

基于通信量权值二分图分配算法的 列车通信网络研究

赵聪慧¹, 陈国政²

(1. 青岛地铁集团有限公司运营分公司, 山东 青岛 266021; 2. 遨海科技有限公司, 辽宁 大连 116028)

摘要: 针对列车通信网络的网络性能直接受到网络拓扑结构的影响, 提出一种基于设备间的通信量权值的二分图分配算法, 解决网络拓扑中设备到交换机的分配问题; 首先, 根据列车通信网络中各设备间的实际通信情况, 建立列车交换式以太网模型, 得出设备间的通信量权值; 然后, 利用通信量权值的二分图分配算法完成设备到交换机的分配, 构建新的交换式列车网络拓扑结构; 通过 OPNET 建模仿真对该结构的网络性能进行分析; 结果表明, 优化后的列车通信网络拓扑结构比未优化的拓扑结构, 在网络时延、链路利用率和吞吐量等网络性能方面能均有很大的提升, 可为列车通信网络拓扑结构优化研究提供理论参考。

关键词: 列车通信网络; 网络性能; 二分图分配算法; 网络拓扑结构

Research on Train Communication Network Based on Bipartite Graph Allocation Algorithm of Traffic Weight

ZHAO Conghui¹, CHEN Guozheng²

(1. Operating branch of Qingdao Metro Group Co., Ltd., Qingdao 266021, China;

2. AOHAI Technology Co., Ltd., Dalian 116028, China)

Abstract: As the network performance of train communication network is directly affected by the network topology, a bipartite graph assignment algorithm based on the traffic weight between devices is proposed to solve the assignment problem from device to switch in network topology. Firstly, according to the actual communication situation between the devices in the train communication network, the train switched Ethernet model is established, and the traffic weight between the devices is obtained; Then, the bipartite graph assignment algorithm for traffic weight is used to complete the assignment of equipment to switch, and a new switched train network topology is constructed. The network performance of structure is analyzed by the OPNET modeling and simulation. The results show that the optimized train communication network topology can greatly improve network performances of network delay, link utilization and throughput compared with the unoptimized topology, the theoretical reference of train communication network topology optimization can be provided.

Keywords: train communication network; network performance; bipartite graph allocation algorithm; network topology

0 引言

列车通信网络是轨道车辆网络控制系统的核心技术, 作为列车信息采集与传输的媒介, 担负着列车可靠、安全运行的重任。列车新型大容量业务的不断出现及设计构架的复杂多样, 使得对列车通信网络技术的研究尤为重要。传统式列车通信网络如 CAN、ARCNET、MVB 和 WTB 等因其通用性差、通信带宽低、传输速率慢等问题, 已经满足不了网络带宽的承载能力和大数据高实时性的传输要求^[1]。为了保障列车通信数据传输的高可靠性和高实时性, 交换式以太网技术被应用于列车通信网络中。它既避免了传统式以太网的非确定性问题, 解决了网络带宽影响网络性能造成的瓶颈问题, 又满足了大量数据通信情况下对网络的高实时性需求^[2]。

目前以太网技术应用于列车通信网络领域已经取得了一定的成果。文献 [3] 提出并行冗余协议和高可用性无缝冗余协议的列车通信网络结构, 实现网络故障零恢复时间, 但该文献仅从物理层面考虑网络可靠性, 没有结合具体设备之间的实际通信情况分析实时可靠性, 无法验证大通信数据下的网络对实时性和可靠性要求。文献 [4] 提出一种基于虚拟链路的环形交换式以太网解决方案, 但在网络实时性方面, 却忽略了交换机和网络设备对实时性的影响, 应该考虑网络在链路、设备和交换机这几个因素共同影响下的实时性。文献 [5] 研究了基于交换式以太网列车通信网络模型, 针对传输数据的不同采用了交换机优先级调度算法, 但未考虑到当网络设备增多时, 系统的性能也需要加强。如果引入设备分配方法, 可以减少交换机时延, 提高系统性能。

收稿日期: 2021-11-15; 修回日期: 2022-01-06。

作者简介: 赵聪慧(1996-), 女, 山东德州人, 硕士, 助理工程师, 主要从事智能交通控制与安全技术方向的研究。

引用格式: 赵聪慧, 陈国政. 基于通信量权值二分图分配算法的列车通信网络研究[J]. 计算机测量与控制, 2022, 30(5): 215-220.

