

# 论 CSMA/CD 协议的数学原理

罗桂兰<sup>1,2</sup> 赵海<sup>1</sup> 张文波<sup>1</sup> 赵明<sup>1</sup> 张浩华<sup>1</sup>

**摘要** CSMA/CD 网络在长期试错中已经从单总线型网络发展到了堆叠式网络,但其不确定性本质上并未得到解决. 本文从数学原理角度推导了其不确定性解决的理论依据,通过对堆叠式网络数学模型的抽象,证明了堆叠式网络结构服从幂率变换定理,在其时间敏感性上以幂率收敛方式优于单总线型网络,并从网络吞吐量和网络传输效率性能分析评价了该模型. 最后,总结出了 CSMA/CD 的理论“究竟”,拓宽了 CSMA/CD 在嵌入式工业控制领域的“方便”应用.

**关键词** CSMA/CD, 不确定性, 幂率变换, 数学模型, 时间敏感性

**中图分类号** TP393.11

## Demonstration of Mathematics Theory of CSMA/CD Protocol

LUO Gui-Lan<sup>1,2</sup> ZHAO Hai<sup>1</sup> ZHANG Wen-Bo<sup>1</sup> ZHAO Ming<sup>1</sup> ZHANG Hao-Hua<sup>1</sup>

**Abstract** The network based on CSMA/CD protocol has developed from single bus-type network to stacking-type network during long-time trial-and-error practice, but its uncertainty has not been solved essentially. In this paper, a theoretical foundation for resolving the uncertainty, is deduced from the angle of mathematics theory. By abstracting the mathematic model of stacking-type network, the structure of stacking-type network is proved to obey the theorem of power rate transition and to be better than the single bus-type network in that it has an exponentially convergent time-sensitivity. Furthermore, through analyzing the network capability of the network throughput and transmission efficiency, the model is evaluated. Finally the theoretical “however” of CSMA/CD is summarized and the applications of “convenience” of CSMA/CD in the embedded industrial control fields are widened.

**Key words** CSMA/CD, uncertainty, power rate transition, mathematic model, time-sensitivity

## 1 引言

八种现场总线经过十四年的纷争也无法达成统一标准,人们开始寻求新的出路<sup>[1]</sup>,以太网就其性价比高、扩展性强、容易安装开通、可靠性高以及通信速率高等<sup>[2]</sup>“方便”而成为首选出路之一. 然而以太网“究竟”因为采用 CSMA/CD 碰撞检测方式,网络负荷较大时,网络传输的不确定性不能满足工业控制的实时要求<sup>[3]</sup>,这是必须首要解决的问题. 在长期的网络研究中,人们试图采用了很多冲突仲裁技术来避免它的不确定性,典型的硬件技术是采用以太网交换机或集线器将网络划分成更小的网段,以减小冲突域. 实践表明这种方法是行之有效的,它提高了节点的访问率<sup>[4]</sup>,但同时也增加了硬件设备的投资. 典型的软件技术是将 CSMA/CD 协议改进成一种 Token-CSMA/CD 混合控制协议,在轻负荷

时采用 CSMA/CD 协议具有很好的实时性,在重负荷时,采用总线优先级轮循 Token bus 方式<sup>[5]</sup>,但该方法增加了网络的负担. 无论是哪种技术都是基于“网络分级”思想,把一个网络分形成数级网络,由这些数级网络迭代而成的新网络我们称为堆叠式网络,这样就可把 CSMA/CD 协议的不确定性问题转化分形成多个确定性问题的迭代.

本文用数学方法推导出从单总线型 CSMA/CD 网络的不确定性到堆叠式 CSMA/CD 网络的确定性的分形迭代原理——幂率变换定理,并对该定理进行模型建立和数学证明,由模型分析其时间敏感性,通过对网络吞吐量和网络传输效率的性能分析评价该模型,最后总结出 CSMA/CD 的理论“究竟”.

## 2 $r$ 级网络数学模型的建立与分析

### 2.1 模型相关假设

该文的分析基于以下两个假设.

