

量子隐形传态网络的互联与路由策略*

周小清[†] 邬云文 赵 晗

(吉首大学物理科学与信息工程学院, 吉首 416000)

(2010年7月6日收到; 2010年7月28日收到修改稿)

利用纠缠交换介绍了量子交换机的工作原理, 利用量子交换机逐一进行纠缠交换可以建立 Alice 和 Bob 的量子连结. 只要将现行的交换机等互联设备增加纠缠粒子对发生器, 在网络空闲时保持和相邻设备间的量子连结, 就可将经典的互联网升级为量子隐形传态互联网. 在量子隐形传态互联网中其路由的选择仍可利用经典互联网的路由算法; 在固定路由选择策略中路由选择可与量子信道的建立同步进行, 在动态路由选择策略时可先选择路由以生成路由器序列列表, 然后根据该路由器序列列表逐一进行纠缠交换就可以建立 Alice 和 Bob 的量子连结.

关键词: 量子通信, 隐形传态, 互联网, 路由

PACS: 03.67.Hk, 42.50.Ex, 89.70.-a

1. 引言

现代物理学将微观粒子统称为量子, 将微观粒子所处的状态叫量子态, 用量子态表示的信息叫量子信息. 将经典信息 0 和 1 映射到量子状态上, 按照量子力学规律对量子态表示的信息实施存储、传输和处理时, 发现了若干基于经典信息理论认为是不可能的“信息机能”. 例如迄今为止宏观世界完全无法想象的有关量子计算机以及量子隐形传态实现信息通信等科学技术. 由于微观粒子的量子态具有相干性、纠缠性和不可克隆等特性, 我们利用它们来完成现代经典信息论不可能完成的任务; 例如利用微观粒子的量子态叠加及相干特性能够实现计算机超高速并行计算; 利用微观粒子的量子纠缠、量子态不可克隆的力学特性能够实现超高速的信息传送、实现不可破译不可窃听的保密通信等.

量子隐形传态的物理基础来源于量子态的纠缠特性: 若二粒子处于纠缠状态, 则无论它们相距多远, 对其中一个粒子的操作必将引起另一个粒子状态的变化. 正是由于发现了微观粒子纠缠的这种奇妙特性, 这才引起了各国科学家的极大兴趣并利用此特性进行量子通信的研究. 现在研究的量子通信方式主要有密钥分配、高密编码和隐形传态三种. 1993年, Bennett 等提出了利用纠缠粒子对进行

量子隐形传态^[1], 1997年 Bouwmeester 等人于利用纠缠光子对作为量子信道实现了人类历史上的第一次隐形传态^[2], 以后又有大量的科学工作者研究了利用非最大纠缠作为量子信道的隐形传态^[3], S 能级的量子隐形传态^[4], 多个粒子的量子隐形传态^[5], 连续变量的量子隐形传态^[6], 受控量子隐形传态^[7], 无需 Bell 基测量的隐形传态^[8]等.

我国也有大量的科技工作者对此进行了研究^[9-17], Pan 等人在 2004 年完成了“五光子纠缠和开放目的的量子隐形传态”实验^[18], 2009 年 8 月在光纤通信中实现了一种抗干扰的量子密钥分配方案, 并在合肥构建了城域量子通信网络^[19]. 周小清等人在 2007 年研究了受控量子隐形传态令牌总线网和令牌环网的通信原理与实现技术^[20,21], 并于近期研究了量子交换机建立多用户间量子信道的方法^[22,23]. 然而, 以上对量子通信网络的研究基本上还处于局域网, 对于量子网络互联的研究还鲜见报道, 且路由问题更是实现量子通信网络的主要难题. 本文将在我们前期研究的基础上研究量子隐形传态网络的互联以及路由策略.

2. 同一交换机上点到点量子信道的建立

对于经典的互联网, 其常用的互联设备有路由

* 湖南省科技计划(批准号: 2008FJ3078, 2010FJ3081)资助的课题.

[†] E-mail: zhouxq_jd@163.com

器、交换机、网桥等,其中路由器工作在网络层,交换机、网桥工作在数据链路层;交换机实际上是一种高性能的多端口网桥. 无论上述哪一种互联设备,其内部都要维护一个路由表,在该表中列出了每个可能的目的地以及它属于哪一条输出线路(端口号,表示转发给哪个 LAN),工作时,交换机根据分组的目的地查表将其转发到相应的端口.

