

基于遗传算法的工业以太网环型拓扑优化

顾 凯¹, 张奇智²

(1. 中广核工程技术有限公司 设计部, 广东 深圳 518124; 2. 上海交通大学 自动化系, 上海 200030)

摘要: 为了改善交换式工业以太网的网络性能, 给出了其采用环形拓扑时的设计原则, 并把它们等价为一个带约束条件的网络优化问题. 然后通过设计遗传算法来寻找该优化问题的解, 为避免遗传算法的早熟收敛, 在进化过程中采用了基于混沌迁移的伪并行进化方案. 最后针对一个仿真例子, 对比了基于遗传算法进行拓扑优化前后的网络性能, 仿真结果验证了该优化方法的有效性.

关键词: 工业以太网; 交换机; 网络设计; 拓扑优化; 遗传算法

中图分类号: TP293 **文献标识码:** A

Optimization of the ring topology of industrial Ethernet based on genetic algorithm

GU Kai¹, ZHANG Qi-zhi²

(1. Department of EGE, China Nuclear Power Engineering Company LTD, Shenzhen Guangdong 518124, China;
2. Department of Automation, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200030, China)

Abstract: To improve the network performance of switched industrial Ethernet, the design principles are given when a ring topology is used. The design principles are equivalent to a network optimization problem with constraints. Then, a genetic algorithm is designed to search solution for this optimization problem, and the chaotic migration-based pseudo-parallel evolution strategy is employed to prevent the premature of genetic algorithm. Finally, a simulation is carried out to compare the network performance before and after topology optimization, and the simulation result validates the effectiveness of the proposed optimization method.

Key words: industrial Ethernet; switches; network design; topology optimization; genetic algorithm

1 引言(Introduction)

以太网是目前应用最为广泛的局域网通信技术, 传统的以太网采用CSMA/CD(carrier sense multiple access with collision detection)作为其介质访问控制协议, 不能保证工业通信的实时性. 而交换式技术的发展为以太网支持实时工业通信提供了新的契机, 以太网交换机可以把大的冲突域分割成较小的冲突域, 减小了数据发生碰撞的可能性. 当以太网采用全双工微网段通信模式后, 每个通信设备都被划分到一个独立的冲突域中, 数据的发送和接收不再受限于CSMA/CD协议, 极大改进了通信的实时性.

网络优化是改善网络性能的重要途径, 虽然已有不少学者提出过采用遗传算法的网络优化方案^[1~4]. 但工业网络具有其特殊性, 和一般通信网络相比, 对网络可靠性和通信延迟具有更高的要求. Krommenacker等针对交换式工业以太网的树型

拓扑设计, 提出了采用遗传算法的优化方案^[5]. 但他们假设任意两个设备间的通信量或者为零, 或者取一个固定值, 在实际应用中受到很大限制. 环形拓扑由于其良好的冗余特性, 在工业场合应用更为广泛. 因此本文针对交换式工业以太网的环形拓扑进行优化, 同时使设备间的通信量可以取不同的权值.

2 问题陈述(Statement of the problem)

2.1 网络优化目标(Objects of network optimization)

图1中描述了需要进行拓扑优化的交换式工业以太网模型, 其优化目标是把所有现场设备以合适的方式划分到各个子网中. 为减少数据的传输延迟, 同时获得较高的网络可靠性, 在子网划分时要遵循以下两个原则:

1) 把相互之间通信量较大的设备划分到同一个子网中, 减少不必要的子网间通信流量. 同时还要尽

量减少数据在环网中的转发次数。

2) 平衡各个子网的通信负荷, 使整个网络的通信量尽可能均匀地分布到所有子网中。

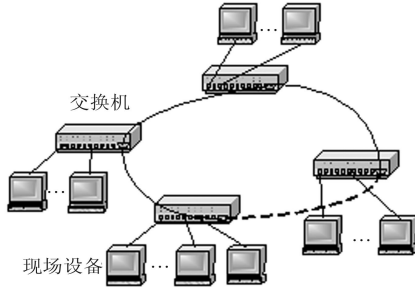


图1 采用环形拓扑的交换式工业以太网模型

Fig. 1 Model of switched industrial Ethernet with ring topology

子网划分的主要依据是任意两个设备间的通信流量, 如果用 $i = \{1, 2, \dots, n\}$ 代表现场设备, 则可以构建通信矩阵为

$$A = \begin{bmatrix} 0 & a_{12} & \cdots & a_{1,n} \\ a_{12} & 0 & \cdots & a_{2,n} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ a_{n,1} & a_{n,2} & \cdots & 0 \end{bmatrix}. \quad (1)$$

式中矩阵元素 a_{ij} 为由源设备 i 发往目的设备 j 的通信量权值。

2.2 优化问题定义(Definition of the optimization problem)