**假设 1.** 模型中以太网 MAC 层均采用争用型 CSMA/CD 协议.

**假设 2.**  $N$  为网段微化的最大节点个数 ( $N = 2, 3, 4, \dots$ ), 即节点控制服务器 NCS (Node control server) 对节点的周期采样分组个数. 采用硬件方法时 NCS 指以太网交换机或集线器等中间连接设备; 采用软件方法时 NCS 指协议中的软件控制服务器,

收稿日期 2005-9-20 收修改稿日期 2006-6-20  
Received September 20, 2005; in revised form June 20, 2006  
国家级火炬计划项目 (2002EB010154), 国家“863”计划资助项目 (2001AA415320) 资助  
Supported by National Torch Program of P. R. China (2002EB010154), National 863 Program of P. R. China (2001AA415320)  
1. 东北大学嵌入式技术省级重点实验室 沈阳 110004 2. 沈阳师范大学软件学院 沈阳 110034  
1. Province Key Laboratory of Embedded Technology, Northeastern University, Shenyang 110034 2. School of Software, Shenyang Normal University, Shenyang 110034  
DOI: 10.1360/aas-007-0500

且每个 NCS 都采用总线优先级轮循方式实现下级网络节点的通信. 当网络节点个数  $n < N$  时冲突概率  $p$  ( $0 < p \leq 1$ , 网络中发生冲突的节点个数与总节点个数之比) 极小时, 可忽略不计, 网络处于实时活跃状态. 当  $n \geq N$  时  $p$  不可忽略, 网络必须进行分段, 分段后每  $N$  个节点用 1 个 NCS 连接.

2.2  $r$  级网络数学模型的建立

**定义 1.**  $i$  级网络  $Net_i$ : 所有  $i$  级节点控制服务器 ( $NCS_i$ ) 节点构成的网络. 特别地, 当  $i = 0$  时, 零级网络  $Net_0$  定义为工作站 ( $NCS_0$ ) 节点构成的网络. 在单总线型 CSMA/CD 网络中只有  $NCS_0$ .

下面给出堆叠式网络结构服从的幂率变换定理并给予证明.

**定理 1(幂率变换定理).** 若  $Net_r$  节点个数为  $k = 1, 2, \dots, N - 1, r = 0, 1, 2, \dots$ , 则  $r$  级网络数学模型中节点总个数为

$$S_r = k \sum_{j=0}^r N^j \quad (1)$$

**证明.** 首先, 验证堆叠式网络结构的初始敏感性. 当  $r = 0$  时, 由定义 1 和假设 2 知, 此时  $NCS_0$  节点个数  $n < N$ , 网络不需分段, 故网络节点总个数等于  $NCS_0$  节点个数  $k$  ( $k$  为  $1, 2, \dots, N - 1$  中任意一个数), 则  $Net_0$  数学模型中网络节点总个数为

$$S_0 = k \quad (2)$$

可见当  $r = 0$  时, 等式 (1) 成立, 堆叠式网络结构具有初始敏感性.

其次, 验证堆叠式网络结构的拓扑可复制性. 当  $r = 1$  时, 网络由  $Net_0$  和  $Net_1$  构成. 由假设 2 知, 此时网络必须分段, 现已知  $Net_1$  有  $k$  个  $NCS_1$ , 那么最多可以连接  $kN$  个  $NCS_0$  节点. 则  $Net_1$  数学模型中网络节点总个数为

$$S_1 = kN + k = k \sum_{j=0}^1 N^j \quad (3)$$

可见当  $r = 1$  时, 等式 (1) 成立, 堆叠式网络结构具有拓扑可复制性.