对于量子隐形传态网络,其量子信息通过量子信道传输,测量信息通过经典信道传输. 在网络空闲时,各相邻设备间均需建立电路连结和量子连结(共享 EPR 对),当然,其量子连结也可在需要时才进行连结. 现假设 Alice, Bob 等终端和交换机 Cliff 均用纠缠对 $|\beta_{00}\rangle$ 连接(图 1).

由于

$$|\beta_{00}\rangle_{AC} = \frac{|0\rangle_A |0\rangle_C + |1\rangle_A |1\rangle_C}{\sqrt{2}}, \quad (1)$$

$$|\beta_{00}\rangle_{BC} = \frac{|0\rangle_B |0\rangle_C + |1\rangle_B |1\rangle_C}{\sqrt{2}}. \quad (2)$$

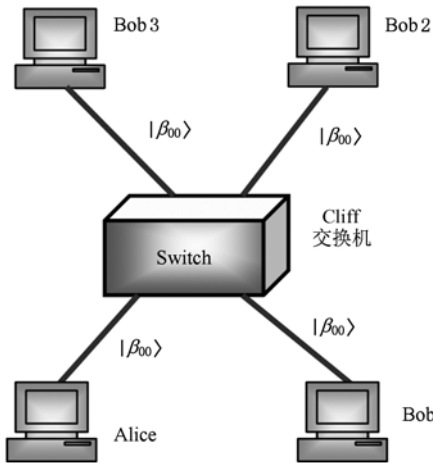


图 1 交换机连接图

由(1),(2)式可知 Alice, Bob 和交换机 Cliff 所拥有粒子的混合量子态为

$$\begin{aligned} |\Psi_0\rangle_{ABC} &= |\beta_{00}\rangle_{AC} \otimes |\beta_{00}\rangle_{BC} \\ &= \frac{|0\rangle_A |0\rangle_C + |1\rangle_A |1\rangle_C}{\sqrt{2}} \\ &\quad \times \frac{|0\rangle_B |0\rangle_C + |1\rangle_B |1\rangle_C}{\sqrt{2}} \\ &= \frac{1}{2} (|00\rangle_{AB} |00\rangle_C + |01\rangle_{AB} |01\rangle_C \\ &\quad + |10\rangle_{AB} |10\rangle_C + |11\rangle_{AB} |11\rangle_C). \quad (3) \end{aligned}$$

当 Alice 希望同 Bob 通话时,他就向交换机发

出连接请求信号,该请求信号中必须包含目的地址和源地址. 交换机收到连接请求后,根据该信号中的目的地址确定受话对象(假设是 Bob)并向受话对象 Bob 发出连接指示;Bob 收到交换机的连接指示信号后,若同意受话,则向交换机回应一个连接响应信号;交换机收到 Bob 的连接响应信号后,就开始建立 Alice 和 Bob 的量子信道,其工作原理如图 2 所示.

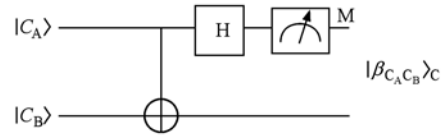


图 2 量子交换机工作原理图

建立量子信道的过程如下:

第 1 步:Cliff 将其持有的二粒子作控制非门运算(见图 2),由(3)式得

$$\begin{aligned} |\Psi_0\rangle_{ABC} &= \frac{1}{2} (|00\rangle_{AB} |00\rangle_C + |01\rangle_{AB} |01\rangle_C \\ &\quad + |10\rangle_{AB} |11\rangle_C + |11\rangle_{AB} |10\rangle_C). \quad (4) \end{aligned}$$