为了保障列车通信网络性能,需要对基于以太网的列车通信网络拓扑结构进行优化设计^[6-7]。文献[8]建立模型模拟了3种不同的列车通信网络拓扑结构,分析其对网络性能的影响,得出环形网络拓扑结构对网络性能的影响最小,但并没有提出减少网络时延、提高网络性能的方法,且该文献的拓扑结构只是对车辆级网络进行比较,应该更深入的探讨网络设备的布局结构对网络性能的影响,来提高网络性能。文献[9]提出在链路冗余封闭环网拓扑结构中增加路由,得出网络性能最佳时路由的位置,但是对网络性能的改善没有起到较明显的效果,并且增加了网络设备成本,没有对网络整体进行系统化的探讨,提出减少时延的方法。文献[10]从网络的物理拓扑和逻辑拓扑两个方面同时探讨其优化问题,提出一种容错廉价网络的设计方案,来保证数据在截止期前完成交付,并减少网络成本,但没有提出较为通用的网络优化模型,对于列车通信网络中设备间的数据传输相对固定这种情况,该方案具有一定的局限性。

本文考虑列车通信网络性能会受其网络拓扑结构的影响,优化网络拓扑结构可以确保网络的高实时性需求^[11]。在列车通信网络中,网络拓扑优化的主要方法是在确保交换机拓扑结构的基础上,优化网络设备到交换机的分配方式。本文依据列车中各网络设备间的实际数据通信情况,给出基于通信量权值的二分图分配算法,将列车内的设备重新布局分配,并构建新的基于交换式以太网的列车通信网络三层拓扑结构;采用 OPNET 仿真,对优化后的网络拓扑结构的网络性能进行验证。

1 列车通信网络的时延分析

列车通信网络中传输的信息主要为控制、检测和故障诊断等重要信息,该信息对实时性要求极高。在高速列车通信网络中,众多网络节点如传感器、执行器和服务器等在网络中数据交互时,因网络带宽的限制及数据变化带来的不确定性,不可避免的造成数据碰撞和网络堵塞等问题,使得网络时延的产生,进而降低列车的稳定性和安全性^[12]。

1.1 网络时延产生的原因

网络时延是指数据帧由源节点起发送到目的节点并被完整接收所经历的时间,图1给出交换式以太网中网络节点之间数据传输的端到端时延,主要由源节点时延、链路时延、交换机时延和目的节点时延组成^[13],其时延公式表示为:

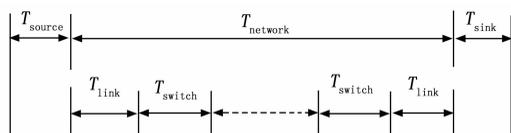


图1 网络时延组成

$$T_{\text{delay}} = T_{\text{source}} + T_{\text{switch}} + T_{\text{sink}} + T_{\text{link}} \quad (1)$$

1) 源节点时延 T_{source} 。包括:协议栈处理时延 $T_{\text{source}}^{\text{proc}}$;发送节点繁忙时,MAC层排队等待时延 $T_{\text{source}}^{\text{wait}}$;帧发送时延 $T_{\text{source}}^{\text{send}}$,与帧长度相关。

2) 交换机节点时延 T_{switch} 。包括:交换机的基本时延 $T_{\text{switch}}^{\text{basic}}$,与交换机性能有关,一般为固定值,该具体数值由厂家提供;交换机繁忙时,端口的排队等待时间 $T_{\text{switch}}^{\text{wait}}$,与调度策略有关;帧转发时延 $T_{\text{switch}}^{\text{send}}$,与帧长度及交换机所选用的转发模式相关。

3) 目的节点时延 T_{sink} 。包括:帧接收时间 $T_{\text{sink}}^{\text{rec}}$,其与帧长度相关;目的节点的协议栈处理时间 $T_{\text{sink}}^{\text{proc}}$ 。

4) 链路传播时延 T_{link} 。取决于通信节点间的电缆长度和信号的传播速度。

1.2 降低网络时延的方法

根据网络时延的组成,将时延分为两类:常量时延和变量时延。常量时延是指网络节点受协议栈性能、帧长度、链路性能的影响产生的时延以及交换机的基本时延,该部分时延较为固定;变量时延是指受网络繁忙程度的影响,在源节点和交换机中的排队时延。因此,降低网络时延的主要办法就是解决变量时延。

当大容量数据从过多设备传输到交换机时,交换机需要监听到所有数据,从而增加了交换机的工作负担和数据排队等待的概率,将可能造成通信网络的堵塞甚至瘫痪^[14]。在高速列车通信网络中,网络拓扑结构与网络节点数量对网络延时影响很大,且节点发送数据帧的包格式、链路速率和交换机的服务速率都是造成大量传输时延的主要原因^[15-16]。

