

基于 FPGA 多级交换结构提升列车骨干网 交换机信号转发性能的技术方案

米志宏¹ 张光远² 李 彬¹

(1. 中车长春轨道客车股份有限公司国家轨道客车工程研究中心, 130062, 长春;

2. 中车长春轨道客车股份有限公司城铁事业部, 130062, 长春)

摘 要 [目的]城市轨道交通列车通信网络承载的传输业务日趋多样化,各通信设备间相互传输的信息量非常大,这对 ETB(列车骨干网)交换机的各项性能提出了更高的要求。交换机的信号转发性能直接决定了交换机传输数据的能力,有必要对 ETB 三层交换机信号转发性能的提升措施进行研究。[方法]以美国洛杉矶地铁红线车辆项目为研究对象,介绍了该线地铁列车的通信网络拓扑结构。从分析 ETB 交换机吞吐量需求入手,研发了基于 FPGA(现场可编程门阵列)多级交换结构平台的 ETB 三层交换机。对研发的交换机信号转发性能进行了测试,以验证其性能。[结果及结论]ETB 需要传输的数据量约为 44 Mbit/s,早期建成地铁线路的车辆配置难以满足如此大数据量的信号转发要求。FPGA 多级结构平台能有效平衡中间模块之间的负载,提高 ETB 交换机的吞吐量。研发的 ETB 三级交换机的网络吞吐量可达到 90 Mbit/s,能够很好地满足洛杉矶地铁红线车辆的数据传输需求。

关键词 城市轨道交通列车;列车骨干网;三层交换机;现场可编程门阵列;信号转发性能

中图分类号 U270.38+2

DOI:10.16037/j.1007-869x.2025.02.033

Technical Solution for Enhancing Signal Forwarding Performance of Train Backbone Network Switch Machines Based on FPGA Multi-level Switching Architecture

MI Zhihong¹, ZHANG Guangyuan², LI Bin¹

(1. National Engineering Research Center of Railway Vehicles, CRRC Changchun Railway Vehicles Co., Ltd., 130062, Changchun, China; 2. Urban Transit Division, CRRC Changchun Railway Vehicles Co., Ltd., 130062, Changchun, China)

Abstract [Objective] The transmission services carried by urban rail transit communication networks are becoming increasingly diverse, leading to a significant volume of information exchange between communication devices. This imposes

higher performance requirements on ETB (ethernet train backbone) switch machines. The signal forwarding performance of switch machines directly determines their data transmission capacity, making it necessary to study signal forwarding performance improvement measures for ETB 3-layer switch machines.

[Method] The vehicle project on Los Angeles Metro Red Line is taken as research object, and the communication network topology of metro trains on this line is introduced. Starting with an analysis of the throughput requirements for ETB switch machines, an ETB 3-layer switch machine based on an FPGA (field-programmable gate array) multi-level switching architecture platform is developed. The signal forwarding performance of the developed switch machine is tested to verify its effectiveness. [Result & Conclusion] The ETB data transmission requirement is approximately 44 Mbit/s, which cannot be met by the configurations of vehicles on metro lines from earlier development. The FPGA multi-level switching platform effectively balances the load between intermediate modules and enhances the throughput of ETB switch machine. The developed ETB 3-layer switch machine has a network throughput of up to 90 Mbit/s, adequately meeting the data transmission needs of Los Angeles Metro Red Line vehicles.

