

远距离类无线充电与抗老化的新型量子电池

宋婉露¹ 杨万里² 安钧鸿^{3,*}

(1 湖北大学物理学院 武汉 430062)

(2 中国科学院精密测量科学与技术创新研究院 武汉 430071)

(3 兰州大学量子理论及应用基础教育部重点实验室 兰州 730000)

2024-04-02收到

* email: anjihong@lzu.edu.cn

DOI: 10.7693/wl20240408

1 量子电池背景介绍

人们对能源需求的持续增长与环境问题的日益关注激发了对变革性储能装置的研究兴趣。传统电池主要基于电化学原理，在过去几十年里，小型化的电池成了推动电子产品更新换代的内在驱动，新能源汽车的快速发展也对大功率电池提出了新要求。虽然研发先进材料、优化现有设备性能可解燃眉之急，但突破固有原理、设计全新设备架构才是长久之计。人们期待通过微观系统中以纠缠为代表的量子特性与自下而上的全新原子制造工艺，形成更小尺寸、更强充电功率、更高容量和更大可提取功的新原理储能装置——量子电池^[1]。它的前瞻性研究预示了其对推动未来能源类型转变和应对能源挑战的巨大潜力^[2]。不同于传统电池的化学反应，它通过微观系统的量子能级存储能量，是一种绿色、安全、无污染的可持续储能装置，有望成为替代当今广泛使用的电池的新一代储能器件。

作为热力学器件，量子电池是以“调控量子态，实现新功能，发展新技术”为主旨的量子科技的主要应用之一。量子热力学为新的产业革命提供原始创新驱动力，是量子科技的重要组成部分。建立在经典热力学基础上的蒸汽机的发明催生了第一次产业革命，基于此的热机架构和效率仍然支配着当今的能源使用格局。进入21世纪，量子调控技术的发展迫使人们将热力学扩展到量子领域，催生了量子热力学。其基础意义在于从量子力学角度重塑热力学，并利用量子物理基本概念审视热力学的先验假定；它的现实意义在于

其发展的器件有望获益于量子效应而超越经典热力学所设置的热机性能极限，从本质上突破当今的能源使用效率。研究发现，利用量子相干性，量子热机可从单一热源提取功，从而超越了热力学第二定律的限制；利用量子压缩或纠缠，量子热机可超越经典卡诺效率；利用量子纠缠，量子电池可超越经典电池，获得更快充电、更高电容和更大可提取功^[3]。

2 量子电池的充电过程

量子电池包括充电、存储和放电三个过程。充电过程既可由经典场给量子电池提供能量来实现，也可由另一量子系统作为充电器，与量子电池相干耦合进行能量转移来实现^[4, 5]。充电功率指单位时间内充入的能量，是衡量量子电池性能的重要指标。研究发现，由 N 个二能级原子构成的量子电池，得益于量子纠缠，其充电功率与 N 的标度关系为 $P \propto N^{3/2}$ ，而现行电池功率与电池芯片个数仅呈线性关系，说明量子电池充电功率是现行电池的 \sqrt{N} 倍^[3]。另一个重要性能指标是寿命，即量子电池中的能量可维持的最长时间。然而，量子系统自身所面临的脆弱性使得量子电池的实现面临两大挑战。一方面，量子电池会不可避免地与环境耦合，从而引起量子相干性丢失，即退相干，它导致量子电池的自发放电，即量子电池的老化。文献[4]中利用光学微腔对由半导体有机分子形成的量子电池进行快速充电，但是退相干使得其能量不能长时间存储。另一方面，在充电过程中，微观系统间的耦合强度会随距离增大而快速衰减，这使得量子电池与充电器之间

的距离要非常小，才可有效转移能量；同时这种诉诸于量子电池—充电器相干耦合的充电方式也不可避免地受到退相干影响而失效。总之，退相干是实现量子电池的主要障碍。因此，寻求更鲁棒的可集成量子物态、更稳定的量子调控手段和更抗退相干的新原理器件方案，为量子电池所需的架构提供支持是本领域的关键科学问题。

3 新型量子电池充电方案

为了解决噪声中等规模量子时代(noisy intermediate-scale quantum era)退相干造成的问题，人们提出了量子互联方案，期待通过将局域量子系统互联而形成更鲁棒的可集成量子物态和更抗退相干的新原理器件^[6]。近年来迅猛发展的波导量子电动力学为量子互联提供了理想平台^[7, 8]。受此启发，我们提出了一种基于一维波导共同环境诱导的远距离充电和退相干抑制的新型量子电池方案^[9]，如图1所示，两个二能级系统分别作为充电器和量子电池，被放置在一个矩形金属波导中。充电器与量子电池的间距远大于其偶极—偶极相互作用的距离，因此二者无法实现直接的能量转移。波导中的电磁场作为充电器和量子电池的共同环境，与二者耦合形成复合系统。如图2所示，复合系统的能谱显示，连续能带外会形成不同个数的孤立能级，称作束缚态，其对充电带来截然不同的结果：当无束缚态时，量子电池的能量快速耗散到环境中，从而发生老化；当形成一个束缚态时，量子电池的能量会趋于有限值，此时虽然实现了能量转移，但并未完全达到持续充电；当形成两个束缚态时，量子电池能量持续振荡，且最大储能不会发生自发损耗，从而实现了抗老化的理想充电。

