

量子传感器在微弱电流检测中的噪声抑制方法

武焕有

山西朋通建设项目管理有限公司 山西太原

【摘要】量子传感器用于微弱电流检测时，热噪声、散粒噪声及量子退相干噪声干扰严重影响检测精度。热噪声源于粒子热运动，与温度相关；散粒噪声由电荷离散性导致；量子退相干噪声则因量子比特与环境相互作用产生。针对这些噪声，低温冷却、高品质材料选用可降低热噪声，优化量子比特设计结合电流整形技术能抑制散粒噪声，量子纠错码与主动反馈控制可应对量子退相干噪声。多维度综合优化策略从材料、电路设计、系统层面协同作用，通过噪声功率谱密度、检测精度及稳定性测试评估噪声抑制效果，为实现高精度微弱电流检测提供有效路径。

【关键词】量子传感器；微弱电流检测；噪声抑制；低温冷却；量子纠错码

【收稿日期】2025 年 6 月 14 日

【出刊日期】2025 年 7 月 15 日

【DOI】10.12208/j.sdr.20250109

Quantum sensor noise suppression methods for measuring weak currents

Huanyou Wu

Shanxi pengtong Construction Project Management Co., Ltd, Taiyuan, Shanxi

【Abstract】 When quantum sensors are used to measure weak currents, thermal noise, shot noise, and quantum decoherence noise significantly affect the accuracy of the measurements. Thermal noise, which is temperature-dependent, originates from the thermal motion of particles; shot noise is caused by the discreteness of charges; and quantum decoherence noise arises from the interaction between qubits and the environment. To address these issues, low-temperature cooling and the use of high-quality materials can reduce thermal noise. Optimizing qubit design and incorporating current shaping techniques can help suppress shot noise. Quantum error correction codes and active feedback control can effectively manage quantum decoherence noise. A multi-dimensional optimization strategy, involving material selection, circuit design, and system integration, evaluates the effectiveness of noise suppression through tests on noise power spectral density, measurement accuracy, and stability, providing an effective approach to achieve high-precision weak current detection.

【Keywords】Quantum sensor; Weak current detection; Noise suppression; Low-temperature cooling; Quantum error correction code

引言

在量子计算、生物医学等前沿领域，微弱电流检测有着不可或缺的地位。在量子计算中，极微弱的电流变化会直接影响量子比特的状态，进而干扰计算结果的准确性；在生物医学领域，细胞电信号的微弱电流检测，对于疾病早期诊断和生理机制研究意义重大。量子传感器凭借高灵敏度成为检测微弱电流的重要工具，但其检测精度受限于热噪声、散粒噪声和量子退相干噪声等多种噪声干扰。如何有效抑制这些噪声，提升量子传感器在微弱电流检

测中的精度，是当前亟待解决的关键问题。

1 噪声问题剖析

在量子传感器检测微弱电流的精密过程中，噪声干扰如同隐匿的暗流，时刻威胁着检测的准确性与可靠性。热噪声作为最基础且普遍存在的干扰源，其本质源于传感器内部粒子永不停歇的热运动。在宏观世界里，温度的细微变化或许难以察觉，但在量子尺度下，每一次温度的攀升，都意味着粒子动能的激增。这些躁动的粒子相互碰撞、跃迁，在电路中产生随机的电压波动，如同平静湖面泛起的层层

涟漪，随着温度升高逐渐演变成汹涌的波涛。

散粒噪声的产生则与微观世界中电荷的离散特性紧密相连。电子作为电荷的基本载体，它们在通过量子传感器敏感元件时，并非像宏观电流那样呈现出连续、稳定的流动状态，而是以离散的“颗粒”形式逐个通过。这种离散性使得电流在微观层面产生不规则的涨落，如同夜空中闪烁不定的繁星，每一次闪烁都代表着电子通过时引起的电流波动^[1]。在微弱电流检测场景下，散粒噪声带来的电流波动与真实信号交织在一起，就像将一粒细小的沙子混入一堆同样细小的珍珠中，使得检测系统难以精准分辨出真正的微弱电流信号，从而导致测量结果出现偏差。

