

## 基于交换式以太网的列车通信网络建模与性能分析

张玉琢<sup>1</sup>, 曹源<sup>2</sup>, 闻映红<sup>1</sup>

(1. 北京交通大学 电子信息工程学院, 北京 100044; 2. 北京交通大学 轨道交通运行控制系统国家工程研究中心, 北京 100044)

**摘要:** 为了满足未来大容量、高速率、硬实时性的信息传输需求, 将交换式以太网技术引入列车通信网络 (TCN, train communication network)。针对不同优先级消息, 根据其通信调度方式对传输过程建立了 TCN 的确定与随机 Petri 网 (DSPN, determined and stochastic Petri nets) 模型, 比较了交换机不同调度算法对时延的影响, 并分析了消息数目和产生周期, 以及消息数目和吞吐量的关系。实验结果表明, 采用优先级调度算法能在牺牲非实时数据时延的条件下降低实时数据的时延, 验证了采用交换式以太网的 TCN 吞吐量远超过现有的 TCN, 并且能够为今后的设计和优化提供理论依据。

**关键词:** 列车通信网络; 交换式以太网; 确定与随机 Petri 网; 调度; 吞吐量; 延时

**中图分类号:** U285

**文献标识码:** A

## Modeling and performance analysis of train communication network based on switched ethernet

ZHANG Yu-zhuo<sup>1</sup>, CAO Yuan<sup>2</sup>, WEN Ying-hong<sup>1</sup>

(1. School of Electronic and Information Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China;

2. National Engineering Research Center of Rail Traffic Control System, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

In order to meet the information transmission requirements of large capacity, high speed and hard real-time in the future, switched ethernet was introduced to the train communication network (TCN). Messages of different priorities was investigated, and established the TCN transmission process model with determined and stochastic Petri nets (DSPN) in accordance to its communication scheduling mechanism. The influences of different switch scheduling algorithms to the delay were compared, and the relationships between throughput and message number, throughput and generating cycle were respectively investigated. The experimental results show that the priority scheduling algorithm can reduce the delay of real-time data under the condition of sacrificing non real-time data's delay. It also verify the throughput of TCN based on switched ethernet is much higher than that of the existing TCN, which can provide theoretical basis for the design and optimization in the future.

**Key words:** train communication network; switched ethernet; DSPN; scheduling; throughput; delay

### 1 引言

列车通信网络担负着列车各个部分信息的采集与传递, 对整列车进行控制、检测、诊断及记录, 关系着运行的安全与可靠。但随着列车控制功能越来越复杂, 现有的列车通信网络通信速率较低, 如 MVB (multifunction vehicle bus) 总线通信速率为 1.5 Mbit/s、WTB (wire train bus) 总线通信速率

为 1 Mbit/s), 无法满足未来大数据量信息传输的需求。

以太网具有通信速率高、带宽大等优点, 已经广泛应用于国防、通信、航天、工业控制等高性能和高实时性领域。将以太网技术引入列车通信网络是未来发展的趋势。正在起草的 IEC61375-2-5 和 IEC61375-3-4 列车通信网络标准中, 分别引入了以太网技术作为骨干级网络和车辆内部网络。

为了解决传统以太网 CSMA/CD 冲突延时不确定

收稿日期: 2015-02-05 修回日期: 2015-07-21

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项基金资助项目(2014YJS014)

**Foundation Item:** The Fundamental Research Funds for the Central University(2014YJS014)

性,在引入交换机的同时,也带来了新的延时,包括:交换延时、输出端口缓存排队延时等。因此,如何确保以太网的实时性和可靠性是这一领域的研究重点。文献[1]提出了基于交换式以太网的安全通信协议模型,该模型针对基于通信的列车控制系统(CBTC)的信息传输,通过Vxworks计算车地之间的设备通信时延,不过该模型无法适用于列车车载的通信网络。文献[2]建立了基于交换式以太网的列车通信网络拓扑结构和通信协议栈模型,采用网络演算法分析了交换式以太网的实时特性。网络演算法考虑的是网络最坏情况下的时延,不能反映网络大多数情况下的实时性能。文献[3]采用流量整形和虚拟链路调度技术避免了传统以太网对介质访问的碰撞问题,确保数据传输的确定性。文献[4]采用排队论对网络时延的主要影响因素交换机排队时延和交换机队列调度技术进行分析,但并没有考虑数据发送机制。

