

3-维 Mesh 网络容错性的概率分析研究^{*})

王高才 陈建二 王国军 陈松乔

(中南大学信息科学与工程学院 长沙410083)

Probabilistic Analysis on Fault Tolerance of 3-Dimensional Mesh Networks

WANG Gao-Cai CHEN Jian-Er WANG Guo-Jun CHEN Song-Qiao

(College of Information Science and Engineering, Central South University, Changsha 410083)

Abstract Mesh network is very popular and important topological structure in parallel computing. In this paper, we focus on the fault tolerance of 3-dimensional mesh. We use the probability model to analyze the fault tolerance of mesh. To simplify our analysis, we assume the failure probability of each node is independent. We partition a 3-dimensional mesh into smaller submeshes and compute the probability with which each submesh satisfies the condition we define. If each submesh satisfies the condition, then the whole mesh is connected. We then compute the probability that a 3-dimensional mesh is connected assuming each node has a failure probability p . We use mathematical methods to derive a relationship between network node failure probability and network connectivity probability. Our simulations show that 3-dimensional mesh networks can remain connected with very high probability in practice. For example, the paper formally proves that when the network node failure probability is bounded by 0.05%, 3-dimensional mesh network of more than two hundred thousand nodes remain connected with probability larger than 99%. Theoretical and experimental results show that our method is powerful technique to calculate the lower bound of the connectivity probability of mesh network.

Keywords 3-dimensional mesh networks, k -submesh, Connectivity, Probabilistic analysis

1 引言

在众多的并行计算机系统的互连网络模型中, Mesh 网络是研究者们研究得较早的, 并且现在仍然是最为重要的和最有吸引力的网络模型之一。而较为有用的和最为流行的是低维的 Mesh 网络, 因此为国内外许多多处理机系统的拓扑结构所采用。如 Intel Paragon、MIT-J machine、Stanford DASH、Touchstone DELTA、Symult 2010^[4~6]等和国内的曙光系列采用二维的 Mesh 网络, 特别地, Cary T3D、Tera Computer System 和 IBM 研究中心的 Blue Gene supercomputer^[7~9]等采用3-维的 Mesh 网络。

随着 Mesh 网络的结点(处理器、存储器及路由器)数目的增加, 网络中某些结点出错可能性也随之增加, 因此, 研究 Mesh 网络容错性就显得非常重要了。近年来, 国内外学者对 Mesh 网络本身和容错 Mesh 网络路由算法都做了大量的研究^[10~15]。即研究当 Mesh 网络中某些结点出错时, 剩余的正确结点之间是否能够保持通信。

在本文中, 我们主要研究3-维 Mesh 网络的容错性。3-维 Mesh 网络比2-维 Mesh 网络有更好的连通性, 易于扩展到大规模的拓扑结构。在3-维 Mesh 网络中, 每个结点并不能保证其为正确结点, 而是有一定的出错概率。3-维 Mesh 网络的使用者非常关心的问题是当网络中结点出错时, 3-维 Mesh 网络是否还能保持正确结点间相互通信。传统的网络容错性的定义是使得网络不连通的最大的结点数。因为3-维 Mesh

网络的结点的度是非常低的, 分别为(3, 4, 5或6), 所以, 它的容错性就是2。但是, 实际情况是当3-维 Mesh 网络中多于2个结点出错结点时, 它仍有可能保持连通。因此, 我们需要使用不同的方法来度量3-维 Mesh 网络的容错性。

我们基于子网和概率模型^[1~3]提出一套新的技术以摆脱在目前容错模型下研究网络的容错性和容错路由算法时所处的困境。在本文中, 我们使用子网和概率模型来分析3-维 Mesh 网络的容错性。为简化我们的分析, 我们假设每个结点具有独立的出错概率, 我们把3-维 Mesh 网络分成较小的子网, 并计算出每个子网满足我们定义的条件概率。如果每个子网都满足我们定义的条件, 则我们假定每个结点具有独立的出错概率 p 计算出整个3-维 Mesh 网络连通的概率。我们使用严格的数学方法推导出结点出错概率与3-维 Mesh 网络连通概率之间的一个关系。