Key words urban rail transit train; ETB; 3-layer switch machine; FPGA; signal forwarding performance

早期地铁列车一般采用 IEC(国际电工委员会)编制的 IEC 61375-1:1999 *Electronic railway equipment-Part 1:Train communication network* 中对 TCN(列车通信网络)技术的要求作为列车内部的主要通信标准。TCN 由 2 级总线结构组成:①WTB(绞线式列车总线),其传输速率为 1.0 Mbit/s;②MVB(多功能车辆总线),其传输速率为 1.5 Mbit/s,主要用于传输列车控制信息和状态信息。随着轨道交通的快速发展,列车通信网络承载的传输业务日趋多样化,且其在网络吞吐量上的要求越来越高。

与传统地铁列车(只有 WTB 和 MVB 的列车)相比,新型地铁列车(配置了以太网列车通信网络的列车)上各通信设备间相互传输的信息量更大,WTB、MVB 等传统的列车通信网络总线已不能满足其传输需求。为此,IEC 于 2014 年发布了 2 个基于以太网的列车通用网络协议:①用于 ETB(列车骨干网)的 IEC 61375-2-5:2014 *Electronic railway equipment-Train communication network(TCN)-Part 2-5:Ethernet train backbone*;②用于 ECN(以太网编组网)的 IEC 61375-3-4:2014 *Electronic railway equipment-Train communication network(TCN)-Part 3-4:Ethernet consist network*。这 2 个协议推动了以太网技术在列车通信网络领域的全面发展。

本研究在分析地铁车辆项目需求的过程中发现,与早期的地铁车辆项目需求相比,目前的地铁车辆项目需求中,列车通信网络除了需要传输列车的控制信息、状态信息和旅客信息外,还需要跨车辆编组传输视频监控等信息。列车级的数据传输量不断提高,这对 ETB 三层交换机的各项性能都提出了更高的要求。尤其是交换机的信号转发性能,该指标决定了交换机传输数据的能力。为此,本文以美国洛杉矶地铁红线车辆项目为研究对象,基于 FPGA(现场可编程逻辑门阵列)多级交换结构平台,研发了基于 MSM(Memory-Space-Memory)型 Clos 网络的 ETB 三层交换机,并对该交换机的信号转发性能进行测试,以验证其性能是否能够满足目前地铁车辆的设计需求。

1 美国洛杉矶地铁车辆项目列车通信网络拓扑结构

IEC 61375-2-5:2014 定义了 ETB 的总体工作机制,使不同车辆编组的 ECN 具有互操作性。IEC 61375-3-4:2014 定义了连接到 ECN 的 ED(终端设备)数据通信接口的通用要求和规范。

该项目基于上述 2 个协议,对列车通信网络拓扑结构进行了设计,其拓扑结构如图 1 所示。列车通信网络分为 2 个层次:ETB 和 ECN。整列车的通信网络由多个 ECN 组成,通过 ETBN(列车骨干网节点)将 ETB 与 ECN 连接,以实现多个 ECN 之间的通信。

列车各编组车辆 ECN 之间的通信主要基于以下 2 个基本技术:①ETB 与 ECN 间需要经过地址转

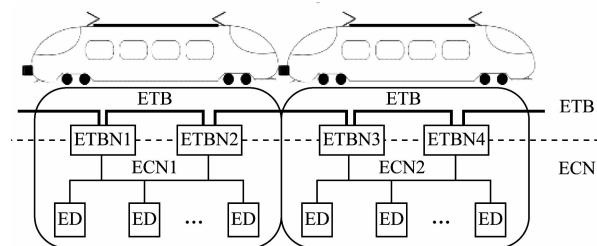


图 1 列车通信网络拓扑结构示意图

Fig. 1 Diagram of train communication network topology structure

换。根据 IEC 61375-2-5:2014 协议和 IEC 61375-3-4:2014,ETB 与 ECN 的地址基于 R-NAT(铁路网络地址转换)协议进行转换;②需要经过 ETB 三层交换机对信号进行三层转发。本文主要研究提高 ETB 三层交换机信号转发性能的有效措施,并确认这些措施能否满足该地铁车辆项目的目前使用需求及今后的性能拓展需求。

本文测试过程中,ETB 的 IP(互联网协议)地址和 ECN 的 IP 地址均依据 R-NAT 协议,并基于该地铁车辆项目的实际应用需求进行了修改。这样,不同编组车辆 ECN 中同一位置设备的 ECN 地址虽然相同,但从 ETB 角度看,这些设备的 IP 地址是不同且唯一的。