Petri网作为一种强大的形式化建模工具,已经被应用到列车通信网络性能分析领域,如文献[5~8]分别对MVB和WTB总线建立了分层有色Petri网模型。这些模型大都先按照不同的总线结构建立顶层模型,之后根据所研究内容设计替代变迁,各个替代变迁再对总线节点的行为进行具体描述。由于研究内容的不同,因此在建模过程中所考虑的细节有很大的不同,得到的模型和仿真结果也随之不同。文献[5]所研究的对象是MVB主节点传输协议;文献[7]侧重于对消息的收发机制进行了建模;文献[6,8]主要考虑是建模的方法论,以确保所得到模型的安全性、活性和公平性。

本文选取了与上述模型不同的研究对象,这是因为交换式以太网的通信速率远远高于MVB和WTB,但其在列车通信网络的应用存在不确定性;而且在建模过程中,根据通信调度机制着重考虑了3种不同优先级数据传输的过程以及不同的调度算法;此外,考虑到建模对象的特点,选取了DSPN作为建模工具。最终根据所建立的模型分析了基于交换式TCN的吞吐量和实时性能,并比较了不同调度算法对延时的影响。

## 2 基于交换式以太网的TCN

基于交换式以太网TCN的拓扑结构如图1所示。由于交换式以太网不能直接适用于实时网络,需要通过设计冗余结构来提高可靠性,并通过引入实时虚拟层的方式保障列车网络的实时性、确定

性,具体措施详见文献[2]。本文主要研究对象是消息传输的实时性,通过建模验证该时延的确定性。

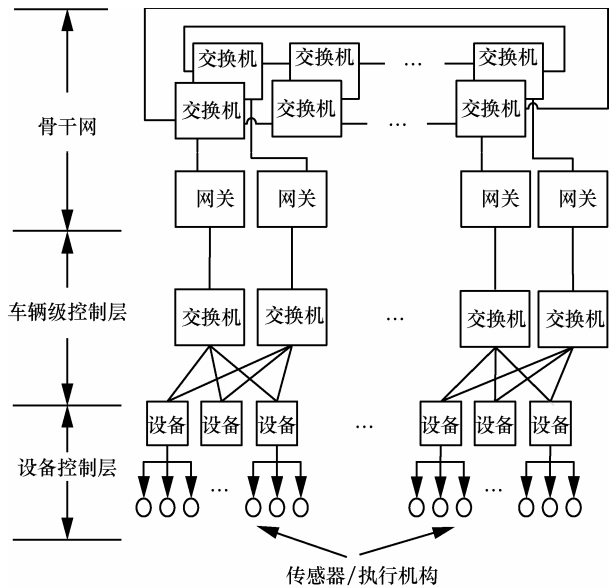


图1 网络拓扑结构

消息传输过程如下:消息首先经由端口进入发送端系统,由端系统将消息封装在以太网帧中,将封装好的数据帧经由特定虚拟链路分为2路,送达交换机网络,由交换机中的配置路由表来决定此消息的目的端系统,端系统中的配置表决定相应的目的端口,至此完成消息的传输过程。

### 2.1 数据类型

根据通信网上所传输数据的性质和实时性的要求,把通信网链路层上的数据分为3类。

1) 过程数据(process data)表示车辆设备的状态和控制信息。过程数据的特点是长度短而实时性强,这些数据采用源广播寻址方式。如常用制动命令、紧急制动命令、列车运行的速度和状态。

2) 消息数据(message data)可以按需传输非实时性数据,是偶发性传输的数据,为了确保消息数据端到端的可靠传输,采用目的寻址的方式,可以采用单播的方式,也可以采用广播的方式。

3) 监督数据(supervisory data)是事件鉴别、总线主权传送、设备状态传送所用的数据,特点是数据帧很短,而且这些数据只有在网络重构或初始化时才传递。