2 相关概念及定义

我们首先给出 n -维 Mesh 网络、3-维 Mesh 网络及其子网的定义。

定义1 一个 n -维 Mesh 网络有 $K_0 \times K_1 \times \dots \times K_{n-1}$ 个结点, K_i 是第 i 维的宽度, 并有 $0 \leq i \leq n-1$ 。我们用 $M_n(k_0 \times k_1 \times \dots \times k_{n-1})$ 来标识一个 n -维 Mesh 网络。用 $(U_0, U_1, \dots, U_{n-1})$ 来标识结点 U , $0 \leq U_i \leq K_{i-1}$ 。

定义2 一个3-维 Mesh 网络中的结点由 x, y 和 z 来标识, $x=1, 2, \dots, K, y=1, 2, \dots, K, z=1, 2, \dots, K$ 。一个3-维 k -

^{*})国家自然科学基金(90104028)和长江学者奖励计划资助项目。王高才 博士生, 主要感兴趣的研究为计算机网络、容错性等方面。陈建二 博士, 长江学者特聘教授, 博士生导师, 主要从事计算机理论、计算机算法优化和计算机图形学等相关领域的研究工作。王国军 博士, 副教授, 主要从事网络计算, 软件工程方面的研究工作。陈松乔 教授, 博士生导师, 主要从事软件工程方面的研究工作。

Mesh子网由三个整数 a, b 和 c 决定, $a < K/k, b < K/k$ 和 $c < K/k$. k -Mesh子网的规模为 $k_0 \times k_1 \times \dots \times k_{n-1}$, 它的结点的坐标 (x', y', z') 为 $x' = ak + 1, ak + 2, \dots, (a+1)k, y' = bk + 1, bk + 2, \dots, (b+1)k, z' = ck + 1, ck + 2, \dots, (c+1)k$. (为了使我们的讨论简单, 我们假设 K 是能被 k 整除的整数, 其它情况可以类似地考虑, 其结果可能有微小的差别).

本文中, $M_3(K)$ 表示一个 $K = K_0 = K_1 = K_2$ 的3-维 Mesh 网络, 用 $M_3(k)$ 表示一个 $k = k_0 = k_1 = k_2$ 的3-维 k -Mesh子网. 由定义2可知, 一个规模为 $K \times K \times K$ 的3-维 Mesh 网络 $M_3(K)$ 可以分成 $(K/k)^3$ 个不相交的3-维 k -Mesh子网. 两个结点 u 和 v 是邻结点当且仅当 (u_x, u_y, u_z) 和 (v_x, v_y, v_z) 的任意一维坐标值之差为1而其它维相同. 邻接的3-维 k -Mesh子网也可类似地定义.

给定一个3-维 Mesh 网络 $M_3(K)$ 和结点出错概率 p , 我们试图得到整个 $M_3(K)$ 的连通概率. 由于3-维 Mesh 网络中存在相当多的各种类型的连通形式, 所以对一般结点出错情况下精确地给出3-维 Mesh 网络连通性是相当困难的. 因此, 我们试图得到连通概率的一个下界. 我们的方法是把一个3-维 Mesh 网络 $M_3(K)$ 分成若干个小的3-维 k -Mesh子网, 然后再计算满足一定条件的3-维 k -Mesh子网的连通的概率, 而计算3-维 k -Mesh子网的连通的概率是非常方便的.

3 容错概率计算的推导

如前所述, 网络的使用者非常关心的是: 如果要达到一给定的网络连通的概率, 则网络中结点的出错概率必须控制在什么范围? 本节将围绕着这一问题, 对给定的网络结点出错概率 p , 推导出3-维 Mesh 网络 $M_3(K)$ 连通概率的一个下界.

对于一个3-维 Mesh 网络 $M_3(K)$, 我们首先考虑两个相邻的3-维 k -Mesh子网 $M_3(k)$ 是连通的概率. 因为每 $M_3(k)$ 有6个面, 每个面上有 k^2 个结点. 在两个相邻的3-维 k -Mesh子网之间将形成 k^2 对邻接点. 假定每个结点出错的概率为 p , 则一对相邻结点同时出错的概率为 p^2 , k^2 对邻接点同时出错的概率为 $(p^2)^{k^2}$, 则至少有一对正确的相邻结点的概率为 $1 - (p^2)^{k^2}$.

