

文章编号: 1674-8190(2022)05-179-08

# GJB289A 总线网络电气特性仿真及故障分析

郑敬杭<sup>1,2</sup>, 江志东<sup>1</sup>, 霍立平<sup>1</sup>, 张弟<sup>1</sup>

(1. 海军航空大学青岛校区 航空电子工程与指挥系, 青岛 266041)

(2. 中国人民解放军92975部队, 宁波 315000)

**摘要:** 机载GJB289A总线用于实现各类航空电子设备之间的物理连接,其可靠性直接影响着飞机航电系统的正常运行。为了分析GJB289A总线网络典型电气故障特性,根据GJB289A总线网络变压器、终端电阻分布参数及有损耦合传输线模型,在ADS软件中构建包含两个耦合变压器的两端口GJB289A总线网络模型;并通过理论推导和实验室实测对比分析,验证该模型的有效性。依托两端口网络分布参数模型分析梳理典型电气故障类型的特征波形和参数,实现典型电气故障的快速判断。结果表明:结合实装GJB289A总线网络拓扑结构、物理尺寸和分布参数,利用该模型可仿真获取测试端口精确波形和典型电气故障的特征参数,为总线检测设备的优化设计及总线网络状态健康管理提供技术支撑。

**关键词:** GJB289A总线;电气特性;仿真;电气故障;有损耦合传输线模型

**中图分类号:** V243; TP302

**文献标识码:** A

**DOI:** 10.16615/j.cnki.1674-8190.2022.05.20

**开放科学(资源服务)标识码(OSID):**



## Simulation and Fault Analysis on Electrical Characteristics of the GJB289A Bus Network

ZHENG Jinghang<sup>1,2</sup>, JIANG Zhidong<sup>1</sup>, HUO Liping<sup>1</sup>, ZHANG Di<sup>1</sup>

(1. Avionics Engineering and Command Department, Qingdao Branch, Naval Aviation University, Qingdao 266041, China)

(2. 92975 Unit of the Chinese People's Liberation Army, Ningbo 315000, China)

**Abstract:** Airborne GJB289A bus is used to realize the physical connection between various avionics equipment, and its reliability directly affects the normal operation of aircraft avionics system. In order to analyze the typical electrical fault characteristics of GJB289A bus network, according to the transformer, terminal resistance distribution parameters and lossy coupling transmission line model of GJB289A bus network, building a two port GJB289A bus network model including two coupling transformers in ADS (advanced design system) software; The validity of the model is verified by theoretical derivation and comparative analysis of laboratory measurement. Based on the two port network distributed parameter model, the characteristic waveforms and parameters of typical electrical fault types are analyzed and sorted out, so as to realize the rapid judgment of typical electrical faults. The results show that: combined with the topology, physical size and distribution parameters of the actual GJB289A bus network, the accurate waveforms of the test port and the characteristic parameters of typical electrical faults can be simulated by using this method, which provides technical support for optimal design of bus detection equipment and the health management of the bus network state.

**Key words:** GJB289A bus; electrical characteristics; simulation; electrical fault; lossy coupled transmission line model

收稿日期: 2021-09-08; 修回日期: 2022-03-24

基金项目: 海军航空大学青岛校区科研发展基金

通信作者: 江志东, jzd19851102@126.com

引用格式: 郑敬杭, 江志东, 霍立平, 等. GJB289A总线网络电气特性仿真及故障分析[J]. 航空工程进展, 2022, 13(5): 179-186.

ZHENG Jinghang, JIANG Zhidong, HUO Liping, et al. Simulation and fault analysis on electrical characteristics of the GJB289A bus network[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2022, 13(5): 179-186. (in Chinese)

## 0 引言

GJB289A 总线是第三代战机航空电子系统的“神经”和“骨架”，它实现了各类航空电子设备之间的物理连接，进而实现其信息融合和功能综合<sup>[1-2]</sup>。GJB289A 总线网络的可靠性直接影响整个航电系统的正常运行，如何对总线网络进行全面有效的检测是长期以来的一个重要课题<sup>[3]</sup>。

GJB289A 总线网络由总线连接组件和总线接口板组成，总线连接组件包括屏蔽双绞电缆、耦合器、终端电阻和连接器等。通常通过自检测和串件可发现和定位总线接口板的故障。由于制作工艺、使用维护和可靠性等原因，GJB289A 总线连接组件电气故障造成的问题日益突出。在外场环境下若不能快速、准确定位网络电气故障，将严重影响飞机再次出动的效率<sup>[4-7]</sup>。

