# 多种资源下结构化 P2P 网络的负载均衡方法\*

沈海飞,樊建席,刘文军,王永伟 (苏州大学 计算机科学与技术学院,江苏 苏州 215006)

摘 要:在真实网络环境中,存在多种瓶颈资源,如存储能力、处理请求能力和带宽等。传统的负载均衡方法只 考虑了一种瓶颈资源,忽视了其他瓶颈资源对网络性能的影响。针对该问题,建立相似度概念模型,设计用于虚 拟服务器转移的转移代价函数,提出可用于任意结构化 P2P 网络的多种资源负载均衡(MRLB)算法。仿真结果 显示,节点上任一资源的负载都随着节点能力的提升而相应增加。MRLB 算法能够有效解决传统方法的缺点, 实现多种瓶颈资源的负载均衡。

关键词:负载均衡;多种资源;虚拟服务器;相似度;异构性 中图分类号:TP393 文献标志码:A 文章编号:1001-3695(2013)12-3712-04 doi:10.3969/j.issn.1001-3695.2013.12.050

# Load balancing method in structured P2P network with multiple resources

SHEN Hai-fei, FAN Jian-xi, LIU Wen-jun, WANG Yong-wei

(School of Computer Science & Technology, Soochow University, Suzhou Jiangsu 215006, China)

Abstract: There are multiple bottleneck resources in a real network environment, such as storage capacity, ability of processing request and bandwidth. The traditional load balance methods only considered single resource, and ignored the influence from other bottleneck resources on network performance. To address this issue, this paper established similarity concept model, then developed multiple resources load balance (MRLB) algorithm for the arbitrary structured P2P network which used transferred cost function designed for virtual server transfer. Simulation results indicate that resource loads on a node can increase with the improvement of node capacity. So MRLB algorithm effectively solves the shortcomings of traditional methods and achieves load balance with multiple bottleneck resources.

Key words: load balance; multiple resources; virtual server; similarity; heterogeneous

与传统网络相比, peer-to-peer (P2P) 网络具有高可扩展 性、高容错性和分布式等优点, 因而在文件共享、多媒体传输、 分布式数据存取等领域得到广泛应用。随着用户数量的激增, 网络规模的不断增大, 负载均衡问题也越来越突出。负载均衡 问题的产生有多种原因: a) 经典结构化 P2P 网络<sup>[1-3]</sup>采用 DHT(一致性哈希函数) 来为节点和数据分配 ID, 但 DHT 具有 伪一致性、忽视节点异构性和不考虑数据的相关性等缺 点<sup>[4-8]</sup>; b) 节点自身在存储能力、处理请求能力等方面具有异 质性; c) P2P 网络上也存在着传输时延和带宽等方面的差异 性<sup>[6-12]</sup>。

# 1 相关工作

针对结构化 P2P 网络的负载均衡问题, Chord 提出虚拟服务器概念<sup>[1]</sup>。随后 Rao 等人<sup>[4]</sup>设计出三种机制,将超载节点上的虚拟服务器进行转移。为了适应动态网络环境, Godfrey 等人<sup>[5]</sup>将上述机制作了进一步改进。考虑到分布式算法的优点,可在 Chord 基础上构造出 K 叉树的拓扑结构, 让父节点收集其子树上节点的信息,并负责这些节点的负载均衡<sup>[6,7]</sup>。但该方法未能考虑父节点的稳定性和能力, 使得父节点有成为瓶

颈节点的风险。为避免收集全局信息所带来的开销,每个节点 基于系统的局部信息去评价节点能力和负载分布的概率,从而 计算出自身所期望的负载,节点最终可以并行地转移虚拟服 务器<sup>[8]</sup>。