用 $k = \{1, 2, \dots\}$ 代表子网, 定义

$$x_{ik} = \begin{cases} 1, & \text{设备 } i \in \text{子网 } k, \\ 0, & \text{设备 } i \notin \text{子网 } k. \end{cases} \quad (2)$$

如果设备 i 和设备 j 同属于子网 k , 则 $x_{ik}(1 - k_{jk})$ 等于 0; 如果设备 i 和设备 j 分别属于不同的子网 k 和 q , 则 $x_{ik}(1 - k_{jq})$ 等于 1. 数据在环网中的转发次数等于源设备和目的设备所在子网的标号之差, 因此子网间的总通信量可以定义为

$$C = \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^n x_{ik}(1 - x_{jq})a_{ij}|k - q|. \quad (3)$$

而子网 k 的通信负荷可以定义为

$$w(k) = \sum_{j=1}^n \sum_{i \in k} a_{ij} + \sum_{j=1}^n \sum_{j \in k} a_{ij} - \sum_{j \in k} \sum_{i \in k} a_{ij}. \quad (4)$$

进一步可以定义子网间的通信负荷差异为一惩罚函数

$$I = \sum_{j=i+1}^k \sum_{i=1}^{k-1} |w(i) - w(j)|. \quad (5)$$

网络优化的目标是使式(3)和式(5)的取值尽可能

小, 采用加权求和法将两个优化目标转换为单一的目标函数^[6]

$$f = \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^n x_{ik}(1 - x_{jq})a_{ij}|k - q| + \beta \sum_{j=i+1}^k \sum_{i=1}^{k-1} |w(i) - w(j)|. \quad (6)$$

式中 β 是加权系数, 可以在两个最小化目标之间进行折衷. β 取较小值时强调最小化子网间的总通信量, 反之 β 取较大值时则强调最小化子网间的通信负荷差异. 考虑到交换机硬件条件的限制, 该优化问题还需满足以下约束条件:

- 1) 分配到每个子网的设备个数不能超过交换机的端口数量;
- 2) 子网的上行和下行总通信速率不能超过交换机相应端口的速率;
- 3) 各子网的通信总负荷不能超过子网交换机的转发能力.

3 遗传算法设计(Design of the genetic algorithm)

遗传算法模仿自然界“适者生存”的进化过程, 它从一个随机初始化的种群开始, 通过一个反复的迭代过程来进行进化. 在每一代进化中, 遗传算法借鉴生物学中的选择、杂交和变异等操作算子来改善种群中个体的适应度. 在若干个进化代后, 具有较高适应度的个体(等同于给定问题的优质解)将会出现。

3.1 编码方案(Encoding scheme)

子网划分问题的解被编码成一个整数向量, 如果一个个体的第 i 元素为 k , 则在其对应的解中设备 i 被划分到子网 k 中. 例如: 现有设备 $n = \{1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12\}$, 欲将它们划分到 3 个子网中, 一个可能的个体为 $[1 \ 2 \ 2 \ 3 \ 1 \ 2 \ 2 \ 3 \ 1 \ 1 \ 3 \ 2]$, 则对应的子网划分为 $\{1, 5, 9, 10\}, \{2, 3, 6, 7, 12\}$ 和 $\{4, 8, 11\}$.

3.2 适应度函数(Fitness function)

适应度函数用来评价一个个体, 并返回一个代表其作为候选解的性能值. 该性能值被选择算子用来决定哪些个体允许进入下一轮进化, 哪些需要从种群中剔除. 为了便于在遗传算法中进行选择操作, 一般将最小值优化问题转换为最大值优化问题, 通过对式(6)进行变换, 可以得到下面的适应度函数

$$F = U - f. \quad (7)$$

式中 U 应该选择一个合适的数, 使得所有个体的适应度都为正值。

3.3 种群初始化(Population initialization)

在子网划分问题中, 通过将所有设备随机地划分到各个子网来产生初始个体. 对新产生的个体要检验其是否满足优化问题的约束条件, 如果有约束条件被破坏则将其抛弃. 子网个数未指定时, 可以通过将总的现场设备数除以二级交换机的端口数量来估计.

3.4 遗传算子(Genetic operators)

遗传算法使用选择算子进行优胜劣汰. 这里采用轮盘法来选择个体进行复制, 一个个体被复制次数的期望值正比于其相对适应度. 比如某个体的相对适应度是另外一个个体的两倍, 则它被复制的次数在概率意义上也是另外一个个体的两倍. 同时采用最优保留策略把具有最高适应度的个体传递到下一代.

