

## 激光与光电子学进展

## 基于量子纠缠的远程态制备研究进展

苏晓龙<sup>1,2,3\*</sup>, 韩冬梅<sup>1,2,3\*\*</sup>, 王娜<sup>1,2,3</sup>, 王美红<sup>1,2,3</sup><sup>1</sup>山西大学量子光学与光量子器件国家重点实验室, 山西 太原 030006;<sup>2</sup>山西大学光电研究所, 山西 太原 030006;<sup>3</sup>极端光学协同创新中心, 山西 太原 030006

**摘要** 基于远程分发的量子纠缠, 远程态制备能够实现量子态的远程制备和操控, 是实现量子态传输的一种重要方式。近年来, 远程态制备取得了重要研究进展, 相继实现了单量子比特、连续变量量子比特、压缩态、非高斯态和光学猫态的远程制备。本文简要介绍远程态制备的基本原理、离散变量和连续变量远程态制备的研究进展及其发展趋势。

**关键词** 远程态制备; 纠缠态; 连续变量; 离散变量

中图分类号 O436

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP232395

## Advances in Entanglement-Based Remote State Preparation

Su Xiaolong<sup>1,2,3\*</sup>, Han Dongmei<sup>1,2,3\*\*</sup>, Wang Na<sup>1,2,3</sup>, Wang Meihong<sup>1,2,3</sup><sup>1</sup>State Key Laboratory of Quantum Optics and Quantum Optics Devices, Shanxi University, Taiyuan 030006, Shanxi, China;<sup>2</sup>Institute of Opto-Electronics, Shanxi University, Taiyuan 030006, Shanxi, China;<sup>3</sup>Collaborative Innovation Center of Extreme Optics, Shanxi University, Taiyuan 030006, Shanxi, China

**Abstract** Remote state preparation stands as a crucial protocol for transmitting quantum states, facilitating the remote preparation and manipulation of quantum states through distributed quantum entanglement. In recent times, notable progress has been achieved in remote state preparation, encompassing the remote preparation of single qubits, continuous-variable qubits, squeezed states, non-Gaussian states, and optical cat states. This paper provides a concise overview of the principles behind remote state preparation, highlighting the research advancements and developmental trends in both discrete and continuous variable systems.

**Key words** remote state preparation; entangled state; continuous variable system; discrete variable system

## 1 引言

为了降低分布式量子信息处理中经典信息消耗量, Lo<sup>[1]</sup>于 2000 年提出了一种量子态传输协议——远程态制备(RSP)。在远程态制备中, 基于共享的量子纠缠, Alice 通过对其拥有的量子比特进行测量, 在 Bob 端制备出一个 Alice 已知的量子态。作为一种量子态传输方式: 远程态制备与量子隐形传态(quantum teleportation)相比<sup>[2]</sup>, 具有消耗更少的经典比特、不需要贝尔测量等优点<sup>[3]</sup>; 与量子态的直接传输相比, 具有更高的安全性<sup>[4]</sup>。研究表明, 远程态制备对理解一些特定的量子计算和量子通信方案的底层逻辑具有很大

帮助<sup>[5-7]</sup>。例如, 远程制备压缩态可以解释为什么基于纠缠态和 homodyne 测量的量子密钥分发可以等同于基于压缩态的量子密钥分发<sup>[7]</sup>。因此, 研究远程态制备对于实现远程量子计算和量子通信具有重要意义。

基于量子失谐(quantum discord)<sup>[8]</sup>、量子纠缠(quantum entanglement)<sup>[9]</sup>和量子导引(quantum steering)<sup>[10]</sup>能够实现不同量子态的远程态制备。在离散变量系统中, 基于参量下转换产生纠缠光子对, 通过对纠缠光子对中一个光子进行探测, 另一个光子可以制备到任意的单量子比特<sup>[11-17]</sup>。通过增加纠缠光子数目, 能够实现多量子比特的多地同时远程制备<sup>[18-19]</sup>。通过结合轨道角动量等自由度, 能够实现混合量子比特的产

收稿日期: 2023-10-30; 修回日期: 2023-11-29; 录用日期: 2023-12-01; 网络首发日期: 2023-12-11

基金项目: 国家自然科学基金(11834010)、山西省基础研究计划(20210302121002)、山西省“1331工程”重点学科建设经费

通信作者: \*suxl@sxu.edu.cn; \*\*dongmeihan519@sina.com

生<sup>[20-24]</sup>。在连续变量系统中,基于非高斯纠缠态可以实现任意单量子比特<sup>[25]</sup>、连续变量量子比特<sup>[26]</sup>和压缩猫态<sup>[27-30]</sup>等量子态的远程制备。基于高斯纠缠态的远程态制备也被广泛研究<sup>[31-32]</sup>。目前,已经实现了亚泊松分布的量子态<sup>[33]</sup>、压缩态<sup>[34]</sup>、具有 Wigner 负值的非高斯态<sup>[35]</sup>和光学猫态<sup>[36]</sup>的远程制备。目前,远程态制备朝着远程制备多量子比特、多自由度量子态等方向发展。

鉴于远程态制备在量子信息处理中的重要意义,本文对远程态制备的实验工作进行了简要分析和总结。首先简要描述远程态制备的基本原理。随后,介绍离散变量和连续变量远程态制备相关进展。最后,总结并展望远程态制备目前面临的一些研究挑战和发展趋势。

## 2 远程态制备原理

基于双模纠缠态的远程态制备的原理如图 1(a) 所示。纠缠态的两个模式分别分发给位于不同站点的 Alice 和 Bob, Alice 对其拥有的模式进行探测,然后将探测结果经过经典信道传输给 Bob。Bob 根据 Alice 的测量结果可以制备出的一个 Alice 已知的量子态。与之相比,量子隐形传态能够实现一个任意未知量子态的远程传输,其原理如图 1(b) 所示。纠缠态的模式 A 和所要传输的未知量子态进行耦合,然后进行贝尔态

探测,探测结果通过经典信道反馈到纠缠态的另一个模式 B。Bob 根据经典信道的信息对模式 B 执行么正变换,即可实现对未知输入态的传输。对比远程态制备和量子隐形传态,可以看出,前者不需要贝尔态测量、所需经典信息较少<sup>[3]</sup>。