有别于上述虚拟服务器转移方法,AFSA<sup>[9]</sup>通过均衡 Chord 路由表项数来均衡节点负载。张宇翔等人<sup>[10]</sup>在层次化网络上 利用杠杆原理来选择超级节点,使得较少的超级节点承担较大 的负载量。另外,让新加入的节点来接收超载节点的负载,并 结合热点数据复制和部分请求转发技术,也可以实现负载均 衡<sup>[11]</sup>。针对节点的异质性,Tomimoto 等人<sup>[12]</sup>使用具有能力意 识的 ID 和 SkipList 数据结构来达到负载均衡的目标。该 ID 由 两种标志符组成,一种用来对节点分类,另一种则用于负载的 重新分配。SLBA 则进一步考虑负载均衡的安全性<sup>[13]</sup>。

上述工作只针对网络中存在的一种瓶颈资源或者指定资 源<sup>[11,12]</sup>的负载均衡进行讨论,具有一定的局限性。本文将对 网络中存在的多种瓶颈资源展开研究。

# 2 相关定义和描述

定义1 已知向量集  $L_{i} = \{l_{i_1}, l_{i_2}, \dots, l_{i_k}\}$ ,该向量集称为虚

收稿日期:2013-02-25;修回日期:2013-04-15 基金项目:国家自然科学基金资助项目(61170021);高等学校博士学科点专项科研基金 资助项目(20103201110018);苏州市应用基础研究项目(SYG201240);江苏省高校青蓝工程项目

作者简介:沈海飞(1988-),男,江苏南通人,硕士研究生,主要研究方向为对等网络、流媒体(20114227043@ suda. edu. cn);樊建席(1965-), 男,山东人,教授,博导,主要研究方向为网络与分布式计算、图论、算法;刘文军(1981-),男,山东临沂人,博士研究生,主要研究方向为网络与分布 式计算、图论;王永伟(1990-),男,安徽六安人,硕士研究生,主要研究方向为对等网络、流媒体.

拟服务器负载。其中, L<sub>i</sub>代表 i 节点上第 j 个虚拟服务器的负载, l<sub>in</sub>代表节点 i 上第 j 个虚拟服务器第 m 个可用资源值。由向量集可知,该网络中共有 k 种瓶颈资源。

类似地,用 $L_i = \{l_1, l_2, \dots, l_k\}$ 代表节点*i*的总负载,用 $C_i = \{c_1, c_2, \dots, c_k\}$ 代表节点*i*的能力,用 $T_i = \{t_1, t_2, \dots, t_k\}$ 代表节 点*i*的目标负载<sup>[6,7]</sup>。其中, $l_m \ c_m \ n \ t_m \ D$ 别代表节点*i*总负 载、能力和目标负载的第*m*个可用资源值。节点的能力是节 点的固有属性,不考虑可能的改变。

**定义**2 给定虚拟服务器负载 *L<sub>ij</sub>*,其在*K* 维空间到原点的 欧氏距离称为虚拟服务器大小,记做 *S*(*L<sub>ij</sub>*)。式(1)给出了虚 拟服务器大小计算公式。

$$S(L_{ij}) = \sqrt{\sum_{m=1}^{k} l_{jm} \times l_{jm}}$$
(1)

定义3 给定虚拟服务器负载  $L_{ij}$ ,将各资源值进行离差标准化处理后,其在 K 维空间到原点的欧氏距离称为虚拟服务器标准大小,记做  $S'(L_{ij})$ 。式(2)给出了虚拟服务器标准大小计算公式。其中: $V'_{jm}$ 为离差标准化处理后的值; max( $V_m$ )和 min( $V_m$ )分别代表整个网络中所有虚拟服务器里第 m 个资源的最大值和最小值。

$$S'(L_{ij}) = \sqrt{\sum_{m=1}^{k} V'_{jm} \times V'_{jm}}$$
(2)  

$$\ddagger \Psi : V'_{im} = (l_{im} - \min(V_m)) / (\max(V_m) - \min(V_m))_{\circ}$$