### 2.2 通信调度机制

设备对底层以太网资源的使用应由以太网资源管理主来控制,此以太网资源管理主在设备轮回时间内保持对底层资源的控制。以太网资源管理按

照基本周期的划分对底层的网络资源进行管理，并按照每个设备特征周期构成的周期扫描表对底层网络资源进行分配。

轮回开始时，某一以太网资源管理器成为管理主，而该管理主将轮回时间分成固定的时间片，这个时间片称为“基本周期”，记为  $T_{bp}$ ，其取值范围参考 IEC61375-1 定为： $1.0\text{ ms} \leq T_{bp} \leq 2.5\text{ ms}$ 。一个基本周期分为 4 个相：周期相、监视相、事件相、保护相，如图 2 所示。

车辆控制层在周期相内发送过程数据，事件相、监视相和保护相构成偶发相，在偶发相内发送消息数据和监视数据。管理主利用监视相进行设备扫描和主权的转移。管理主在偶发相内发送之后应保留一个保护相作为缓冲以提供下一个周期相的正确开始。

### 2.3 时延分析

数据帧传输端对端时延包括 3 个部分<sup>[4]</sup>。

1) 源节点时延，包括数据帧在源节点预处理时间和数据帧传输时延。

2) 交换机时延，排队时延和转发时延。排队时延是指数据帧在缓冲区中排队等待时产生的时延，排队时延和流量的输入类型及交换机缓冲区的调度策略有关。调度策略主要有 2 种，一种是基于优先级的调度算法，按照对实时性的不同要求将各种类型的消息区分开来，给予固定的优先级，缺点是实现复杂；另一种是先来先服务算法（FCFS, first come first serve），其适合于消息密度低的系统，缺点是在消息频发的系统中会造成了大量“冲突”。选用合理的调度算法将直接影响网络实时性，因此本文对这 2 种算法进行了建模验证。

3) 宿节点时延，是指数据帧在宿节点处理时延。

## 3 TCN 模型的建立

DSPN 是一般随机 Petri 网的扩充，具有并行、不确定性、异步描述能力和分析能力等优点。允许

时间变迁的实施延时既可以是常数，也可以是指数分布的随机变量，这对周期性通信或数据传输的问题非常适用<sup>[9-11]</sup>。

图 3 给出了基于优先级调度的 TCN 模型。图 3 中，基本周期由周期相和偶发相组成，分别由确定变迁  $T_{16}$  和  $T_{18}$  表示，瞬时变迁  $T_{17}$ 、 $T_{19}$  表示周期相和偶发相之间转变过程，库所  $P_{19}$  和  $P_{20}$  分别表示时间轴处于周期相和偶发相的状态。下方 3 行分别表示过程数据、消息数据和监督数据的传输过程，包括源节点产生、交换机调度和宿节点接收。过程数据是周期性产生的，故用确定变迁  $T_1$  表示消息源产生过程数据的时延。而消息数据和监督数据是随机产生的非周期性数据，故用指数变迁  $T_6$  和  $T_{11}$  表示，其到达服从泊松分布。库所  $P_1$ 、 $P_8$ 、 $P_{14}$  表示数据等待传输的状态，变迁  $T_2$ 、 $T_7$ 、 $T_{12}$  则表示传输的延时。库所  $P_5$ 、 $P_{12}$  表示总线传输状态，当高优先级消息集的库所有标记时，它将通过禁止弧来阻止较低优先级消息集的传送变迁实施。周期相状态库所  $P_{19}$  通过禁止弧来阻止消息数据和监督数据传输变迁  $T_7$ 、 $T_{12}$  在周期相的实施，偶发相状态库所  $P_{20}$  也禁止过程数据在偶发相通过变迁  $T_2$  传输。禁止弧权值  $K_1$ 、 $K_2$ 、 $K_3$  分别表示 3 种数据的消息个数。库所  $P_2$ 、 $P_9$ 、 $P_{15}$  表示数据到达交换机输入端口，即排队队列。库所  $P_7$  和瞬时变迁  $T_3$ 、 $T_8$ 、 $T_{13}$  共同表示交换机对消息的调度过程。库所  $P_2$ 、 $P_9$  引出的禁止弧表示基于优先级的调度算法，即高优先级队列中消息传输完成时才能传输低优先级的消息。库所  $P_3$ 、 $P_{10}$ 、 $P_{16}$  表示交换机处理过程，变迁  $T_4$ 、 $T_9$ 、 $T_{14}$  表示处理的时延。库所  $P_4$ 、 $P_{11}$ 、 $P_{17}$  表示数据到达交换机输出端口的状态，变迁  $T_5$ 、 $T_{10}$ 、 $T_{15}$  表示消息被宿节点成功接收的时延。将图 2 模型中抑制低优先级消息发送的禁止弧去掉，保留一条控制偶发相和周期相数据发送的禁止弧，便可得到基于 FCFS 的 TCN 模型，如图 4 所示。

