

# 基于有限状态机的轨道交通多功能车辆 总线网络动态性能仿真分析

王 健 滕万秀 张 镭

(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//第一作者, 工程师)

**摘 要** 鉴于 MVB(多功能车辆总线)网络在轨道交通列车上的广泛应用,选取网络效率、网络利用率和网络吞吐量等表征 MVB 网络动态性能的关键评价指标,基于 Stateflow 有限状态机工具箱构建模块化 MVB 网络模型,并利用该模型分析了数据长度、设备数量、传输介质等因素对 MVB 网络动态性能的影响。

**关键词** 轨道交通;多功能车辆总线;网络动态性能;有限状态机;仿真

**中图分类号** U231.7

**DOI:**10.16037/j.1007-869x.2022.02.010

## Simulation Analysis of Rail Transit MVB Network Dynamic Performance Based on Finite State Machine Model

WANG Jian, TENG Wanxiu, ZHANG Lei

**Abstract** Multifunctional vehicle bus (MVB) is widely applied in rail transit trains. In this paper, key evaluation indexes of MVB network dynamic performance including network efficiency, network utilization and network throughput are selected, a modular MVB network model based on the finite state machine toolbox Stateflow is established. Then, the model is used to analyze the influence of data length, number of devices and communication medium on the dynamic performance of MVB network.

**Key words** rail transit; MVB; network dynamic performance; finite state machine; simulation

**Author's address** National Engineering Research Center of Railway Vehicles, CRRC Changchun Railway Vehicles Co., Ltd., 130062, Changchun, China

MVB(多功能车辆总线)作为连接车辆内设备的网络,目前在城市轨道交通列车和高速铁路列车上都得到了广泛的应用<sup>[1]</sup>。MVB 网络性能的预测和分析在 MVB 网络系统设计中起着重要作用。在购买昂贵的硬件构建实际系统之前,仿真建模是预

测和分析 MVB 的有效方法。

文献[2]采用 GSPN(广义随机 Petri 网)方法,利用 TimeNET 软件包建立模型,计算分析了吞吐性能、有效数据传输能力和带宽使用率。文献[3]引入 OPNET 软件模拟基于通用总线的 TCN(列车通信网)车辆级总线,通过对比几种不同的列车通信网络拓扑模型,验证了模型的合理性。文献[4]基于 Matlab/Simulink 软件,从节点的角度建立了发送机和接收机的状态机模型。为了提高 MVB 网络性能,本文提出了一种全新的评价 MVB 网络实时性能的方法。该网络模型是采用 Stateflow 工具箱,利用 FSM(有限状态机)理论建立的。与上述模型相比,该模型利用更为成熟的软件工具箱,可用于分析影响 MVB 网络动态性能的因素。

## 1 MVB 网络动态性能评价指标

MVB 网络的动态性能可以通过网络效率、网络利用率和网络吞吐量等指标进行评价。上述指标计算时需要利用 MVB 周期的概念。

### 1.1 MVB 周期

MVB 通信分为若干个周期,其中,最短的称为基本周期  $T_{bp}$ ,它包括 1 个周期相(用于过程数据)和 1 个偶发相(用于消息数据)。主设备周期数据的特征周期  $T_{ip}$  轮询每个周期数据,  $T_{ip}$  为基本周期的 2<sup>n</sup> 倍,其中  $n$  为正整数。将 MVB 上所有节点的最长特征周期定义为宏周期  $T_{macro}$ ,即 MVB 完成一次完整通信所用的时间。

### 1.2 网络效率

网络效率采用 MVB 一次完整通信中所有报文发送有效数据的传输延时之和与全部报文总传输延时的比值表示,并且采用 1 个宏周期内的延时数据进行计算。

单个报文的有效数据传输延时  $T_e$  为:

$$T_e = \frac{N_e}{V} \quad (1)$$

式中:

$N_e$ ——报文中有效数据的位数;

$V$ ——MVB 通信速率。

单个报文的总传输延时  $T_t$  为:

$$T_t = \frac{N_m}{V} + \frac{N_s}{V} + T_r \quad (2)$$

式中:

$N_m$ ——主帧数据的位数,取定值 33;

$N_s$ ——从帧数据的位数;

$T_r$ ——应答延时,表示从主帧结束到从帧开始时段内可能的最大延时,见式(3)。

$$T_r = T_{rpt} N_{rpt} + T_{wst} L \quad (3)$$

式中:

$T_{rpt}$ ——单个中继器可能引入的最大延时;

$N_{rpt}$ ——MVB 中的中继器个数;

$T_{wst}$ ——最差情况下单位长度线缆引入的延时,一般取  $6 \mu\text{s}/\text{km}$ ;

