

超立方体中基于极大安全链路矩阵的容错路由

苑召国, 郭大昌

(广东工业大学 应用数学学院, 广东 广州 510006)

摘要: 超立方体网络拓扑结构是多处理机系统中常见的一种. 随着多处理机系统规模的增大, 系统出现链路与结点故障的概率也随之增大. 针对超立方体结构的多处理机系统中存在链路故障的情况, 提出了用于最优通路记录的极大安全链路矩阵 (maximum safety-link matrices, M SIM s) 这一概念, 给出了一种建立 M SIM s 及其容错路由算法. 通过 $n-1$ 轮邻结点的信息交换, 用矩阵的形式记录最优通路; 与已有的容错路由算法相比, 极大安全链路矩阵解决了如何用矩阵的形式来记录最多最优通路数的问题.

关键词: 容错路由; 超立方体; 安全链路向量; 极大安全链路矩阵; 多处理机系统

中图分类号: O29

文献标识码: A

文章编号: 1007-7162(2008)01-0033-05

在众多网络拓扑结构中, n 维超立方体是最典型的网络拓扑结构, 由于超立方体结构具有正规性、对称性、可靠性、强容错性、直径短、可嵌入性和网络通信能力的可扩展性等优点, 使其深受实践者的欢迎. 随着多处理机系统规模的增大, 系统出现链路与结点故障的概率也随之增大. 在针对超立方体结构的容错路由设计方面, 人们做了大量的工作^[1~6]. 文献 [7] 在文献 [6] 的基础上改用矩阵来表示各邻结点的每条链路是否存在链路故障, 提出了最优通路矩阵 (optimal path matrices, OPM s) 的概念及其容错路由算法, 文献 [8] 在文献 [7] 的基础上修改了 OPM s 的定义, 提出了扩展最优通路矩阵 (extended optimal path matrices, EOPM s) 的概念及其容错路由算法, 文献 [9] 在文献 [7]、[8] 的基础上提出了极大安全通路矩阵 (maximum safety path matrices, M SPM s) 的概念及其容错路由算法, 它们记录的最优通路信息都比安全向量 (safety vectors, SV s)、扩展安全向量 (extended safety vectors, ESV s) 要多, 搜索最优通路的能力都比 SV s、ESV s 要强, 它们都是 SV s 的容错路由算法的扩展, 而 M SPM s 是 SV s、ESV s、OPM s 以及 EOPM s 的最大扩展.

本文针对 n 维超立方体结构的多处理机系统中存在链路故障的情况, 将提出了用于记录最优通路数的 M SIM s 及其容错路由算法. 给出极大安全链路矩阵的两个性质并证明, 同时还将证明在 n 维超立方体中, 对于任意结点 A , $M SIM a[i][j] = 0 (1 \leq i \leq n, 1 \leq j \leq n)$ (结点 A 和所有与其距离为 i 且第 j 位与其第 j 位互异的结点之间一定不存在 Hamming 距离为 i 的最优通路. M SIM s 是 SV s、ESV s、OPM s

EOPM s 以及 M SPM s 的扩展, 用矩阵的形式记录与源结点的距离为 $1 \sim n$ 的所有最短通路的条数.

1 极大安全链路矩阵

1.1 预备知识

定义 1 (超立方体) 超立方体是一个由 2^n 个结点组成的 n 维的图, 记做 Q_n . 图中每个结点地址用 $0 \sim 2^n - 1$ 的二进制数字来表示. 其中结点地址只有一位数字相异的两个结点有一条边相连. 结点地址为 $b(1)b(2) \dots b(n)$, $b(i) \in \{0, 1\}$, $1 \leq i \leq n$ 其中 $b(i)$ 表示结点地址的第 i 位.

用 $b^{(i)}$ 表示 b 沿 i 维的邻结点, 是 b 的第 i 维的地址. 例如, $1101^{(2)} = 1001$. 标志 Δ 定义了两个结点地址相异的维数, 例如: $1001\Delta 1110 = 0111$ 起始结点 u 与目的结点 v 的距离用 Hamming 距离 $H(u, v)$ 来表示.

