Modern Physics 现代物理, 2026, 16(6), 282-288
Published Online November 2026 in Hans. https://www.hanspub.org/journal/mp
https://doi.org/10.12677/mp.2026.166029

Hans汉斯

量子纠缠与量子信息技术

——从Bell非定域性到量子通信的物理基础

陆俊涵

贵州大学大数据与信息工程学院，贵州 贵阳

收稿日期：2026年10月12日；录用日期：2026年11月5日；发布日期：2026年11月11日

摘　要

量子纠缠是现代物理中最具代表性的非经典现象之一，也是量子信息科学的核心物理资源。本文从复合量子系统的张量积结构出发，结合Bell态、Schmidt分解与约化密度矩阵，说明纠缠态不可分离性的数学特征；进一步回顾EPR论证、CHSH型Bell不等式及无漏洞Bell检验，阐释量子非定域关联与局域实在论之间的根本差异。在此基础上，本文分析纠缠在量子密钥分发、量子隐形传态、纠缠交换、量子中继和量子计算中的作用，并从退相干、信道损耗、单光子探测、量子存储、接口耦合及系统误差预算等方面讨论工程化瓶颈。分析表明，量子纠缠的科学意义已由“验证非经典关联”扩展为“操控非经典关联”，其发展正推动量子信息技术由单器件和点到点实验向集成化、多节点和系统级应用演进。

关键词

量子纠缠，Bell不等式，量子非定域性，量子通信，量子隐形传态，量子信息

Quantum Entanglement and Quantum Information Technology

—From Bell Nonlocality to the Physical Basis of Quantum Communication

Junhan Lu

College of Big Data and Information Engineering, Guizhou University, Guiyang Guizhou

Received: October 12, 2026; accepted: November 5, 2026; published: November 11, 2026

Abstract

Quantum entanglement is a paradigmatic nonclassical phenomenon and a central physical resource for quantum information science. Starting from the tensor-product structure of composite quantum

文章引用: 陆俊涵. 量子纠缠与量子信息技术[J]. 现代物理, 2026, 16(6): 282-288.
DOI: 10.12677/mp.2026.166029

systems, this paper explains the mathematical signatures of entanglement using Bell states, Schmidt decomposition, and reduced density matrices. The EPR argument, the CHSH Bell inequality, and loophole-free Bell tests are then reviewed to clarify the conflict between quantum correlations and local realism. Representative applications in quantum key distribution, quantum teleportation, entanglement swapping, quantum repeaters, and quantum computing are discussed. Major engineering limitations, including decoherence, channel loss, single-photon detection, quantum memory, interface coupling, and system-level error budgeting, are summarized. The analysis shows that the scientific significance of quantum entanglement has expanded from verifying nonclassical correlations to manipulating them, and that its development is driving quantum information technology from single-device and point-to-point experiments toward integrated, multi-node, and system-level applications.

Keywords

Quantum Entanglement, Bell Inequality, Quantum Nonlocality, Quantum Communication, Quantum Teleportation, Quantum Information

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.
This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).
http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/
Open Access

1. 引言

20 世纪初建立的量子力学改变了人们对“物理状态”和“测量结果”的理解。经典物理通常假定系统在测量前已经具有确定属性，而量子系统可以处于多个本征态的线性叠加，并在测量时以概率方式给出结果。对于两个或多个量子系统，更深刻的非经典特征来自其联合态：如果整体状态不能写成各子系统状态的直积，就会产生量子纠缠。此时，系统的完整信息并不分别储存在各个粒子中，而是编码在联合态的相关结构中。

1935 年，Einstein、Podolsky 和 Rosen 提出 EPR 论证，质疑量子力学是否给出了对物理实在的完备描述[1]。1964 年，Bell 将这一争论转化为可实验检验的问题：任何满足局域实在论的隐变量模型都必须服从特定统计约束，而量子力学允许这些约束被违反[2]。随后，CHSH 形式的不等式使实验检验更加可行[3]，Aspect 等的光子实验以及近年来的无漏洞 Bell 检验持续支持量子力学的预言[4]-[7]。

量子纠缠因此具有双重意义：在基础物理层面，它揭示了自然界关联结构与经典局域图景之间的差异；在信息科学层面，它又能被制备、传输、交换、存储和消耗，从而成为量子通信、量子计算与量子网络的重要资源。本文按照“理论基础–实验检验–信息应用–工程实现”的逻辑，对这一现代物理主题进行综述。

