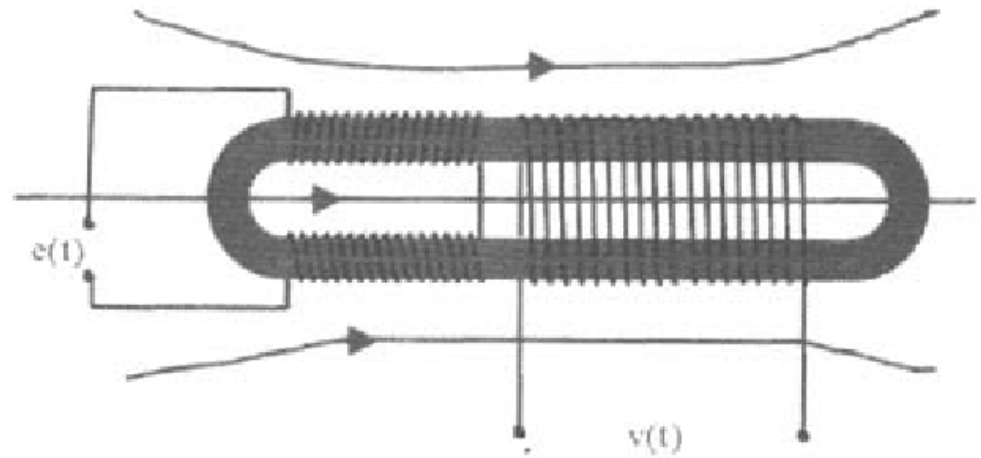


图 5 差动形式构成方式（2）

在 MEMSMag 中采用第一种差动构造形式。这样做用意重要是考虑到线圈对称性。如图 6 所示，顺时针把十二个线圈分别标记为 X_1 、 X_2 、 X_3 、 Y_1 、 Y_2 、 Y_3 、 X'_1 、 X'_2 、 X'_3 、 Y'_1 、 Y'_2 、 Y'_3 。这样 X_1 和 X'_1 就构成一组线圈，别的同理。通过这种形式，十二个线圈构成六组线圈对，具备相似构造参数和电气参数，至于运用哪一组线圈作为励磁、检测和补偿线圈，可以依照应用需要在使用时决定，而不是在设计和加工时就拟定，扩大了使用灵活性。磁芯形状是方形环状构造，具备对称性，选用各向同性软磁材料，这样四条边电磁参数都相似。线圈旋向相似，匝数相似，也具备对称性。 x 方向两条边构成一组双磁芯磁探头，用于 x 方向磁场分量测量；同样， y 方向两条边构成另一组双磁芯磁探头，用于 y 方向磁场分量测量。由于磁芯和线圈是对称，又具备差动构造，使得这种构造很容易形成一种两轴磁敏感器，也可以形成一种一轴磁敏感器，这重要是由于线圈具备柔性连接性能。如果把线圈对 X_1 和 X'_1 正向串联作为励磁线圈， X_3 和 X'_3 正向串联作为补偿线圈， X_2 和 X'_2

反向串联作为检测线圈，就可形成一种检测 Y 轴方向一轴磁敏感器。对此外三组线圈也进行同样连接，也形成一种检测 x 轴方向一轴磁敏感器。这样整个就形成了一种两轴磁敏感器，可用于测量磁场强度在 x 和 Y 轴两个正交轴方向上分量。