遗传算法使用杂交算子交换配对父代个体的部分染色体, 来产生新的后代. 这里采用双点杂交法: 在两个配对的父代个体中随机产生两个杂交点, 然后交换两个杂交点中间部分的染色体. 在每次杂交运算后立即检查子代个体的合法性, 如果有约束条件被破坏, 则将产生的子代抛弃, 重新对配对的父代进行杂交运算. 在重试一定次数后如果仍然无法获得合法的子代个体, 则放弃对该配对父代的杂交运算.

遗传算法使用变异算子增加种群的多样性. 针对子网划分问题, 在由杂交运算产生的每代个体中, 以一定的概率随机地选择若干个变异位, 并以随机的方式把它们划分到不同于原来的其他子网中. 在对每个体进行变异后也立即检验其合法性, 如果破坏了约束条件, 则对该个体重新进行变异.

3.5 基于混沌迁移的伪并行进化(Chaotic migration-based pseudo-parallel evolution)

为了防止进化过程早熟, 在遗传算法进化过程中, 采用了基于混沌迁移的伪并行进化方案^[7]. 它的基本思想是在单台计算机上构造多个独立的种群, 分别进行进化, 由此得到适应不同环境的子种群. 然后每隔若干个进化代后, 构造混沌迁移序列引导种群中的个体进行互换迁移, 然后再独立地进行进化. 如此循环进行, 直到找到给定问题优质解.

4 仿真研究(Simulation research)

考虑一个具体的例子, 须将40个现场设备划分到4个子网中, 每个交换机有16个端口. 通信矩阵由1到10间的整数权值来随机产生. 首先考虑一种随机划分: 设备1~10, 11~20, 21~30和31~40被划分到4个不同子网中. 通过式(3)和式(4)可以计算该子网划分对应的子网间总通信量和各个子网的通信负

荷, 记入表1中.

表1 基于遗传算法优化前后的子网划分
Table 1 Network partitions before and after the optimization based on genetic algorithm

子网	优化前	优化后
1	1~10	7,8,14,15,16,23,24,33,36
2	11~20	4,5,6,19,20,21,29,37,38,39
3	21~30	1,2,3,11,17,18,25,26,27,30,32,40
4	31~40	9,10,12,13,22,28,31,34,35
子网间通信量	2070	858
各子网的负荷	638,624,614,606	379,553,542,370

采用遗传算法来优化子网划分, 种群规模取120, 将其分解成4个相等规模的独立种群分别进行进化. 杂交概率取0.08, 变异概率取0.01, 最大进化代数为1200, 每隔50个进化代在种群之间进行一次混沌迁移. 遗传算法程序执行20次, 每次为权系数 β 设置一个不同的值, 由此可以得到20组Pareto最优解. 由这些Pareto最优解可以计算出其相应的子网间总通信量 S 和子网负荷最大差异 M , 如图2所示.

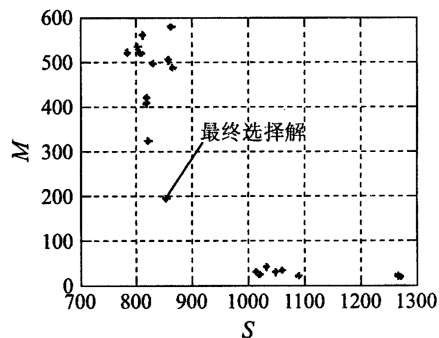
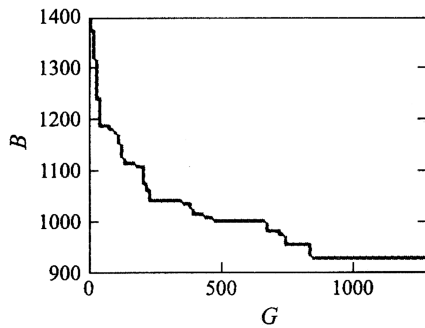


图2 取不同权系数时得到的多个Pareto最优解
Fig. 2 Pareto solutions with different weight coefficients

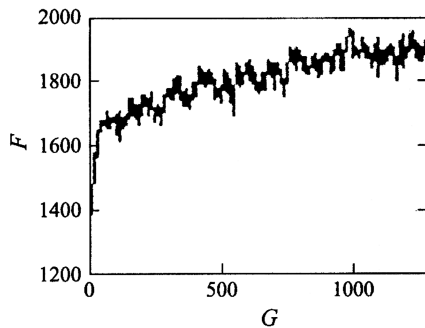
当选择子网划分问题的最终解时, 需要在子网间的总通信量和子网负荷最大差异之间进行折衷. 通过观察图2中的Pareto最优解的分布, 不难选择一个同时较好地满足两个优化目标的Pareto解作为最终解. 最终选择解对应的子网划分、子网间通信量以及各子网的负荷也记入表1中. 对比优化前后的网络性能可以看出, 基于遗传算法优化子网划分后, 子网间的通信量降低了约60%, 各子网的通信负荷也明显降低.