$L$ ——线缆长度。

网络效率  $\xi_e$  为:

$$\xi_e = \frac{\sum_{i=1}^M \left( T_{ep,i} \frac{T_{macro}}{T_{ip,i}} \right) + \sum_{i=1}^{V \cdot T_{macro}} T_{es,i}}{\sum_{i=1}^M \left( T_{ip,i} \frac{T_{macro}}{T_{ip,i}} \right) + \sum_{i=1}^{V \cdot T_{macro}} T_{ts,i}} \quad (4)$$

式中:

$M$ ——总线上的设备数量;

$T_{macro}$ ——宏周期,即 MVB 上所有节点的最长特征周期;

$T_{ip,i}$ ——设备  $i$  的特征周期;

$T_{ep,i}$ ——设备  $i$  的过程数据的有效数据传输延时;

$T_{es,i}$ ——设备  $i$  的消息数据的有效数据传输延时;

$T_{ip,i}$ ——设备  $i$  的过程数据的总传输延时;

$T_{ts,i}$ ——设备  $i$  的消息数据的总传输延时,计算方法如式(1)一式(3)所示。

### 1.3 网络利用率

网络利用率  $\xi_u$  表示有效数据对网络带宽的利用程度,可以采用 MVB 一次完整通信中网络传输有效数据时间与宏周期的比值表示,其计算方法为:

$$\xi_u = \frac{\sum_{i=1}^M \left( T_{ep,i} \frac{T_{macro}}{T_{ip,i}} \right) + \sum_{i=1}^{V \cdot T_{macro}} T_{es,i}}{T_{macro}} \quad (5)$$

### 1.4 网络吞吐量

网络吞吐量  $Q_e$  采用 MVB 一次完整通信中网络传输有效数据总量与宏周期的比值表示,表征 MVB 的有效数据传输能力,其计算方法为:

$$Q_e = \frac{\sum_{i=1}^M \left( N_{ep,i} \frac{T_{macro}}{T_{ip,i}} \right) + \sum_{i=1}^{V \cdot T_{macro}} N_{es,i}}{T_{macro}} \quad (6)$$

式中:

$N_{ep,i}$ ——设备  $i$  的过程数据的有效数据位数;

$N_{es,i}$ ——设备  $i$  的消息数据的有效数据位数。

## 2 MVB 网络模型的整体架构

本文基于 FSM(标准模型扩展)理论,利用 Stateflow 工具箱,在 Matlab/Simulink 平台上模块化建立 MVB 网络模型。FSM 是一个抽象的数学模型,它由有限状态(包括初始状态和 1 个或多个结束状态)组成。1 组输入事件、1 组输出事件或 1 个状态转换函数可以触发模型将一个状态转换到另一个状态。该模型以模块的形式建立,共分为 4 个模块,包括总线模块、信号源模块、主设备模块和从设备模块。MVB 网络模型的整体架构如图 1 所示。

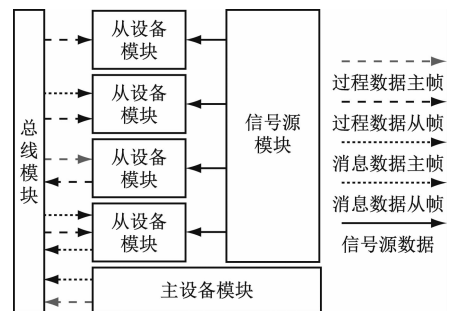


图 1 MVB 网络模型的整体架构

Fig. 1 Overall architecture of MVB network model

### 2.1 总线模块

总线模块包括模拟各设备的访问权限、MVB 的传输延时等功能,并记录传输数据以监控 MVB 上的数据流。总线模块接收到的数据有 4 种访问方式。符合数据类型条件的数据可以通过相应的访问方式获得对总线模块的访问权限。函数“send = slave(data)”和“send = master(data)”可处理接收到的数据,并将数据包分配给目标设备。函数“ $t_1 = \text{delay}(\text{length})$ ”模拟总线造成的延时。函数“data = readframe( )”负责计算网络动态性能评价指标,包括网络效率、网络利用率和网络吞吐量等,计算方式见式(4)一式(6)。