远程制备特定的量子态,既要对所用的纠缠态进行选择,也要对 Alice 的模式进行特定的测量。根据所采用的量子变量的不同,光量子信息处理可以分为离散变量和连续变量两种方式。离散变量量子信息处理采用有限维希尔伯特空间的量子变量完成量子信息处理<sup>[37]</sup>,如光子的偏振、自旋和路径等;连续变量量子信息处理采用无限维希尔伯特空间的量子变量完成量子信息处理<sup>[37]</sup>,如光场正交分量、机械振子的位置和动量、原子系综的集体自旋变量等。这两种方式各有优缺点:离散变量光量子信息处理在产生纠缠时具有高保真度的优势,但是纠缠的产生是概率性的;连续变量光量子信息处理可以确定性地产生纠缠,但保真度有限。离散变量量子比特和连续变量量子态在不同的量子信息处理任务中有着各自的优势,选择特定的方式在不同系统中实现不同量子态的远程制备,为基于量子态的远程量子信息处理提供了基础。

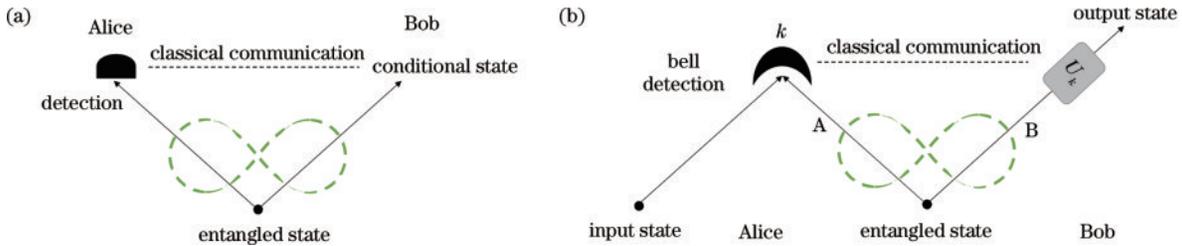


图 1 量子态传输方案。(a) 远程态制备示意图;(b) 量子隐形传态示意图

Fig. 1 Protocols for quantum state transmission. (a) Schematic of remote state preparation; (b) schematic of quantum teleportation

## 3 远程态制备

### 3.1 离散变量远程态制备

远程态制备首次在离散变量系统中被提出<sup>[1]</sup>。2004 年, Jeffrey 等<sup>[11]</sup>首次实现了不同纯度的偏振比特的制备。该工作基于参量下转换产生的偏振纠缠光源:

$$|\phi\rangle = (|D_t D_{rp}\rangle + |A_t A_{rp}\rangle) / \sqrt{2}, \quad (1)$$

式中:  $|D\rangle = (|H\rangle + |V\rangle) / \sqrt{2}$ ;  $|A\rangle = (|H\rangle - |V\rangle) / \sqrt{2}$ ; 下标 t 是触发光子模式, 下标 rp 指的是远程制备的光子模式。通过将触发光子投影到不同纯度的偏振态, 远程制备的量子态可以表示为

$$\rho_{rp}(T_D, T_A) = N \left( T_D |D_{rp}\rangle \langle D_{rp}| + T_A |A_{rp}\rangle \langle A_{rp}| \right) / 2. \quad (2)$$

他们通过部分偏振器件 (partial polarizer) 对触发光子偏振强度  $T_D$  和  $T_A$  进行控制, 实现不同纯度的偏振比特的远程制备。随后, 该团队<sup>[12]</sup>实现了任意单量子比特的制备, 即可以制备出 Bloch 球面上的任意

一个单量子比特, 如图 2(a) 所示。该工作可产生不同偏振角度的纠缠光子对, 如  $(|HH\rangle + |VV\rangle) / \sqrt{2}$ 、 $(|DD\rangle + |AA\rangle) / \sqrt{2}$  等, 同样通过控制触发光子的偏振, 远程制备了 Bloch 球面上的单量子比特 (纯态) 以及 Bloch 球内部单量子比特 (混态), 实现了单量子比特更灵活的远程操控。

为了提高远程态制备的效率, Liu 等<sup>[15]</sup>通过局域操作, 实现了更为高效的任意单量子比特的制备。首先产生偏振光子对  $(|H^A V^B\rangle + |V^A H^B\rangle) / \sqrt{2}$ , 通过在触发模式 A 中增加两个偏振分束棱镜, 整体模式变为  $\left\{ |H_2^A\rangle [\alpha |H^B\rangle + \beta \exp(i\phi) |V^B\rangle] - |V_2^A\rangle \sigma_z [\alpha |H^B\rangle + \beta \exp(i\phi) |V^B\rangle] + |H_1^A\rangle \sigma_x [\alpha |H^B\rangle + \exp(i\phi) |V^B\rangle] - |V_1^A\rangle i\sigma_x [\alpha |H^B\rangle + \exp(i\phi) |V^B\rangle] \right\} / 2$ 。 (3)

