文章编号:1000-5862(2017)02-0127-06

4粒子团簇态的可控隐形传态

臧　鹏,易图林,胡超斌,田　菲
(空军预警学院黄陂士官学校,湖北 武汉　430345)

摘要:为实现4粒子团簇态更加经济和安全的隐形传态,提出2种利用6粒子团簇态为量子信道的可控隐形传态方案,分别是3方参与的可控隐形传态方案和4方参与的可控隐形传态方案.在控制者同意信息传输的情况下,2种隐形传态方案成功的概率是一致的,为$4|a|^2$,即选用最大纠缠的6粒子团簇态为量子信道时,传输成功率为100%.通过2种方案的对比发现,控制方的增多可以有效地提高信息传输的安全性,但同时会使接收方还原原始信息的操作更加复杂.

关键词:6粒子团簇态;4粒子团簇态;Bell基联合测量;可控隐形传态
中图分类号:O 431　文献标志码:A　DOI:10.16357/j.cnki.issn1000-5862.2017.02.04

0　引言

量子信息处理主要包括量子通信和量子计算,是信息科学与量子力学的交叉学科.量子通信主要包括量子隐形传态、密集编码、量子数字签名等方面,量子隐形传态是其中比较简单也比较迷人的应用.1993年,C. H. Bennett等[1]首次提出一种成功的隐形传态方案,吸引了众多物理学家投入研究.H. J. Briegel和R. Raussendorf在2001年提出了一种新的量子纠缠态——团簇态[2],并且证明团簇态在量子数目$N>3$时,有一些更加特殊的性质,如持续纠缠性和最大联通性.团簇态是量子信息处理领域的重要资源.对团簇态的研究,既包括以团簇态为量子信道,隐形传输其他态的方案[3-5],也包括利用其他量子信道,隐形传输4粒子团簇态的方案[6-10].在这些隐形传输4粒子团簇态的方案中,量子信道的粒子数分别为7粒子或8粒子.

可控隐形传态由A. Karlsson等[11]在1998年首次提出,可控隐形传态方案的提出,进一步提高了隐形传输的安全性.文献[12-16]提出了利用团簇态为信道的可控隐形传输方案,传输的信息为任意单粒子态或任意2粒子态.

人们总是希望可以用相同的资源更加安全地传输更多的信息.本文提出利用6粒子团簇态为量子信道实现4粒子团簇态的可控隐形传输方案,与文献[6-10]相比,利用更少的粒子传输相同的团簇态,同时实现了控制传输,提高了安全性,与文献[16]相比,用相同的信道传输了更多的信息.同时,文献[16]的量子信道为最大纠缠的6粒子团簇态,在实际应用中由于量子噪声的存在,最大纠缠态很难保持,所以本方案选用非最大纠缠的6粒子团簇态为量子信道,考虑了量子噪声对量子信道的影响,使方案具有更加普遍的意义.

1　3方参与的可控隐形传态

假设Alice要传输给Bob的未知信息态为4粒子团簇态,

$$|C_4\rangle_{1234}=(\alpha|0000\rangle+\beta|0011\rangle+\gamma|1100\rangle-\delta|1111\rangle)_{1234},\tag{1}$$

其中$|\alpha|^2+|\beta|^2+|\gamma|^2+|\delta|^2=1$.

量子信道为6粒子团簇态,

$$|C_6\rangle_{5678910}=(a|000000\rangle+b|000111\rangle+c|111000\rangle-d|111111\rangle)_{5678910},\tag{2}$$

其中$|a|^2+|b|^2+|c|^2+|d|^2=1$.Alice拥有粒子1、2、3、4、5、8,Bob拥有粒子6、7、9,Charlie拥有粒子10.

在操作之前,系统的初态为

$$|\psi\rangle_s=|C_4\rangle_{1234}\otimes|C_6\rangle_{5678910}=(\alpha|0000\rangle+\beta|0011\rangle+\gamma|1100\rangle-\delta|1111\rangle)_{1234}\otimes(a|000000\rangle+b|000111\rangle+c|111000\rangle-$$

收稿日期:2016-12-17
基金项目:国家自然科学基金(61304067)资助项目.
作者简介:臧　鹏(1984-),男,山东胶南人,讲师,主要从事量子信息研究.E-mail:zangpeng2005@163.com

$d\,|111111\rangle)_{5678910}$.

为了将信息传递给 Bob,Alice 对(1,5)和(3,8)进行 2 次 Bell 基联合测量,Bell 基为

$$|\Phi^{\pm}\rangle_{ij}=(|00\rangle\pm|11\rangle)_{ij}/\sqrt{2},\ |\Psi^{\pm}\rangle_{ij}=(|01\rangle\pm|10\rangle)_{ij}/\sqrt{2},\tag{3}$$

测量有 16 种可能的结果,采用非归一化的形式为

$$_{38}\langle\Phi^{\pm}|_{15}\langle\Phi^{\pm}|\psi\rangle_s=(\alpha a|000000\rangle\pm^2\beta b|010011\rangle\pm^1\gamma c|101100\rangle\pm^2\pm^1\delta d|111111\rangle)_{2467910}/2,\tag{4}$$

$$_{38}\langle\Psi^{\pm}|_{15}\langle\Phi^{\pm}|\psi\rangle_s=(\alpha b|000011\rangle\pm^2\beta a|010000\rangle\mp^1\gamma d|101111\rangle\mp^2\mp^1\delta c|111100\rangle)_{2467910}/2,\tag{5}$$

$$_{38}\langle\Phi^{\pm}|_{15}\langle\Psi^{\pm}|\psi\rangle_s=(\alpha c|001100\rangle\mp^2\beta d|011111\rangle\pm^1\gamma a|100000\rangle\mp^2\mp^1\delta b|110011\rangle)_{2467910}/2,\tag{6}$$

$$_{38}\langle\Psi^{\pm}|_{15}\langle\Psi^{\pm}|\psi\rangle_s=(-\alpha d|001111\rangle\pm^2\beta c|011100\rangle\pm^1\gamma b|100011\rangle\mp^2\mp^1\delta a|110000\rangle)_{2467910}/2,\tag{7}$$

其中 $\pm^1$、m^1 对应(1,5)的 Bell 基测量结果,$\pm^2$、m^2 对应(3,8)的 Bell 基测量结果.

假设 Alice 对(1,5)、(3,8)的测量结果为 $|\Phi^+\rangle_{15}$、$|\Phi^-\rangle_{38}$,则系统塌缩为 $|\psi\rangle_{2467910}=(\alpha a|000000\rangle-\beta b|010011\rangle+\gamma c|101100\rangle-\delta d|111111\rangle)_{2467910}/2$.

为了将粒子 2 提炼出来,Alice 对粒子 2 进行 H 变换

$$|\psi\rangle_{2467910}=\frac{1}{2}\alpha a\Big(\frac{1}{\sqrt{2}}(|0\rangle+|1\rangle)_2\Big)|00000\rangle_{467910}-\frac{1}{2}\beta b\Big(\frac{1}{\sqrt{2}}(|0\rangle+|1\rangle)_2\Big)|10011\rangle_{467910}+\frac{1}{2}\gamma c\Big(\frac{1}{\sqrt{2}}(|0\rangle-|1\rangle)_2\Big)|01100\rangle_{467910}-\frac{1}{2}\delta d\Big(\frac{1}{\sqrt{2}}(|0\rangle-|1\rangle)_2\Big)|11111\rangle_{467910}=$$

$$\frac{1}{2\sqrt{2}}(\alpha a|00000\rangle-\beta b|10011\rangle+\gamma c|01100\rangle-\delta d|11111\rangle_{467910}\otimes|0\rangle_2+\frac{1}{2\sqrt{2}}(\alpha a|00000\rangle-\beta b|10011\rangle-\gamma c|01100\rangle+\delta d|11111\rangle_{467910}\otimes|1\rangle_2.$$

选取基$\{|0\rangle,|1\rangle\}$进行单粒子测量,若测量结果为 $|0\rangle_2$,系统塌缩到 $|\varphi\rangle_{467910}=\frac{1}{2\sqrt{2}}(\alpha a|00000\rangle-\beta b|10011\rangle+\gamma c|01100\rangle-\delta d|11111\rangle)_{467910}$,若测量结果为 $|1\rangle_2$,系统塌缩到 $|\varphi\rangle_{467910}=\frac{1}{2\sqrt{2}}(\alpha a|00000\rangle-\beta b|10011\rangle-\gamma c|01100\rangle+\delta d|11111\rangle)_{467910}$.