2 三层交换机性能参数

对于三层交换机来说,其性能指标体系依据 IETF(国际互联网工程任务组)编制的 RFC 2544:1999 *Benchmarking Methodology for Network Interconnect Devices* 测试标准制定。该测试标准包括了吞吐量、丢包率、时延、背靠背、系统恢复时间、系统重启时间等参数。对于该地铁车辆项目而言,吞吐量是此项目最重要的性能指标。

吞吐量是交换机的包转发能力。吞吐量同交换机端口的数量和速率、数据包的长度和类型、路由计算模式(分布或集中)、交换结构及测试方法等密切相关。通常情况下,吞吐量特指处理器处理数据包的能力。

3 ETB 网络吞吐量需求分析

在研究该地铁车辆项目需求时发现,很多通信数据并不需要经过 ETB,即:数据不跨车辆编组,不经过 ETBN。但也有部分通信数据必须经过 ETB,这些数据主要分为四类:①列车控制中心和 CCTV

(闭路电视)调取八路视频数据流,这部分数据的吞吐量为 32.00 Mbit/s;②LCD(液晶显示器)视频数据,这部分数据的吞吐量为 10.00 Mbit/s;③人工广播、司机对讲、紧急对讲、数字广播、无线电广播等数据,这部分数据的吞吐量为 0.96 Mbit/s;④TRDP(列车实时协议)控制信号数据,这部分数据的吞吐量为 0.70 Mbit/s。经计算,ETB 需要传输的数据量约为 44.00 Mbit/s。但由于应用于既有地铁车辆项目列车通信网络的数据吞吐量需求较低,既有的 ETB 三层交换机转发性能不高,难以满足目前洛杉矶地铁红线车辆大数据量信号转发的要求。因此,在确保数据传输稳定、可靠的前提下,该地铁车辆项目的最大难点是 ETB 网络需要满足信号数据大吞吐量的传输要求。

4 基于 FPGA 多级交换结构的三层交换机设计

传统单级交换结构的交换机已无法满足大数据量信号转发需求,因此,为了提升交换机的信号转发性能,本文研发了基于 FPGA 多级交换结构的三层交换机。

交换机可选择的多级交换结构包括 Banyan 网络、Benes 网络和 Clos 网络等。通过分析,Clos 网络具有管理简洁、路径多样且无阻塞、高扩展性等特点,以及高数据吞吐量的性能优势。因此,本研究选择基于 MSM 型 Clos 网络的三层交换机进行研发设计。Clos 网络主要针对端口映射管理、仲裁调度、媒体存取控制地址调取、系统功率损耗及系统容错等功能模块进行了优化设计。

MSM 型结构采用定长分组同步交换方式,将传输时间划分为等长的时隙并进行传输。每个时隙的路由仲裁调度过程相互独立,且在第 n 个时隙中完成第 $n+1$ 个时隙待传输信元的仲裁调度。在所有输入/输出端口间的可选通路之中,寻找输入/输出端口的最佳匹配,以期在最大程度上避免数据通路被其他数据包占用,合理利用数据交换网络的资源,提高交换机吞吐量。

Clos 网络的高性能路由结构由多个以 Clos 网络为核心的子交换机组成。本文建立了基于 Clos 网络的交换结构,该 Clos 网络由 IM(输入模块)、CM(中间模块)和 OM(输出模块)组成,并形成三级交叉开关矩阵。该交换结构为一种分层结构,分层结构具有大量的缓冲区,可提高路由器内部交换

带宽,确保数据通路不被其他数据占用,进而提升交换机的吞吐量。

5 数据吞吐量测试

为了验证本文研发 ETB 三级交换机的数据吞吐量性能,使用业界熟知的 Chariot 工具,对该 ETB 三级交换机进行了性能测试。该工具可以用图表直观地显示网络传输吞吐量、传输速率、响应时间等参数信息。

