

量子传感 (I): 基础理论与方法

郭弘^{1,†} 吴腾¹ 罗斌²

(1 北京大学电子学院 量子信息技术中心 北京 100871)

(2 北京邮电大学电子工程学院 信息光子学与光通信国家重点实验室 北京 100876)

2024-03-28收到

† email: hongguo@pku.edu.cn

DOI: 10.7693/wl20240402

Quantum sensing (I): basics and approaches

GUO Hong^{1,†} WU Teng¹ LUO Bin²

(1 Center for Quantum Information Technology, Department of Electronics, Peking University, Beijing 100871, China)

(2 State Key Laboratory of Information Photonics and Optical Communications, School of Electronic Engineering, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China)

摘要 作为当前三大核心量子技术之一的量子传感技术,是量子信息感知与获取的重要物理实现基础,也是发展历史最悠久、技术成熟度最高、实际应用范围最广、潜在应用最多的量子技术。文章是量子传感的第一部分,主要介绍量子传感的基础理论与方法。首先从理论上总结量子传感的定义及基本概念,指出量子传感“量子性”的由来,并从实际应用的角度,提出量子传感的技术外延以及分类依据;接着详细介绍了有关量子传感的基本实现架构,以及描述量子传感性能的核心技术指标,归纳了用于提高量子传感性能的物理原理及技术方法。

关键词 量子传感, 原子能级, 量子相干, 量子传感器, 量子信息感知与获取

Abstract Quantum sensing is one of the core directions of current quantum technology, and has the longest history, the highest maturity, and the widest applications. This article reviews the basic theory and methods of quantum sensing. First, the definition and basic concepts of quantum sensing are summarized, including the origin of the quantum nature of quantum sensing and the extension and classification of quantum sensing from the perspective of practical application. The basic and general protocol of quantum sensing is then described in detail, as well as the core technical parameters for depicting the performance of quantum sensing. Finally, the technical methods and physical principles to improve the performance of quantum sensing are summarized.

Keywords quantum sensing, atomic energy level, quantum coherence, quantum sensor, quantum information perception and acquisition

1 引言

量子传感是当前三大量子技术领域的核心发展方向之一,是量子信息感知的物理实现基础,它与量子通信、量子计算共同构成了当前量子技

术的三大支柱。基于量子传感原理形成的各类量子传感器,也在诸多领域发挥着重要作用。相较于量子计算和量子通信,量子传感技术的发展历程更悠久、技术成熟度更高、应用更广泛、效果更显著。伴随着量子理论及信息技术的发展,量

子传感的概念和技术外延也在不断拓展, 技术表现形式也愈发多样。本文主要介绍量子传感的基本概念、技术外延, 以及基本方法。

2 量子传感基本概念

传统意义的传感, 泛指利用宏观物体的物理效应对某种物理量的响应特性, 来实现对物理量的探测和感知。例如, 利用宏观材料的电学特性与待测物理量之间的依赖关系, 可以构建温度传感器、压力传感器等。早期的量子传感技术(主要指20世纪30年代左右形成的量子电子学技术)也是基于此思想, 区别在于对待测物理量进行响应的物理效应, 由宏观的物理效应转为微观粒子的量子态。例如, 基于原子能级的各种传感器, 利用的就是微观粒子量子态的分立性——待测物理量会造成微观粒子处在不同状态的概率分布产生变化, 通过测量这种概率分布的变化, 实现对待测物理量的探测。量子态与待测物理量之间的耦合构成了量子传感的核心。

量子传感技术是伴随着量子理论和人们对微观粒子量子特性的发掘以及物理与信息技术的进步而发展的。从应用的角度可将量子特性归纳为: 分立性、相干性、随机性。其中, 微观粒子(如原子)的相干性, 除了体现在单粒子状态的相干叠加(实际上, 早期的量子传感技术主要利用的就是此特性), 也体现在多个粒子状态的相干叠加, 即量子纠缠, 包括纠缠状态如何制备、如何被操控并在待测物理量的作用下演化、以及如何在演化后被探测, 都与早期的量子传感技术有本质区别; 另外, 微波激光器/量子频标/原子钟/激光、半导体/集成电路、非线性光学/量子光学等技术的发展也极大地促进了量子态的制备、操控、演化、读取等技术发展, 为量子传感技术的发展带来了更多的可能性和更为广阔的空间。

2.1 量子传感“量子性”根源

量子传感虽然研究历程已久, 但一直以来, 并没有一个规范的定义。2003年, J. P. Dowling和G. J. Milburn发表了一篇具有重要意义的论文

《量子技术: 第二次量子革命》, 第一次明确提出了“第二次量子革命”的概念以及定义^[1]。文中将“量子技术”的概念建立在量子化(分立化)、不确定性原理、量子叠加、量子隧穿、量子纠缠、量子退相干等“量子原理”上, 并将量子技术分为了量子信息技术(包括量子算法、量子密码学和量子信息论)、量子机电技术、相干量子电子学(主要是超导量子线路), 同时, 将量子光子学独立于量子技术提出, 包括自旋电子学、分子相干量子电子学、固态量子计算、量子光学、量子光学干涉技术、量子光刻和显微、量子压缩、非相互作用成像、量子远程传态、相干物质技术(即原子干涉仪)、原子光学、原子重力梯度仪、原子激光等。

