

# 基于 EPR 对的任意四粒子 Cluster 类态全概率联合远程制备

袁晓敏<sup>1</sup> 刘文杰<sup>1,2</sup> 刘琦<sup>1,2</sup> 鲁锦伸<sup>1</sup>

(南京信息工程大学计算机与软件学院 南京 210044)<sup>1</sup>

(南京信息工程大学江苏省网络监控中心 南京 210044)<sup>2</sup>

**摘要** 采用 4 个 EPR(Einstein-Podolsky-Rosen)对作为量子信道,提出一种新的全概率联合远程制备任意四粒子 Cluster 类态方案。在这个新的方案中,一个制备者执行四粒子投影测量,另一个制备者对手中的粒子执行二粒子投影测量。然后,接收者对手中二粒子进行某种么正操作,并分别对两个辅助粒子进行受控非门操作,从而最终得到需要制备的 Cluster 类态。与其他制备任意四粒子 Cluster 类态的全概率制备方案相比,所提协议效率较高,而且在实验上更经济可行。

**关键词** Cluster 类态,联合远程制备,ERP 对,投影测量,全概率

**中图分类号** TP309, TN918 **文献标识码** A **DOI** 10.11896/j.issn.1002-137X.2017.03.034

## Deterministic Joint Remote Preparation of Arbitrary Four-qubit Cluster-type Entangled State Using EPR Pairs

YUAN Xiao-min<sup>1</sup> LIU Wen-jie<sup>1,2</sup> LIU Qi<sup>1,2</sup> LU Jin-shen<sup>1</sup>

(School of Computer and Software, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China)<sup>1</sup>

(Jiangsu Engineering Center of Network Monitoring, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China)<sup>2</sup>

**Abstract** Taking four EPR (Einstein-Podolsky-Rosen) pairs as quantum channel, a new protocol for deterministic joint remote preparation of four-particle cluster-type states was presented. In the protocol, one of the senders performs a four-qubit projective measurement, while the other performs a bipartite projective measurement. Afterwards, the receiver just adopts some appropriate unitary operations on his/her own two particles, and then respectively applies a controlled-NOT gate on two other auxiliary particles. As a result, he/she can obtain the desired state. Compared with other protocols for deterministic remote preparation of arbitrary four-particle cluster-type states, our protocol is more efficient, and it is economic and feasible in the physical experiment.

**Keywords** Cluster-type state, Joint remote preparation, EPR pairs, Project measurement, Unit success probability

## 1 引言

在经典物理学中,传送一个物体只需要对其进行精确测量,将测量得到的信息发送给遥远的接收站,接收站根据信息实现物体的复制。而在量子理论中,由于量子态在测量之后会发生塌缩,因此精确的测量显然是不可能实现的。因此常规量子方法无法实现对量子的复制。

量子纠缠态在量子信息理论中起着非常重要的作用。1993年, Bennett 开创性地提出了单粒子量子态隐形传送方案(Quantum Teleportation, QT)<sup>[1]</sup>。该方案基于预先共享的量子纠缠来构造量子信息传输信道,利用局域操作和经典通信,将一个未知量子态在不同地域的发送者与接收者之间进行传送。之后, Lo<sup>[2]</sup>, Pati<sup>[3]</sup> 和 Bennett<sup>[4]</sup> 等人又提出一种新型量子通信方案——量子态远程制备(Remote State Preparation, RSP),该方案利用纠缠态和经典信道远程制备量子态。

然而, RSP 制备的是已知的量子态,相对于 QT, RSP 需要消耗的经典信息更少。因此, RSP 作为量子信息领域中一个新兴的研究方向逐渐受到广泛关注,更多的 RSP 协议被提出来<sup>[5-7]</sup>。

在 RSP 中,只有一个发送方和一个接收方,发送方能够得到待制备量子态的全部信息,这样可能会产生信息泄露。为了避免此问题,量子态联合远程制备(Joint Remote State Preparation, JRSP)被提出。在该方案中,一个量子态的全部信息被相互独立地分配给若干个发送者,也就是说,每一个发送者只知道待制备量子态的部分信息,他们只有全部联合起来才能帮助接收者重构出原来的量子态。2007年,夏燕等人<sup>[8]</sup>首先实现了多人合作制备已知量子态的 JRSP 方案。自此,很多研究者加入这个行列,提出了多种 JRSP 方案,实现了单粒子态<sup>[9-10]</sup>、Bell 态<sup>[11-13]</sup>、三粒子 GHZ 态<sup>[14-15]</sup>、四粒子 W 态<sup>[16-17]</sup>的联合远程制备。

到稿日期:2015-11-06 返修日期:2016-01-22 本文受国家自然科学基金项目(61373131, 61373016),江苏省高校优势学科建设工程资助项目,江苏省高等学校大学生创新创业训练计划项目(201310300018Z)资助。

袁晓敏(1991-),女,硕士,主要研究方向为量子安全通信, E-mail: yuanxiaomin1991@163.com; 刘文杰(1979-),男,博士,副教授,硕士生导师,主要研究方向为量子安全通信、量子多方计算、量子信息等; 刘琦(1979-),男,博士,教授,硕士生导师,主要研究方向为无线传感网、自动气象观测等; 鲁锦伸(1993-),男,主要研究方向为量子多安全计算。

最近,联合远程制备更多粒子引起了人们的注意。由于实现 JRSP 的关键在于测量基的巧妙构造,且制备任意四粒子需要构造的测量基是一个  $16 \times 16$  规模的矩阵,因此其目前仍然是一个难题。一些学者对此类问题进行了研究,并给出了一些制备特殊四粒子态(如 Cluster 类态)的方案。2011 年,Zhan 等人<sup>[18]</sup>提出了两种四粒子 Cluster 类态的 JRSP 协议,一种利用 6 个 EPR 对作为量子信道制备实系数或虚系数 Cluster 类态;另外一种利用两个六粒子非最大纠缠态制备实系数或虚系数 Cluster 类态。但这些方案还存在一些错误,比如酉操作未归一化、制备概率计算错误等。此后,An 等人<sup>[19]</sup>发现并改正了这些错误,并在此基础上进行改进,提出了一种新的 JRSP 协议,该协议也分别考虑实系数和虚系数两种情况,采用 3 个 EPR 对代替原来 6 个 EPR 对作为量子信道。随后,Hou<sup>[20]</sup>利用两个二粒子非最大纠缠态,同样实现了实系数情况下 Cluster 类态的远程制备,并将其扩展到任意多方。总体而言,以上这些协议大多为概率性的,即  $P_{suc} < 1$ ;且待制备量子态要么只考虑实系数情况,要么只包含虚系数情况,因此所制备的量子态并非真正意义上的任意 Cluster 类态。2013 年,Zhan 等人<sup>[21]</sup>提出了基于 EPR 对的任意四粒子 Cluster 态的两方全概率 RSP 协议(ZFL13)。为了实现多方联合制备,2015 年,陈正飞等人<sup>[22]</sup>提出一种利用三粒子 GHZ 态实现任意四粒子 Cluster 类态的全概率 JRSP 协议(CCL15)。为了节省量子资源,本文拟用 EPR 对作为量子信道来实现任意四粒子 Cluster 类态的全概率联合远程制备( $P_{suc} = 1$ )。