第 2 步:Cliff 对其拥有的第一个粒子作 H 门运算(见图 2),由(4)式得

$$\begin{aligned} |\Psi_0\rangle_{ABC} &= \frac{1}{2} \left(|00\rangle_{AB} \frac{|00\rangle_C + |10\rangle_C}{\sqrt{2}} \right. \\ &\quad + |01\rangle_{AB} \frac{|01\rangle_C + |10\rangle_C}{\sqrt{2}} \\ &\quad + |10\rangle_{AB} \frac{|01\rangle_C - |11\rangle_C}{\sqrt{2}} \\ &\quad \left. + |11\rangle_{AB} \frac{|00\rangle_C - |10\rangle_C}{\sqrt{2}} \right) \\ &= \frac{1}{2} \left(\frac{|00\rangle_{AB} + |11\rangle_{AB}}{\sqrt{2}} |00\rangle_C \right. \\ &\quad + \frac{|01\rangle_{AB} + |10\rangle_{AB}}{\sqrt{2}} |01\rangle_C \\ &\quad + \frac{|00\rangle_{AB} - |11\rangle_{AB}}{\sqrt{2}} |10\rangle_C \\ &\quad \left. + \frac{|01\rangle_{AB} - |10\rangle_{AB}}{\sqrt{2}} |11\rangle_C \right) \\ &= \frac{1}{2} (|\beta_{00}\rangle_{AB} |00\rangle_C + |\beta_{01}\rangle_{AB} |01\rangle_C \\ &\quad + |\beta_{10}\rangle_{AB} |10\rangle_C + |\beta_{11}\rangle_{AB} |11\rangle_C). \quad (5) \end{aligned}$$

第3步:交换机 Cliff 作坐标基测量(见图2),并将测量结果通过经典信道通知 Bob, Bob 通过相应的幺正变换建立与 Alice 相应的量子纠缠. 由(5)式可知,当交换机的测量结果为 $|00\rangle$ 时, Alice 和 Bob 处于 $|\beta_{00}\rangle$ 状态, Bob 不需要作任何变换;当交换机的测量结果为 $|01\rangle$ 时, Alice 和 Bob 处于 $|\beta_{01}\rangle$ 状态, Bob 需要作 σ_x 变换;当交换机的测量结构为 $|10\rangle$ 时, Alice 和 Bob 处于 $|\beta_{10}\rangle$ 状态, Bob 需要作 σ_z 变换;当交换机的测量结构为 $|11\rangle$ 时, Alice 和 Bob 处于 $|\beta_{11}\rangle$ 状态, Bob 需要作 $-\sigma_x\sigma_z$ 变换(见表1).

表1 交换机坐标基测量与量子连接类型对应表

交换机与用户 连接类型	交换机 测量结果	Alice 与 Bob 的状态	Bob 的操作	Alice 与 Bob 的连接类型	
1	$ \beta_{00}\rangle$	$ 00\rangle_c$	$ \beta_{00}\rangle_{AB}$	I	$ \beta_{00}\rangle$
		$ 01\rangle_c$	$ \beta_{01}\rangle_{AB}$	σ_x	
		$ 10\rangle_c$	$ \beta_{10}\rangle_{AB}$	σ_z	
		$ 11\rangle_c$	$ \beta_{11}\rangle_{AB}$	$\sigma_z\sigma_x$	
2	$ \beta_{01}\rangle$	$ 00\rangle_c$	$ \beta_{00}\rangle_{AB}$	σ_x	$ \beta_{01}\rangle$
		$ 01\rangle_c$	$ \beta_{01}\rangle_{AB}$	I	
		$ 10\rangle_c$	$-\beta_{10}\rangle_{AB}$	$-\sigma_x\sigma_z$	
		$ 11\rangle_c$	$-\beta_{11}\rangle_{AB}$	$-\sigma_z$	
3	$ \beta_{10}\rangle$	$ 00\rangle_c$	$ \beta_{00}\rangle_{AB}$	σ_z	$ \beta_{10}\rangle$
		$ 01\rangle_c$	$-\beta_{01}\rangle_{AB}$	$-\sigma_z\sigma_x$	
		$ 10\rangle_c$	$ \beta_{10}\rangle_{AB}$	I	
		$ 11\rangle_c$	$-\beta_{11}\rangle_{AB}$	$-\sigma_x$	
4	$ \beta_{11}\rangle$	$ 00\rangle_c$	$ \beta_{00}\rangle_{AB}$	$\sigma_z\sigma_x$	$ \beta_{11}\rangle$
		$ 01\rangle_c$	$-\beta_{01}\rangle_{AB}$	$-\sigma_z$	
		$ 10\rangle_c$	$-\beta_{10}\rangle_{AB}$	$-\sigma_x$	
		$ 11\rangle_c$	$-\beta_{11}\rangle_{AB}$	I	

同理可以求出当交换机与用户间的连接类型为 $|\beta_{01}\rangle, |\beta_{10}\rangle, |\beta_{11}\rangle$ 时, Bob 所需作的变换和 Alice 与 Bob 建立量子连接的类型(见表1).

