



量子磁力 计报告

Quantum magnetometer Report

量子精密测量系列报告

2022年7月

前言

磁，是自然界中的一种基本物理属性。小到微观粒子，大到宇宙天体，都存在一定程度的磁性。

从古代的指南针，到近代的高斯计，再到数十年前的超导量子干涉仪，磁测量技术随着科技进步在不断发展，磁测量工具被应用在诸多领域，改变着人类社会生活。当前，第二次量子革命下，人们对微观尺度的探索有了更高追求。

量子精密测量是量子科技三大领域中产业化进程最快的，而量子磁力计更是量子精密测量产业中的主要代表之一。利用量子力学原理，量子精密测量技术有望突破经典测量的极限，在灵敏度等指标上有较大的优势。磁测量技术在诸如生物医学、科学研究、军事国防和工业检测等重要领域发挥重要价值。

目前，量子磁测量研发集中在原子磁力计与金刚石NV色心磁力计等技术路线，并且得到不同程度的商业化应用。量子磁力计正在推动尖端医疗器械的更新迭代，并且成为纳米科学研究的重要工具。

本期报告 关键词 ◆

01



弱磁测量

微弱磁场测量是量子精密测量领域的一大分支。基于量子理论而设计制造的磁测量仪器设备已逐渐在多种领域得到应用与发展。

02



技术路径

当前, 技术实现上最有潜力、市场关注度较高的量子磁力计按技术路线有核子旋进磁力计、SQUID磁力计、原子磁力计、金刚石NV色心磁力计等。

03



商业转化

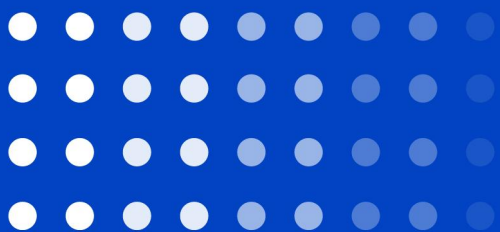
量子磁力计的商业化目前多在心磁、脑磁、地球物理方面。其中, SQUID磁力计较为成熟, 但其有运行环境要求高、运行维护成本高、装置复杂等缺点, 不利于量子磁力计的商业化推广。当前在诸多不同技术的磁力计中, SERF原子磁力计极有可能是下一个很好的替代, 它具有小型化、可穿戴、成本较低等优点, 使量子磁力计技术有望进一步商业化。

04



应用领域

当前量子磁力计主要应用如: 生物磁(心磁图、脑磁图、细胞科学研究等)、地磁(地球物理研究、空间勘探等)、军事国防(脑机接口、水下绘图与导航、水上反潜等); 工业检测(无损探伤、材料检测等)。量子磁力计亟待提升精度、稳定性等, 以及带来一些前所未有的功能, 从而拓展更多领域的应用。



量子磁力计 趋势判断



趋势 1：量子磁力计在国防军事应用中已有发展方向

据公开信息，量子磁力计在军事方面的用途包括不依赖于GPS等当前传统地理定位技术的地磁导航、反潜战等。当前，量子磁力计已在磁异常地图测绘与水上反潜技术得到应用，磁异常地图用于惯性导航与量子导航的定位，不依赖GNSS（全球导航卫星系统）与雷达，反潜技术主要通过水平面上的机载悬挂航空磁力仪对水下目标识别。

未来，量子磁力计将有以下几种军事应用融合发展：第一，量子磁力计完成地理测绘地图后，可应用于量子导航系统，与量子重力仪等量子传感器配合使用，提供更精准的信息，减轻对GNSS、雷达的依赖；第二，用于反潜战的舰载磁力计的使能技术仍需提升，增强对潜艇或水雷的目标识别磁性探测能力，显著地提升水下作战能力；第三，可穿戴式的脑磁探测设备将有可能安装在士兵头盔中，远程实时反馈作战人员生理状态和指导作战，及时反馈前线作战人员情报汇报。

趋势 2：经典磁测量传感器逐步“量子化”

一些基于经典物理技术的传感器正在逐渐过渡为量子传感器。这一趋势发展的原因一方面是量子传感器基于对量子的操纵，测量精度可突破经典极限；另一方面，量子系统赋予了量子传感器更好的稳定性，因其不受制造差异、缺陷、杂质或老化的影响，这使得它们更适用于精密测量。量子磁力计技术是经典传感器走向量子化的先锋，目前，商业化较为成熟的产品有质子磁力计、欧弗豪泽磁力计、光泵磁力计、SQUID磁力计；正在进入商业化的产品有SERF磁力计、金刚石NV色心磁力计。

经典传感器向量子传感器发展的过程中也将推动社会诸多领域的发展。例如，卫星上使用的磁力计要求性能稳定、工作时间长，量子磁力计刚好符合这一特性；高端医疗设备的采购成本和运营维护成本降低，有助于更广泛的应用从而普惠大众；新型快速精准检测器材的应用，可提升诊断效率，甚至在COVID-19时代或未来其他疫情下，极大地为社会带来便利；基于量子磁力计的电池缺陷检测技术有望短期能实施落地，维护人们的生命财产安全；高灵敏度的磁成像显微镜能推动基础科研发展。

趋势 3: SERF 技术将为下一代脑磁图仪器赋能

当前,医院使用的脑部与心脏诊断技术——脑磁图和心磁图绝大多数是利用 SQUID 技术获得磁场数据,但 SQUID 设备占地面积大、装置复杂、价格昂贵、运行环境苛刻(需液氮制冷、需磁屏蔽)等问题限制其大范围应用,广泛大众无法受益于这项高端医疗检查。并且,氦气属稀有气体,全球资源正在消耗,尤其是脑磁图,其背后的技术亟待新的方式来摆脱既往发展限制。

就目前发展状态来看,在 OPM 基础上发展的 SERF 原子磁力计有望改变现状。SERF 不仅成本低于 SQUID,并且具有对低频信号敏感、室温运行、功耗低、体积小、可穿戴等优点,分辨率也与 SQUID 接近或超越,适合大规模推广应用,这也是 OPM 在基础物理和实际应用研究中得到大量关注与研究的重要原因。公开信息显示,目前,基于 SERF 磁力计的脑磁图设备,价格约为 SQUID 磁力计的二分之一,约为 1500 万人民币,未来大规模商业化后,脑磁图设备的价格有望从 1500 万人民币降至 1000 万左右,将有更多的医疗机构有能力采购,相关的诊断费用将大大降低。

趋势 4: 量子磁力计应用前景广阔,金刚石 NV 色心磁力计与原子磁力计具有巨大潜力

基于量子自旋技术的金刚石 NV 色心磁力计与原子磁力计是近些年最有望商业化的量子传感器,适用行业和应用场景也较为多样化。目前,量子磁力计相对成熟的应用领域为生物医疗、物理科研和地磁勘探。在医疗领域,基于 SERF 磁力计的新一代脑磁图和心磁图在实验演示方面已经验证了可行性,短期内可实现商业化,有望替代 SQUID 市场份额,或打开新的小型化可穿戴弱磁测量市场。此外, SERF 原子磁力计还能解决锂电池品质检测与分级等, CPT 与 NOMR 技术的研发也让人期待原子磁力计实现更多落地应用。

在物理科研、地磁导航、军事国防、工业检测等应用领域,目前主要产品为质子磁力计等早期量子磁力计。短期内,金刚石 NV 色心磁力计可能会成为科学研究、无损探伤方面的主要量子磁力计,因其生物相容性好,空间识别能力强,是目前各学术团队、各国家提及频次高、受关注度高、发展较快的技术。金刚石 NV 色心磁力计尚未实现物理上的极限,诸多团队正为之努力,它有望成为新一代量子磁力计,并满足研究单个细胞、蛋白质、DNA 或进行单分子识别、单原

子核磁共振等等新兴科研需求。

趋势 5：多国发布政策支持量子磁力计研发，相关研究机构开展布局

美国、英国、德国、法国、中国、澳大利亚等国均公开了量子磁力计相关的研究计划和项目。其中，在量子传感器领域的磁测量相关研究的固态量子传感器（金刚石NV色心磁力计）与光泵碱磁力计（OPM）被提出是重点研究发展方向。美国最新发布的《将量子传感器付诸实践》(*Bringing Quantum Sensors to Fruition*)中，重点提出了光学磁力计与NV色心磁力计的研究进展与应用前景，举例说明了其巨大的应用价值与潜力。

此外，还有其他国家高校开展了相关基础研究布局。例如，日本东京工业大学展开固态量子传感器在MEG领域中的应用；中国北京航空航天大学大科学装置研究院开展了基于原子自旋SERF效应、基于金刚石色心等量子精密测量技术的研究。当前有很多处在不同研发阶段的量子传感器，多国均在统一协调，缩短产品推向市场的进程，并加快技术转让，同时也不断加强本国在各自领域的领导地位。在尽可能减少对性能影响的情况下，小型化、紧凑化、降低成本是各大中上游供应商的重点追求目标。

目录

前言 i

本期报告关键词 ii

量子磁力计发展趋势预判 iii

第一章 量子磁力计技术简介 1

 一、 量子磁力计的基本介绍 1

 二、 主要技术路径 2

 1、 核子旋进磁力计 2

 2、 超导量子干涉器件磁力计 3

 3、 原子磁力计 3

 4、 金刚石氮空位色心磁力计 6

 三、 小结 8

第二章 量子磁力计应用 10

 一、 磁测量技术及其应用 10

 二、 量子磁力计应用领域 11

 1、 生物医学 11

 2、 工业检测 13

 3、 物理科研 15

 4、 地磁导航 16

 5、 军事国防 17

 三、 小结 18

第三章 量子磁力计研究主要参与国的研究概况 20

第四章 量子磁力计市场 23

 一、 产业链分析 23

 二、 中标信息 24

 三、 主要供应商 25

 四、 投融资情况 28

 五、 市场规模预测 30

附录 35

 附录 1 光泵磁力计技术路径的研究历程 35

 附录 2 SERF 原子磁力计基于不同碱金属原子的加热温度的真实测灵敏度的研究 35

 附录 3 非线性磁光效应磁力计技术的研究进展 36

 附录 4 基于系综 NV 色心的磁测量技术的研究进展 36

 附录 5 原子磁力计测量得到的不同特征生物磁及强度 37

声明 38

关于我们 39

表目录

表 1 SQUID 磁力计信息整理 3

表 2 光泵磁力计基本原理 4

表 3 脑磁图 SQUID 磁力计与 SERF 原子磁力计对比 5

表 4 量子磁力计主要技术路径对比 9

表 5 脑磁图与心磁图的相关信息对比 11

表 6 量子磁力计各应用领域现状及未来发展趋势 19

表 7 量子磁力计研究主要参与国及研发概况 20

表 8 量子磁力计主要研究机构 21

表 9 中国脑磁图中标信息 25

表 10 中国量子磁力计中标信息 25

表 11 量子磁力计主要公司介绍 26

表 12 量子磁力计公司投融资情况 28

图目录

图 1 磁力计的主要发展历程..... 1

图 2 量子磁力计主要技术路径..... 2

图 3 铯光泵地面磁力计及其使用示例..... 5

图 4 一种用于生命科学领域的金刚石氮空位色心磁力计原型..... 7

图 5 不同磁测量应用对磁力计灵敏度以及可探测频率范围的要求..... 10

图 6 MEG 通过测量神经电流产生的磁信号生成的实时图.....11

图 7 fMCG 测量装置与 MCG 胎儿信号识别示意图..... 12

图 8 漏磁现象的简单示意图..... 13

图 9 磁力计传感器位于螺线管上方的超低磁场区域..... 14

图 10 CPI 开发用于彻底改变生产线质量评估和电池分级的传感器..... 14

图 11 超导岩石磁力计图..... 16

图 12 CHAMP 卫星及仪器图示..... 16

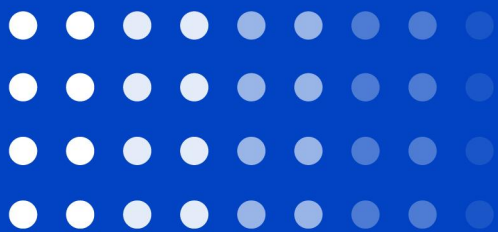
图 13 装载高精度光泵磁力计的设备及其地磁测绘图..... 17

图 14 量子磁力计产业生态概览..... 23

图 15 量子磁力计全球市场规模预测..... 30

图 16 量子磁力计全球各区域市场份额..... 31

图 17 量子磁力计全球各行业市场份额..... 32



量子磁力计

正文



第一章

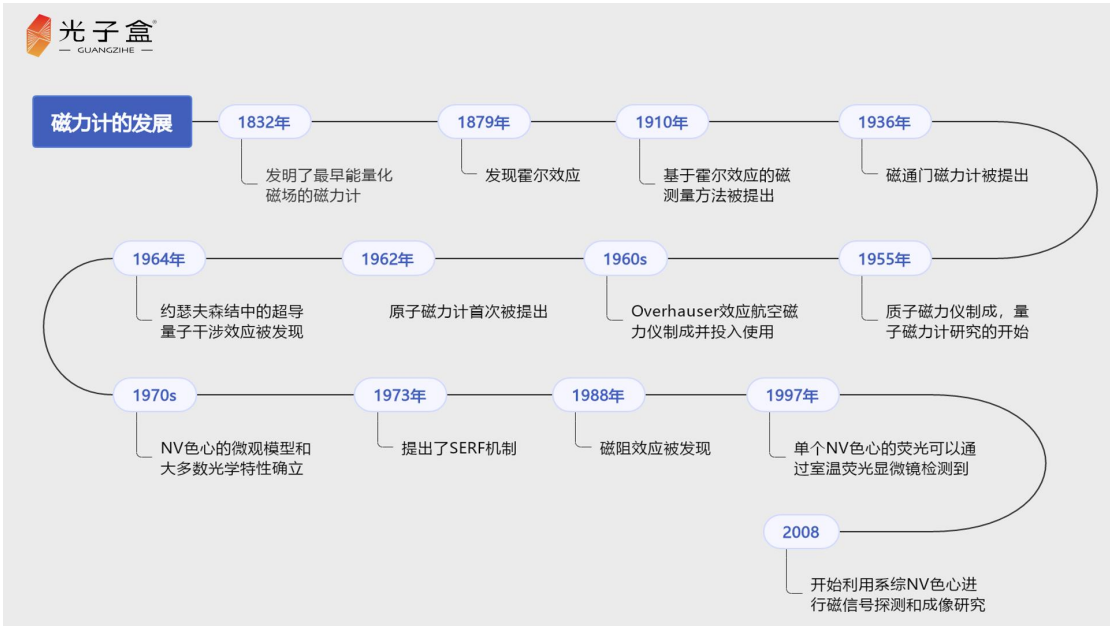
量子磁力计技术简介

一、量子磁力计的基本介绍

量子磁力计（Quantum magnetometer）也称量子磁强计，是依据近现代量子物理原理设计制造的磁测量仪器¹。其发展伴随着第二次量子革命，特点是操纵和控制单个量子（如原子、离子、电子、光子、分子等），测量精度允许突破经典极限，达到海森堡极限。宏观物体的磁性源于微观粒子的磁性，其中主要是来自其内部所包含的电子的磁性²，通过物理学实验，人们发现组成宏观物体的许多基本物质粒子，例如电子、原子核以及原子自身，都与磁场存在相互作用。