综上所述,通过优化高速列车通信网络的拓扑结构及其节点部署,可以减少数据从底层设备节点发送到服务器所经过的交换机跳数,有效地避免交换机时延;还可以减少同一设备经交换机转发时的缓存时延。因此,本文优化网络拓扑结构从两个方面进行:1)保障设备传输数据过程中经过最少的交换机,以此确保交换机拓扑结构;2)在此基础上,重新分配各节车辆中设备节点到交换机的分配方式,保证连接同一交换机的设备数量较少,且主要设备节点连接编组交换机,其它设备节点连接子交换机。

2 基于通信量权值二分图分配算法的网络拓扑结构设计

列车通信网络的性能直接受到网络拓扑结构的影响,设计不当的拓扑结构,不仅会导致网络时延的增加,还会降低网络的可靠性,影响整体网络的性能,甚至引发安全问题^[17]。如今,针对列车网络的研究往往忽视了对拓扑结构控制的优势,通过对拓扑结构的优化是对列车网络实时性研究最直观、最便捷的方式^[18]。

本文主要针对网络拓扑结构中的设备控制层进行研究,考虑列车通信网络存在设备布局相对受限、网络规模较小且固定、设备间通信关系比较明确等特殊特性,提出一种基于通信量权值二分图分配算法来实现网络节点部署,并构建新的列车通信网络拓扑结构。首先,根据各个固定节点间的通信情况,建立列车交换式以太网模型,计算出节点之间的通信量权值,构建二分图;再由各节车辆内的节点数确定该节车辆内所需交换机的数量,并将每一个交换机

所在的区域视为独立的局域网; 最后以各节点之间的通信量权值为依据, 按照由高至低的权值将所有节点划分到不同的区域内, 完成整个网络拓扑优化。

2.1 列车交换式以太网模型的建立

考虑到交换式以太网中存在大量网络节点, 为了提高网络实时性, 需要将它们分配到不同的交换机子网中。设整个列车网络中有 N 个节点, M 个交换机。以 $N \times M$ 的矩阵 X 来表示通信网络中节点到交换机的分配情况, 见公式 (2)。若节点 n 分配到交换机 m , 则矩阵中元素 $X_{N \times M} = 1$; 否则 $X_{N \times M} = 0$ 。

$$X_{N \times M} = \begin{pmatrix} x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{n1} & x_{n2} & \cdots & x_{nm} \end{pmatrix}_{N \times M} \quad (2)$$

考虑到各个节点之间需要实现数据交互, 故引入节点间的实际通信量, 用矩阵 F 来表示, 见公式 (3)。矩阵 F 中元素 f_{nl} 表示节点 n 向节点 l 发送的实际通信量, 取 $f_{nl} = L_{nl} / T_{nl}$, 其中 L_{nl} 、 T_{nl} 分别代表节点 n 发送到节点 l 数据的长度和周期。由于节点自身不存在数据交互的情况, 故 $f_{nn} = 0$ 。

$$F = \begin{pmatrix} 0 & f_{12} & \cdots & f_{1n} \\ f_{21} & 0 & \cdots & f_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ f_{n1} & f_{n2} & \cdots & 0 \end{pmatrix}_{N \times N} \quad (3)$$

由于列车通信网络中传输的数据具有不同要求的实时性, 为了方便比较各个节点之间的实际通信量的重要程度, 再引入节点间的通信量权值, 以矩阵 A 来表示, 见公式 (4)。

其中 $\max\{f_{nl}\}$ 为矩阵 F 中元素的最大值。

$$A = \frac{F}{\max\{f_{nl}\}} = \begin{pmatrix} 0 & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & 0 & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \cdots & 0 \end{pmatrix}_{N \times N} \quad (4)$$

本文设计的网络拓扑也需满足一定的约束条件, 见公式 (5)。

$$\begin{cases} C1 & \bigcup_{i=1}^M E_i = \varphi \\ C2 & \bigcup_{i=1}^M E_i = N \\ C3 & E_i \leq k_i \end{cases} \quad (5)$$

式 (5) 中, E_i 表示第 i 个区域内节点的集合, 即一个交换机所连接的节点数量; k_i 表示第 i 个交换机的端口数目; $C1$ 说明每个节点只能分配到一个区域内, 即各个节点只能连接一个交换机; $C2$ 说明所有节点都被分配到各个不同区域内, 此外, 各节点间不能直接通信连接, 需经交换机进行通信; $C3$ 表示各个区域内被分配的节点数量不能超过交换机的端口数。

