

DOI:10.15923/j.cnki.cn22-1382/t.2018.5.14

列车以太网拓扑结构

赵航, 胡黄水*, 戚小莎, 王宏志

(长春工业大学 计算机科学与工程学院, 吉林 长春 130012)

摘要: 在 OPNET 平台下设计了总线型、环形和具有链路冗余的封闭环网三种网络拓扑结构, 并对其网络通信时延、链路负载进行了比较分析。结果表明, 具有链路冗余的封闭环网网络拓扑结构性能最优。

关键词: 列车通信网络; 以太网; 拓扑结构; 通信时延

中图分类号: U 285.5 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-1374(2018)05-0494-05

Urban rail ethernet network topology structure

ZHAO Hang, HU Huangshui*, QI Xiaosha, WANG Hongzhi

(School of Computer Science and Engineering, Changchun University of Technology, Changchun 130012, China)

Abstract: Under OPNET platform, three types of network topologies such as bus-type, ring-type and closed-ring network with link redundancy are designed. We analyze and compare the network communication delay and link load, and the results show that the closed ring network with link redundancy network topology has the best performance.

Key words: train communication network; ethernet; topology; communication delay.

0 引言

列车正在朝着高速、可靠、智能化的方向发展, 使得新的服务不断增加, 例如视频监控、网络诊断、旅客信息安全、图像识别、录像查询等^[1-2], 因此, 列车网络对高带宽的要求也越来越高。传统的 LonWorks、ArcNet、WorldFIP 等列车通信网络拓扑单一、消息传播速率低、组网灵活性差、吞吐能力有限, 已经不能满足这种大容量、实时性的要求。而将以太网技术应用到列车网络中很大

程度上解决了传统列车网络的不足。

列车是安全性要求极高的高速移动型设备, 信息实时性传输关乎行车与人员安全, 因此如何保证实时性是列车通信网络的关键问题。文献[3]提出一种应用于列车的具有混合调度算法的交换机, 从而降低在缓冲队列内的排队时延, 车辆级、列车级端到端实时数据时延分别在 0.30 ms 和 1.10 ms 以内, 有效地保证了列车通信的实时性要求。算法虽然有效提高了网络的实时性, 但却增加了计算复杂度。文献[4]提出列车通信网络

收稿日期: 2018-07-22

基金项目: 吉林省教育厅“十三五”科学技术项目(JJKH20181013KJ); 吉林省发改委产业技术研究与开发项目(2018C039-2)

作者简介: 赵航(1993-), 男, 汉族, 吉林长春人, 长春工业大学硕士研究生, 主要从事工业以太网技术方向研究, E-mail: 2412174119@qq.com. * 通讯作者: 胡黄水(1974-), 男, 汉族, 湖南隆回人, 长春工业大学教授, 博士, 主要从事无线网络、列车通信网络方向研究, E-mail: huhs08@163.com.

提高实时性问题的根源是以太网的CSMA/CD机制,于是采用集总帧主从调度机制来解决以太网CSMA/CD机制带来的确定性通信问题,并在FPGA上实现对MAC层的设计,实验结果表明,相对于CAMA/CD机制来说集总帧主从调度机制实时性更高。文献[5]在MAC层中添加实时控制子层来控制数据帧的通断,从而通过控制交换机间不同数据的传输来解决硬实时数据帧的实时性问题,可以看出合理引进并改进IEEE 802.1p协议可以很大程度保证硬实时数据帧的实时性。在MAC层上加入实时控制子层可以很好地解决兼容问题,然而,现有研究往往忽视了拓扑结构控制的优势,拓扑控制对实时性研究是最直观也最便捷的方式。文献[6]借助了网络仿真平台OPNET来建立基于以太网列车通信网络的网络拓扑模型并进行仿真,分别分析不同负荷下的网络时延、负载及链路利用率,结果表明,增加网络带宽可以使网络的性能得到明显改善。