虚拟服务器标准大小用于对节点类型的定义,采用离差标 准化处理是因为直接的欧式距离法将不同资源之间差别同等 看待,弱化了数值小的资源对网络的影响。

定义4 给定两个向量集  $L_{ij}$ 和  $T_i$ ,它们在 K 维空间指向的 夹角的余弦值称为相似度,记做 sim( $L_{ij}$ ,  $T_i$ )。式(3)给出了相 似度计算公式。

$$\sin(L_{ij}, T_{i}) = \frac{\sum_{m=1}^{k} (l_{jm} \times t_{m})}{(S(L_{ij}) \times S(T_{i}))}$$
(3)

上述相似度定义表示节点 *i* 上第 *j* 个虚拟服务器负载与节 点 *t* 目标负载之间的关系。相似度也可用来表示 *L<sub>i</sub>* 与节点 *i* 本身的关系,在此基础上可建立起多种资源下的虚拟服务器转 移模型。

定义5 已知网络的总负载和总能力,将总负载与总能力 的各个资源对应比值的向量值称为系统负载利用率,记做 U。 式(4)给出了系统负载利用率计算公式,其中δ为一个松弛变 量,该松弛变量是负载均衡质量和负载转移数量之间的 折中<sup>[6,7]</sup>。

$$U = L/C + \delta \tag{4}$$

网络要发挥最大效益,各个节点应当各尽其能,达到系统 负载利用率。因而每个节点都应有与其能力相一致的目标负 载,式(5)为节点*i*的目标负载计算公式。

$$T_i = C_i \times U \tag{5}$$

# 3 MRLB 算法设计

图1 描述了 MRLB 算法的主要思想:每个管理节点内有低 负载池和扭曲负载池,它们分别用来保存低负载节点信息和扭 曲负载节点信息。为确保节点各尽其能,管理节点将高负载节 点中超载的虚拟服务器转移至低负载节点,将扭曲负载节点上 与目标负载相似度最低的虚拟服务器重新分配。

#### 3.1 初始化操作

初始节点产生两个初始令牌环,分别沿着 ID 增大和减小方 向轮询,遍历网络中所有的节点。初始令牌环中包含如下信息: a)全局负载信息和全局能力信息。

- b)网络中各个资源的最大值和最小值。
- c) O(logN) 个管理节点信息(N 为节点总数)。

节点收到初始令牌环后,首先将自身总的负载信息和能力 信息分别加入令牌环信息 a)中;然后将令牌环信息 b)中各资源 的最大值和最小值与本身资源值比较更新;最后判断本身能力 是否达到阈值,若达到就将自身稳定性与令牌环信息 c)比较, 若高于最低管理节点就更新令牌环信息 c)。需注意的是两个 初始令牌环最后将汇聚到同一节点上,该节点也对两个令牌环 进行上述操作。此节点利用式(4)计算出系统负载利用率 U,并 产生两个管理令牌环,类似于首次轮询操作,包含如下信息。

a)全局信息(已知,即初始令牌环收集)。

b)整个网络中最小标准大小的虚拟服务器信息。

节点收到管理令牌环后,首先保存令牌环信息 a);然后利 用式(2)将令牌环信息 b)进行更新;类似地,两个令牌环最后 汇聚到同一节点,该节点最终获取全局最小标准大小虚拟服务 器信息,并广播给网络中所有节点。为了应对 P2P 网络的 Chum 现象,系统应周期性地执行上述操作,并确定相应数目 的备份节点以防管理节点失效。上述操作时间复杂度为  $O(N \times M)$ ,这里 M 为节点负责的最大虚拟服务器数。