本文第 2 节提出了制备任意四粒子 Cluster 类态的确定性 JRSP 协议,并对其详细描述;第 3 节对本协议进行效率和安全性分析;最后对全文进行总结和讨论。

## 2 任意四粒子 Cluster 类态的全概率 JRSP 协议

简单起见,本文选取三方为例:两个制备者即 Alice 和 Bob,一个接收者即 Charlie。假设 Alice 和 Bob 需要帮助接收者 Charlie 联合制备的四粒子 Cluster 类态为:

$$|\phi\rangle = a|0000\rangle + be^{i\theta_1}|0011\rangle + ce^{i\theta_2}|1100\rangle + de^{i\theta_3}|1111\rangle \quad (1)$$

其中,  $a, b, c, d$  为实系数,且满足  $a^2 + b^2 + c^2 + d^2 = 1$ ,  $\theta_i (i=1, 2, 3)$  为虚部系数。将量子态  $|\phi\rangle$  的信息分割成两个部分,实部信息  $a, b, c, d$  分给 Alice,虚部信息  $\theta_i (i=1, 2, 3)$  分给 Bob。

为了完成制备, Alice, Bob 和 Charlie 需事先共享 4 个 EPR 对。

$$|Q\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|00\rangle + |11\rangle)_{A_1 B_1} \otimes \frac{1}{\sqrt{2}}(|00\rangle + |11\rangle)_{A_2 B_2} \otimes \frac{1}{\sqrt{2}}(|00\rangle + |11\rangle)_{A_3 C_1} \otimes \frac{1}{\sqrt{2}}(|00\rangle + |11\rangle)_{A_4 C_2} \quad (2)$$

其中,粒子  $A_1, A_2, A_3, A_4$  属于 Alice,  $B_1$  和  $B_2$  属于 Bob,  $C_1$  和  $C_2$  属于 Charlie(见图 1)。

图 1 中,实心点表示粒子,实线表示粒子间的纠缠。

由这 4 个 EPR 对组成的量子系统初态(2)可改写为:

$$|Q\rangle = (|00000000\rangle + |01010101\rangle + |10101010\rangle + |11111111\rangle + |00010001\rangle + |01001000\rangle + |10111011\rangle + |11101110\rangle + |00100010\rangle + |10011001\rangle + |01110111\rangle + |11001100\rangle +$$

$$|00110011\rangle + |01100110\rangle + |10001000\rangle + |11011101\rangle)_{A_1 A_2 A_3 A_4 B_1 B_2 C_1 C_2} \quad (3)$$

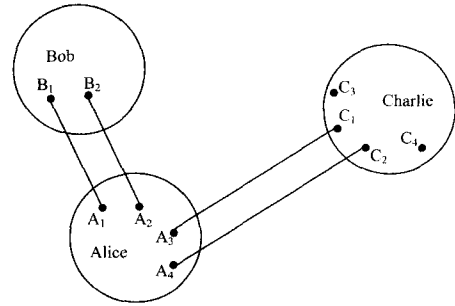


图 1 本协议中的共享量子信道

步骤 1 Alice 准备一组正交测量基  $\{|u_0\rangle, |u_1\rangle, \dots, |u_{15}\rangle\}$  来对手里的  $A_1, A_2, A_3$  和  $A_4$  粒子进行测量,这一组基的具体形式为:

$$\begin{pmatrix} |u_0\rangle \\ |u_1\rangle \\ \vdots \\ |u_{14}\rangle \\ |u_{15}\rangle \end{pmatrix}_{A_1 A_2 A_3 A_4} = U \begin{pmatrix} |\xi_0\rangle \\ |\xi_1\rangle \\ \vdots \\ |\xi_{14}\rangle \\ |\xi_{15}\rangle \end{pmatrix}_{A_1 A_2 A_3 A_4} \quad (4)$$

其中,

$$\begin{aligned} \xi_0 &= |0000\rangle, \xi_1 = |0101\rangle, \xi_2 = |1010\rangle, \xi_3 = |1111\rangle, \\ \xi_4 &= |0001\rangle, \xi_5 = |0100\rangle, \xi_6 = |1011\rangle, \xi_7 = |1110\rangle, \\ \xi_8 &= |1100\rangle, \xi_9 = |1001\rangle, \xi_{10} = |0010\rangle, \xi_{11} = |0111\rangle, \\ \xi_{12} &= |1101\rangle, \xi_{13} = |1000\rangle, \xi_{14} = |0011\rangle, \xi_{15} = |0110\rangle \end{aligned} \quad (5)$$

$$U = \begin{pmatrix} F & O & O & O \\ O & F & O & O \\ O & O & F & O \\ O & O & O & F \end{pmatrix} \quad (6)$$

其中,  $O$  是一个  $4 \times 4$  的零矩阵,且

$$F = \begin{pmatrix} a & b & c & d \\ b & -a & d & -c \\ c & -d & -a & b \\ d & c & -b & -a \end{pmatrix} \quad (7)$$

因此,式(3)可以被改写成:

$$|Q\rangle = \frac{1}{4} \sum_{k=0}^{15} |u_k\rangle_{A_1 A_2 A_3 A_4} |L_k\rangle_{B_1 B_2 C_1 C_2} \quad (8)$$