我们定义一个事件 $C(M_3(k))$ 如下.

事件 $C(M_3(k))$: 在3-维 k -Mesh子网 $M_3(k)$ 中, 每一层上的正确结点数目大于错误结点数, 且所有正确结点是连通的.

根据事件 $C(M_3(k))$, 我们自然有如下引理.

引理1 如果3-维 k -Mesh子网 $M_3(k)$ 中的每一层都满足事件 $C(M_3(k))$ 所定义的条件, 则3-维 k -Mesh子网 $M_3(k)$ 中所有正确结点是连通的.

证明: 在一个3-维 k -Mesh子网 $M_3(k)$ 中, $M_3(k)$ 能被分成不相交的 k 层. 不失一般性, 任意选择相邻的两层, 因为在 $M_3(k)$ 的每个层上共有 k^2 个结点, 则在两相邻的层之间构成 k^2 对邻接点, 根据我们在事件 $C(M_3(k))$ 中定义的条件, 至少有一半的正确结点, 也就是说相邻的两层间至少存在一对正确结点. 又因为每层中正确结点是连通的, 所以至少有一对正确的邻接点将两层中的正确结点连通起来. 即整个3-维 k -Mesh子网 $M_3(k)$ 中的所有正确结点是连通的. $\square$

引理2 假设每个结点具有独立的出错概率 p , 则在3-维 k -Mesh子网 $M_3(k)$ 中, 事件 $C(M_3(k))$ 的概率为

$$\Pr[C(M_3(k))] = \left(\sum_{i=0}^{k^2} W_{k,i} (1-p)^{k^2-i} p^i \right)^k$$

这里, $0 \leq i \leq k^2$, $W_{k,i}$ 为当从每层中去掉 i 个结点后, 仍保持每层的正确结点大于错误结点, 并使每层中所有正确结点保持连通的方法种数.

证明: 在3-维 k -Mesh子网 $M_3(k)$ 的任意一层中, 我们随机地选取 i 个结点, 并保持其正确结点大于错误结点和所有正确结点保持连通. 令这 i 个结点为错误结点, 其余 $k^2 - i$ 个结点为正确结点, 这一事件的概率为 $(1-p)^{k^2-i} p^i$. 因此, $W_{k,i} (1-p)^{k^2-i} p^i$ 是每层中有刚好 i 个错误结点并仍保持其连通的概率. 由此推出, $\sum_{i=0}^{k^2} W_{k,i} (1-p)^{k^2-i} p^i$ 为3-维 k -Mesh子网 $M_3(k)$ 每层满足事件 $C(M_3(k))$ 的概率. 因为一个3-维 k -Mesh子网 $M_3(k)$ 共有不相交的 k 层. 所以同时发生的概率为每层满足事件 $C(M_3(k))$ 的概率的交集, 我们有

$$\Pr[C(M_3(k))] = \left(\sum_{i=0}^{k^2} W_{k,i} (1-p)^{k^2-i} p^i \right)^k \quad \square$$

在3-维 Mesh 网络 $M_3(K)$ 中, 我们再定义如下事件.

事件 $C(M_3(K))$: 在3-维 Mesh 网络 $M_3(K)$ 中所有正确结点是连通的.

定理1 假设每个结点具有独立的出错概率 p , 则在3-维 Mesh 网络 $M_3(K)$ 中, 事件 $C(M_3(K))$ 的概率至少为

$$\Pr[C(M_3(K))] \geq \left(\sum_{i=0}^{k^2} W_{k,i} (1-p)^{k^2-i} p^i \right)^{K^3/k^2} \cdot (1 - (p^2)^{k^2})^{K^3/k^2}$$

