

文章编号: 1001-2486(2001)03-0064-04

C⁴ISR 分布式信息融合系统拓扑结构设计*

李明国, 郁文贤, 庄钊文, 胡卫东

(国防科技大学电子工程学院, 湖南 长沙 410073)

摘要: 提出一种构造分布式信息融合系统的拓扑结构的新方法。首先, 简要介绍了该问题的研究现状; 然后, 在对目前使用的网络结构进行深入分析的基础上, 提出了基于多层 de Bruijn 网的分布式信息融合系统网络拓扑结构及其构造方法; 最后讨论了上述网络结构的路由问题。

关键词: C⁴ISR 系统; 信息融合; 网络拓扑设计; de Bruijn 网

中图分类号: TP393.02 **文献标识码:** A

Network Structure Design of C⁴ISR Distributed Information Fusion System

LI Ming-guo, YU Wen-xian, ZHUANG Zhao-wen, HU Wei-dong

(College of Electronic Science and Engineering, National Univ. of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: We propose a new method to construct the network topology of distributed information fusion system. Firstly, the status quo in this area is briefly introduced. Then, based on in-depth analysis about the network structures in existence, we propose the multi-layer de Bruijn network method. In the end of this paper, the routing problem of the multi-layer de Bruijn network is discussed.

Key words: C⁴ISR system; Information Fusion; Network Topology Design; de Bruijn Network

C⁴ISR 是 20 世纪 90 年代后期在军事指挥控制与军事电子信息处理领域出现的一个新概念。它在 C³I 的基础上强调战场情报的感知能力、信息的综合处理与利用能力及系统与系统间的互联互通互操作, 信息融合问题是 C⁴ISR 系统建设中的一个关键问题。

C⁴ISR 信息融合系统是一个由信息源节点、信息处理节点、信息消费节点组成的分布式网络结构。综合利用不同地理分布的传感器所组成的探测网络的探测信息一直是信息融合领域研究的一个重要内容。Wesson 等人首先对分布式态势估计中的网络结构设计等问题进行了研究^[1]。Varshney 等深入研究了分布式检测中的优化准则、系统结构及检测性能等问题^[2]。Nadig、Iyengar 及 Rao 则研究了分布式传感器网络中的一些一般性问题, 如网络结构、计算复杂性及容错性能等。

与所有分布式系统一样, 网络拓扑结构的设计也是分布式信息融合系统研究中的一个重要问题。现有系统一般采用层次结构。从 C³I 系统的角度来看, 层次结构之所以实用是由于该结构与 C³I 系统传统的“烟囱式”信息通道相一致, 与指控节点的层次结构相适应, 因而满足了信息消费节点分布特征的需求。但从 C⁴ISR 信息处理的角度来看, 一方面, 该结构缺乏同层节点之间的侧连接因而不能满足 C⁴ISR 信息处理扁平式结构的要求; 另一方面, 高层节点与间接下层节点的交互困难, 必须通过中间节点的中继, 加重了中间节点的通信与处理负担。本文正是通过研究在层次结构的基础上加入侧连接提出了一种新的网络拓扑构造方法。

1 设计约束

在分布式系统研究中已提出多种适用于不同情况的网络拓扑结构^[3], 如星型结构、环形结构、层次结构、树环结构等。在分布式信息融合处理中, 网络拓扑结构的设计主要考虑以下几个因素的制约: 点对点通信的延迟、路由的效率、系统容错性、每一个节点的通信负担、信息消费节点的分布等。

* 收稿日期: 2000-12-19

作者简介: 李明国(1972-), 男, 博士生。

2 De Bruijn 网

De Bruijn 网是一个无向图，表示为： $G = \langle V, E \rangle$ ， V 代表顶点的集合， E 代表边的集合。Pradhan 最先将 De Bruijn 网用于并行与分布式系统的拓扑结构设计^[4]。目前 De Bruijn 网已广泛应用于包括 VLSI 设计在内的很多领域^[5]。设顶点数为 n 。令 d_i 表示与顶点 i 连接的边的条数，称为顶点 i 的度。令 k_{ij} 表示顶点 i 与 j 之间的最小跳数，称为两顶点间的距离。对于连接两顶点的两条路径，如果它们没有相同的节点，则称这两条路径为节点不相邻路径。令 c_{ij} 表示顶点 i 与 j 之间的节点不相邻路径的数目。下面引入几个定义：