在一定基矢下测量 A 模式, 根据测量得到的结果,

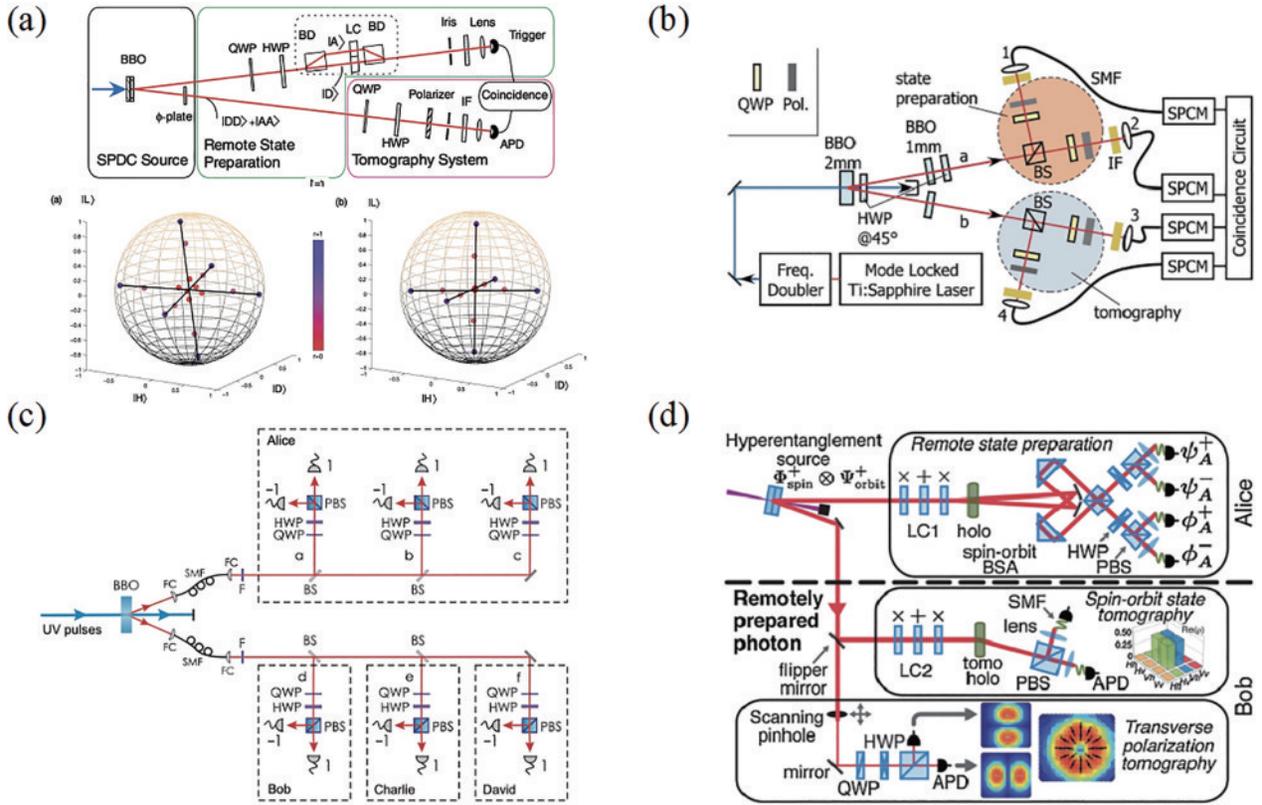


图 2 离散变量系统中的远程态制备。(a) 远程制备任意单量子比特<sup>[12]</sup>;(b) 远程制备 qutrit states<sup>[18]</sup>;(c) 远程制备多量子比特<sup>[19]</sup>;(d) 远程制备混合量子比特<sup>[22]</sup>

Fig. 2 Remote state preparation in discrete variable system. (a) Remote preparation of arbitrary single-qubit<sup>[12]</sup>;(b) remote preparation of qutrit states<sup>[18]</sup>;(c) remote preparation of qubits in multi-locations<sup>[19]</sup>;(d) remote preparation of hybrid qubit<sup>[22]</sup>

对 B 模式执行一定的单位操作  $I, \sigma_z, \sigma_x$  或  $\sigma_y$ , 可以在 B 模式中实现单量子比特  $\alpha|H^B\rangle + \beta \exp(i\phi)|V^B\rangle$  的制备。与只对 A 模式进行投影测量相比<sup>[12]</sup>, 该工作将制备效率从 50% 提升到 100%。进一步, 为了提高远程制备量子比特的维度, Mikami 等<sup>[18]</sup> 实现了任意单光子三重态的远程制备, 如图 2(b) 所示。该工作基于纠缠态  $(|0\rangle_A|0\rangle_B + |1\rangle_A|1\rangle_B + |2\rangle_A|2\rangle_B) / \sqrt{3}$ , 通过将 A 光子投影到任意态  $\alpha|0\rangle_A + \beta|1\rangle_A + \gamma|2\rangle_A$ , B 模式的光子被制备到  $\alpha^*|0\rangle_B + \beta^*|1\rangle_B + \gamma^*|2\rangle_B$ 。该工作提供了一种远程制备高维量子比特的方式, 为基于此的多光子通信提供了基础<sup>[18]</sup>。

随着远程制备单个量子比特技术的成熟, 远程制备多量子比特的方案也相继被提出。图 2(c) 中, Rådmark 等<sup>[19]</sup> 通过参量下转换过程制备了六光子叠加态, Alice 对其拥有的 3 个光子进行投影测量, Bob 拥有的 3 个光子会塌缩到相同或者不同的量子态, 实现了处于 3 个不同位置的量子态的远程制备。该方案中, 随着远程制备光子比特的增加, 所需要的多光子纠缠态的产率会逐渐降低, 多光子的符合计数会导致远程制备多光子量子态的产率降低。因此, 该方案扩展到更多光子的远程制备时面临很大挑战。

随后, 结合自旋和轨道角动量(OAM)等自由度

的远程态制备方案也被提出。Barreiro 等<sup>[22]</sup> 首先制备了自旋和空间模式的超纠缠态, 通过对其中一个模式进行自旋-轨道角动量贝尔态探测, 在另一个模式中制备出两比特混合纠缠态, 如图 2(d) 所示。该工作分别利用偏振层析技术和空间模式层析技术, 验证了所制备量子态不同自由度中的纠缠, 实现了自旋和轨道角动量混合的两比特混合纠缠态的远程制备。Erhard 等<sup>[23]</sup> 将偏振和轨道角动量两个自由度结合, 通过对混合纠缠态的一个模式进行自旋(偏振)投影, 在另一个模式中远程制备不同阶数的轨道角动量量子态。通过将 A 模式的自旋信息转移到另一个模式的轨道角动量信息中, 实现了信息在不同希尔伯特空间的编码和解码。

### 3.2 连续变量远程态制备

如果一个量子态的特征函数或 Wigner 函数是高斯分布, 则该量子态被称为高斯态, 反之则为非高斯态<sup>[38]</sup>。如果一个高斯态经过操作后仍然为高斯态, 则该量子操作被称为高斯操作。如果一个高斯态经过操作后为非高斯态, 则该量子操作被称为非高斯操作<sup>[38]</sup>。压缩光经过分束器变换后能够实现高斯纠缠态的确定性制备<sup>[39]</sup>。与之相比, 非高斯纠缠态的制备通常是概率性的。基于非高斯态和分束器操作可直接制备非高斯纠缠态<sup>[40-41]</sup>, 或者结合高斯纠缠