采用同样的方法将粒子 4 的信息提炼出来. 假设 Alice 对粒子 2 的测量结果为 $|0\rangle_2$,若粒子 4 的测量结果为 $|0\rangle_4$,系统塌缩到 $|\varphi\rangle_{67910}=\frac{1}{4}(\alpha a|0000\rangle-\beta b|0011\rangle+\gamma c|1100\rangle-\delta d|1111\rangle)_{67910}$;若粒子 4 的测量结果为 $|1\rangle_4$,系统塌缩到 $|\varphi\rangle_{67910}=\frac{1}{4}(\alpha a|0000\rangle+\beta b|0011\rangle+\gamma c|1100\rangle+\delta d|1111\rangle)_{67910}$.

若 Charlie 同意本次信息传递,就对手中的粒子 10 进行单粒子测量,同样先进行 H 变换,再选定基$\{|0\rangle,|1\rangle\}$进行测量. 假设粒子 4 的测量结果为 $|1\rangle_4$,若 Charlie 的测量结果为 $|0\rangle_{10}$,系统塌缩为 $|\varphi\rangle_{679}=\frac{1}{4\sqrt{2}}(\alpha a|000\rangle+\beta b|001\rangle+\gamma c|110\rangle+\delta d|111\rangle)_{679}$;若测量结果为 $|1\rangle_{10}$,系统塌缩为 $|\varphi\rangle_{679}=\frac{1}{4\sqrt{2}}(\alpha a|000\rangle-\beta b|001\rangle+\gamma c|110\rangle-\delta d|111\rangle)_{679}$. 粒子 6、7、9 的状态共有 128 种可能,为节省篇幅,将相同的态进行归纳,详细情况见表 1.

表 1 Alice 和 Charlie 测量结果及粒子 6、7、9 状态

测量结果	$\|\varphi\rangle_{679}$ 的状态
$\|\Phi^+\rangle_{15}\|\Phi^+\rangle_{38}\|0\rangle_2\|0\rangle_4\|0\rangle_{10}$、$\|\Phi^+\rangle_{15}\|\Phi^-\rangle_{38}\|0\rangle_2\|1\rangle_4\|0\rangle_{10}$ $\|\Phi^-\rangle_{15}\|\Phi^+\rangle_{38}\|1\rangle_2\|0\rangle_4\|0\rangle_{10}$、$\|\Phi^-\rangle_{15}\|\Phi^-\rangle_{38}\|1\rangle_2\|1\rangle_4\|0\rangle_{10}$ $\|\Phi^+\rangle_{15}\|\Phi^+\rangle_{38}\|0\rangle_2\|1\rangle_4\|1\rangle_{10}$、$\|\Phi^+\rangle_{15}\|\Phi^-\rangle_{38}\|0\rangle_2\|0\rangle_4\|1\rangle_{10}$ $\|\Phi^-\rangle_{15}\|\Phi^+\rangle_{38}\|1\rangle_2\|1\rangle_4\|1\rangle_{10}$、$\|\Phi^-\rangle_{15}\|\Phi^-\rangle_{38}\|1\rangle_2\|0\rangle_4\|1\rangle_{10}$	$\frac{1}{4\sqrt{2}}(\alpha a\|000\rangle+\beta b\|001\rangle+\gamma c\|110\rangle+\delta d\|111\rangle)_{679}$
$\|\Phi^+\rangle_{15}\|\Phi^+\rangle_{38}\|0\rangle_2\|0\rangle_4\|1\rangle_{10}$、$\|\Phi^+\rangle_{15}\|\Phi^-\rangle_{38}\|0\rangle_2\|1\rangle_4\|1\rangle_{10}$ $\|\Phi^-\rangle_{15}\|\Phi^+\rangle_{38}\|1\rangle_2\|0\rangle_4\|1\rangle_{10}$、$\|\Phi^-\rangle_{15}\|\Phi^-\rangle_{38}\|1\rangle_2\|1\rangle_4\|1\rangle_{10}$ $\|\Phi^+\rangle_{15}\|\Phi^+\rangle_{38}\|0\rangle_2\|1\rangle_4\|0\rangle_{10}$、$\|\Phi^+\rangle_{15}\|\Phi^-\rangle_{38}\|0\rangle_2\|0\rangle_4\|0\rangle_{10}$ $\|\Phi^-\rangle_{15}\|\Phi^+\rangle_{38}\|1\rangle_2\|1\rangle_4\|0\rangle_{10}$、$\|\Phi^-\rangle_{15}\|\Phi^-\rangle_{38}\|1\rangle_2\|0\rangle_4\|0\rangle_{10}$	$\frac{1}{4\sqrt{2}}(\alpha a\|000\rangle-\beta b\|001\rangle+\gamma c\|110\rangle-\delta d\|111\rangle)_{679}$
$\|\Phi^+\rangle_{15}\|\Phi^+\rangle_{38}\|1\rangle_2\|0\rangle_4\|0\rangle_{10}$、$\|\Phi^+\rangle_{15}\|\Phi^-\rangle_{38}\|1\rangle_2\|1\rangle_4\|0\rangle_{10}$ $\|\Phi^-\rangle_{15}\|\Phi^+\rangle_{38}\|0\rangle_2\|0\rangle_4\|0\rangle_{10}$、$\|\Phi^-\rangle_{15}\|\Phi^-\rangle_{38}\|0\rangle_2\|1\rangle_4\|0\rangle_{10}$ $\|\Phi^+\rangle_{15}\|\Phi^+\rangle_{38}\|1\rangle_2\|1\rangle_4\|1\rangle_{10}$、$\|\Phi^+\rangle_{15}\|\Phi^-\rangle_{38}\|1\rangle_2\|0\rangle_4\|1\rangle_{10}$ $\|\Phi^-\rangle_{15}\|\Phi^+\rangle_{38}\|0\rangle_2\|1\rangle_4\|1\rangle_{10}$、$\|\Phi^-\rangle_{15}\|\Phi^-\rangle_{38}\|0\rangle_2\|0\rangle_4\|1\rangle_{10}$	$\frac{1}{4\sqrt{2}}(\alpha a\|000\rangle+\beta b\|001\rangle-\gamma c\|110\rangle-\delta d\|111\rangle)_{679}$

表 1(续)