文中首先设计了以太网的总线型拓扑结构和环型拓扑结构,研究发现两种拓扑结构的实时性和稳定性都有待提高,通过合理有效地引入冗余机制,设计了列车链路冗余以太网环型结构,并与总线型、传统环形以太网拓扑结构进行比较分析,有效缩短以太网网络时延,降低网络负载。

1 网络拓扑结构对时延分析的影响

在列车通信网络中,传感器、服务器、执行器等大量网络节点设备数据传输时,由于网络带宽有限以及外界环境对数据传输影响的不确定性,数据碰撞、网络堵塞等流量控制不足的问题不可避免地发生,从而对网络时延造成严重影响,使得高速列车网络的安全性与稳定性降低,危及行车安全和车乘人员的人身安全。

网络时延定义为数据包从发送端进入等待发

送到数据包在接收端全部收到的时间,如下式:

$$\tau = \tau_i + \tau_p + \tau_s + \tau_r \quad (1)$$

1)数据发送时延 τ_i 。发送端逐层封装发送信息,最终封装成数据包进入队列,从封装开始到进入队列的时间定义为数据发送时延 τ_i 。

2)传输时延 τ_p 。物理媒介中数据包传输所需的时间定义为传输时延 τ_p ,其大小受到传输长度、网络带宽、物理媒介以及数据包大小等因素影响。

3)处理时延 τ_s 。交换机的工作方式是存储转发,进行CRC检验并提取目的地址,以查找表的方式确定输出端口。不难看出,在数据包增多的情况下,时延会明显增加。

4)数据接收时延 τ_r 。数据包在远程主机接收并通过校验后,又逐层解码上传到应用层,在此过程中造成的时延定义为数据接收时延 τ_r 。

在高速列车组通信网络中,网络拓扑结构与网络节点数量对网络延时影响很大,中间链路中大量路由器、交换机造成大量处理时延。以下是由交换机造成的时延:

1)交换时延。交换机厂家预定交换机的交换时延数值。

2)转发时延。由交换机转发的数据长度和自身的转发模式决定。

3)缓冲时延。由数据输入的模式决定,如不定期模式或定期模式。

通过优化列车通信网络的节点部署及拓扑结构,使得数据从某节列车车厢的交换机到服务器的交换机跳数减少,从而有效地避免了由交换机造成的时延。每节列车车厢安置一台交换机,每台交换机连接4个工作站,第一台交换机与服务器连接。总线型网络拓扑结构是将相邻列车车厢的交换机相互连接^[7],如图1所示。