图 1 MRLB 算法流程

# 3.2 节点类型定义

根据收集到的全局信息和式(5),每个节点可以判定出自 己的类型。节点类型定义如下:

a) 高负载节点: ∀*m* ∈ [1,*k*],都有 *t<sub>m</sub>* − *l<sub>m</sub>* < 0。

b) 低负载节点:  $\forall m \in [1,k]$ , 都有  $t_m - l_m > V_m + \omega_m$ 。

c)常规负载节点:∀*m*∈[1,*k*],都有0≤*t<sub>m</sub>* -*l<sub>m</sub>*≤*V<sub>m</sub>* +*ω<sub>m</sub>*。

d)扭曲负载节点,即上述三种情况都不满足的节点。

其中:V代表整个网络中最小标准大小的虚拟服务器,ω为松 弛变量。扭曲负载节点的产生是因其所负责的部分虚拟服务 器与目标负载的相似较度低。对于一个稳定的网络,扭曲负载 节点来源于节点的加入和离开。

#### 3.3 虚拟服务器选择

ŀ

高负载节点和扭曲负载节点消息中 L<sub>ij</sub>的选择直接关系到 MRLB 算法的收敛,影响负载均衡的实现效果。为此,综合考 虑了相似度、负载大小和节点类型这三种因素,设计出如下转 移代价函数:

$$K_1(L_{ij}, T_i) = \operatorname{sim}(L_{ij}, T_i)$$
(6)

$$K_2(\boldsymbol{L}_{ij}, \boldsymbol{T}_i) = \sin(\boldsymbol{L}_i, \boldsymbol{T}_i) / \sin(\boldsymbol{L}_i - \boldsymbol{L}_{ij}, \boldsymbol{T}_i)$$
(7)

$$K_{3}(L_{ij}, L_{i}, T_{i}) = \frac{\sqrt{\sum_{m=1}^{k} (l_{m} - l_{jm} - t_{m})^{2}}}{\sqrt{\sum_{m=1}^{k} (l_{m} - t_{m})^{2}}}$$
(8)

其中: $K_1$  表示  $L_{ij}$ 与节点 i 目标负载的相似度; $K_2$  表示  $L_{ij}$ 转移 前后的总负载与节点 i 目标负载的相似度的比值; $K_3$  表示  $L_{ij}$ 转移前后的总负载与目标负载的方差的变化; $K_4$  表示优先选 择将节点 i 变为常规负载节点的  $L_{ij}$ 。节点 i 转移  $L_{ij}$ 总代价为  $K = \sum_{i=1}^{4} S_i K_i$ ,其中  $S_i$  为权重。在 MRLB 中,节点总是选择总 的转移代价最低的  $L_{ij}$ 。同时,利用率严重偏高的高负载节点 将优先发送消息,确保其能够得到及时处理。

#### 3.4 低负载池操作

管理节点收到高负载节点*i*的消息后,遍历低负载池:在 低负载节点接收  $L_{ij}$ 不会变成高负载节点的前提下,寻找总的 转移代价最低的节点*a*。若找到*a*,管理节点发送消息通知  $L_{ij}$ 转移。转移成功后,若节点*a*的类型改变将其从池中删除,否 则更新其剩余负载。对于低负载池中节点而言,由于  $L_{ij}$ 将被 转移进来,因此转移代价函数需作相应调整,此时总的转移代 价为*K* =  $\sum_{i=1}^{3} S_i K'_{io}$ 

$$K'_{1}(L_{ij}, T_{i}) = 1 - \sin(L_{ij}, T_{i})$$
(10)

$$K'_{2}(L_{ij}, T_{t}) = \frac{\sin(L_{t}, T_{t})}{\sin(L_{t} + L_{ii}, T_{t})}$$
(11)

$$K'_{3}(L_{ij}) = \begin{cases} 0 & 8 \# L_{ij} \text{ = } \overline{b} \text{ = } \overline{b} \text{ = } \overline{b} \text{ = } 1 \\ 1 & 8 \# L_{ij} \text{ = } \overline{b} \text{ = } \overline{b} \text{ = } \overline{b} \text{ = } 1 \end{cases}$$

$$(12)$$

$$K'_4(L_{ij}) = \begin{cases} 0 移进 L_{ij} 后节点变成非扭曲负载节点 \\ 1 移进 L_{ii} 后节点仍为扭曲负载节点 \end{cases}$$
 (13)