测量结果	$\vert\varphi\rangle_{679}$ 的状态
$\vert\Phi^+\rangle_{15}\vert\Phi^+\rangle_{38}\vert1\rangle_2\vert0\rangle_4\vert1\rangle_{10}$、$\vert\Phi^+\rangle_{15}\vert\Phi^-\rangle_{38}\vert1\rangle_2\vert1\rangle_4\vert1\rangle_{10}$ $\vert\Phi^-\rangle_{15}\vert\Phi^+\rangle_{38}\vert0\rangle_2\vert0\rangle_4\vert1\rangle_{10}$、$\vert\Phi^-\rangle_{15}\vert\Phi^-\rangle_{38}\vert0\rangle_2\vert1\rangle_4\vert1\rangle_{10}$ $\vert\Phi^+\rangle_{15}\vert\Phi^+\rangle_{38}\vert1\rangle_2\vert1\rangle_4\vert0\rangle_{10}$、$\vert\Phi^+\rangle_{15}\vert\Phi^-\rangle_{38}\vert1\rangle_2\vert0\rangle_4\vert0\rangle_{10}$ $\vert\Phi^-\rangle_{15}\vert\Phi^+\rangle_{38}\vert0\rangle_2\vert1\rangle_4\vert0\rangle_{10}$、$\vert\Phi^-\rangle_{15}\vert\Phi^-\rangle_{38}\vert0\rangle_2\vert0\rangle_4\vert0\rangle_{10}$	$\frac{1}{4\sqrt{2}}(\alpha a\vert000\rangle-\beta b\vert001\rangle-\gamma c\vert110\rangle+\delta d\vert111\rangle)_{679}$
$\vert\Psi^+\rangle_{15}\vert\Phi^+\rangle_{38}\vert0\rangle_2\vert0\rangle_4\vert0\rangle_{10}$、$\vert\Psi^+\rangle_{15}\vert\Phi^-\rangle_{38}\vert0\rangle_2\vert1\rangle_4\vert0\rangle_{10}$ $\vert\Psi^-\rangle_{15}\vert\Phi^+\rangle_{38}\vert1\rangle_2\vert0\rangle_4\vert0\rangle_{10}$、$\vert\Psi^-\rangle_{15}\vert\Phi^-\rangle_{38}\vert1\rangle_2\vert1\rangle_4\vert0\rangle_{10}$ $\vert\Psi^+\rangle_{15}\vert\Phi^+\rangle_{38}\vert0\rangle_2\vert1\rangle_4\vert1\rangle_{10}$、$\vert\Psi^+\rangle_{15}\vert\Phi^-\rangle_{38}\vert0\rangle_2\vert0\rangle_4\vert1\rangle_{10}$ $\vert\Psi^-\rangle_{15}\vert\Phi^+\rangle_{38}\vert1\rangle_2\vert1\rangle_4\vert1\rangle_{10}$、$\vert\Psi^-\rangle_{15}\vert\Phi^-\rangle_{38}\vert1\rangle_2\vert0\rangle_4\vert1\rangle_{10}$	$\frac{1}{4\sqrt{2}}(\alpha c\vert110\rangle-\beta d\vert111\rangle+\gamma a\vert000\rangle+\delta b\vert001\rangle)_{679}$
$\vert\Psi^+\rangle_{15}\vert\Phi^+\rangle_{38}\vert0\rangle_2\vert0\rangle_4\vert1\rangle_{10}$、$\vert\Psi^+\rangle_{15}\vert\Phi^-\rangle_{38}\vert0\rangle_2\vert1\rangle_4\vert1\rangle_{10}$ $\vert\Psi^-\rangle_{15}\vert\Phi^+\rangle_{38}\vert1\rangle_2\vert0\rangle_4\vert1\rangle_{10}$、$\vert\Psi^-\rangle_{15}\vert\Phi^-\rangle_{38}\vert1\rangle_2\vert1\rangle_4\vert1\rangle_{10}$ $\vert\Psi^+\rangle_{15}\vert\Phi^+\rangle_{38}\vert0\rangle_2\vert1\rangle_4\vert0\rangle_{10}$、$\vert\Psi^+\rangle_{15}\vert\Phi^-\rangle_{38}\vert0\rangle_2\vert0\rangle_4\vert0\rangle_{10}$ $\vert\Psi^-\rangle_{15}\vert\Phi^+\rangle_{38}\vert1\rangle_2\vert1\rangle_4\vert0\rangle_{10}$、$\vert\Psi^-\rangle_{15}\vert\Phi^-\rangle_{38}\vert1\rangle_2\vert0\rangle_4\vert0\rangle_{10}$	$\frac{1}{4\sqrt{2}}(\alpha c\vert110\rangle+\beta d\vert111\rangle+\gamma a\vert000\rangle-\delta b\vert001\rangle)_{679}$
$\vert\Psi^+\rangle_{15}\vert\Phi^+\rangle_{38}\vert1\rangle_2\vert0\rangle_4\vert0\rangle_{10}$、$\vert\Psi^+\rangle_{15}\vert\Phi^-\rangle_{38}\vert1\rangle_2\vert1\rangle_4\vert0\rangle_{10}$ $\vert\Psi^-\rangle_{15}\vert\Phi^+\rangle_{38}\vert0\rangle_2\vert0\rangle_4\vert0\rangle_{10}$、$\vert\Psi^-\rangle_{15}\vert\Phi^-\rangle_{38}\vert0\rangle_2\vert1\rangle_4\vert0\rangle_{10}$ $\vert\Psi^+\rangle_{15}\vert\Phi^+\rangle_{38}\vert1\rangle_2\vert1\rangle_4\vert1\rangle_{10}$、$\vert\Psi^+\rangle_{15}\vert\Phi^-\rangle_{38}\vert1\rangle_2\vert0\rangle_4\vert1\rangle_{10}$ $\vert\Psi^-\rangle_{15}\vert\Phi^+\rangle_{38}\vert0\rangle_2\vert1\rangle_4\vert1\rangle_{10}$、$\vert\Psi^-\rangle_{15}\vert\Phi^-\rangle_{38}\vert0\rangle_2\vert0\rangle_4\vert1\rangle_{10}$	$\frac{1}{4\sqrt{2}}(\alpha c\vert110\rangle-\beta d\vert111\rangle-\gamma a\vert000\rangle-\delta b\vert001\rangle)_{679}$
$\vert\Psi^+\rangle_{15}\vert\Phi^+\rangle_{38}\vert1\rangle_2\vert0\rangle_4\vert1\rangle_{10}$、$\vert\Psi^+\rangle_{15}\vert\Phi^-\rangle_{38}\vert1\rangle_2\vert1\rangle_4\vert1\rangle_{10}$ $\vert\Psi^-\rangle_{15}\vert\Phi^+\rangle_{38}\vert0\rangle_2\vert0\rangle_4\vert1\rangle_{10}$、$\vert\Psi^-\rangle_{15}\vert\Phi^-\rangle_{38}\vert0\rangle_2\vert1\rangle_4\vert1\rangle_{10}$ $\vert\Psi^+\rangle_{15}\vert\Phi^+\rangle_{38}\vert1\rangle_2\vert1\rangle_4\vert0\rangle_{10}$、$\vert\Psi^+\rangle_{15}\vert\Phi^-\rangle_{38}\vert1\rangle_2\vert0\rangle_4\vert0\rangle_{10}$ $\vert\Psi^-\rangle_{15}\vert\Phi^+\rangle_{38}\vert0\rangle_2\vert1\rangle_4\vert0\rangle_{10}$、$\vert\Psi^-\rangle_{15}\vert\Phi^-\rangle_{38}\vert0\rangle_2\vert0\rangle_4\vert0\rangle_{10}$	$\frac{1}{4\sqrt{2}}(\alpha c\vert110\rangle+\beta d\vert111\rangle-\gamma a\vert000\rangle+\delta b\vert001\rangle)_{679}$
$\vert\Phi^+\rangle_{15}\vert\Psi^+\rangle_{38}\vert0\rangle_2\vert0\rangle_4\vert0\rangle_{10}$、$\vert\Phi^+\rangle_{15}\vert\Psi^-\rangle_{38}\vert0\rangle_2\vert1\rangle_4\vert0\rangle_{10}$ $\vert\Phi^-\rangle_{15}\vert\Psi^+\rangle_{38}\vert1\rangle_2\vert0\rangle_4\vert0\rangle_{10}$、$\vert\Phi^-\rangle_{15}\vert\Psi^-\rangle_{38}\vert1\rangle_2\vert1\rangle_4\vert0\rangle_{10}$	$\frac{1}{4\sqrt{2}}(\alpha b\vert001\rangle+\beta a\vert000\rangle-\gamma d\vert111\rangle+\delta c\vert110\rangle)_{679}$
$\vert\Phi^+\rangle_{15}\vert\Psi^+\rangle_{38}\vert0\rangle_2\vert0\rangle_4\vert1\rangle_{10}$、$\vert\Phi^+\rangle_{15}\vert\Psi^-\rangle_{38}\vert0\rangle_2\vert1\rangle_4\vert1\rangle_{10}$ $\vert\Phi^-\rangle_{15}\vert\Psi^+\rangle_{38}\vert1\rangle_2\vert0\rangle_4\vert1\rangle_{10}$、$\vert\Phi^-\rangle_{15}\vert\Psi^-\rangle_{38}\vert1\rangle_2\vert1\rangle_4\vert1\rangle_{10}$	$\frac{1}{4\sqrt{2}}(-\alpha b\vert001\rangle+\beta a\vert000\rangle+\gamma d\vert111\rangle+\delta c\vert110\rangle)_{679}$