2.2 基于通信量权值二分图的设备节点分配算法

设 $G = (V, E)$ 是一个无向图, 如果顶点集 G 可以分割为两个互不相交的子集 (M, N) , 并且图中每条边 (i, j) 所关联的两个顶点 $i \in M, j \in N$, 则称图 G 为一个二分图^[19]。在

此基础上, 本文通过将二分图与列车中各节点间的通信量相结合, 引入节点间的通信量权值, 并依据权值的大小来完成节点到交换机的分配^[20]。基于二分图的设备节点分配算法步骤如下:

1) 由各节车辆内的节点数量来确定交换机数量, 并视连接同一交换机的节点所在区域为独立的局域网。其中, 交换机数量 M 应不小于该节车辆内节点数 N 与交换机端口数量 k 之比, 由于交换机端口还应预留出链路输入/输出两个端口, 故交换机数量为公式 (6) 所示:

$$\frac{N}{k-2} \leq M \quad (6)$$

2) 根据公式 (3) 和公式 (4) 计算出节点间的通信量权值;

3) 将设备节点进行编号, 构建带有通信量权值的二分图。将网络抽象为节点集 $N = \{N_1, N_2, \dots, N_n\}$ 和带有通信量权值的链路集 $L = \{\alpha_{12}, \alpha_{13}, \dots, \alpha_{n, n-1}\}$ 共同构成的二分图 $G = (N, L)$;

4) 根据权值的大小, 由高到低的合并权值数相近且是相邻的节点, 使其划分到同一区域内, 但应确保节点的分配情况满足公式 (5) 的约束条件。其中, 每节车辆中权值数相近的节点被划分至同一区域, 拥有高权值数节点的区域其内部节点连接编组交换机, 而拥有较低权值数节点的区域其内部节点连接子交换机;

5) 重复 4) 过程, 直至所有节点被划分至各个不同区域内。

2.3 算法实例

选取某一动车组的驾驶室动车车辆和客室动车车辆, 其设备节点名称及英文缩写见表 1 所示, 节点列表及其编号见表 2 所示。

表 1 设备节点名称及其英文缩写

设备名称	英文缩写	设备名称	英文缩写
中央控制单元	CCU	车辆控制单元	VCU
制动控制单元	BCU	牵引控制单元	TCU
辅助控制单元	ACU	门控单元	DCU
空调系统	HVAC	乘客信息系统	PIS
自动控制系统	ATC	事件记录模块	ERM
人机交互接口	HMI	其它网络接口	RIOM

表 2 节点列表及其编号

所在车辆	节点名称及其序号
驾驶室动车车辆 (交换机编号 1, 2, 3)	① CCU; ② VCU_1; ③ BCU_1; ④ TCU_1
	⑤ ACU_1; ⑥ DCU_1; ⑦ DCU_2; ⑧ HVAC
	⑨ PIS_1; ⑩ ATC; ⑪ ERM; ⑫ HMI_1
	⑬ HMI_2; ⑭ RIOM_1; ⑮ RIOM_2;
客室动车车辆 (交换机编号 4, 5)	⑯ VCU_2; ⑰ BCU_2; ⑱ TCU_2
	⑲ ACU_2; ⑳ DCU_3; ㉑ DCU_4
	㉒ HVAC_2; ㉓ PIS_2; ㉔ RIOM_3

假设每个交换机的端口数量均为 8 个, 由公式 (6) 可

以计算出驾驶室和动车客室的交换机数量，考虑到车辆布线和网络节点数目等实际情况，两车辆的交换机数分别为 3 个和 2 个，其中每节车辆内各有 1 个交换机为车辆级编组交换机，其它为子交换机，如图 2 网段示意图所示。