#### 3.5 扭曲负载池操作

管理节点在指定时间对扭曲负载池中每个节点*i* 消息中的 $L_i$ ,执行如下操作:遍历池中节点,寻找总的转移代价最低且比在节点*i* 上总的转移代价还小的扭曲负载节点*a*。其中,总的转移代价为 $K = S_4 K'_4 + \sum_{i=1}^{2} S_i K'_i$ 。若找到*a*,管理节点发送消息通知 $L_i$ 转移。转移成功后,若节点*i* 或者*a* 类型改变则将其从池中删除。遍历结束时,若池中还有未转移的虚拟服务器,则交给低负载池处理。然后管理节点清空池,等待下一周期的消息。需要注意的是扭曲负载节点类型的改变是不确定的,但通过最小转移代价可以确保虚拟服务器向着最合适的节点转移。

#### 3.6 MRLB 算法复杂度分析

对于已初始化好的网络,节点主要分为普通节点和管理节 点。普通节点只需判断自己类型并执行相应操作,其时间复杂 度为 O(R)(R 为节点上虚拟服务器数)。管理节点则还需要 对低负载池和扭曲负载池操作,其时间复杂度为 O(R + P + Q<sup>2</sup>)。这里 P 为低负载池中节点数,Q 为扭曲负载池中节点 数,随着网络趋于稳定,Q 值会越来越小。

## 4 实验仿真及结果分析

MRLB 算法具有一定通用性,适用于任意的结构化 P2P 网络模型中。为了验证该算法在实际网络中的工作效率,将其移植到 Chord 网络中进行测试和分析。在实验中主要考虑存储资源和处理查询请求资源这两种资源。本文在不考虑拓扑一致性前提下,实现了文献[6,7]的单重资源负载均衡,并将其与 MRLB 进行对比分析。实验基于 Windows 平台,采用 Peer-Sim 作为模拟器,编码实现使用了事件机制。

### 4.1 实验数据的获取

初始设置网络节点数目 N 为1000,每个节点负责 30 个虚

拟服务器。为了更好地体现节点的异构性并模拟出真实的网络环境,实验中采用 Gnutella-like 和 zipf-like 分布<sup>[7,8]</sup>来初始化 各个节点能力的各个资源值  $C_i:\langle c_1,c_2\rangle$ ,其中 1 $\leq i \leq 1000$ 。此时,网络所承载的总能力为  $C = \sum_{i=1}^{1000} C_i$ 。然后再根据已经分配的节点能力,利用高斯分布来初始化各节点所负责的虚拟服务器负载。具体参数设置如表 1 所示。表 2 为 Gnutela-like 分布。

表1 节点能力和负载初始化

分类	资源		分布		公式
节点能力	存储能力 处理请求能	力	Gnutella-like Zipf-like	10	见表 2 0000 × <i>i <sup>-β</sup></i> β = 1.2
节点负载	存储负载 处理请求负	载	Gaussian 分布	μ:	$= \frac{C}{N \times 30 \times 2}$ $\sigma = 0.1\mu$
表 2 Gnutela-like 分布					
值	101	10 <sup>2</sup>	10 <sup>3</sup>	$10^{4}$	10 <sup>5</sup>
概率/%	20	45	30	4.9	0.1

### 4.2 实验结果分析

在实验中单重资源的负载均衡只考虑存储资源。图2和 3 描述了各资源负载在不同实验下的分布情况。图4 中单重 资源1和单重资源2 是同一个实验。另外,单重资源1 的节点 类型只按照存储资源进行定义,因而其不存在扭曲负载节点。 单重资源2 和多重资源的节点类型则按照两种资源进行定义。