图3显示了选择解对应的进化过程. 最优个体对应的目标函数值 B 随进化过程 G 呈单调下降趋势, 而

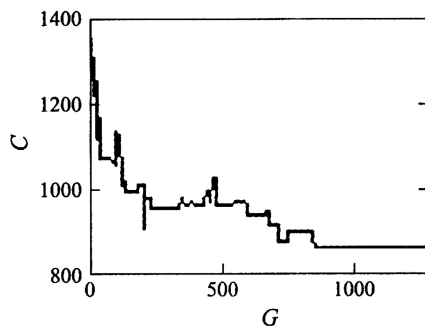
种群的平均适应度 F 在进化开始时有一个快速上升过程,然后逐渐趋于收敛.最优个体对应的子网间通信量 C 和子网负荷最大差异 M 并不是单调递减的,它们整体上虽然随进化过程呈下降趋势,但在一些进化代也可能会有所增加,这是两个优化目标相互竞争和妥协的结果.



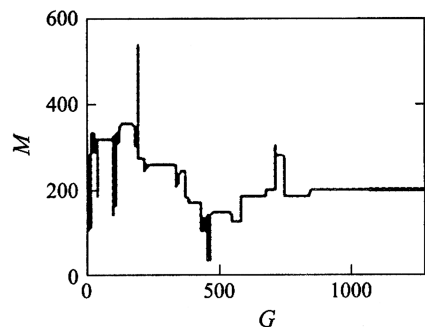
(a) 最优个体的目标函数值



(b) 种群的平均适应度



(c) 最优个体对应的子网间通信量



(d) 最优个体对应的子网负荷最大差异

图3 选择解对应的进化过程

Fig. 3 Evolutionary process of the selected solution

5 结论(Conclusion)

本文给出了交换式工业以太网环形拓扑的设计原则,同时考虑到交换机的硬件约束,将它们等价为一个带约束条件的优化问题.然后通过设计遗传算法来寻找该优化问题的解,最后通过仿真试验验证了该优化方法的有效性.本文仅考虑了交换式工业以太网采用单级环形拓扑时的优化问题,当采用多级环形拓扑时,可以采用自下而上的设计顺序.在设计高层网络时可以把底层子网等同于一个整合了其通信流量的设备来考虑.

参考文献(References):

- [1] GEN M, CHENG R, OREN S S. Network design techniques using adapted genetic algorithms [J]. *Advances in Engineering Software*, 2001, 32(9): 731 – 744.
- [2] CHOU H, PREMKUMAR G, CHU C H. Genetic algorithms for communications network design-an empirical study of the factors that influence performance [J]. *IEEE Trans on Evolutionary Computation*, 2001, 5(3): 236 – 249.
- [3] SAYOUD H, TAKAHASHI K. Designing communication networks topologies using steady-state genetic algorithms [J]. *IEEE Communication Letters*, 2001, 5(3): 113 – 115.
- [4] 郭彤城, 慕春棣. 并行遗传算法在一类计算机网络可靠性优化问题中的应用[J]. *系统工程理论与实践*, 2003, 23(1): 31 – 36. (GUO Tongcheng, MU Chundi. Reliability optimization for computer networks using parallel genetic algorithms[J]. *Systems Engineering-Theory & Practice*, 2003, 23(1): 31 – 36.)
- [5] KROMMENACKER N, RONDEAU E, DIVOUX N. Study of algorithms to define the cabling plan of switched Ethernet for real-time applications [C]// *Proc of Emerging Technologies and Factory Automation*. New York: IEEE Press, 2001: 223 – 230.
- [6] 周明, 孙树栋. 遗传算法原理及应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 1999. (ZHOU Ming, SUN Shudong. *Genetic Algorithm: Principle and Applications*[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 1999.)
- [7] 陈晓方, 桂卫华, 吴敏, 等. 一种基于混沌迁移的伪并行遗传算法及其应用[J]. *控制理论与应用*, 2004, 21(6): 997 – 1002. (CHEN Xiaofang, GUI Weihua, WU Min, et al. Chaotic migration-based pseudo parallel genetic algorithm and its application [J]. *Control Theory & Applications*, 2004, 21(6): 997 – 1002.)

作者简介:

顾凯 (1975—), 男, 中广核工程有限公司仪控设计二处工程师, 主要研究领域为工业以太网、分散控制系统和核电站数字化控制系统设计实现等, E-mail: gkxpr@163.com;

张奇智 (1978—), 男, 2003年毕业于华北电力大学自动化系, 现为上海交通大学博士生, 目前研究方向为工业以太网和随机网络控制系统, E-mail: zhangqz@sju.edu.cn.