量子磁力计有望改善传感器的尺寸、重量、成本和灵敏度，并且其物理实现已在多个量子体系中得到发展，例如核子旋进磁力计、超导量子干涉装置磁力计、原子磁力计、金刚石 NV 色心磁力计等。

图 1 磁力计的主要发展历程



来源：Science、工程地球物理学报、中国学位论文全文数据库、光子盒量子研究院整理

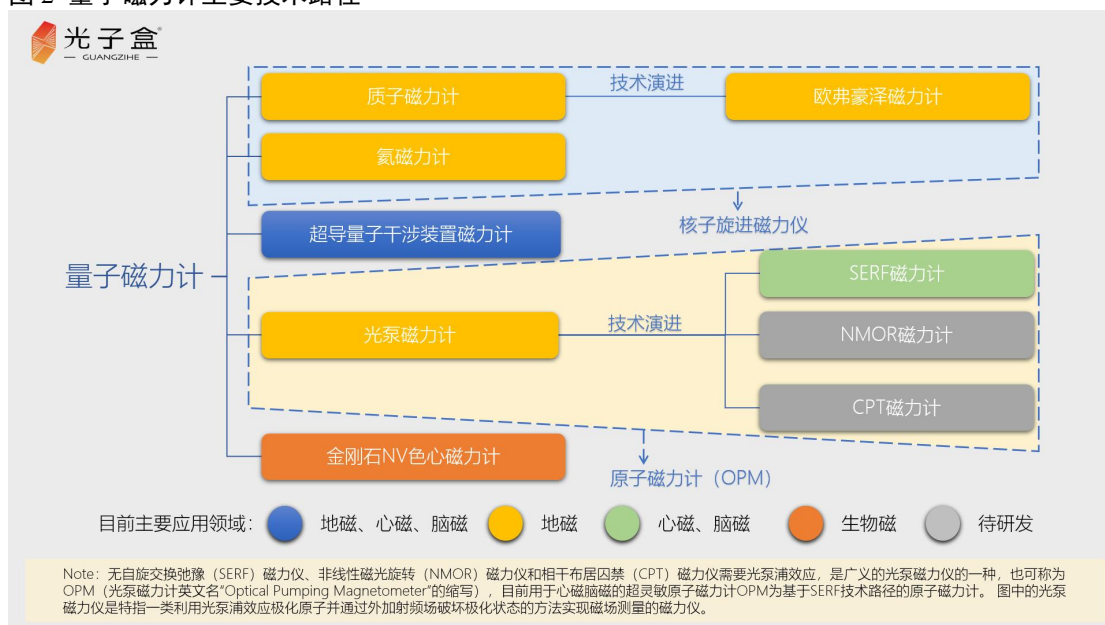
¹ <https://iqc.pku.edu.cn/dht/lzgxylzxx/yjfx/lzcly/index.htm>
² 谢一进.(2020).基于金刚石氮-空位色心系综的磁测量方法研究[D].中国科学技术大学.

二、主要技术路径

目前，量子磁力计技术主要基于微观粒子的自旋体系磁测量，SQUID 基于超导约瑟夫森效应和磁通量子化现象。新一代量子磁力计的主要目标是进一步提高微磁测量精度，降低成本并提高其使用推广也是其主要发展方向，目前原子磁力计能在室温下工作并且测量精度已经超过了 SQUID 磁力计³。

本节主要介绍各量子磁力计的原理，梳理并总结了当前主要的量子磁力计技术路径：核子旋进磁力计、SQUID 磁力计、光泵磁力计、SERF 磁力计、NMOR 磁力计、CPT 磁力计、金刚石 NV 色心磁力计。

图 2 量子磁力计主要技术路径



注 1：灰色圆圈代表该技术路径截止发稿日暂未发现商业化案例，待研发。

注 2：OPM 为光泵磁力计的英文缩写，但也可指基于光泵浦技术的原子磁力计。市场上高灵敏的光泵原子磁力计 OPM 主要基于 SERF 技术路径，SERF 技术路径可以理解为 OPM 技术的改良。例如，“2003 年普林斯顿大学研究组发现了基于原子无自旋交换弛豫 (SERF) 的全新物理学现象，并基于此建造了可进行 fT 级别灵敏度测量的光泵原子磁力计 (OPM) 系统⁴”中的 OPM 系统其实主要基于 SERF 技术路径。

来源：光子盒量子研究院整理

1、核子旋进磁力计

在应用地球物理学中使用的核子旋进磁力计 (Nuclear-Precession Magnetometer) 有三种：质子磁力计、欧弗豪泽效应质子磁力计 (Overhauser effect proton magnetometer, OVM) 和氦 3 (^3He) 磁力计。前两者利用氢原子核即质子的自旋磁矩在外磁场中的旋进来测量磁场，而 ^3He 磁力计则是利用 ^3He 的核磁

³ Degen CL, Reinhard F, Cappellaro P. (2017). Quantum sensing. Rev Mod Phys. ;89(3).

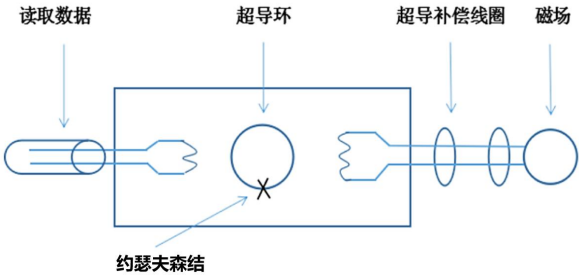
⁴ <https://xueqiu.com/2250028670/181496629>

矩在外磁场中的旋进来测量磁场⁵。

2、超导量子干涉器件磁力计

超导量子干涉器件（SQUID）磁力计其功能是一种磁通传感器。这种技术允许在宏观尺度上制造一个量子系统，并可以通过微波信号进行有效的控制。SQUID 是目前主要的磁力传感器之一，缺点需要在低温环境下运行。

表 1 SQUID 磁力计信息整理

类别	内容
使用条件	需建立在超导条件下电流与磁场相互作用机制上
原理	基于超导约瑟夫森效应和磁通量子化现象，将磁场的微小变化转换为可测量的电压
测量物理量	磁通量及能转换成磁通的其它磁场量
原理示意图	

来源：光子盒量子研究院整理

SQUID 根据所使用的超导材料,可分为低温超导 SQUID 和高温超导 SQUID;又可根据超导环中插入的约瑟夫森结的个数,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）。DC-SQUID 由直流偏置制成双结的形式；RF-SQUID 由射频信号作偏置，具体采用的是单结形式⁶。DC-SQUID 可以用于测量微弱磁场,作为目前灵敏度较高的磁力计其灵敏度可达到 1 fT/Hz^{1/2} ⁷。

3、原子磁力计

原子磁力计（Atomic Magnetometer）又称全光学磁力仪（All Optical Atomic Magnetometer）⁸，其包含多种不同技术路径的磁力计。下文将介绍的主要技术

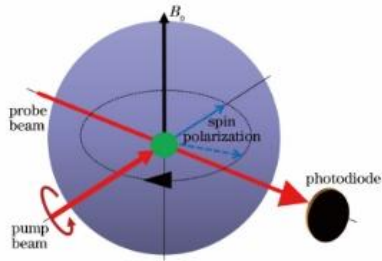
⁵ 董浩斌,张昌达.(2010). 量子磁力仪再评说[J]. 工程地球物理学报,7(04):460-470.
⁶ 陈林.(2006). 超导量子干涉仪应用研究[D].华中科技大学.
⁷ 季云兰.(2019). 无自旋交换弛豫原子磁力计及其零场-超低场核磁共振的应用[D].中国科学技术大学.
⁸ 银鸿,杨生胜,郑阔海,文轩,庄建宏,王俊.(2017). 弱磁测量传感器的发展与应用[J]. 真空与低温,23(05):304-310.

路径⁹有基于光学-射频双共振现象的光泵磁力计（OPM）、测量低频弱磁场的无自旋交换弛豫（SERF）、非线性磁光旋转（NMOR）磁力计、相干布局囚禁磁力计（CPT）磁力计等。

(1) 光泵磁力计

光泵磁力计（Optical pumping magnetometer, OPM）又称电子自旋共振磁力仪。光泵磁力计具有无零点漂移，响应快速等优点。光泵磁力计适合在大型平台搭载，目前是航空磁测量最常用的磁力计，用来进行地磁测绘。

表 2 光泵磁力计基本原理

类别	内容
测量原理	通过激光技术测量磁场中自旋极化惰性气体原子（如氦、氙）或碱金属原子（如钾、铷、铯）的拉莫尔进动来实现磁场探测
使用条件	室温环境，碱金属气室是超高灵敏磁场和惯性测量的灵敏核心，原子源种类决定了测量灵敏度的极限
测量物理量	利用光信号检测较弱的射频信号可实现高精度的磁场测量
原理示意图	

来源：光子盒量子研究院整理

OPM 命名根据其工作原理的光泵浦效应，由于磁场信息是通过光信号表现出来，所以原子磁力计又可称为光学磁力计。因为其作用对象主要为惰性气体原子，所以 OPM 是原子磁力计。SERF、NMOR 等基于光泵浦技术的磁力计，它们也是广义的光泵磁力计，也可以称为 OPM¹⁰。

⁹ 刘慧丰,鲍善霞.(2019).原子磁力计在脑磁测量中的应用研究进展[J].山西大同大学学报(自然科学版),35(02):8-12.
¹⁰ 彭欣欣.(2019).基于自旋极化的高灵敏原子磁力计研究[D].华东师范大学.

图 3 铯光泵地面磁力计及其使用示例



来源：LAUREL-Geophysics 产品介绍¹¹

(2) 无自旋交换弛豫磁力计

无自旋交换弛豫（Spin-exchange relaxation free, SERF）磁力计是一种运行在 SERF 态下的新型碱金属原子磁力计，通常需要较高的温度来保证高饱和蒸气密度以实现 SERF 态，以及尽可能小的温度梯度来使原子极化更为均匀。SERF 磁力计灵敏度不受自旋交换弛豫的影响，并且具有非低温操作、易于小型化、高空间分辨率等优点，是目前探测灵敏度最高的磁力计，能达到 $0.54 \text{ fT/Hz}^{1/2}$ ¹²。

表 3 脑磁图 SQUID 磁力计与 SERF 原子磁力计对比

光子盒 — GUANGZHIHE —		
	SQUID磁力计	SERF原子磁力计
售价	≈3000万人民币	≈1500万人民币
年使用费	≥250万元/年	几乎无
探测器阵列	固定；与头皮距离较远	可穿戴，可调节；与头皮距离较近
信噪比	较低；无法兼顾成人和儿童	对低频信号敏感；兼顾成人和儿童
尺寸	大	小
屏蔽室面积	>150平米	~20平米
示意图		

来源：光子盒量子研究院整理¹³

¹¹ <https://www.laureltechnologies.com/zh-hant/products/>
¹² 基于不同原子源的不同灵敏度详见附录 2
¹³ 该部分主要由医学物理和工程北京市重点实验室主任、北京大学磁共振成像研究中心主任高家红的公开讲座内容整理；图片为网络资料整理

SERF 原子磁力计在实验室环境的的研究已较为成熟，近几年来主要转向针对于应用方向的研究，有潜力成为新一代心磁图、脑磁图。目前，SERF 原子磁力计的灵敏度尚未达到极限，小型化 SERF 原子磁力计的灵敏度仍有提升空间。其次，SERF 原子磁力计的成本还有降低空间，以便于更好地进行脑科学等相关应用的研究¹⁴。

(3) 非线性磁光效应磁力计

非线性磁光旋转 (Nonlinear magneto-optical rotation, NMOR) 磁力计利用非线性磁光旋转效应实现磁场测量，优点是技术简单、高精度、高动态范围。典型的 NMOR 的工作条件：气室体积较小，小于 10cm^3 ，气室温度一般为室温或轻微加热，一般低于 60°C ¹⁵。NMOR 适合研究近零场磁力计，并且使得研究动态范围较广的超灵敏磁力计成为了可能，包括动态范围涵盖地磁场在内的磁场。

(4) 相干布居囚禁磁力计

相干布居囚禁 (coherent population trapping, CPT) 是一种量子光学现象，与 OPM 相比，CPT 磁力计的一个突出特点是利用全光学共振，其磁探头全部由光学元件构成，不需要射频线圈，这就使其探头部分可以做得很小，从而能够实现更高的空间分辨率；同时，也不存在射频线圈产生额外磁场噪声的问题，使 CPT 磁力计对外磁场的测量更加准确。