当交换机完成上述工作后,向 Alice 发出一个连接证实信号,说明已作好通信准备,可以进行通信. Alice 收到连接证实信号后,就可以开始发送数据,其通信过程我们已在文献[20,21]中作了研究,在此不再赘述.

3. 量子隐形传态网络的互联

网络互联的主要功能是资源共享和通信. 现在的通信网络按其数据交换的方式可分为电路交换、

报文交换和分组交换三种. 常用的互联设备有集线器、网桥、路由器和交换机等. 无论哪一种互联设备,它都必须完成建立链路、转发报文、选择路由等任务. 对于量子隐形传态网络,其测量信息由经典信道传送,量子信息由量子信道传送. 由于纠缠的非局域性,无论通信双方在什么位置、相距有多远,只要他们建立了量子信道,就可以进行量子信息的传送,其量子信息的传送与通信双方间的网络线路无关. 所以现在的通信网络只需传送经典的测量信息,建立通信双方的量子信道,就可以升级为量子隐形传态互联网.

升级现在经典的网络为量子隐形传态互联网要求所有的互联设备除具有现有的各项功能外,还需具有建立量子信道的功能,这要求每个互联设备具有生成纠缠粒子对的能力. 在网络空闲时,互联设备与所有相邻设备(或终端)共享纠缠粒子对(建立量子信道);当用户需要进行通信时,就向交换机发送一个经典的请求通信信号,交换机根据通信双方的地址进行远程纠缠交换建立通信双方的量子信道.

4. 互联网中点到点量子信道的建立

在本节中我们将研究多个互联设备间通信双方如何建立量子信道. 为叙述方便,假设上节所述交换机建立通信双方量子信道的过程简称为交换操作,各子网间用路由器连结.

假设在 Alice 所处的子网 0 和 Bob 所处的子网 n 间有 n 个路由器(见图3),则在 Alice 和 Bob 间建立量子信道的过程如下:

整个网络系统在闲时维持各网络设备的量子连结,假设各用户和路由器、路由器和路由器间均建立了 $|\beta_{00}\rangle$ 连结,为叙述方便,分别设为 $|\beta_{00}\rangle_{A1}, |\beta_{00}\rangle_{12}, |\beta_{00}\rangle_{23}, \dots, |\beta_{00}\rangle_{nB}$.

第1步:路由器1通过将所持有的 $|\beta_{00}\rangle_{A1}, |\beta_{00}\rangle_{12}$ 中的二粒子通过交换操作,可将 Alice 和路由器2建立 $|\beta_{00}\rangle$ 连结,设为 $|\beta_{00}\rangle_{A2}$;

第2步:路由器2通过将所持有的 $|\beta_{00}\rangle_{A2}, |\beta_{00}\rangle_{23}$ 中的二粒子通过与上同样的交换操作,可将 Alice 和路由器3建立 $|\beta_{00}\rangle$ 连结,设为 $|\beta_{00}\rangle_{A3}$.

重复以上过程,直到第 n 个路由器将所持有的 $|\beta_{00}\rangle_{An}, |\beta_{00}\rangle_{nB}$ 中的二粒子通过交换操作,最终可将 Alice 和 Bob 建立 $|\beta_{00}\rangle$ 连结.

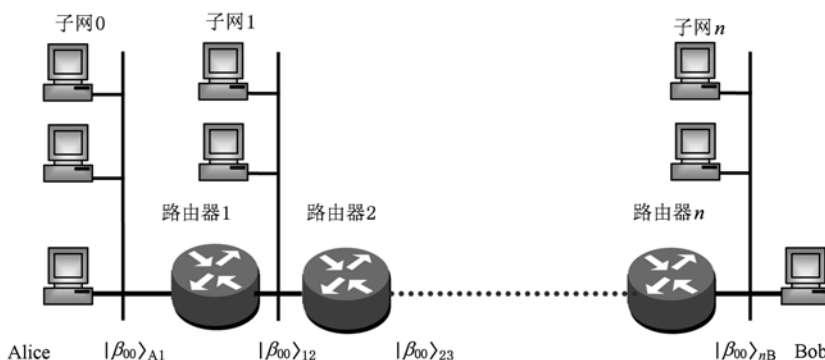


图3 相隔 n 个路由器的通信双方连接图

由以上分析可知,要建立 Alice 和 Bob 间的量子信道,只需确定他们所处子网间的路由器序列,然后沿该路由器序列逐一进行纠缠交换,便可建立他们间的量子信道.