定义 2 (距离)^[9] 对于 n 维超立方体 Q_n 中的结点 $A(w_{n-1} \dots w_1 w_0)$, $B(w'_{n-1} \dots w'_1 w'_0)$, 其中 $w_j, w'_j \in \{0, 1\}$, $j \in [0, 1]$, 定义 A, B 之间的互异位的个数, 即 A, B 之间的 Hamming 距离为 A, B 之间的距离; 若 A, B 之间的距离为 k , 则称 A, B 具有 k 距离.

定义 3 (k 距离最优通路)^[9] 对于 n 维超立方体 Q_n 中的结点 A, B , 若它们之间的距离为 k 且 A, B 之间存在一条距离为 k 的通路, 则称 A, B 之间存在 k 距离最优通路, 或简称 A, B 之间存在最优通路.

为了方便, 把源结点、目的结点和当前结点分别用 $source, dest, cur$ 表示; 结点 A 的第 i 个邻结点用 $nei(A, i)$ 表示; 结点 A 和结点 B 之间的距离用

$\text{Dist}(A, B)$ 表示

1.2 极大安全链路矩阵

定义 4(极大安全链路矩阵) 对于超立方体 Q_n 中的结点 A , 它的极大安全链路矩阵有 n 行 n 列, 记为 MSLM_A , 其中 $\text{MSLM}_A[i][j]$ ($1 \leq i \leq n, 1 \leq j \leq n$) 占一个位,

$$\text{MSLM}_A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \cdots & a_{nn} \end{bmatrix},$$

其矩阵中的 a_{ij} 表示结点 A 和所有与其 Hamming 距离为 i 且第 j 位与其第 j 位互异的结点之间存在的通路数.

它的值按如下规则计算:

$$\text{MSLM}_A[i][j] =$$

$$\begin{cases} 1 & \text{如果 } A \text{ 的 } k \text{ 维方向的链路无故障,} \\ 0 & \text{如果 } A \text{ 的 } k \text{ 维方向的链路有故障.} \end{cases}$$

当 $i \geq 2$ 时, 记为 MSLM_A 的第 i 行的值由 A 的邻结点的 MSLM_A 的第 $i-1$ 行的值计算得出, 方法如下:

$$\text{MSLM}_A[k] = [a_{k1}, a_{k2}, \dots, a_{kn}]$$

其中 a_{ij} 按如下规则赋值 ($1 \leq j \leq n$):

$$a_{ij} = \sum \text{SL}_A[i-1] \cdot \text{SL}_{(A,j)}[i-1][j]$$

$\text{SL}_A[i-1]$ 表示从结点 A 到距离为 $k-1$ 的某点的通路数,

$$\text{SL}_{(A,j)}[i-1][j] =$$

$$\begin{cases} 1 & \text{与结点 } A \text{ 距离为 } i-1 \text{ 的点和与结点 } A \text{ 距离为 } i \text{ 的} \\ & \text{且第 } j \text{ 位与第 } j \text{ 位互异的结点之间链路无故障} \\ 0 & \text{与结点 } A \text{ 距离为 } i-1 \text{ 的点和与结点 } A \text{ 距离为 } i \text{ 的且} \\ & \text{第 } j \text{ 位与第 } j \text{ 位互异的结点之间的链路有故障.} \end{cases}$$

依据 MSLM_s 及其链路状态的定义给出建立极大最优链路矩阵的描述算法如下:

Algorithm $\text{MSLM}_s()$

Collect link fault information to construct MSLM_s [1];

Send $\text{MSLM}_s[1]$ to non-faulty link

Receive all neighbor $\text{MSLM}_s[1]$;

For ($i = 2; i \leq n; i++$)

Calculate $\text{MSLM}_s[i]$ with all neighbor $\text{MSLM}_s[i-1]$ according to definition 4

显然算法 MSLM_s 赋值算法中的每个结点计算自身的 $\text{MSLM}_s[i]$ 时只需要用到自己邻结点的 $\text{MSLM}_s[i-1]$ 的信息, 因此 MSLM_s 的赋值可以通过 $n-1$ 轮结点之间的信息交换来完成; MSLM_s 为 $n \times n$ 矩阵, 各元素的取值为 $1 \sim n!$ 的自然数.