测试平台严格按照 IEC 61375-2-5:2014 和 IEC 61375-3-4:2014 中所要求的 ETB-ECN 结构进行搭建。测试平台网络拓扑结构及数据流向如图 2 所示。图 2 中:PC(个人电脑)是陪测设备,用于运行 Chariot 工具并统计吞吐量测试结果;ETBN 表示被测的 ETB 三级交换机设备,是被测设备。由图 2 可看出,整个测试平台由 4 台通用 PC 机(PC1—PC4)、2 台 ETB 三级交换机(ETBN1、ETBN2)组成。将 PC1 至 PC2 的数据流记为流向 1,流向 1 的链路为:ECN1→ETBN1→ETBN2→ECN2。再将 PC4 至 PC3 的数据流记为流向 2,流向 2 的链路为 ECN2→ETBN2→ETBN1→ECN1。

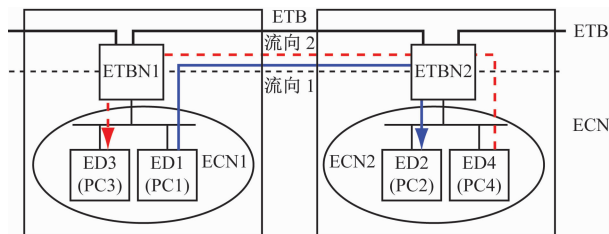


图 2 测试平台网络拓扑结构及数据流向

Fig. 2 Test platform network topology structure and data flow

依据 RFC 2544 中规定的吞吐量,通过 Chariot 测试工具对本文研发 ETB 三级交换机进行了相关性测试。ETB 三级交换机的性能测试内容如表 1 所示。表 1 中序号 2 测试内容对应的吞吐量测试结果如图 3 所示。

试验结果表明:本文研发的 ETB 三级交换机网络吞吐量可达到 90 Mbit/s,吞吐量很高,已达到线速,能够很好地满足 ETB 传输各类数据信息的要求。

6 结语

本文从 ETB 交换机的吞吐量需求入手,基于 FPGA 多级交换结构平台,研发了 MSM 型 Clos 结

表 1 ETB 三级交换机的性能测试内容

Tab. 1 Performance test content of ETB 3-layer switch machine

序号	测试内容
1	TCP 单向测试,PC1、PC2 对应数据流向 1;PC2 运行 TCP 服务器指令,启动服务器;PC1 运行 TCP 客户端指令,启动客户端
2	TCP 单向测试,PC1、PC2 对应数据流向 2;PC1 运行 TCP 服务器指令,启动服务器;PC2 运行 TCP 客户端指令,启动客户端
3	TCP 双向测试,PC1、PC2 对应数据流向 1、PC3、PC4 对应数据流向 2;PC2、PC3 运行 TCP 服务器指令,启动服务器;PC1、PC4 运行 TCP 客户端指令,启动客户端
4	UDP(用户数据包协议)单向测试,PC1、PC2 对应数据流向 1;PC2 运行 UDP 服务器指令,启动服务器;PC1 运行 UDP 客户端指令,启动客户端
5	UDP 单向测试,PC1、PC2 对应数据流向 2;PC1 运行 UDP 服务器指令,启动服务器;PC2 运行 UDP 客户端指令,启动客户端
6	UDP 双向测试,PC1、PC2 对应数据流向 1,PC3、PC4 对应数据流向 2;PC2、PC3 运行 UDP 服务器指令,启动服务器;PC1、PC4 运行 UDP 客户端指令,启动客户端