态和非高斯操作可实现非高斯纠缠态的制备<sup>[42]</sup>。基于连续变量高斯和非高斯纠缠态实现各种量子态的远程制备对于发展远程量子信息处理具有重要意义。

基于非高斯纠缠态和高斯纠缠态均可实现远程态制备。在基于非高斯纠缠态的远程态制备方面, Babichev 等<sup>[25]</sup>将一个单光子态和真空态在 50:50 分束器中耦合,分束器两个输出模式 A 和 B 则近似为单光子态和真空态的两比特叠加态  $\propto |0\rangle_A |1\rangle_B + |1\rangle_A |0\rangle_B$ 。随后,通过平衡零拍测量对模式 A 进行近似实现真空态的投影,预告了模式 B 中单量子比特  $\propto \alpha|0\rangle + \beta|1\rangle$  的产生。Le Jeannic 等<sup>[26]</sup>基于单光子和光学猫态的混合纠缠态<sup>[39]</sup>,通过对其中一个模式进行

投影测量,在另一个模式中远程制备了连续变量量子比特,即光学奇猫态和偶猫态的叠加态,如图 3(a) 所示。Ourjoumtsev 等<sup>[27]</sup>将双光子态和真空态在 50:50 分束器中耦合,而后将分束器的其中一个输出模式投影到动量为零,在另一个模式中远程制备出一个光学压缩偶猫态。NOON 态是一种典型的非高斯纠缠态,基于 NOON 态也可以实现非高斯态的远程制备,如图 3(b) 所示。Ulanov 等<sup>[28]</sup>从两个双模压缩态中分别选取一个模式进行耦合,然后对耦合的模式进行光子数探测。当两个单光子探测器均有响应时,预告式地制备了非高斯纠缠态  $|2002\rangle = |2,0\rangle + |0,2\rangle$ 。而后,对其中一个模式进行正交位相为零的投影测量,在另一个模式中实现了光学压缩偶猫态的远程制备。

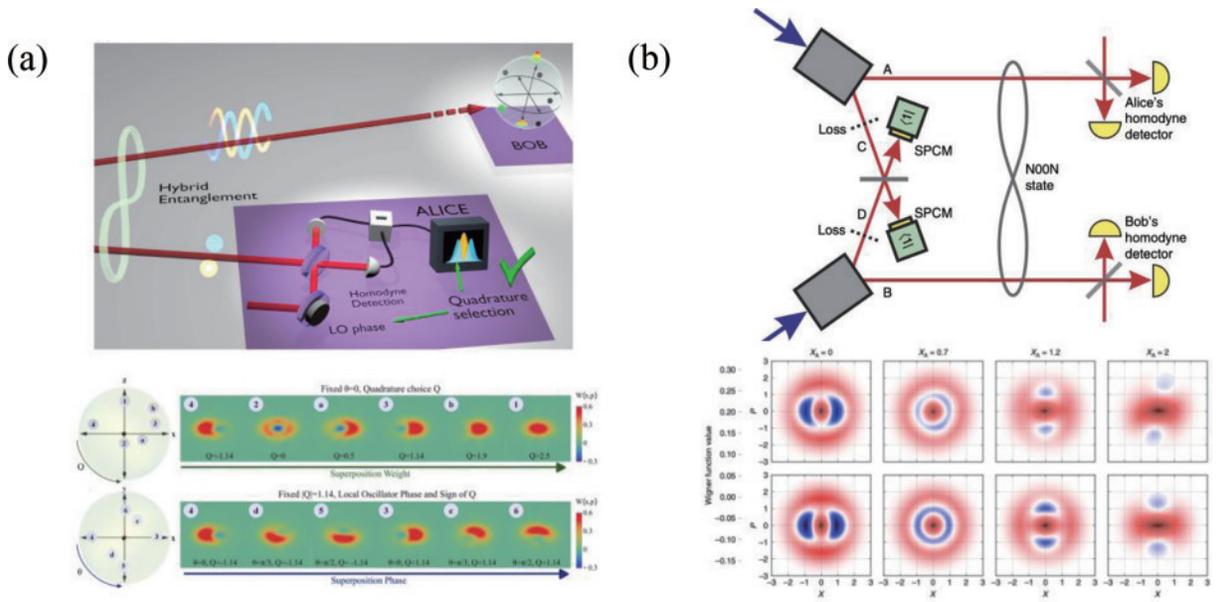


图 3 基于非高斯纠缠态的远程态制备。(a) 远程制备连续变量量子比特<sup>[26]</sup>; (b) 远程制备光学压缩猫态<sup>[28]</sup>

Fig. 3 Remote state preparation based on non-Gaussian entangled state. (a) Remote preparation of continuous variable qubits<sup>[26]</sup>; (b) remote preparation of squeezed cat state based on NOON state<sup>[28]</sup>

与连续变量非高斯纠缠态相比,连续变量高斯纠缠态具有确定性制备和可扩展性强的特点。Asavanant 等<sup>[43]</sup>基于 4 个光学参量振荡器和光纤延时技术实现了超过两万模式的一维和二维大尺度连续变量 cluster 纠缠态。与此同时, Larsen 等<sup>[44]</sup>基于两个光学参量振荡器和光纤延时技术,实现了超过三万个模式的二维大尺度连续变量 cluster 纠缠态。鉴于高斯纠缠态可扩展性强的优点,基于高斯纠缠态的远程态制备具有良好的前景。

在基于高斯纠缠态的远程态制备方面,基于双模的高斯纠缠态已经实现了几种重要的高斯和非高斯量子态的远程制备。压缩态作为一种重要的连续变量量子态,在量子信息处理中有广泛应用<sup>[45-48]</sup>。Pogorzalek 等<sup>[4]</sup>率先在微波系统中演示了压缩态的远程制备。首先,将两个约瑟夫森参量放大器(JPA)产生的两束压