根据信号完整性理论对总线网络进行电气特性仿真分析，可为检测设备的研制和优化提供技术支持。寻建晖<sup>[8]</sup>、昶旭曦<sup>[9]</sup>通过建立总线网络模型完成电气参数和误码率的分析，旨在为高速 GJB289A 总线规范的制定提供理论依据；G. L. Fehlhaber<sup>[10]</sup>系统研究了 1553B 总线组件的电气特性；MIL-HDBK-1553A 标准<sup>[11]</sup>中明确了 1553 总线的测试要点和通过准则；李文娟等<sup>[12]</sup>介绍了飞行器健康管理（IVHMS）技术在提高飞行器的安全性、降低飞行成本等方面的重要作用及其关键技术。从总线网络健康管理的需求看，应开展全寿命周期内总线网络的预防性检测工作，而目前均是在出现故障后才开展检测。此外，系统梳理 GJB289A 总线网络典型电气故障特征参数，开展电气故障诊断的研究也未见报道。

本文在分析典型总线网络拓扑结构和理论推导的基础上，根据总线网络分立元件（变压器、电阻、屏蔽双绞电缆）分布参数建立仿真模型，实现两端口典型网络下的 GJB289A 总线仿真，完成典型电气故障模拟，并结合实验室环境搭建的网络进行实测对比分析。通过仿真和实测对比验证的方式，分析 GJB289A 总线网络中总线连接组件出现典型电气故障时的特征波形和特征参数，以期为外场总线网络电气故障的快速诊断及 GJB289A 总线检查设备的优化设计提供参考依据。

## 1 GJB289A 总线典型网络理论分析

根据相关标准<sup>[13-14]</sup>，“某个支路的故障不影响整个系统”及耦合变压器特性，本文在仿真与实测时均采用典型的一发一收两端口总线网络。

典型两端口总线网络电气结构如图 1 所示，包含终端匹配电阻、故障隔离电阻、耦合变压器、收发端等基本组成要素。其中终端匹配电阻阻值为  $Z_0$ ，故障隔离电阻  $R=0.75Z_0$ 。

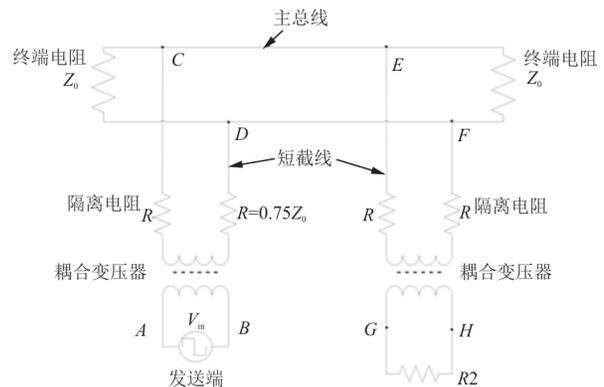


图 1 典型两端口总线网络结构示意图

Fig. 1 Structure diagram of typical two-port bus network

耦合变压器的绕组匝数比为 1:1.41。在子线端口的负载、线缆传输损耗以及网络上其他耦合器的影响可忽略不计的情况下，典型总线网络电气结构等效电路如图 2 所示。

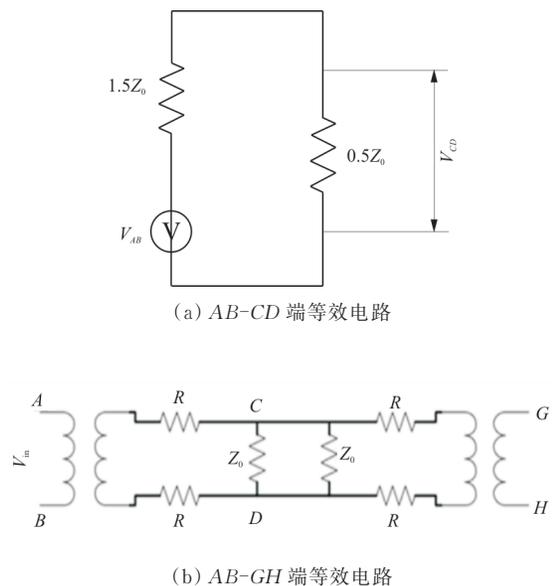


图 2 典型两端口总线网络等效电路

Fig. 2 Typical equivalent circuit of two-port bus network

图1中的G与H端的负载为高阻抗时,可根据电路推导公式(式(1)~式(2))计算得出 $V_{GH}$ 与 $V_{in}$ 的关系:

$$V_{CD}=V_{EF}=V_{in}/4 \quad (1)$$

$$V_{GH}=V_{EF}/\sqrt{2}=\sqrt{2}V_{in}/(4\sqrt{2})=V_{in}/4 \quad (2)$$

测量两组子线间的插入损耗(IL),通过分析插入损耗等相关电气性能参数,可实现总线网络物理层面性能测试和电气故障诊断。插入损耗计算公式为

$$IL=20\lg(V_{out}/V_{in}) \quad (3)$$

根据上述推导,可以计算典型总线网络两端端口间的插入损耗 $IL_{(理论)}=-12.04$  dB,该值是在不考虑线缆传输损耗等因素的理想状态下的标称值。

同理,当终端一端电阻开路时,经等效电路推导得到此时 $V_{GH}=2V_{in}/5$ , $V_{GH}$ 比总线网络正常通信情况下高 $0.15V_{in}$ ,这将导致接收端收到的电压比正常值高。可以计算得出该情况下插入损耗理论值 $IL_{(理论)}=-7.96$  dB,该值是在不考虑线缆传输损耗等因素的理想状态下的标称值。

以上给出典型总线网络正常情况与终端一端开路情况下的插入损耗理论推导,其他情况的推导原理相同,在此不作赘述。

## 2 GJB289A总线仿真模型搭建与验证

GJB289A总线网络的基本组件包括耦合器终端电阻和屏蔽双绞电缆。耦合器是耦合变压器的简称,是GJB289A总线网络的重要组件,实现主总线与短截线之间的信号传输,起到故障隔离的作用,其内部核心器件为变压器和隔离电阻。终端电阻用来实现阻抗匹配,防止信号反射。屏蔽双绞电缆作为传输媒介,根据所处位置,分为主总线电缆和短截线电缆。其中主总线用于连接耦合器,短截线用于连接耦合器和子系统。

根据文献[8],考虑电缆的分布参数效应,分布电阻、电感和电容等的影响,主总线电缆分布参数如表1所示。

表1 主总线电缆分布参数  
Table 1 Distribution parameters of main bus cable

参数	数值
奇模特性阻抗/ $\Omega$	55.02
偶模特性阻抗/ $\Omega$	75.23
奇模有效介电常数 $K_o$ (无量纲)	1.928
偶模有效介电常数 $K_e$ (无量纲)	2.068 8
奇模导体衰减 $A_o$ /(dB·m <sup>-1</sup> )	0.009 9
偶模导体衰减 $A_e$ /(dB·m <sup>-1</sup> )	0.012 6
损耗正切tanD(无量纲)	0.001 6

### 2.1 分布参数模型搭建

典型总线网络分布参数仿真示意图如图3所示,其中一个终端作为发送端Tx,另外一个终端作为接收方Rx。主电缆模型采用ADS(Advanced Design System)仿真环境下实例化库中的CLINP(有损耦合传输线)模型并根据表1中数据配置参数。发送端添加频率为1 MHz的脉冲波作为激励信号。在分布参数模型的各个位置添加测试点,如 $V_{in}$ 、A、B、C、D、E、F、 $V_{out}$ 等,便于后续导出用于波形完整性分析。

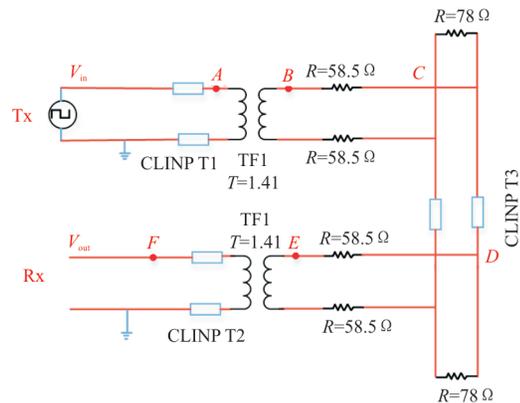
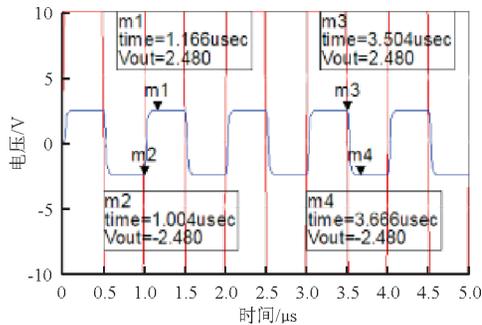