再次, 假设当  $r = i$  时堆叠式网络结构具有拓扑可复制性, 则

$$S_i = k \sum_{j=0}^i N^j \quad (4)$$

当  $r = i + 1$  时, 由假设 2 可知在  $Net_{i+1}$  增加  $k$  个节点, 在  $Net_i$  必须增加  $kN$  个, 此时在  $Net_i$  增加的相对节点个数为  $kN - k$ ; 同理在  $Net_{i-1}$  增加的

相对节点个数为  $kN^2 - kN$ ; 以此类推可得  $Net_{i+1}$  数学模型增加的相对节点总个数为  $kN^{i+1}$ , 则有

$$S_i + kN^{i+1} = k \sum_{j=0}^{i+1} N^j = S_{i+1} \quad (5)$$

即当  $r = i + 1$  时, 等式 (1) 成立. 从而对于一切  $r = 0, 1, \dots$  都有等式 (1) 成立. 这说明对于一切  $r = 0, 1, \dots$  堆叠式网络结构都具有网络拓扑可复制性.  $\square$

由以上证明可以得出  $r$  级网络数学模型的幂率变换定理表征, 如图 1 所示. 由此得到  $r$  级网络数学模型如图 2 所示.

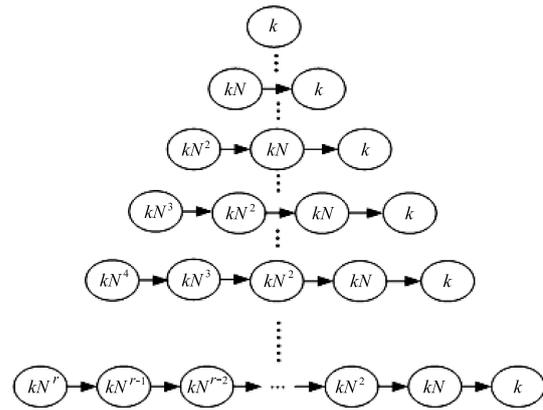


图 1  $r$  级网络数学模型的幂率变换定理表征

Fig.1 Power rate transition token of  $r$ -level network mathematic model

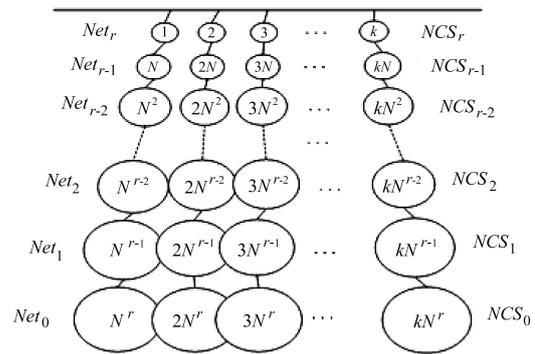


图 2  $r$  级网络数学模型

Fig.2  $r$ -level network mathematic model

由等式 (1) 可见, 各级网络节点个数构成了一个首项为  $kN^r$ , 公比为  $\frac{1}{N}$  的  $r + 1$  项等比数列, 所有项的迭加和便堆叠成了  $r$  级网络数学模型; 每增加一级网络, 网络节点总个数相对于前一级网络模型增加了  $kN^R$  ( $R = 1, 2, \dots$ ), 即  $r$  级网络数学模型的网络结构具有幂率变换规律的网络拓扑可复制性, 因此我们称该定理为幂率变换定理. 其纯数学意

义指在定义域中的函数项级数的部分和  $S_r(N)$ , 当  $r \rightarrow \infty$  时就成为定义域上的一个无穷级数, 其物理意义指所有网络节点在空间上的集合, 当网络节点增至无穷时占据的空间是无限的, 即  $r$  级网络数学模型建立了无限的空间资源。

### 2.3 $r$ 级网络数学模型的分析

$r$  级网络数学模型分析主要是针对从单总线型 CSMA/CD 网络的时间不确定性到堆叠式 CSMA/CD 网络的时间确定性问题的分形迭代. 在网络分析时, 很难测得网络节点数据传输的精确时间, 时间敏感性分析正是对这类不确定性因素进行分析的有力工具. 时间敏感性反映了网络节点对时间的敏感程度.