其中,

$$\begin{aligned} |L_0\rangle_{B_1 B_2 C_1 C_2} &= (a|0000\rangle + b|0101\rangle + c|1010\rangle + d|1111\rangle)_{B_1 B_2 C_1 C_2} \\ |L_1\rangle_{B_1 B_2 C_1 C_2} &= (b|0000\rangle - a|0101\rangle + d|1010\rangle - c|1111\rangle)_{B_1 B_2 C_1 C_2} \\ |L_2\rangle_{B_1 B_2 C_1 C_2} &= (c|0000\rangle - d|0101\rangle - a|1010\rangle + b|1111\rangle)_{B_1 B_2 C_1 C_2} \\ |L_3\rangle_{B_1 B_2 C_1 C_2} &= (d|0000\rangle + c|0101\rangle - b|1010\rangle - a|1111\rangle)_{B_1 B_2 C_1 C_2} \\ |L_4\rangle_{B_1 B_2 C_1 C_2} &= (a|0001\rangle + b|0100\rangle + c|1011\rangle + d|1110\rangle)_{B_1 B_2 C_1 C_2} \\ |L_5\rangle_{B_1 B_2 C_1 C_2} &= (b|0001\rangle - a|0100\rangle + d|1011\rangle - c|1110\rangle)_{B_1 B_2 C_1 C_2} \\ |L_6\rangle_{B_1 B_2 C_1 C_2} &= (c|0001\rangle - d|0100\rangle - a|1011\rangle + b|1110\rangle)_{B_1 B_2 C_1 C_2} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 |L_7\rangle_{B_1 B_2 C_1 C_2} &= (d|0001\rangle + c|0100\rangle - b|1011\rangle - a|1110\rangle)_{B_1 B_2 C_1 C_2} \\
 |L_8\rangle_{B_1 B_2 C_1 C_2} &= (a|1100\rangle + b|1001\rangle + c|0010\rangle + d|0111\rangle)_{B_1 B_2 C_1 C_2} \\
 |L_9\rangle_{B_1 B_2 C_1 C_2} &= (b|1100\rangle - a|1001\rangle + d|0010\rangle - c|0111\rangle)_{B_1 B_2 C_1 C_2} \\
 |L_{10}\rangle_{B_1 B_2 C_1 C_2} &= (c|1100\rangle - d|1001\rangle - a|0010\rangle + b|0111\rangle)_{B_1 B_2 C_1 C_2} \\
 |L_{11}\rangle_{B_1 B_2 C_1 C_2} &= (d|1100\rangle + c|1001\rangle - b|0010\rangle - a|0111\rangle)_{B_1 B_2 C_1 C_2} \\
 |L_{12}\rangle_{B_1 B_2 C_1 C_2} &= (a|1101\rangle + b|1000\rangle + c|0011\rangle + d|0110\rangle)_{B_1 B_2 C_1 C_2} \\
 |L_{13}\rangle_{B_1 B_2 C_1 C_2} &= (b|1101\rangle - a|1000\rangle + d|0011\rangle - c|0110\rangle)_{B_1 B_2 C_1 C_2} \\
 |L_{14}\rangle_{B_1 B_2 C_1 C_2} &= (c|1101\rangle - d|1000\rangle - a|0011\rangle + b|0110\rangle)_{B_1 B_2 C_1 C_2} \\
 |L_{15}\rangle_{B_1 B_2 C_1 C_2} &= (d|1101\rangle + c|1000\rangle - b|0011\rangle - a|0110\rangle)_{B_1 B_2 C_1 C_2} \quad (9)
 \end{aligned}$$

然后, Alice 通过经典信道将测量结果  $k$  告诉 Bob 和 Charlie.

步骤 2 Bob 根据自己手中的虚部信息  $\theta_i (i=1, 2, 3)$  以及 Alice 发送给他的结果  $k$ , 准备一组测量基  $\{|v_0\rangle, |v_1\rangle, |v_2\rangle, |v_3\rangle\}$  来对手里的  $B_1$  和  $B_2$  粒子进行测量, 这一组基的具体形式为:

$$\begin{pmatrix} |v_0\rangle \\ |v_1\rangle \\ |v_2\rangle \\ |v_3\rangle \end{pmatrix}_{B_1 B_2} = G^{(k \bmod 4)} \begin{pmatrix} \gamma_0 \\ \gamma_1 \\ \gamma_2 \\ \gamma_3 \end{pmatrix}_{B_1 B_2} \quad (10)$$

当  $0 \leq k \leq 7$  时

$$\begin{cases} \gamma_0 = |00\rangle \\ \gamma_1 = |01\rangle \\ \gamma_2 = |10\rangle \\ \gamma_3 = |11\rangle \end{cases} \quad (11)$$

当  $8 \leq k \leq 15$  时

$$\begin{cases} \gamma_0 = |11\rangle \\ \gamma_1 = |10\rangle \\ \gamma_2 = |00\rangle \\ \gamma_3 = |01\rangle \end{cases} \quad (12)$$

其中

$$G^{(0)} = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} 1 & e^{-i\theta_0} & e^{-i\theta_1} & e^{-i\theta_2} \\ 1 & -e^{-i\theta_0} & e^{-i\theta_1} & -e^{-i\theta_2} \\ 1 & -e^{-i\theta_0} & -e^{-i\theta_1} & e^{-i\theta_2} \\ 1 & e^{-i\theta_0} & -e^{-i\theta_1} & -e^{-i\theta_2} \end{pmatrix} \quad (13)$$

$$G^{(1)} = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} e^{-i\theta_0} & 1 & e^{-i\theta_2} & e^{-i\theta_1} \\ e^{-i\theta_0} & -1 & e^{-i\theta_2} & -e^{-i\theta_1} \\ e^{-i\theta_0} & -1 & -e^{-i\theta_2} & e^{-i\theta_1} \\ e^{-i\theta_0} & 1 & -e^{-i\theta_2} & -e^{-i\theta_1} \end{pmatrix} \quad (14)$$

$$G^{(2)} = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} e^{-i\theta_1} & e^{-i\theta_2} & 1 & e^{-i\theta_0} \\ e^{-i\theta_1} & -e^{-i\theta_2} & 1 & -e^{-i\theta_0} \\ e^{-i\theta_1} & -e^{-i\theta_2} & -1 & e^{-i\theta_0} \\ e^{-i\theta_1} & e^{-i\theta_2} & -1 & -e^{-i\theta_0} \end{pmatrix} \quad (15)$$

$$G^{(3)} = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} e^{-i\theta_2} & e^{-i\theta_1} & e^{-i\theta_0} & 1 \\ e^{-i\theta_2} & -e^{-i\theta_1} & e^{-i\theta_0} & -1 \\ e^{-i\theta_2} & -e^{-i\theta_1} & -e^{-i\theta_0} & 1 \\ e^{-i\theta_2} & e^{-i\theta_1} & -e^{-i\theta_0} & -1 \end{pmatrix} \quad (16)$$

基于这一组测量基, 量子态  $|L_k\rangle_{B_1 B_2 C_1 C_2}$  可表示为:

$$|L_k\rangle_{B_1 B_2 C_1 C_2} = \frac{1}{2} \sum_{l=0}^3 |v_l\rangle_{B_1 B_2} |D_{kl}\rangle_{C_1 C_2} \quad (17)$$

Bob 在测量之后, 通过经典信道把测量结果  $l (l=0, 1, 2, 3)$  告诉 Charlie.