$\vert\Phi^+\rangle_{15}\vert\Psi^+\rangle_{38}\vert0\rangle_2\vert1\rangle_4\vert0\rangle_{10}$、$\vert\Phi^+\rangle_{15}\vert\Psi^-\rangle_{38}\vert0\rangle_2\vert0\rangle_4\vert0\rangle_{10}$ $\vert\Phi^-\rangle_{15}\vert\Psi^+\rangle_{38}\vert1\rangle_2\vert1\rangle_4\vert0\rangle_{10}$、$\vert\Phi^-\rangle_{15}\vert\Psi^-\rangle_{38}\vert1\rangle_2\vert0\rangle_4\vert0\rangle_{10}$	$\frac{1}{4\sqrt{2}}(\alpha b\vert001\rangle-\beta a\vert000\rangle-\gamma d\vert111\rangle-\delta c\vert110\rangle)_{679}$
$\vert\Phi^+\rangle_{15}\vert\Psi^+\rangle_{38}\vert0\rangle_2\vert1\rangle_4\vert1\rangle_{10}$、$\vert\Phi^+\rangle_{15}\vert\Psi^-\rangle_{38}\vert0\rangle_2\vert0\rangle_4\vert1\rangle_{10}$ $\vert\Phi^-\rangle_{15}\vert\Psi^+\rangle_{38}\vert1\rangle_2\vert1\rangle_4\vert1\rangle_{10}$、$\vert\Phi^-\rangle_{15}\vert\Psi^-\rangle_{38}\vert1\rangle_2\vert0\rangle_4\vert1\rangle_{10}$	$\frac{1}{4\sqrt{2}}(-\alpha b\vert001\rangle-\beta a\vert000\rangle+\gamma d\vert111\rangle-\delta c\vert110\rangle)_{679}$
$\vert\Phi^+\rangle_{15}\vert\Psi^+\rangle_{38}\vert1\rangle_2\vert0\rangle_4\vert0\rangle_{10}$、$\vert\Phi^+\rangle_{15}\vert\Psi^-\rangle_{38}\vert1\rangle_2\vert1\rangle_4\vert0\rangle_{10}$ $\vert\Phi^-\rangle_{15}\vert\Psi^+\rangle_{38}\vert0\rangle_2\vert0\rangle_4\vert0\rangle_{10}$、$\vert\Phi^-\rangle_{15}\vert\Psi^-\rangle_{38}\vert0\rangle_2\vert1\rangle_4\vert0\rangle_{10}$	$\frac{1}{4\sqrt{2}}(\alpha b\vert001\rangle+\beta a\vert000\rangle+\gamma d\vert111\rangle-\delta c\vert110\rangle)_{679}$
$\vert\Phi^+\rangle_{15}\vert\Psi^+\rangle_{38}\vert1\rangle_2\vert0\rangle_4\vert1\rangle_{10}$、$\vert\Phi^+\rangle_{15}\vert\Psi^-\rangle_{38}\vert1\rangle_2\vert1\rangle_4\vert1\rangle_{10}$ $\vert\Phi^-\rangle_{15}\vert\Psi^+\rangle_{38}\vert0\rangle_2\vert0\rangle_4\vert1\rangle_{10}$、$\vert\Phi^-\rangle_{15}\vert\Psi^-\rangle_{38}\vert0\rangle_2\vert1\rangle_4\vert1\rangle_{10}$	$\frac{1}{4\sqrt{2}}(-\alpha b\vert001\rangle+\beta a\vert000\rangle-\gamma d\vert111\rangle-\delta c\vert110\rangle)_{679}$
$\vert\Phi^+\rangle_{15}\vert\Psi^+\rangle_{38}\vert1\rangle_2\vert1\rangle_4\vert0\rangle_{10}$、$\vert\Phi^+\rangle_{15}\vert\Psi^-\rangle_{38}\vert1\rangle_2\vert0\rangle_4\vert0\rangle_{10}$ $\vert\Phi^-\rangle_{15}\vert\Psi^+\rangle_{38}\vert0\rangle_2\vert1\rangle_4\vert0\rangle_{10}$、$\vert\Phi^-\rangle_{15}\vert\Psi^-\rangle_{38}\vert0\rangle_2\vert0\rangle_4\vert0\rangle_{10}$	$\frac{1}{4\sqrt{2}}(\alpha b\vert001\rangle-\beta a\vert000\rangle+\gamma d\vert111\rangle+\delta c\vert110\rangle)_{679}$
$\vert\Phi^+\rangle_{15}\vert\Psi^+\rangle_{38}\vert1\rangle_2\vert1\rangle_4\vert1\rangle_{10}$、$\vert\Phi^+\rangle_{15}\vert\Psi^-\rangle_{38}\vert1\rangle_2\vert0\rangle_4\vert1\rangle_{10}$ $\vert\Phi^-\rangle_{15}\vert\Psi^+\rangle_{38}\vert0\rangle_2\vert1\rangle_4\vert1\rangle_{10}$、$\vert\Phi^-\rangle_{15}\vert\Psi^-\rangle_{38}\vert0\rangle_2\vert0\rangle_4\vert1\rangle_{10}$	$\frac{1}{4\sqrt{2}}(-\alpha b\vert001\rangle-\beta a\vert000\rangle-\gamma d\vert111\rangle+\delta c\vert110\rangle)_{679}$
$\vert\Psi^+\rangle_{15}\vert\Psi^+\rangle_{38}\vert0\rangle_2\vert0\rangle_4\vert0\rangle_{10}$、$\vert\Psi^+\rangle_{15}\vert\Psi^-\rangle_{38}\vert0\rangle_2\vert1\rangle_4\vert0\rangle_{10}$ $\vert\Psi^-\rangle_{15}\vert\Psi^+\rangle_{38}\vert1\rangle_2\vert0\rangle_4\vert0\rangle_{10}$、$\vert\Psi^-\rangle_{15}\vert\Psi^-\rangle_{38}\vert1\rangle_2\vert1\rangle_4\vert0\rangle_{10}$	$\frac{1}{4\sqrt{2}}(-\alpha d\vert111\rangle+\beta c\vert110\rangle+\gamma b\vert001\rangle+\delta a\vert000\rangle)_{679}$
$\vert\Psi^+\rangle_{15}\vert\Psi^+\rangle_{38}\vert0\rangle_2\vert0\rangle_4\vert1\rangle_{10}$、$\vert\Psi^+\rangle_{15}\vert\Psi^-\rangle_{38}\vert0\rangle_2\vert1\rangle_4\vert1\rangle_{10}$ $\vert\Psi^-\rangle_{15}\vert\Psi^+\rangle_{38}\vert1\rangle_2\vert0\rangle_4\vert1\rangle_{10}$、$\vert\Psi^-\rangle_{15}\vert\Psi^-\rangle_{38}\vert1\rangle_2\vert1\rangle_4\vert1\rangle_{10}$	$\frac{1}{4\sqrt{2}}(\alpha d\vert111\rangle+\beta c\vert110\rangle-\gamma b\vert001\rangle+\delta a\vert000\rangle)_{679}$
$\vert\Psi^+\rangle_{15}\vert\Psi^+\rangle_{38}\vert0\rangle_2\vert1\rangle_4\vert0\rangle_{10}$、$\vert\Psi^+\rangle_{15}\vert\Psi^-\rangle_{38}\vert0\rangle_2\vert0\rangle_4\vert0\rangle_{10}$ $\vert\Psi^-\rangle_{15}\vert\Psi^+\rangle_{38}\vert1\rangle_2\vert1\rangle_4\vert0\rangle_{10}$、$\vert\Psi^-\rangle_{15}\vert\Psi^-\rangle_{38}\vert1\rangle_2\vert0\rangle_4\vert0\rangle_{10}$	$\frac{1}{4\sqrt{2}}(-\alpha d\vert111\rangle-\beta c\vert110\rangle+\gamma b\vert001\rangle-\delta a\vert000\rangle)_{679}$
$\vert\Psi^+\rangle_{15}\vert\Psi^+\rangle_{38}\vert0\rangle_2\vert1\rangle_4\vert1\rangle_{10}$、$\vert\Psi^+\rangle_{15}\vert\Psi^-\rangle_{38}\vert0\rangle_2\vert0\rangle_4\vert1\rangle_{10}$ $\vert\Psi^-\rangle_{15}\vert\Psi^+\rangle_{38}\vert1\rangle_2\vert1\rangle_4\vert1\rangle_{10}$、$\vert\Psi^-\rangle_{15}\vert\Psi^-\rangle_{38}\vert1\rangle_2\vert0\rangle_4\vert1\rangle_{10}$	$\frac{1}{4\sqrt{2}}(\alpha d\vert111\rangle-\beta c\vert110\rangle-\gamma b\vert001\rangle-\delta a\vert000\rangle)_{679}$