科研人员利用相干布居囚禁 (CPT) 磁力计研究 MCG，但 CPT 磁力计的探测灵敏度在 $\text{pT} / \text{Hz}^{1/2}$ 水平，因此在生物磁应用范围有限。科研人员认为其磁场测量的极限分辨能力可达 $0.1 \text{ fT} / \text{Hz}^{1/2}$ 水平，要进一步提高 CPT 磁力计的磁场探测灵敏度，需要在提高 CPT 信号幅度和压窄信号线宽等方面做进一步的工作。

4、金刚石氮空位色心磁力计

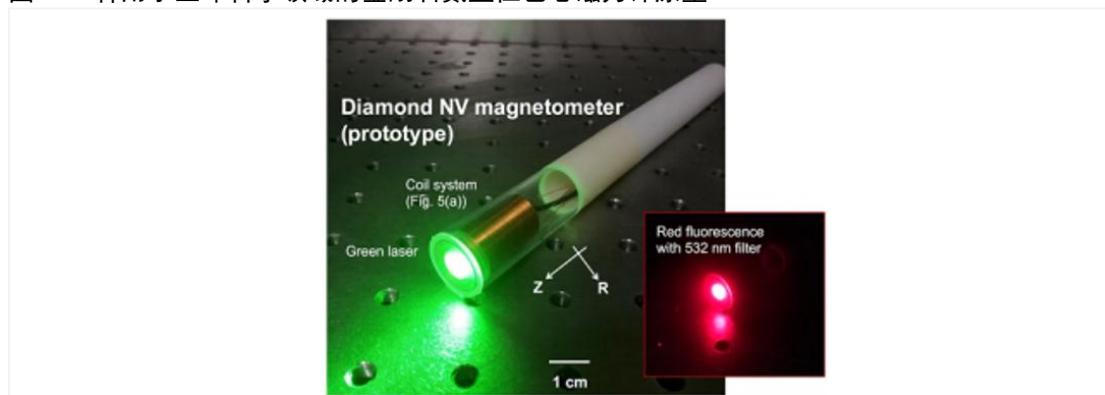
不同于基于原子蒸汽的碱金属原子磁力计，金刚石氮空位 (diamond nitrogen-vacancy) 色心磁力计基于固体介质，因具有极高的空间分辨能力而受到关注。金刚石 NV 色心磁力计原理是单电子自旋比特的相干操纵，金刚石晶体中

¹⁴ 王宇,赵惟玉,康翔宇,李筠,高秀敏,李阳. (2021). SERF 原子磁力计最新进展及应用综述[J]. 光学仪器.

¹⁵ 彭欣欣. (2019). 基于自旋极化的高灵敏原子磁力计研究[D]. 华东师范大学.

的 NV 色心作为一个量子比特的电子自旋，与外部磁场耦合，特点是无需低温冷却即可保证生物相容性和高灵敏度，被广泛应用在生物大分子和基础物理等方面的研究中。并且该材料的生物信号成像在理论上接近光学衍射极限，具有极优的空间分辨率¹⁶。

图 4 一种用于生命科学领域的金刚石氮空位色心磁力计原型



来源: Optimization of a Diamond Nitrogen Vacancy Centre Magnetometer for Sensing of Biological Signals(2020, J Webb)

目前，基于单 NV 色心的磁测量技术在灵敏度指标上已经实现了纳米尺度分辨率以及可测得单核自旋的灵敏度。2015 年，中国科大杜江峰团队利用 NV 色心作为量子探针，在室温大气条件下获得了世界上首张单蛋白质分子的磁共振谱。该研究不仅将磁共振技术的研究对象从数十亿个分子推进到单个分子，“室温大气”这一宽松的实验环境也为该技术未来在生命科学等领域的广泛应用提供了必要条件，使得高分辨率的纳米磁共振成像及诊断成为可能。

与单 NV 色心的磁测量技术略有不同，基于系综 NV 色心的磁测量技术通常面向的是宏观磁场的测量。在应用方面，基于系综 NV 色心的磁力计已测得了蠕虫神经元产生的磁信号、涡流成像、古地磁学中的矿石检测等。中国在系综 NV 色心磁测量领域的研究相对起步稍晚。在 2016 年左右中国有团队开展该领域的研究，包括中国科大、北航等¹⁷。2020 年，中国科大杜江峰团队结合磁通聚集方法将系综 NV 色心磁测量灵敏度提升至 $0.2 \text{ pT/Hz}^{1/2}$ 。

¹⁶ <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fphy.2020.522536/full>

¹⁷ 谢一进.(2020). 基于金刚石氮-空位色心系综的磁测量方法研究[D].中国科学技术大学.

三、小结

本节通过列表总结对比了不同磁力计的测量精度以及其优劣势。从技术路径的成熟度来看，质子磁力计、Overhauser 磁力计、SQUID 磁力计、光泵磁力计与是目前最成熟的量子磁力计，已经实现商业化应用；SERF 原子磁力计理论成熟，正在从实验室走上商业化，目前已有少数商业应用；CPT 和 NMOR 原子磁力计均已有实验室原型机，但无商用案例；氦 3 磁力计目前只有少量学术研究。

高灵敏的 OPM¹⁸具有比传统的 SQUID 磁力计更低的制造和运行成本，尤其是 SERF 磁测量技术进一步提高了灵敏度，是目前国际上公认的下一代脑磁图仪器的发展方向。这使得原子磁力计不仅在基础物理研究方面，而且也在实际应用中得到大量关注与研究。

各种量子磁力计在不同特性上各有优劣，针对不同应用场合也各有所长，比如 NV 色心磁力计，虽然目前测量精度与 OPM、SQUID 磁力计相比较低，但有非常好的生物相容性，是目前各学术团队、各国家发展较快的技术，提及频次高，受关注度高。

¹⁸ 注释：市场上高灵敏的 OPM 磁力计主要基于 SERF 技术路径。例如，2003 年普林斯顿大学研究组发现了基于原子无自旋交换弛豫(SERF)的全新物理学现象，并基于此建造了可进行 fT 级别灵敏度测量的光泵原子磁力计(OPM)系统。<https://xueqiu.com/2250028670/181496629>

表 4 量子磁力计主要技术路径对比

光子盒 — GUANGZHIHE —			
类别	测量精度	优势	劣势
质子磁力计	0.1 nT/Hz ^{1/2}	与利用电子磁矩进动的磁力计相比，有较高的绝对精度	功耗大且不能连续测量
欧弗豪泽效应 (Overhauser) 磁力计	10 pT/Hz ^{1/2}	保留传统质子磁力计精度的基础上降低了功耗；极化和测量可同时进行，并能连续测量	价格约为质子磁力计的两倍
氦 (³ He) 磁力仪	0.05 nT/Hz ^{1/2}	核子旋进磁力计中功耗最小的；形成宏观核磁矩之后，拉莫尔旋进可持续几小时到几天。	(未得到充分验证)
超导量子干涉装置 (SQUID) 磁力计	1 fT/Hz ^{1/2}	其带宽非常大，可以覆盖直流到 GHz 的频率范围	需要液氦温度 (4.2K) 或者液氮温度 (77K) 下运行；体积庞大价格昂贵且安装比较复杂
光泵磁力计 (OPM)	100 fT/Hz ^{1/2}	易小型化	受自旋交换弛豫的影响
无自旋交换弛豫 (SERF) 磁力计	0.16~55 fT/Hz ^{1/2}	轻便、可小型化、探测距离近、造价较低	部分高精度需高温环境
非线性磁光旋转 (NMOR) 磁力计	0.3 fT/Hz ^{1/2}	高动态范围，快速响应	只能测量零磁场附近磁场的微小变化
相干布居囚禁 (CPT) 磁力计	12 pT/Hz ^{1/2}	易小型化、理论测量精度高	(未得到充分验证)
金刚石 NV 色心磁力计	0.9~15pT/Hz ^{1/2}	在空间分辨率上具有优势、成本低、生物相容性好	(未得到充分验证)

注：磁感应强度单位 μT 表示 10^{-6} 特斯拉；nT 表示 10^{-9} 特斯拉；pT 表示 10^{-12} 特斯拉；fT 表示 10^{-15} 特斯拉；laT 表示 10^{-18} 特斯拉。
来源：光子盒量子研究院整理（详见附录 1~4）

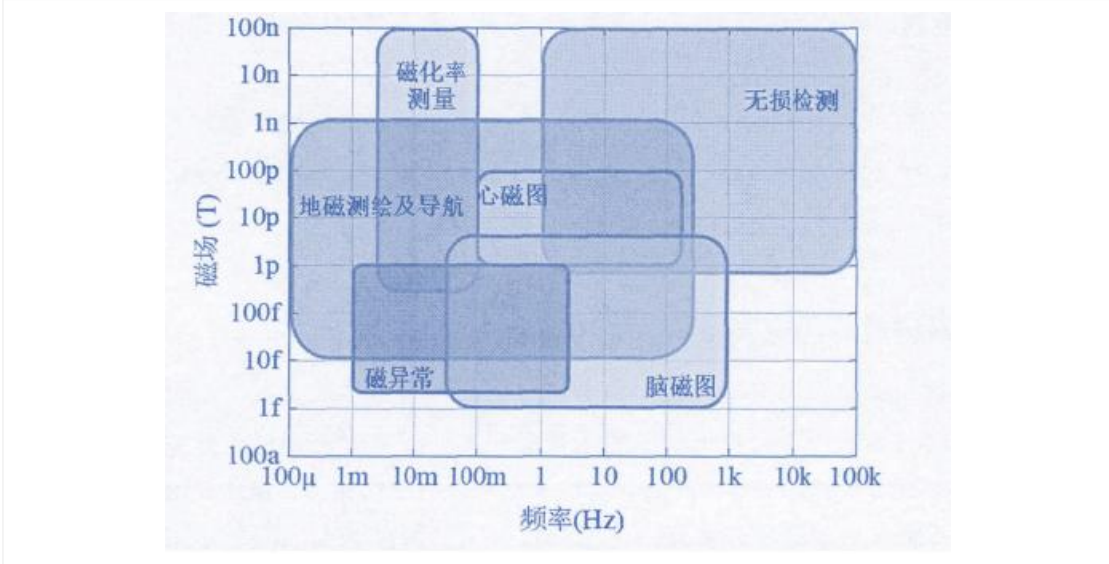
第二章

量子磁力计应用

一、磁测量技术及其应用

磁测量技术通常围绕着两个物理量：磁场强度与磁感应强度。对于该技术来说比较重要的参数包括灵敏度、带宽、动态范围等，这些参数决定了磁测量技术的应用范围。目前，磁测量技术的应用领域包括地球物理勘探(地磁测绘及导航)、生物磁学成像(心磁图、脑磁图)、材料检测(磁异常、无损检测)以及科学研究(磁化率测量)等。常见磁测量应用领域对磁测量技术灵敏度以及探测频率范围的要求见下图：

图 5 不同磁测量应用对磁力计灵敏度以及可探测频率范围的要求



来源：基于金刚石氮-空位色心系综的磁测量方法研究（2020，谢一进）

对于大部分磁测量应用来说，测量微弱的低频磁场信号是非常重要的，特别是 1mHz 到 1kHz 这个频率范围的磁场信号。对于地磁测绘或者磁异常这类的应用来说，通常会基于载具来进行勘探，因此信号的频率范围会受到载具移动速度的影响。而为了精确分析，通常要求这类应用中使用的磁测量系统能够分别测得纳特斯拉量级的磁场¹⁹。

¹⁹ W.M. Telford, L. P. Geldart, R. E. Sheriff,. (1976). Applied geophysics (the 2nd edition) [M]. Cambridge: Cambridge University Press.

二、量子磁力计应用领域

量子磁力计有诸多应用领域，本节主要针对生物医学、工业检测、物理科研、地磁导航、军事国防这五大领域展开介绍。

1、生物医学

量子磁力计在生物医学的应用宽泛，包括神经康复监测、脑科学、脑认知、脑机接口、心血管与脑疾病精准诊断、细胞原位成像等前沿应用。目前，生物磁方面的目前主要应用为脑磁图（Magneto-encephalography，MEG）与心磁图（Magneto-cardiography，MCG），因为心脏和脑部的神经传导电流较大，其周围的磁信号也相对较强。这种非侵入性方法可以对患者的预后产生积极影响，为临床医生提供评估神经系统疾病和手术治疗所需的宝贵信息。

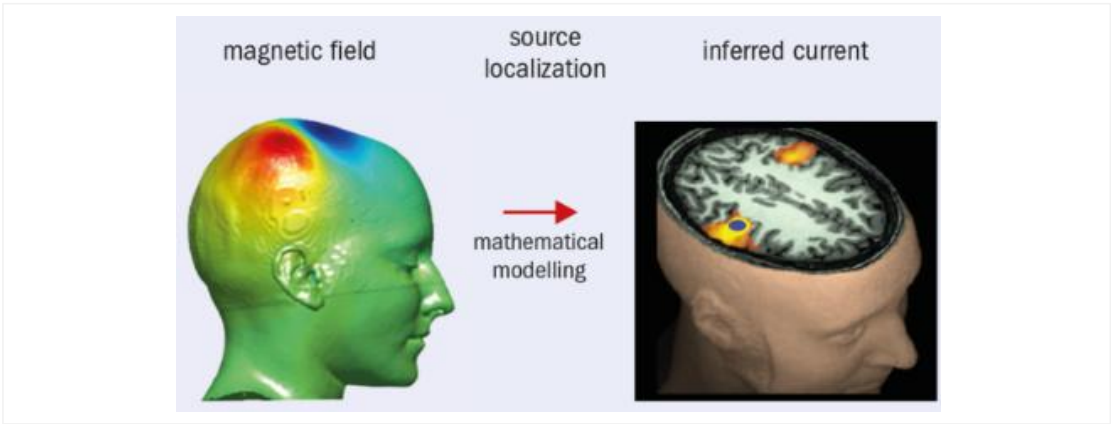
表 5 脑磁图与心磁图的相关信息对比

类别	信号强度	内容
MCG	约 10^{-11} 特斯拉	无创性记录和分析心动周期中由心脏电活动所产生的电磁场中的磁成分
MEG	约 10^{-13} 特斯拉	无创性测量在神经元内流动的电流产生的磁场，MEG 以毫米级的空间精度实时识别人类大脑功能活动