步骤 3 Charlie 根据接收到的测量结果  $k, l$  选择相应的么正变换  $R_{kl}$  (见表 1), 操作完毕后, 手中的量子态  $|D_{kl}\rangle_{C_1 C_2}$  将处于状态:

$$|T\rangle_{C_1 C_2} = (a|00\rangle + be^{i\theta_0}|01\rangle + ce^{i\theta_1}|10\rangle + de^{i\theta_2}|11\rangle)_{C_1 C_2} \quad (18)$$

表 1 根据测量结果, 粒子  $C_1$  和  $C_2$  相应的么正变换

$k$	$l$	$ D_{kl}\rangle_{C_1 C_2}$	$R_{kl}$
0	0	$a 00\rangle + beZ^{i\theta_0} 01\rangle + ceZ^{i\theta_1} 10\rangle + deZ^{i\theta_2} 11\rangle$	$I_{C_1} \otimes I_{C_2}$
	1	$a 00\rangle - beZ^{i\theta_0} 01\rangle + ceZ^{i\theta_1} 10\rangle - deZ^{i\theta_2} 11\rangle$	$I_{C_1} \otimes Z_{C_2}$
	2	$a 00\rangle - beZ^{i\theta_0} 01\rangle - ceZ^{i\theta_1} 10\rangle + deZ^{i\theta_2} 11\rangle$	$Z_{C_1} \otimes Z_{C_2}$
	3	$a 00\rangle + beZ^{i\theta_0} 01\rangle - ceZ^{i\theta_1} 10\rangle - deZ^{i\theta_2} 11\rangle$	$Z_{C_1} \otimes I_{C_2}$
1	0	$beZ^{i\theta_0} 00\rangle - a 01\rangle + deZ^{i\theta_2} 10\rangle - ceZ^{i\theta_1} 11\rangle$	$I_{C_1} \otimes Z_{C_2} X_{C_2}$
	1	$beZ^{i\theta_0} 00\rangle + a 01\rangle + deZ^{i\theta_2} 10\rangle + ceZ^{i\theta_1} 11\rangle$	$I_{C_1} \otimes X_{C_2}$
	2	$beZ^{i\theta_0} 00\rangle + a 01\rangle - deZ^{i\theta_2} 10\rangle - ceZ^{i\theta_1} 11\rangle$	$Z_{C_1} \otimes X_{C_2}$
	3	$beZ^{i\theta_0} 00\rangle - a 01\rangle - deZ^{i\theta_2} 10\rangle + ceZ^{i\theta_1} 11\rangle$	$Z_{C_1} \otimes Z_{C_2} X_{C_2}$
2	0	$ceZ^{i\theta_1} 00\rangle - deZ^{i\theta_2} 01\rangle - a 10\rangle + beZ^{i\theta_0} 11\rangle$	$Z_{C_1} X_{C_1} \otimes Z_{C_2}$
	1	$ceZ^{i\theta_1} 00\rangle + deZ^{i\theta_2} 01\rangle - a 10\rangle - beZ^{i\theta_0} 11\rangle$	$Z_{C_1} X_{C_1} \otimes I_{C_2}$
	2	$ceZ^{i\theta_1} 00\rangle + deZ^{i\theta_2} 01\rangle + a 10\rangle + beZ^{i\theta_0} 11\rangle$	$X_{C_1} \otimes I_{C_2}$
	3	$ceZ^{i\theta_1} 00\rangle - deZ^{i\theta_2} 01\rangle + a 10\rangle - beZ^{i\theta_0} 11\rangle$	$X_{C_1} \otimes Z_{C_2}$
3	0	$deZ^{i\theta_2} 00\rangle + ceZ^{i\theta_1} 01\rangle - beZ^{i\theta_0} 10\rangle - a 11\rangle$	$Z_{C_1} X_{C_1} \otimes X_{C_2}$
	1	$deZ^{i\theta_2} 00\rangle - ceZ^{i\theta_1} 01\rangle - beZ^{i\theta_0} 10\rangle + a 11\rangle$	$Z_{C_1} X_{C_1} \otimes Z_{C_2} X_{C_2}$
	2	$deZ^{i\theta_2} 00\rangle - ceZ^{i\theta_1} 01\rangle + beZ^{i\theta_0} 10\rangle - a 11\rangle$	$X_{C_1} \otimes Z_{C_2} X_{C_2}$
	3	$deZ^{i\theta_2} 00\rangle + ceZ^{i\theta_1} 01\rangle + beZ^{i\theta_0} 10\rangle + a 11\rangle$	$X_{C_1} \otimes X_{C_2}$
4	0	$a 01\rangle + beZ^{i\theta_0} 00\rangle + ceZ^{i\theta_1} 11\rangle + deZ^{i\theta_2} 10\rangle$	$I_{C_1} \otimes X_{C_2}$
	1	$a 01\rangle - beZ^{i\theta_0} 00\rangle + ceZ^{i\theta_1} 11\rangle - deZ^{i\theta_2} 10\rangle$	$I_{C_1} \otimes X_{C_2} Z_{C_2}$
	2	$a 01\rangle - beZ^{i\theta_0} 00\rangle - ceZ^{i\theta_1} 11\rangle + deZ^{i\theta_2} 10\rangle$	$Z_{C_1} \otimes X_{C_2} Z_{C_2}$
	3	$a 01\rangle + beZ^{i\theta_0} 00\rangle - ceZ^{i\theta_1} 11\rangle - deZ^{i\theta_2} 10\rangle$	$Z_{C_1} \otimes X_{C_2}$
5	0	$beZ^{i\theta_0} 01\rangle - a 00\rangle + deZ^{i\theta_2} 11\rangle - ceZ^{i\theta_1} 10\rangle$	$I_{C_1} \otimes Z_{C_2}$