由定义易知, 对无故障的 n 维超立方体, 任意结

点的极大安全链路矩阵为

$$\begin{bmatrix} 1! \cdot C_{n-1}^0 & 1! \cdot C_{n-1}^0 & 1! \cdot C_{n-1}^0 & \cdots & 1! \cdot C_{n-1}^0 \\ 2! \cdot C_{n-1}^1 & 2! \cdot C_{n-1}^1 & 2! \cdot C_{n-1}^1 & \cdots & 2! \cdot C_{n-1}^1 \\ 3! \cdot C_{n-1}^2 & 3! \cdot C_{n-1}^2 & 3! \cdot C_{n-1}^2 & \cdots & 3! \cdot C_{n-1}^2 \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ n! \cdot C_{n-1}^{n-1} & n! \cdot C_{n-1}^{n-1} & n! \cdot C_{n-1}^{n-1} & \cdots & n! \cdot C_{n-1}^{n-1} \end{bmatrix}.$$

图 1 表示一个无故障的 Q_4

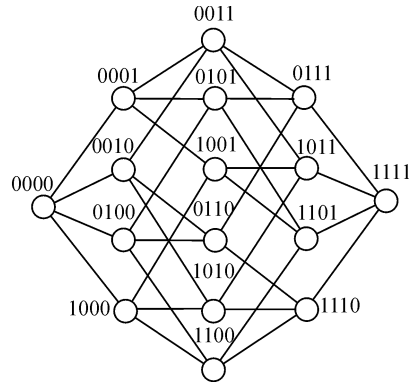


图 1 一个无故障的 Q_4

根据图 1 由上面的结论知, 图中结点 0000 的极大安全链路矩阵为

$$\begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 2! \cdot C_3^1 & 2! \cdot C_3^1 & 2! \cdot C_3^1 & 2! \cdot C_3^1 \\ 3! \cdot C_3^2 & 3! \cdot C_3^2 & 3! \cdot C_3^2 & 3! \cdot C_3^2 \\ 4! \cdot C_3^3 & 4! \cdot C_3^3 & 4! \cdot C_3^3 & 4! \cdot C_3^3 \end{bmatrix},$$

$$\text{即} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 6 & 6 & 6 & 6 \\ 18 & 18 & 18 & 18 \\ 24 & 24 & 24 & 24 \end{bmatrix}.$$

其中 $a_{32} = 18$ 表示与结点 0000 距离为 3 的且第 2 位与第 2 位互异的 3 个 1110, 1101, 0111 结点有 18 条最优通路. 同理, $a_{41} = 24$ 表示与结点 0000 距离为 4 的且第 1 位与第 1 位互异的结点 1111 有 24 条最优通路.

由极大安全链路矩阵的定义得性质 1、2

性质 1 由极大安全链路矩阵的定义所确定的每个结点的极大安全链路矩阵是唯一的.

证明 在只存在链路故障的 n 维超立方体中, 对于任意结点 A , 它的极大安全链路矩阵包含 n 行 n 列, 矩阵中的元素为 $\text{MSLM}_A[i][j]$ ($1 \leq i \leq n, 1 \leq j \leq n$), 它表示结点 A 和所有与其距离为 i 且第 j 位与其第 j 位互异的结点之间存在的通路数. 对于给定的 n 维超立方体, 边的链接情况也是唯一确定的, 所以每个结点的极大安全链路矩阵是唯一的.

性质 2 n 维超立方体中任意结点的极大安全

链路矩阵的第 n 行的元素都相等, 即

$$\text{MSIM}_A[n][j] = [a_{n1}, a_{n2}, \dots, a_{nn}] \quad (1 \leq j \leq n),$$

其中 $a_{n1} = a_{n2} = \dots = a_{nn}$.

证明 在只存在链路故障的 n 维超立方体中, 与任意结点 A 的距离为 n 的结点只有一个, 记为 B . 结点 B 的地址中的每一位都与结点 A 的相对应的位相异, 即结点 B 既是与结点 A 距离为 n 且第 1 位与第 1 位互异的点, 也是与结点 A 距离为 n 且第 2 位与第 2 位互异的点 同样也是与结点 A 距离为 n 且第 n 位与第 n 位互异的点.