2. 量子纠缠的理论基础

2.1. 复合系统、直积态与 Bell 态

单量子比特在基态$|0\rangle$和$|1\rangle$下的一般纯态可写为$|\psi\rangle = \alpha|0\rangle + \beta|1\rangle$，其中$|\alpha|^2 + |\beta|^2 = 1$。对于两个量子比特 A 和 B，联合态属于张量积空间 $H_A \otimes H_B$。若联合态能够写成$|\psi_A\rangle \otimes |\psi_B\rangle$，则称为可分离态；如果不能分解为这种直积形式，则为纠缠态。典型的两比特最大纠缠态为 Bell 态：

$$|\Phi^+\rangle = \left(|00\rangle + |11\rangle\right)/\sqrt{2} \tag{1}$$

在$|\Phi^+\rangle$中，任一单独量子比特的测量结果都是随机的，但在同一计算基下比较两个量子比特的结果时，

它们始终保持严格相关。这种“局域随机、整体相关”的特征说明纠缠不是简单的经典共同原因，而是联合量子态本身的不可分离结构。

2.2. Schmidt 分解与纠缠度量

对于任意双体纯态，都可以进行 Schmidt 分解。若 Schmidt 系数仅有一个非零值，状态就是直积态；若存在两个及以上非零系数，则系统处于纠缠状态。其一般形式可表示为：

$$|\psi\rangle = \sum_k \sqrt{\lambda_k}\,|u_k\rangle_a |v_k\rangle_\beta,\ \sum_k \lambda_k = 1 \tag{2}$$

通过对整体密度矩阵 $\rho = |\psi\rangle\langle\psi|$对其中一个子系统取偏迹，可以得到约化密度矩阵 ρ_A。对于双体纯态，约化态的 von Neumann 熵可作为纠缠熵：

$$S(\rho_A) = -Tr(\rho_A \log_2 \rho_A) \tag{3}$$

Bell 态的任一单比特约化态均为 I/2，因此纠缠熵为 1 bit。这个结果直观地说明：虽然整体 Bell 态是确定的纯态，但任何单个子系统都呈现最大混合性。纠缠信息存在于整体相关关系中，而不是独立属于某个局域粒子[8]。

2.3. EPR 论证、局域性与不可超光速通信

EPR 论证强调，如果对粒子 A 的测量能够在不物理扰动远处粒子 B 的情况下预测 B 的某个物理量，那么该物理量似乎应当在测量前已经具有确定值[1]。在局域性假设下，这自然引出了“是否存在隐藏变量”的问题。Bell 的工作表明，局域隐变量理论并不能复现量子力学对全部测量统计的预言。需要指出的是，Bell 非定域性并不等价于可控的超光速信息传输。单方局域测量的结果依然随机，只有通信双方利用经典信道比较数据后，才能确认纠缠关联，因此量子纠缠不违反相对论的因果结构。

3. Bell 不等式与实验检验

3.1. CHSH 不等式与 Tsirelson 界

CHSH 方案考虑相距较远的 Alice 和 Bob，双方分别可以选择两种测量设置 A、A'和 B、B'，测量结果取±1。定义相关函数 $E(A, B)$后，可以构造 CHSH 参数 S：

$$S = E(A,B) + E(A,B') + E(A',B) - E(A',B') \tag{4}$$

若测量结果由局域隐变量预先决定，则必有$|S| \le 2$；而对合适的纠缠态与测量方向，量子力学给出的最大值为 $2\sqrt{2}$，即 Tsirelson 界[2] [3]。因此，在满足空间分离、随机设置选择和高探测效率等条件下观察到$|S| > 2$，就意味着局域隐变量模型无法同时解释全部实验统计。

3.2. 从早期光子实验到无漏洞检验

Aspect 等在 20 世纪 80 年代利用纠缠光子和快速变化的偏振分析器完成了代表性的 Bell 不等式实验[4]。早期实验仍可能受到探测效率不足、测量设置与隐藏变量相关、事件选择方式等问题影响。2015 年，多组研究分别采用远距离电子自旋和高效率纠缠光子系统，在同一实验中显著关闭局域性和探测等主要漏洞[5]-[7]。这些实验的意义不在于证明存在“可控的瞬时作用”，而在于排除了大类局域实在论解释，使 Bell 非定域性成为现代量子物理中可重复检验的实验事实。