	1	$beZ^{i\theta_0} 01\rangle + a 00\rangle + deZ^{i\theta_2} 11\rangle + ceZ^{i\theta_1} 10\rangle$	$I_{C_1} \otimes I_{C_2}$
	2	$beZ^{i\theta_0} 01\rangle + a 00\rangle - deZ^{i\theta_2} 11\rangle - ceZ^{i\theta_1} 10\rangle$	$Z_{C_1} \otimes I_{C_2}$
	3	$beZ^{i\theta_0} 01\rangle - a 00\rangle - deZ^{i\theta_2} 11\rangle + ceZ^{i\theta_1} 10\rangle$	$Z_{C_1} \otimes Z_{C_2}$
6	0	$ceZ^{i\theta_1} 01\rangle - deZ^{i\theta_2} 00\rangle - a 11\rangle + beZ^{i\theta_0} 10\rangle$	$Z_{C_1} X_{C_1} \otimes X_{C_2} Z_{C_2}$
	1	$ceZ^{i\theta_1} 01\rangle + deZ^{i\theta_2} 00\rangle - a 11\rangle - beZ^{i\theta_0} 10\rangle$	$Z_{C_1} X_{C_1} \otimes X_{C_2}$
	2	$ceZ^{i\theta_1} 01\rangle + deZ^{i\theta_2} 00\rangle + a 11\rangle + beZ^{i\theta_0} 10\rangle$	$X_{C_1} \otimes X_{C_2}$
	3	$ceZ^{i\theta_1} 00\rangle - deZ^{i\theta_2} 01\rangle + a 10\rangle - beZ^{i\theta_0} 11\rangle$	$X_{C_1} \otimes X_{C_2} Z_{C_2}$
7	0	$deZ^{i\theta_2} 01\rangle + ceZ^{i\theta_1} 00\rangle - beZ^{i\theta_0} 11\rangle - a 10\rangle$	$Z_{C_1} X_{C_1} \otimes I_{C_2}$
	1	$deZ^{i\theta_2} 01\rangle - ceZ^{i\theta_1} 00\rangle - beZ^{i\theta_0} 11\rangle + a 10\rangle$	$Z_{C_1} X_{C_1} \otimes Z_{C_2}$
	2	$deZ^{i\theta_2} 01\rangle - ceZ^{i\theta_1} 00\rangle + beZ^{i\theta_0} 11\rangle - a 10\rangle$	$X_{C_1} \otimes Z_{C_2}$
	3	$deZ^{i\theta_2} 01\rangle + ceZ^{i\theta_1} 00\rangle + beZ^{i\theta_0} 11\rangle + a 10\rangle$	$X_{C_1} \otimes I_{C_2}$
8	0	$a 00\rangle + beZ^{i\theta_0} 01\rangle + ceZ^{i\theta_1} 10\rangle + deZ^{i\theta_2} 11\rangle$	$I_{C_1} \otimes I_{C_2}$
	1	$a 00\rangle - beZ^{i\theta_0} 01\rangle + ceZ^{i\theta_1} 10\rangle - deZ^{i\theta_2} 11\rangle$	$I_{C_1} \otimes Z_{C_2}$
	2	$a 00\rangle - beZ^{i\theta_0} 01\rangle - ceZ^{i\theta_1} 10\rangle + deZ^{i\theta_2} 11\rangle$	$Z_{C_1} \otimes Z_{C_2}$
	3	$a 00\rangle + beZ^{i\theta_0} 01\rangle - ceZ^{i\theta_1} 10\rangle - deZ^{i\theta_2} 11\rangle$	$Z_{C_1} \otimes I_{C_2}$
9	0	$beZ^{i\theta_0} 00\rangle - a 01\rangle + deZ^{i\theta_2} 10\rangle - ceZ^{i\theta_1} 11\rangle$	$I_{C_1} \otimes Z_{C_2} X_{C_2}$
	1	$beZ^{i\theta_0} 00\rangle + a 01\rangle + deZ^{i\theta_2} 10\rangle + ceZ^{i\theta_1} 11\rangle$	$I_{C_1} \otimes X_{C_2}$
	2	$beZ^{i\theta_0} 00\rangle + a 01\rangle - deZ^{i\theta_2} 10\rangle - ceZ^{i\theta_1} 11\rangle$	$Z_{C_1} \otimes X_{C_2}$
	3	$beZ^{i\theta_0} 00\rangle - a 01\rangle - deZ^{i\theta_2} 10\rangle + ceZ^{i\theta_1} 11\rangle$	$Z_{C_1} \otimes Z_{C_2} X_{C_2}$
10	0	$ceZ^{i\theta_1} 00\rangle - deZ^{i\theta_2} 01\rangle - a 10\rangle + beZ^{i\theta_0} 11\rangle$	$Z_{C_1} X_{C_1} \otimes Z_{C_2}$
	1	$ceZ^{i\theta_1} 00\rangle + deZ^{i\theta_2} 01\rangle - a 10\rangle - beZ^{i\theta_0} 11\rangle$	$Z_{C_1} X_{C_1} \otimes I_{C_2}$
	2	$ceZ^{i\theta_1} 00\rangle + deZ^{i\theta_2} 01\rangle + a 10\rangle + beZ^{i\theta_0} 11\rangle$	$X_{C_1} \otimes I_{C_2}$
	3	$ceZ^{i\theta_1} 00\rangle - deZ^{i\theta_2} 01\rangle + a 10\rangle - beZ^{i\theta_0} 11\rangle$	$X_{C_1} \otimes Z_{C_2}$

(续表)