图 2 表明节点的存储负载基本都依赖于自身的能力,其中 单重资源均衡效果要稍优于图 2(b)的 MRLB。但从图 4 多重 资源可知,图 2(b)不均衡节点数实际上并不超过 40 个。图 3 描述了节点处理查询请求资源负载的分布情况。图 3(a)的查 询请求负载严重不均,基本上不依赖于节点能力,从图 4 单重 资源 2 中得出真正均衡的节点数不超过 10 个。图 3(b)却保 证节点查询请求负载与节点能力保持一致。图 4 中虽然单重 资源 1 和多重资源的常规负载节点都可以达到 950 个以上,但 单重资源 1 却并不能真实地代表节点的负载情况。

实验结果最终表明,在网络中同时存在两种瓶颈资源的情况下,若只考虑一种资源的负载均衡,将忽视节点的其他瓶颈资源的能力。而 MRLB 算法能确保节点承担的每个资源的负载与自身能力值基本保持一致,也就是实验中存储负载和处理请求负载都随着对应资源能力的上升而增加。理论上 MRLB 算法适用于任意数目的瓶颈资源,但随着瓶颈资源数目的增加,相应计算量也将增加,节点上每个资源同时达到负载均衡的难度也将增加。

# 5 结束语

本文通过相似度模型和转移代价函数,设计出了 MRLB 算法。该算法运用令牌环轮询机制来收集全局信息,并使用 管理节点负责虚拟服务器的转移,最终实现了任意结构化 P2P 网络下多种资源的负载均衡问题。仿真实验表明,MRLB 算法使网络中节点各尽其能,最优化地利用了网络资源,避 免了瓶颈节点的产生。如何使 MRLB 算法更好地适应 Chum 情形,满足网络的动态环境,以及在转移虚拟服务器时考虑 拓扑一致性,尽可能降低转移开销,这些问题是今后研究的 重点。

# 参考文献:

- [1] STOICA I, MORRIS R, KARGER D, et al. Chord: a scalable peerto-peer lookup service for Internet applications [C]//Proc of Conference on Application, Technologies, Architectures, and Protocols for Computer Communications. New York: ACM Press, 2001: 149-160.
- [2] ROWSTRON A, DRUSCHEL P. Pastry: scalable, decentralized object location, and routing for large-scale peer-to-peer systems [C]// Proc of IFIP/ACM International Conference on Distributed Systems Platforms. Berlin: Springer, 2001: 329-350.

(上接第3707页)

- [6] MAN Zhong-xiao, ZHANG Zhan-jun, LI Yong. Deterministic secure direct communication by using swapping quantum entanglement and local unitary operations [J]. Chinese Physics Letters, 2005, 22 (1): 18-21.
- [7] LEE H, LIM J, YANG H. Quantum direct communication with authentication[J]. Physical Review A, 2006, 73(4):042305-1-5.
- [8] CAO Hai-jing, SONG He-shan. Quantum secure direct communication with W state[J]. Chinese Physics Letters, 2006, 23(2):290-292.
- [9] 杨新元,马智,吕欣.基于W态的量子安全直接通信协议[J].计 算机科学,2009, 36(10):68-71.
- [10] 王剑,张盛,张守林,等.基于纯纠缠态的量子安全直接通信协议
   [J].国防科技大学学报,2009,31(2):51-54.
- [11] 徐红云,杨新元,马智,等.基于部分纠缠态的量子安全直接通信 协议[J]. 计算机工程, 2010, 36(2): 170-172.
- [12] 权东晓,裴昌幸,刘丹,等.基于单光子的单向量子安全通信协议
   [J].物理学报,2010,59(4):2493-2496.
- [13] 刘晓芬,潘日晶.集体旋转噪声信道上的量子安全直接通信[J]. 福建师范大学学报:自然科学版,2011,27(5):117-119.
- [14] 曹正文,冯晓毅,康维宏,等.基于一类 W 态密集编码的量子安全