在传统量子电池方案中，仅当充电器与量子电池的距离足够近且无退相干时，才可通过直接耦合实现持续的无损充电。而在实际情况下，充电器与量子电池之间的耦合强度会随着距离的增大而快速衰减，退相干也破坏直接耦合，迫使理想的充电根本无法实现。我们利用波导管中的电

磁场这一共同环境诱导的退相干，实现了充电器与电池间免受老化影响的持续能量交换，在退相干条件下达到了理想充电的目标，在理论上实现了量子电池非接触式远距离“类无线”充电，也证实了退相干在建立电池—充电器间相干互联中的建设性作用，有效地解决了量子电池的能量耗散问题和距离限制问题，对于进一步推动量子电池的物理实现具有重要理论指导意义。

该工作是本团队继2020年利用Floquet工程激活老化的量子电池^[10]与2021年利用波导管制备作为量子精密测量重要资源的自旋压缩后的又一重要结果，受到国际科学媒体的普遍关注^[11-14]。*Nature*杂志将其作为“研究亮点”进行了报道^[11]。

4 未来展望

量子电池通过将电磁波能量转化为原子的内部激发态能量来实现储能，因此可以预见，它一旦实现，因纠缠赋予其的超大充电功率将可以极



图1 量子电池方案示意图：在矩形中空金属波导管中放置两个无直接耦合的二能级系统，分别作为充电器和量子电池

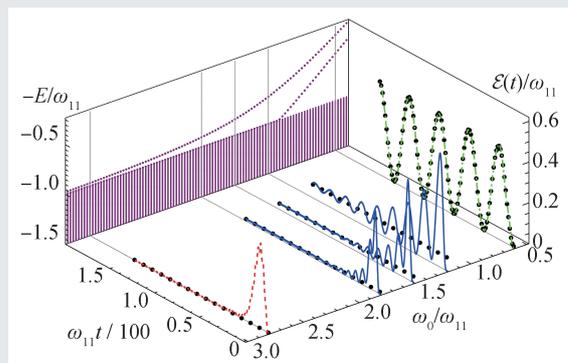


图2 量子电池不同频率 ω_0 下复合系统的能谱 E (紫色点线)与量子电池能量 $\mathcal{E}(t)$ 随时间的演化图。其中，绿色点虚线、蓝色实线、红色虚线分别对应两个、一个和零个束缚态时的量子电池充电能量演化， ω_{11} 为波导管截止频率。绿色点虚线对应两个束缚态时的理想充电结果



CIOE
中国光博会

光学全产业链 展示及交流平台

精密光学展 & 摄像头技术及应用展
PRECISION OPTICS EXPO & CAMERA EXPO

2024年9月11-13日
深圳国际会展中心(宝安新馆)

第25届中国国际光电博览会
240,000M² 展出面积 | 120,000+ 专业观众 | 3,700+ 参展企业

同期展会

- 信息通信展
- 激光技术及智能制造展
- 红外技术及应用展
- 智能传感展
- 光电子创新展
- 新型显示技术展


展会小程序

大地提升光伏中的光电转换效率。另一方面，量子电池将能量存储在原子这一物质世界最小的组成单元中，因此其存储的能量密度比现行电池将有潜在的颠覆性的提高，该特征亦有望对光伏的存储容量带来变革性提升。另一方面，量子电池的发展趋势也符合当今电子产品对储供能设备小型化与长续航的要求。量子电池的超大充电功率和储能密度也将对这些电子产品的储供能设备带来新的契机。

但是，量子电池仍然处于基础理论研究阶段，除了退相干，另一个需要克服的挑战是集成性。下一步，我们将继续研究量子电池方案的集成性，探索多原子纠缠对远距离无线充电与抗老化量子电池性能的建设性作用，为现实条件下实现量子电池所需的架构提供理论基础。

致谢 感谢论文[9]的作者刘海滨副教授和周斌教授对研究工作的贡献。

参考文献

- [1] Campaioli F, Gherardini S, Quach J Q *et al.* Colloquium: Quantum Batteries. 2023, arXiv:2308.02277
- [2] Campaioli F, Pollock F A, Binder F C *et al.* Phys. Rev. Lett., 2017, 118:150601
- [3] Ferraro D, Campisi M, Andolina G M *et al.* Phys. Rev. Lett., 2018, 120:117702
- [4] Quach J Q, McGhee K E, Ganzer L *et al.* Sci. Adv., 2022, 8:eabk3160
- [5] Zhu G, Chen Y, Hasegawa Y *et al.* Phys. Rev. Lett., 2023, 131:240401
- [6] Awschalom D *et al.* PRX Quantum, 2021, 2:017002
- [7] Sheremet A S, Petrov M I, Iorsh I V *et al.* Rev. Mod. Phys., 2023, 95:015002
- [8] Bai S Y, An J H. Phys. Rev. Lett., 2021, 127:083602
- [9] Song W L, Liu H B, Zhou B *et al.* Phys. Rev. Lett., 2024, 132:090401
- [10] Bai S Y, An J H. Phys. Rev. A, 2020, 102:060201(R)
- [11] A Better Way to Charge a Quantum Battery. Nature, 2024, 627:247
- [12] Gururaj T. Scientists Propose New Scheme for the Quantum Battery Using Waveguides. www.phys.org
- [13] Padavic-Callaghan K. Quantum Batteries That Charge Wirelessly Might Never Lose Efficiency. www.newscientist.com
- [14] Padavic-Callaghan K. New Scientist, 2023, 3456:17