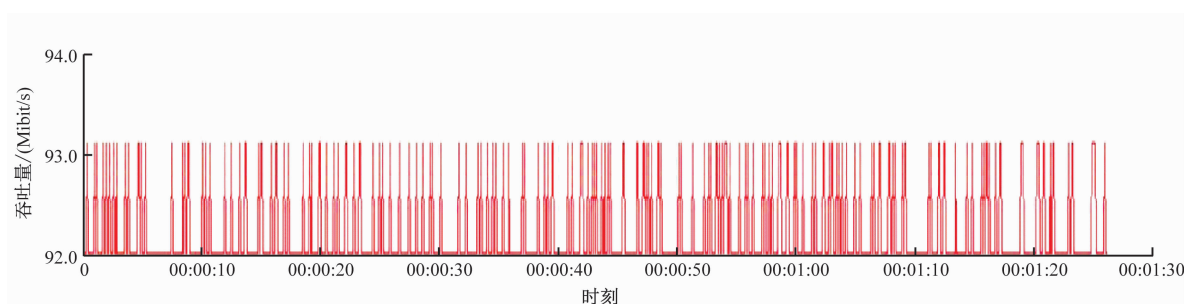


图 3 表 1 中序号 2 测试内容对应的吞吐量测试结果

Fig. 3 Throughput test results corresponding to No. 2 test content of Tab. 1

构的 ETB 三层交换机。经试验验证,该交换机能够有效提升列车通信网络的传输性能。本研究为今后高速 ETB 三层交换机的研发提供了技术积累。

本文提出的基于 FPGA 多级交换结构平台提升 ETB 交换机信号转发性能的技术方案,能够缩短设计周期,节约资源成本,提高列车通信网络系统的可靠性,在实现高速实时、高可靠性的列车通信网络方面具有较好的应用前景和研发意义。

后续研究应进一步对定长和变长分组同步交换方式、多级调度算法等进行深入研究,以提高交换机传输速率,满足城市轨道交通列车对高速数据传输的需求。

参考文献

- [1] 施得君,李宏亮,胡舒凯.基于 Clos 网络的高阶路由器结构[J].计算机工程与科学,2023,45(12):2099.
SHI Dejun, LI Hongliang, HU Shukai. A Clos network based high-radix router structure[J]. Computer Engineering & Science, 2023, 45(12): 2099.
- [2] 李超.列车 ECN 设备与 ETBN 节点通讯技术研究[D].大连:大连交通大学,2017.
LI Chao. Research on communication technology between train ECN equipment and ETBN node[D]. Dalian: Dalian Jiaotong

University, 2017.

- [3] 姚欣,李斌,徐辉,等.一种基于 Clos 网络的新型 4×4 全交换开关矩阵[J].微波学报,2024,40(2):46.
YAO Xin, LI Bin, XU Hui, et al. A novel 4×4 full switch matrix based on Clos network[J]. Journal of Microwaves, 2024, 40(2): 46.
- [4] 呼延琅,周诠,黎军,等.一种星上 MSM 型 Clos 交换结构的调度算法(英文)[J].空间电子技术,2015,12(1):79.
HU Yanlang, ZHOU Quan, LI Jun, et al. An onboard dispatching algorithm for MSM Clos-network switches[J]. Space Electronic Technology, 2015, 12(1): 79.
- [5] 李德顺,申彦明,李克秋. DPCLos: 基于 3 级 Clos 结构的集装箱数据中心网络设计[J].大连理工大学学报,2016,56(6):643.
LI Deshun, SHEN Yanming, LI Keqiu. DPCLos: design of network architecture for container data center based on 3-stage Clos structure[J]. Journal of Dalian University of Technology, 2016, 56(6): 643.

· 收稿日期:2024-08-05 修回日期:2024-09-05 出版日期:2025-02-10
Received:2024-08-05 Revised:2024-09-05 Published:2025-02-10
· 通信作者:米志宏,正高级工程师,mizhihong_ck@crrecg.cc
· ©《城市轨道交通研究》杂志社,开放获取 CC BY-NC-ND 协议
© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license