可以看到, 最初的量子技术分类在层次上是比较混乱的。随着“第二次量子革命”这一概念的提出及其在近二十年的发展, 量子技术逐步凝练并形成了三个核心发展方向: 量子计算(涵盖但不限于量子计算、量子模拟、量子加速、量子算法)、量子通信(涵盖但不限于量子密钥分发、量子隐形传态、量子直接通信)和量子传感(涵盖但不限于量子精密测量、量子计量、量子传感器、量子信息感知)。对量子传感而言, 它在国际上比较早的来源甚至可以追溯到1879年^[2], 这意味着早在量子理论建立之前, 人们就已经意识到, 可以利用微观粒子的某些属性来实现对物理量的测量(图1), 并强调了这种方法的优势在于, 微观粒子的状态与待测物理量之间的依赖关系是微观粒子的内禀属性, 且不随时间、空间的变化而变化^[2]。例如, 原子核外电子的分立能级所决定的能级之间固定的能量间隔, 是原子钟技术的基础; 角动量在空间取向只能取分立数值所决定的外磁场幅值与能级移动具有确定的比例关系, 是原子磁力仪技术的基础; 等等。

综上所述, 早期的量子传感利用的是微观粒子的分立性给测量所带来的确定性和一致性, 在传感性能提升方面, 并没有脱离经典传感技术的框架, 仍沿用经典传感技术的噪声抑制方法和信号提取方法。随着特殊量子态, 如纠缠态、压缩态等概念的提出, 以及激光技术的不断发展, 特

别是20世纪80年代后期飞速发展的半导体激光器技术以及非线性光学技术,大大降低了特殊量子态在制备、操控、读取等环节的技术门槛以及难度,量子传感才真正与经典传感有了本质的不同——从经典的独立传感(探测)发展为基于量子效应的关联传感(探测)。

总体而言,对量子传感这一概念以及

技术内涵进行科学规范的学术定义,仍持续了很长时间,很多人做了相关尝试。2017年,C. Degen, F. Reinhard, P. Cappellaro在《现代物理评论》上发表了题为“Quantum Sensing”的长篇综述论文^[3],可以认为是迄今为止从学术上对量子传感技术的概念定义及技术外延所做出的最大努力——该文给出了目前最广泛的量子传感的覆盖范围,并进一步仿照2000年D. DiVincenzo针对量子计算机的判据方法^[4],提出了有关量子传感的判据(或分类依据),基于此,论文尝试提出了一个通用的量子传感协议(或技术分类方法)。在这篇文章中,量子传感的定义、量子性来源以及技术外延可按以下准则分为三类:

- (1) 使用量子物体测量物理量,其特征是量子化的能级(量子态)。具体的例子包括来自超导、中性原子、囚禁离子或其他自旋体系中的电子能级、磁子能级、原子核能级或振动能级;
- (2) 使用量子相干性(即具有波动属性的空间、时间叠加态)来测量物理量;
- (3) 使用量子纠缠来提高测量的灵敏度或精度,从而超越经典测量技术的统计极限。

2.2 量子传感的技术分类

按照上述三类标准,早期的量子传感技术,

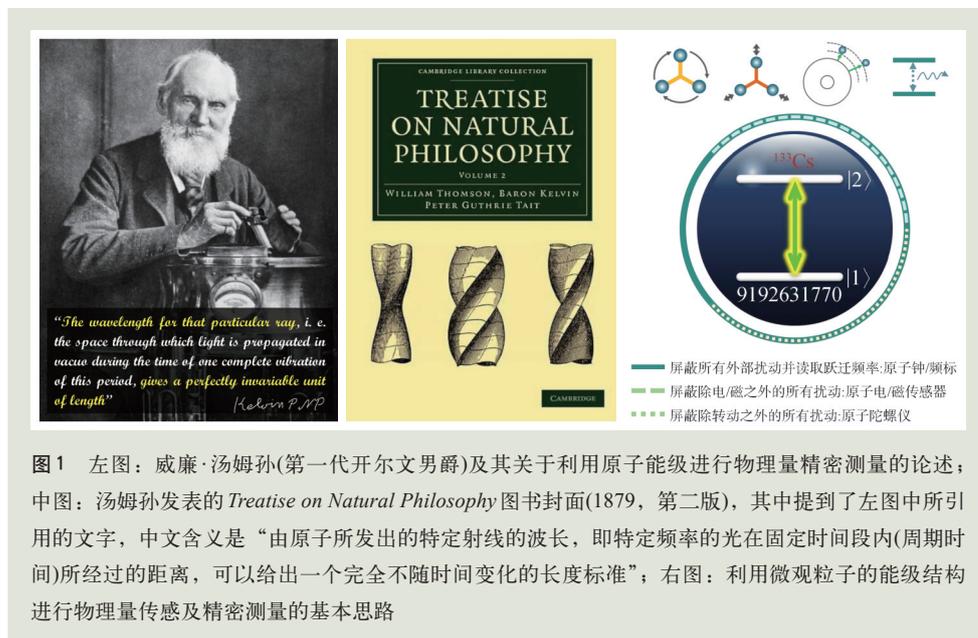


图1 左图:威廉·汤姆孙(第一代开尔文男爵)及其关于利用原子能级进行物理量精密测量的论述;中图:汤姆孙发表的 *Treatise on Natural Philosophy* 图书封面(1879,第二版),其中提到了左图中所引用的文字,中文含义是“由原子所发出的特定射线的波长,即特定频率的光在固定时间段内(周期时间)所经过的距离,可以给出一个完全不随时间变化的长度标准”;右图:利用微观粒子的能级结构进行物理量传感及精密测量的基本思路