证明: 在一个3-维 Mesh 网络 $M_3(K)$ 中, $M_3(K)$ 能被分成 $(K/k)^3$ 个不相交的3-维 k -Mesh子网 $M_3(k)$. 此前, 我们已得到两个相邻的3-维 k -Mesh子网 $M_3(k)$ 连通的概率至少为 $1 - (p^2)^{k^2}$, 在引理2中, 我们证明事件 $C(M_3(k))$ 的概率为 $\left(\sum_{i=0}^{k^2} W_{k,i} (1-p)^{k^2-i} p^i \right)^k$. 如果 $(K/k)^3$ 个不相交事件 $C(M_3(k))$ 同时发生和任意两个相邻的3-维 k -Mesh子网 $M_3(k)$ 是连通的, 则3-维 Mesh 网络 $M_3(K)$ 中的所有正确结点将是连通的. 所以我们有

$$\begin{aligned} \Pr[C(M_3(K))] &\geq \Pr[C(M_3(k))_1 \cap C(M_3(k))_2 \cap \dots \cap C(M_3(k))_{(K/k)^3}] \cdot (1 - (p^2)^{k^2})^{K^3/k^2} \\ &= \Pr[C(M_3(k))_1] \cdot \Pr[C(M_3(k))_2] \cdot \dots \cdot \Pr[C(M_3(k))_{(K/k)^3}] \cdot (1 - (p^2)^{k^2})^{K^3/k^2} \\ &= \Pr[C(M_3(k))]^{(K/k)^3} \cdot (1 - (p^2)^{k^2})^{K^3/k^2} \\ &= \left(\sum_{i=0}^{k^2} W_{k,i} (1-p)^{k^2-i} p^i \right)^{(K^3/k^2)} \cdot (1 - (p^2)^{k^2})^{K^3/k^2} \end{aligned}$$

所以, 3-维 Mesh 网络 $M_3(K)$ 中的所有正确结点是连通的概率至少不小于这一概率, 也就是说事件 $C(M_3(K))$ 概率至少

为 $\left(\sum_{i=0}^{k^2} W_{k,i} (1-p)^{k^2-i} p^i \right)^{(K^3/k^2)} \cdot (1 - (p^2)^{k^2})^{K^3/k^2}$. 由此, 我们推出3-维 Mesh 网络 $M_3(K)$ 的连通概率的一个下界. $\square$

4 实验结果

在这一节中, 我们将给出定理1的理论与实验结果并讨论其在研究3-维 Mesh 网络容错性方面的作用. 我们首先考虑在引理2中, 当 $k=3$ 时事件 $C(M_3(3))$ 的概率.

引理3 假设每个结点具有独立的出错概率 p , 则在3-维 3-Mesh子网 $M_3(3)$ 中, 事件 $C(M_3(3))$ 的概率为

$$\Pr[C(M_3(3))] = \left(\sum_{i=0}^9 W_{3,i} (1-p)^{9-i} p^i \right)^3 = ((1-p)^9 + 9$$

$$(1-p)^8 p + 32(1-p)^7 p^2 + 48(1-p)^6 p^3 + 49(1-p)^5 p^4)^3$$

证明:我们先考虑每层中的情况。当一层中有0个或1个错误结点时,该层明显满足事件 $C(M_3(3))$ 中的条件,这一概率为 $(1-p)^9 + 9(1-p)^8 p$ 。因为共有9个结点,要保持正确结点

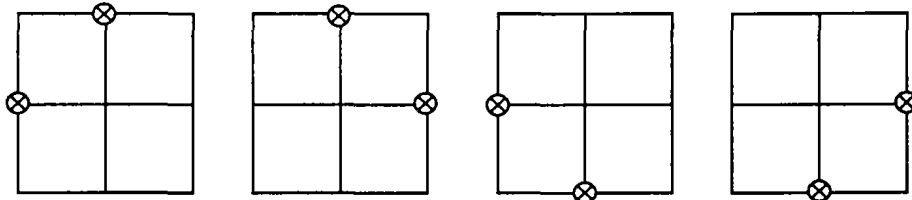


图1 当有2个错误结点时使得该层不连通的情况

又因为每层是相互独立的,所以在3-维3-Mesh子网 M_3 (3)中的事件 $C(M_3(3))$ 的概率为 $((1-p)^9 + 9(1-p)^8 p + 32(1-p)^7 p^2 + 48(1-p)^6 p^3 + 49(1-p)^5 p^4)^3$ 。□

