

一种 ARINC659 总线通信故障检测方法

花文波¹ 袁莓婷¹ 何燕春¹ 花文涛²
HUA Wenbo YUAN Meiting HE Yanchun HUA Wentao

摘要

针对数据处理单元在系统联试过程中 ARINC659 总线偶发通信故障问题,基于系统硬件结构和工作原理,文章对软硬件故障因素及收发器信号质量进行了深入分析。通过测量发现,信号在传输过程中因多过孔导致的反射和寄生效应是影响信号质量的主要原因,总线寄生参数过大会引发信号畸变,进而造成通信故障。为此,提出了一种检测方法,重点分析了总线端接影响和信道寄生参数对信号传输的影响,并通过建立仿真模型,对 BTL 驱动端电容变化参数进行仿真验证。仿真结果表明,信道寄生参数过大会显著影响信号完整性,导致 ARINC659 总线通信故障。针对这一问题,提出了优化底板总线隔离设计及控制总线 AO 端传输时间参数的解决方案。仿真验证结果表明,该方法能够有效降低信号反射和寄生效应,避免系统级通信故障的发生,为解决类似问题提供了理论依据和实践参考。

关键词

ARINC659 总线;故障检测;飞控计算机;数据处理;信号反射

doi: 10.3969/j.issn.1672-9528.2025.08.018

0 引言

数据处理单元是飞控计算机飞行控制系统的核心,主要完成自动飞行控制任务的计算调度及总线接口管理,在复杂高低温条件下,当受到异常电磁干扰、硬件结构损伤、测试不完善、功能电路缺陷等影响时,可能出现无法预知的错误,从而导致系统故障^[1-2],因此要求系统具备一定的容错能力,通常采用余度技术来实现。

ARINC659 总线是基于时间触发架构的双-双余度配置的容错总线,是航空电子系统的重要组成部分,在飞控系统中应用广泛,其稳定性和可靠性直接关系到整个系统的安全运行。由于航空环境的复杂性及多样性,总线系统可能面临各种潜在的故障风险^[3-4],因此,研究和开发有效的故障检测方法对于保障航空电子系统的正常运行具有重要意义。

本文首先对飞控系统中 ARINC659 总线基本工作原理进行概述,针对系统地面联试过程中出现的通信故障进行分析,在此基础上,提出了一种基于时间同步的故障检测方法,通过设计改进及测试、仿真,验证了该方法的有效性和实用性。

1 系统组成及工作原理

1.1 系统组成

数据处理单元以 CPU 处理单元为核心,外围配置 FPGA 电路、通道故障逻辑及离散量处理电路、MBI 功能电路和

ARINC659 总线处理单元电路,其系统组成如图 1 所示。CPU 处理单元预留程序现在和调试用的 RS232 串口和以太网接口,MBI 功能电路采用智能控制,具有自检测能力,并带有发送使能控制端,FPGA 功能电路对外提供 HB6096 总线接口及与其他模块互联接口,以满足发送/接收过程中的通道输出保护、短时短路发送器不损坏、智能控制、故障逻辑数据处理等需求,ARINC659 总线处理单元负责与其他模块进行总线连接。

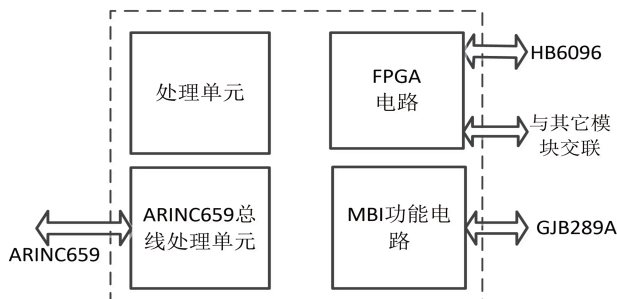


图 1 系统组成框图

1.2 ARINC659 总线工作原理

ARINC659 总线是多节点多路串行通信总线,具有高数据完整性和较强的总线容错能力。数据处理单元通过 ARINC659 总线与其他背板模块进行数据通信^[5-6]。每个接口包含 2 个 ARINC659 总线协议芯片,分别为 BIU_x 和 BIU_y,BIU_x 经由 x 总线发送,BIU_y 经由 y 总线发送,共包含 4 路总线,即 A_x 总线、B_x 总线、A_y 总线和 B_y 总线。每个协议芯片接收所有 4 路总线数据,每路总线都有独立的总线收发器。ARINC659 总线通信原理如图 2 所示。