4. 量子纠缠的信息应用

4.1. 量子密钥分发

量子密钥分发(Quantum Key Distribution, QKD)利用量子测量扰动和不可克隆定理，使通信双方能够

发现窃听行为。BB84 协议本身并不要求预共享纠缠，而是利用非正交量子态编码信息[9]。E91 协议则直接使用纠缠粒子的 Bell 关联建立密钥，并将 Bell 检验与安全性验证联系起来[10]。因此，纠缠在不同 QKD 方案中的角色并不完全相同：它既可以是直接的信息资源，也可以是验证信道可信性的物理工具。

4.2. 量子隐形传态

量子隐形传态不是将物质本身“瞬间搬运”，而是借助预共享纠缠和两比特经典信息，把未知量子态从发送端转移到接收端[11]。设待传输态为$|\chi\rangle$，Alice 与 Bob 共享一对 Bell 态。Alice 对$|\chi\rangle$与自己持有的纠缠粒子实施 Bell 基测量，并把两比特经典测量结果发送给 Bob；Bob 根据结果进行相应的 Pauli 变换，即可恢复原始量子态。由于最后一步依赖经典通信，所以完成隐形传态所需时间仍受光速限制。

4.3. 纠缠交换、量子中继与量子网络

远距离量子网络不能像经典网络那样直接对未知量子态进行复制和放大。量子中继器因此采用“分段建立纠缠–纠缠交换–必要时进行纯化与存储”的思路，将多个短距离高保真链路连接为更长距离的量子链路[12]。纠缠交换的关键特点是：两个此前从未直接相互作用的远端粒子，可以通过中间节点的联合测量建立纠缠。这一机制是未来多节点量子网络和分布式量子计算的重要物理基础。

4.4. 量子计算中的纠缠资源

量子计算利用叠加与纠缠构造高维联合态空间。纠缠并不是所有量子算法获得优势的唯一条件，但在多比特量子态制备、量子纠错、量子模拟以及分布式量子计算中具有基础作用。随着量子比特数量增加，仅关注“量子比特数”并不足以评价系统性能，还需要同时考察双比特门保真度、读出误差、串扰、相干时间以及逻辑量子比特开销[13] [14]。

4.5. 典型量子信息任务比较

不同任务对纠缠的依赖方式、实验目标和主要误差来源并不相同，表 1 对其进行归纳。

Table 1. Comparison of representative quantum information tasks
表 1. 典型量子信息任务比较

任务	核心物理资源	主要目标	主要限制因素
BB84 量子密钥分发	非正交量子态、测量扰动	建立共享安全密钥	信道损耗、探测器噪声、有限码长
E91 量子密钥分发	纠缠与 Bell 关联	建立密钥并检验非经典关联	纠缠源质量、探测效率、信道不对称
量子隐形传态	共享纠缠 + Bell 测量 + 经典通信	转移未知量子态	纠缠保真度、Bell 测量效率、前馈延迟
量子中继/网络	纠缠交换、纯化与量子存储	扩展纠缠分发距离	光纤损耗、存储寿命、接口效率
量子计算	多比特叠加、纠缠与量子门	实现可控联合量子演化	退相干、门误差、串扰、纠错开销

5. 工程实现中的关键问题

5.1. 退相干、噪声与保真度

实际量子系统不可避免地与环境发生耦合。热涨落、材料缺陷、电磁噪声、激光相位噪声以及光子散射等因素都会破坏相干叠加，使量子态逐渐退相干。对于量子计算，退相干会限制可执行量子门的深度；对于量子通信，则表现为纠缠可见度和保真度下降。因此，器件层面的相干保护、系统层面的稳定

控制，以及算法层面的误差缓解和量子纠错必须协同设计。

5.2. 信道损耗与远距离纠缠分发

光子适合作为飞行量子比特，但光纤衰减与自由空间链路损耗会使成功探测概率随距离快速下降。经典中继可以直接对信号进行检测、再生和放大，而未知量子态受不可克隆定理限制，不能采用同样方法。量子中继器需要借助量子存储器暂存成功建立的短链路纠缠，再通过纠缠交换扩展距离。另一方面，卫星自由空间链路能够显著降低跨洲尺度的总传播损耗，已被用于远距离纠缠分发和洲际量子通信实验[15] [16]。

5.3. 光源、探测器和量子存储

高质量量子网络要求光源、信道、探测器和存储器之间形成完整的性能闭环。纠缠光源需要兼顾亮度、纯度、不可区分性与稳定性；单光子探测器需要较高探测效率、较低暗计数和较小时间抖动；量子存储器则需要在存储寿命、读写效率、带宽和保真度之间取得平衡。任何一个环节的性能短板都会通过级联系统放大，最终降低端到端纠缠生成率。