因此,我们自然有如下推论。

推论1 假设每个结点具有独立的出错概率 p ,则在3-维 Mesh 网络 $M_3(K)$ 中,所有正确结点连通的概率至少为

$$\Pr[C(M_3(K))] \geq ((1-p)^9 + 9(1-p)^8 p + 32(1-p)^7 p^2 + 48(1-p)^6 p^3 + 49(1-p)^5 p^4)^{K^3/9} \cdot (1-(p^2)^9)^{K^3/27}$$

根据推论1,我们分3-维 Mesh 网络 $M_3(K)$ 为 $K^3/27$ 个不相交的3-维3-Mesh子网 $M_3(3)$, $K \geq 3$ 。我们对于不同网络规模3-维 Mesh 网络 $M_3(K)$,给定的结点出错概率,计算出了网络连通的概率的一个下界。同时,我们假定要求3-维 Mesh 网络 $M_3(K)$ 连通的概率至少为99%时,我们对不同规模的3-维 Mesh 网络计算出对网络结点出错概率的要求。见下表1。

表1 按3-维3-Mesh子网 $M_3(3)$ 的连通概率计算的结果

3-Dimensional Mesh Size	The Number of Nodes	Lower Bound of Connectivity Probability ($p = 0.01\%$)	Upper Bound of Node Failure Probability (Connectivity Probability=99%)
9×9×9	729	99.9986%	≤0.5540%
18×18×18	5832	99.9884%	≤0.1965%
30×30×30	27000	99.9464%	≤0.0914%
36×36×36	46656	99.9073%	≤0.0696%
72×72×72	373428	99.2612%	≤0.0246%

上述计算结果表明,如果我们能保证网络结点满足表1中所要求的出错概率,则相对应的3-维 Mesh 网络连通的概率可以保证达到99%。注意表1只是给出了网络结点出错概率一个上界,这个上界是基于对3-Mesh子网 $M_3(3)$ 连通性的计算得出的。如果我们考虑较大的3-维 k -Mesh子网的连通概率,我们能得到3-维 Mesh 网络的连通概率的一个更好的下界。所以我们编制了一段C语言程序,将所有可能的去掉 i 个结点的方法都枚举出,并记录下保持3-维 k -Mesh子网连通的方法个数,从而计算出 $W_{s,i}$ 的值(注意当 k 值较大时,某些值在单机上在短时间内是难以计算出来的)。我们计算了当 $k=5$ 时的 $W_{s,i}$ 的值。我们有如下引理。

引理4 假设每个结点具有独立的出错概率 p ,则在3-维 5-Mesh子网 $M_3(5)$ 中,所有正确结点连通的概率至少为

$$\Pr[C(M_3(5))] = \sum_{i=0}^{25} W_{s,i} (1-p)^{25-i} p^i = (1-p)^{25} + 25(1-p)^{24} p + 296(1-p)^{23} p^2 + 2188(1-p)^{22} p^3 + 111051$$

大于错误结点的数目,则错误结点最多为4。当有2个错误结点时,我们列出如下图所示的使得该层不连通的情况,共有4种,而任意从该层取出2个结点的情况种数为 $C_2^9 = 36$ 种,所以满足要求情况的种数是32种。当有3、4个结点时可类似计算出来。分别为48种和49种。

$$(1-p)^{21} p^4 + 41288(1-p)^{20} p^5 + 111180(1-p)^{19} p^6 + 221076(1-p)^{18} p^7 + 332580(1-p)^{17} p^8 + 392525(1-p)^{16} p^9 + 378190(1-p)^{15} p^{10} + 257864(1-p)^{14} p^{11} + 217531(1-p)^{13} p^{12}$$

根据定理1和引理4,我们分3-维 Mesh 网络 $M_3(K)$ 为 $K^3/125$ 个不相交的3-维5-Mesh子网 $M_3(5)$, $K \geq 5$ 。我们计算了与表1相同3-维 Mesh 网络规模下的参数值。计算结果如表2。

表2 按3-维5-Mesh子网 $M_3(5)$ 的连通概率计算的结果

3-Dimensional Mesh Size	The Number of Nodes	Lower Bound of Connectivity Probability ($p = 0.01\%$)	Upper Bound of Node Failure Probability (Connectivity Probability=99%)
10×10×10	1000	99.9852%	≤0.7771%
15×15×15	3375	99.9501%	≤0.4268%
20×20×20	8000	99.8818%	≤0.2783%
40×40×40	64000	99.0584%	≤0.1772%
50×50×50	125000	98.1692%	≤0.0708%
60×60×60	216000	96.8575%	≤0.05385%