基本上都可以归结为前两类。随着量子纠缠的实现以及激光技术的发展,人们开始充分挖掘特殊量子态以及量子态操控方法在降低测量不确定度方面的巨大潜力,并由此而发展出量子精密测量、量子参数估计等技术。在本文中,我们将这些技术统称为量子传感。一方面与上述定义相符,另一方面,不同的技术,其核心都是利用量子态与待测物理量之间的耦合作用,终将殊途同归。只是在现阶段的发展侧重点有所区别:前两类技术,更关注的是提升对微小物理量变化量的感知能力;第三类技术,更关注的是如何在资源有限的情况下,进一步降低待测物理量的测量不确定度。

从量子传感的实际应用出发,2022年,美国发布《将量子传感器付诸实践(Bringing Quantum Sensors to Fruition)》的报告^[5],将量子传感器定义为:“量子传感器是利用量子力学特性(如原子能级、光子态或基本粒子的自旋)进行计量的设备”,将概念的重点放在其外延上,仅以“例证”形式说明哪些技术属于量子传感器——任何一个传感器本身是不是足够“量子”并不影响其在现阶段发挥效能。因此,基于“归纳法”,可以给出量子传感器的框架。

基于此思想,由于量子科技已经在世界各发达国家上升到国家战略技术的地位,因此,可先将发达国家有关量子战略的代表性文件中所关注

的量子技术择要列出(表1), 尝试描述量子传感器的概念并进行分类。综合来看, 截至目前, 在各发达国家普遍受到关注的量子传感技术实际上是在逐渐聚焦的。目前普遍的量子传感技术也可以分为三大类。可以看到, 分类结果基本能够与上述学术分类标准相符合。

第一类是已经形成了具有代表性实用化产品的成熟技术方向, 且已经形成或正在逐步构建新的产业结构, 主要有原子钟、原子磁力仪、超导干涉磁力仪、原子干涉重力仪、核磁共振技术等。

第二类是在实用化研发过程中的技术, 主要

有光频原子钟(包括光晶格钟)、金刚石色心(NV color center)技术、量子关联成像等。

第三类是暂时还处在实验室和学术研究阶段的, 主要有(里德伯)原子电场探测器、量子照明, 以及基于特殊量子态(如压缩态、纠缠态)的量子精密测量技术及方法等。

3 量子传感性能描述及提升方法

传感或测量的核心, 体现为对物理量的测量能力, 或对物理量变化量的响应能力, 除此之

表1 世界科技大国量子传感器技术举例

时间	国家	文件来源	量子技术
2014	英国	量子技术前景报告 ^[6] Quantum Technology Landscape	量子时频: 相干布居囚禁原子钟, 量子逻辑钟和单离子钟, 原子芯片和光晶格时钟, 量子时钟同步; 惯性和引力: 增强型 Sagnac 效应陀螺仪, Sagnac 物质波干涉仪, Mach-Zender 和 Michelson 类冷原子干涉仪, 单离子钟和光晶格; 量子增强成像: 激光雷达, 量子鬼成像, 量子安全成像, 量子芝诺效应传感器, 光学纳米探针; 电磁传感器: 电场传感器, 磁场传感器, 量子电流标准, 电场和磁场成像, 纳米尺度测温, 电磁辐射传感器及信号检测, 单光子探测器; 机械传感器; 其他一些量子增强: 量子栅栏, 望远镜基线扩展, 测距。
2016	美国	量子传感器报告 ^[7] Quantum Sensors at the Intersections of Fundamental Science, Quantum Information Science & Computing	在物理和生命科学中具有广泛应用的固态量子传感器(金刚石色心-NV 氮原子空穴色心); 探索标准模型之外物理的量子传感器(磁力仪和原子钟, 囚禁的极性分子, 自旋压缩, 控制自旋退相干, 纠缠); 量子信息处理成为现实(囚禁离子, 约瑟夫森结); 增强型量子传感器的先进材料(光晶格, 固态量子缺陷, 混合量子系统, 拓扑材料); 用于暗区物理的量子传感器(高 Q 值的射频或微波腔, 基于超导干涉效应的高 Q 接收器); 基于原子干涉测量和光学原子钟的精密时空传感器(量子纠缠(“压缩”)和量子控制(“动态解耦”))。
2017	欧盟	量子技术旗舰计划最终报告 ^[8] Quantum Technologies Flagship Final Report	光子学, 冷/热原子传感器, 囚禁离子传感器, 单自旋或固态自旋的集合, 电子, 固态超导磁通量子, 光机械和光机电传感器, 混合系统。
2017	欧盟	空间量子技术 ^[9] Quantum Technologies in Space	(冷)原子钟, 量子重力梯度仪, 光力学与大质量物质波干涉(腔光力学与分子干涉)。
2017	欧盟	欧洲量子科技路线 ^[10] European Quantum Technology Roadmap	光子传感器, 原子传感器, 量子钟, 量子成像, 基于自旋量子比特的传感, 光机械传感器; 多光子干涉测量法(NOON 态/压缩光); 原子干涉(重力、转动、磁场、时间); 在低光照水平或存在强背景照明的情况下, 使光学分辨率超波长限制; 金刚石及碳化硅中的缺陷(高空间分辨率和高光谱分辨率探测)。
2019	美国	量子科学技术现状概览及给国防部的建议 ^[11] Overview of the Status of Quantum Science and Technology and Recommendations for the DoD	原子干涉, 量子照明, 原子蒸气, 囚禁离子, 里德伯原子, 超导电路, 金刚石色心。
2019	美国	量子技术的应用(调查报告) ^[12] Applications of Quantum Technology (Investigation Report)	原子钟, (原子干涉)加速度计和磁力仪, 量子照明, 里德伯原子天线。
2020	日本	量子技术战略研究报告 ^[13] Quantum Technology Strategy Report	固态量子传感器(金刚石色心等), 量子惯性传感器, 光晶格钟, 量子纠缠光学传感器, 自旋电子学传感器。
2020	美国	量子光子技术路线 ^[14] Quantum Photonic Development Roadmap	原子钟, 用于重力、惯性和旋转传感器的原子干涉仪, 磁强计, 量子激光雷达/雷达, 量子成像。
2022	美国	量子传感器实用路线 ^[15] Bringing Quantum Sensors to Fruition	原子钟, 原子干涉仪, 光泵(原子)磁力仪, 利用量子光学效应的设备, (里德伯)原子电场探测器等。