图3 典型总线网络分布参数仿真示意图  
Fig. 3 Simulation diagram of distribution parameters of typical bus network

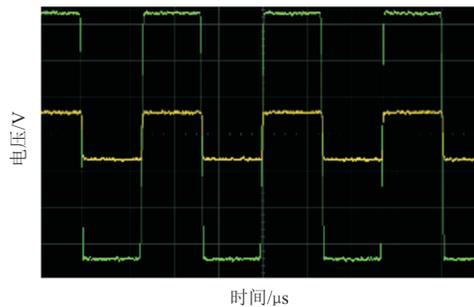
### 2.2 分布参数模型验证

将ADS环境下仿真结果与实际测量结果对比,以检验仿真模型的有效性。在确定仿真模型有效性的基础上,通过调整参数模拟典型故障来分析总线网络的电气特性。根据GJB289A协议的波形完整性要求,以发送/接收端口短截线的线与线间电压的峰—峰值 $V_{in}$ 和 $V_{out}$ 作为比较的对象。

仿真与实测发送端和接收端短截线上的特征波形和电压峰值如图 4 所示,参数对比如表 2 所示。



(a) 仿真波形



(b) 实测波形

图 4 典型两端口网络发送端和接收端电压波形

Fig. 4 Voltage waveforms at transmitter and receiver of typical two-port network

表 2 ADS 仿真与实测接收端特征参数对比  
Table 2 Comparison of characteristic parameters at receiver between ADS simulation and measurement

方法	峰-峰值/V	上升时间/ns	下降时间/ns
理论推导	5.000	0	0
ADS 仿真	5.034	162.0	162.0
实测	5.020	165.6	164.0

从图 4 和表 2 可以看出:仿真得到的波形与实测的波形吻合,表征波形特征的数据也很接近,说明该模型满足要求。

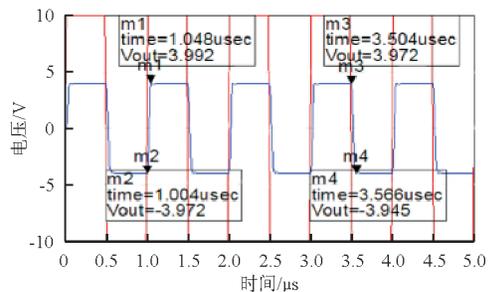
### 3 典型电气故障研究

依托两端口网络分布参数模型,在 ADS 软件中分别模拟终端电阻超差、耦合器故障和电缆故障,分析电气故障的特征波形和特征参数,以期为外场环境下根据 GJB289A 网络实测波形及特征参数快速判断故障类型提供依据。

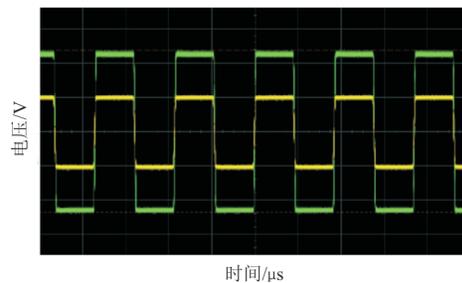
#### 3.1 终端电阻超差故障

终端电阻的阻值超差故障表现为总线电缆上的匹配电阻阻值异常。极端情况为一个未连接(开路或故障)、两个均未连接(开路或故障)或出现短路的情况。一个匹配电阻未连接(开路或故障)的情况可以等效为在总线上跨接了一个阻值为无穷大的电阻<sup>[15]</sup>,根据等效电路图(图 2)推导可知: $V_{out}=0.4V_{in}$ 。这将导致接收端接收到的电压比正常值偏高。

仿真与实测发送端和接收端短截线上的特征波形和电压峰值如图 5 所示,特征参数如表 3 所示。



(a) 仿真波形



(b) 实测波形

图 5 网络一侧开路故障时发送端和接收端电压波形

Fig. 5 Voltage waveforms at transmitter and receiver in case of open-circuit fault on one side of the network