缩态耦合产生纠缠态。然后,对 Alice 拥有的一束纠缠态利用第 3 个 JPA 进行相敏放大后反馈给 Bob 拥有的纠缠态模式。最后,对 Bob 拥有的模式执行平移操作,实现了微波系统中约为 -1.6 dB 的压缩态的远程制备。但该工作中,除了 Alice 需要对其模式执行一定操作外, Bob 也需要对其模式进行额外操作。如何通过仅在 Alice 模式进行操作在 Bob 模式中实现压缩态的远程制备值得研究。

Paris 等<sup>[31]</sup>提出一种基于双模压缩态和平衡零拍投影测量远程制备压缩态的方案,通过对分发给 Alice 的一束纠缠光进行平衡零拍投影测量,另一束发送给 Bob 的纠缠光塌缩为压缩态。近期, Han 等<sup>[34]</sup>实验演示了该方案,实现了压缩度约为 -1.27 dB、保真度约为 92% 的压缩真空态的远程制备。该工作采用非简并光学参量放大器产生双模高斯纠缠态,两个模式分

别经过损耗信道传输给 Alice 和 Bob。Alice 对其拥有的模式执行平衡零拍投影测量操作, Bob 用一个平衡零拍探测器对远程制备的量子态进行重构。当 Alice 对其模式进行不同正交分量的投影测量时, 实现了压缩态压缩方向的远程操控。当 Alice 模式投影测量的正交分量的值不同时, 可实现对远程制备的压缩态平移量的操控。

同时, Han 等<sup>[34]</sup>将该方案扩展到了基于  $N$  模的 continuous variable Greenberger-Horne-Zeilinger (CV GHZ) 纠缠态, 实现了多个压缩态的同时制备。假设一个云端的服务器可以制备一个  $N$  模的 CV GHZ 纠缠态, 并将  $N$  个模式分发到 Alice、Bob、Claire 手中, 如果将其中一个模式投影到  $x_j = 0$ , 其余  $N-1$  个模式则会塌缩到振幅压缩态上, 即可以实现  $N-1$  个压缩态的同时制备。

基于高斯纠缠态, 结合加光子和减光子等非高斯操作, 可以实现非高斯态的远程制备。其中, 具有 Wigner 负值的连续变量非高斯态在量子纠错、量子模

拟和量子精密测量等量子信息处理任务中具有非常重要的作用<sup>[49]</sup>。Walschaers 等<sup>[10]</sup>证明了, 对于一个多模高斯系统, 如果对其中一个模式进行减光子操作, 其余模式上产生具有 Wigner 负值的非高斯态的必要条件是其余模式对减光子模式存在高斯量子导引。当对减光子的模式在减光子操作之前进行额外的局域高斯操作时, 此时量子导引也会成为制备具有 Wigner 负值非高斯态的充分条件。随后, Xiang 等<sup>[50-51]</sup>证明了, 对于一个分别分发给 Alice 和 Bob 的双模压缩态, 在 Alice 模式上减光子, Bob 端对 Alice 端的量子导引是在 Bob 端产生具有 Wigner 负值的非高斯态的充分必要条件。

Liu 等<sup>[35]</sup>基于双模高斯纠缠态和减光子操作, 实验实现了非高斯态的远程制备, 并通过同时观察高斯量子导引和非高斯负值在损耗信道中的演化, 验证了高斯量子导引和远程制备的非高斯负值之间的关系。图 4(a) 中, 双模高斯纠缠态的两个模式分别经过损耗信道分发给 Alice 和 Bob。Alice 对其拥有