定义 1：顶点最大距离 k 定义为 $k = \max \{k_{ij} | 0 \leq i, j \leq n-1\}$

定义 2：顶点平均距离 k_{av} 定义为 $k_{av} = 2(\sum_{j=0}^{n-1} \sum_{i=j+1}^{n-1} k_{ij}) / (n^2 - n)$

定义 3：图 G 的最大度定义为 $d_{\max} = \max \{d_i | 0 \leq i \leq n-1\}$

定义 4：图 G 的顶点连接度 c 定义为 $c = \min \{c_{ij} | 0 \leq i, j \leq n-1\}$

De Bruijn 网的顶点数 n 规定为 $n = r^m$ 。给定 n ，可通过选择不同的 r 来构造不同的网络连接。 r 可根据节点可用的 I/O 端口数及所允许的信息包最大延迟时间来选择，当 $r=2$ 时的网络称为二进 De Bruijn 网。

令 $(i_{m-1}, i_{m-2}, \dots, i_0)$ 为节点序号 i 的基 $-r$ 表示，令 $(j_{m-1}, j_{m-2}, \dots, j_0)$ 为节点序号 j 的基 $-r$ 表示，这里 $0 \leq i \leq n-1, 0 \leq j \leq n-1$ 。对于图 G 中两个序号为 i 与节点序号为 j 的顶点，若满足下面条件，则这两个顶点连结：

$$i_w = j_{w-1}, 1 \leq w \leq m-1 \text{ 或 } i_w = j_{w+1}, 0 \leq w \leq m-2$$

De Bruijn 网具有如下性质^[4]：

性质 1：网络顶点最大距离 $k = m$ ；

性质 2：网络顶点平均距离 $k_{av} = m-1$ ；

性质 3：网络中的连接数为： $nr - (r^2 + r) / 2$ ；

性质 4：图 G 中必定存在一个环；

性质 5：图 G 的顶点连接度 $c \geq r$ ；

性质 6：图 G 的最大度 $d_{\max} \leq 2r$ ；

性质 1 与性质 2 表明了节点间的最大距离及节点间平均距离与网络规模之间具有对数关系，这保证了基于 De Bruijn 网的系统在网络规模较大时的点对点通信的效率。性质 3 表明网络连接数随网络规模线性增长，这使得大规模系统的实现经济可行。性质 4 下面会谈到。性质 5 表明了 De Bruijn 网的容错性。可以看到，即使是在 $r=2$ ，即二进网的情形，对于网络中任意两节点间也有两条节点不相同路径。利用该性质，可以通过选择较大的 r 来增强系统的容错性。性质 6 表明网络单个节点的最大通信连接数目与基数 r 的选择有关，且较小。

3 基于 De Bruijn 网的融合系统拓扑设计

在现有的网络结构中，层次结构与军事指挥的层次结构自然吻合，能够满足信息消费节点的分布需求。但层次结构中缺少同层节点之间的侧连接，这使得同层节点之间难以实现信息共享，只要不是最顶层节点，那么一个节点就只能得到自己所在的子树的叶子节点所探测到的信息，节点所在的层数越高，这种情况越严重。所以，应以层次结构为基础，研究如何在层次结构中引入合适的侧连接。

引入侧连接的一种方式就是前面所说的树环结构。其做法是将层次结构的同层节点联成一个环。这种结构的主要缺点是通信延迟随网络规模而线性增长，在 C⁴ISR 信息融合系统这种大规模系统中，这是不可接受的。另外，该结构很明显存在容错问题。通过上面对 De Bruijn 网性质的讨论可以看到，若将 De Bruijn 网用于构造层次结构的侧连接，就可以避免树环的缺点。下面讨论这种基于层次 De Bruijn 网的融合系统网络结构的构造。网络结构的构造过程表述如下。