表 1(续)

测量结果	$\vert\varphi\rangle_{679}$ 的状态
$\vert\Psi^+\rangle_{15}\ \vert\Psi^+\rangle_{38}\ \vert 1\rangle_2\ \vert 0\rangle_4\ \vert 0\rangle_{10}$、$\vert\Psi^+\rangle_{15}\ \vert\Psi^-\rangle_{38}\ \vert 1\rangle_2\ \vert 1\rangle_4\ \vert 0\rangle_{10}$ $\vert\Psi^-\rangle_{15}\ \vert\Psi^+\rangle_{38}\ \vert 0\rangle_2\ \vert 0\rangle_4\ \vert 0\rangle_{10}$、$\vert\Psi^-\rangle_{15}\ \vert\Psi^-\rangle_{38}\ \vert 0\rangle_2\ \vert 1\rangle_4\ \vert 0\rangle_{10}$	$\frac{1}{4\sqrt{2}}(-\alpha d\vert 111\rangle+\beta c\vert 110\rangle-\gamma b\vert 001\rangle-\delta a\vert 000\rangle)_{679}$
$\vert\Psi^+\rangle_{15}\ \vert\Psi^+\rangle_{38}\ \vert 1\rangle_2\ \vert 0\rangle_4\ \vert 1\rangle_{10}$、$\vert\Psi^+\rangle_{15}\ \vert\Psi^-\rangle_{38}\ \vert 1\rangle_2\ \vert 1\rangle_4\ \vert 1\rangle_{10}$ $\vert\Psi^-\rangle_{15}\ \vert\Psi^+\rangle_{38}\ \vert 0\rangle_2\ \vert 0\rangle_4\ \vert 1\rangle_{10}$、$\vert\Psi^-\rangle_{15}\ \vert\Psi^-\rangle_{38}\ \vert 0\rangle_2\ \vert 1\rangle_4\ \vert 1\rangle_{10}$	$\frac{1}{4\sqrt{2}}(\alpha d\vert 111\rangle+\beta c\vert 110\rangle+\gamma b\vert 001\rangle-\delta a\vert 000\rangle)_{679}$
$\vert\Psi^+\rangle_{15}\ \vert\Psi^+\rangle_{38}\ \vert 1\rangle_2\ \vert 1\rangle_4\ \vert 0\rangle_{10}$、$\vert\Psi^+\rangle_{15}\ \vert\Psi^-\rangle_{38}\ \vert 1\rangle_2\ \vert 0\rangle_4\ \vert 0\rangle_{10}$ $\vert\Psi^-\rangle_{15}\ \vert\Psi^+\rangle_{38}\ \vert 0\rangle_2\ \vert 1\rangle_4\ \vert 0\rangle_{10}$、$\vert\Psi^-\rangle_{15}\ \vert\Psi^-\rangle_{38}\ \vert 0\rangle_2\ \vert 0\rangle_4\ \vert 0\rangle_{10}$	$\frac{1}{4\sqrt{2}}(-\alpha d\vert 111\rangle-\beta c\vert 110\rangle-\gamma b\vert 001\rangle+\delta a\vert 000\rangle)_{679}$
$\vert\Psi^+\rangle_{15}\ \vert\Psi^+\rangle_{38}\ \vert 1\rangle_2\ \vert 1\rangle_4\ \vert 1\rangle_{10}$、$\vert\Psi^+\rangle_{15}\ \vert\Psi^-\rangle_{38}\ \vert 1\rangle_2\ \vert 0\rangle_4\ \vert 1\rangle_{10}$ $\vert\Psi^-\rangle_{15}\ \vert\Psi^+\rangle_{38}\ \vert 0\rangle_2\ \vert 1\rangle_4\ \vert 1\rangle_{10}$、$\vert\Psi^-\rangle_{15}\ \vert\Psi^-\rangle_{38}\ \vert 0\rangle_2\ \vert 0\rangle_4\ \vert 1\rangle_{10}$	$\frac{1}{4\sqrt{2}}(\alpha d\vert 111\rangle-\beta c\vert 110\rangle+\gamma b\vert 001\rangle+\delta a\vert 000\rangle)_{679}$

Alice 将(1,5)、(3,8)的 Bell 基联合测量结果和粒子 2、4 的单粒子测量结果通过经典信道告诉 Bob,Charlie 也将粒子 10 的测量结果告诉 Bob.

假设接收到的测量结果为 $|\Phi^+\rangle_{15}$、$|\Phi^-\rangle_{38}$、$|0\rangle_2$、$|1\rangle_4$、$|0\rangle_{10}$,Bob 可以知道,粒子 6、7、9 的状态为 $|\varphi\rangle_{679}=\frac{1}{4\sqrt{2}}(\alpha a|000\rangle+\beta b|001\rangle+\gamma c|110\rangle+\delta d|111\rangle)_{679}$. 为了得到想要的原始态,Bob 引入辅助粒子 $|0\rangle_H$,系统变为 $|\varphi\rangle_{679H}=\frac{1}{4\sqrt{2}}(\alpha a|0000\rangle+\beta b|0010\rangle+\gamma c|1100\rangle+\delta d|1110\rangle)_{679H}$. Bob 以粒子 9 为控制粒子,以粒子 H 为目标粒子,进行控制非门操作,状态变为 $|\varphi\rangle_{679H}=\frac{1}{4\sqrt{2}}(\alpha a|0000\rangle+\beta b|0011\rangle+\gamma c|1100\rangle+\delta d|1111\rangle)_{679H}$.