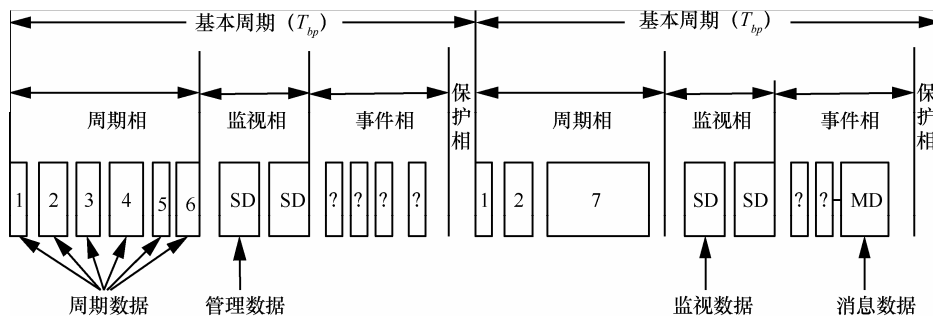


图 2 基本周期

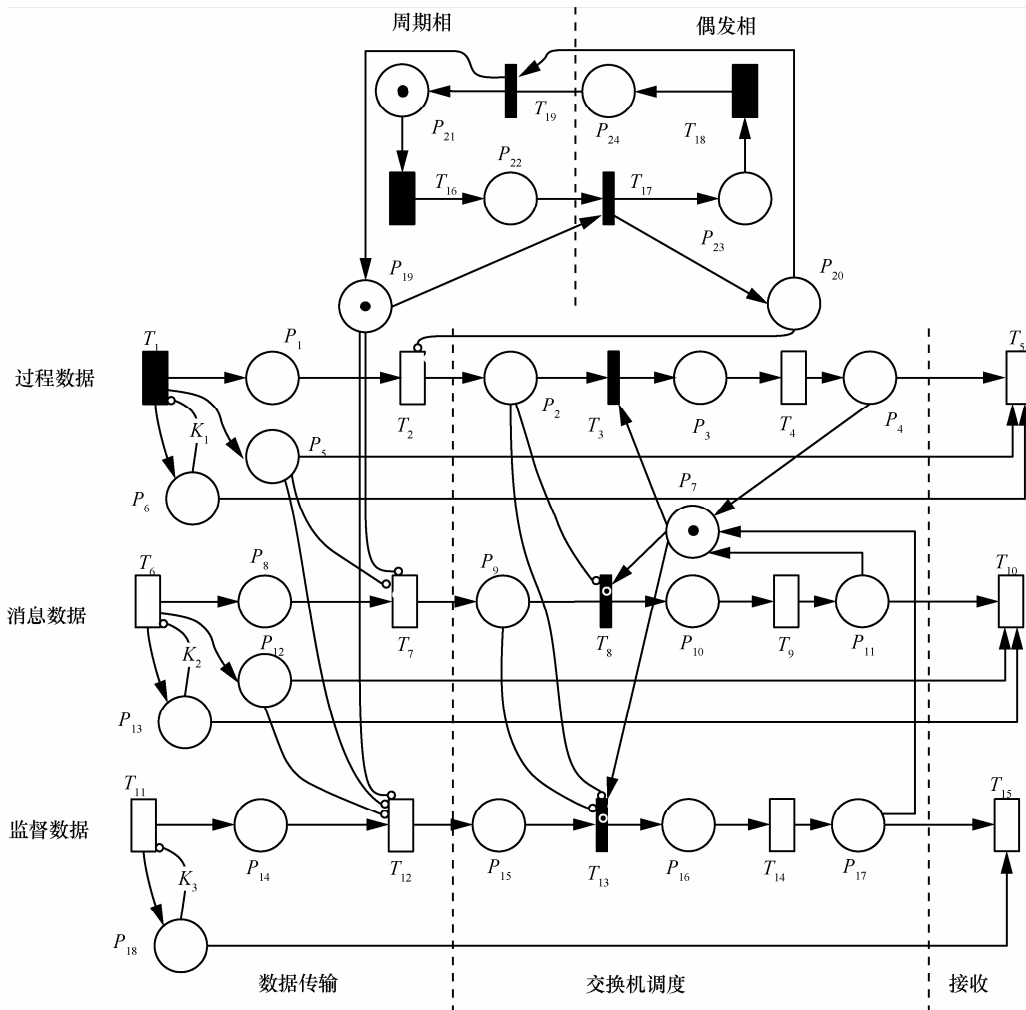


图 3 基于优先级调度的 TCN 模型

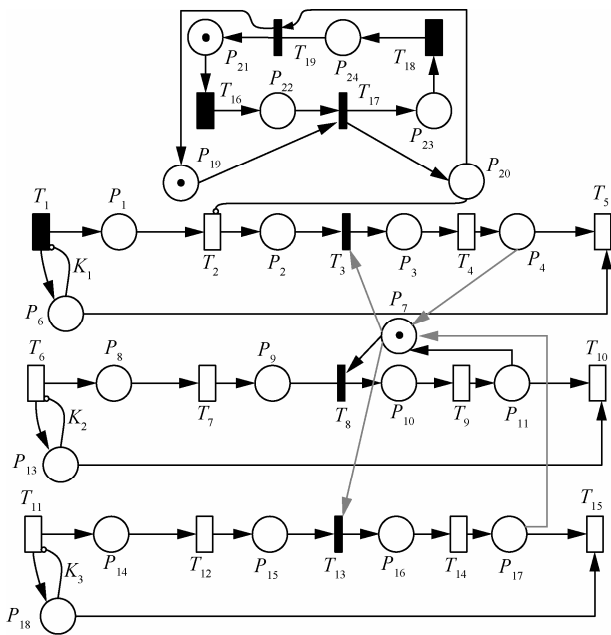


图 4 基于 FCFS 的 TCN 模型

### 4 模型分析

建立好上述模型，需要对模型中变迁参数进行设置，从而为模型进一步的仿真分析打下基础。

#### 4.1 参数选取及量化指标

本文选取基本周期为 1 ms，其中周期相占 0.65 ms，偶发相占 0.35 ms<sup>[12]</sup>。确定变迁  $T_{16}$  和  $T_{18}$  的参数分别取相对应的值。

选取传输速率为 100 Mbit/s 的以太网，根据以太网标准 IEEE802.3 的规定，以太网帧长度为 64~1 522 byte<sup>[13]</sup>。由于过程数据和监督数据帧长都较短，故本文中选取两者帧长均为 64 byte，而消息数据字节取为 1 522 byte，再考虑到 8 byte 帧前同步码，以及 12 字节的帧间隔，可以计算出变迁  $T_2$ 、 $T_7$ 、 $T_{12}$  相对应的参数取值。

过程数据和监督数据传输耗时

$$D_1 = \text{消息帧长度/带宽}$$

$$= \frac{(64 + 20) \text{ byte} \times 8 \text{ bit/byte}}{100 \text{ Mbit/s}}$$

$$= 0.00672 \text{ ms}$$

消息数据传输耗时

$$D_2 = \text{消息帧长度/带宽}$$

$$= \frac{(1522 + 20) \text{ byte} \times 8 \text{ bit/byte}}{100 \text{ Mbit/s}}$$

$$= 0.12336 \text{ ms}$$

交换机处理消息技术时延小于 0.1 ms, 变迁  $T_4$ 、 $T_9$ 、 $T_{14}$  的参数取其均值 0.05 ms。

协议中端系统接收的技术时延小于 0.15 ms, 变迁  $T_5$ 、 $T_{10}$ 、 $T_{15}$  的参数取其均值 0.075 ms。

为了对系统性能进行评估, 本文选取得系统吞吐量  $S$  和平均分组延时  $D$  2 个量化指标。其中吞吐量的计算公式为

$$S = \sum_{\substack{m=6,13,18 \\ n=1,2,3}} \frac{1 - \frac{E\{\#P_m\}}{K_n}}{t_n} L_n 8 \times 10^{-3}$$