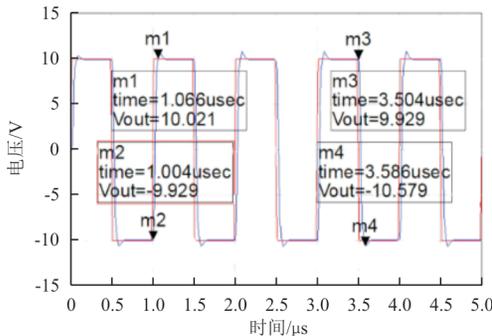
表 3 仿真和实测参数比较(网络一侧开路故障)  
Table 3 Comparison of simulated and measured parameters (open-circuit fault on one side of the network)

方法	上升时间/ns	下降时间/ns	过冲/%	下冲/%
仿真测试	44	42	1.02	2.13
实测测量	45.3	43.8	1.10	2.24

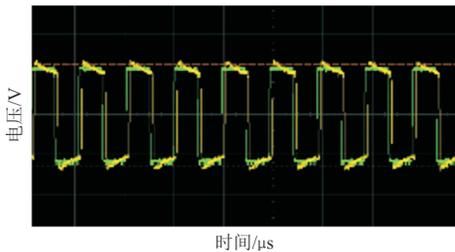
当两个匹配电阻均未连接(开路或故障)时,同理可知该情况可等效为收发两端的短截线直接

通过总线线缆连接在一起。因为接收端为高阻抗,此时隔离电阻  $R=0.75Z_0$ ,相对较小,耦合器输出的电压绝大部分被分压到总线上,主总线电缆上的电压几乎与  $V_{in}$  相等,此时接收端的接收电压  $V_{out} \approx V_{in}$ ,为正常情况下接收端电压的 4 倍。

仿真与实测发送端和接收端短截线上的特征波形和电压峰值如图 6 所示,参数比较如表 4 所示。



(a) 仿真波形



(b) 实测波形

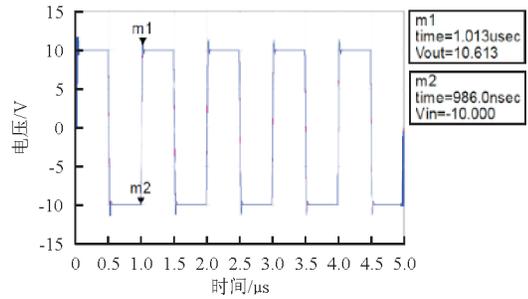
图 6 网络两侧开路故障时发送端和接收端电压波形  
Fig. 6 Voltage waveforms at transmitter and receiver in case of open-circuit fault on both sides of the network

表 4 仿真和实测参数比较(网络两侧开路故障)  
Table 4 Comparison of simulated and measured parameters (open-circuit fault on both sides of the network)

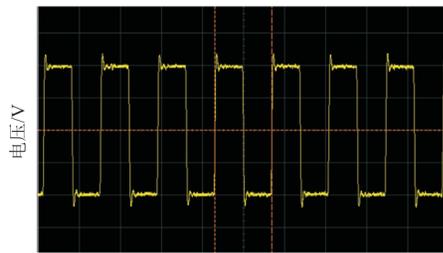
方法	上升时间/ns	下降时间/ns	过冲/%	下冲/%
仿真测试	62.0	62.0	11.92	6.32
实测测量	67.4	65.8	12.20	5.60

### 3.2 耦合器故障

当总线网络耦合器的收发端未连接或出现故障时,相当于短截线直接连接。由于信号的反射、振荡,在总线网络进行通信时,收发信号将产生过冲,仿真系统和实测得到的特征波形如图 7 所示。



(a) 仿真波形



(b) 实测波形

图 7 耦合器故障时发送端和接收端电压波形  
Fig. 7 Voltage waveforms at transmitter and receiver in case of coupler failure

### 3.3 电缆故障

总线网络的电缆故障通常是指总线或子线网络中相关的信号线高低端之间发生开路、短路、错接或信号线与屏蔽层之间发生的短路。其中开路故障类型包括接触不良、内阻增大等异常现象;短路故障类型包括因使用磨损等情况导致的电缆绝缘电阻降低、错接等异常现象。

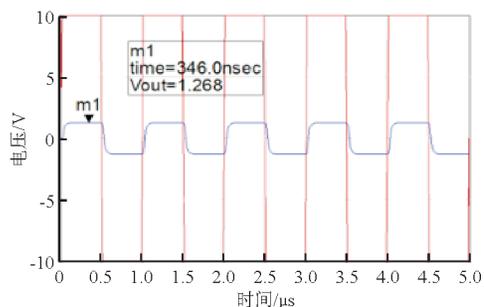
屏蔽双绞电缆是 GJB289A 总线网络物理组成的重要连接组件,占比最大,在外场环境下,电缆故障率高、故障查找困难。为研究电缆故障类型导致的接收端波形特征变化,进而实现典型电气故障的快速诊断,设计制作错接(信号线 Hi 与 Lo 接反)、短路(信号线 Hi 与屏蔽层短接、信号线 Lo 与屏蔽层短接)等故障模拟件,如图 8 所示。