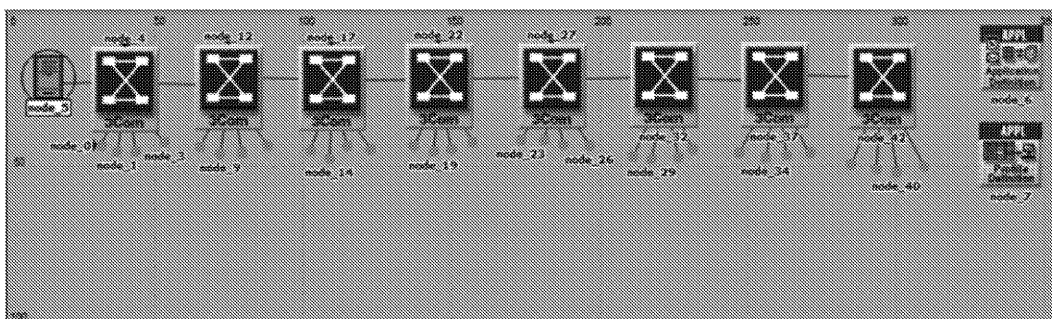


图1 总线型网络拓扑结构

环形网络拓扑结构是将相邻列车车厢的交换机相互连接,并将首尾列车车厢连接组成一个环网^[8],如图 2 所示。

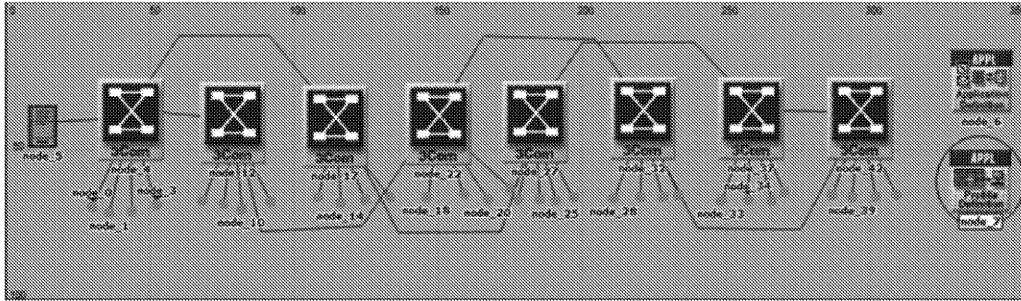


图 2 环形网络拓扑结构

具有冗余的环网拓扑结构是将间隔列车车厢首尾列车车厢相连组成环网^[9],如图 3 所示。

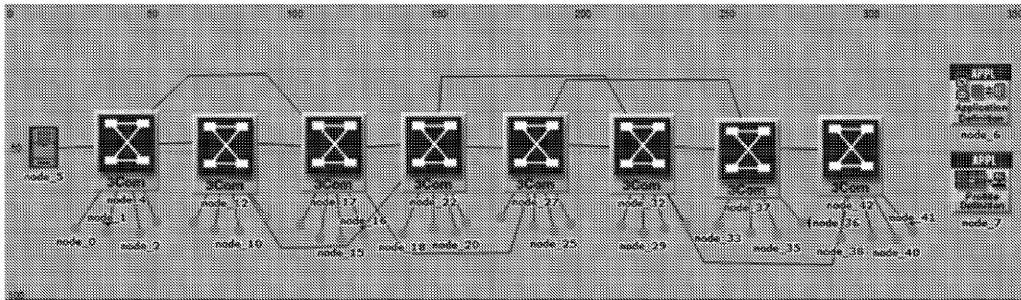


图 3 具有网络冗余的封闭环网拓扑结构

文中重点研究由交换机造成的数据处理时延和数据传输时延^[10-11]。

假定列车有 n 节车厢,每节列车车厢中部安置交换机,相邻列车车厢交换机的物理链路长度为 L ,由于电缆接头处存在间隙及电缆布线中弯曲的情况,因此,每节车厢的终端设备到该节车厢交换机的物理链路长度按 $1/2L$ 计算,相邻列车车厢的物理链路总长度约为 $1.5L$,物理链路单位长度的网络时延为 τ_k ,数据传输时由交换机产生的处理时延为 τ_s ,从第 i 节列车车厢的终端设备经过 j 台交换机到达服务器,物理链路长度为 kL ,该过程的总时延记为 τ_i :

$$\tau_i = \left(\frac{1}{2} + k\right)\tau_k L + j\tau_s \quad (2)$$

$$i = 1, 2, \dots, n$$

列车通信网络的平均时延记为 τ_{ave} :

$$\tau_{ave} = \frac{\sum_{i=1}^n \tau_i}{n} \quad (3)$$

$$i = 1, 2, \dots, n$$

情形 1:总线型网络拓扑结构由相邻列车车厢的交换机相互连接构成,每台交换机连接 4 个

工作站,第 1 节车厢中部安置服务器。

单节列车车厢时延 τ_i 记为:

$$\tau_i = \left(i - \frac{1}{2}\right)\tau_k L + i\tau_s \quad (4)$$

列车通信网络的平均时延记为 τ_{ave1} :

$$\tau_{ave1} = \frac{\sum_{i=1}^n \tau_i}{n} = \frac{n}{2}\tau_k L + \frac{n+1}{2}\tau_s \quad (5)$$

$$i = 1, 2, 3, \dots, n$$

情形 2:将间隔列车车厢的交换机相互连接,也就是说把列车车厢号是奇数的交换机相连,再把列车车厢是偶数的交换机相连,最后把交换机 1 和交换机 2 相互连接,交换机 $n-1$ 和交换机 n 相互连接,最终构成封闭环网。