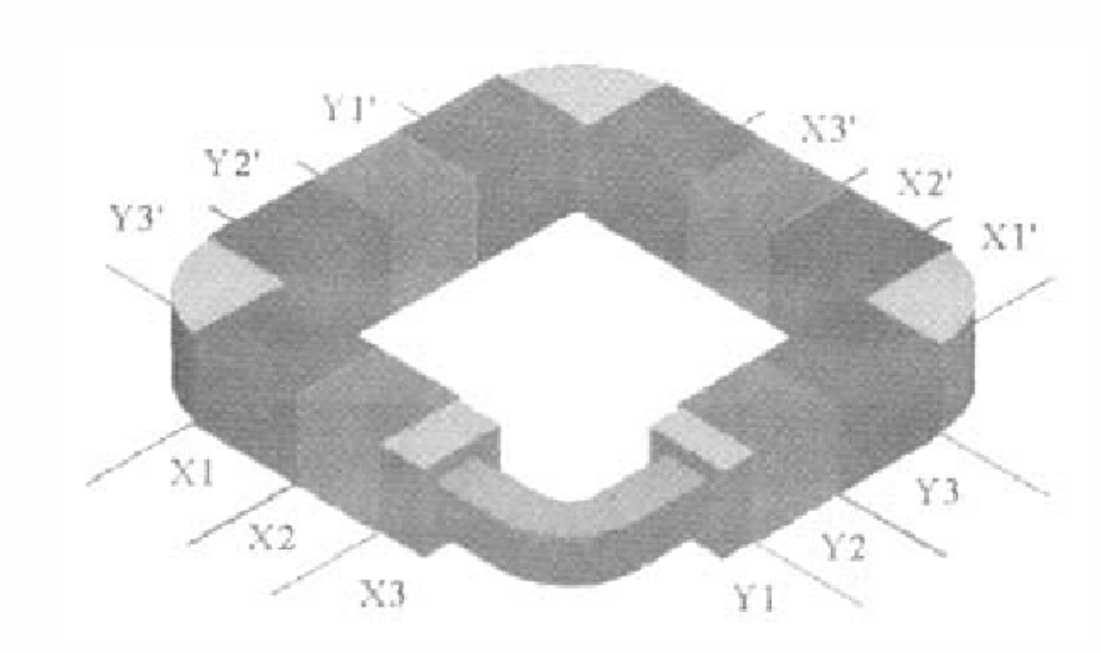


图 6 MEMSMag 连结方式示意图

除上述连接方式之外，这种构造形式通过不同连接方式还可以形成一轴磁通门磁敏感器构造，如表 2 所示。

表 2 MEMSMag 中线圈不同连结方式

序号	励磁线圈	检测线圈	补偿线圈	匝数比	磁敏感器特征描述
1	$X1 + X1' + Y1 + Y1'$	$X2 - X2', Y2 - Y2'$	$X3 + X3', Y3 + Y3'$	2:1:1	两轴, 有补偿
2	$X1 + X1' + Y1 + Y1'$	$(X2 + X3) - (X2' + X3'), (Y2 + Y3) - (Y2' + Y3')$	-	1:1	两轴, 无补偿
3	$X1 + X2 + X3 + X1' + X2' + X3'$	$(Y1 + Y2 + Y3) - (Y1' + Y2' + Y3')$	-	1:1	一轴, 无补偿
4	$X1 + X2 + X3 + X1' + X2' + X3'$	$(Y1 + Y2) - (Y1' + Y2')$	$Y3 + Y3'$	3:2:1	一轴, 有补偿

(注:加号“+”表示同向串联,减号“-”表示反向串联。2 匝数比是指励磁线圈:检测线圈:补偿线圈(如果存在补偿线圈的话)。)

(2)、MEMS 谐振式磁强计^{[9][11]}

基本原理: 谐振式磁强计基本工作原理是运用通电导线在磁场中产生洛仑兹力来检测磁场强度大小。在悬臂梁中通过一定频率交变电流, 其频率等于悬臂梁谐振频率, 这样, 当外界有磁场时, 悬臂梁中电流将受到洛仑兹力作用使悬臂梁产生振动, 其振幅和外界磁场强度大小成正比关系, 通过检测振幅大小, 即可得到磁场强度信息。由于其工作在谐振状态下, 因而其振幅可以被放大 Q 倍, 从而使检测精度和敏捷度得到大幅提高。

谐振式磁强计按照其构造基本可以分为扭摆式和水平式两种。

扭摆式谐振式 MEMS 磁强计:

以上内容仅为本文档的试下载部分，为可阅读页数的一半内容。

如要下载或阅读全文，请访问：

<https://d.book118.com/926114205101010140>