很明显,表2的结果不论是连通概率的下界还是结点出错概率的上界都比表1的结果好。所以,表2结果进一步说明了大规模3-维 Mesh 网络的可用性和较好的连通性。例如,当网络结点出错概率被控制在0.05%时,则具有216000个结点的3-维 Mesh 网络仍可达到大于99%的连通概率。我们指出,按照现有的大型集成电路技术,将结点出错概率控制在0.05%是完全可能的。

结论 本文主要研究3-维 Mesh 网络的连通性。因为3-维 Mesh 网络结点的度很低,当 Mesh 网络的规模增大时,3-维 Mesh 网络不能保持连通的概率也随之增加。因此,研究3-维 Mesh 网络能达到所要求的连通概率是相当重要且不可回避的重要课题。我们在本文中提出的3-维 k -Mesh子网的方法使得我们能够基于结点出错概率来研究3-维 Mesh 网络的连通性。我们运用严格的数学推理,推导出网络结点出错概率必须控制在怎样的范围以达到某一给定的3-维 Mesh 网络的连通概率。据我们所知,这是第一次对 Mesh 网络连通概率给出严格的数学推导。从另一方面来看,我们研究表明以3-维 Mesh 网络为拓扑的多处理器计算机系统是可能保持相当高的连通概率的。例如,我们严格证明了,当网络结点出错概率控制在0.05%以下,则对多达二十多万个结点的3-维 Mesh 网络,网

(下转第96页)

可采取签名保护方法来维护审计日志,审计控制模块可对这些日志进行验证。审计控制模块里也可安装入侵触发器,它周期性地给其他组件发出合法或不合法的请求,然后通过验证这些组件的响应来识别异常行为,处理过的响应被传到适应性重配置模块来作进一步处理。

基于入侵容忍机制,系统在面对攻击的情况下,能够识别已被攻破的系统组件,评估破坏程度,进而动态地对软硬件资源和安全策略进行重配置来平滑地降低系统的功能和性能,保持尽量多的关键功能模块的正常运行,增强安全性,同时仍然持续地为预期的用户提供服务。

结束语 在本文中,我们提出了一个具有预警功能的网络监管体系结构,该体系结构并不改变网络用户和受保护服务器的应用,它对端用户和服务器应用都是透明的。该体系结构不仅能增强受保护服务的安全性和可用性,而且是一个具有可扩展性、开放性和通用性的合作框架。

然而,在该体系结构的实现上,尚有一些难题需要解决。一个高度可重配体系结构应具备多种入侵容忍策略并支持不同级别的安全需求。这就需要选择不同的入侵容忍技术、资源冗余程度等措施来定义不同的策略,还涉及代价/性能比的折衷问题,非常复杂。而且,在运行时对安全策略的重配置可能导致以传统方式设计的软件(没有考虑到动态的安全)不同程度的出错,包括关键进程不期望的终止^[10]。我们将在下一步工作中对这些难点进行研究。