首先，以信息消费节点及信息处理节点所固有的层次关系为基础设计一个层次结构，信息源节点则按其与信息处理节点的固有连接作为层次结构的叶子节点进行连接。然后，开始构造同层节点的侧连接。设处理的是第 l 层，节点数为 n_l 。若 n_l 较小，则按实际需求可连接为全连接结构。当 n_l 较大时，按下述步骤在该层构造 De Bruijn 网：

1) 根据节点 I/O 端口数目及对系统容错性的要求选定参数 r ；

2) 由于 De Bruijn 网要求满足 $n = r^m$ ，但未必存在一个 m_0 满足 $n_l = r^{m_0}$ ，故取 $(n, m) = \min \{ (n_0, m_0) \mid n_0 = r^{m_0}, n \geq n_l, m_0 > 0 \}$ ；

3) 将这 n 个节点编号为 $0, 1, \dots, n - 1$ ，选出其中度最小的 $n - n_l$ 个点，然后，将剩余的 n_l 个点对应到该层实际的节点上；

4) 剩余的 $n - n_l$ 个点实际上不对应实际的融合节点，可采用两种做法来处理这些点。一种方法是将它们保留，但设计为只具有通信功能的路由节点。另一种方法是将这些点除去。由于在 De Bruijn 网中必定存在一个环，所以这里定义一个点在环上的两个相邻点分别为其环上左邻与环上右邻。对于上述 $n - n_l$ 个点中的任一个点，若除环上左邻与环上右邻外不存在来自其它点的连接，则直接将该点去掉，然后将其环上左邻与环上右邻连接；若存在来自其它节点，设为节点 j 的连接，则首先将该连接去掉，并分别连接 j 与该节点的左右邻，然后将该点去掉并将其环上左邻与环上右邻连接。重复上述步骤，直到去除所有的 $n - n_l$ 个点。

可以看到，若在第四步中采用第二种方法则最终构造的网络并非一个正规的 De Bruijn 网，但由上述构造过程可以看到，它基本上保持了 De Bruijn 网的主要性质。所构造的网络保持了 De Bruijn 网中存在的环，所以我们可以将前述树环结构看作是基于 De Bruijn 网的层次结构的一种退化的情形。图 1 显示了一个通过上述方法构造的四层 De Bruijn 网络的结构。

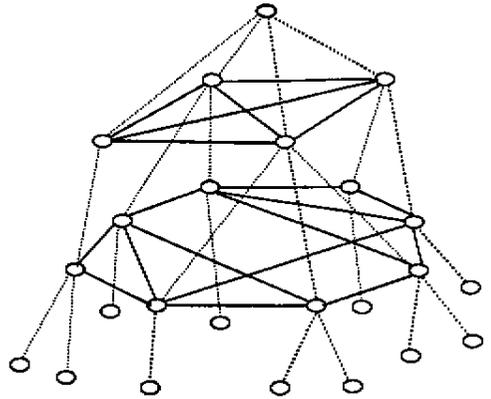


图 1 基于层次 De Bruijn 网的融合系统拓扑结构

Fig.1 Information fusion system topology based on layered de Bruijn network

4 层次 De Bruijn 网的路由问题

在上面构造的层次 De Bruijn 网结构中，节点间的路由问题可分解为层内路由与层间路由。层内 De Bruijn 网的路由问题已在文献 [4] [5] 中进行了深入研究，给出了不考虑容错与考虑容错两种情况下的路由算法。但这些算法都是在源节点处将路径预先算出，不适合我们提出的层次网络路由需求。这里给出一种分布式层内路由算法，该算法的特点是在路由的每一步，下一节点的地址都是在前一节点处算出，而不是预先在第一个节点处算好的。