所以, $a_{n1} = a_{n2} = \dots = a_{nn}$.

定理 1 $\text{MSIM}_A[i][j] = 0 (1 \leq i \leq n, 1 \leq j \leq n) \Leftrightarrow$ 结点 A 和所有与其距离为 i 且第 j 位与其第 j 位互异的结点之间一定不存在距离为 i 的最优通路.

证明 必要性: 由定义显然成立.

充分性: 由定义知, 若 $\text{MSIM}_A[i][j] = 0 (1 \leq i \leq n, 1 \leq j \leq n)$, 即 $a_{ij} = \sum \text{SL}_A[i-1] \cdot \text{SL}_{(A,j)}[i-1] / [i] = 0 (1 \leq i \leq n)$, 则对任意的 $1 \leq i \leq n$ 都有 $\text{SL}_A[i-1] / (\text{SL}_{(A,j)}[i-1] / [i]) = 0$ 等价于 $\text{SL}_A[i-1] = 0$ 或 $\text{SL}_{(A,j)}[i-1] / [i] = 0$ 其中 $\text{SL}_A[i-1] = 0$ 表示从结点 A 到与其距离为 $i-1$ 的某点的长度为 Hamming 距离的通路数为 0, $\text{SL}_{(A,j)}[i-1] / [i] = 0$ 表示与结点 A 距离为 $i-1$ 的结点和与结点 A 距离为 i 的且第 j 位与第 j 位互异的结点之间的链路有故障.

总之, 与结点 A 距离为 i 且第 j 位与第 j 位互异的结点不存在最优通路, 即 $\text{MSIM}_A[i][j] = 0 (1 \leq i \leq n, 1 \leq j \leq n)$.

定理 2 $\text{MSIM}_A[i][j] = m (1 \leq i \leq n, 1 \leq j \leq n) \hat{=}$ 结点 A 和所有与其距离为 i 且第 j 位与其第 j 位互异的结点之间一定存在 m 条 Hamming 距离为 i 的通路.

限于篇幅, 证明从略.

1.3 SV s ESV s OPM s EOPM s MSPM s 与 MSIM s 数据对比示例

图 2 表示含有 5 条链接故障的 Q_4 , 表 1 列出了图 2 所示的一个有故障的 4 维超立方体中结点 1000, 0110, 1110, 0000 的 SV s ESV s OPM s EOPM s MSPM s MSIM s 对比数据.

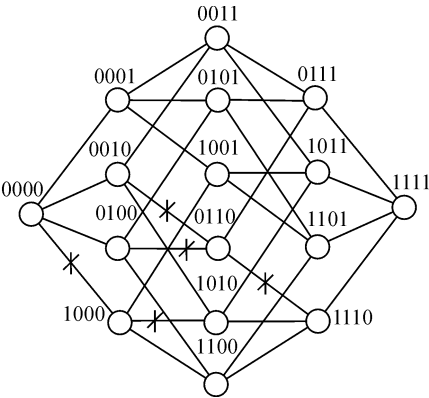


图 2 含有 5 条链接故障的 Q_4

表 1 图 2 部分结点的 SV s ESV s OPM s EOPM s MSPM s 和 MSIM s 数据

矩阵或向量	Node 1000	Node 0110	Node 1110	Node 1100	Node 0000
SV s	(0001)	(0001)	(0001)	(1001)	(0001)
ESV s	(0001)	(0001)	(0101)	(1011)	(0011)
OPM s	$\begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 0 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 0 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \end{pmatrix}$
EOPM s	$\begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 0 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 0 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \end{pmatrix}$
MSPM s	$\begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 0 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 0 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \end{pmatrix}$
MSIM s	$\begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & 1 \\ 2 & 4 & 2 & 4 \\ 6 & 8 & 6 & 10 \\ 11 & 11 & 11 & 11 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 3 \\ 4 & 4 & 4 & 6 \\ 6 & 6 & 6 & 6 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 0 & 1 & 1 & 1 \\ 3 & 4 & 4 & 5 \\ 10 & 10 & 10 & 12 \\ 14 & 14 & 14 & 14 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 3 & 4 & 3 & 6 \\ 11 & 12 & 11 & 14 \\ 16 & 16 & 16 & 16 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 0 & 1 & 1 & 1 \\ 3 & 3 & 3 & 5 \\ 10 & 10 & 10 & 12 \\ 14 & 14 & 14 & 14 \end{pmatrix}$

由表 1 结果可以看出, 结点 1000、0110、1110、1100、0000 的 OPM_s 、 $EOPM_s$ 、 $MSPM_s$ 、 $MSLM_s$ 的第一行的值是完全相同的, 这是因为它们的定义所定义的矩阵的初始值相同.