将 1 号列车车厢的交换机和 2 号列车车厢的交换机相连,列车中段将间隔列车车厢的交换机相连,最后将 7 号列车车厢和 8 号列车车厢的交换机相连构成环形网络拓扑结构(见图 2)。

单节车厢时延 τ_i 计算:

当 i 为奇数时:

$$\tau_i = \left(i - \frac{1}{2}\right)\tau_k L + \frac{i+1}{2}\tau_s \quad (6)$$

当 i 为偶数时:

$$\tau_i = \left(i - \frac{1}{2}\right) \tau_k L + \left(\frac{i}{2} + 1\right) \tau_s \quad (7)$$

列车通信网络的平均时延记为 τ_{ave2} :

当 n 为奇数时:

$$\tau_{ave2} = \frac{\sum_{i=1}^n \tau_i}{n} = \frac{n}{2} \tau_i L + \frac{(n+2)^2 - 5}{4n} \tau_s \quad (8)$$

$i = 1, 2, \dots, n$

当 n 为偶数时:

$$\tau_{ave2} = \frac{\sum_{i=1}^n \tau_i}{n} = \frac{n}{2} \tau_i L + \left(1 + \frac{n}{4}\right) \tau_s \quad (9)$$

$i = 1, 2, \dots, n$

综上, 当 $n > 2$ 时:

$$\tau_{ave2} < \tau_{ave1} \quad (10)$$

通过对比 τ_{ave2} 和 τ_{ave1} 可以得出, 环形拓扑结构和总线型拓扑结构在链路传输平均距离上是相同的, 但是环形拓扑结构由交换机造成的时延远远小于总线型由交换机产生的时延。原因是环形拓扑结构设计多了一条冗余通信链路, 大大减少了数据从某节列车车厢的交换机到服务器过程中

交换机的跳数, 从而使网络时延有效降低。

情形 3: 将间隔车厢上的交换机相连, 即把车厢号为奇数的交换机相连, 再把偶数的交换机相连, 最后将相邻车厢的交换机相连, 组成一个具有链路冗余的封闭环网; 与情景 2 相似, 时延分析方法相同, 但是与总线型拓扑结构相比, 当某一条链路出现问题时, 具有链路冗余的封闭环网再度选择的链路优于环形网络的时延。

2 仿真结果分析

借助 OPNET 网络仿真软件, 以通用动车标准编组 4 节动车配 4 节拖车的方式, 构建基于以太网的列车通信网络模型, 对比分析总线型网络拓扑结构、环形网络拓扑结构及具有冗余的网络的网络时延、链路负载^[12-13]。

对于三种不同的网络拓扑结构, 分别创建总线型、环形和具有链路冗余封闭环网三个网络场景^[14], 采用带宽 100 M 以太网传输。设置两个 FTP 应用业务模拟过程数据和消息数据的传输。仿真时间设定 0.5 h, 以太网时延和服务器负载分别如图 4 和图 5 所示。