总线模块的工作方式如图 2 所示。

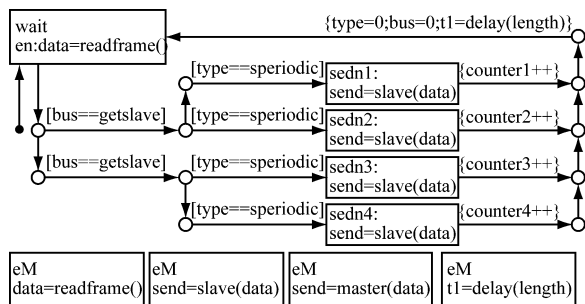


图 2 总线模块的工作方式

Fig. 2 Operation mode of bus module

## 2.2 主设备模块

主设备模块是一个时间触发逻辑设备,它能够分配带宽,生成调度算法,制定过程数据和消息数据的轮询策略。基于时间触发机制建立 MVB 网络模型。如图 3 所示,主设备模块有 1 个输入端口,用于接收来自总线模块的帧;同时其有 2 个输出端口,分别生成主帧和相转换触发器。在主设备模块的基本周期划分模块中,周期时间开关用于将基本周期划分为周期相和偶发相。

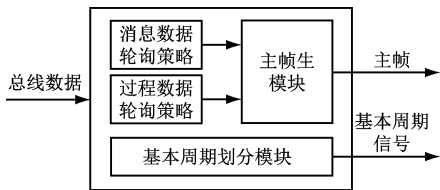


图 3 主设备模块的工作方式

Fig. 3 Operation mode of master device module

## 2.3 从设备模块

从设备模块根据设备状态(发送或接收)和时间相(周期相或偶发相)的不同,包含 4 种数据访问方式,如图 4 所示。函数“senddata = pack( vals )”

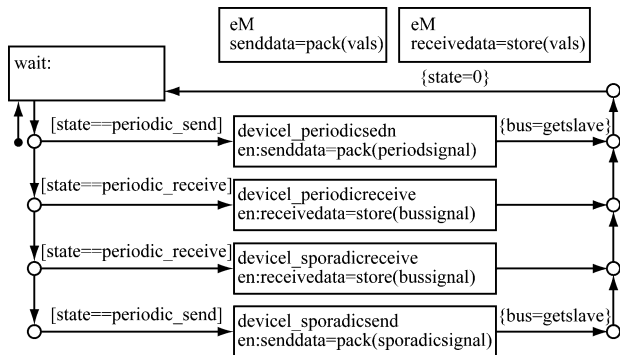


图 4 从设备模块的工作方式

Fig. 4 Operation mode of slave device module

将端口存储或消息数据队列中的数据打包,作为从帧发送。函数“receivedata = store( vals )”识别接收到的帧数据并存储在一起,然后由从设备进行接收。

## 2.4 信号源模块

信号源模块的功能是模拟速度传感器、压力传感器、阀门等产生的信号。根据 IEC 61375-1: 2012 Railway equipment-Train communication network ( TCN )-Part 3-1: Multifunction Vehicle Bus ( MVB ),信号源模块包括过程数据信号模块和消息数据信号模块两部分。因过程数据是周期性的,故采用周期函数发生器来模拟过程数据的信号。从设备以端口存储的形式存储过程数据,即读取端口存储值时,存储值不发生变化,但一旦被写入,该值就会被覆盖。根据数据类型和设备不同,可以配置过程数据的大小和特征周期。由于消息数据是非周期性的,消息数据到达的时间间隔服从泊松分布。采用服从泊松分布的随机数字函数发生器来模拟消息数据的信号。消息数据以队列形式存储,可以配置消息数据的大小和频率。

## 3 MVB 模型系统仿真分析

### 3.1 MVB 模型系统的基本参数

考虑到实际车载网络环境下的典型数据流和网络拓扑特点,采用某 6 节编组地铁列车 MVB 组网并进行简化,作为 MVB 模型仿真系统的参数选择基础。仿真中的 MVB 通信系统包括 1 条 MVB、1 个主设备和若干从设备,且该系统采用 EMD(电气中间距离)介质。MVB 通信速率为 1.5 Mbit/s,基本周期为 1.0 ms,周期相为 0.65 ms,偶发相为 0.35 ms。每个设备产生过程数据的特征周期(宏周期)为 256 ms,模拟时间设置为 1 024 ms,产生消息数据的到达率为 0.1 帧/ms。

### 3.2 从设备数量对 MVB 网络动态性能的影响分析

将每个从设备产生的过程数据均设置为 256 位,总线中有 1 个中继器,线缆长度为 100 m。仿真分析不同从设备数量下,MVB 网络的动态性能评价指标的变化如图 5 所示。

由图 5 可见,网络吞吐量和网络利用率随设备数量的增加而增长,而网络效率则缓慢下降。究其原因主要是由于网络吞吐量和网络利用率的大小取决于网络负载量,而网络效率的大小取决于帧