4.1 层间路由

对于层次 De Bruijn 网的层间路由问题，我们采用的方法是：首先，将地址信息扩充为两部分，一部分是源节点与目的节点所在的层信息，另一部分是它们在各自层上的 De Bruijn 网内的地址。该地址实际上就是它的编号的 r 进制表示。同时包头中还包含层内源节点地址，用于记录层内路由开始时的节点地址。图 2 显示了一个数据包的结构，这里的标志位记录到目前为止该消息已经历的层内路由次数（跳数），记为 z 。初始源节点在发送消息时并不计算标志位，它只根据目的节点所在层信息，将数据包发往父节点或任一子节点。中间节点在收到数据包后，判断该信息是否是发给自己的：若是，则接受；若不是，则判断目的节点是否与自己在同一层上，若不是则将该数据包发向父节点或子节点，若是在同一层上，则首先设置层内源节点地址，将 z 初始化为 0，然后启动一次下面的层内的路由过程，将数据包送到目的节点。这里当然还存在一个优化问题，就是当一个节点向下层的多个子

节点发送数据包时有一个选择问题。我们是让其发往任一个子节点。

| | | | | |
|---------|---------|--------|-----|----|
| 初始源节点地址 | 层内源节点地址 | 目的节点地址 | 标志位 | 数据 |
|---------|---------|--------|-----|----|

图 2 De Bruijn 网数据包格式

Fig.2 De Bruijn network package structure

4.2 层内路由

考虑上述层次 De Bruijn 网的一层，设它为一个有 $N = 2^k$ 个节点的二进 De Bruijn 网。层内源节点为： $S = s_{k-1}s_{k-2}\dots s_1s_0$ ，目的节点为： $D = d_{k-1}d_{k-2}\dots d_1d_0$ 。由 De Bruijn 网的定义，层内源节点 S 有如下两个邻居点： $d_0s_{k-1}s_{k-2}\dots s_1$ 与 $s_{k-2}\dots s_1s_0d_{k-1}$ 。循环利用该性质，我们可以获得两条从源节点到目的节点的路径，下面是用第一个邻居点生成的路径：

$$(z = 0) \quad s_{k-1}s_{k-2}\dots s_1s_0 \quad (\text{source})$$

$$(z = 1) \quad d_0s_{k-1}s_{k-2}\dots s_1$$

$$(z = 2) \quad d_1d_0s_{k-1}s_{k-2}\dots s_2$$

$$(z = k) \quad d_{k-1}d_{k-2}\dots d_1d_0 \quad (\text{destination})$$

可见，采用该方法路由的步数为： $k = \log N$ 。

考虑一个中间节点 $I = i_{k-1}i_{k-2}\dots i_1i_0$ ，基于上面的路径生成方法，该节点进行的层内路由处理包括如下几步：

- 1) 若目的节点标号与本节点标号相同，则接收消息，否则转 2；
- 2) 检查标志位中的路由次数值 z ，利用该值获得路径中下一节点的地址：

$$d_z i_{k-1} i_{k-2} \dots i_1 ;$$

- 3) 将消息头中的 z 值加一，并将消息转发到 2 中确定的下一节点。

5 结束语

基于多层 De Bruijn 网的分布式信息融合网络拓扑结构，一方面满足了作战指挥系统本身固有的层次结构需求；另一方面通过将每一层的节点利用 De Bruijn 网进行侧连接，使得信息融合节点间的广泛信息共享成为可能。

参考文献：

- [1] Wesson R, et al. Network Structures for Distributed Situation Assessment [J]. IEEE Trans. On S. M. C. 1981 (1): 5-23.
- [2] Alhakeem S, Varshney P K. A unified approach to the design of decentralized detection system [J]. IEEE Trans. On AES, 1995 (1).
- [3] 孙钟秀. 分布式计算机系统 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1987.
- [4] Pradhan D K, Reddy S M. A Fault-Tolerant Communication Architecture for Distributed Systems [J]. IEEE Trans. On Computers, 31, 1982 (9).
- [5] Samatham M R, Pradhan D K. The De Bruijn Multiprocessor Network: A Versatile Parallel Processing and Sorting Network for VLSI [J]. IEEE Trans. On Computers, 38, 1989 (4).