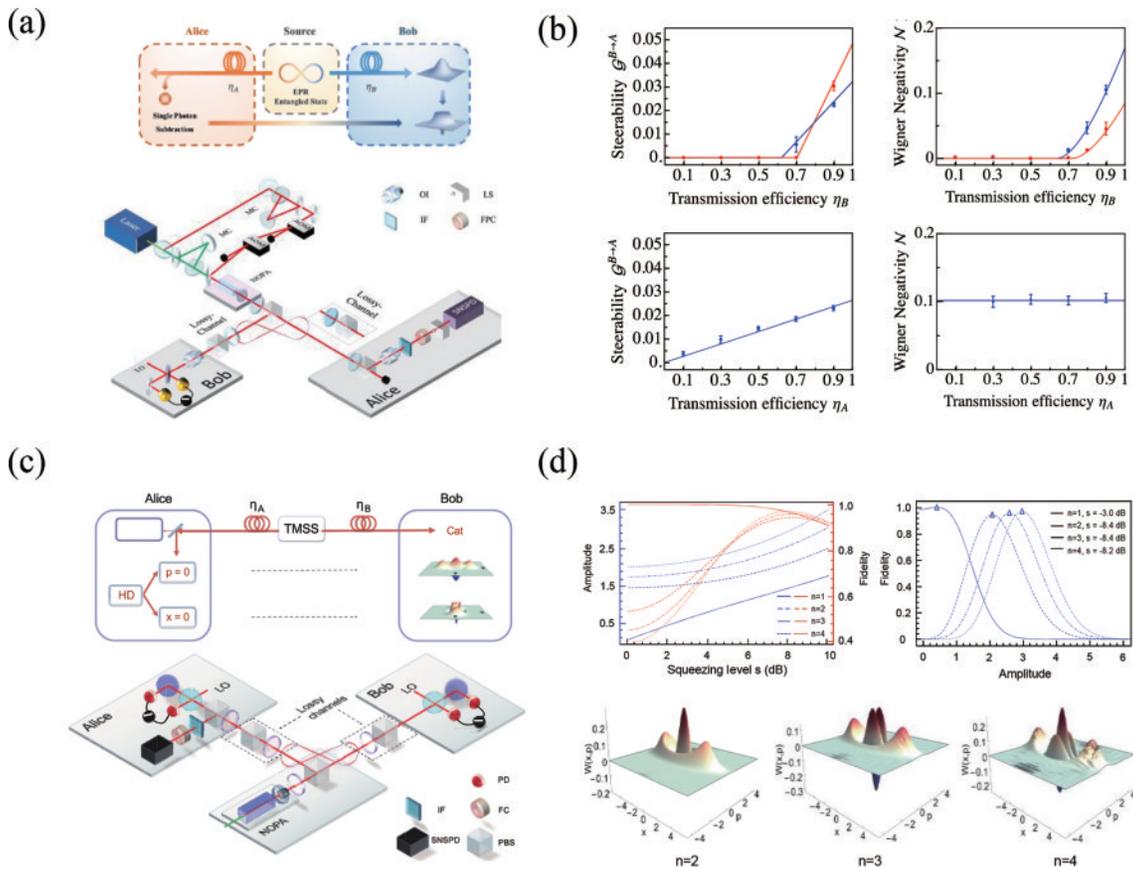


图 4 远程制备非高斯态。(a) 基于高斯纠缠态远程制备非高斯态的示意图和实验装置图<sup>[35]</sup>; (b) Bob 对 Alice 的高斯量子导引和 Bob 端量子态的 Wigner 负值随传输效率的变化<sup>[35]</sup>; (c) 基于高斯纠缠态远程制备光学猫态的示意图和实验装置图<sup>[36]</sup>; (d) 基于高斯纠缠态远程制备大尺度光学猫态方案<sup>[36]</sup>

Fig. 4 Remote preparation of non-Gaussian state. (a) Schematic and experimental setup of the remote preparation of non-Gaussian state based on Gaussian entangled state<sup>[35]</sup>; (b) the dependence of Gaussian steering from Bob to Alice and the Wigner negativity at Bob's station on the transmission efficiencies<sup>[35]</sup>; (c) schematic and experimental setup of the remote preparation of optical cat state based on Gaussian entangled state<sup>[36]</sup>; (d) scheme of the remote preparation of large-amplitude optical cat state based on Gaussian entangled state<sup>[36]</sup>

的模式执行减光子操作, Bob 对其模式进行平衡零拍探测。通过对比基于两种不同纯度的双模高斯纠缠态远程制备的非高斯负值发现, 基于更高纯度的双模高斯纠缠态可以实现 Wigner 负值更大的非高斯态的远程制备。图 4(b) 中, 通过研究 Bob 端制备的非高斯态负值以及 Bob 对 Alice 的高斯量子导引随着 Bob 和 Alice 端传输效率的变化, 观察到 Bob 端制备的非高斯态的负值以及 Bob 对 Alice 的高斯量子导引在相同的 Bob 端传输效率点消失, 这一结果验证了高斯量子导引和 Bob 端制备的 Wigner 负值之间的关系。

光学猫态作为两个振幅相同、相位相反的相干态的叠加态, 是一种特殊且重要的非高斯态<sup>[52-53]</sup>, 一般通过对压缩真空态进行减光子操作进行局域制备<sup>[54-59]</sup>。Han 等<sup>[36]</sup>提出并实验实现了基于双模高斯纠缠态远程制备光学猫态的方案, 如图 4(c) 所示。该工作采用非简并光学参量放大器产生双模高斯纠缠态, 并将纠缠态两个模式分别经过损耗信道传输给 Alice 和 Bob。Alice 对其拥有的模式先进行减光子操作, 而后对减光子后的模式进行平衡零拍投影测量。此时 Bob 拥有的模式的量子态<sup>[36]</sup>可以表示为

$$|\phi'_{0|x_A}\rangle_B = |r, \theta\rangle_B^{(l)} + (-1)^l |-r, \theta\rangle_B^{(l)}, \quad (4)$$

式中:  $|r, \theta\rangle_B^{(l)} = \sum_{m=1}^{\infty} \frac{m(m-1)!!}{\sqrt{m}} \tanh^m r \exp\left[-im\left(\theta - \frac{\pi}{2}\right)\right] |m\rangle_B$ ,  $l$  表示 Alice 减去的光子个数。可以看出: 当

$l$  为奇数时, Bob 的量子态含有奇数个光子, 类似于奇猫态; 当  $l$  为偶数时, Bob 态含有偶数个光子, 类似于偶猫态。如果 Alice 端成功减去一个光子并完成正交位相为零的平衡零拍投影测量操作, 则 Bob 端产生正交振幅方向叠加的光学奇猫态。如果 Alice 成功减去一个光子并完成正交振幅为 0 的平衡零拍投影测量操作, Bob 端产生正交位向叠加的光学奇猫态, 因此实现了光学猫态叠加方向的操控。理论上, 该方案可以扩展到制备大尺度的光学猫态, 如图 4(d) 所示。当 Alice 端减去更多光子时, 且双模压缩态压缩度分别为  $-8.4$  dB,  $-8.4$  dB 和  $-8.2$  dB 时, Bob 端可以制备出保真度均大于 90% 且尺度均大于 2 的光学猫态。该工作实现了基于高斯纠缠态远程制备光学猫态, 并且提出了远程制备大尺度猫态的方案, 为基于猫态的量子信息处理奠定了基础。

## 4 总结与展望

远程态制备作为一种重要的量子态传输方式, 在远程量子信息处理中有重要应用。离散变量系统中, 已经能够实现对任意单量子比特的远程操控, 也能够结合偏振和轨道角动量等多个自由度实现混合量子比特的远程制备。离散变量系统抗损耗的优点也体现在

基于该系统的远程态制备中: 通过牺牲一定态制备的成功概率, 可以实现相当长距离的离散变量量子比特的远程态制备。然而, 由于离散变量系统中纠缠态通常是概率性的, 因此基于离散变量量子纠缠的远程态制备也通常是概率性的。此外, 在投影测量时需要进行的多光子符合计数也是概率性的, 导致远程制备多个量子比特的成功率会降低。因此, 在该系统中, 多量子比特的远程制备面临一定挑战。

在连续变量系统中, 基于双模高斯纠缠态已经演示了压缩态、非高斯态和光学猫态等几种非常重要的连续变量量子态的远程制备。由于连续变量高斯纠缠态具有确定性制备的优势, 因此, 基于连续变量高斯纠缠态能够高效实现远程态制备。与此同时, 高斯纠缠态具有良好的可扩展性, 因此, 基于多模高斯纠缠态实现多个连续变量量子态的远程制备在量子通信网络中具有潜在的应用。此外, 基于远程制备的连续变量量子态进行量子通信时, 为了提升信道容量, 发展结合多种自由度的连续变量量子态的远程制备也有待进行。