1. 中国航空工业集团公司西安航空计算技术研究所
陕西西安 710000
2. 中国空空导弹研究院 河南洛阳 471009
[基金项目] 航空科学基金(20200025031001)

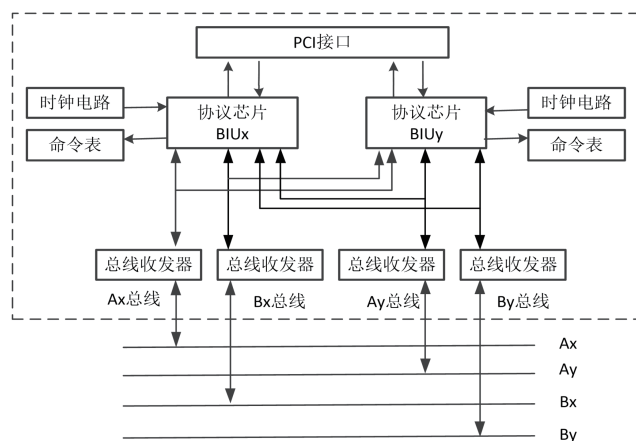


图2 ARINC659 总线结构

ARINC659 总线协议芯片主要用于实现数据处理单元同背板总线的连接接口，包括总线命令表及参数存储、收发数据暂存、ARINC659 协议处理、背板总线接口等，采用表驱动均衡访问通信、支持半双工传输和交叉校验通信^[7]。总线传输最大数据传输速率为 60 Mbit/s，传输效率达到 98%^[8-9]。

从 ARINC659 总线电路原理分析，CBU 模块上电后，ARINC659 协议芯片会自动加载存储在 PROM 中的命令表，按照命令表要求完成同步，然后开始进行通信^[10-11]。当 ARINC659 协议芯片接收数据时，如接收的数据经过数据比对存在错误，则总线状态寄存器显示该条总线故障。当发送数据时，发送的数据同时又被该芯片接收，如果接收的数据经过数据比对存在错误，则总线状态寄存器显示该条总线故障。ARINC659 协议芯片的数据校验机制完全采用 ARINC-659—1993 标准中所规定的编码规则进行解码，并根据“数据有效性表”进行数据的选择。

2 系统测量及分析

2.1 问题描述

数据处理单元在系统联试过程中，偶发出现加电工作过程中，B 端口 ARINC659 通信故障，报 Bx 计数 8 102，该故障在整机地面验证测试时不复现，在系统联试过程中才会偶发复现，且故障产品数据较多，定位难度大，需要快速准查明原因。

2.2 故障测量

因 ARINC659 总线故障是在系统联试常温下故障，从图 2 的总线结构上分析，相关影响因素主要分为硬件故障和软件故障，硬件故障又包括 659 总线协议芯片晶振故障、芯片故障、其供电电路故障、659 总线收发器焊接问题、收发器供电故障、收发器芯片失效、收发器信号质量。

659 系统软件在该项目中使用多年，属于成熟应用，技术状态经查为现行有效版本，软件的烧写、归档和验证测试均正确，软件故障可排除。

在 659 总线通信报故时，示波器分别测量 659 协议芯片的晶振输出波形、Bx 总线时钟线 and 数据线输出波形，以及协议芯片的供电电压 3.3 V 和 1.8 V，测量均正确，可排除 659 总线协议芯片故障。

对 659 总线收发器焊接质量光学检查，未见脱焊、漏焊、搭锡、桥连等问题，对其外部供电进行测量，收发器 3.3 V 供电电压正常，将收发器芯片在工装板上交叉验证，其功能正常，排除 659 总线收发器芯片自身故障。

在 ARINC659 总线 Bx 通信故障时，测量 659 总线收发器的信号输出管脚，发现 BTL 收发器输出端出现剧烈的振荡，波形严重畸变，最终导致回环的数据出错。