由于系数 a、b、c、d 未知,Bob 再次引入初始状态为 $|0\rangle_A$ 的辅助粒子 A,并以基{$|00000\rangle$,$|00110\rangle$,$|11000\rangle$,$|11110\rangle$,$|00001\rangle$,$|00111\rangle$,$|11001\rangle$,$|11111\rangle$},进行联合幺正变换,变换矩阵为

$$U=\begin{pmatrix}\boldsymbol{A}_1 & \boldsymbol{A}_2\\ \boldsymbol{A}_2 & -\boldsymbol{A}_1\end{pmatrix}, \tag{8}$$

其中 $\boldsymbol{A}_i(i=1,2)$ 为 4×4 的对角矩阵,$\boldsymbol{A}_1=\mathrm{diag}(a_1,a_2,a_3,a_4)$,$\boldsymbol{A}_2=\mathrm{diag}(\sqrt{1-a_1^2},\sqrt{1-a_2^2},\sqrt{1-a_3^2},\sqrt{1-a_4^2})$. $a_i(i=1,2,3,4)$ 的取值与系统状态有关,对于 $|\varphi\rangle_{679HA}=\frac{1}{4\sqrt{2}}(\alpha a|00000\rangle+\beta b|00110\rangle+\gamma c|11000\rangle+\delta d|11110\rangle)_{679HA}$,$a_i(i=1,2,3,4)$ 可取为 $a_1=1$,$a_2=a/b$,$a_3=a/c$,$a_4=-a/d$. 幺正变换之后,$|\varphi\rangle_{679HA}$ 变为 $|\varphi\rangle_{679HA}=\frac{1}{4\sqrt{2}}a(\alpha|0000\rangle+\beta|0011\rangle+\gamma|1100\rangle-\delta|1111\rangle)_{679H}\otimes|0\rangle_A+\frac{1}{4\sqrt{2}}(\beta\sqrt{b^2-a^2}|1100\rangle+\gamma\sqrt{c^2-a^2}|1100\rangle-\delta\sqrt{d^2-a^2}|1111\rangle)_{679H}\otimes|1\rangle_A$.

可以发现,若辅助粒子 A 的测量结果为 $|0\rangle_A$,则隐形传输成功,若测量结果为 $|1\rangle_A$,则信息传输失败. 传输成功的概率为 $\frac{1}{32}|a|^2$. 总共有 128 种可能,每种可能成功的概率都是一致的,因此总的成功概率为 $4|a|^2$,当 $|a|=1/2$ 时,取得最大值,即选取最大纠缠态为量子信道时,隐形传态成功率为 100%,其余情况见表 2.

表 2 $|\varphi\rangle_{679H}$、Bob 对应的操作及 $a_i(i=1,2,3,4)$ 取值

$\vert\varphi\rangle_{679H}$ 的状态	幺正操作	a_1	a_2	a_3	a_4
$\frac{1}{4\sqrt{2}}(\alpha a\vert 0000\rangle+\beta b\vert 0010\rangle+\gamma c\vert 1100\rangle+\delta d\vert 1110\rangle)_{679H}$	$I_6\otimes I_7\otimes I_9\otimes I_H(U_{C-NOT})_{9H}$	1	$\frac{a}{b}$	$\frac{a}{c}$	$-\frac{a}{d}$
$\frac{1}{4\sqrt{2}}(\alpha a\vert 0000\rangle-\beta b\vert 0010\rangle+\gamma c\vert 1100\rangle-\delta d\vert 1110\rangle)_{679H}$	$I_6\otimes I_7\otimes I_9\otimes I_H(U_{C-NOT})_{9H}$	1	$-\frac{a}{b}$	$\frac{a}{c}$	$\frac{a}{d}$
$\frac{1}{4\sqrt{2}}(\alpha a\vert 0000\rangle+\beta b\vert 0010\rangle-\gamma c\vert 1100\rangle-\delta d\vert 1110\rangle)_{679H}$	$I_6\otimes I_7\otimes I_9\otimes I_H(U_{C-NOT})_{9H}$	1	$\frac{a}{b}$	$-\frac{a}{c}$	$\frac{a}{d}$
$\frac{1}{4\sqrt{2}}(\alpha a\vert 0000\rangle-\beta b\vert 0010\rangle-\gamma c\vert 1100\rangle+\delta d\vert 1110\rangle)_{679H}$	$I_6\otimes I_7\otimes I_9\otimes I_H(U_{C-NOT})_{9H}$	1	$-\frac{a}{b}$	$-\frac{a}{c}$	$-\frac{a}{d}$
$\frac{1}{4\sqrt{2}}(\alpha c\vert 1100\rangle-\beta d\vert 1110\rangle+\gamma a\vert 0000\rangle+\delta b\vert 0010\rangle)_{679H}$	$\sigma_{x6}\otimes\sigma_{x7}\otimes I_9\otimes I_H(U_{C-NOT})_{9H}$	$\frac{a}{c}$	$-\frac{a}{d}$	1	$-\frac{a}{b}$

表 2(续)