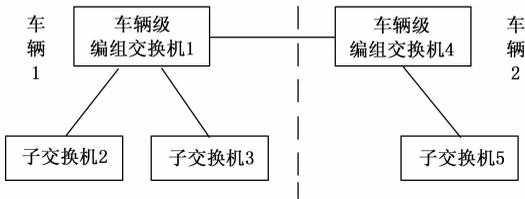


图 2 拓扑优化实例一网段示意图

为了简化计算，矩阵 A 中两节点之间的往返数据通信量取值相等，即 $\alpha_{nl} = \alpha_{ln}$ 。取 CCU 和 VCU 的数据帧大小为 64 字节，周期为 2 ms；PIS 的数据帧大小为 960 字节，周期为 150 ms。由式 (3) 和式 (4) 可计算出 CCU 与 VCU 之间通信量权值为 1；VCU 与 PIS 之间通信量权值为 0.2。同理，驾驶室内的 CCU 与每节车辆内的各类控制单元 VCU、BCU、TCU、ACU 和 ATC 之间相互通信，其权值大小依次为 1、1、1、1 和 0.5；每节车辆内的其它设备 DCU、HVAC、PIS 和 RIOM 与本节车辆的 VCU 进行数据通信，其权值大小依次为 1、1、1、1 和 0.5；HMI 先通过 ERM 再与 CCU 进行数据交互，权值为 0.4 和 0.5。由各节点间的通信量权值构建二分图，依据分配算法完成所有设备节点的分配，节点分配流程图如图 3 所示。

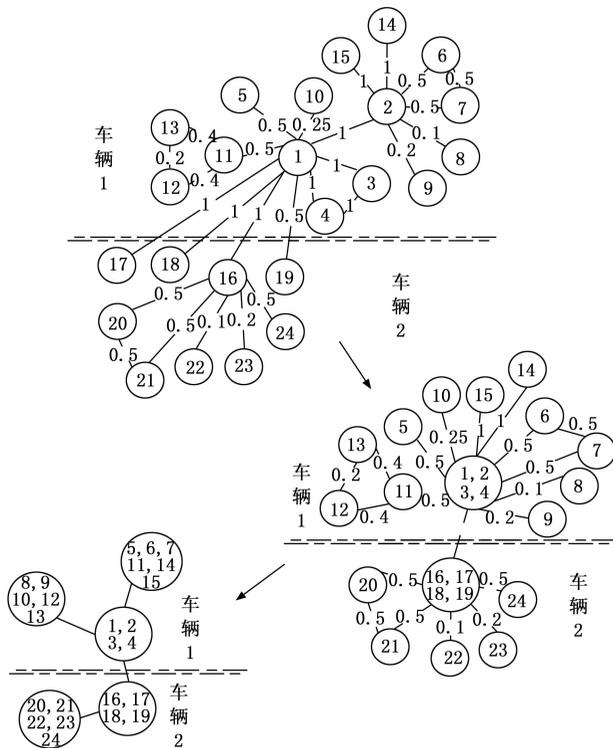


图 3 节点分配流程图

按照通信量权值二分图的设备节点分配算法分配后，各交换机形成的区域及其区域内的各个节点的编号如下所示。

驾驶室动车车辆：编组交换机 1 连接的节点为①②③④

④；子交换机 2 连接的节点为⑤⑥⑦⑧⑨⑩⑪⑫⑬⑭⑮；子交换机 3 连接的节点为⑧⑨⑩⑪⑫⑬。客室动车车辆：编组交换机 4 连接的节点为⑯⑰⑱⑲；子交换机 5 连接的节点为⑳㉑㉒㉓㉔。

2.4 基于通信量权值二分图分配算法的网络拓扑结构

本文参考国际电工委员会标准，并依据上述设备分配结果，构建出优化后的交换式列车通信网络拓扑结构见图 4 所示。它分为三层网络：最高层为列车级骨干网层，该层由以太网骨干网节点和以太网中继器通过双缆链路聚合连接；中间层为车辆级编组网层，由各节车辆的编组交换机相互连接形成环形拓扑结构；最底层为设备控制层，该层中高通信量权值的节点以编组网层中的编组交换机为中心呈星型连接，低通信量权值的节点以子交换机为中心，采用星型拓扑结构部署。各节车辆中的编组交换机与该节车辆的子交换机连接。每节车辆中的编组交换机和其它网络节点构成一个局域网。不同车辆间，通过编组交换机与其它车辆进行通信；同一车辆内，由编组交换机和子交换连接实现节点间通信，构成完整的通信链路。