迄今为止, 虽然远程态制备已经取得了一系列重要的研究进展, 但是仍然局限于实验室的演示性实验。面向实际应用, 基于实际量子信道(光纤信道或自由空间)分发的量子纠缠实现量子态的远程制备是远程态制备发展的必然趋势。进一步, 研究基于远程制备的量子态实现远程量子信息处理对于推动远程态制备和量子信息处理具有重要意义。

## 参 考 文 献

- [1] Lo H K. Classical-communication cost in distributed quantum-information processing: a generalization of quantum-communication complexity[J]. Physical Review A, 2000, 62(1): 012313.
- [2] Bennett C H, Brassard G, Crépeau C, et al. Teleporting an unknown quantum state via dual classical and Einstein-Podolsky-Rosen channels[J]. Physical Review Letters, 1993, 70(13): 1895-1899.
- [3] Pati A K. Minimum classical bit for remote preparation and measurement of a qubit[J]. Physical Review A, 2000, 63(1): 014302.
- [4] Pogorzalek S, Fedorov K G, Xu M, et al. Secure quantum remote state preparation of squeezed microwave states[J]. Nature Communications, 2019, 10: 2604.
- [5] Gheorghiu A, Vidick T. Computationally-secure and composable remote state preparation[C]//2019 IEEE 60th Annual Symposium on Foundations of Computer Science (FOCS), November 9-12, 2019, Baltimore, MD, USA. New York: IEEE Press, 2020: 1024-1033.
- [6] Hadiashar S B, Nayak A, Renner R. Communication complexity of one-shot remote state preparation[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2018, 64(7): 4709-4728.
- [7] Grosshans F, Cerf N J, Wenger J, et al. Virtual entanglement and reconciliation protocols for quantum

- cryptography with continuous variables[J]. *Quantum Information & Computation*, 2003, 3(7): 535-552.
- [8] Dakić B, Lipp Y O, Ma X S, et al. Quantum discord as resource for remote state preparation[J]. *Nature Physics*, 2012, 8(9): 666-670.
- [9] Bennett C H, DiVincenzo D P, Shor P W, et al. Remote state preparation[J]. *Physical Review Letters*, 2001, 87(7): 077902.
- [10] Walschaers M, Treppe N. Remote generation of Wigner negativity through einstein-Podolsky-Rosen steering[J]. *Physical Review Letters*, 2020, 124(15): 150501.
- [11] Jeffrey E, Peters N A, Kwiat P G. Towards a periodic deterministic source of arbitrary single-photon states[J]. *New Journal of Physics*, 2004, 6: 100.
- [12] Peters N A, Barreiro J T, Goggin M E, et al. Remote state preparation: arbitrary remote control of photon polarization[J]. *Physical Review Letters*, 2005, 94(15): 150502.
- [13] Ye M Y, Zhang Y S, Guo G C. Faithful remote state preparation using finite classical bits and a nonmaximally entangled state[J]. *Physical Review A*, 2004, 69(2): 022310.
- [14] Xiang G Y, Li J, Yu B, et al. Remote preparation of mixed states via noisy entanglement[J]. *Physical Review A*, 2005, 72(1): 012315.
- [15] Liu W T, Wu W, Ou B Q, et al. Experimental remote preparation of arbitrary photon polarization states[J]. *Physical Review A*, 2007, 76(2): 022308.
- [16] Wu W, Liu W T, Chen P X, et al. Deterministic remote preparation of pure and mixed polarization states[J]. *Physical Review A*, 2010, 81(4): 042301.
- [17] Killoran N, Biggerstaff D N, Kaltenbaek R, et al. Derivation and experimental test of fidelity benchmarks for remote preparation of arbitrary qubit states[J]. *Physical Review A*, 2010, 81(1): 012334.
- [18] Mikami H, Kobayashi T. Remote preparation of qutrit states with biphotons[J]. *Physical Review A*, 2007, 75(2): 022325.
- [19] Rådmark M, Wieśniak M, Żukowski M, et al. Experimental multilocation remote state preparation[J]. *Physical Review A*, 2013, 88(3): 032304.
- [20] Solís-Prosser M A, Neves L. Remote state preparation of spatial qubits[J]. *Physical Review A*, 2011, 84(1): 012330.[LinkOut]
- [21] Su M, Chen L X. Remote state preparation of three-dimensional optical vortices[J]. *Optics Express*, 2014, 22(9): 10898-10905.
- [22] Barreiro J T, Wei T C, Kwiat P G. Remote preparation of single-photon “hybrid” entangled and vector-polarization states[J]. *Physical Review Letters*, 2010, 105(3): 030407.
- [23] Erhard M, Qassim H, Mand H, et al. Real-time imaging of spin-to-orbital angular momentum hybrid remote state preparation[J]. *Physical Review A*, 2015, 92(2): 022321.
- [24] Ra Y S, Lim H T, Kim Y H. Remote preparation of three-photon entangled states via single-photon measurement[J]. *Physical Review A*, 2016, 94(4): 042329.
- [25] Babichev S A, Brezger B, Lvovsky A I. Remote preparation of a single-mode photonic qubit by measuring field quadrature noise[J]. *Physical Review Letters*, 2004, 92(4): 047903.
- [26] Le Jeannic H, Cavallès A, Raskop J, et al. Remote preparation of continuous-variable qubits using loss-tolerant hybrid entanglement of light[J]. *Optica*, 2018, 5(8): 1012-1015.
- [27] Ourjoumtsev A, Jeong H, Tualle-Brouiri R, et al. Generation of optical ‘Schrödinger cats’ from photon number states[J]. *Nature*, 2007, 448(7155): 784-786.
- [28] Ulanov A E, Fedorov I A, Sychev D, et al. Loss-tolerant state engineering for quantum-enhanced metrology via the reverse Hong-Ou-Mandel effect[J]. *Nature Communications*, 2016, 7: 11925.
- [29] Etesse J, Bouillard M, Kanseri B, et al. Experimental generation of squeezed cat states with an operation allowing iterative growth[J]. *Physical Review Letters*, 2015, 114(19): 193602.
- [30] Sychev D V, Ulanov A E, Pushkina A A, et al. Enlargement of optical Schrödinger’s cat states[J]. *Nature Photonics*, 2017, 11(6): 379-382.
- [31] Paris M G A, Cola M, Bonifacio R. Remote state preparation and teleportation in phase space[J]. *Journal of Optics B: Quantum and Semiclassical Optics*, 2003, 5(3): S360-S364.
- [32] Kurucz Z, Adam P, Kis Z, et al. Continuous variable remote state preparation[J]. *Physical Review A*, 2005, 72(5): 052315.
- [33] Laurat J, Coudreau T, Treppe N, et al. Conditional preparation of a quantum state in the continuous variable regime: generation of a sub-poissonian state from twin beams[J]. *Physical Review Letters*, 2003, 91(21): 213601.
- [34] Han D M, Wang N, Wang M H, et al. Remote preparation and manipulation of squeezed light[J]. *Optics Letters*, 2022, 47(13): 3295-3298.
- [35] Liu S H, Han D M, Wang N, et al. Experimental demonstration of remotely creating Wigner negativity via quantum steering[J]. *Physical Review Letters*, 2022, 128(20): 200401.
- [36] Han D M, Sun F X, Wang N, et al. Remote preparation of optical cat states based on Gaussian entanglement[J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2023, 17(9): 2300103.
- [37] Andersen U L, Neergaard-Nielsen J S, van Loock P, et al. Hybrid discrete-and continuous-variable quantum information[J]. *Nature Physics*, 2015, 11(9): 713-719.
- [38] Giedke G, Cirac J I. Characterization of Gaussian operations and distillation of Gaussian states[J]. *Physical Review A*, 2002, 66(3): 032316.
- [39] van Loock P, Furusawa A. Detecting genuine multipartite continuous-variable entanglement[J]. *Physical Review A*, 2003, 67(5): 052315.
- [40] Morin O, Huang K, Liu J L, et al. Remote creation of hybrid entanglement between particle-like and wave-like optical qubits[J]. *Nature Photonics*, 2014, 8(7): 570-574.
- [41] Jeong H, Zavatta A, Kang M S, et al. Generation of hybrid entanglement of light[J]. *Nature Photonics*, 2014, 8(7): 564-569.