5. 路由选择策略

在上节我们研究了在相隔 n 个路由器的 Alice 和 Bob 间建立量子信道的方法,本节我们讨论如何建立 n 个路由器序列(路由算法).

在经典通信中,Alice 和 Bob 间的通信方式有两种,一是数据报,二是虚电路.当采用数据报方式时,每个分组都必须有目的地址和源地址,且每个分组都要独立寻找路由,不同的分组到达 Bob 的路径都可能不同.当采用虚电路时,只需在建立虚电路时寻找路由,虚电路一经建立,其路由器序列就不会变化,以后的分组均沿同一路由到达 Bob.

在隐形传态网络中,我们仍采用经典线路加量子线路的方法进行通信.路由的选择仍采用经典的方法,不同的是每当一个寻找路由的分组到达一个路由器时,该路由器就同步地建立和 Alice 的量子连结,直到最后一个路由器建立 Alice 和 Bob 的量子连结.

对于固定路由策略,由于每个路由器存贮的路由表中的每一项记录着为了到达某个目的结点而选择的下一结点或链路,当一个分组到达某路由器时,该路由器只需根据分组中的地址信息从固定路由表中找到与目的地址对应的下一结点,将分组转发给下一结点;由于此分组不用拷贝,对于同一个分组在寻找路由的过程中是唯一的,所以用上述建立量子线路的方法是合适的.但对于动态路由策略

比如分布式路由策略在寻找路由阶段,经典的分组可能会被拷贝很多份(扩散时),显然量子线路不可能同步建立,这就需要分 2 个阶段进行:

第 1 阶段:用经典方法寻找路由,找到 Bob 后,返回给 Alice 一份路由器序列列表;

第 2 阶段:利用路由器序列列表建立 Alice 和 Bob 的量子连结.

由于数据报的每个分组都要独立寻找路由,所以每个分组都要重复上述过程.而虚电路方式只需在建立虚电路时寻找路由,以后的分组均按同一路由器序列建立量子连结.

关于经典路由算法在许多文献中都可以查到,在此不再赘述.

6. 结 论

由于量子纠缠的非局域性,只要 Alice 和 Bob 各自具有 EPR 对的一个粒子,无论他们相距多远,对其中任何一个粒子的操作必将引起另一个粒子状态的变化,亦即他们利用量子信道进行通信与他们所处的位置无关.所以,在量子互联网中,只要建立了 Alice 和 Bob 的量子信道,则他们之间进行量子信息通信时与经典的互联网无关,经典的互联网只承担建立量子信道、传送 Alice 的测量信息和路由选择的任务.

经典的互联网升级为量子隐形传态网络的方法是:将现行的互联设备增加纠缠粒子对发生器,在网络空闲时保持与其相邻设备的量子连结.当路由器收到用户的通信请求时,可根据通信双方的地址寻找到达目的地的路由器序列列表,然后根据路由器序列列表逐路由器进行纠缠交换建立通信双方的量子信道.

路由的选择仍采用经典的路由算法,对于固定路由策略,量子信道的建立可以与路由选择同步进行;对于动态路由策略,可先寻找路由以建立路由器序列列表,然后根据路由器序列列表建立通信双向方

的量子信道.

本文仅讨论了点到点量子隐形传态网络的互联与路由策略,对于多用户间同步通信的情况非常复杂,我们将在下文中进行研究.