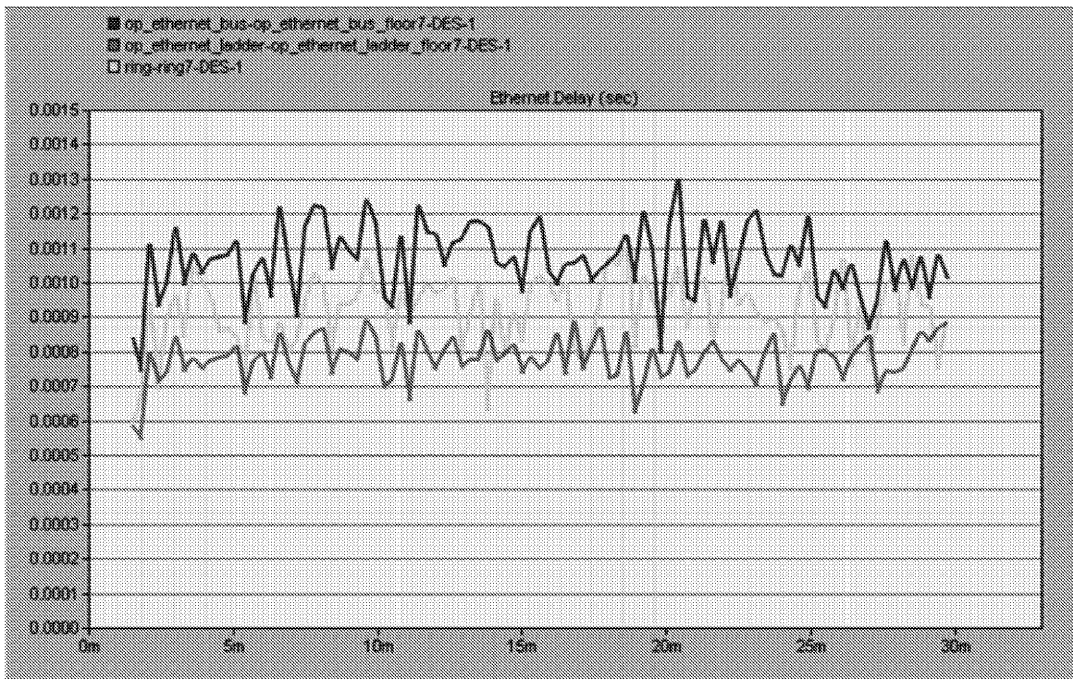


图 4 以太网时延仿真对比

图 4 中, 深色曲线代表总线型拓扑结构, 浅色代表环形拓扑结构, 略深色代表具有链路冗余的封闭环网。当网络稳定后, 三种网络拓扑结构满足 TCN 标准中规定的时延不能高于 25 ms 的要求^[15]。具有链路冗余的封闭环网结构的网络时

延最小。具有链路冗余的封闭环网结构时延比环形结构小 19.5%, 具有链路冗余的封闭环网结构时延比总线型结构小 39.4%, 仿真结果表明, 具有链路冗余的封闭环网结构在时延方面性能最优。