在结点 1000 处, 按照 $OPM_{1000}[3][1] = 0$, $EOPM_{1000}[3][1] = 0$, $MSPM_{1000}[3][1] = 0$ 的定义, 它们未能反映结点 1000 和与其 Hamming 距离为 3 且第 1 位与第 1 位互异的结点 0110、0101、0011 之间最优通路的存在, 而根据 $MSLM_{1000}[3][1] = 6$ 的定义, 它反映了结点 1000 与 0110、0101、0011 之间最优通路的存在. 实际上, 结点 1000 与 0101、0011 之间存在 6 条 Hamming 距离为 3 的通路.

从表 1 中还可以看出, 按照 $OPM_{1000}[4] = (1111)$, $EOPM_{1000}[4] = (1111)$, $MSPM_{1000}[4] = (1111)$ 的定义, 结点 0110 与其 Hamming 距离为 4 的结点 1001 之间一定存在最优通路, 而 $MSLM_{1000}[4] = (6666)$ 不仅说明结点 0110 与其 Hamming 距离为 4 的结点 1001 之间一定存在最优通路, 而且有 6 条 Hamming 距离为 4 的通路.

2 路由算法与性能分析

下面给出寻找最优路径的极大安全链路矩阵路由算法:

- 1) 确定源结点与目的结点, $dist = |source - dest| = k$, 建立源结点的极大安全链路矩阵.
- 2) 若源结点与目的结点之间的 Hamming 距离为 k 的通路数不为 0, 则:

- (i) 此 k 距离通路即是最优通路, 则消息沿此最优通路传递 (长度为 k);
- (ii) 此 k 距离通路不是最优通路, 则消息沿次最优通路传递 (长度为 $k + 2$).
- 3) 若源结点与目的结点之间的 Hamming 距离为 k 的通路数为 0 则不存在 Hamming 距离为 k 的最优通路.

满足上述条件的极大安全链路矩阵 ($MSLM_s$) 路由算法如下:

```
Algorithm MSLM ( )
{ if ( cur == dest) send message to node and
return ( R );
for( i = 0; i < n; i++ )
{ if this link is the optimal path{
send the message with this link
return ( R ); } }
for( i = 0; i < n; i++ )
{ if this link is not the optimal path{
send the message with its spare link
return ( R ); } }
return ( N ); }
```

下面比较一下在图 2 中 ESV_s 、 OPM_s 、 $EOPM_s$ 、 $MSPM_s$ 和 $MSLM_s$ 路由算法的最优通路数和系统中实际存在的最优通路数, 见表 2 (Optimal paths existed actually (实际最优路径), OPEA; Optimal paths recorded by (记录的最优路径), OPRB).

表 2 图 2 部分结点的 ESV_s 、 OPM_s 、 $EOPM_s$ 、 $MSPM_s$ 和 $MSLM_s$ 算法中记录信息的比较数据

节点	距离为 2 的最优通路数						距离为 3 的最优通路数					
	OPEA	OPRB	OPRB	OPRB	OPRB	OPRB	OPEA	OPRB	OPRB	OPRB	OPRB	OPRB
		ESV_s	OPM_s	$EOPM_s$	$MSPM_s$	$MSLM_s$		ESV_s	OPM_s	$EOPM_s$	$MSPM_s$	$MSLM_s$
Node 1000	5	0	0	5	5	5	3	0	3	3	3	3
Node 0110	3	0	0	3	3	3	3	0	0	0	3	3
Node 1110	6	6	5	6	6	6	4	0	4	4	4	4
Node 1100	5	0	5	5	5	5	4	4	4	4	4	4
Node 0000	5	0	5	5	5	5	4	4	4	4	4	4
Node 0010	5	0	5	5	5	5	4	0	4	4	4	4
Node 0100	6	6	5	6	6	6	4	0	4	4	4	4
总计	35	12	25	35	35	35	26	8	23	23	26	26