$\vert\varphi\rangle_{679H}$ 的状态	幺正操作	a_1	a_2	a_3	a_4
$\frac{1}{4\sqrt{2}}(\alpha c\vert 1100\rangle+\beta d\vert 1110\rangle+\gamma a\vert 0000\rangle-\delta b\vert 0010\rangle)_{679H}$	$\sigma_{x6}\otimes\sigma_{x7}\otimes I_9\otimes I_H(U_{C-NOT})_{9H}$	$\frac{a}{c}$	$\frac{a}{d}$	1	$\frac{a}{b}$
$\frac{1}{4\sqrt{2}}(\alpha c\vert 1100\rangle-\beta d\vert 1110\rangle-\gamma a\vert 0000\rangle-\delta b\vert 0010\rangle)_{679H}$	$\sigma_{x6}\otimes\sigma_{x7}\otimes I_9\otimes I_H(U_{C-NOT})_{9H}$	$\frac{a}{c}$	$-\frac{a}{d}$	-1	$\frac{a}{b}$
$\frac{1}{4\sqrt{2}}(\alpha c\vert 1100\rangle+\beta d\vert 1110\rangle-\gamma a\vert 0000\rangle+\delta b\vert 0010\rangle)_{679H}$	$\sigma_{x6}\otimes\sigma_{x7}\otimes I_9\otimes I_H(U_{C-NOT})_{9H}$	$\frac{a}{c}$	$\frac{a}{d}$	-1	$-\frac{a}{b}$
$\frac{1}{4\sqrt{2}}(\alpha b\vert 0010\rangle+\beta a\vert 0000\rangle-\gamma d\vert 1110\rangle+\delta c\vert 1100\rangle)_{679H}$	$I_6\otimes I_7\otimes\sigma_{x9}\otimes I_H(U_{C-NOT})_{9H}$	$\frac{a}{b}$	1	$-\frac{a}{d}$	$-\frac{a}{c}$
$\frac{1}{4\sqrt{2}}(-\alpha b\vert 0010\rangle+\beta a\vert 0000\rangle+\gamma d\vert 1110\rangle+\delta c\vert 1100\rangle)_{679H}$	$I_6\otimes I_7\otimes\sigma_{x9}\otimes I_H(U_{C-NOT})_{9H}$	$-\frac{a}{b}$	1	$\frac{a}{d}$	$-\frac{a}{c}$
$\frac{1}{4\sqrt{2}}(\alpha b\vert 0010\rangle-\beta a\vert 0000\rangle-\gamma d\vert 1110\rangle-\delta c\vert 1100\rangle)_{679H}$	$I_6\otimes I_7\otimes\sigma_{x9}\otimes I_H(U_{C-NOT})_{9H}$	$\frac{a}{b}$	-1	$-\frac{a}{d}$	$\frac{a}{c}$
$\frac{1}{4\sqrt{2}}(-\alpha b\vert 0010\rangle-\beta a\vert 0000\rangle+\gamma d\vert 1110\rangle-\delta c\vert 1100\rangle)_{679H}$	$I_6\otimes I_7\otimes\sigma_{x9}\otimes I_H(U_{C-NOT})_{9H}$	$-\frac{a}{b}$	-1	$\frac{a}{d}$	$\frac{a}{c}$
$\frac{1}{4\sqrt{2}}(\alpha b\vert 0010\rangle+\beta a\vert 0000\rangle+\gamma d\vert 1110\rangle-\delta c\vert 1100\rangle)_{679H}$	$I_6\otimes I_7\otimes\sigma_{x9}\otimes I_H(U_{C-NOT})_{9H}$	$\frac{a}{b}$	1	$\frac{a}{d}$	$\frac{a}{c}$
$\frac{1}{4\sqrt{2}}(-\alpha b\vert 0010\rangle+\beta a\vert 0000\rangle-\gamma d\vert 1110\rangle-\delta c\vert 1100\rangle)_{679H}$	$I_6\otimes I_7\otimes\sigma_{x9}\otimes I_H(U_{C-NOT})_{9H}$	$-\frac{a}{b}$	1	$-\frac{a}{d}$	$\frac{a}{c}$
$\frac{1}{4\sqrt{2}}(\alpha b\vert 0010\rangle-\beta a\vert 0000\rangle+\gamma d\vert 1110\rangle+\delta c\vert 1100\rangle)_{679H}$	$I_6\otimes I_7\otimes\sigma_{x9}\otimes I_H(U_{C-NOT})_{9H}$	$\frac{a}{b}$	-1	$\frac{a}{d}$	$-\frac{a}{c}$
$\frac{1}{4\sqrt{2}}(-\alpha b\vert 0010\rangle-\beta a\vert 0000\rangle-\gamma d\vert 1110\rangle+\delta c\vert 1100\rangle)_{679H}$	$I_6\otimes I_7\otimes\sigma_{x9}\otimes I_H(U_{C-NOT})_{9H}$	$-\frac{a}{b}$	-1	$-\frac{a}{d}$	$-\frac{a}{c}$
$\frac{1}{4\sqrt{2}}(-\alpha d\vert 1110\rangle+\beta c\vert 1100\rangle+\gamma b\vert 0010\rangle+\delta a\vert 0000\rangle)_{679H}$	$\sigma_{x6}\otimes\sigma_{x7}\otimes\sigma_{x9}\otimes I_H(U_{C-NOT})_{9H}$	$-\frac{a}{d}$	$\frac{a}{c}$	$\frac{a}{b}$	-1
$\frac{1}{4\sqrt{2}}(\alpha d\vert 1110\rangle+\beta c\vert 1100\rangle-\gamma b\vert 0010\rangle+\delta a\vert 0000\rangle)_{679H}$	$\sigma_{x6}\otimes\sigma_{x7}\otimes\sigma_{x9}\otimes I_H(U_{C-NOT})_{9H}$	$\frac{a}{d}$	$\frac{a}{c}$	$-\frac{a}{b}$	-1
$\frac{1}{4\sqrt{2}}(-\alpha d\vert 1110\rangle-\beta c\vert 1100\rangle+\gamma b\vert 0010\rangle-\delta a\vert 0000\rangle)_{679H}$	$\sigma_{x6}\otimes\sigma_{x7}\otimes\sigma_{x9}\otimes I_H(U_{C-NOT})_{9H}$	$-\frac{a}{d}$	$-\frac{a}{c}$	$\frac{a}{b}$	1
$\frac{1}{4\sqrt{2}}(\alpha d\vert 1110\rangle-\beta c\vert 1100\rangle-\gamma b\vert 0010\rangle-\delta a\vert 0000\rangle)_{679H}$	$\sigma_{x6}\otimes\sigma_{x7}\otimes\sigma_{x9}\otimes I_H(U_{C-NOT})_{9H}$	$\frac{a}{d}$	$-\frac{a}{c}$	$-\frac{a}{b}$	1
$\frac{1}{4\sqrt{2}}(-\alpha d\vert 1110\rangle+\beta c\vert 1100\rangle-\gamma b\vert 0010\rangle-\delta a\vert 0000\rangle)_{679H}$	$\sigma_{x6}\otimes\sigma_{x7}\otimes\sigma_{x9}\otimes I_H(U_{C-NOT})_{9H}$	$-\frac{a}{d}$	$\frac{a}{c}$	$-\frac{a}{b}$	1
$\frac{1}{4\sqrt{2}}(\alpha d\vert 1110\rangle+\beta c\vert 1100\rangle+\gamma b\vert 0010\rangle-\delta a\vert 0000\rangle)_{679H}$	$\sigma_{x6}\otimes\sigma_{x7}\otimes\sigma_{x9}\otimes I_H(U_{C-NOT})_{9H}$	$\frac{a}{d}$	$\frac{a}{c}$	$\frac{a}{b}$	1
$\frac{1}{4\sqrt{2}}(-\alpha d\vert 1110\rangle-\beta c\vert 1100\rangle-\gamma b\vert 0010\rangle+\delta a\vert 0000\rangle)_{679H}$	$\sigma_{x6}\otimes\sigma_{x7}\otimes\sigma_{x9}\otimes I_H(U_{C-NOT})_{9H}$	$-\frac{a}{d}$	$-\frac{a}{c}$	$-\frac{a}{b}$	-1
$\frac{1}{4\sqrt{2}}(\alpha d\vert 1110\rangle-\beta c\vert 1100\rangle+\gamma b\vert 0010\rangle+\delta a\vert 0000\rangle)_{679H}$	$\sigma_{x6}\otimes\sigma_{x7}\otimes\sigma_{x9}\otimes I_H(U_{C-NOT})_{9H}$	$\frac{a}{d}$	$-\frac{a}{c}$	$\frac{a}{b}$	-1

2　4 方参与的可控隐形传态

在该方案中，传递的信息依然为 4 粒子团簇态，量子信道依然为 6 粒子团簇态. 粒子的归属为 Alice 拥有粒子 1、2、3、4、5、8，Bob 拥有粒子 7、9，Charlie 拥有粒子 10，增加一个控制者 Daniel，拥有粒子 6.

Alice 和 Charlie 的操作与方案 1 相同，假设 Alice 的测量结果为 $\vert\Phi^+\rangle_{15}$、$\vert\Phi^-\rangle_{38}$、$\vert 0\rangle_2$、$\vert 1\rangle_4$，Charlie 对粒子 10 的测量结果为 $\vert 0\rangle_{10}$，由表 1 可知，此时粒子 6、7、9 的状态为 $\vert\varphi\rangle_{679}=\frac{1}{4\sqrt{2}}(\alpha a\vert 000\rangle+\beta b\vert 001\rangle+\gamma c\vert 110\rangle+\delta d\vert 111\rangle)_{679}$. 为了让 Bob 得到原始信息态，Daniel 对粒子 6 进行 H 变换和单粒子测量，若测量结果为 $\vert 0\rangle_6$，系统塌缩为 $\vert\varphi\rangle_{79}=\frac{1}{8}(\alpha a\vert 00\rangle+\beta b\vert 01\rangle+\gamma c\vert 10\rangle+\delta d\vert 11\rangle)_{79}$；若测量结果为 $\vert 1\rangle_6$，系统塌缩为 $\vert\varphi\rangle_{79}=\frac{1}{8}(\alpha a\vert 00\rangle+$

$\beta b|01\rangle-\gamma c|10\rangle-\delta d|11\rangle)_{79}$. 然后 Daniel 也将测量结果告诉 Bob.

假设 Bob 接收的测量结果为 $|\Phi^+\rangle_{15}$、$|\Phi^-\rangle_{38}$、$|0\rangle_2$、$|1\rangle_4$、$|0\rangle_{10}$、$|1\rangle_6$,粒子 7、9 的状态为 $|\varphi\rangle_{79}=\frac{1}{8}(\alpha a|00\rangle+\beta b|01\rangle-\gamma c|10\rangle-\delta d|11\rangle)_{79}$. 为了得到原始信息态,Bob 引入 2 个辅助粒子 $|0\rangle_H$、$|0\rangle_K$,粒子 7、9、H、K 的状态为 $|\varphi\rangle_{79HK}=\frac{1}{8}(\alpha a|0000\rangle+\beta b|0100\rangle-\gamma c|1000\rangle-\delta d|1100\rangle)_{79HK}$. Bob 以粒子 9 为控制粒子,粒子 H 和粒子 K 分别为目标粒子进行 2 次控制非门操作,再以粒子 7 为控制粒子,粒子 9 为目标粒子进行一次控制非门操作,最后以粒子 H、K 为控制粒子,以粒子 9 为目标粒子进行 2 比特控制 T 门操作,就可得到 $|\varphi\rangle_{79HK}=\frac{1}{8}(\alpha a|0000\rangle+\beta b|0011\rangle-\gamma c|1100\rangle-\delta d|1111\rangle)_{79HK}$.