$k$	$l$	$ D_{kl}\rangle_{C_1C_2}$	$R_{kl}$
11	0	$d\mathcal{Z}^{i\theta_2} 00\rangle + c\mathcal{Z}^{i\theta_1} 01\rangle - b\mathcal{Z}^{i\theta_0} 10\rangle - a 11\rangle$	$Z_{C_1} X_{C_1} \otimes X_{C_2}$
	1	$d\mathcal{Z}^{i\theta_2} 00\rangle - c\mathcal{Z}^{i\theta_1} 01\rangle - b\mathcal{Z}^{i\theta_0} 10\rangle + a 11\rangle$	$Z_{C_1} X_{C_1} \otimes Z_{C_2} X_{C_2}$
	2	$d\mathcal{Z}^{i\theta_2} 00\rangle - c\mathcal{Z}^{i\theta_1} 01\rangle + b\mathcal{Z}^{i\theta_0} 10\rangle - a 11\rangle$	$X_{C_1} \otimes Z_{C_2} X_{C_2}$
	3	$d\mathcal{Z}^{i\theta_2} 00\rangle + c\mathcal{Z}^{i\theta_1} 01\rangle + b\mathcal{Z}^{i\theta_0} 10\rangle + a 11\rangle$	$X_{C_1} \otimes X_{C_2}$
12	0	$a 01\rangle + b\mathcal{Z}^{i\theta_0} 00\rangle + c\mathcal{Z}^{i\theta_1} 11\rangle + d\mathcal{Z}^{i\theta_2} 10\rangle$	$I_{C_1} \otimes X_{C_2}$
	1	$a 01\rangle - b\mathcal{Z}^{i\theta_0} 00\rangle + c\mathcal{Z}^{i\theta_1} 11\rangle - d\mathcal{Z}^{i\theta_2} 10\rangle$	$I_{C_1} \otimes X_{C_2} Z_{C_2}$
	2	$a 01\rangle - b\mathcal{Z}^{i\theta_0} 00\rangle - c\mathcal{Z}^{i\theta_1} 11\rangle + d\mathcal{Z}^{i\theta_2} 10\rangle$	$Z_{C_1} \otimes X_{C_2} Z_{C_2}$
	3	$a 01\rangle + b\mathcal{Z}^{i\theta_0} 00\rangle - c\mathcal{Z}^{i\theta_1} 11\rangle - d\mathcal{Z}^{i\theta_2} 10\rangle$	$Z_{C_1} \otimes X_{C_2}$
13	0	$b\mathcal{Z}^{i\theta_0} 01\rangle - a 00\rangle + d\mathcal{Z}^{i\theta_2} 11\rangle - c\mathcal{Z}^{i\theta_1} 10\rangle$	$I_{C_1} \otimes Z_{C_2}$
	1	$b\mathcal{Z}^{i\theta_0} 01\rangle + a 00\rangle + d\mathcal{Z}^{i\theta_2} 11\rangle + c\mathcal{Z}^{i\theta_1} 10\rangle$	$I_{C_1} \otimes I_{C_2}$
	2	$b\mathcal{Z}^{i\theta_0} 01\rangle + a 00\rangle - d\mathcal{Z}^{i\theta_2} 11\rangle - c\mathcal{Z}^{i\theta_1} 10\rangle$	$Z_{C_1} \otimes I_{C_2}$
	3	$b\mathcal{Z}^{i\theta_0} 01\rangle - a 00\rangle - d\mathcal{Z}^{i\theta_2} 11\rangle + c\mathcal{Z}^{i\theta_1} 10\rangle$	$Z_{C_1} \otimes Z_{C_2}$
14	0	$c\mathcal{Z}^{i\theta_1} 01\rangle - d\mathcal{Z}^{i\theta_2} 00\rangle - a 11\rangle + b\mathcal{Z}^{i\theta_0} 10\rangle$	$Z_{C_1} X_{C_1} \otimes X_{C_2} Z_{C_2}$
	1	$c\mathcal{Z}^{i\theta_1} 01\rangle + d\mathcal{Z}^{i\theta_2} 00\rangle - a 11\rangle - b\mathcal{Z}^{i\theta_0} 10\rangle$	$Z_{C_1} X_{C_1} \otimes X_{C_2}$
	2	$c\mathcal{Z}^{i\theta_1} 01\rangle + d\mathcal{Z}^{i\theta_2} 00\rangle + a 11\rangle + b\mathcal{Z}^{i\theta_0} 10\rangle$	$X_{C_1} \otimes X_{C_2}$
	3	$c\mathcal{Z}^{i\theta_1} 00\rangle - d\mathcal{Z}^{i\theta_2} 01\rangle + a 11\rangle - b\mathcal{Z}^{i\theta_0} 10\rangle$	$X_{C_1} \otimes X_{C_2} Z_{C_2}$
15	0	$d\mathcal{Z}^{i\theta_2} 01\rangle + c\mathcal{Z}^{i\theta_1} 00\rangle - b\mathcal{Z}^{i\theta_0} 11\rangle - a 10\rangle$	$Z_{C_1} X_{C_1} \otimes I_{C_2}$
	1	$d\mathcal{Z}^{i\theta_2} 01\rangle - c\mathcal{Z}^{i\theta_1} 00\rangle - b\mathcal{Z}^{i\theta_0} 11\rangle + a 10\rangle$	$Z_{C_1} X_{C_1} \otimes Z_{C_2}$
	2	$d\mathcal{Z}^{i\theta_2} 01\rangle - c\mathcal{Z}^{i\theta_1} 00\rangle + b\mathcal{Z}^{i\theta_0} 11\rangle - a 10\rangle$	$X_{C_1} \otimes Z_{C_2}$
	3	$d\mathcal{Z}^{i\theta_2} 01\rangle + c\mathcal{Z}^{i\theta_1} 00\rangle + b\mathcal{Z}^{i\theta_0} 11\rangle + a 10\rangle$	$X_{C_1} \otimes I_{C_2}$

步骤4 Charlie完成么正变换之后,准备两个辅助粒子  $C_3$  和  $C_4$ , 记为  $|00\rangle_{C_3C_4}$ , 构成  $|T\rangle_{C_1C_2C_3C_4} = (a|0000\rangle + b\mathcal{Z}^{i\theta_0}|0100\rangle + c\mathcal{Z}^{i\theta_1}|1000\rangle + d\mathcal{Z}^{i\theta_2}|1100\rangle)_{C_1C_2C_3C_4}$ 。然后进行两次控制非门操作:  $CONT_{C_1C_3}$  和  $CONT_{C_2C_4}$ ,  $C_1$  和  $C_2$  作控制粒子,  $C_3$  和  $C_4$  作目标粒子, 最终得到原  $|\phi\rangle$ 。