从表 2 的 7 个结点中可以看出, 距离为 2 的最优通路数, ESV_s 、 OPM_s 、 $EOPM_s$ 、 $MSPM_s$ 、 $MSLM_s$ 记录条数分别占实际存在数的 34%、71%、100%、100%、100%; 对距离为 3 的最优通路数, ESV_s 、 OPM_s 、 $EOPM_s$ 、 $MSPM_s$ 、 $MSLM_s$ 记录条数分别占实际存在数的 30%、88%、88%、100%、100%, 说明

$MSLM_s$ 算法具有较好的记录最优通路的性能.

3 结论

本文研究了 n 维超立方体拓扑结构中存在链路故障情况下的容错路由问题, 提出了极大安全链路矩阵 ($MSLM_s$) 的概念, 给出了基于极大安全链路矩

阵的两个性质和两个定理并给出了证明, 还给出了建立 MSLM 及其容错路由算法. 与已有的 OPM、EOPM 和 MSPM 算法相比, 该算法可以最大限度地记录超立方体中实际存在的最优通路数, 而且在系统中存在的链路故障越多的情况下, 用于记录信息的极大安全链路矩阵就越简单, 从而实现源结点与目的结点之间的高效信息传递.

参考文献:

- [1] Chen M S, Shin K G. Adaptive fault-tolerant routing in hypercube multi-computers [J]. IEEE Trans Computers 1990 39(12): 1406-1416
- [2] Bagherzadeh N, Nassif M. Computation in faulty stars (hypercube networkers) [J]. IEEE Transactions on Reliability 1995, 44(1): 114-119
- [3] Al-Sadi J, Day K, Ouili-Khaoua M. Unsafety vectors: A new fault-tolerant routing for k -ary n -cubes [J]. Micro-process-

sors and Microsystems 2001, 25(5): 239-246

- [4] 高峰, 李忠诚, 闵应骅, 等. 超立方体多处理机系统中基于扩展安全向量的容错路由 [J]. 计算机学报, 2000 23(3): 248-254
- [5] 王国军, 陈建二, 陈松乔. 具有大量错误结点的超立方体网络的高效路由算法的设计与讨论 [J]. 计算机学报, 2001, 24(9): 909-916
- [6] Wu J. Adaptive fault-tolerant routing in cube-based multi-computers using safety vectors [J]. IEEE Trans on Parallel and Distributed Systems 1998, 9(4): 321-334
- [7] 高峰, 李忠诚. 用最优通路矩阵实现超立方体多处理机系统的容错路由 [J]. 计算机学报, 2000 23(3): 242-247.
- [8] 田绍槐. 超立方体多处理机系统中基于扩展最优通路矩阵的容错路由 [J]. 计算机学报, 2002 25(1): 87-92
- [9] 王雷, 林亚平, 陈治平, 等. 超立方体中基于极大安全通路矩阵的容错路由 [J]. 软件学报, 2004 15(7): 994-1004

Fault-tolerant Routing Based on Maximum Safety-link Matrices in Hypercube

Yuan Zhao-guo, Guo Da-chang

(Faculty of Applied Mathematics, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China)

Abstract Hypercube topology of network is a common multi-computers network. With the increasing size of a multi-computers network, fault possibility of nodes and their links increases. A novel fault-tolerant routing algorithm in hypercube multi-computers system is proposed, in which each node uses a maximum safety-link matrices (MSLM) to record the paths to other nodes. The way to construct the MSLM and the MSLM fault-tolerant routing algorithm is given. It records most of the optimal paths by $n-1$ rounds of information exchanges between neighboring nodes. It is proved that MSLM records most of the optimal paths compared with the optimal path matrices (OPM), the extended optimal path matrices (EOPM) and the maximum safety-path matrices (MSPM), so the problem, how to record the most of optimal paths in the n dimensional hypercube multi-computers system by using matrices, is solved finally.

Key words fault-tolerant routing, hypercube, safety link vectors, maximum safety-link matrices, multi-computers system