来源：光子盒量子研究院整理

脑磁场强度为心磁场强度的百分之一左右，有效探测难度更大并且容易受到低频干扰。对脑部磁场的探测是对神经元活动放电产生磁场的直接探测，拥有毫秒级时间分辨率，在脑疾病诊断如癫痫病灶定位、脑功能区定位、术前规划上有广泛的应用。

图 6 MEG 通过测量神经电流产生的磁信号生成的实时图

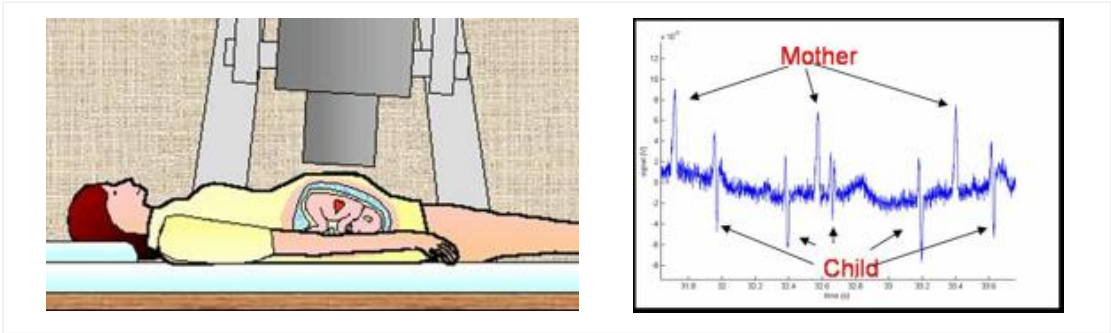


来源：Quantum physics gives brain-sensing MEG scanners a boost（2021，Physics World）

心磁图在未来普及率有望增加。欧美有关心磁图的临床医学研究，传统的心电图检查手段只能获取心脏电生理信号所携带的 10% 的病理信息，而心磁图能补充获取剩余的 90% 的心脏病理信息。相比于心电图来说，心磁图能够展示更多更深的病理信息²⁰。胎儿心磁图（fMCG）是一种新的替代产前监测方法，记录由胎儿心脏中的传导电流产生的磁场。与胎儿心电图相比，磁场的传播相对不受周围组织的干扰，这使 fMCG 具有更高信噪比的优势，并且可以在怀孕早期获得。此外，信号的高时间分辨率使其比胎儿超声显著更精确地确定胎儿心率参数。

21

图 7 fMCG 测量装置与 MCG 胎儿信号识别示意图



来源：Magneto-cardiogram of the Fetal Heart (2022, University of Twente)

当前，医院主要使用的 MEG 与 MCG 的诊断方式是通过 SQUID 磁力计获得磁场数据，设备占地面积大、装置复杂、价格昂贵、需液氮制冷、运行维护成本高，以及探头距头皮位置较远带来的测量精准度问题，限制其大范围推广应用，并且全球氦气正在消耗殆尽，脑磁图需要原子磁力计更新迭代摆脱对氦气制冷依赖。而新一代的 SERF 磁力计能够实现这一目标，其具有对低频信号敏感、室温运行、功耗低、小型化、可穿戴等优点，分辨率也与 SQUID 接近或超越，适合大规模推广应用。目前氦气的短缺也推动了相关研究发展。

未来，量子磁力计能实现对生物磁的进一步探索，在脑认知、脑科学、脑机接口方面，脑磁场成像也是为数不多可以实现高时间、空间分辨率的非侵入功能性成像手段。MEG 是脑成像和人机接口的基础，在短期内，脑磁图可能会以头盔的形式，以便在受伤的情况下进行持续和远程的医疗监测和诊断。未来可能进一步完善人机接口，达成实用的非侵入性认知与机器人和自主系统的通信²²。

²⁰ <https://www.cn-healthcare.com/articlewm/20211203/content-1291639.html>

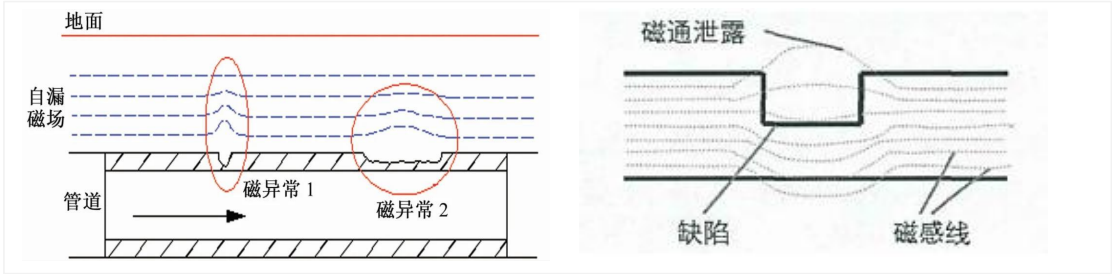
²¹ <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/19484515/>

²² <https://epjquantumtechnology.springeropen.com/articles/10.1140/epjqt/s40507-021-00113-y>

2、工业检测

量子磁力计在工业检测的应用主要为金属探测、材料分析、无损探伤、电池缺陷检测。量子磁力计主要特点为能够对物体或材料进行无创的磁性鉴别，从而控制材料的质量，这种检测不会改变被测材料的性状²³，尤其是金属类的材料。当金属材料内部存在缺陷时，在缺陷处，材料的电导率会发生变化。在施加交流电后，由于电磁感应原理，缺陷处会产生磁场梯度。通过测量磁场梯度，可以确定缺陷部位与程度²⁴。

图 8 漏磁现象的简单示意图

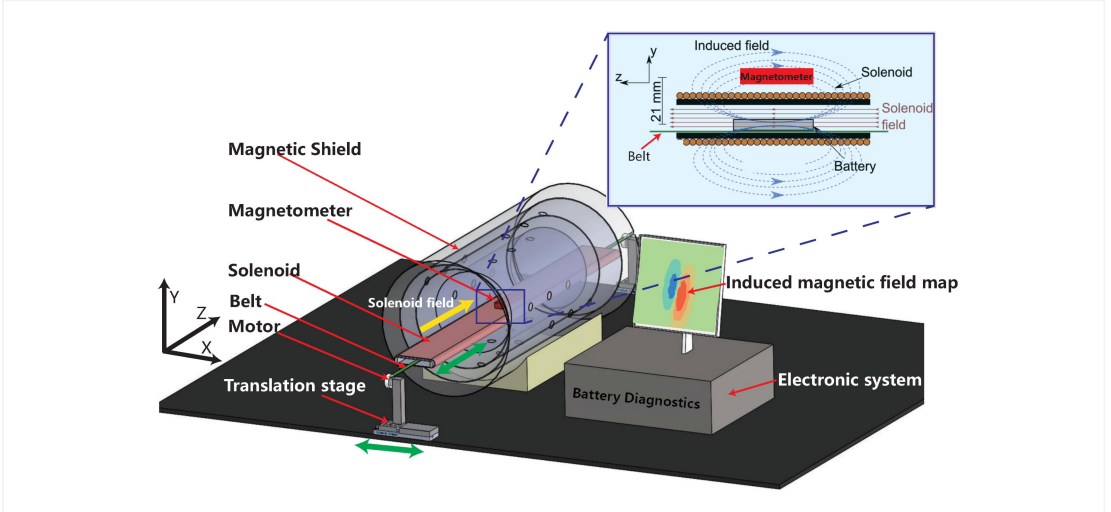


来源：网络图片整理

目前，已经发现了无损检测在多个工业领域中的潜在应用，例如市场需要一种快速和敏感的电池缺陷识别诊断工具，协助固态电池技术以安全、高效的方式提供灵活的电能存储，当前随着新能源汽车普及率逐渐提高，厂商需要一种精准反应锂电池内部结构缺陷的检测方案，维护人们的生命财产安全是至关重要的，这也是目前量子磁力计主要研究发展方向。该技术需要极高的灵敏度，目前，主要解决方案为基于 SQUID 的磁测量与原子磁力计。其中，原子磁力计的优势主要为提供了一种低成本、便携和灵活实施电池质量控制和表征技术的可能性²⁵。下图为该诊断工具（传感器）斜视图，其使用原子磁学测量微型固态电池周围的磁场，可以发现关于电池制造缺陷、电荷状态和杂质的信息，并且它们可以提供关于电池老化过程的重要见解。

²³ S. Colombo, V. Lebedev, A. Tonyushkin, S. Pengue, A. Weis,. (2020). Imaging Magnetic Nanoparticle Distributions by Atomic Magnetometry-Based Susceptometry [J]. IEEE Trans Med Imaging. 39,922.
²⁴ M.Kuroda, S. Yamanaka, Y. Isobe,. (2005). Detection of plastic deformation in low carbon steel by SQUID magnetometer using statistical techniques [J]. NDT E Int.38,53.
²⁵ <https://www.mdpi.com/2076-3417/10/21/7864>

图 9 磁力计传感器位于螺线管上方的超低磁场区域



注：插图为实验装置的侧视图。电机驱动的传送带通过长螺线管移动电池，可以提供恒定的背景磁场。磁力计传感器位于螺线管上方的超低磁场区域，图中所示的螺线管超出了四层 Twinleaf MS-2 磁屏蔽的范围。传送带沿 z 轴来回移动电池，而两端的移动台则沿 x 轴以 0.1 毫米的精度移动整个皮带。
来源：Rapid Online Solid-State Battery Diagnostics with Optically Pumped Magnetometers（2020，Yinan Hu）

基于量子磁力计的电池缺陷检测技术可能短期能实施落地。目前，英国工艺创新中心（CPI）已经开始了量子传感器应用于工业检测的研究，该项目期间为 2020 年 8 月至 2023 年 8 月，由 Innovate UK 提供 540 万英镑。量子传感器项目旨在开发一个能够使用 OPM 对电池进行连续在线测试的中试系统。该系统将配备一系列 OPM 作为量子传感器，检测合格锂电池发出的小磁场。该技术可用于监控生产线上电池的质量，以便快速剔除故障电池并提供详细的质量保证。该项目将涉及英国制造光学加工材料供应链的开发，包括蒸汽电池生产、激光制造、光学封装、磁屏蔽、电子控制和数据处理系统。该项目的最终目标是创建一个可在试验生产线上实施的中试规模电池测试系统²⁶。

图 10 CPI 开发用于彻底改变生产线质量评估和电池分级的传感器



来源：CPI joins consortium to develop quantum sensors for end-of-line battery testing（2021，UK-CPI）

²⁶ <https://www.uk-cpi.com/news/cpi-joins-consortium-to-develop-quantum-sensors-for-end-of-line-battery-testing>

3、物理科研

地球物理：地球本身具有强大的磁场，会使许多岩石和矿物产生弱磁性或被感应磁化，并在地磁场中引起扰动，称为“磁异常”。同时包含铁或钢的人造物体通常也会被高度磁化，并且在局部会引起高达数千纳特斯拉的磁异常。

量子磁力计通过精确捕捉地磁场信息的微弱变化，利用地磁观测资料得到地磁异常。具有精确测量各种地磁样品的能力，可满足利用海洋、湖泊、黄土等不同类型的地磁样品开展研究²⁷。在物理学基础研究、环境、气候变化、地球动力学过程、大地构造学和磁性地层学、深空深地磁场测量等方面都有着广阔的科研和市场潜力。还可应用于石油工业的钻井定向、矿产资源勘查和地质灾害预警。

科学研究：量子磁力计能作为科学研究工具，是研究材料磁学性质的新利器，在磁畴成像、二维材料、拓扑磁结构、超导磁学、细胞成像等领域有着广泛应用。例如，金刚石 NV 色心磁力计通过对自旋进行量子操控与读出，可实现磁学性质的定量无损成像，能研究单个细胞、蛋白质、DNA 或进行单分子识别、单原子核磁共振等。

地质勘探：量子磁力计是地球物理勘探中最有效的方法之一，并被广泛应用于地质勘探的各个阶段：寻找铁矿和其他矿物（包括碳氢化合物）、地质填图、构造研究等。高精度精密磁力测量在考古调查和工程测量中同样发挥着重要的作用。有系统地将磁力计用于勘探目的可以追溯到上个世纪初。在这些年的技术发展中，至少使用了四种类型的磁力计。在第一阶段，光机平衡磁力计使用了 50 多年。随后，磁通门、质子和光泵磁力计被研制出来。目前，磁勘探主要采用核进动（质子）磁力计和光泵磁力计。针对各种测量条件，地面、井下、海上和空中作业用的专用磁力计被大量生产²⁸。

²⁷ <http://www.eusci.com/product/1133.html>

²⁸ <https://www.auniontech.com/jishu-479.html>

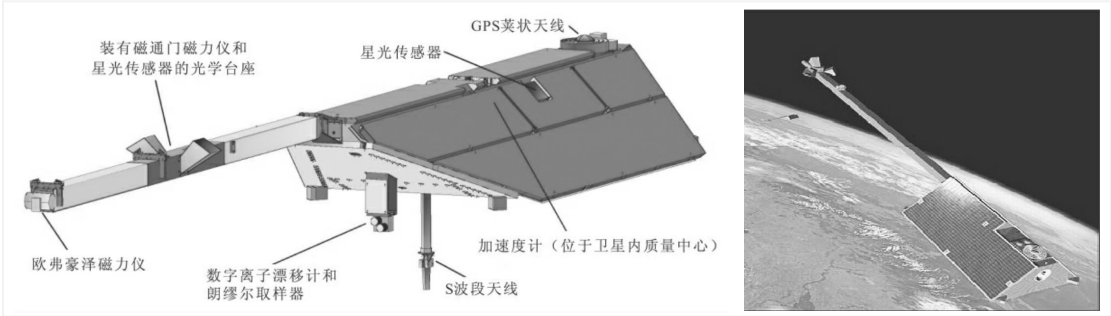
图 11 超导岩石磁力计图



来源：黄土与第四纪地质国家重点实验室官网

卫星磁测：量子磁力计也应用于空间磁测探测，卫星上使用的磁力计要求功耗小、性能稳定、工作时间长，部分量子磁力计刚好符合这一特性。土星及其最大的一颗卫星 Titan 的飞船 Cassini-Huygens 上装备有氦光泵磁力计，测量土星的磁场。阿根廷发射的磁测卫星 SAC—C，装备有丹麦制造的磁通门磁力计 FGM 和美国制造的氦 4 光泵磁力计，2000 年 11 月 18 日发射，寿命 4 年。丹麦的 Oersted 磁测卫星和德国的 CHAMP 重、磁两用卫星，都采用 OVM 测地磁场的标量，由法国 LETI（信息技术电子实验室）设计制造。欧洲航天局（ESA）计划发射的 AMPERE 卫星也准备采用 OVM 测量地球磁场的标量。