5.4. 系统集成与误差预算

量子信息系统从实验平台走向工程应用，还面临光机稳定、低温环境、封装耦合、时钟同步、自动标定和长期运行可靠性等问题。现代量子技术越来越依赖集成光子学、低噪声电子学、微纳制造与控制软件的共同发展。工程评价也应从单一器件指标转向系统级误差预算，例如把光源制备误差、传输损耗、探测误差、门误差和时序抖动统一纳入端到端性能分析。

进一步地，可通过简化误差预算模型描述不同环节对系统性能的耦合作用。例如，将系统有效性能指标表示为 $R_{sys} = R_0(1-\varepsilon_s)(1-\varepsilon_c)(1-\varepsilon_d)$，其中 ε_s、ε_c 和 ε_d 分别表示光源制备误差、信道传输损耗和探测过程误差。该模型说明，单一模块性能提升并不一定直接转化为整体性能提升，系统优化需要综合考虑各环节误差贡献及其相互制约关系。

此外，系统集成过程中需综合考虑不同功能模块之间的接口匹配与协同优化，降低模块耦合误差对整体性能的影响。通过建立系统级误差传播模型，可进一步提升量子信息系统的稳定性与工程应用可靠性。

5.5. 关键工程指标的物理含义

表 2 总结了量子信息实验中常见的关键指标及其对系统性能的影响。

Table 2. Key engineering metrics of quantum information systems and their impacts
表 2. 量子信息系统关键工程指标及其影响

指标	物理含义	对系统的主要影响
纠缠保真度	实际纠缠态与目标理想态的接近程度	决定隐形传态、交换和网络任务的可用性
相干时间	量子相位信息在环境噪声下保持的时间尺度	限制量子门深度、存储等待时间与同步窗口
探测效率/暗计数	有效光子被探测的概率与 无光输入下的误触发概率	影响有效计数率、误码率 与 Bell 检验统计显著性
量子存储效率	写入并再次读出量子态的总成功概率	直接影响量子中继的等待时间和端到端纠缠率
双比特门保真度	多比特受控操作与理想幺正变换的一致程度	决定纠缠制备质量和容错纠错资源开销

6. 发展趋势与现代物理意义

6.1. 从“验证纠缠”到“管理纠缠”

早期纠缠研究的核心问题是“量子力学的关联是否真实存在”，而当前研究越来越关注如何稳定地产生、表征、分发、存储和调用纠缠。也就是说，研究目标正在从证明某种量子效应转向管理一种量子资源。对量子网络而言，真正关键的不仅是某一瞬间能否获得高保真 Bell 对，还包括其生成速率、缓存能力、路由策略和长期运行稳定性。

6.2. 集成化与异构量子接口

不同量子平台各有优势：光子适合远距离传输，固态自旋和原子体系适合存储与局域操作，超导量子比特具有快速门操作能力。未来量子系统很可能呈现异构架构，不同平台通过频率转换、光电接口或芯片级集成进行连接。如何在转换过程中保持量子相干性和纠缠保真度，将成为连接“量子处理器–量子存储–量子信道”的关键问题。

6.3. 从物理指标走向系统指标

未来量子技术的工程评价将更加综合。除相干时间、纠缠保真度、探测效率和量子门误差外，还需要考察系统功耗、尺寸、成本、自动化程度、可维护性和连续运行时间。对于真正可扩展的量子设备，“最好的一项器件参数”往往不如“所有环节在同一误差预算下稳定协同”重要。这种由单器件最优转向系统最优的思路，也是现代物理技术走向工程化的典型特征。

7. 结论

量子纠缠把现代物理中最深刻的基础问题之一与新一代信息技术联系起来。EPR 论证提出了量子理论完备性和局域性的挑战，Bell 不等式则将哲学讨论转化为实验可检验的统计命题；从 Aspect 实验到无漏洞 Bell 检验，大量实验不断强化了量子力学关于非经典关联的描述。通过 Schmidt 分解、约化密度矩阵和纠缠熵可以看到，纠缠的本质是复合系统整体信息结构不可分解为局域子系统的独立描述。

在应用层面，量子密钥分发、量子隐形传态、纠缠交换、量子中继和量子计算分别以不同方式利用纠缠或相关量子资源；在工程层面，退相干、信道损耗、探测噪声、量子存储和系统集成仍决定着可扩展性。未来量子信息技术的突破不仅依赖新的物理方案，也依赖光电器件、微纳制造、低噪声电子学、自动控制和软件协议的协同进步。量子纠缠因此既是理解现代物理基本规律的重要窗口，也是推动量子信息系统由原理验证走向工程应用的核心基础。