Bob 再次引入辅助粒子 $|0\rangle_A$,进行联合幺正变换,选取合适的系数,就能以一定概率还原出原始信息态,具体操作与方案 1 类似,在此不再详细说明. 信息传输成功的概率为 $\frac{1}{64}|a|^2$,共有 256 种可能,每种可能成功的概率都是一致的,因此总的成功概率依然为 $4|a|^2$.

3 结论

本文提出了 2 种粒子归属不同的利用 6 粒子团簇态实现 4 粒子团簇态可控隐形传输的方案. 若控制方同意信息传递,发送方、接收方和控制方通过相应的操作,成功实现信息传递的概率为 $4|a|^2$,符合选用最大纠缠态为量子信息时,信息以 100% 的成功率被传输的规律. 与已有方案相比,本方案的优势有:(i) 利用相同的信息资源,传递了更多的信息. (ii) 实现控制传输,增强了信息传递的安全性. (iii) 选用部分纠缠的团簇态为量子信道,考虑了量子噪声对量子信道的影响,使方案具有更普遍的意义.

通过 2 种方案的对比发现,控制方的增加有利于信息传输安全性的提高,但是由于控制方的增加导致接收方掌握的粒子数减少,使接收方在还原原始信息态时的操作变得更加复杂.

4 参考文献

[1] Bennett C H,Brassard G,Crepeau C,et al. Teleporting an unknown quantum state via dual classical and Einstein-Podolsky-Rosen channels [J]. Phys Rev Lett,1993,70(13):1895-1899.

[2] Briegel H J,Raussendor F R. Persistent entanglement in arrays of interacting particles [J]. Physical Review Letters,2001,86(5):910-913.

[3] 尹义芬,张仕斌,昌燕,等. 基于四粒子团簇态实现二粒子任意态的量子隐形传态 [J]. 成都信息工程学院学报,2015,30(1):48-51.

[4] 肖仕敏,李渊华,桑明煌,等. 基于 5 粒子团簇态实现二粒子未知态的量子隐形传态 [J]. 江西师范大学学报:自然科学版,2012,36(4):370-372.

[5] 李渊华,刘俊昌,聂义友. 基于五粒子团簇态实现经济和简单的任意二粒子可控隐形传态 [J]. 光子学报,2010,39(11):2073-2077.

[6] 韩学峰,杨本朝. 四粒子团簇态的量子隐形传态 [J]. 河南理工大学学报,2013,32(6):768-771.

[7] 陈智鹏,李渊,胡之惠,等. 利用 GHZ 态和 EPR 态隐形传送四粒子团簇态 [J]. 上海电机学院学报,2010,13(3):135-139.

[8] Ming Ying,Zhang Shou. Probablistic teleportation of a cluster state [J]. Journal of Yanbian University:Nature Science,2010,36(4):313-316.

[9] Ming Ying. Probablistic teleportation of a four-particle cluster state [J]. Journal of Yanbian University:Nature Science,2009,35(2):137-140.

[10] 洪智慧,聂义友,李嵩松,等. 四粒子团簇态的量子隐形传态 [J]. 江西师范大学学报:自然科学版,2007,31(5):459-462.

[11] Karlsson A,Bourennane. Quantum teleportationusing three-particle entanglement [J]. Physical Review A,1998,58:4394-4400.

[12] 杨幼凤,叶志清. 基于四粒子团簇态实现量子态的双向通信 [J]. 江西师范大学学报:自然科学版,2013,37(5):497-499.

[13] 洪智慧,聂义友,黄亦斌,等. 基于四粒子团簇态的可控量子隐形传态 [J]. 量子电子学报,2008,25(4):458-461.

[14] 李艳平,王天银,尹宝银. 基于 cluster 态任意单粒子可控量子信息共享 [J]. 光子学报 2014,43(9):191-195.

[15] 洪智慧,聂义友,易小杰,等. 基于团簇态信道的双粒子纠缠态可控量子隐形传态 [J]. 江西师范大学学报:自然科学版,2008,32(4):425-428.

[16] 刘坤,李渊华,梁章坦,等. 基于 6 粒子团簇态的可控量子隐形传态 [J]. 江西师范大学学报:自然科学版,2010,34(6):612-614.

(下转第 144 页)

版,2015,39(6):551-555.
[17] Borgohain R,Li J,Selegue J P,et al. Electrochemical study of functionalized carbon nano-onions for high-performance supercapacitor electrodes [J]. J Phys Chem C,2012,116(28):15068-15075.

Preparation and Electrochemical Property of Submicron-Structured $K_{0.4}MoO_3$ Electrode Material

DAI Fang[1,2],ZHU Yangjun[1,2],ZHANG Zhichao[1,2],LIAO Qiansheng[1],LI Ping[2],ZHANG Lei[2*],WEN Zubiao[2]
(1. Jiangxi Province Key Laboratory of Precision Drive & Control,Nanchang Institute of Technology,Nanchang Jiangxi 330099,China;
2. College of Chemistry and Chemical Engineering,Jiangxi Normal University,Nanchang Jiangxi 330022,China)

Abstract: The electrode materials of submicron-structured K_xMoO_3($x=0.2,0.4,0.6,0.8$) were synthesized by high temperature solid-state method using $(NH_4)_6Mo_7O_{24}$ and K_2CO_3 as reactants. X-ray diffraction,scanning electron microscopy were used to investigate the crystal structure,morphology of the prepared materials, respectively. Their electrochemical properties were evaluated by cyclic voltammetry,galvanostatic charge-discharge and electrochemical impedance spectroscopy. The results showed that specific capacitance of K_xMoO_3 is in the order of $K_{0.4}MoO_3 > K_{0.8}MoO_3 > K_{0.6}MoO_3 > K_{0.2}MoO_3$ at same scan rates or current density. Meanwhile,$K_{0.4}MoO_3$ electrode material exhibits excellent rate capability and super-cycling behavior of 600 charge-discharge cycles in 0.5 mol · L^{-1} K_2SO_4 electrolyte,which maybe have a promising prospect for application in electrochemical capacitors.

Key words: electrochemical capacitors; electrode material; electrochemical property; $K_{0.4}MoO_3$

(责任编辑:刘显亮)

(上接第 132 页)

Controlled Teleportation of 4 Particle Cluster State

ZANG Peng,YI Tulin,HU Chaobin,TIAN Fei
(Huangpi NCO School,Air Force Early Warning Academy,Wuhan Hubei 430345,China)

Abstract: In order to achieve a more economical and secure teleportation of the 4 particle cluster state,two controlled teleportation schemes using 6 particle cluster states as the quantum channel are proposed. It is the three party involved in the controlled teleportation and the four party to participate in the controlled teleportation. The probability of success of the two schemes is consistent with the coordination of the control er,and the probability is $4|a|^2$. The successful transmission rate is 100% when the 6 particle cluster states of the maximal entanglement are used as the quantum channel. Through the comparison of the two schemes,it is found that the increase of the control side can effectively improve the security of information transmission,but also make the operation of the receiver to restore the original information more complex.

Key words: six-particle cluster state; four-particle cluster state; Bell state measurement; controlled teleportation

(责任编辑:冉小晓)