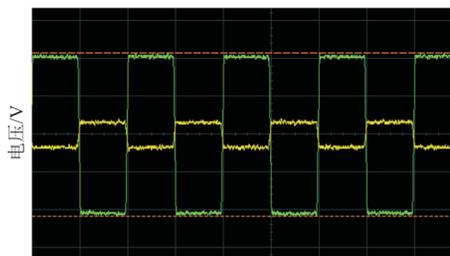
图 8 典型电气故障模拟件  
Fig. 8 Typical electrical fault simulator

在仿真软件中,通过调整分布参数进行上述故障情况模拟,并将以上故障模拟件串入到典型两端口总线网络,观察得波形如下。

(1) 模拟故障件信号线 Lo 与屏蔽层短路故障时,得到收发端波形如图 9 所示。



(a) 仿真波形

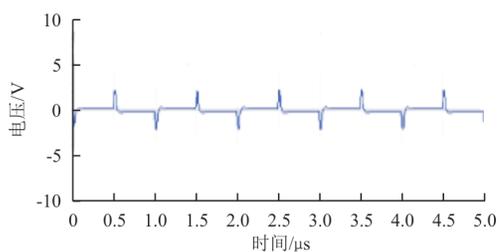


(b) 实测波形

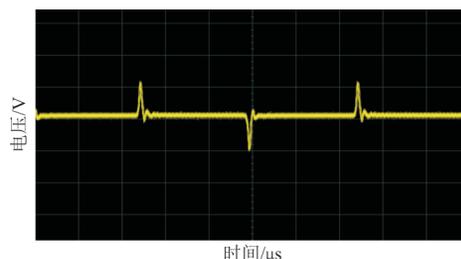
图 9 信号线 Lo 与屏蔽层短路时发送端和接收端电压波形  
Fig. 9 Voltage waveforms at transmitter and receiver in case of signal line Lo shorted with the shielding layer

根据差分信号传输的特点,其信号值是作用在双绞线两条导体上的电压差,作用在双绞线两导体上两个信号的振幅相等,相位相差  $180^\circ$ ,极性相反。从图 9 可以看出:当 Lo 与屏蔽层短路时,最明显的变化为接收端信号幅值变为正常情况下接收幅值的约  $1/2$ ,利用该特点可以进行故障区分。

(2) 模拟信号线 Hi 与屏蔽层短路故障时,得到收发端波形如图 10 所示,可以看出:此时接收端出现明显的 spike 尖峰脉冲信号。



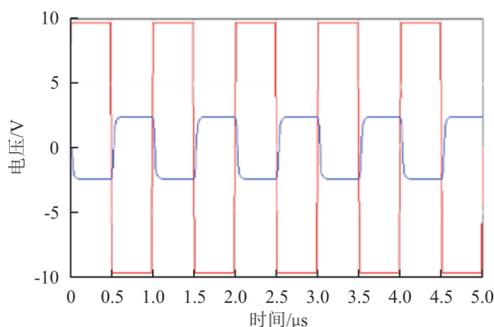
(a) 仿真波形



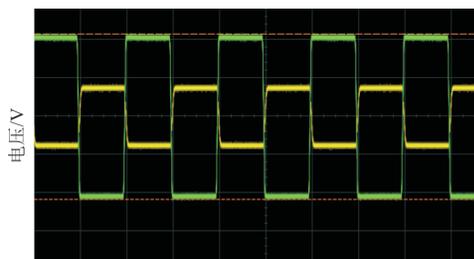
(b) 实测波形

图 10 信号线 Hi 与屏蔽短路时发送端和接收端电压波形  
Fig. 10 Voltage waveforms at transmitter and receiver in case of signal line Hi shorted with the shielding layer

(3) 模拟信号线 Lo 与 Hi 错接故障时,得到收发端波形如图 11 所示。



(a) 仿真波形



(b) 实测波形

图 11 信号线 Lo 与 Hi 错接时发送端和接收端电压波形  
Fig. 11 Voltage waveforms at transmitter and receiver in case of misconnection between signal line Lo and Hi fault