图 12 CHAMP 卫星及仪器图示



来源：《地球物理学进展》²⁹

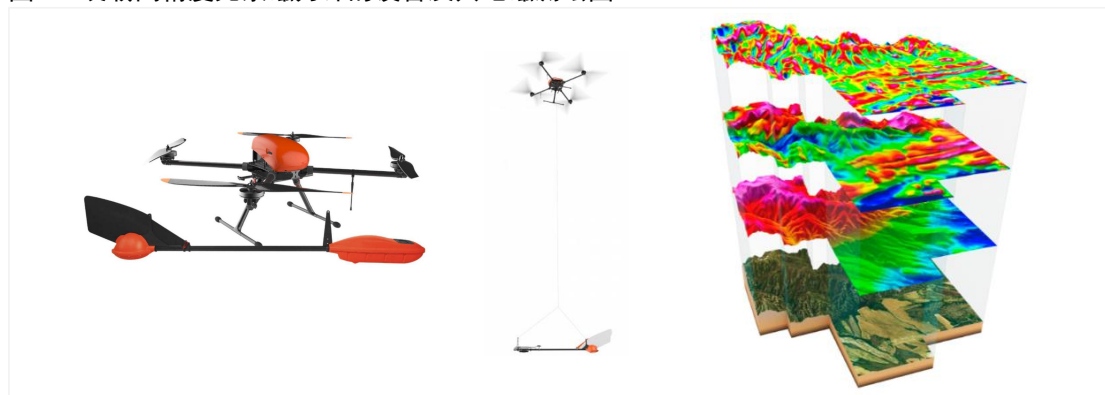
4、地磁导航

航空磁学：进行地磁测绘，绘制出用于地磁导航的“磁异常地图”，也是地球物理研究的一部分。在大多数地表所能探测到的磁场测量中，地磁场占主导地位，地磁场场强因在地球表面的位置而异。通过绘制和分析局域地磁图像中磁场的变化和分布，能够得到当地的地质矿藏信息及人造物痕迹。

²⁹ 冯彦，安振吕，孙涵，等.(2010). 地磁测量卫星. 地球物理学进展 ,25(6);1947~1958,DOI: 10.3969/j.issn.1004-2903.2010.06.009.

现代光泵磁力计是磁学研究的主要部分，具有高分辨率（灵敏度可达 0.001 nT）和高性能（每秒可达 100 次测量）的特点，确保了磁场记录精度 0.2-0.5 nT，使用标准空中平台时观测点之间的距离约为 0.5-1m。采用差分数据平差的现代 GPS 导航系统可以获得亚米精度的观测点位置。而精确的标记又可大大降低航磁测量的总体误差，并可构建精度磁场图。

图 13 装载高精度光泵磁力计的设备及其地磁测绘图



来源：LAUREL-Geophysics 产品介绍

地磁导航：一种无源自主导航方法，磁传感器是研究地磁导航的硬件基础，是决定导航精度的关键因素，该技术基于矢量地磁场的探测。它不仅仅对磁场测量的强度有要求，也需要能够精确的测出磁场的方向。

原理依据为，不同地理位置地磁大小与方向有差别。在已知地磁分布的条件下，依据测量磁场来确定地理位置。地磁场是地球的天然参考坐标系，由此开发了用于航空、航海等场景的地磁导航技术。地磁导航技术由于其隐蔽性好、成本低和精度适中、无误差积累等优点是导航研究领域的一个热点。

5、军事国防

在军事上，磁场的高精度测量是地磁导航与反潜的基础^{30 31}。量子磁力计的军事应用主要包括军备脑磁图作战头盔、量子导航、反潜战、水下目标识别、海底测绘等。

军工装备：有望将基于量子磁力计的脑磁图技术加入作战头盔，远程实时反馈作战人员生理状态和指导作战，及时反馈前线作战人员情报汇报。

³⁰ 黄谟涛,翟国君,欧阳永忠,陆秀平,任来平,王克平,宋海英.(2011).海洋磁场重力场信息军事应用研究现状与展望.海洋测绘[J].31,72.

³¹ P. Bevington, R. Gartman, D. Botelho, R. Crawford, M. Packer, T. Fromhold, w. Chalupczak,. (2020). Object surveillance with radio-frequency atomic magnetometers [J]. Rev.Sci. Instrum. 91,055002.

量子导航：不依赖 GNSS 与雷达，不受干扰，也不受电子战攻击。多年来，美国国家海洋和大气管理局（NOAA）一直在绘制地球的磁异常地图，用于辅佐地磁导航³²。量子磁力计可以帮助绘制海底环境，例如峡谷、冰山和皱底等，而无需易暴露的声纳。潜艇和其他水下航行器很可能最先采用地磁导航。利用灵敏的量子磁力计结合地球磁异常图是实现量子非 GNSS 导航的另一种方法^{33 34}。量子重力计的引力图也遵循类似的原理，其与量子磁力计可以协作成为潜艇量子导航的基础。

反潜战：量子磁力计可以探测、识别和分类目标潜艇、探测水雷，可增强现有的水下探测能力。磁场测量用于反潜的主要原因是潜艇中的磁性合金会在环境中产生磁异常³⁵。研究人员预计，SQUID 磁力计可以在探测到 6 公里外的潜艇，当下经典的磁异常探测器，通常安装在直升机或飞机上，其探测范围只有几百米。目前，量子磁力计多用于水上机载反潜。例如，CTF 公司受加拿大国防部委托，开发了机载潜艇探测仪器³⁶。公开资料显示，美国军事研究人员需要使能技术来提高原子蒸气在从机载电子战（EW）到海军反潜战（ASW）等应用中用于电场传感的性能，美国国防高级研究计划局（DARPA）与 ColdQuanta 签订合同，用于新技术的原子蒸气科学（SAVaNT）项目，该计划为期四年，其中蒸汽磁力计是所有器件中标量磁场灵敏度最高的设备之一，重点是在小型封装中实现基于蒸汽的准直流场矢量磁力测量³⁷。20 世纪 60~70 年代法国、加拿大和苏联先后制造了 Overhauser 效应航空磁力仪并投入应用于军事方面，法国反潜飞机和反潜直升机采用 OVM 作为 MAD，OVM 经久耐用，长期无须维修³⁸。

三、小结

本节总结了不同领域磁力计的现状和未来发展趋势。由此可见，金刚石 NV 色心磁力计因其特性优势，在磁测量领域有较高的应用前景。未来，通过解决精密密度、应用环境受限等问题，磁测量技术有望能够进一步推动其他领域的突破。

³² <https://epjquantumtechnology.springeropen.com/articles/10.1140/epjqt/s40507-021-00113-y>

³³ Canciani A, Raquet J. (2017). Airborne magnetic anomaly navigation. IEEE Trans Aerosp Electron Syst.

³⁴ Wired. Jan. (2018). Quantum Physicists Found a New, Safer Way to Navigate.

³⁵ J. Zhou, J. Chen, Z. Shan., (2017). Spatial signature analysis of submarine magnetic anomaly at low altitude [J]. IEEE Trans. Magn. 53.

³⁶ <https://www.ctf.com/about-us>

³⁷ <https://www.militaryaerospace.com/computers/article/14201305/quantum-sensors-electronic-warfare-ew>

³⁸ 董浩斌,张昌达.(2010).量子磁力仪再评说[J].工程地球物理学报,7(04):460-470.

表 6 量子磁力计各应用领域现状及未来发展趋势

光子盒
— GUANGZHIHE —

主要磁力计	当前现状	未来发展	
生物医疗	SQUID磁力计 SERF磁力计	脑磁、心磁已有一定应用，SQUID发展存在一定局限（灵敏度、工作环境要求、功耗体积成本等）；SERF磁力计已完成实验室验证	SERF 技术进一步落地商业化；脑科学、脑机接口等低频高灵敏度的弱磁测量领域应用
工业检测	金刚石NV色心磁力计 SERF磁力计（待市场验证）	无损探伤，基于NV色心磁力计的无创弱磁探测应用场景相对成熟	NV色心向生物磁测量方向发展，SERF有望实现固态电池的定级和缺陷识别
地球物理	光泵磁力计 SQUID磁力计 质子磁力计 Overhauser磁力计	地球物理研究及地磁测绘应用较多，但地磁探测无极高精密度要求，未来发展空间有限；量子磁力计经久耐用，长期无须维修	提升测量精度，测绘仪器设备小型化、便携化
地磁导航	光泵磁力计 质子磁力计	相对成熟，用于地图测绘与参考定位	量子导航系统的重要组成部分
军事国防	光泵磁力计 SQUID磁力计 Overhauser磁力计	反潜战，目前应用较少，信息整理为水上反潜	进一步提升反潜、目标识别能力；基于量子磁力计的脑磁图技术配合作战头盔使用

来源：光子盒量子研究院整理

第三章

量子磁力计研究主要参与国的研究概况

量子磁力计在美国、中国、德国、法国、澳大利亚、英国等诸多国家均展开研究，以下列举六国量子磁力计相关研究项目及概况。

表 7 量子磁力计研究主要参与国及研发概况

量子磁力计相关内容			
国家	日期	项目名	量子磁力计相关内容
美国	2022	Bringing Quantum Sensors to Fruition	国家科学技术量子信息科学委员会（NSTC-SCQIS）发布报告，重点讲解原子钟、原子干涉仪、光泵磁力计等技术及其应用，并提出了一些发展建议。
英国	2019	NQTP	建设四大量子研究中心，量子传感为重点研究方向。量子磁力计（可穿戴脑成像技术）是英国量子技术中心一直在进行领先的工作，以创造世界领先的医学成像能力，使用高灵敏度，可穿戴的磁电医学成像技术。由诺丁汉大学领导的一种可穿戴的用于脑磁图的头盖帽（MEG：一种通过记录磁场绘制大脑活动的技术），在国家计划的第一阶段开发，目前正在用于临床试验，以指导癫痫手术，特别是儿童。其他医疗应用，例如诊断创伤性脑损伤。
德国	2019	Qmag-“量子磁力计”	弗劳恩霍夫灯塔项目（Lighthouse Project），项目期间为2019年4月-2024年3月，资助资金1000万欧元，由弗劳恩霍夫协会、巴登符腾堡州资助，主要研究金刚石氮空位色心成像扫描探针磁力计、OPM，及其在室温下以高分辨率和高灵敏度测量最小磁场。
法国	2018	macQsimal	FET（Quantum Technologies Flagship）的一部分，由欧盟资助的Horizon2020研究项目，项目周期为2018年10月至2021年9月，预算1020万欧元，共有14个合作伙伴。项目旨在设计、开发、小型化和集成具有出色灵敏度的先进量子传感器，以测量五个关键领域的物理可观测量：磁场、时间、回转、电磁辐射、气体浓度。
	2017	QuEnG	量子工程（Quantum Engineering）项目的基本目标是培养下一代量子工程师，包括6个研究领域，量子传感是其一。项目预算820万欧元，其中量子传感项目有两大研究方向：1、开发基于约瑟夫森结阵列的新一代参量放大器，工作在量子极限，具有大带宽和高饱和功率；2、基于纳米机械谐振器中的自旋量子比特的新型量子传感器。氮空位缺陷的自旋具有超长的相干时间，因此可以用光学和微波场对其进行操纵，用于超灵敏的磁场和电场探针。

中国	2016	量子调控与量子信息	国家发展战略，明确提出要在核心技术、材料、器件等方面突破瓶颈，实现量子相干和量子纠缠的长时间保持和高精度操控，并应用于量子传感与测量等领域。“地球观测与导航”重点专项部署了“原子磁力计”等项目。
澳大利亚	2020	《增长的澳大利亚量子技术产业：争取40亿澳元的产业发展机遇》	澳大利亚联邦科学与工业研究组织（Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation, CSIRO）制定并发布量子技术路线图，明确支持量子生态系统建设。根据CSIRO的预测，量子传感与测量领域将在2040年为澳大利亚创造3000个职位以及9亿澳元经济价值。澳大利亚将在军用及民用精确导航、地下环境量子重力测量、增强量子传感器、量子磁力计等澳大利亚优势领域开展攻关和商业化应用。

来源：光子盒量子研究院整理

量子磁力计在以上国家往往有多个机构开展不同技术的量子磁力计，以下列举六国重要的研究机构及其研究内容。

表 8 量子磁力计主要研究机构

光子盒 — GUANGZHIHE —		
国家	机构名	研究方向
美国	下一代量子科学与工程中心（Q-NEXT）	美国能源部阿贡国家实验室领导，通过物理、材料和生命科学领域的变革性应用实现超高灵敏度的传感器，包括作为一次拾取一个光子（光粒子）的电磁信号的设备，或者以低于标准量子检测极限的精度测量它们。这是通过量子挤压（一种减少测量不确定性的方法）和纠缠（一种量子现象，其中两个信号在信息上不可分割）的现象来实现的。科研人员正在基于量子科学的创新创建用于测量信号的新算法，扩展在广泛频率范围内感知光子的能力，并以创新方式将传感器集成到更大的量子系统中。
英国	英国量子科技传感器与计时中心	由伯明翰大学领导，是英国四大量子中心之一，研究方向包括医疗保健磁力计、地球物理学等。
德国	应用固体物理研究（Fraunhofer IAF）	弗劳恩霍夫灯塔项目（Lighthouse Project），Qmag-量子磁力计项目期间为2019年4月-2024年3月，资助资金1000万欧元，由弗劳恩霍夫协会、巴登符腾堡州资助，主要研究金刚石氮空位色心成像扫描探针磁力计、OPM，及其在室温下以高分辨率和高灵敏度测量最小磁场。
日本	东京工业大学工程电气电子系统学部	通过固态量子传感器的先进控制创建创新的传感器系统（开发具有高灵敏度和高空间分辨率的脑磁图（MEG）原型；开发用于监控电池和功率设备中的电流和温度的系统的原型）。
	学习院大学理学院物理系	双压缩量子噪声的量子原子磁力计的开发。