其中,  $E\{\#P_m\}$  表示库所  $P_m$  中的平均标记数;  $n=1, 2, 3$  时  $t_n$  分别表示过程数据、消息数据、监督数据产生周期,  $L_n$  表示各个数据的帧长度。应用 Little 公式<sup>[14, 15]</sup>得到消息平均延时的计算公式为

$$D_n = \frac{t_n E\{\#P_m\}}{1 - \frac{E\{\#P_m\}}{K_n}}$$

## 4.2 实验结果

设置好上述参数, 在 TimeNet 4.0 仿真环境下对该模型进行稳态分析。工具介绍详见文献[16]。

### 1) 消息平均延时

目前, 我国常用的列车通信网络 MVB 传输周期性过程数据的特征周期为  $2^n (n \leq 10)$ , 那么考察过程数据产生周期  $t_1$  取不同值时对消息平均延时的影响。令产生消息数据和监督数据的变迁  $T_6$  和  $T_{11}$  所对应的参数为  $t_2$  和  $t_3$ , 其取值均为 10 ms,  $K_1=K_2=K_3=5$ , 做出优先级调度算法和 FCFS 算法消息平均延时的比较如图 5 所示。可以看出: 由于消息数据的数据帧较大, 尽管优先级高于监督数据, 但其消息平均延时最大。平均延时均随过程数据产生周期  $t_1$  的增大而减小, 但受影响的程度不同。优先级调度算法的消息数据和监督数据随  $t_1$  变化的趋势明显, 但由

于采用 FCFS 算法与优先级无关, 其消息平均延时受  $t_1$  变化的波动不大。2 种算法过程数据平均延时波动均不大, 说明了过程数据延时具有一定确定性。

采用优先级调度算法的消息数据和监督数据的平均延时都要高于 FCFS 算法, 但过程数据平均延时大约为 251  $\mu\text{s}$ , 小于 FCFS 的 271  $\mu\text{s}$ 。可以认为采用优先级调度算法相比较 FCFS 算法而言, 在牺牲了非实时性数据的时延条件下, 降低了实时性数据传输时延 20  $\mu\text{s}$ 。同时由图 5 也可以看出, 采用优先级的调度算法对最低优先级的过程数据的抑制作用非常明显, 因此, 这种算法适用于重点关注过程数据时延而对消息数据时延要求不高的情况下。

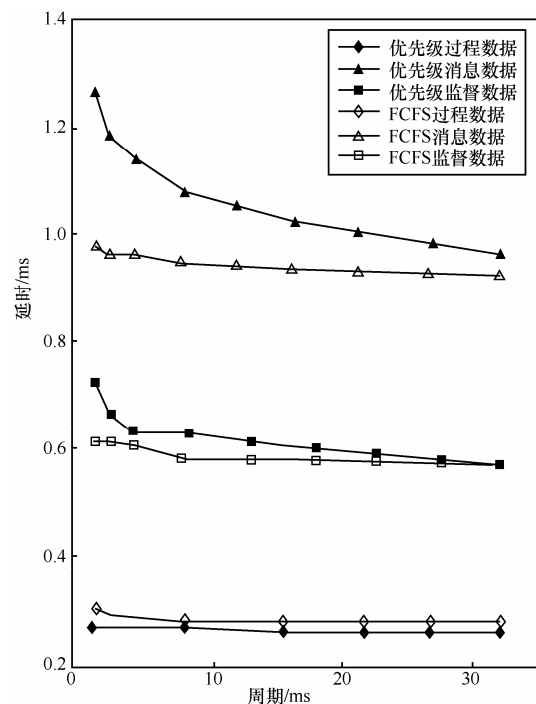


图 5 不同调度算法延时的比较

### 2) 吞吐量

消息数据帧较长, 对吞吐量影响较大, 故选取  $t_2$  为变量, 以基于优先级的 TCN 模型为工具, 分析其对吞吐量的影响。选取  $t_1=8 \text{ ms}$ ,  $t_2=10 \text{ ms}$ ,  $K_1=K_2=K_3=1$  做出吞吐量曲线。为了更加清楚观察变化的趋势, 将  $t_2$  的倒数 (即消息产生速率) 作为横坐标, 如图 6 所示。