**定义 2.** 时间敏感性  $\tau$ : 轮循周期  $RoundTime$  的变化率. 其中  $RoundTime$  指  $Net_0$  中所有节点都发送一次数据的平均网络时延. 若平均每个节点发送  $m$  次数据, 则

$$RoundTime = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m RoundTime_i \quad (6)$$

其中  $RoundTime_i$  为  $Net_0$  中所有节点发送第  $i$  次数据的网络时延.

网络时延是衡量网络通信中所表现出来的时间特性, 它指的是一帧信息准备就绪以后, 通过执行协议与控制, 成功地完成传输所占用的时间<sup>[6]</sup>, 它体现了一个网络的响应能力. 网络时延包括三部分<sup>[7]</sup>: 发送时延、传播时延和处理时延. 设单总线型 CSMA/CD 网络和堆叠式 CSMA/CD 网络在相同的网络环境下, 两者发送相同数据时唯一不同的就是处理时延. 在前者中处理时延就是排队时延 (包括冲突检测与等待时延). 而在后者中, 由假设 2 知  $N$  个节点的排队时延可以忽略, 而处理时延就只有 NCS 的轮循时延 (包括存储转发与轮询时延).

在单总线型 CSMA/CD 网络中, 随着网络节点个数的不断增加,  $p$  越来越大, 节点一旦检测到冲突, 就各自延迟一个随机后退时延  $t_D$ , 等再次检测到信道空闲时才发送数据, 若再次检测到冲突则还要继续增加一个  $t_D$ , 直到信道空闲为止.  $t_D$  计算公式为<sup>[8]</sup>

$$t_D = R \times 2^j \times 2D \quad (7)$$

其中  $R$  为随机数,  $j = 0, 1, 2, \dots, 15$  为退避次数,  $D$  为通道时延, 最大时槽数为 1023. 可见  $t_D$  因  $j$  的不确定性和  $R$  的随机性而无法确定.

又因第  $i$  个节点冲突检测与等待时延之和为

$$t_{qi} = \sum_j t_{CDj} + \sum_j t_{Dj} \quad (8)$$

则平均排队时延为

$$T_q = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n t_{qi} \quad (9)$$

又设第  $i$  个节点发送时延与传播时延和为  $t_{trans}$ , 求其均值值得

$$T_{trans} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n t_{trans} \quad (10)$$

则网络中所有节点发送一次数据共花费的网络时延为

$$f(t) = n(T_{trans} + T_q) \quad (11)$$

当  $n \rightarrow \infty$  时, 排队时延长短取决于网络中当时的通信量, 当网络通信量很大时, 队列溢出, 使分组丢失, 此时相当于  $T_q \rightarrow \infty$ <sup>[7]</sup>, 则有

$$\lim_{n \rightarrow \infty} f(t) = \infty \quad (12)$$

由此可见, 在单总线型 CSMA/CD 网络中, 当  $n \rightarrow \infty$  时, 网络中所有节点发送一次数据共花费的网络时延为无穷大, 整个网络处于不活跃状态. 说明网络时延  $f(t)$  是一个发散函数, 网络中节点连一次数据也无法发送成功, 此时  $RoundTime = f(t)$ .

由以上推导可以得到单总线型 CSMA/CD 网络的时间敏感性  $\tau$  拟合曲线表达式

$$\tau = \frac{\partial f(t)}{\partial n} = T_{trans} + T_q = a + b2^j \quad (13)$$

其中,  $a, b$  为确定常数 (由具体网络而定),  $j = 0, 1, 2, 3, \dots, 15$  为平均退避次数. 从 (13) 式得知  $\tau$  与  $j$  直接相关,  $\tau$  与  $n$  间接相关, 定性绘出  $\tau$  拟合曲线如图 3 所示.