- [1] Bennett C H, Brassard G, Crepeau C, Jozsa R, Peres A, Wootters W K 1993 *Phys. Rev. Lett.* **70** 1895
- [2] Bouwmeester D, Pan J W, Mattle K Eibl M, Weinfurter H, Zeilinger A 1997 *Nature* **390** 575
- [3] Bose S, Knight P L, Plenio M B, Vedral V 1999 *Phys. Rev. Lett.* **83** 5158
- [4] Zhou J D, Hou G, Zhang Y D 2001 *Phys. Rev. A* **64** 012301
- [5] Yang C P, Guo G C 2000 *Chin. Phys. Lett.* **17** 162
- [6] Braunstein S L, Kimble H J 1998 *Phys. Rev. Lett.* **80** 869
- [7] Zhan X G, Li H M, Ji H, Zeng H S 2007 *Chin. Phys.* **16** 2880
- [8] Zheng S B 2004 *Phys. Rev. A* **69** 064302
- [9] Wu Y W, Hai W H, Cai L H 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 99 (in Chinese)[邬云文、海文华、蔡丽华 2006 物理学报 **55** 99]
- [10] Wu Y W, Hai W H 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 3315 (in Chinese) [邬云文、海文华 2006 物理学报 **55** 3315]
- [11] Zhou N R, Zeng B Y, Wang L J, Gong L H 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 2193 (in Chinese)[周南润、曾宾阳、王立军、龚黎华 2010 物理学报 **59** 2193]
- [12] Sun Y, Du J Z, Qin S J, Wen Q Y, Zhu F C 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 4689 (in Chinese)[孙莹、杜建忠、秦素娟、温巧燕、朱甫臣 2008 物理学报 **57** 4689]
- [13] Zhang S, Wang J, Zhang Q, Tang C J 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 0073 (in Chinese)[张盛、王剑、张权、唐朝京 2009 物理学报 **58** 0073]
- [14] Yang Y G, Cao W F, Wen Q Y 2010 *Chin. Phys. B* **19** 050306
- [15] Deng H L, Fang X M 2008 *Chin. Phys. B* **17** 0702
- [16] Zhang X Z, Gong W G, Tan Y G, Tan Y G, Ren Z Z, Guo X T 2009 *Chin. Phys. B* **18** 2143
- [17] Liu J, Wang Q, Kuang L M, Zeng H S 2010 *Chin. Phys. B* **19** 030313
- [18] Zhao Z, Chen Y A, Zhang A N, Yang T, Briegel H J, Pan J W 2004 *Nature* **430** 54
- [19] http://www.cas.cn/xw/zyxw/yw/200908/t20090831_2538124.shtml [2009.8.31]
- [20] Zhou X Q, Wu Y W 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 1881 (in Chinese)[周小清、邬云文 2007 物理学报 **56** 1881]
- [21] Zhou X Q, Wu Y W 2009 *Journal of Jishou University* **30** 56 (in Chinese)[周小清、邬云文 2009 吉首大学学报 **30** 56]
- [22] Zhao H, Zhou X Q, Yang X L 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 5970 (in Chinese)[赵晗、周小清、杨小琳 2009 物理学报 **58** 5970]
- [23] Zhao H, Zhou X Q, Yang X L 2010 *Optics Communications* **283** 2472

Quantum teleportation internetworking and routing strategy^{*}

Zhou Xiao-Qing[†] Wu Yun-Wen Zhao Han

(College of Physics Science and Information Engineering, Jishou University, Jishou 416000, China)

(Received 6 July 2010; revised manuscript received 28 July 2010)

Abstract

The principle of the quantum switch is introduced by means of entanglement swapping. With the help of quantum switch operating entanglement swapping one by one, quantum correlations between Alice and Bob can be established. Adding entangled particle generator into conventional interconnection equipments, such as switch, and keeping quantum correlations between adjacent devices in the network leisure time, one can upgrade the classic internet to quantum teleportation internet. In quantum teleportation internet, the routing is selected also by utilizing the routing algorithm of classical internet. The routing selection can be synchronized with the establishment of quantum channel in static routing strategy. When the dynamic routing strategy is selected, quantum switch first selects a route to generate a router sequence table and then operates entanglement swapping one by one according to the table to establish the quantum correlations between Alice and Bob.

Keywords: quantum communication, teleportation, internet, route

PACS: 03.67.Hk, 42.50.Ex, 89.70.-a

^{*} Project supported by the Science and Technology Plan Foundation of Hunan Province, China (Grant Nos. 2008FJ3078, 2010FJ3081).

[†] E-mail: zhouxq_jd@163.com