2.3 收发器信号质量测量

根据 659 总线收发器详细规范中 Bi_N to AOi 交流电参数特性，在 -55~125 °C 各指标参数的合格范围内，经过对故障产品进行分析并验证不同参数指标，得到 tTLH_AO 参数对用户故障比较敏感，且 tTLH_AO 参数在 1~7 ns 之间均为合格，迭代验证 tTLH_AO 指标在 -55 °C 条件下，小于 3.1 ns 时，均无故障出现，高于 3.1 ns 指标会偶发故障。

根据 ARINC659 总线容错机制可知，当出现 1 条总线故障或 2 条可纠正错误时，659 总线会纠正总线错误，且不会影响通信，只有当出现不可纠正错误时，可导致通信异常；根据故障现象可知，系统通信正常，处理器检测信息显示只有 Bx 一条总线数据偶发存在异常，通过以下方案测试：

(1) 659 总线收发器芯片故障：通过将故障模块的对应位置芯片更换至其他通道，均功能正常，排除芯片故障；

(2) 换模块位置，Bx 总线仍可能出现异常，排除个别模块自身故障；

(3) 当系统 5 个模块同时工作时，可能出现 Bx 总线异常现象，当拔掉任何一个节点时，Bx 均能恢复正常，不排除底板总线影响；

(4) 通过对底板总线端接及布局进行检查满足要求，按每条总线地平面隔离要求，检查 PCB 走线总线信号穿多层多孔走线，可影响总线信号质量，信号通过多过孔会产生较大反射和寄生，从而影响总线信号；多模块同时加入，总线的寄生进一步加大，影响总线信号传输质量，会出现信号异常；当减少模块数量时，寄生降低，对总线信号影响减少，总线恢复正常。

3 仿真验证及措施

3.1 仿真验证

ARINC659 总线 BTL 波形畸变包含总线端接影响和信道寄生参数影响两个方面。

3.1.1 总线端接影响

总线端接影响包括端接电压影响和端接电阻影响。

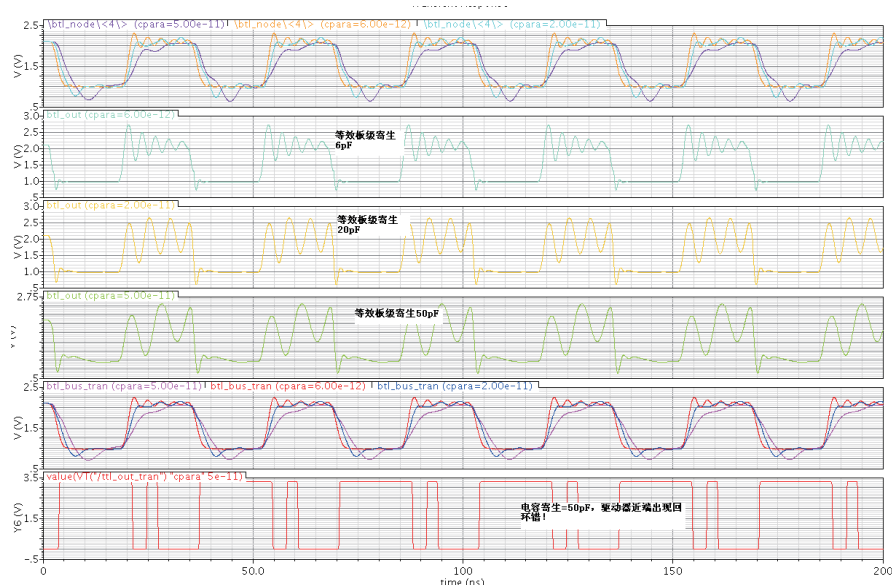


图4 BTL驱动端电容变化模拟分析

在寄生电容达到 50 pF 时, BTL 收发器输出端出现剧烈的振荡, 波形严重畸变, 最终导致回环的数据出错。PCB 的走线长度越长, 寄生的参数越大, PCB 走线寄生主要以寄生电容 C 为主, 并有串联的电感 L 和电阻 R 集成。