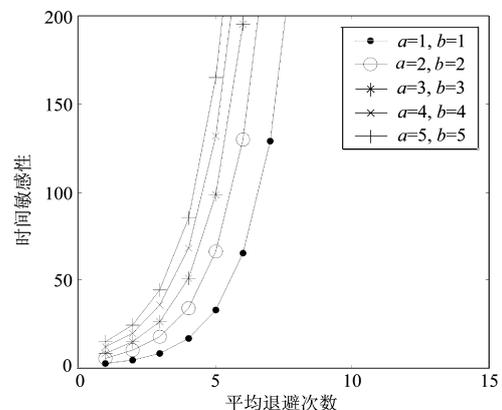


图 3 单总线型 CSMA/CD 网络时间敏感性曲线  
Fig. 3 Time-sensitivity curve of single bus-type CSMA/CD network

图 3 说明  $\tau$  随  $j$  的增加按指数规律增大. 当  $j$  越大时,  $RoundTime$  变化越快, 又因  $RoundTime$  是一个发散函数, 则知  $RoundTime$  将随  $j$  的增加而急剧增加, 最终致使  $RoundTime \rightarrow \infty$ . 这就是单总线型 CSMA/CD 网络的时间不确定性问题.

在堆叠式 CSMA/CD 网络中, 依据幂率变换定理, 通过对堆叠式 CSMA/CD 网络的分形迭代可以将单总线型 CSMA/CD 网络的时间不确定性问题转化为无数个时间确定性的和的极限.

当  $Net_0$  中节点个数  $n \rightarrow \infty$  时, 考虑每级网络中每个节点的平均网络时延, 设发送时延与传播时延之和为  $t_{trans}$ , 轮循时延为  $t_{contr}$ , 那么网络中每个节点在一个  $RoundTime$  内的平均网络时延为

$$f(\bar{t}) = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N (t_{trans} + t_{contr}) = T_{trans} + T_{contr} \quad (14)$$

又由 2.2 节知  $r$  级网络数学模型中  $Net_i$  中节点个数为  $kN^{r-i}$ , 那么  $Net_i$  中所有节点在一个  $RoundTime$  内的网络时延为

$$f_i(t) = kN^{r-i} f(\bar{t}) = kN^{r-i} (T_{trans} + T_{contr}) \quad (15)$$

又  $Net_0$  中节点个数  $n = kN^r$ , 每个节点只有  $t_{trans}$ , 所以  $f_0(t) = kN^r T_{contr}$ . 可见每级网络时延都是可以确定的, 那么网络中所有节点发送一次数据所花费的平均网络时延可以转化成各级网络时延和的极限

$$f(t) = \sum_{i=0}^r f_i(t) = k_1 - \frac{k_2}{n} \quad (16)$$

其中,  $k_1 = \frac{kN}{N-1} (T_{trans} + T_{contr})$ ,  $k_2 = \frac{k^2}{N-1} (T_{trans} + NT_{contr})$ , 且  $k_1, k_2 > 0$ , 此时有

$$\lim_{n \rightarrow \infty} f(t) = k_1 \quad (17)$$

因为  $k, N, T_{trans}, T_{contr}$  为确定值 (由具体的网络确定), 所以  $k_1$  为一确定值, 由此可见  $f(t)$  是一个收敛函数. 而

$$\lim_{n \rightarrow \infty} RoundTime = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m f(t) = k_1 \quad (18)$$

可见随着  $Net_0$  节点个数  $n \rightarrow \infty$ ,  $RoundTime$  最终也将收敛到一确定值  $k_1$ ,  $RoundTime$  具有收敛性, 是一个收敛函数.

为了更清晰地表征这个收敛特性, 又因为 (16) 式中  $k_1, k_2$  都是可以确定的常数, 其变化不影响整个规律的特征, 可以得到堆叠式 CSMA/CD 网络的时间敏感性  $\tau$  拟合曲线表达式

$$\tau = \frac{\partial f(t)}{\partial n} = \frac{k_2}{n^2} \quad (19)$$

可见, 堆叠式 CSMA/CD 网络中  $\tau$  与  $n$  直接相关. 由 (19) 式可以定性绘出  $\tau$  拟合曲线如图 4 所示.