外, 有关传感性能及结果的可重复性以及一致性, 也是目前重点发展的方向之一。这一部分将首先给出量子传感的基本框架, 并介绍量子传感性能指标的描述方法, 以此为基础, 从物理以及技术方法两方面, 介绍如何提升量子传感技术性能指标。

3.1 量子传感基本框架

量子传感主要依赖于对微观粒子状态(量子态)的精确操控和读取。实际上, 量子传感的基本框架以及实现方法, 可以用量子技术的通用框架进行描述, 即, 量子态的制备、量子态的演化以及量子态的读取。因此, 从这个角度来看, 量子传感和量子计算是等价的。二者的区别在于, 在量子态的制备以及演化部分, 量子计算比量子传感的复杂程度更高, 主要体现在, 量子计算需要将待解决的问题或拟实现的算法, 转化(或编译)为一系列实现量子态演化的相互作用哈密顿量, 而对于量子传感, 在态的演化这一部分, 一般仅需要考虑量子态在待测物理量作用下的演化形式即可。也就是说, 量子传感更关注的是如何精确地控制并读取量子态的演化。此外, 量子计算对量子纠缠态的要求也更高, 对于量子传感, 纠缠并非必要条件。

具体而言, 量子传感的通用框架包括7个基本步骤。这部分内容主要参考“Quantum Sensing”这篇综述论文^[3]。本文以此为基础, 并结合原子磁力仪、原子钟、核磁共振等代表性量子传感技术, 对量子传感这一框架的基本结构做相应的补充和说明。

第一步: 量子态的初始化。微观粒子的状态需要被制备到一个初始状态, 一般而言, 该初始状态可以选为微观粒子的某个本征态(如二能级原子的能量本征态)。对于基于原子系综的量子传感器, 这一步骤也被称为极化。例如, 核磁共振中的强磁场、原子钟中的磁选态技术、原子磁力仪中的光泵浦技术等。

第二步: 量子态的制备。这一步主要将量子态转化为可用于进行传感的状态。该状态需要能

够在待测物理量的作用下产生演化。一般通过施加一定的状态控制脉冲来实现态的制备。例如, 核磁共振中的 90° 磁场脉冲; 除此之外, 还可以设计一系列更复杂的操控手段, 用来制备一些特殊的量子态, 比如纠缠态、压缩态等。

第三步: 量子态的演化。制备的量子态在待测物理量的作用下进行演化, 这是实现量子传感的关键。例如, 在磁场作用下, 微观粒子的内禀磁矩会与外磁场相互作用, 若微观粒子的状态不是该相互作用的本征态, 就会产生演化, 演化过程可以唯象地用磁矩在磁场作用下的拉莫进动来反映状态的演化规律, 通过测量进动的角度(或者频率), 即可得到有关磁场的信息; 原子钟则是利用原子的内禀相互作用, 通过屏蔽所有外界影响, 精确提取微观粒子的状态在内禀作用下的演化频率。

第四步: 量子态的转化。这一步的主要目的是将演化后的量子态转化为可以观测的状态。例如, 对于原子钟, 在利用 90° 脉冲将原子状态制备为叠加态, 并在内禀相互作用下演化后, 需要再施加一个 90° 脉冲。这一步主要取决于后面的观测手段。如果选择的观测手段可以直接观测演化后的叠加态, 则无需进行这一操作。

第五步: 量子态的读取。相较于初态而言, 演化后的状态一般是原本征态的叠加态, 因此, 单次测量得到的结果是随机的, 只能得到其中的一个本征态。读数(或测量)是一个伯努利过程, 以 $1-p$ 的概率得到状态A, 以 p 的概率得到状态B, 这个概率通过单次测量无法得到, 需进行多次测量。