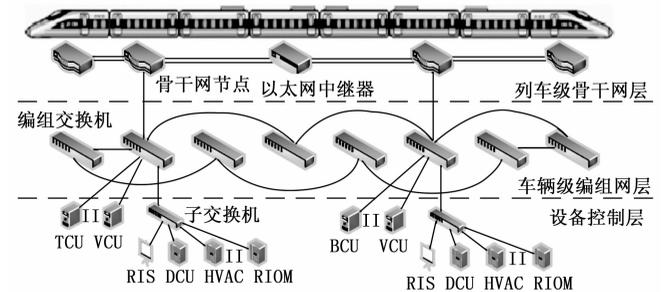


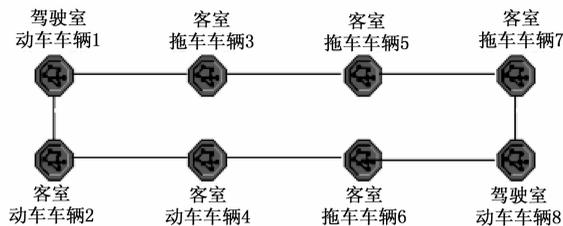
图 4 基于通信量权值二分图分配算法的拓扑结构

3 列车通信网络性能仿真

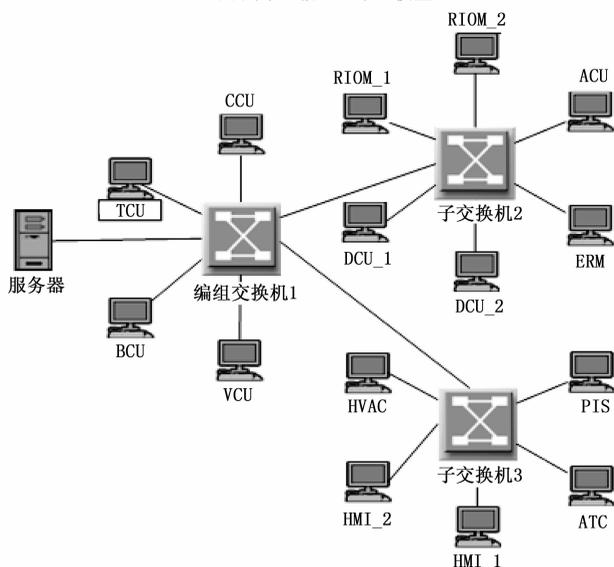
为验证优化后的列车交换式以太网拓扑结构对网络性能的影响，采用 OPNET Modeler 软件进行仿真，搭建了如图 5 所示的交换式列车通信网络仿真模型，研究了两个不同场景下的网络拓扑结构对网络时延、网络服务器时延、链路率以及吞吐量的影响。

场景 (1)：以图 4 作为网络拓扑模型的依据，仿真场景大小设置为 200 × 200 m，8 个子网分别代表动车组的 8 节车辆，每个子网由其内部编组交换机采用环形拓扑方式连接，各个子网之间相距 50 m 如图 5 (a) 所示；各个子网内部依据节点分配算法得出的分配情况，将各个网络节点与对应的编组交换机或子交换机进行连接，图 5 (b) 是驾驶室动车车辆内部模型，包括若干电子控制单元（如牵引、制动等）和若干终端设备，其通信连接由编组交换机或子交换机呈星型连接完成。此外，由于客室动车车辆比客室拖车车辆多了牵引控制单元，故在仿真时客室拖车车辆没有牵引控制单元。

场景 (2)：拓扑模型中网络节点数目和节点数据类型与场景 (1) 相同，但网络节点到交换机未进行优化分配，而是随机连接。



(a) 列车通信网络子网模型



(b) 子网内部模型

图 5 交换式列车通信网络仿真模型

网络时延一般用来描述发送数据包从进入等待发生状态到接收端收到全部数据包的时间。网络时延的数值越大, 说明数据包在传输过程中所耗费的时间越长, 其对系统的安全性和稳定性的危害性越大。在 2 个场景下, 网络时延仿真结果如图 6 所示, 优化前和优化后的列车通信网络拓扑结构的网络平均时延分别为 2.133 ms 和 1.929 ms, 这表明优化后的网络拓扑结构可以有效降低网络时延, 提高网络的实时性、安全性和稳定性。

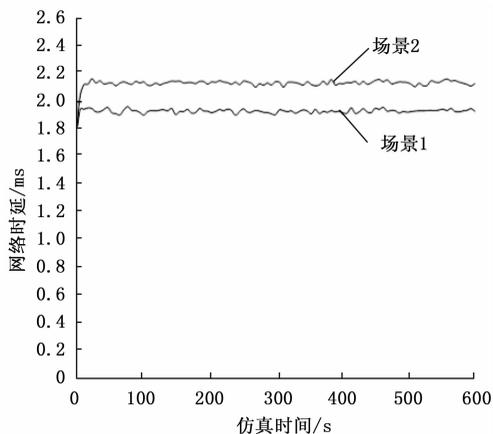


图 6 网络时延

服务器作为众多网络节点之一, 在进行数据交换时, 由于网络带宽的限制以及数据变化的不确定性, 不可避免

的造成数据碰撞和网络堵塞, 进而导致网络时延的出现。图 7 为网络拓扑结构优化前后的网络服务器时延, 服务器时延由 0.112 6 ms 减小到 0.097 7 ms, 说明优化拓扑网络结构可以提高网络性能, 减小时延。