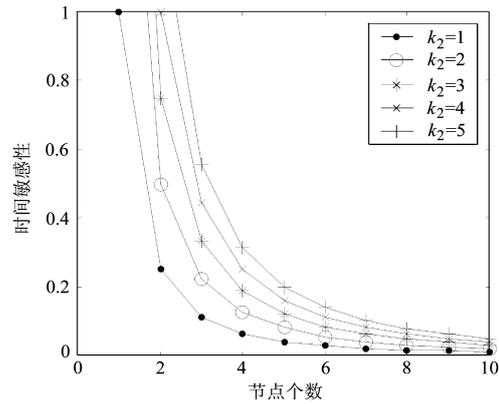


图 4 堆叠式 CSMA/CD 网络时间敏感性曲线

Fig. 4 Time sensibility curve of stacking-type CSMA/CD network

由图 4 可见, 随着  $n$  的增加  $\tau$  按  $n$  的幂率规律递减, 递减的快慢由常数  $k_2$  决定,  $k_2$  越大递减越快. 即当  $n$  无限增加时,  $\tau$  递减到一个趋于 0 的极小值, 说明此时  $RoundTime$  变化很慢, 变化率几乎可以忽略, 则  $RoundTime$  最终就趋于一个确定值了.

由以上对堆叠式 CSMA/CD 网络的分析可见, 堆叠式 CSMA/CD 网络通过占据无限的空间资源赢得了有限的时间资源, 这种由不确定性到确定性的转化正是牺牲空间而换取时间的代价. 这种转化体现了一种时空变换关系: 空间的分形堆叠表达了时间的幂率收敛.

### 3 网络吞吐量与传输效率性能分析与评价

#### 3.1 网络吞吐量 $S$

**定义 3.** 网络吞吐量  $S$ : 单位时间内承担的网络负载, 即网络负载  $G$  与轮循周期  $RoundTime$  之比, 即

$$S = \frac{G}{RoundTime} \quad (20)$$

其中,  $G$  定义为在一个  $RoundTime$  内网络上构成网络传输的全部负担<sup>[9]</sup>.

堆叠式 CSMA/CD 网络相对于单总线型 CSMA/CD 网络的主要区别就在于增加了轮循负担, 其它因素相同. 故由于其它因素引起的网络负载变化都计算到网络中所有节点数据传输的平均网络负载  $G_0$  中, 而每个 NCS 的平均网络负载设为  $G_{contr}$ , 显然有  $G_0 \gg G_{contr}$ . 那么当  $Net_0$  节点个数  $n$  无限增加时, 单总线型 CSMA/CD 网络与堆叠

式 CSMA/CD 网络的网络负载分别为

$$G = G_0, G' = G_0 + \sum_{i=1}^r kN^{r-i} G_{contr} \quad (21)$$

由 2.3 节知单总线型 CSMA/CD 网络中  $RoundTime \rightarrow \infty$ , 而堆叠式 CSMA/CD 网络中  $RoundTime \rightarrow k_1$ . 分别求其网络吞吐量

$$\lim_{n \rightarrow \infty} S = 0 \quad (22)$$

$$\lim_{n \rightarrow \infty} S' = \frac{\left(\frac{N-1}{kN} G_0 + G_{contr}\right)}{T_{trans} + T_{contr}} = S_\theta \quad (23)$$

显然有  $S_\theta > 0$ , 即  $S' > S$ , 当  $n \rightarrow \infty$  时, 单总线型 CSMA/CD 网络  $S = 0$ , 所有节点根本无法传输数据; 而堆叠式 CSMA/CD 网络  $S' \rightarrow S_\theta$  确定收敛, 网络仍能进行正常通信.