量子退相干噪声是量子传感器面临的独特挑战，其根源在于量子比特与外界环境之间复杂的相互作用。量子比特作为量子计算与传感的核心单元，依赖于量子态的相干性来实现高灵敏度检测。外界环境中的温度变化、磁场扰动、电磁辐射等因素，都如同无形的“推手”，会不经意间破坏量子态的脆弱平衡。当量子比特与环境发生相互作用时，原本处于叠加态的量子态会迅速退化为经典状态，就像脆弱的肥皂泡在微风中破裂^[2]。这种退相干过程不仅降低了量子传感器的检测灵敏度，还会引入额外的噪声干扰，使得微弱电流检测的准确性大打折扣，成为制约量子传感器性能提升的关键瓶颈。

2 抑制技术探索

面对热噪声的挑战，低温冷却技术犹如一把精准的“手术刀”，能够有效“切除”噪声干扰的根源。当量子传感器被冷却至毫开尔文量级的极低温环境时，内部粒子的热运动如同被按下了“暂停键”，运动速度大幅减缓。在这种近乎静止的状态下，粒子之间的碰撞频率急剧降低，热噪声产生的电压波动也随之被压制到极低水平。与此采用高品质低温材料制作传感器元件，就像是为传感器构筑了一道坚固的“防线”。这些材料内部缺陷极少，能够进一步减少因材料自身特性引起的热噪声。

为了应对散粒噪声，优化量子比特设计与电流整形技术双管齐下，形成了一套有效的降噪策略。通过增加电荷量子化能级，如同在微观世界中为电子搭建了多层“台阶”，使得电子在通过敏感元件时能够更加有序地跃迁，从而稳定电荷传输过程^[3]。

这就好比在繁忙的交通路口设置多个车道和明确的交通规则，让车辆能够有条不紊地通行，减少了因混乱导致的“拥堵”（即电流波动）。而电流整形技术则像是一位技艺精湛的“信号雕塑家”，它将不规则、波动的电流信号转换为更加稳定、平滑的形式。

针对量子退相干噪声，量子纠错码技术与主动反馈控制技术相辅相成，共同为量子比特保驾护航。量子纠错码技术基于 Shor 码、Steane 码等精妙的编码方案，就像为量子传感信息穿上了一层“防护铠甲”。通过对量子信息进行冗余编码，即使在噪声干扰下部分信息丢失或出错，系统也能够利用冗余信息恢复出原始的准确信息。这就如同在重要文件的传递过程中，同时发送多份备份，即使其中一份受损，也能通过其他备份还原出完整内容^[4]。主动反馈控制技术则像是一位时刻警觉的“守护者”，它能够实时监测量子比特的状态变化。一旦发现量子比特因外界干扰出现退相干迹象，便立即采取相应的调整措施，通过施加特定的控制信号或调节环境参数，帮助量子比特恢复到稳定的量子态，从而有效提升量子传感器的抗退相干能力，确保微弱电流检测的准确性。

3 综合优化实施

从材料层面进行优化，是降低噪声的重要基础环节。选择低噪声材料，如量子点红外探测器采用 InSb 或 GaSb 材料，就像是为量子传感器挑选了一副“优质骨架”。这些材料在液氦温区下，能够展现出优异的噪声性能，如同为传感器提供了一个天然的“降噪屏障”。它们自身的电子结构和物理特性使得在低温环境中，材料内部产生的噪声极少，为微弱电流检测提供了一个相对纯净的信号环境。而对材料进行纯化处理，就像是对材料进行一场“深度净化手术”。通过去除材料中的杂质和缺陷，减少了电子在材料中运动时的散射和干扰，从根源上降低了噪声的产生。这就好比净化水源，去除水中的杂质后，水流会更加清澈、稳定，纯化后的材料也能让电流信号的传输更加顺畅、稳定。

在电路设计方面，每一个细节的优化都如同精心绘制一幅精密的电路图。优化电路布局，减少电磁干扰，就像是合理规划城市交通网络，避免信号之间的“交通拥堵”。通过合理安排电路元件的位

置和布线方式,降低了不同电路模块之间的电磁耦合,减少了因电磁干扰产生的噪声^[5]。采用差分放大电路抑制共模噪声,就像是为信号处理配备了一个“智能筛选器”。它能够识别并放大差分信号(即有用的微弱电流信号),同时抑制共模信号(通常为噪声信号),从而在众多信号中精准提取出我们需要的微弱电流信号。引入滤波电路则像是安装了一道“信号过滤门”,它能够根据设定的频率范围,过滤掉特定频段的噪声信号,只允许有用的微弱电流信号通过,进一步提升了信号的纯净度和检测精度。