由于双绞线 Hi 与 Lo 定义的原因,当出现信号线高低端错接故障时,会导致接收端信号接收出现相位颠倒。

综合以上三类故障模拟情况分析可知:

(1) 信号线 Hi/Lo 与屏蔽层短路故障时,两者波形存在明显区别:信号线 Lo 与屏蔽层短路时,接收端可以接收到类似波形,但是接收波形的幅值约为正常情况下的  $1/2$ ;信号线 Hi 与屏蔽层短路

时,接收端收不到通信波形,但会出现尖峰现象,此时总线网络无法正常通信。

(2) 当信号线 Hi、Lo 错接时,接收端与发送端会出现反相现象。在现实中,此类问题常出现在对现役战机进行加改装时,对总线网络线缆拼接出现高低端错接。

(3) 主总线和短截线过长也可能引起错误,某些情况下可以使用,但不能保证可以正常工作;屏蔽双绞电缆的屏蔽性能、接地情况或其他标准

要求未达到时,实际工作时可能会出现间歇性通信错误。

## 4 典型电气故障特征分析

依托两端口网络分布参数模型对典型电气故障进行仿真,梳理典型电气故障的特征波形和参数,构建典型电气故障特征参数检查表,如表 5 所示。

表 5 典型电气故障特征参数检查表  
Table 5 Check list of characteristic parameters for typical electrical faults

故障类型	插入损耗/dB	稳定电压/V	上升时间/ns	下降时间/ns	有无过冲现象	备注
无故障情况	-12.04±0.5	2.480	162	162	无	波形干净
终端一端开路	-7.96±0.5	3.992	42	42	轻微	幅值增加
终端两端开路	-0.5±0.5	9.929	62	62	明显	幅值大幅增加
耦合器故障	0±0.5	10.000	27	26	明显	过冲尖锐
L0与屏蔽层短路	-17.94±0.5	1.268	163	162	无	—
Hi与屏蔽层短路	-13.98±0.5	0	—	—	尖峰	尖峰
Hi与Lo错接	-12.04±0.5	2.500	162	162	无	反相

表 5 可以作为两端口网络的典型电气故障的唯一性判断,为实际总线网络故障的检测技术升级与设备的改进提供一定参考。

需要注意的是:表 5 所示内容是基于典型的两端口盒式耦合器总线网络,未考虑实际线缆长度对特征波形和特征参数的影响。此外,实际机载总线网络采用的是线式耦合器,不具有可分割性。基于分布参数的仿真方法相对于实测方法更方便。当两个耦合变压器之间线缆长度或其他因素发生变化时,表 5 中的特征波形与参数均会发生一定变化,因此该方法在实际使用中需要考虑不同机载、车载或星载等平台的总线网络拓扑结构、物理尺寸与分布参数,以获得精确的波形和特征参数,实现网络状态健康管理和故障的精确定位判断。

## 5 结 论

(1) 根据 GJB289A 总线网络中变压器、终端电阻分布参数、有损耦合传输线模型,在 ADS 软件中构建了包含两个耦合变压器的两端口 GJB289A 总线网络模型,通过理论推导和实验室实测对比分析,验证了基于分布参数仿真模型的有效性。

(2) 利用 GJB289A 总线网络两端口分布参数

模型进行典型电气故障的仿真,并与实测结果对比,分析梳理典型电气故障类型的特征波形和参数,构建了故障判断检查表,可以实现两端口 GJB289A 总线网络典型电气故障的唯一性判断。

(3) 结合实装 GJB289A 总线网络拓扑结构、物理尺寸和分布参数,利用本文方法可仿真获取实装 GJB289A 总线网络测试端口精确波形和典型电气故障的特征参数,为总线检测设备的优化改进和总线网络状态健康管理提供数据支撑。

## 参考文献

- [1] 何锋. 机载网络技术基础[M]. 北京:国防工业出版社, 2018.  
HE Feng. Fundamentals of airborne network technology [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2018. (in Chinese)
- [2] 江志东, 霍立平, 张弟, 等. 基于 SoC 芯片的 1553B 总线仿真平台设计与实现[J]. 电子设计工程, 2020, 28(24): 152-157.  
JIANG Zhidong, HUO Liping, ZHANG Di, et al. Design and implementation of 1553B bus simulation platform based on SOC chip[J]. Electronic Design Engineering, 2020, 28(24): 152-157. (in Chinese)
- [3] 王研. 1553B 总线现场测试仪的研究及设计[D]. 西安:西安科技大学, 2013.  
WANG Yan. The research and design of field tester of