为了描述清楚, 举例说明。Alice用  $\{|u_0\rangle, |u_1\rangle, \dots, |u_{15}\rangle\}$  测量之后, 有16种可能, 且概率都相同, 假设测量结果为  $u_0 = (a|0000\rangle + b|0101\rangle + c|1010\rangle + d|1111\rangle)_{A_1A_2A_3A_4}$  (即  $k=0$ ), 将  $k$  值发送给 Bob 和 Charlie。然后, Bob 根据结果  $k$  选取对应测量基  $\{|v_0\rangle, |v_1\rangle, |v_2\rangle, |v_3\rangle\}$ , 有4种可能, 概率都相同, 假设测量结果为  $v_0 = \frac{1}{2}(|00\rangle + e^{-i\theta_0}|01\rangle + e^{-i\theta_1}|10\rangle + e^{-i\theta_2}|11\rangle)_{B_1B_2}$  (即  $l=0$ ), 将  $l$  发送给 Charlie。此时, Charlie 手中的粒子变成  $a|00\rangle + b\mathcal{Z}^{i\theta_0}|01\rangle + c\mathcal{Z}^{i\theta_1}|10\rangle + d\mathcal{Z}^{i\theta_2}|11\rangle$ , 根据  $k$  和  $l$  的值, 从表1中选取对应的么正操作  $I_{C_1} \otimes I_{C_2}$ , 再进行两次受控非门操作, 从而获取原来的 Cluster 类态。

根据上述步骤可以看出, 不管 Alice 和 Bob 的测量结果如何, Charlie 都能成功获得原来的四粒子 Cluster 类态, 其远程制备的成功率为 100%。

### 3 效率与安全性分析

#### 3.1 效率分析

为了评估本文所提协议的性能, 选取两个制备任意四粒子 Cluster 类态的全概率协议(ZFL13<sup>[21]</sup>, CCL15<sup>[22]</sup>), 分别从量子信道、量子消耗、经典信息消耗3个方面进行比较。以ZFL13协议为例, 效率参数的计算方法如下: 制备1个 Cluster 类态需要6个 Bell 态(即12个 qubit)作为量子信道, 引入的辅助粒子为0(0个 qubit), 其量子消耗一共为12个 qubit; 另外, 制备过程中, 制备者将测量结果(共8bit信息)发送给接收者, 因此其经典信息损耗为8bit。采取上述计算方法可以获得CCL15以及本协议的效率值, 如表2所列。从表2可知, 与同样选用EPR对量子信道的ZFL13协议相比, 本协议虽然经典信息消耗略多, 但量子比特消耗更少; 与CCL15协议相比, 虽然本协议的量子消耗和经典消耗都略高, 但本协议采用的是EPR对, 而CCL15采用的为实验上更难制备的

GHZ 态, 因此本协议在实验上更经济可行。

表2 本文协议与同类协议在量子信道、量子消耗、经典信息消耗方面的对比

协议	量子信道	量子消耗/qubit	经典信息消耗/bit
ZFL13	EPR 对	12 (12+0)	8(6+2)
CCL15	GHZ	8(6+2)	6(2+2+2)
本协议	EPR 对	10 (8+2)	10(4+4+2)

#### 3.2 安全性分析

从安全性方面考虑, 所提协议也是安全的。首先, 在量子密码通信中, 大家普遍认为“经典信道的信息可以被任意复制, 不过不能被篡改”, 即经典信息最终都会被准确无误地发送给对方。如第2节所述, 协议中需传递的信息均为经典信息, 不存在量子信息的传递, 不管窃听者是否窃取经典信息, Charlie 都会准确无误地收到 Alice 和 Bob 的测量结果(经典信息), 从而成功制备出原先的四粒子 Cluster 类态。

另外, 为了提高协议的安全保障, 可以通过块传输<sup>[23]</sup>和单光子信道检测<sup>[24]</sup>等技术实现“Alice, Bob 和 Charlie 需事先共享4个EPR对”, 从而确保本协议假设前提的安全实现。

**结束语** 本文利用4个EPR对作为量子信道, 解决了全概率联合远程制备任意四粒子 Cluster 类态的问题。与同类基于任意 Cluster 类态的远程制备方案相比, 所提协议是一种更高效且经济可行的全概率联合远程制备方案。目前仅考虑3方联合制备的模式, 在后续的研究中将尝试扩展到任意多方, 实现任意四粒子 Cluster 类态的任意多方全概率联合远程制备。

另外, 本文所提的全概率联合远程制备侧重考虑理想量子信道下的实现。在现实情况中, 量子信道可能存在噪声, 因此为了实现 Alice, Bob 和 Charlie 共享4个EPR对, 在非理想信道中进行量子传输会不可避免地受到噪声干扰。可以通过采用量子纠错码<sup>[25]</sup>技术来解决这个问题, 即通过构造量子态的自身重复、增加冗余方法来达到系统能够自动发现并纠正错误, 实现EPR对的正确共享, 最终实现噪声情况下全概率联合远程制备的目的。

### 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] LO H K. Classical-communication cost in distributed quantum-information processing: A generalization of quantum-communication complexity [J]. Phys. Rev. A, 2000, 62(1): 012313.
- [3] PATI A K. Minimum classical bit for remote preparation and measurement of a qubit [J]. Phys. Rev. A, 2001, 63(63): 94-98.
- [4] BENNETT C H, DIVINCENZO D P, SHOR P W, et al. Remote state preparation [J]. Phys. Rev. Lett., 2001, 87(7): 077902.
- [5] HOU K, WANG J, SHI S H. Probabilistic remotely preparing an arbitrary two-particle entangled state via positive operator-valued measure [J]. Int. J. Quantum Inf., 2008, 6(6): 1183-1193.
- [6] HOU K, WANG J, YUAN H, et al. Multiparty-Controlled Remote Preparation of Two-Particle State [J]. Commun. Theor. Phys., 2009, 52(5): 848-852.