从系统层面来看,加强电磁屏蔽与稳定工作环境是保障量子传感器性能的关键措施。利用金属屏蔽罩加强电磁屏蔽,就像是为量子传感器建造了一座坚固的“电磁堡垒”。金属屏蔽罩能够有效阻挡外界电磁场的干扰,如同城墙抵御外敌入侵一样,将外界杂乱的电磁信号拒之门外,为传感器内部的微弱电流检测营造一个安静、稳定的电磁环境^[6]。稳定工作环境,严格控制温度、湿度等因素,就像是为传感器打造了一个专属的“舒适房间”。在这个房间里,温度、湿度等环境参数始终保持在最佳状态,避免了因环境变化引起的噪声波动。通过对环境的精确控制,减少了环境噪声对量子传感器的影响,确保传感器能够持续、稳定地工作,为微弱电流检测提供可靠的保障。

4 效果评估验证

噪声功率谱密度作为评估噪声抑制效果的核心指标,其测量过程就像是为噪声绘制一幅“频谱画像”。通过测量不同频率下的噪声功率谱密度,我们能够全面了解噪声在各个频段的分布情况。在噪声抑制前,噪声功率谱密度曲线可能如同起伏不定的山脉,在各个频段都存在较高的噪声强度。而在采取噪声抑制措施后,通过对比曲线的变化,我们可以直观地看到哪些频段的噪声得到了有效抑制,哪些频段还存在改进空间。

检测精度是衡量噪声抑制技术有效性的重要尺度,它直接反映了量子传感器在实际应用中的性能提升。在噪声抑制前,由于噪声的干扰,量子传感器对微弱电流的检测可能存在较大误差,测量结果如同蒙上了一层迷雾,难以反映真实的电流情况。而在实施噪声抑制技术后,通过对比噪声抑制前后对

微弱电流的检测精度,我们可以清晰地看到测量误差的减小和测量结果准确性的提升^[7]。这就好比使用精度更高的测量工具,能够更准确地测量物体的尺寸,噪声抑制技术的应用让量子传感器能够更精准地捕捉微弱电流信号,为科学研究和实际应用提供可靠的数据支持。

稳定性测试则是对噪声抑制技术长期效果的全面考验,它如同一场“耐力赛”,检验着量子传感器在长时间工作状态下的性能表现。通过长时间监测量子传感器的检测信号,我们可以观察到传感器是否能够在长时间内保持稳定的检测性能。在测试过程中,如果噪声抑制技术有效,传感器的检测信号应该保持相对稳定,波动较小^[8]。反之,如果存在问题,检测信号可能会出现较大幅度的波动,甚至出现异常。稳定性测试不仅能够评估噪声抑制技术对传感器稳定性的提升作用,还能够发现潜在的问题和隐患,为进一步优化噪声抑制技术提供重要参考,确保噪声抑制效果的可靠性和持久性。

5 结语

量子传感器在微弱电流检测中的噪声抑制,通过剖析噪声根源、探索抑制技术、实施综合优化及科学评估验证,取得显著成效。未来,随着材料科学、量子技术等领域的发展,可进一步探索新型低噪声材料,优化量子算法提升纠错能力,结合人工智能实现智能噪声抑制。推动量子传感器在微弱电流检测中的精度持续提升,拓展其在更多前沿领域的应用边界。

参考文献

- [1] 臧奕茗,李卓潇,张少春,等.AI与量子技术在未来电网中的融合模式与应用展望[J].高电压技术,2025,51(04):1708-1726.
- [2] 胡孔友.基于量子精密测量的在用电梯曳引钢丝绳检测技术及装置研究[J].特种设备安全技术,2025,(02):35-37.
- [3] 郭源生.量子技术引领传感器技术创新与产业变革[J].新经济导刊,2025,(03):86-93.
- [4] 李山.德发明新量子传感器显微镜[J].电子质量,2025,(03):51.
- [5] 杨琦,范华林,刘畅.电梯钢丝绳的检测方法及基于量子测量技术的无损检测仪器的开发[J].中国电梯,2025,

36(03): 60-63.

环境试验,2024,42(04):103.

- [6] SpinMagIC 将量子传感器缩至手掌大小用于食品质量检测[J].传感器世界,2025,31(01):50.
- [7] 王婧,宁晓琳,杨剑之.量子传感器中的磁场线圈设计方法综述[J].飞控与探测,2024,7(06):1-8.
- [8] 世界首个原子级量子传感器问世[J].电子产品可靠性与

版权声明: ©2025 作者与开放获取期刊研究中心(OAJRC)所有。本文章按照知识共享署名许可条款发表。

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



OPEN ACCESS