韩国	KRISS	韩国标准研究院，开展量子磁测量相关研究。
中国	北京量子科学研究院	量子精密测量研究部，研究超高灵敏惯性测量、超高精度磁场测量、高精度重力测量、时间频率测量、量子导航、量子传感。
	之江实验室	量子传感研究中心，研究量子精密操控、敏感源制备、精密检测、极限物理量测量等技术，研发极弱力与加速度、极弱磁场、超高灵敏惯性等测量装置。
	中国科学院	原子精密测量研究方向包括发展高稳定性的原子共磁力仪，探寻与核自旋相关的新物理现象，结合原子物理、激光光谱与精密仪器技术，发展高灵敏度原子磁力仪，突破传统磁探测技术。
	中国科学技术大学	中国科学技术大学中科院微观磁共振重点实验室。创新仪器研制项目，低温量子钻石原子力显微镜的工程化研制。科技部国家重点研发计划，室温超高灵敏度量子磁敏感元件及传感器。
	北京航空航天大学	大科学装置研究院，量子精密测量与传感方向，研究基于原子自旋SERF效应的超高灵敏磁场测量、基于原子自旋SERF效应的极弱人体磁源成像、基于原子自旋SERF效应的超高灵敏惯性测量、基于金刚石色心的量子精密测量技术；惯性导航与智能导航方向，研究原子自旋陀螺仪技术、核磁共振陀螺仪技术、机载高精度POS与惯性稳定平台技术。
	中山大学	量子工程与精密测量团队，现有量子原子光学、量子气体多体问题、低维量子材料等研究组，已建成超冷铷原子气体实验平台、精密光学成像实验平台，正在搭建离子阱实验平台、原子磁力计低场核磁共振实验平台等实验装置。

来源：光子盒量子研究院整理

产业链下游为应用方，即中游产品或技术的采购方，一般为医疗、科学研究、军事国防领域。量子磁力计目前主要应用在科学研究、地质勘探与生物医疗等领域：SQUID 磁力计应用于心磁、脑磁与地磁的测量；质子磁力计、OVM 磁力计和光泵磁力计主要用于地磁测量、空间勘探。量子磁力计的新技术路径金刚石 NV 色心磁力计、原子磁力计的研究已展开多年，前者作为科研仪器开始进入商业化，后者基于 SERF 技术路径的原子磁力计用于脑磁图、心磁图的商业化也进入初期。

其中，心磁图仪市场以老牌的超导技术强国为主。德国、加拿大、日本、美国、英国均有厂家提供系统解决方案。近几年中国的招投标信息显示，脑磁图设备的采购方主要为医院、大学和研究院所，上海瑞金医院、首都医科大学附属北京天坛医院、四川大学华西医院等均引进了 MEGIN 公司的脑磁图设备，提供癫痫诊断和癫痫灶术前定位、神经外科术前脑功能区定位、精神病和心理障碍疾病诊断、缺血性脑血管病预测和诊断、外伤后大脑功能的评估鉴定、司法鉴定和测谎。中国科学院、深圳大学等高校也引进脑磁图设备。磁力计及生命健康领域磁测量仪器设备的全球供应商有：SQUID 技术——MEGIN（芬兰）、Elekta（瑞典）、Compumedics Neuroscan（澳大利亚）、CTF MEG（加拿大）、RICOH USA（美国）、苏州卡迪默克（中国）、漫迪医疗（中国）；OPM 技术——QuSpin（美国）、Cerca Magnetix（英国）、FieldLine（美国）、昆迈医疗（中国）、未磁科技（中国）。

二、中标信息

目前，脑磁图与心磁图的商业应用以 SQUID 磁力计为主。SERF 磁力计是下一代主要发展和应用，具有替代 SQUID 市场的潜力。以中国脑磁仪中标信息来看，从收集到的 2019 年至 2021 年的 7 次记录，6 次为 SQUID 技术（3 次为芬兰 MEGIN 公司供应，2 次为瑞典 Elekta 公司供应，1 次为澳大利亚 Compumedics 公司供应），1 次为 OPM 技术（中国北京昆迈医疗科技有限公司供应）。

从招标、中标、引进、培训、对外开放使用这一流程看，广大患者可以收益于脑磁图技术需要 3-4 年左右的时间，预计新一代技术 SERF 原子磁力计从实验室走向大众应用的时间预估可能还有 5 年。

表 9 中国脑磁图中标信息

光子盒 — GUANGZHIHE —					
序号	采购方	时间	供应商	型号	价格
1	天津师范大学	2022.01	Compumedics Ltd	Orion Life Span MEG (Neuroscan Orion Life)	1974.71万元
2	北京大学	2021.11	北京昆迈医疗科技有限公司	OPM-MEG	1482万元
3	复旦大学	2021.05	MEGIN	TRIUX-neo	2672.59万元
4	中国科学院脑科学与智能技术卓越创新中心	2020.12	MEGIN	脑磁图系统维保服务 (Triux neo) 一套	459万元
5	四川大学华西医院	2020.12	Elekta	Neuromag TRIUX	2830万元
6	中国科学院上海生命科学研究院	2019.11	MEGIN	脑磁图系统1套	3190万元
7	北京天坛医院	2018.11	Elekta	Neuromag TRIUX™	2690万元

来源：光子盒量子研究院整理

根据国家药品监督管理局网站，截至 2022 年 6 月 1 日，境内医疗器械（注册）的脑磁图暂无产品，注册的心磁图仅有 2 家公司，注册名称分别是苏州卡迪默克医疗器械有限公司和湖南未磁医疗科技有限公司；进口医疗器械（注册）的心磁图暂无产品，注册的脑磁图仅有 1 家公司，注册名称为迈科因（芬兰）公司 Megin Oy。

表 10 中国量子磁力计中标信息

序号	采购方	时间	供货商	产品	价格
1	中国科学院江西稀土研究	2022.02	Quantum Design	MPMS3 (SQUID)、DynaCool、VersaLab	1179.4 万人民币
2	北京航空航天大学前沿科学技术创新研究院	2020.07	QuSpin	OPM QZFM-ET 32 套	296 万人民币

来源：光子盒量子研究院整理

三、主要供应商简介

本节将介绍量子磁力计的主要供应商，通过应用场景的不同，依次按照脑磁图、心磁图、弱磁/生物磁、地球物理进行下游应用划分，并对该行业的代表企

业进行简要介绍,对于技术路径与细分领域的划分可详见上文量子磁力计产业生态概览图。

表 11 量子磁力计主要公司介绍

光子盒 — GUANGZHIHE —			
脑磁图			
公司简称	国家	成立时间	简介
MEGIN	芬兰	1989	全球领先的MEG技术提供商。MEGIN的MEG扫描仪是一种非侵入性,功能性的大脑定位解决方案,用于诊断检查,治疗策略和神经系统疾病的干预。TRIUX™neo能够扫描先前由于磁化材料(例如植入的刺激器,牙齿填充物或牙套)而被排除在外的患者;采用人机工程学设计。
Compumedics	澳大利亚	1985	神经生理学、神经影像学 and 神经诊断系统研究软件的全球领先开发商,主要经营EEG、电磁源定位、多模式神经成像以及fMRI增强技术。Orion Life Span™MEG使用获得专利的双张弛振荡超导量子干涉仪(DROSSQUID)传感器,其信噪比高于传统SQUID传感器。
RICOH USA	美国	1962	RICOH的MEG脑部扫描仪具有以下特点:可以检测并记录直至海马和下丘脑水平的大脑活动;传感器的数量及灵敏性,头盔中的160个超导传感器可检测并放大神经元产生的磁场;同轴梯度仪传感器减少电磁干扰,通过算法滤除噪声来识别信号。
QuSpin	美国	2012	专注于OPM制造,为生物医学和地球物理应用制造光学原子磁力计。在量子精密测量领域,目前已拥有零场磁力计(QZFM)与全场磁力计(QTFM)。零场磁力计是一种超灵敏矢量磁力计,可在低场环境中工作,主要应用在脑磁图(MEG)、胎儿心磁图(fMCG)、磁松弛测量(magnetic relaxometry)等方面。全场磁力计是一种紧凑的高灵敏度标量磁力计,可以在地球的磁场中运行,可以解决非常微小的场变化,主要应用在地球物理学、空间、矿物和能源勘探、未爆弹药探测等方面。
Field Line	美国	2019	开发OPM的MEG系统,FieldLine HEDscan系统是一种基于光学泵浦磁力计(OPM)传感器技术的非侵入式可穿戴式脑磁图(MEG)设备。小型量子传感器直接放置在头部,以高保真度记录和映射神经活动。
Cerca Magnetics	英国	2020	Magnetic Shields Limited (MSL) 与诺丁汉大学合作开发。将向市场推出世界上最先进的功能性可穿戴大脑扫描仪。它旨在让人们在被扫描时自由移动。市场的主要竞争对手正在收购中小型企业,以扩大其产品组合并提高其制造能力。
CTF	加拿大	1970	专注于MEG仪器,用于人类大脑功能的卓越测量。CTF MEG仪器的CTF SQUID传感器技术,噪声抑制方法和仪器工程相结合。
光子盒 — GUANGZHIHE —			
心磁图			
公司简称	国家	成立时间	简介
漫迪医疗	中国	2009	基于中科院上海微系统所的超导技术,漫迪医疗仪器(上海)有限公司于2019年5月取得了II类医疗器械注册证,成为中国首家拥有自主知识产权4通道超导心磁图仪的企业;除已获批的心磁设备,漫迪医疗正在开发注册的胎儿心磁图仪设备,将为先天性心脏疾病早期筛查、精确诊断及预后评估提供独有的诊断价值。

苏州卡迪默克	中国	2016	由牛津大学科技创新（OUI）策划并促成，源于2014年成立于牛津大学科技园的牛津医疗仪器有限公司（Oxford Cardiomox），主要负责开发非侵入性的、具有快速诊断早期心脏病的功能的高技术医疗仪器。于2020年11月获得了II类医疗器械注册证和生产资质。负责中国市场开发和生产，牛津卡迪默克心磁图仪是无创技术，在诊断时不需要X射线，超声波或磁共振成像（MRI）程序等辐射能量。
Genetesis	美国	2013	2017年通过采购原子磁力计开始进行基于原子磁力计的心磁图仪开发，推出了全球首台基于原子磁力计的非超导式心磁图仪CardioFluxTM，并通过云计算平台采用机器学习算法远程实现数据收集与处理。产品于2019年获得美国FDA 510K认证，并在2020年12月正式获得了FDA的“突破性影像设备”的资质认证，在美国多家医院使用。据公布，其临床试验人数已接近2000人。
Creavo	英国	2014	Leeds大学成果转化的感应线圈式心磁图仪CORSENS利用高精度线圈进行心磁测量，使用方便灵活，无需磁屏蔽，可配备于病房，进行一维和二维心磁测量。但其测量灵敏度较差，无法捕捉关键心磁信号。
弱磁检测/生物磁			
公司简称	国家	成立时间	简介
Qnami	瑞士	2017	技术起源于瑞士巴塞尔大学物理系。公司开发了专为纳米级成像设计的量子传感技术，实现从科学仪器到计量学和医学成像的应用。2020年7月，Qnami和HORIBA公司宣布达成合作，开展有关于基于金刚石的量子传感和磁力测量的研究。
国盛量子	中国	2019	成立于合肥国家大学科技园，目前已研制出基于量子技术的多款传感设备和量子系列产品，主要面向的客户包括国内外研发制造、生产检测等单位，主要涉及领域包括量子测量、量子传感、量子光学、量子芯片、量子材料、量子教育等。
地球物理			
公司简称	国家	成立时间	简介
Gem Systems	加拿大	1980	是一家为地球科学、地球物理学和其他应用提供磁力计、梯度计和磁传感器的供应商。该公司一直是基于其Proton、Overhauser和Potassium传感器和系统为地面测量提供地球物理仪器的领导者。
William S Goree	美国	1978	致力于通过提供最先进的岩石磁力计来服务古地磁和地球物理科学。于2005年开发了闭环超导SRM，目前在我们位于加利福尼亚州沙城的实验室运营。我们一直在与加利福尼亚州山景城的应用物理系统公司合作，以2G Enterprises的名义向地球物理学界销售完整的磁性测量系统。
CTF	加拿大	1970	CTF的MEG与SQUID传感器技术、噪声抑制方法和仪器工程相结合，作为可用的最高性能MEG系统。早期，底层SQUID技术被用于地球物理勘探和无损材料测试的应用。后来，CTF根据与加拿大国防部的合同开发了机载潜艇探测仪器。2009年，CTF收购了4D Neuroimaging的资产，并继续为全球4D客户提供服务和支持。（注：目前该公司主要业务为MEG）。