- [7] LIU J M, FENG X L, OH C H. Remote preparation of arbitrary two-and three-qubit states [J]. *Epl*, 2009, 87(3): 30006.
- [8] XIA Y, SONG J, SONG H S. Multiparty remote state preparation [J]. *J. Phys. B-At. Mol. Opt. Phys.*, 2007, 40(18): 3719-3724.
- [9] AN N B, KIM J. Collective remote state preparation [J]. *Int. J. Quantum Inf.*, 2008, 6(5): 1051-1066.
- [10] LIU W J, CHEN Z F, LIU C, et al. Improved deterministic N-to-one joint remote preparation of an arbitrary qubit via EPR pairs [J]. *Int. J. Theor. Phys.*, 2015, 54(2): 472-483.
- [11] NGURYEN B A. Joint remote preparation of a general two-qubit state [J]. *J. Phys. B-At. Mol. Opt. Phys.*, 2009, 42(12): 125501.
- [12] WANG D, ZHA X W, LAN Q. Joint remote state preparation of arbitrary two-qubit state with six-qubit state [J]. *Opt. Commun.*, 2011, 284(24): 5853-5855.
- [13] HOU K, LI Y B, LIU G H, et al. Joint remote preparation of an arbitrary two-qubit state via GHZ-type states [J]. *J. Phys. A-Math. Theor.*, 2011, 44(25): 255304.
- [14] HOU K, WANG J, LU Y L, et al. Joint Remote Preparation of a Multipartite GHZ-class State [J]. *Int. J. Theor. Phys.*, 2009, 48(7): 2005-2015.
- [15] XIAO X Q, LIU J M, ZENG G H. Joint remote state preparation of arbitrary two-and three-qubit states [J]. *J. Phys. B-At. Mol. Opt. Phys.*, 2011, 44(7): 075501.
- [16] CHEN Q Q, XIA Y, SONG J, et al. Joint remote state preparation of a W-type state via W-type states [J]. *Phys. Lett. A*, 2010, 374(44): 4483-4487.
- [17] LUO M X, CHEN X B, MA S Y, et al. Deterministic remote preparation of an arbitrary W-class state with multiparty [J]. *J. Phys. B-At. Mol. Opt. Phys.*, 2010, 43(6): 065501.
- [18] ZHAN Y B, HU B L, MA P C. Joint remote preparation of four-qubit cluster-type states [J]. *J. Phys. B-At. Mol. Opt. Phys.*, 2011, 44(9): 095501.
- [19] AN B, BICH T, DON N V. Joint remote preparation of four-qubit cluster-type states revisited [J]. *J. Phys. B-At. Mol. Opt. Phys.*, 2011, 44(13): 135506.
- [20] HOU K. Joint remote preparation of four-qubit cluster-type states with multiparty [J]. *Quantum Inf. Process.*, 2013, 12(12): 3821-3833.
- [21] ZHAN Y B, FU H, LI X W, et al. Deterministic Remote Preparation of a Four-Qubit Cluster-Type Entangled State [J]. *Int. J. Theor. Phys.*, 2013, 52(8): 2615-2622.
- [22] CHEN Z F, CHEN Y F, LIU W J. Scheme for joint remote preparation of four-qubit Cluster-like states with unit success probability [J]. *Appl. Res. Comput.*, 2015, 32(9): 2794-2797. (in Chinese)  
陈正飞, 陈云峰, 刘文杰. 一种全概率联合远程制备四粒子 Cluster 类态的方案 [J]. *计算机应用研究*, 2015, 32(9): 2794-2797.
- [23] DENG F G, LONG G L, LIU X S. Two-step quantum direct communication protocol using the Einstein-Podolsky-Rosen pair block [J]. *Phys. Rev. A*, 2003, 68(4): 042317.
- [24] LIU W J, CHEN H W, MA T H, et al. An efficient deterministic secure quantum communication scheme based on cluster states and identity authentication [J]. *Chinese Phys B*, 2009, 18(10): 4105-4109.
- [25] EKERT A, MACCHIAVELLO C. Quantum error correction for communication [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1996, 77(12): 2585-2588.

(上接第 149 页)

- [5] CCAPKUN S, BUTTYAN L, HUBAUX J P. Self-organized public key management for mobile Ad hoc networks [J]. *IEEE Transaction on Mobile Computing*, 2003, 2(1): 52-64.
- [6] HAMOUID K. Self-certified based trust establishment scheme in Ad hoc networks [C]//Proc of the 5th International Conference on New Technologies, Mobility and Security. Istanbul: IEEE, 2012: 1-7.
- [7] ZIMMERMANN P. The Official PGP User's Guide [M]. MA: MIT Press Cambridge, 1995: 191-198.
- [8] EISSA T, RAZAK S A, NGADI M D A. Towards providing a new lightweight authentication and encryption scheme for MANET [J]. *Wireless Network*, 2011, 17: 833-842.
- [9] YANG K, JIA X H, ZHANG B, et al. Threshold Key Redistribution for dynamic change of authentication group in wireless mesh networks [C]//Proc of IEEE Global Telecommunications. Miami: IEEE, 2010: 1151-1156.
- [10] SHIN Y C, DONG M K, HUN J L, et al. Mechanism for regenerating CGA using threshold secret sharing in MANET [C]//Proc of the 13th International Conference on Advanced Communication Technology. Seoul: IEEE, 2012: 891-895.
- [11] LI X, JING Z. A Trust cluster based key management protocol for Ad hoc networks [C]//Proc of IEEE International Workshop on Anti-counterfeiting, Security, Identification. Xiamen: IEEE, 2007: 371-376.
- [12] YANG Y, XUE S Q, LUO M M, et al. A self-adaptive method of task allocation in clustering-based MANETs [C]//Proc of 2010 IEEE International Conference on Network Operations and Management Symposium. Osaka: IEEE, 2010: 440-447.
- [13] QIN N Y, FU A M, CHEN S G. Blind Signature-based Handover Authentication Protocol with Conditional Privacy Preserving in LTE/LTE-A Networks [J]. *Computer Science*, 2015, 42(8): 145-151. (in Chinese)  
秦宁元, 付安民, 陈守国. LTE/LTE-A 网络中基于盲签名的具有条件隐私保护的切换认证协议 [J]. *计算机科学*, 2015, 42(8): 145-151.
- [14] GUO P, ZHANG H, FU D S, et al. Hybrid and Lightweight Cryptography for Wireless Sensor Network [J]. *Computer Science*, 2012, 39(1): 14-19. (in Chinese)  
郭萍, 张宏, 傅德胜, 等. 一种混合轻量型无线传感器网络公钥密码方案 [J]. *计算机科学*, 2012, 39(1): 14-19.
- [15] FENG D G, QIN Y, WANG D, et al. Research on Trust Computing Technology [J]. *Computer Research and Development*, 2011, 48(8): 1332-1349. (in Chinese)  
冯登国, 秦宇, 汪丹, 等. 可信计算技术研究 [J]. *计算机研究与发展*, 2011, 48(8): 1332-1349.
- [16] LU Z. Research on OPNET Application in Wireless Network Simulation [D]. Shanghai: Fudan University, 2010. (in Chinese)  
陆智. OPNET 在无线网络仿真中的应用研究 [D]. 上海: 复旦大学, 2010.