第六步: 重复测量。重复上述1—5步, 在理想情况下, 得到的测量结果即为不同本征态的概率, 重复有两方面意思, 一方面, 体现为对单个粒子重复进行上述1—5步, 另一方面, 体现为粒子系综的探测结果均值, 这两种意义上的重复可以并列进行。

第七步: 待测物理量的估值。根据前述步骤的分析, 测量得到不同本征态的概率分布及其变化当中就包含了待测物理量的信息。通过测量概率, 可以得到有关物理量的取值。

上述框架基本上可以概括目前与量子传感相关的所有技术,不同技术方向的区别主要体现在上述7个步骤的关注侧重点有所不同。

3.2 量子传感性能指标

量子传感的核心技术指标包括噪声、灵敏度、精度等,这些指标之间既有联系,又有区别。总的来说,噪声主要反映为影响测量结果的一类物理因素,且具有随机特性。灵敏度虽与噪声密切相关,但其同时也取决于信号强度,反映的是系统所能分辨的物理量变化量的最小值。精度(或准确度)关注的是测量结果与真实结果之间的差异,既与噪声相关(统计误差),也取决于测量方法所引入的误差(系统误差)。

噪声。量子传感中的噪声可主要分为经典噪声和量子噪声两大类。经典噪声一般也被称作为技术类噪声(主要是指来源于宏观系统所引入的噪声,比如激光器的强度噪声、频率噪声、探测器的散粒噪声,与后面提到的暗电流噪声其实都来源于自发辐射这一量子效应,但通常被归为技术类噪声/经典噪声)、暗电流噪声等等,以及来自外界的非待测物理量的随机性干扰,如黑体辐射、振动噪声、温度噪声等。

量子噪声主要来源于对量子态的测量,其本质是不确定性原理,是对未知量子态做投影测量的必然结果。例如,假如测量结果为 A 的概率为 p ,测量结果为 B 的概率为 $1-p$,根据前文所述,概率 p 中包含了待测物理量的信息。假设测量的总次数为 n ,则测量得到 A 的次数为 np ,测量得到 B 的次数为 $n(1-p)$,可以计算得到 p 的不确定度(或方差)为 $p(1-p)/n$,这个不确定度就是量子投影噪声。量子投影噪声可通过设置不同量子态进行操控(如压缩态),但并非量子投影噪声越小越好,例如,对于上述例子, p 为0或1时, p 的不确定度为0,此时微观粒子处于本征态(基矢),但这个状态对于传感而言并非最优——传感更关注的是信噪比。

灵敏度。灵敏度是指传感系统所能反映的某

物理量变化量的最小值,主要取决于一定带宽范围内的信噪比,可分为由经典或量子噪声所决定的灵敏度指标,例如,对于原子磁力仪,其经典噪声下的灵敏度公式可以写作 $[(T_2)(\text{SNR})\gamma]^{-1}$,其中, T_2 为横向弛豫时间(一定程度上,反映的是量子叠加态的相干时间), SNR 为在一定带宽范围内的信噪比(平均时间越长、带宽越小,噪声越低,信噪比则越大), γ 为常数(描述特定原子的特定状态下,磁场和频率之间的转化系数);而其量子噪声,如量子投影噪声下的灵敏度一般写作 $[(T_2)(NT)\gamma^2]^{-1/2}$,其中, N 为相互作用的粒子数, T 为总测量时间, T/T_2 也可以看作是平均次数(单次测量时间的上限取决于量子态的弛豫时间)。量子投影噪声所决定的灵敏度极限与相互作用的粒子数以及测量时间成反比,一般也称作标准量子极限,可以通过制备特殊的量子态,如纠缠态、压缩态对灵敏度实现进一步突破,但目前仍局限于少量粒子数所构成的体系。

精度。也被称作准确度,主要反映传感过程中引入的测量误差,包括统计误差和系统误差。其中,统计误差取决于噪声水平,噪声越小则测量离散程度越小,从而统计误差就越小。系统误差主要来源于测量方法及系统非理想性等因素引入的误差,主要体现为与真实物理量之间的偏移量。精度更多反映的是传感系统的长期稳定性以及可重复性。量子传感之所以能够在精度方面具备较高性能,核心还是对微观粒子量子态的高精度操控以及保护。

此外,描述量子传感性能的指标还需包括量程、带宽等。这里未加详述,主要是考虑:这些指标仍沿用经典传感中的定义,在技术上,也并未脱离经典的技术框架;另一方面,从目前的技术发展现状来看,微观粒子的量子特性也未能够为上述指标带来类似于灵敏度、精度等在概念内涵、性能提升等方面的颠覆性效果;甚至,鉴于量子态对外界环境的高度敏感性,量子传感在动态范围以及带宽方面反而受限,例如,原子磁力仪的带宽和灵敏度就互相制约。近些年,随着金刚石色心以及结合光学谐振腔的微型原子气室等

技术的发展,量子传感在保证高传感灵敏度指标的同时,在空间分辨率方面也达到了极高水平。尤其是基于金刚石色心的传感技术,发展至今,正逐步往兼具高传感灵敏度、高空间分辨率、大动态范围、高带宽的传感技术方向迈进(详细内容另文介绍)。

3.3 量子传感性能提升方法

结合上述有关量子传感核心性能指标的描述以及分析,下文将试着从物理原理和技术方法两个方面,总结概括出提高量子传感技术探测灵敏度、降低探测噪声以及提高探测精度的根源和主要技术手段。由于这一尝试是基于归纳的,因此并不能涵盖量子传感技术灵敏度提高的所有方法。通过下文介绍,可以看到的是,表1中的大部分技术(除去和安全性相关的技术外)均可纳入。