吞吐量随产生速率的增加而增大, 在产生速率小于 1000 packet/s 时, 增长最快, 基本呈线性增长。随后增长率逐渐放缓, 最终吞吐量趋近于 30 Mbit/s。这一通信量也远大于文献[17]中计算的 MVB 总线的吞吐量。

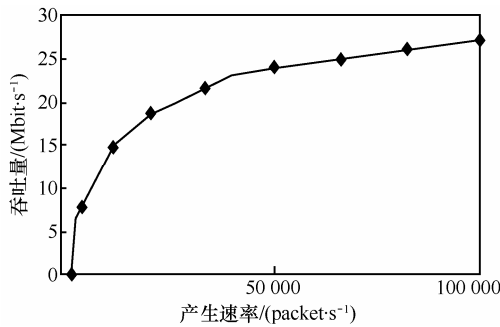


图 6 吞吐量与消息数据产生速率的关系

最后分析了消息数据的消息数目对吞吐量的影响。选取  $t_1=8\text{ ms}$ ,  $t_2=t_3=10\text{ ms}$ ,  $K_1=K_3=1$ , 取  $K_2$  为不同值时做出吞吐量曲线, 如图 7 所示。

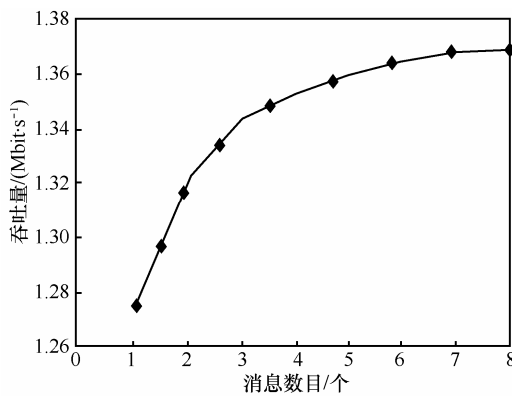


图 7 吞吐量与消息数目的关系

图 7 中吞吐量也是随着消息数目的增加而增大, 最终趋于一个稳定值。根据图 6 和图 7, 在系统设计时应避免消息数据参数选取在吞吐量曲线的平缓增加段, 同时又要兼顾带宽的充分利用, 从而达到优化列车通信网络性能的目的。

### 5 结束语

为了验证基于交换式以太网的列车通信网络的性能, 采用确定与随机 Petri 网理论对该网络进行建模。计算了列车通信网络主要性能指标吞吐量和消息平均时延, 并分析了消息产生周期和消息数目对这些指标的影响。结果说明: 基于交换式以太网 TCN 的吞吐量远大于 MVB 总线的吞吐量; 通过对不同交换机调度算法的比较发现, 基于优先级的调度算法在损失非实时性数据传输时延的条件下, 保证了实时性数据传输延迟为  $251\text{ }\mu\text{s}$ , 比 FCFS 算法降低了  $20\text{ }\mu\text{s}$ 。这些结果验证了基于交换式以太网的 TCN 实时性和确定性, 能够为今后将交换式以太网引入列车通信网络的设计和完美提供重要

理论依据。

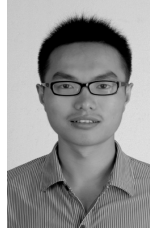
### 参考文献:

- [1] 张岩, 唐涛, 马连川, 等. 基于交换式以太网安全通信协议的模型和仿真研究[J]. 铁道学报, 2010, 32(3): 43-48.  
ZHANG Y, TANG T, MA L C, *et al.* Modeling and simulation of the security communication protocol based on the switched ethernet[J]. Journal of the China Railway Society, 2010, 32(3): 43-48.
- [2] 邢震. 基于交换式以太网列车通信网络的研究[D]. 北京: 交通大学, 2013.  
XING Z. Research on Switched Ethernet Based on Train Communication Network[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2013.
- [3] 周洁琼, 王立德, 王涛, 等. 基于虚拟链路交换式以太网的列车通信网络可靠性分析[J]. 铁道学报, 2014, 36(2): 55-61.  
ZHOU J Q, WANG L D, WANG T, *et al.* Analysis on reliability of train communication network based on virtual link switched Ethernet[J]. Journal of the China Railway Society, 2014, 36(2): 55-61.
- [4] 周洁琼, 王立德, 王涛, 等. 基于交换式以太网的列车通信网络的交换机排队时延分析[J]. 北京交通大学学报, 2014, 38(2): 95-100.  
ZHOU J Q, WANG L D, WANG T, *et al.* Switch queuing delay of train communication network based on switched Ethernet[J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2014, 38(2): 95-100.
- [5] XIA M, LO K, SHAO S, *et al.* Formal modeling and verification for MVB[J]. Journal of Applied Mathematics, 2013, 2013: 1-12.
- [6] ZHANG G, LIU M, YAO A. A coloured Petri net based formal verification methodology of MVB-TCN device[A]. 2010 International Conference on Intelligent Computation Technology and Automation (ICICTA)[C]. Changsha, China, 2010. 46-49.
- [7] BAGO M, PERIC N, MARIJAN S. Modeling wire train bus communication using timed colored Petri nets[A]. SICE Annual Conference 2008[C]. Tokyo, 2008. 2905-2910.
- [8] LIU M, ZHANG G, YAO A. Extended Petri net based formal modeling and verification of WTB-TCN device[A]. 2010 3rd IEEE International Conference on Computer Science and Information Technology (ICCSIT)[C]. Chengdu, China, 2010. 110-114.
- [9] 曹源, 唐涛, 徐田华等. 形式化方法在列车运行控制系统中的应用[J]. 交通运输工程学报, 2010, 10, (1): 112-126.  
CAO Y, TANG T, XU T H, *et al.* Application of formal methods in train control system[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2010, 10, (1): 112-126.
- [10] GERMAN R, HEINDL A. Performance evaluation of IEEE 802.11 wireless LAN with stochastic Petri nets[A]. The 8th International Workshop on Petri Nets and Performance Models[C]. Zaragoza, 1999. 44-53.

- [11] ZIMMERMANN A, HOMMEL G. A train control system case study in model-based real time system design[A]. International Parallel and Distributed Processing Symposium[C]. Washington DC, 2003. 118-126.
- [12] CRUZ R. A calculus for network delay, part i: network elements in isolation[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 1991, (1): 114-131.
- [13] 邢震, 康洪军, 马连川, 等. 基于交换式以太网的 TCN 仿真研究及分析[J]. 铁道机车车辆, 2012, (5): 1-5.  
XING Z, KANG H J, MA L C, *et al.* Analysis and simulation research on switched Ethernet based on train communication network[J]. Railway Locomotive & Car, 2012, (5): 1-5.
- [14] MOLLOY M K. Performance analysis using stochastic Petri nets[J]. IEEE Transactions on Computers, 1982, 31(9): 913-917.
- [15] JAIN R. The Art of Computer Systems Performance Analysis: Techniques for Experimental Design, Simulation and Modeling[M]. New York: Wiley-Inter science, 1991.
- [16] ZIMMERMANN A, KNOKE M, HUCK A, *et al.* Towards version 4.0 of timeNET[A]. The 13th GI/ITG Conference on Measuring, Modeling and Evaluation of Computer and Communication Systems[C]. GI/ITG, Germany, 2006.477-480.
- [17] 王永翔, 王立德. 基于广义随机 Petri 网的 MVB 网络吞吐性能分析[J]. 北京交通大学学报, 2008, 32(5): 98-101.  
WANG Y X, WANG L D. A GSPN-based throughput performance

analysis of MVB[J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2008, 32(5): 98-101.

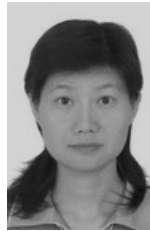
#### 作者简介:



张玉琢 (1990-), 男, 河南信阳人, 北京交通大学博士生, 主要研究为 Petri 网理论及在列车运行控制系统的应用。



曹源 [通信作者] (1982-), 男, 回族, 河南开封人, 博士, 北京交通大学副教授、博士生导师, 主要研究方向为基于通信的列车控制技术。E-mail: ycao@bjtu.edu.cn。



闻映红 (1970-), 女, 浙江嘉兴人, 博士, 北京交通大学教授、博士生导师, 主要研究方向为电磁兼容、铁路信号等。