来源：光子盒量子研究院整理

四、投融资情况

表 12 量子磁力计公司投融资情况

序号	公司名称	业务	国家	轮次	时间	金额	投资方
1	Qnami	量子传感技术研发商	瑞士	A轮	2021.05	400万瑞士法郎	Runa Capital、SIT Capital、Zürcher Kantonal Bank、Verve Ventures、Quantonation、High-Tech Gründerfonds
				种子轮	2019.11	260万瑞士法郎	Quantonation、Zürcher Kantonal Bank、Verve Ventures、High-Tech Gründerfonds
				Pre-A轮	2019.03	未披露	Eurostar
				天使轮	2018.06	23万瑞士法郎	Venture Kick
				种子轮	2017.08	1万美元	Venture Kick
2	未磁科技	量子弱磁测量核心技术平台	中国	A轮	2022.06	超亿元	IDG资本、朗玛峰创投、民银国际、中关村科学城跟投
				股权融资	2021.07	未披露	IDG资本
				股权融资	2021.05	未披露	雅瑞资本、北航投资、启迪之星、东升博展投资
				天使轮	2020.1	数千万人民币	荷塘探索国际健康
3	漫迪医疗仪器	基于中科院上海微系统所的超导心磁图仪	中国	天使轮	2017.12	3500万元	联一资本
				Pre-A	2020.07	数千万元	中赛资本
				A轮	2021.09	超亿元融资	国科发展、中科院资本、中科院上海微系统所、上海新微集团、上海国鑫
4	Genetesis	基于原子磁力计的非超导式心磁图仪	美国	天使轮	2014.1	26万美元	43North
				种子轮	2016.11	120万美元	Mark Cuban、CincyTech、LOUD Capital、Danmar Capital
				Pre-A	2017.05	-	MedTech Innovator
				A轮	2018.06	750万美元	CincyTech、Raptor Group、Ohio Innovation、Radical Investment
				B轮	2020.04	920万美元	TDK、Mark Cuban、CincyTech、Ohio Innovation

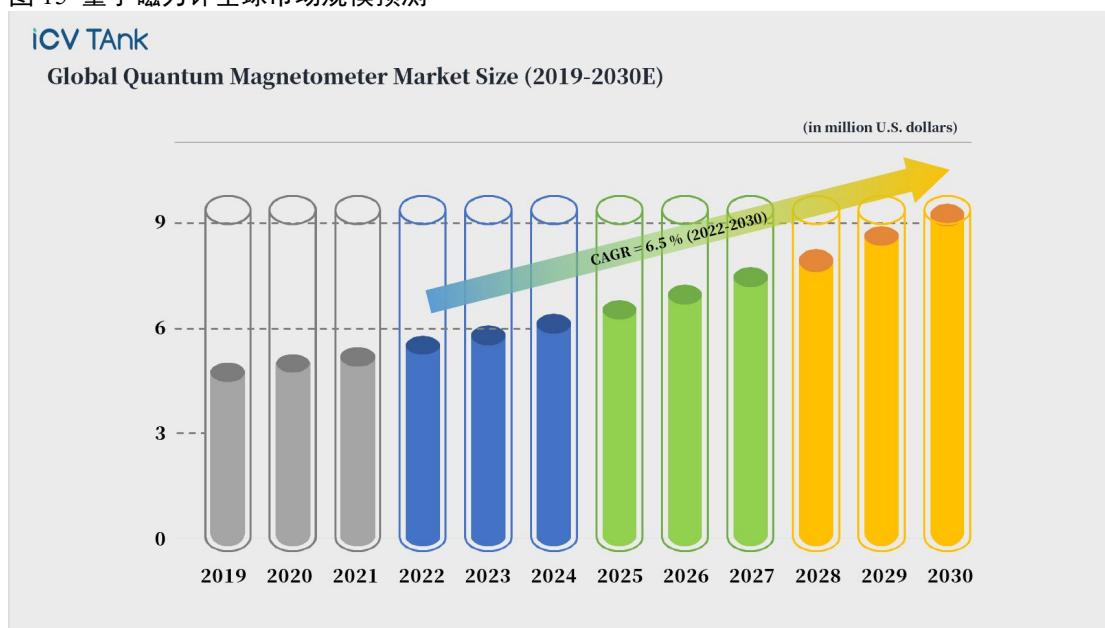
5	Creavo	感应线圈式心磁图仪	英国	B轮	2021.3	-	10X Capital
				种子轮	2014.4	160万元美元	IP group
				A轮	2016.2	460万美元	-
				B轮	2017.6	1340万美元	IP group、Parkwalk Advisors、Puhua Capital

来源：光子盒量子研究院整理

五、市场规模预测

本节市场规模预测数据主要来自国际机构 ICV TAnk，其将量子磁力计计划分为四大方面计算：生物医疗、军事国防、物理及科研、其他³⁹。其中，生物医疗、军事国防、物理及科研是量子磁力计较为成熟的三个应用领域；“其他”包括已有原型机但未公开实际市场应用产品，例如，洛克希德马丁公司（Lockheed Martin）的黑冰（Dark Ice）、博世公司（BOSCH）的量子磁力仪和量子陀螺仪的演示系统。

图 15 量子磁力计全球市场规模预测

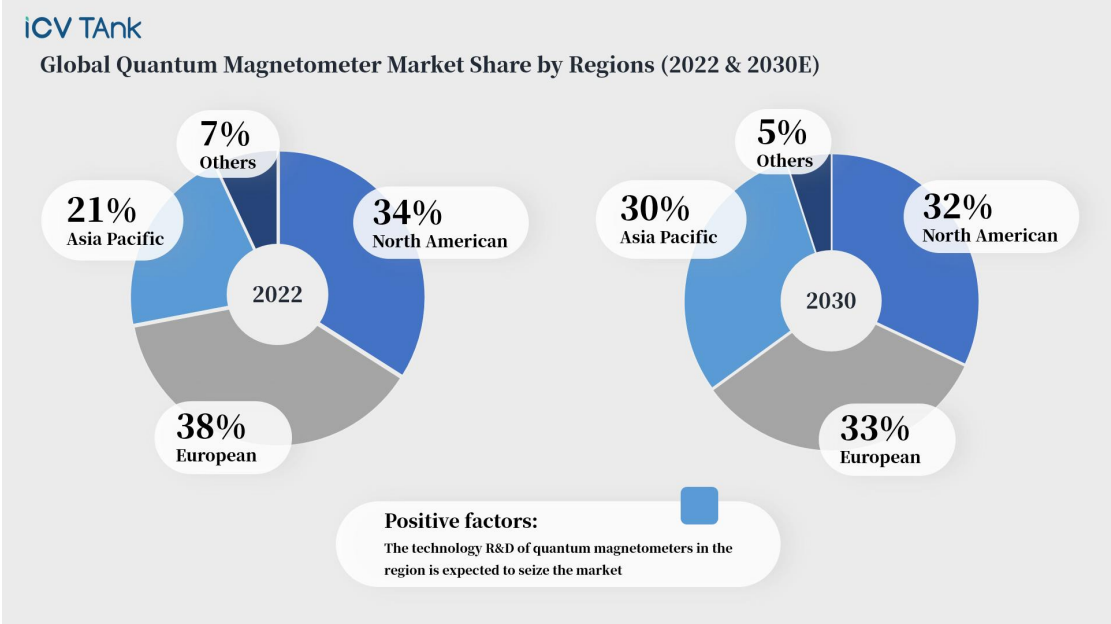


来源：ICV TAnk

据 ICV 推测，2022 年量子磁力计全球市场规模约为 5.5 亿美元，2022-2030 年复合增长率约为 6.5%，预计到 2030 年，市场规模增长至 9.1 亿美元。其中，脑磁图市场有望在 OPM 产品优势下加快商业化进展，2022 年生物医学市场份额约为 1.34 亿美元，复合增长率约为 7.5%（2022-2030）；2022 年军事国防领域，市场份额约为 1.59 亿美元，复合增长率约为 7.1%（2022-2030）；2022 年物理科研领域，占比最高（42%），市场份额约为 2.31 亿美元，复合增长率约为 5.3%（2022-2030）；2022 年其他市场份额约为 0.25 亿美元，复合增长率约为 7.8%（2022-2030）。

39 注：“物理科研”领域指地磁勘探、材料检测和空间探测等多个领域

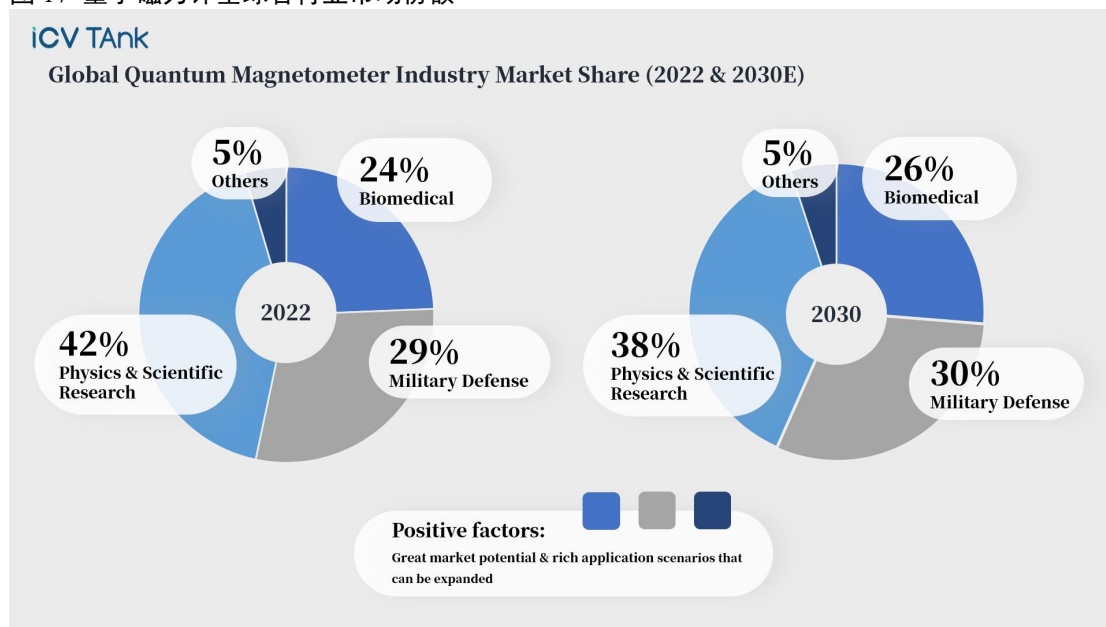
图 16 量子磁力计全球各区域市场份额



来源：ICV TAnk

ICV 报告显示，从全球市场的地理区域分布来看，目前量子磁力计市场主要集中在欧洲与北美地区，总占比超过总体市场的 2/3。其中，欧洲市场占比最大，约为 38%，其次是北美，占比约为 34%，亚太地区市场占比约为 21%，量子磁力计在欧美地区技术发展更为成熟，产业化进程更快。未来，若亚太地区持续并加大对 OPM、NV 色心磁力计等新型量子磁力计的研发力度，将有望抢占一部分脑磁图、工业检测、物理科研市场，预计 2030 年亚太市场占比将扩大到约 30%，北美和欧洲市场份额在 2030 年分别约为 32%与 33%，其他区域约为 5%。

图 17 量子磁力计全球各行业市场份额



来源：ICV Tank

从全球各行业应用领域来看，ICV 认为 2022 年物理科研领域的量子磁力计市场份额占比最高，约 42%；其次是军事国防领域，占比约为 29%；生物医学占比约为 24%；其他领域约占 5%。

生物医疗市场规模推断主要通过网络公开信息与对量子磁力计成本在上下游供应链中的占比进行分析，该领域主要产品为应用于 MCG、MEG 的 OPM、SQUID 磁力计，本节主要计算 MEG 与 MCG 市场份额。根据网上公开信息整理与招投标估算，OPM-MEG 的造价约为 224 万美元⁴⁰，单个 OPM 传感器的成本为 8000 至 12500 美元⁴²，得出单个 OPM 在 MEG 中占成本 0.46%。目前，不同品牌和实验室原型机的 OPM-MEG 中的传感器矩阵数量有所差异，有 49⁴³、64⁴⁴、108⁴⁵、128⁴⁶等等不同的通道数区分。其中，49 通道 OPM-MEG 能够提供与现有低温设备 SQUID-MEG 相当的性能。本文设 64 通道数进行市场规模的推算，得 OPM 约占 MEG 总成本的 29.4%；SQUID 脑磁图需要低温环境，整体配套设施成本比 OPM-MEG 高出一倍左右，不过其传感矩阵（量子磁力计）也高出

40 医学物理和工程北京市重点实验室主任、北京大学磁共振成像研究中心主任高家红的公开讲座内容

41 http://www.ccgp.gov.cn/cggg/zygg/zbgg/202111/t20211112_17176981.htm

42 <https://qusp.in.com/products-qzfm/>

43 <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S105381192030481X>

44 <https://www.cercamagnetics.com/cerca-opm-meg#System-Integration>

45 <https://www.osti.gov/servlets/purl/1646428>

46 <https://fieldlineinc.com/>

OPM-MEG 一倍有余（全头脑磁图通常为 148、151、248、275⁴⁷、306⁴⁸⁴⁹通道），按照量子磁力计在 SQUID 脑磁图中的占比进行推测，量子磁力计在 SQUID-MEG 中占的成本比重比 OPM-MEG 更高，考虑到 SQUID-MEG 的商业化较为成熟，其生产成本相对 OPM 较低，推测 OPM 与 SQUID 磁力计在 MEG 中的总成本占比相近，设其占总成本的 30%，约为 134 万美元，SQUID 磁力计单价约为 4000 美元。参考 ICV 机构的最新脑磁图行业研究报告，2022 年脑磁图市场规模约为 2.5 亿美元⁵⁰，由此推断出 2022 年用于 MEG 的量子磁力计市场规模约为 0.74 亿美元左右。

心磁图市场规模与脑磁图估算方式类似，据公开资料显示，2021 年心磁图的主要应用国家在德国、日本、美国以及欧盟，世界范围内保有量长期保持在 400 台左右，增量有限，中国于 2021 年有数十台投入使用⁵¹。OPM 心磁图有 36⁵² 通道，目前，SQUID 是市场上心磁图的主要路径，其售价约为 300 万美元，得出总市场规模约为 12 亿美元。超导心磁图有 3⁵³、16⁵⁴、36⁵⁵、64⁵⁶、72 等不同通道数。设通道数为 36 个，约占总成本 5.3%，推断出 2022 年用于心磁图的量子磁力计约为 0.6 亿美元左右，则 2022 年生物医疗的量子磁力计约为 1.34 亿美元。