- [3] RATNASAMY S, FRANCIS P, HANDLEY M, et al. A scalable content-addressable network [C]//Proc of Conference on Application, Technologies, Architectures, and Protocols for Computer Communications. New York: ACM Press, 2001: 161-172.
- [4] RAO A, LAKSHMINARAYANAN K, SURANA S, et al. Load balancing in structured P2P systems [C]//Proc of International Workshop on Peer-To-Peer Systems. Berkely: Springer, 2003: 68-79.
- [5] GODFREY B, LAKSHMINARAYANAN K, SURANA S, et al. Load balancing in dynamic structured P2P systems [C]//Proc of IEEE IN-FOCOM. Washington DC: IEEE Computer Society, 2004: 2253-2262.
- [6] ZHU Y. Load balancing in structured P2P networks [M]//Handbook of Peer-to-Peer Networking. Berlin: Springer, 2009: 1149-1164.
- ZHU Y, HU Y. Efficient, proximity-aware load balancing for DHTbased P2P systems [J]. IEEE Trans on Parallel and Distributed Systems, 2005, 16(4): 349-361.
- [8] HSIAO H C, LIAO H, CHEN S T, et al. Load balance with imperfect information in structured peer-to-peer systems [J]. IEEE Trans on Parallel and Distributed Systems, 2011, 22(4): 634-649.
- [9] HAUTAKORPI J, MÄENPÄÄ J. Load balancing for structured P2P networks using the advanced finger selection algorithm (AFSA) [C]//Proc of ACM Symposium on Applied Computing. New York: ACM Press, 2010: 655-662.
- [10]张宇翔,张宏科. 一种层次结构化 P2P 网络中的负载均衡方法
   [J]. 计算机学报,2010,33(9):1580-1590.
- [11] AGHBARI Z A, KAMEL I, MUSTAFA A. Dynamic storage and access load balancing for answering range queries in peer-to-peer networks [J]. Peer-to-Peer Networking and Applications, 2009, 4 (4): 391-409.
- [12] TOMIMOTO T, TACHIBANA T, SUGIMOTO K. Capability-aware object management based on skip list in large-scale heterogeneous P2P networks [J]. WSEAS Trans on Communications, 2010, 9(5): 312-321.
- [13] MI W, ZHANG C H, QIU X F. SLBA: a security load-balancing algorithm for structured P2P systems [J]. Journal of Computational Information Systems, 2012, 8(7): 2751-2760.

直接通信方案[J]. 光电子·激光, 2012, 23(6): 1152-1158.

- [15] 王晓芹,逯怀新,赵加强. 广义 GHZ 态的纠缠与非定域性[J]. 物 理学报, 2011, 60(11): 110301-1-5.
- [16] 王晓芹,逯怀新,赵加强. 三体 W 态的纠缠与非定域性[J]. 量子 电子学报, 2012, 29(5): 542-546.
- [17] SALEMIAN S, MOHAMMADNEJAD S. An error-free protocol for quantum entanglement distribution in long-distance quantum communication[J]. Chinese Science Bulletin, 2011, 56(7):618-625.
- [18] HAO Xiang, SHA Jin-qiao, SUN Jian, et al. Dynamics of quantum entanglement in reservoir with memory effects [J]. Communications in Theoretical Physics, 2012, 57(1):29-33.
- [19] LIU Zhi-hao, CHEN Han-wu, LIU Wen-jie, et al. Quantum secure direct communication with optimal quantum superdense coding by using general four-qubit states [J]. Quantum Information Processing, 2013, 12(1):587-599.
- [20] NIELSEN M A, CHUANG I L. Quantum computation and quantum information [M]. Cambridge, UK: Cambriage University Press, 2000: 464-465.
- [21] MAURICIO, GUTIÉRREZ, LUKAS, et al. Approximation of realistic errors by Clifford channels and Pauli measurements [J]. Physical Review A,2013, 87(3): 030302(R)1-5.