- [42] Ra Y S, Dufour A, Walschaers M, et al. Non-Gaussian quantum states of a multimode light field[J]. *Nature Physics*, 2020, 16(2): 144-147.
- [43] Asavanant W, Yu S, Yokoyama S, et al. Generation of time-domain-multiplexed two-dimensional cluster state [J]. *Science*, 2019, 366(6463): 373-376.
- [44] Larsen M, Guo X, Breum C, et al. Deterministic generation of a two-dimensional cluster state[J]. *Science*, 2019, 366(6463): 369-372.
- [45] Aasi J, Abadie J, Abbott B P, et al. Enhanced sensitivity of the LIGO gravitational wave detector by using squeezed states of light[J]. *Nature Photonics*, 2013, 7(8): 613-619.
- [46] Yonezawa H, Furusawa A. Continuous-variable quantum information processing with squeezed states of light[J]. *Optics and Spectroscopy*, 2010, 108(2): 288-296.
- [47] Takeda S, Furusawa A. Toward large-scale fault-tolerant universal photonic quantum computing[J]. *APL Photonics*, 2019, 4(6): 060902.
- [48] 秦忠忠, 王美红, 马荣, 等. 压缩态光场及其应用研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2022, 59(11): 1100001.  
Qin Z Z, Wang M H, Ma R, et al. Progress of the squeezed states of light and their application[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2022, 59(11): 1100001.
- [49] Mari A, Eisert J. Positive Wigner functions render classical simulation of quantum computation efficient[J]. *Physical Review Letters*, 2012, 109(23): 230503.
- [50] Xiang Y, Kogias I, Adesso G, et al. Multipartite Gaussian steering: monogamy constraints and quantum cryptography applications[J]. *Physical Review A*, 2017, 95(1): 010101.
- [51] Xiang Y, Liu S H, Guo J J, et al. Distribution and quantification of Wigner negativity remotely generated via Einstein-Podolsky-Rosen steering[J]. *Proceedings of SPIE*, 2021, 11905: 1190508.
- [52] Lund A P, Ralph T C, Haselgrove H L. Fault-tolerant linear optical quantum computing with small-amplitude coherent states[J]. *Physical Review Letters*, 2008, 100(3): 030503.
- [53] Marek P, Fiurášek J. Elementary gates for quantum information with superposed coherent states[J]. *Physical Review A*, 2010, 82(1): 014304.
- [54] Wenger J, Tualle-Brouri R, Grangier P. Non-gaussian statistics from individual pulses of squeezed light[J]. *Physical Review Letters*, 2004, 92(15): 153601.
- [55] Ourjoumtsev A, Tualle-Brouri R, Laurat J, et al. Generating optical Schrödinger kittens for quantum information processing[J]. *Science*, 2006, 312(5770): 83-86.
- [56] Neergaard-Nielsen J S, Nielsen B M, Hettich C, et al. Generation of a superposition of odd photon number states for quantum information networks[J]. *Physical Review Letters*, 2006, 97(8): 083604.
- [57] Wakui K, Takahashi H, Furusawa A, et al. Photon subtracted squeezed states generated with periodically poled KTiOPO<sub>4</sub>[J]. *Optics Express*, 2007, 15(6): 3568-3574.
- [58] Takahashi H, Wakui K, Suzuki S, et al. Generation of large-amplitude coherent-state superposition via ancilla-assisted photon subtraction[J]. *Physical Review Letters*, 2008, 101(23): 233605.
- [59] Gerrits T, Glancy S, Clement T S, et al. Generation of optical coherent-state superpositions by number-resolved photon subtraction from the squeezed vacuum[J]. *Physical Review A*, 2010, 82(3): 031802.