军事国防与物理科研市场规模数据方面，ICV 通过收集与整理量子传感器、磁传感器的市场数据进行推测，并对公开资料进行定性分析加以佐证。涉及的主要产品为质子磁力计、OVM 磁力计、SQUID 磁力计与光泵磁力计。本文主要通过收集分析整理全球磁传感器与量子传感器市场规模的公开数据，从而推断量子磁力计在全球市场中的占比。其中，通过 ICV 等资讯机构的研报数据，拟全球量子磁力计在量子传感器中占比约为 28%，估算出全球量子磁力计市场约为 2.66 亿美元，考虑到部分研究报告对应用领域挖掘不全面，设该数据小于实际数值，仅用于参考。

47 151 与 275 均为 CTF 公司产品，148 与 248 通道为 4-D Neuroimaging 公司产品，于 2009 年被 CTF 所收购。
<https://www.ctf.com/about-us>

48 <https://natmeg.se/onewebmedia/NM23083B-A%20Elekt%20Neuromag%20TRIUX%20datasheet.pdf>

49 <https://megin.fi/triux-neo/>

50 注：该市场份额数据包含科研机构用于脑科学研究的脑磁图，心磁图缺乏市场数据信息无市场规模判断

51 中国心血管医生创新俱乐部.(2021).《中国心血管医疗器械产业创新白皮书 2021》.p137-p144

52 北京未磁科技有限公司的 36 通道心磁图仪-骐骥 Miracle MCG

53 <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1875389212020986>

54 [https://www.ijesi.org/papers/Vol\(7\)i10/Version-2/H0710025457.pdf](https://www.ijesi.org/papers/Vol(7)i10/Version-2/H0710025457.pdf)

55 <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1875389212021554>

56 http://macau-cardiac.com/files/portugal_channel/MCG_Summary.pdf

ICV 通过统计整理公开信息资料，拟 2020 年全球磁传感器的市场份额约为 25.46 亿美元（不包含 MEG 等弱磁测量仪器），磁传感器得主要应用场景在汽车和消费电子产品，约占据磁传感器市场份额的 2/3。量子磁力计暂无汽车和消费电子产品的相关应用，主要场景为军事国防与物理科研，约为总市场份额的 1/3，约为 8.48 亿美元。综合考虑，设国防航空量子磁力计占比约为全球磁传感器市场份额的 1/18，2020 年市场份额约为 1.42 亿美元；物理科研领域量子磁力计应用场景丰富，例如地质勘探的 SQUID 磁力计、用于科学研究的 NV 色心磁力计、用于空间勘探的卫星仪器 OVM 磁力计等，推测其 2020 年市场份额约占全球磁传感器市场份额的 1/12，市场份额约为 2.12 亿美元。

附录

附录 1 光泵磁力计技术路径的研究历程

背景条件	理论灵敏度	实际灵敏度	年份
Bloom 第一次实现了基于光抽运原理的磁力计, 并且给出了光抽运磁力计的理论模型	-	-	1962
中国长春地质学院制成了第一台光泵磁力计	-	-	1965
中国北京地质仪器厂在长春地质学院和北京大学等单位帮助下, 研制成功了氦跟踪式光泵磁力计和铯自激式光泵磁力计	-	1 nT/Hz ^{1/2}	1976
中国逐步改进, 研制成功 HC-85 型光泵磁力计, 之后出口到美国	-	0.01 nT/Hz ^{1/2}	1985
钾磁力计, 使得光抽运磁力计有可能超越传统的 SQUID 磁力计	-	0.1 pT/Hz ^{1/2}	1992
K 原子气泡作为磁力计探头, 气泡体积 1800cm ³	1.8 fT/Hz ^{1/2}	-	1990s
Cs 原子泡 (直径 2cm, 长 2cm) 内实现梯度计形式的 Mx 型 OPM, 在 1-100Hz 频段内, 空间分辨率为 2.8	1 pT/Hz ^{1/2}	7 nT/Hz ^{1/2}	1990s
Cs 原子, 室温条件下; 激光抽运磁力计得到人体心磁图, 可以获得比心电图更丰富的疾病诊断信息	-	100 fT/Hz ^{1/2}	2003
OPM 的磁场探头体积做到了 25mm ³ , 功耗 194mW, 同时保持了较高的灵敏度, 在 1—100Hz 带宽内	-	5 pT/Hz ^{1/2}	2007 ⁵⁷

来源: 提高激光抽运铯原子磁力计灵敏度的研究 (2013, 李楠); 高灵敏度原子磁力计研究进展 (2012, 刘国宾); 我国弱磁测量研究的进展 (1997, 丁鸿佳)

附录 2 SERF 原子磁力计基于不同碱金属原子的加热温度的真实测灵敏度

碱金属原子	加热温度/°C	测灵敏度/ (fT · Hz ^{1/2})	年份
钾	180	0.54	2003
钾	200	0.16	2010
铷	200	5	2010
铷	180	4	2014
铷	150	15	2018
铯	103	40	2008
铯	85	55	2015
铯	120	10	2017
钾-铷	195	5	2014
钾-铷	180	15	2018
钾-铷	190	0.68	2019

来源: SERF 原子磁力计最新进展及应用综述 (2021, 王宇)

⁵⁷ Schwindt P D D, Linseth B, Knappe S et al. (2007). Appl. Phys.Lett.90:081102

附录 3 非线性磁光效应磁力计技术的研究进展

时间	灵敏度	背景条件下/成果
1898	-	发现了共振激光偏振面的旋转（线性 Faraday effect，Macaluso-Corbino effect），然而旋转角度可以通过基态磁子能级的相干和外磁场塞曼相干的演化显著提高，从而导致许多非线性旋光效应
1980s	-	发现了在铯和铷蒸汽中发现了非线性偏振面旋转
2000	0.3 fT/Hz ^{1/2}	石蜡镀膜的 Rb 泡中
2002	-	Budker 演示了一种调频调制的基于非线性磁光旋转的磁场测量技术，该技术适用于研究近零场磁力计，并且使得研究动态范围较广的超灵敏磁力计成为了可能，动态范围涵盖地磁场在内的磁场
2004	-	Yashchuk 等人证明了利用频率调制的 NMOR 磁力计，对极化的氦气样品产生的磁化矢量进行检测的可靠性。非线性磁光旋转共振作为 NMOR 磁力计的特征信号，可以用作样品的磁性鉴别的特征信号，通过观察特征信号的变形情况进行材料磁性的甄别

来源：SERF 原子磁力计最新进展及应用综述（2021，王宇）；NMOR 型碱金属铷原子磁强计的研发（2017，谢奇峰）

附录 4 基于系综 NV 色心的磁测量技术的研究进展

背景条件	理论灵敏度	实际灵敏度	成果	年份
数毫米的金刚石样品上	3 fT/Hz ^{1/2}	-	打开了 NV 色心用于磁测量的大门	2008
探测频率范围 DC-100Hz	-	7 nT/Hz ^{1/2}	-	2010
20kHz	-	100 pT/Hz ^{1/2}	-	2010
光学谐振腔结合红外光探测法	亚皮特斯拉量级	-	-	2013
光学谐振腔结合红外光探测法	-	2.5 nT/Hz ^{1/2}	提高了激光与红外光在金刚石内的光程	2014
提高激光利用率	-	290 pT/Hz ^{1/2}	首次超过了红外探测方法的灵敏度	2015
采用抛物面透镜收集的方法兼在样品以及探测序列方面的改进，20kHz 处	-	0.9 pT/Hz ^{1/2}	首次突破了皮特斯拉量级	2015
利用基态能级交叉点	-	-	实现无微波磁测量技术	2016
对荧光探测方法做了系统性的优化	-	15 pT/Hz ^{1/2}	目前纯 NV 色心的最高灵敏度，实现了对电刺激下蠕虫神经元产生的磁信号的测量	2017
改进了光腔结合红外探测的方法	-	28 pT/Hz ^{1/2}	-	2017
基于系综 NV 色心的四主轴来发展矢量磁力计	-	-	有望取代其他基于 3 单轴磁力计的矢量磁力计	2018
将金刚石样品与互补式金属氧化物半导体（CMOS）芯片集成	-	63 nT/Hz ^{1/2}	灵敏度不高，但分布式光纤磁力计能够用于大范围的磁场监测（心磁测量应用的一种可能	2019

			性)	
零场环境下实现了磁场测量	-	250 pT/Hz ^{1/2}	空间分辨率为 348 μm	2019
与磁通聚集方法结合	-	0.9 pT/Hz ^{1/2}	-	2020
通过金刚石磁显微镜实现了对集成电路的磁场成像	-	-	用于分析电路的活动状态; 空间分辨率为 10 μm	2020
发展无微波磁测量技术成矢量磁测量方法	-	300 pT/Hz ^{1/2}	-	2020
介质腔微波读出方法; 5kHz 附近较高频率的频点上实现	-	3 pT/Hz ^{1/2}	-	2020

来源：基于金刚石氮-空位色心系统的磁测量方法研究（2020，谢一进）

附录 5 原子磁力计测量得到的不同特征生物磁及强度

类型	性质	时间	作者	距离（mm）	磁场大小（pT）
MCG	QSR	2003	Bison <i>et al.</i>	-	~50
		2010	Knappe <i>et al.</i>	50（距心脏） 5（距表皮）	~180
		2012	Wyllie <i>et al.</i>	76（距心脏） 10（距肚皮）	~40
fMCG	QSR	2012	Wyllie <i>et al.</i>	-	~1.5
		2015	Alem <i>et al.</i>	4.5（距肚皮）	~40
		2017	Eswaran <i>et al.</i>	-	~4
MEG	诱发响应	2006	Xia <i>et al.</i>	25（距头颅）	~1.2
	自发	2012	Sander <i>et al.</i>	25（距磁场源）	~0.5
	诱发响应				~2
	诱发响应	2013	Shah <i>et al.</i>	5-25（距头颅）	0.1~0.2
		2013	Johnson <i>et al.</i>	30（距头颅）	~0.2
		2017	Sheng <i>et al.</i>	6（距头颅）	~1.2
		2017	Boto <i>et al.</i>	6.5（距头颅）	~2
Nerve	神经冲动	2016	Jensen <i>et al.</i>	1.9	~24

注：QRS（QRS wave complex）波群反映左、右心室除极电位和时间的变化，第一个向下的波为 Q 波，向上的波为 R 波，接着向下的波是 S 波。自 QRS 波群起点至 QRS 波群终点的时间为 QRS 时限。

来源：超灵敏原子磁力计在生物磁应用中的研究进展（2018，王晓飞）

声明

本报告采用的数据均来自公开渠道或对公开数据进行的整理。本报告发布的观点力求独立、客观和公正，结论不受第三方授意或影响，不构成任何广告。

光子盒全部原创作品版权归光子盒所有。其他媒体、网站或个人转载使用时不得进行商业性的原版原式的转载，也不得歪曲和篡改本网站所发布的内容。如转载须注明来源为“光子盒”，不得对本报告进行任何有悖原意的引用、删减和篡改。未经书面许可，任何机构和个人不得以任何形式翻版、复制或发表。如征得光子盒的同意进行引用、刊发的，需在允许范围内。违规使用本报告者，法律必究。

光子盒引用其他资料的目的在于呈现信息，并不代表光子盒赞同其全部观点，不对其真实性、时效性负责。

本报告具有一定的时效性，仅表达截至发稿时的情况，不代表未来情况。在任何情况下，本报告中的信息或所表述的意见均不构成投资建议。

关于我们



光子盒 (GUANGZIHE) 这一创业理念萌生于 2019 年 9 月，第一篇媒体文章发表于 2020 年 2 月。“光子盒”这一名称来自于在 1930 年第六届索尔维会议 (Solvay Conference) 上，爱因斯坦 (Albert Einstein) 在其与玻尔 (Niels Bohr) 的争论 (Bohr-Einstein debate) 中提出的一项光子盒实验 (photon box experiment)。

光子盒以量子信息技术为切入点，通过文字、视频等方式传播资讯、科普知识、解读技术等。光子盒通过提供商务推广、研究报告、展览会议、投融资、战略咨询等服务，已与中国多地政府、国内外多家研究机构和科技企业建立了良好的合作关系。

成立至今，光子盒积极参与中国量子信息科技领域的重大活动，例如：2021 年 5 月，光子盒作为协办方，与主办方中国电子科技集团公司电子科学研究院、社会安全风险感知与防控大数据应用国家工程实验室和中国工程科技发展战略安徽研究院，在安徽合肥成功举办了“2021 中国量子科技产业‘双循环’高峰论坛”。2022 年 3 月，光子盒为重庆市沙坪坝区政府提供支持，筹建重庆市量子实验室，未来也将持续为重庆量子信息科技行业提供服务和保障。

光子盒正在不断扩充自有量子信息科技产业数据库的广度与深度，建立多维量子产业数据信息，提供客观、专业、深入及具有时效性的前沿科技报道和研究报告等。光子盒未来仍将在前沿科技领域持续发力，为建设中国量子信息科技生态圈做出努力，同中国量子信息科技产业共同成长。

iCV TAnk

Technology Advisory
& Knowledgebase

作为全球前沿科技咨询机构，ICV 对新技术始终充满热情，我们专注于发布最准确客观的行业数据与观点，来帮助我们的客户做出正确的战略决策。

我们目前专注于最前沿的科技，例如智能驾驶、量子技术、人工智能和新能源等。

我们集合了全球顶尖的技术专家与行业研究团队，通过连接动态的行业与公司信息，我们的分析师将为我们的客户提供更丰富、更高度融合的视角来看待未来商业世界。

我们可以实时动态且有效的揭示新技术路线下的风险与机会，这将助力我们的客户获得最快的信息，从而更有信心地进行决策。



更多精彩内容
请关注光子盒公众号

CONTACT US



www.quantumchina.com



gzh.marketing@quantumchina.com