### 3.2 网络传输效率 $\eta$

**定义 4.** 网络传输效率  $\eta$ : 在一个  $RoundTime$  内成功发送数据帧所花费的有效时间  $T$  与发送数据帧所花费的平均时间  $\bar{T}$  之比<sup>[6]</sup>, 即

$$\eta = \frac{T}{\bar{T}} \quad (24)$$

单总线型 CSMA/CD 网络中, 当  $n \rightarrow \infty$  时,  $T_q \rightarrow \infty$ , 这时网络处于不活跃状态, 根本无法发送数据, 故有

$$T = 0, \bar{T} = \infty \quad (25)$$

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \eta = 0 \quad (26)$$

堆叠式 CSMA/CD 网络中, 当  $n \rightarrow \infty$  时, 由 2.3 节模型分析知, 由于增加了 NCS, 避免了冲突检测与等待时间, 使得  $T_q = 0$ , 虽然增加了  $t_{contr}$ , 但是  $t_{contr}$  随着节点数的增加, 其增加量远远小于  $t_{trans}$  的增加量, 而  $\bar{T}'$  的值正是 (16) 式所得结果, 所以有

$$T' = \left(\frac{kN}{N-1} - \frac{k^2}{n(N-1)}\right) T_{trans} \quad (27)$$

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \eta' = \frac{T_{trans}}{T_{trans} + T_{contr}} = \eta_\theta \quad (28)$$

显然有  $\eta_\theta > 0$ , 即  $\eta' > \eta$ , 当  $n \rightarrow \infty$  时, 单总线型 CSMA/CD 网络由于冲突致使  $\eta = 0$ , 网络处于实时不活跃状态, 导致网络无法进行通信; 而堆叠式 CSMA/CD 网络  $\eta' \rightarrow \eta_\theta$  收敛到一确定值, 网络仍处于实时活跃状态.

### 3.3 网络性能对模型的评价

通过以上性能计算与分析, 进一步验证了  $r$  级网络数学模型的正确性. 由此得出结论: 通过 (1) 式空间的分形堆叠实现了 (16) 式时间的幂率收敛, 具有幂率变换定理的堆叠式网络使得 CSMA/CD 协议不确定性网络时延收敛到一确定值, 这是用空间代价换取时间效应的结果, 也是“幂率收敛网络是 CSMA/CD 得以生存的充分条件”的理论证明.

## 4 “究竟”与“方便”

目前以太网已是世界上应用最多、网络节点超过 93% 的网络<sup>[1]</sup>. 文献 [1] 表明交换式 100M 以太网能提供足够的带宽和减少冲突, 全双工网络和具有优先权的传送机制能够保证其确定性, 在 100M 以太网中, 发送一个包时延超过 2ms 的状况, 5 年也不会发生一次. 美国电力研究院的实验结果可保证在 4ms 以内. 这些都是对以太网 CSMA/CD“方便”的实践, 即有效的、且由实际应用触发从而为网络发展给出研究基础的应用. 本文的结论正是对这些“方便”应用的理论抽象. 如今的 CSMA/CD 网络能够保证其确定性的主要原因就在于它的网络结构具有 (1) 式描述的  $kN^R$  幂率变换规律的网络拓扑可复制性, 在时间敏感性上具有幂率收敛规律, 从而能够将其时间不确定性转化分形成有限个时间确定性的迭代, 这就是 CSMA/CD 能够满足实时通信要求的理论“究竟”, 即由现实的、超前于理论研究的应用而奠定的、对未来网络发展进行有效指导的数学研究基础. 以太网 CSMA/CD 的理论“究竟”总结并丰富了它的“方便”应用, 使其在嵌入式工业控制领域中逐步占据主导地位, 以太网标准有望代替八种现场总线.