参考文献

- 1 Axelsson S. Intrusion detection systems: a survey and taxonomy. 14 March, 2000. Available at <http://citeseer.nj.nec.com/axelsson00intrusion.html>
- 2 Mukherjee, Heberlein L T, Levitt K N. Network intrusion detection. IEEE Network, 1994, 8(3): 26 ~ 41
- 3 Eskin E, Miller M, et al. Adaptive Model Generation for Intrusion Detection Systems. Available at: <http://www.cs.columbia.edu/ids/publications/adaptive-ccsids00.pdf>
- 4 Lee W, Stolfo S J, et al. Real Time Data Mining-based Intrusion Detection. Available at: <http://www.cs.columbia.edu/ids/concept/>
- 5 Lee W, Stolfo S J, Mok K. Data mining in work flow environments: Experiences in intrusion detection. In: proc. of the 1999 conf. on Knowledge Discovery and Data Mining (KDD-99), 1999
- 6 Warrender C, Forrest S, Pearlmuter B. Detecting intrusions using system calls: alternative data models. IEEE Computer Society. In: Proc. of the 1999 IEEE Symposium on Security and Privacy, 1999. 133~145
- 7 King M, Dalton C E, Osmanoglu T E. Security architecture: design, deployment and operations. Sydney: Osborne/McGraw-Hill, 2001. 132
- 8 Yau S S, Zhang Xinyu. Computer network intrusion detection, assessment and prevention based on security dependency relation. Available at: <http://dlib.computer.org/conferen/compsac/0368/pdf/03680086.pdf>
- 9 wang Feiyi, Gong Fengmin. SITAR: A scalable intrusion-tolerant architecture for distributed services. In: Proc. of the 2001 IEEE. Workshop on information Assurance and Security. United States Military Academy, West Point, NY, 2001 Available at: <http://panda.ece.utk.edu/~fwang2/papers/SITAR-norfolk-2001.pdf>
- 10 Petkac M, Badger L. Security agility in response to intrusion detection. Proceeding of the Sixteenth Annual Computer Security Applications Conference (ACSAC'00). Available at: <http://www.acsac.org/2000/papers/43.pdf>
- 11 Van Hemmen L J G T. Models supporting the network management organization. International Journal of Network Management, 2000, 10: 299~314

(上接第79页)

络连通的概率仍可保持在99%以上。

参考文献

- 1 王国军, 陈建二, 陈松乔. 具有大量错误结点的超立方网络中的高效路由算法的设计与讨论. 计算机学报, 2001, 24(9): 909~916
- 2 Chen Jianer, Wang GuoJun, Chen SongQiao. Locally subcube-connected hypercube networks: Theoretical analysis and experimental results. IEEE Transactions on Computers, 2002, 51(5): 530~540
- 3 王高才, 陈建二, 张祖平. aMesh 网络容错概率上界及其证明. 卢正鼎主编. 2002全国开放式分布与并行计算学术会议论文集. 武汉: 华中科技大学出版社, 2002. 295~298
- 4 Lillevik S L. The Touchstone 30 Gigaflop DELTA Prototype. In: Q. F. Stout, M. Wolfe, eds. IEEE Proceedings of the Sixth Distributed Memory Computing Conference. Portland, Oregon: IEEE Computer Society Press, 1991. 671~677
- 5 Lenoski D, Laudon J, Gharachorloo K, et al. The Stanford DASH Multiprocessor. IEEE Computer, 1992, 25(3): 63~79
- 6 Agarwal A, Bianchini R, Chaiken D, et al. The MIT Alewife Machine: Architecture and Performance. In: Santa Margherita, ed. IEEE/ACM Proceedings of the 22nd Annual Intl. Symposium on Computer Architecture, Ligure, Italy: ACM Press, 1995. 2~13
- 7 Cray Research Inc. Cray T3D System Architecture Overview. Technical report, HR-04033, March 1994.
- 8 Alverson R, Callahan D, Cummings D, et al. The Tera Computer System. In: Proc. of the 1990 Intl. Conf. on Supercomputing. 1-6, 1990. <http://citeseer.nj.nec.com/alverson90tera.html>
- 9 Allen F, Almasi G, Andreoni W, et al. Blue Gene: A vision for protein Science using a petaflop supercomputer. IBM Systems J., 2001, 40: 310~337
- 10 Boppana R V, Chalasani S. Fault-tolerant wormhole routing algorithms for mesh networks. IEEE Transactions on Computer, 1995, 44(7): 848~864
- 11 Almohammand B F A, Bose Bella. Fault-tolerant communication algorithms in toroidal networks. IEEE Trans. Parallel and Distributed Systems, 1999, 10(10): 976~983
- 12 Gaucha P T, et al. Distributed, deadlock-free routing in faulty, pipelined, direct interconnection networks. IEEE Transactions on Computers, 1996, 45(6): 651~665
- 13 Suh Y J, Yalmanchili S. All-to-All Communication with Minimum Start-up Costs in 2D/3D Tori and Meshes. IEEE Trans. Parallel and Distributed Systems, 1998, 9(5): 442~458
- 14 Chen C-L, Chiu G-M. A fault-tolerant routing scheme for meshes with nonconvex faults. IEEE Trans. Parallel and Distributed Systems, 2001, 12(5): 467~475