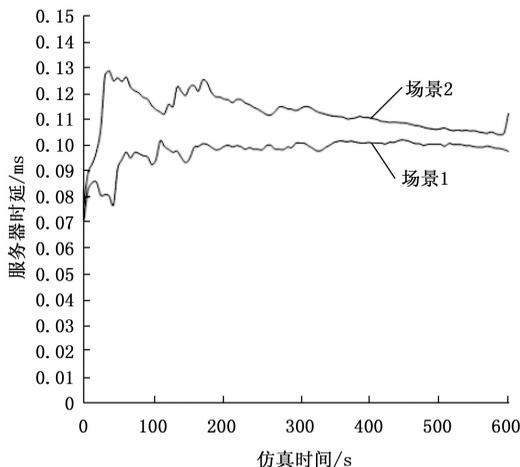


图 7 网络服务器时延

链路利用率一般用来描述网络的拥塞情况, 链路利用率越高, 说明网络越拥堵, 当链路利用率低于 25% 时, 网络中几乎不会发生碰撞。图 8 是驾驶室动车车辆 1 与客室拖车车辆 3 之间的链路利用率, 由图 8 可以看出, 列车通信网络通拓扑结构优化后, 链路利用率由 25.63% 降到 8.56%, 说明网络的拥塞情况得到改善, 可以更好的保障网络数据传输的可靠性^[21]和实时性。

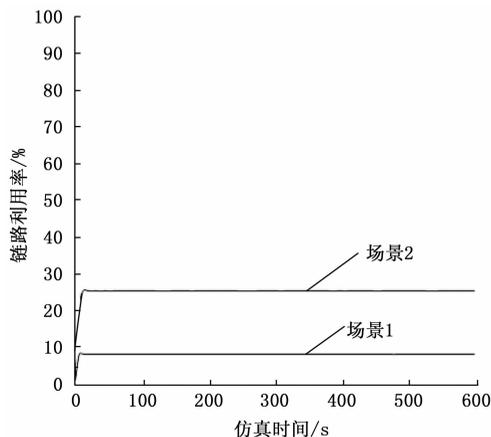


图 8 链路利用率

吞吐量一般用来描述发送端和接收端传送数据的速率, 相同时间内, 吞吐量的值越大, 代表数据传输速率越快。图 9 和图 10 分别表示网络拓扑结构优化前后, 驾驶室动车车辆 1 和客室拖车车辆 3 内交换机之间三段链路上的吞吐量情况, 结合图 2 的网段示意图可知, 编组交换机 1 和子交换机 2 之间的链路为链路 A, 编组交换机 1 和子交换机 3 之间的链路为链路 B, 编组交换机 1 和编组交换机 4 之间的链路为链路 C。网络拓扑结构未优化之前各链路 A、B、C 的吞吐量分别为 8.535 Mbps、4.265 Mbps 和 25.629 Mbps。

优化后的网络拓扑结构的各链路 A、B、C 的吞吐量分别为 4.251 Mbps、8.562 Mbps 和 8.558 Mbps。证明了优化后的网络拓扑结构的吞吐量产生了明显的变化,同时也可以减少子网间不必要的数据传输,提高网络性能。

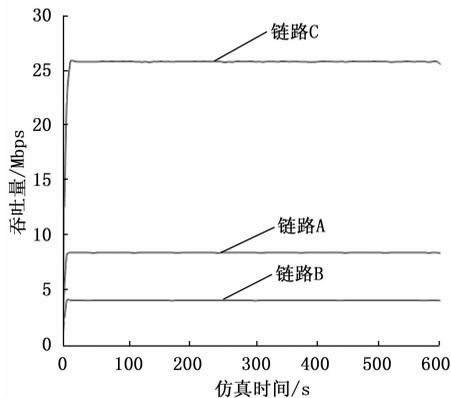


图 9 未优化网络拓扑结构的吞吐量

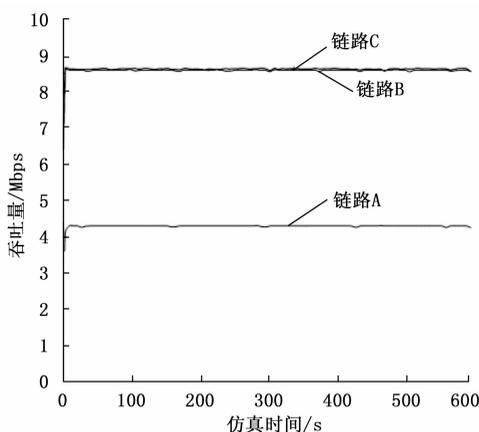


图 10 优化网络拓扑结构后的吞吐量

通过各类网络仿真数据可以看出,列车的网络拓扑结构对网络时延、服务器时延、链路利用率以及吞吐量具有重要的影响。优化网络拓扑结构不仅能降低网络时延提高网络实时性,在改善网络性能等方面也起到积极的作用,该结果为车载网络拓扑结构的优化提供了理论参考。