参考文献

[1] Einstein, A., Podolsky, B. and Rosen, N. (1935) Can Quantum-Mechanical Description of Physical Reality Be Considered Complete? *Physical Review*, **47**, 777-780. https://doi.org/10.1103/physrev.47.777

[2] Bell, J.S. (1964) On the Einstein Podolsky Rosen Paradox. *Physics Physique Fizika*, **1**, 195-200. https://doi.org/10.1103/physicsphysiquefizika.1.195

[3] Clauser, J.F., Horne, M.A., Shimony, A. and Holt, R.A. (1969) Proposed Experiment to Test Local Hidden-Variable Theories. *Physical Review Letters*, **23**, 880-884. https://doi.org/10.1103/physrevlett.23.880

[4] Aspect, A., Dalibard, J. and Roger, G. (1982) Experimental Test of Bell’s Inequalities Using Time-Varying Analyzers. *Physical Review Letters*, **49**, 1804-1807. https://doi.org/10.1103/physrevlett.49.1804

[5] Hensen, B., Bernien, H., Dréau, A.E., Reiserer, A., Kalb, N., Blok, M.S., *et al.* (2015) Loophole-Free Bell Inequality Violation Using Electron Spins Separated by 1.3 Kilometres. *Nature*, **526**, 682-686. https://doi.org/10.1038/nature15759

[6] Giustina, M., Versteegh, M.A., Wengerowsky, S., Handsteiner, J., Hochrainer, A., Phelan, K., *et al.* (2015) Significant-

loophole-Free Test of Bell's Theorem with Entangled Photons. *Physical Review Letters*, **115**, Article 250401. https://doi.org/10.1103/physrevlett.115.250401

[7] Shalm, L.K., Meyer-Scott, E., Christensen, B.G., Bierhorst, P., Wayne, M.A., Stevens, M.J., *et al*. (2015) Strong Loophole-Free Test of Local Realism. *Physical Review Letters*, **115**, Article 250402. https://doi.org/10.1103/physrevlett.115.250402

[8] Horodecki, R., Horodecki, P., Horodecki, M. and Horodecki, K. (2009) Quantum Entanglement. *Reviews of Modern Physics*, **81**, 865-942. https://doi.org/10.1103/revmodphys.81.865

[9] Bennett, C.H. and Brassard, G. (2014) Quantum Cryptography: Public Key Distribution and Coin Tossing. *Theoretical Computer Science*, **560**, 7-11. https://doi.org/10.1016/j.tcs.2014.05.025

[10] Ekert, A.K. (1991) Quantum Cryptography Based on Bell's Theorem. *Physical Review Letters*, **67**, 661-663. https://doi.org/10.1103/physrevlett.67.661

[11] Bennett, C.H., Brassard, G., Crépeau, C., Jozsa, R., Peres, A. and Wootters, W.K. (1993) Teleporting an Unknown Quantum State via Dual Classical and Einstein-Podolsky-Rosen Channels. *Physical Review Letters*, **70**, 1895-1899. https://doi.org/10.1103/physrevlett.70.1895

[12] Briegel, H., Dür, W., Cirac, J.I. and Zoller, P. (1998) Quantum Repeaters: The Role of Imperfect Local Operations in Quantum Communication. *Physical Review Letters*, **81**, 5932-5935. https://doi.org/10.1103/physrevlett.81.5932

[13] Nielsen, M.A. and Chuang, I.L. (2010) Quantum Computation and Quantum Information. 10th Anniversary Edition, Cambridge University Press.

[14] Preskill, J. (2018) Quantum Computing in the NISQ Era and Beyond. *Quantum*, **2**, Article 79. https://doi.org/10.22331/q-2018-08-06-79

[15] Yin, J., Cao, Y., Li, Y., Liao, S., Zhang, L., Ren, J., *et al*. (2017) Satellite-Based Entanglement Distribution over 1200 Kilometers. *Science*, **356**, 1140-1144. https://doi.org/10.1126/science.aan3211

[16] Liao, S., Cai, W., Handsteiner, J., Liu, B., Yin, J., Zhang, L., *et al*. (2018) Satellite-Relayed Intercontinental Quantum Network. *Physical Review Letters*, **120**, Article 030501. https://doi.org/10.1103/physrevlett.120.030501