3.3.1 物理原理

量子传感技术的灵敏度及精度提高,亦即所谓的“量子增强”效应的原理,可以简单分为两个大的部分:量子化和量子相干。这也是截至目前,我们所能够认识到的有关微观粒子的基本属性(图2)。

量子化。基本传感单元微观结构的量子化(或

分立化)是几乎所有量子传感器的物理基础,也是各类量子效应及其控制手段得以应用的根本,其精确性就体现在“量子化”本身。一些物理系统的量子化特性为灵敏度极限提供了理论支撑(例如超导)。需要指出的是,与传统定义观点不同,本文认为“量子化”不仅仅指“分立化”这一主要涉及量子束缚态的自然结论,还需要强调所谓的量子力学基本假设中的全同性(此处不追求束缚态和量子力学公设的严格学术论证)。特别重要的是,原子能级的量子化及量子力学的全同性基本假设,从原理上保证了不同原子能级间跃迁频率的高度一致性,而频率测量的高精度进一步构成了现代精密测量的核心能力,也是计量量子化(即溯源到基本物理常数)的根本保障之一——发展至今,频率是人类测量水平最高的物理量——不仅指测量精度,还体现在长期测量的一致性及可重复性。

量子相干。量子相干主要涉及量子态的相干叠加特性(包括量子纠缠特性的控制与保持),是增强、提升量子传感技术传感精度及灵敏度的关键。

对于早期的量子传感技术,如原子钟、原子磁力仪、原子陀螺仪等,决定其传感性能的关键因素之一,体现为如何保持量子态的相干特性。相干特性在很大程度上可以用特征信号的 Q 值来表征,如原子钟、原子磁传感器的量子传感技术中的共振信号线宽,也就是公式 $[(T_2)(\text{SNR})\gamma]^{-1}$ 中

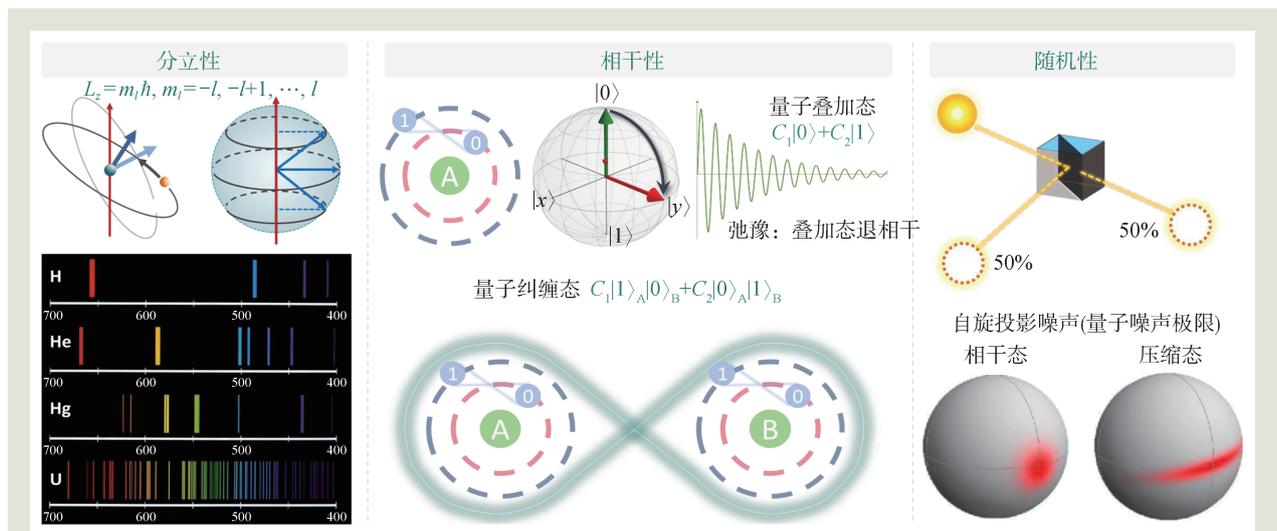


图2 微观粒子的基本属性: 分立性(分立能级)、相干性(量子叠加态、纠缠态)、随机性(量子噪声)

的 T_2 ，其与线宽之间一般呈反比，因此，相干时间越长，信号线宽越窄、 Q 值越大，传感器的探测灵敏度性能指标则越高。

伴随着冷原子技术而发展起来的物质波干涉技术，我们可以大胆地将量子相干性带来的系统测量精度及探测灵敏度的提高，归结为量子系统中“波动性”的进一步体现。量子传感技术测量精度及探测灵敏度的提高可以在很大程度上归因到经典光学干涉测量技术的量子版本(光学干涉代表着经典测量的最高水平，如引力波探测)。和其他经典理论一起，遵循从经典波动的振幅干涉到“量子波”的几率幅干涉上，从而统一到在量子相干和量子统计理论的理论框架内。此外，利用特殊的量子态(如量子压缩态、NOON 态等)，以及量子操控手段(如动力学解耦、量子无损测量等)带来传感技术灵敏度及精度的提升，归根到底，体现的仍是有关量子态相干特性和纠缠特性的控制与保持。