- 1553B bus [D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2013. (in Chinese)
- [4] 曾亮亮, 朱江雷, 吕欣. 机载系统测试性设计体系研究[J]. 航空工程进展, 2020, 11(4): 591-602.  
ZENG Liangliang, ZHU Jianglei, LYU Xin. Research on the testability design system of airborne system[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2020, 11(4): 591-602. (in Chinese)
- [5] 张创. 机上故障诊断系统研究与设计[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2020.  
ZHANG Chuang. Research and design of on-board fault diagnosis system [D]. Xi'an: Xidian University, 2020. (in Chinese)
- [6] 党小红. GJB289A 总线电缆故障分析与研究[J]. 航空维修与工程, 2017(2): 64-65.  
DANG Xianhong. Analysis and research on GJB289A bus cable fault[J]. Aviation Maintenance and Engineering, 2017(2): 64-65. (in Chinese)
- [7] 李绪忠, 李素琴. 舰载飞机电线电缆选用技术分析[J]. 航空工程进展, 2015, 6(4): 507-511.  
LI Xuzhong, LI Suqin. Technical analysis of wire and cable selection for shipborne aircraft[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2015, 6(4): 507-511. (in Chinese)
- [8] 寻建晖. 1553B 总线系统的建模与仿真[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2011.  
XUN Jianhui. Modeling and simulation of 1553B bus system [D]. Xi'an: Xidian University, 2011. (in Chinese)
- [9] 昝旭曦. 基于 ADS 的时分制指令/响应型 1553B 总线系统建模[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2011.  
CHANG Xuxi. Modeling of time division command/response 1553B bus system based on ADS [D]. Xi'an: Xidian University, 2011. (in Chinese)
- [10] FEHLHABER G L. Resistance integrated coupler between databus and terminal device having databus windings with high resistance wire with resistance being 1.5 times databus cable nominal characteristic impedance: US06314481B1 [P]. 2001-11-06.
- [11] America Department of Defense United. Multiplex applications handbook: MIL-HDBK-1553A [S]. USA: America Department of Defense United, 1988.
- [12] 李文娟, 马存宝, 贺尔铭. 综合飞行器健康管理系统的组成框架及关键技术研究[J]. 航空工程进展, 2011, 2(3): 330-334.  
LI Wenjuan, MA Cunbao, HE Erming. Research on the framework and key technologies of integrated aircraft health management system [J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2011, 2(3): 330-334. (in Chinese)
- [13] 国防科学技术工业委员会. 数字式时分制指令、响应型多路传输数据总线: GJB289A—1997[S]. 北京: 国防科学技术工业委员会, 1997.  
National Defense Science, Technology and Industry Commission. Digital time division command and response multiplex data bus: GJB289A—1997[S]. Beijing: National Defense Science, Technology and Industry Commission, 1997. (in Chinese)
- [14] 国防科学技术工业委员会. 数字式时分制指令响应型多路传输数据总线测试方法(第 5 部分)——系统测试方法: GJB 5186.5—2004[S]. 北京: 国防科学技术工业委员会, 2005.  
National Defense Science, Technology and Industry Commission. Test methods for digital time division command response multiplex data bus (Part 5)—system test methods: GJB 5186.5—2004[S]. Beijing: National Defense Science, Technology and Industry Commission, 2005. (in Chinese)
- [15] 贾艳梅, 张东伟, 李峰, 等. 1553B 总线特性分析及非标准连接的影响[J]. 载人航天, 2015, 21(1): 53-57.  
JIA Yanmei, ZHANG Dongwei, LI Feng, et al. Characteristic analysis of 1553B bus and the influence of non-standard connection [J]. Manned Spaceflight, 2015, 21(1): 53-57. (in Chinese)

#### 作者简介:

郑敬杭(1998—),男,学士,助理工程师。主要研究方向:航空电子装备保障、机载总线网络技术。

江志东(1985—),男,博士,讲师。主要研究方向:航空电子装备保障、航空电子综合化技术、机载总线网络技术。

霍立平(1981—),男,硕士,讲师。主要研究方向:航空电子装备保障、航空电子综合化技术。

张弟(1989—),女,硕士,讲师。主要研究方向:机载总线网络技术。

(编辑:马文静)