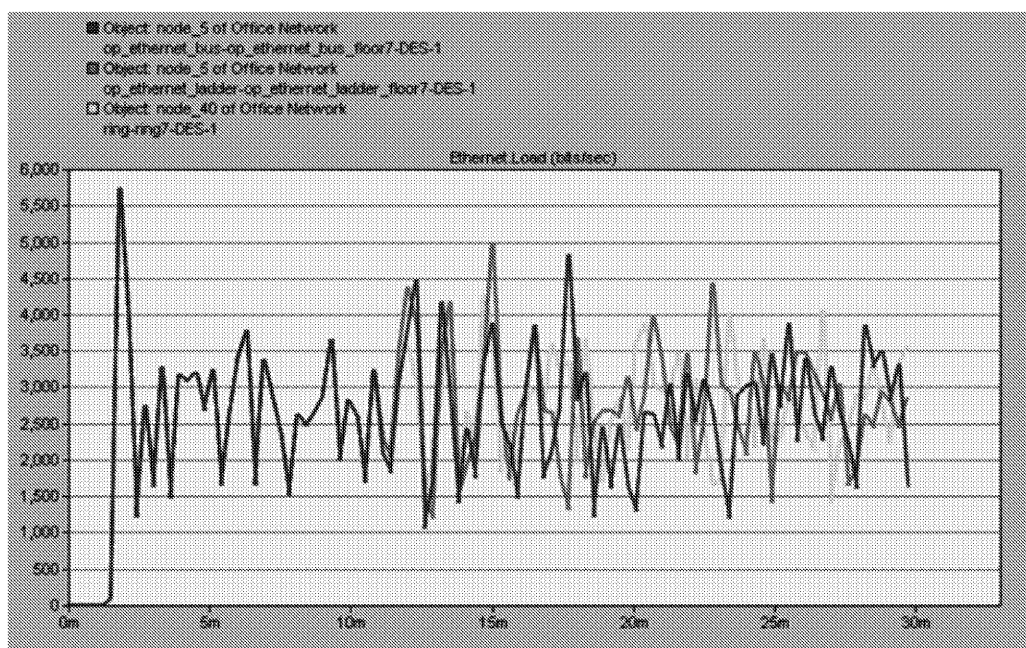


图 5 以太网链路负载仿真对比

图 5 中,深色代表总线型拓扑结构,浅色代表环形拓扑结构,略深色代表具有链路冗余的封闭环网。三种拓扑结构的链路负载基本相同,在 0~11 min 内,三种拓扑结构基本重合,在 11~23 min 内,三种拓扑结构负载波动较大,无法判断三种拓扑结构的最优性能。在 23~30 min 内,具有链路冗余的封闭环网的负载优于总线型网络和环形网络,仿真结果表明,具有链路冗余的封闭环网负载要优于其他两种网络拓扑结构。

3 结 语

在 OPNET 平台下设计了总线型网络模型、环形网络模型和具有链路冗余的封闭环网模型。通过对网络通信时延、链路负载进行仿真比较,结果表明,具有链路冗余的封闭环网网络拓扑结构性能最优。对列车部署网络节点,降低网络时延,提高网络质量,从而保证列车安全、可靠、高效运行具有指导意义。

参考文献:

- [1] 贺德强,路向阳,苗剑.地铁列车故障检测与诊断系统网络体系结构及其仿真研究[J].机车电传动,2009(5):30-32.
- [2] 张玉琢,曹源,闻映红.基于交换式以太网的列车通信网络建模与性能分析[J].通信学报,2015,36(9):181-187.
- [3] 王涛.基于交换式以太网的列车通信网络实时性研究[D].北京:北京交通大学,2014.

- [4] 王国兴.基于以太网的现场总线设计与实现[D].沈阳:中国科学院研究生院(沈阳计算技术研究所),2010.
- [5] 田中大,高宪文,李琨,等.工业以太网中 IEEE802.1p 优先级调度协议改进[J].信息与控制,2012,41(1):117-122.
- [6] 丁超义,苗剑,贺德强,等.基于 OPNET 的列车工业以太网仿真研究[J].广西大学学报:自然科学版,2010,35(2):269-272.
- [7] 张宇爽.EtherNet/IP 工业以太网的性能研究与应用[D].北京:北京交通大学,2016.
- [8] 谭文举.基于以太网的城轨列车网络拓扑结构性能分析[J].装备制造技术,2017(1):112-115.
- [9] 徐琳升.工业以太网交换机环网冗余技术及其实现[D].上海:上海交通大学,2015.
- [10] 党安喜,裴少婧,尚耀东,等.以太网时延仿真与性能分析[J].计算机工程与应用,2009,45(2):119-121.
- [11] 雷昊,贺德强,苗剑.高速动车组车载以太网时延分析[J].计算机测量与控制,2013,21(5):1320-1322.
- [12] 朱辰,董银虎.基于 OPNET 的网络仿真技术研究及其应用[J].无线电工程,2013,43(3):12-15.
- [13] 丁超义,苗剑,贺德强,等.基于 OPNET 的列车工业以太网仿真研究[J].广西大学学报:自然科学版,2010,35(2):269-272.
- [14] 耿晓晗.基于实时以太网 PowerLink 的列车网络的实现研究[D].北京:北京交通大学,2017.
- [15] 刘峰.轨道车辆 MVB 网络模型研究与设计[D].长春:长春工业大学,2016.