3.3.2 技术方法

基于上述有关量子传感的物理原理分析，可将目前提升量子传感技术性能指标的主要技术实现，分为三个主要思路。

(1) 高 Q 值系统的制备和维持

基本传感单元微观结构的量子化是几乎所有量子传感器的物理基础，但量子化本身并不保证测量精度的提高。如果不考虑引入量子纠缠的量子系统，其测量精度的提高在基本原理上与经典系统是类似的，其基本原则是依赖传感单元的高 Q 值。不仅仅是电路或光学腔，作为最重要的量子传感系统的原子系统更是如此。“原子”的分立性能级本身并不保证测量精度(但是可以保证测量一致性)，高 Q 值的原子系统才是保证测量精度的根本——其本质反映的是原子系统对待测物理量的响应能力， Q 值越大，原子系统对待测物理量的响应越强。原子系统的 Q 值可定义为跃迁频率与跃迁线宽之比，这也是原子钟向光钟发展^[16](提高跃迁频率)以及由热原子向冷原子发展^[17](降低跃迁线宽)必然性的根本原因。

(2) 干涉仪的量子增强技术

光学干涉仪在精密测量的历史上扮演了重要的角色，其中，以迈克尔孙—莫雷实验最为著名。经典光学干涉仪测量精度的提高需要更短的波长和更强的相干性(衍射极限)，这往往通过光源选择(从可见光到紫外线、 X 射线等)、光源稳定性(增加相干时间)和加长干涉臂来实现，其测量值的统计原理仍然遵循 $1/N^{1/2}$ 的经典统计规律。量子力学所带来的量子相干性给干涉仪的“光源”提供了更多的选择，原子干涉仪在短波长物质波干涉仪方向上前进了一大步，更进一步，还可以利用电子、中子、反物质粒子等实现干涉仪。纠缠光以及以之为基础的特殊光场态的引入使干涉仪的测量精度具备了提高到 $1/N$ 海森伯极限的基本条件，而其纠缠光注入技术则从技术实现上完成了这一跨越^[18]。此外，采用强度干涉的鬼成像技术和超导量子干涉器件也可以纳入这一类型中来。

(3) 由物理量测量向频率测量转换

以激光器、高精细度(高 Q 值)光学腔为代表的现代量子光学技术是量子传感能力提升的根本保障之一，随着以原子钟为核心的量子频率标准技术的不断成熟，人类精密测量的能力在频率这一基本单位上已提高到了不可思议的水平——频率测量的不确定度已经达到了 10^{-19} 水平^[19]，日常运行的原子钟(喷泉)也能达到 10^{-15} 水平^[20]，这一测量精度远高于其他物理量的测量精度。因此，将其他物理量通过与量子系统(特别是原子能级)的相互作用，从而将被测量的物理量转换为频率测量就成为了一个重要的手段，其代表性技术有光泵原子磁力仪(基于特定原子的特定能级，磁场与频率之间通过旋磁比进行联系)^[21, 22]、里德伯原子电场测量^[23]、双光梳测距等。

除此之外，一些技术方案，包括但不限于原子气室多路径技术、零差和外差检测、双光梳技术等，没有列入，其原因在于，这些涉及到量子传感性能提高的技术手段，原理上与经典光学干涉仪、微波雷达检测和电信号时间检测等方面的技术趋同，并不属于典型量子效应(即分立性、相干性)所带来的。

4 量子传感器的定义

与量子传感的三要素类似,综述[3]尝试给出了量子传感器的定义:

(1)量子系统的状态需具备可分辨、分立的基本条件,等效为二能级系统;

(2)量子系统的状态具备初始化到任意状态以及被读取的可能性;

(3)量子系统的状态能够被操控,典型的如交变电磁场等;

(4)量子系统的状态与待测物理量之间具有固定的转化关系,一般可写作 $\gamma = \partial^q E / \partial V^q$,其中, ∂V 表示待测物理量的变化,相应的, ∂E 表示量子系统能量的变化, $q = 1$ 表示线性关系, $q = 2$ 表示二次关系(依此类推)。

可以看到,与前述有关传感的定义不同,这里并没有刻意强调量子纠缠效应,完全从实用的角度给出了量子传感器的定义。因此,结合目前发展现状,已进入实用化阶段的量子传感器的典型代表为原子钟、原子磁力仪、原子干涉重力仪等。同时,金刚石色心、里德伯原子电场探测等因其独特的优势也正在逐步成为重要的技术发展方向,受到了较多的关注。这一部分涉及量子传感技术的实际应用,受限于篇幅要求,我们将另文详细讨论有关量子传感技术以及量子传感器在应用方面的总体发展情况以及进一步的发展趋势。

5 结语

本文主要介绍了量子传感的基本理论和方法,从理论上总结了量子传感的定义及基本概念,指

出了量子传感“量子性”的由来,并从实际应用的角度,给出了量子传感的技术外延以及分类依据。本文还详细介绍了有关量子传感的基本实现架构,以及描述量子传感性能的核心技术指标,并归纳了用于提高量子传感性能的核心物理原理及技术方法。需要注意的是,量子传感技术是伴随着量子理论的发展而不断发展的,其概念内涵以及技术外延也在近一个世纪的发展历程当中不断拓展。