从上述仿真结果分析可知, 当 ARINC659 总线信号信道长度过长, 寄生电容过大, BTL 收发器输出端会出现剧烈的振荡, 波形显著变差。通过检查母板走线发现 Bx 总线在母板上对应的信号线较长, 说明“信道寄生参数过大”已经严重影响总线波形, 是导致通信故障的一个根本原因, 因此本次故障是由于“信道寄生参数影响”引起“ARINC659 总线 BTL 信号畸变”, 最终导致故障发生。

3.2 解决措施

底板总线隔离设计应当满足为每条总线设计地平面, 在尽可能范围内, 地平面承载仅与此总线有关的电流, 即仅通过此总线的收发器和端接器的电流。如果其他总线与此总线 (A_x, A_y, B_x, B_y) 具有相同的故障封锁区, 共享同一个地平面。在一个故障封锁区内的所有总线, 包括其收发器和端接器, 必须有确切的相同电源。所有导致地平面内的返回电流的信号线走线, 必须在保持总线阻抗的同时, 与地平面尽可能地接近。

每个收发器的带隙参考引脚必须经一个独立的通道和除此之外没有其他连接的连接器引脚连接到其所对应的总线地平面。返回地的信号和带隙线都必须以可能的最低阻抗通道从收发器连接到其总线的地平面。

因此, 考虑到设备总线固定问题, 通过验证不同参数指标可知, t_{TLH_AO} 参数对设备 Bx 总线故障比较敏感, 且 t_{TLH_AO} 参数在 1~7 ns 之间均为合格, 当 t_{TLH_AO} 参数小于 3.1 ns 指标时, 故障均未再发生。

4 结语

数据处理单元在系统联试过程中, 加电工作偶发出现的 B 端口 ARINC659 通信故障, 主要原因是多模块产品测试时, 659 总线通信质量发生畸变, 通过对 ARINC659 总线 BTL 波形畸变进行机理分析及仿真验证, 确定总线走线过长会造成“信道寄生参数过大”, 从而严重影响总线波形, 控制总线 AO 端的传输时间参数, 将其控制在 1~3.1 ns 范围内, 解决了实际工程应用中的现实问题, 有效提高了产品质量。

参考文献:

- [1] 唐怀奎, 李珊珊. ARINC659 总线测试系统设计 [J]. 河南科技, 2021, 40(25): 16-20.
- [2] 赵磊, 孙芳. ARINC659 总线故障注入测试方法研究 [J]. 测控技术, 2022, 41(4): 56-61.
- [3] 邓泽勇, 曹东, 邵海龙. ARINC659 总线多余度飞控计算机故障检测策略研究 [J]. 计算机工程与科学, 2022, 44(8): 1349-1356.
- [4] 刘洋, 吴昊. ARINC659 与 AFDX 总线的协同通信研究 [J]. 航空电子技术, 2022, 53(1): 12-17.
- [5] 陈亚明, 颜云. 故障诊断方法现状及发展方向研究 [J]. 电工技术, 2018(18): 112-114.
- [6] 潘计辉, 张盛兵, 张小林. 飞行控制系统故障诊断与重构技术研究 [J]. 计算机测量与控制, 2015, 23(4): 1073-1074.
- [7] 张晓敏, 刘炜. ARINC659 背板总线的电气特性研究与设计改进 [J]. 计算机测量与控制, 2014, 22(10): 3330-3332.
- [8] 田泽, 刘宁宁, 郭亮, 等. ARINC659 底板数据总线及关键技术 [J]. 计算机应用, 2013, 33(S2): 49-53.
- [9] 黄伟, 张琳. ARINC659 总线在航天器控制系统中的可靠性评估 [J]. 航天控制, 2021, 39(6): 45-50.
- [10] 胡延国, 范彦铭, 齐一帆, 等. ARINC659 背板总线在余度计算机中的应用 [J]. 测控技术, 2023, 42(9): 98-104.
- [11] 刘智武, 于峰, 陈长胜. 时间触发通信总线安全性技术研究 [J]. 航空计算技术, 2020, 50(3): 72-76.

【作者简介】

花文波 (1986—), 男, 陕西西安人, 硕士研究生, 高级工程师, 研究方向: 计算机维修保障技术。

(收稿日期: 2025-02-19 修回日期: 2025-07-19)