4 结束语

将以太网技术应用到列车通信网络是现今发展的必然趋势,而以太网应用于列车通信网络的关键技术问题在于如何提高网络的实时性和可靠性。本文从优化网络拓扑结构的角度出发,提出一种通信量权值二分图分配算法,解决网络拓扑结构中设备到交换机的分配问题,将通信频繁的节点限制在同一交换机区域内并减少信息传递中交换机的数量,从而完成整个列车交换式以太网拓扑结构的优化。通过网络仿真结果表明,优化后的列车通信网络拓扑结构在具有高可靠性的前提下,网络的实时性明显提高,且对其网络性能也有一定的积极影响,说明本文优化后的列车通信网络是具有较高及时可靠性的网络。本文所提出的网络拓扑结构优化方案在列车网络节点分配、网络时延降低、

网络虚拟提高等方面具有很好的应用价值。

参考文献:

- [1] 严翔. 基于工业以太网的列车控制网络性能分析及优化[J]. 机车电传动, 2018 (3): 41-44.
- [2] 贺德强, 王亚松, 陈彦君, 等. 基于分层调度算法的列车通信网络实时性研究[J]. 铁道学报, 2020, 42 (11): 102-109.
- [3] 简捷, 王立德, 靳建宇, 等. 基于以太网的列车通信网络冗余结构可靠性分析[J]. 北京交通大学学报, 2018, 42 (2): 76-83.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 邢震, 贾步超, 穆建成, 等. 基于交换式以太网的 TCN 设计与实时性能分析[J]. 铁路计算机应用, 2013, 22 (6): 51-56.
- [7] MORENO J C, LALOYA E, NAVARRO J. A Link-Layer Slave Device Design of the MVB-TCN Bus (IEC 61375 and IEEE 1473-T)[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2007, 56 (6): 3457-3468.
- [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] 郭媛媛, 王宏志, 王豪, 等. 路由以太网列车通信网络分析[J]. 长春工业大学学报, 2019, 40 (5): 477-482.
- [10] FENCL T, BURGET P, BILEK J. Network topology design[J]. Control Engineering Practice, 2011, 19 (11): 1287-1296.
- [11] 丁超义, 周勇, 邹华兵, 等. 基于 OPNET 的星型工业以太网列车通信网络仿真研究[J]. 湖南理工学院学报(自然科学版), 2020, 33 (2): 32-36.
- [12] 赵航, 胡黄水, 戚小莎, 等. 列车以太网拓扑结构[J]. 长春工业大学学报, 2018, 39 (5): 494-498.
- [13] 王涛, 王立德, 周洁琼, 等. 基于交换式以太网的列车通信网络实时性研究[J]. 铁道学报, 2015, 37 (4): 39-45.
- [14] 张军, 贺德强, 苗剑. 基于以太网的列车通信网络及交换机开发[J]. 计算机测量与控制, 2014, 22 (6): 1890-1892, 1895.
- [15] 杨佳丽, 窦军. 高速以太网时延仿真分析[J]. 计算机科学, 2011, 38 (S1): 341-344.
- [16] 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.
- [17] 田寅, 贾利民, 董宏辉, 等. 列车通信网络设计问题中的双层规划模型[J]. 西安交通大学学报, 2014, 48 (4): 133-138.
- [18] 裴子秀, 谭献海. 基于以太网的列车通信网络性能仿真研究[J]. 西南科技大学学报, 2014, 29 (2): 66-71.
- [19] FORTZ B, GOUVEIA L, JOYCE-MONIZ M. Optimal design of switched ethernet networks implementing the multiple spanning tree protocol[J]. Discrete Applied Mathematics, 2018, 234: 114-130.
- [20] 黄俊伟, 杨志明. 超密集小区中基于二分图优先级的资源分配算法[J]. 电讯技术, 2019, 59 (8): 930-937.
- [21] 黄宁, 伍志韬. 网络可靠性评估模型与算法综述[J]. 系统工程与电子技术, 2013, 35 (12): 2651-2660.