## References

- Opolmzy. The Development of FCS and Ethernet[Online], available: <http://www.ca800.com/bbs/index.asp>, August 10, 2005
- Bogga D R, Mogul J C, Kent C A. Measured capacity of an Ethernet: myths and reality. In: Proceedings of the SIGCOMM'88 Symposium. California, USA, SIGCOMM, 1988. 222~234
- Kapsalis V D, Koubias S A, Haralabkdis H C. New hybrid MAC-protocol for real-time bus network. In: Proceedings of IEEE Communication. UK, IEEE, 1994. 325~333
- Mao Xiu-Wei, Wu Tie-Jun. An adaptive algorithm for  $p$ -persistent CSMA/CD policy. *Journal on Communications*, 2003, **24**(8): 162~167  
(毛修伟, 吴铁军. 自适应  $p$ -持续 CSMA/CD 介质访问控制策略. 通信学报, 2003, **24**(8): 162~167)
- Liu Huai, Hu Ji-Feng. A new media access control for control network Token-CSMA/CD hybrid protocol. *Measurement Control Technology*, 2001, **20**(6): 5~15  
(刘怀, 胡继峰. 一种应用于控制网络的新的媒体访问控制协议 Token-CSMA/CD 混合协议. 测控技术, 2001, **20**(6): 5~15)

- 6 Fan Zhong-Li. The extended research based on optical fiber CSMA/CD LAN. *Journal of Nanjing University of Posts and Telecommunications*, 1997, **17**(1): 9~12  
(范忠礼. 基于光纤 CSMA/CD 局域网的延伸研究. 南京邮电学院学报, 1997, **17**(1): 9~12)
- 7 Xie Xi-Ren. *Computer Networks* (4th edition). Dalian: Dalian University of Technology Press, 2005. 17~19  
(谢希仁. 计算机网络 (第四版). 大连: 大连理工大学出版社, 2005. 17~19)
- 8 Liang Ping-Yuan, Xie Shao-Long. Analysis design of absolute priority in CSMA/CD. *Journal of Yuxi Teachers' College*, 2001, **17**(4): 77~78  
(梁平原, 谢绍龙. CSMA/CD 中绝对优先级的设计与分析. 玉溪师范学院学报, 2001, **17**(4): 77~78)
- 9 Che Jia-Xiong. A discussing on the offered load of Ethernet. *Computer Engineering*, 2000, **26**(8): 135~137  
(车驾雄. 以太网网络负载讨论. 计算机工程, 2000, **26**(8): 135~137)



**罗桂兰** 东北大学嵌入式技术省级重点实验室博士研究生, 沈阳师范大学讲师. 研究方向为普适计算, 嵌入式系统. 本文通信作者. E-mail: luogl@neuera.com  
(**LUO Gui-Lan** Ph.D. candidate at Province Key Laboratory of Embedded Technology Northeastern University, lecturer at Shenyang Normal University. Her research interest covers pervasive computing and embedded system. Corresponding author of this paper.)



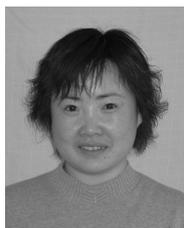
**赵海** 东北大学教授, 博士生导师. 研究方向为普适计算, 嵌入式系统, 信息融合, 复杂网络. E-mail: zhhai@neuera.com  
(**ZHAO Hai** Professor at Northeastern University. His research interest covers pervasive computing, embedded system, and information fusion and complex network.)



**张文波** 东北大学嵌入式技术省级重点实验室博士研究生. 研究方向为普适计算, 复杂网络.

E-mail: zwb@neuera.com

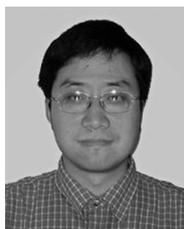
(**ZHANG Wen-Bo** Ph.D. candidate at Province Key Laboratory of Embedded Technology, Northeastern University. His research interest covers pervasive computing and complex network.)



**赵明** 东北大学嵌入式技术省级重点实验室博士研究生. 研究方向为普适计算, 嵌入式系统.

E-mail: zhaom@neuera.com

(**ZHAO Ming** Ph.D. candidate at Province Key Laboratory of Embedded Technology, Northeastern University. Her research interest covers pervasive computing and embedded system.)



**张浩华** 东北大学嵌入式技术省级重点实验室博士研究生. 研究方向为信息融合, 复杂网络.

E-mail: zhanghh@neuera.com

(**ZHANG Hao-Hua** Ph.D. candidate at Province Key Laboratory of Embedded Technology, Northeastern University. His research interest covers information fusion and complex network.)