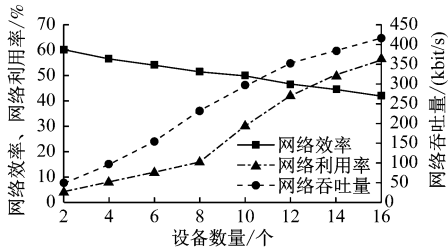


图5 从设备数量对 MVB 网络动态性能的影响

Fig. 5 Impact of slave device number on the dynamic performance of MVB network

的长度。设备数量的增加与帧长度无关,反而会导致用于寻找等待设备的轮询帧数量增加。相较设备数量增加前的 MVB 网络,轮询帧数增加,而有效数据大小不变,这将不可避免地导致网络效率降低。

### 3.3 数据长度对 MVB 网络动态性能的影响分析

将从设备数量设置为 12,总线中有 1 个中继器,线缆长度为 100 m。仿真中,过程数据的长度分别为 16 bit、32 bit、64 bit、128 bit、256 bit 时,MVB 网络动态性能评价指标变化如图 6 所示。

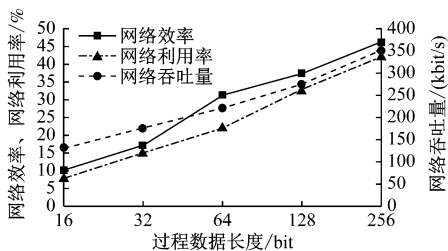


图6 过程数据长度对 MVB 网络动态性能的影响

Fig. 6 Impact of process data length on the dynamic performance of MVB network

由图 6 可见,随着过程数据长度增加,网络利用率、网络效率和网络吞吐量逐渐提高。过程数据的增加相当于过程数据的网络负载增加,故网络吞吐量也随之增长。为提高 MVB 的网络利用率和网络效率,建议将尽可能多的数据打包成同一个数据帧。

### 3.4 传输介质对 MVB 网络动态性能的影响分析

将从设备数量设置为 12,传输介质分为 3 种条件:①1 个中继器,100 m 长线缆;②2 个中继器,150 m 长线缆;③3 个中继器,180 m 长线缆。仿真中,过程数据长度分别为 16 bit、32 bit、64 bit、128 bit、256 bit 时,上述 3 种传输介质的 MVB 网络效率,见图 7。

由图 7 可见,随着中继器数量和线缆长度的增加,MVB 的网络效率越来越低,这是因为中继器数量和线缆长度的增加导致应答延时的增加。此外,

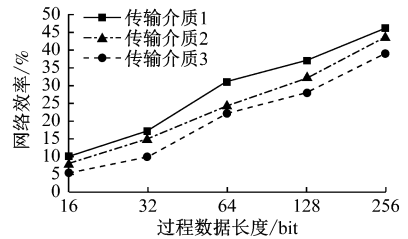


图7 传输介质对 MVB 网络效率的影响

Fig. 7 Impact of transmission medium on the dynamic performance of MVB network

随着过程数据长度的增加,不同传输介质条件下的网络效率都随之提高,从而使传输介质对网络效率的影响有所缓解。因此,将特征周期相同的过程数据打包为同一个数据帧有利于网络效率的提升。

## 4 结语

本文对 MVB 网络动态性能的仿真分析方法进行了研究。选取了网络效率、网络利用率及网络吞吐量等影响 MVB 网络动态性能的关键评价指标,并推导了该评价指标的计算公式;构建了基于 FSM 的模块化 MVB 网络模型,详细阐述了总线模块、主设备模块、从设备模块和信号源模块的工作方式;利用该模型分析了数据长度、设备数量、传输介质等因素对 MVB 网络动态性能的影响。

## 参考文献

- [1] 曾嵘,杨卫峰,刘军. 列车分布式网络通信与控制系统[J]. 机车电传动, 2009(3):17.  
ZENG Rong, YANG Weifeng, LIU Jun. Development of the distribute train electric control system[J]. Electric Drive for Locomotives, 2009 (3):17.
- [2] 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(5):98.  
WANG Yongxiang, WANG Lide. A GSPN-based throughput performance analysis of MVB[J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2008(5):98.
- [3] 周怡,毛中亚. 基于 OPNET 仿真软件的列车通信网络研究[J]. 城市轨道交通研究, 2014(2):42.  
ZHOU Yi, MAO Zhongya. Train TCN and ARCNET communication networks based on OPNET[J]. Urban Mass Transit, 2014 (2):42.
- [4] 王磊,何正友. 基于 Stateflow 的 TCN 列车通信网络仿真分析[J]. 信息技术, 2008(8):6.  
WANG Lei, HE Zhengyou. Simulation of train communication network based on finite state machine theory[J]. Information Technology, 2008(8):6.

(收稿日期:2021-09-28)