发展至今,量子传感已经成为当前量子技术的三大核心发展方向之一,同时,也是发展历史最悠久、技术成熟度最高、实际应用范围最广或潜在应用最多的量子技术。但即便如此,量子传感同量子计算、量子通信一样也面临着如何抵抗外界环境对量子态所引入的退相干机制——量子态对外界环境具有高敏感性,既是量子传感的优势,同时也给其在复杂环境下的稳定可靠使用带来了技术挑战。相比较而言,在应对环境所引起的退相干机制这一块,量子计算反而比量子传感在处理方式上要直接的多——将外界所有干扰尽可能进行屏蔽即可。量子传感的核心目的是感受外界信息,如何在更复杂、更实际的环境中,充分发挥量子传感所带来的颠覆性的性能优势,是目前量子传感要解决的核心问题之一。

总之,量子传感虽历经一个世纪的发展,然方兴未艾,其涉及到的技术范围极广、概念内涵以及描述方法也纷繁多样。以此为背景,本文是对量子传感的核心概念、关键理论及技术方法进行归纳与总结的一次尝试。鉴于作者自身研究方向无法覆盖量子传感的所有技术领域,难免会在部分技术、理论的描述方面有欠妥及不完备之处,敬请批评指正。

参考文献

- [1] Dowling J P, Milburn G J. *Philosophical Transactions A*, 2003, 361: 1655
- [2] Thomson W, Tait P G. *Treatise on natural philosophy*. Clarendon Press, 1867, 1
- [3] Degen C, Reinhard F, Cappellaro P. *Reviews of Modern Physics*, 2017, 89: 035002
- [4] DiVincenzo D P. *Fortschritte der Physik: Progress of Physics*, 2000, 48: 771
- [5] Bringing Quantum Sensors to Fruition. <https://www.quantum.gov/wp-content/uploads/2022/03/BringingQuantumSensorsToFruition.pdf>
- [6] UK Quantum Technology Landscape 2014. <https://www.quantum-commshub.net/wp-content/uploads/2020/09/QuantumTechnology-Landscape.pdf>
- [7] Quantum Sensors at the Intersections of Fundamental Science, Quantum Information Science & Computing. <https://www.osti>

gov/biblio/1358078

[8] Quantum Technologies Flagship Final Report. <https://era.gv.at/public/documents/3365/Finalreport.pdf>

[9] Quantum Technologies in Space. https://qt-space.eu/wp-content/uploads/2023/08/QTspace_Strategic_Report_Intermediate.pdf

[10] Acín A *et al.* New Journal of Physics, 2018, 20:1

[11] Wolf S A, Joneckis L G, Waruhiu S *et al.* Overview of the Status of Quantum Science and Technology and Recommendations for the DoD. Institute for Defense Analyses, 2019 Applications of Quantum Technology

[12] Applications of Quantum Technology(Investigation Report). https://dsb.cto.mil/reports/2010s/DSB_QuantumTechnologies_Executive%20Summary_10.23.2019_SR.pdf

[13] Quantum Technology Strategy Report. <https://www8.cao.go.jp/cstp/tougosenryaku/ryoushisenryaku.pdf>

[14] Quantum Photonic Development Roadmap. https://www.optica.org/industry/online_industry_library/quantum_photonics_roadmap/

[15] Bringing Quantum Sensors to Fruition. <https://www.quantum.gov/wp-content/uploads/2022/03/BringingQuantumSensorto-Fruition.pdf>

[16] Ludlow A D, Boyd M M, Ye J *et al.* Reviews of Modern Physics, 2015, 87:637

[17] Pezzè L, Smerzi A, Oberthaler M K *et al.* Reviews of Modern Physics, 2018, 90:035005

[18] Pan J W, Chen Z B, Lu C Y *et al.* Reviews of Modern Physics, 2012, 84:777

[19] Brewer S M, Chen J S, Hankin A M *et al.* Physical Review Letters, 2019, 123:033201

[20] NIST's Cesium Fountain Atomic Clocks. <https://www.nist.gov/pml/time-and-frequency-division/time-realization/cesium-fountain-atomic-clocks>

[21] Budker D, Romalis M. Nature Physics, 2007, 3:227

[22] Marcis A, Budker D, Rochester S. Optically Polarized Atoms: Understanding Light-atom Interactions. Oxford University Press, 2010

[23] Gallagher T F. Reports on Progress in Physics, 1988, 51:143

读者和编者

订阅《物理》得好礼

——超值回馈《岁月留痕》
—《物理》四十年集萃—

为答谢广大读者长期以来的关爱和支持，《物理》编辑

户名：中国科学院物理研究所
帐号：11 250 1010 4000 5699
(请注明《物理》编辑部)
咨询电话：010-82649029; 82649277
Email: physics@iphy.ac.cn

部特推出优惠订阅活动：向编辑部连续订阅2年《物理》杂志，将获赠物理类科普图书或《岁月留痕—《物理》四十年集萃》一本。该书收录了1972年到2012年《物理》发表的40篇文章，476页精美印刷，定价68元，值得收藏。

希望读者们爱上《物理》！

订阅方式(编辑部直接订阅优惠价180元/年)

(1) 邮局汇款

收款人地址：北京市中关村南三街8号中科院物理所，100190

收款人姓名：《物理》编辑部

(2) 银行汇款

开户行：农行北京科院南路支行

