

# 基于典型缺陷的 1553B 总线 RT 软件 测试技术研究

代晓倩, 高赛军

(上海航天计算机技术研究所, 上海 201109)

**摘要:** 针对 1553B 总线 RT 软件的设计特征与典型缺陷问题, 结合军用软件高可靠性需求, 系统研究了动态与静态测试技术的综合应用方法; 通过功能测试、接口测试、性能测试、安全性测试、强度测试及可恢复性测试等多维度动态测试, 结合静态代码审查与中断机制分析, 构建了覆盖软件全生命周期的测试框架; 研究提出针对消息处理机制、中断及容错恢复等关键问题的测试策略, 并设计专用审查单以强化缺陷预防能力; 经实际工程应用验证, 该方法显著提升了测试充分性与效率, 有效缩短测试周期, 解决了传统测试中存在的覆盖不足与定位困难问题; 研究成果为 1553B 总线 RT 软件的可靠性保障提供了系统性技术支撑, 同时为航天嵌入式系统的软件测试实践提供了指导和参考。

**关键词:** 1553B 总线; RT 软件; 软件测试; 典型故障; 静态测试; 动态测试

## Study on RT Software Testing Method for 1553B Bus Based on Typical Defects

DAI Xiaoqian, GAO Saijun

(Shanghai Aerospace Computer and Technology Institute, Shanghai 201109, China)

**Abstract:** Aimed at the design characteristics and typical defects of Remote Terminal (RT) software on 1553B bus, and in combination with high reliability requirements for military software, a comprehensive application method for dynamic and static testing technologies is systematically studied. Through multi-dimensional dynamic tests such as functional test, interface test, performance test, security test, strength test, and recoverability test. Combined with static code review and interrupt mechanism analysis, a test framework including entire software life cycle is constructed. This paper proposes test strategies for key issues such as message processing mechanism, interrupt and fault tolerance recovery, and designs special review sheets to enhance the ability to prevent defects. Through actual engineering verification, the method significantly improves the sufficiency and efficiency of testing, effectively shortens testing cycle, and solves insufficient coverage and difficult positioning in traditional testing. The research results provides a systematic technical support for reliability assurance of RT software on 1553B bus, and also offers a guidance and reference for software testing practice in aerospace embedded systems.

**Keywords:** 1553B bus; RT software; software testing; typical faults; static testing; dynamic testing

## 0 引言

MIL-STD-1553B (简称 1553B) 总线是一种时分制指令/响应式多路传输数据总线<sup>[1]</sup>, 具有高可靠性、抗干扰能力强、开放性好等特点, 已被广泛应用于航天、航空等领域。然而一些 1553B 总线软件缺陷仍时有发生, 且问题定位困难, 直接影响着航天嵌入式软件系统的可靠性。

软件测试作为保证软件质量的重要手段, 其重要性不言而喻。目前, 1553B 总线软件测试技术的研究主要集中在自动测试平台的开发与应用<sup>[2-12]</sup>。这些研究在提高测试效率方面取得了一定的成果, 例如开发了多种自动测试平台, 能够快速执行测试用例, 减少人工干预, 提高测试的重复性和一致性。然而, 这些研究在测试的充分性和有效性方面仍存在不足。具体来说, 现有研究多局限于基于 1553B 总线协议的物理层与链路层

收稿日期:2025-02-06; 修回日期:2025-03-03。

作者简介:代晓倩(1983-),女,硕士,高级工程师。

引用格式:代晓倩,高赛军.基于典型缺陷的 1553B 总线 RT 软件测试技术研究[J].计算机测量与控制,2025,33(5):19-28.

测试,对功能、性能及强度等方面的测试研究相对薄弱。这种局限性导致测试覆盖不足,难以全面评估软件的性能和可靠性。此外,现有研究难以帮助第三方测试人员有效整合传统测试类型开展全面测试。由于缺乏系统性的测试框架和方法,第三方测试人员在面对复杂的 1553B 总线软件时,往往难以全面覆盖所有测试场景,导致缺陷定位困难,测试效率低下。

针对上述问题,本文结合航天领域 RT 软件开发及测试的工程实践,提出一种融合动态测试与静态审查的多维测试框架。通过功能、接口、性能等六类动态测试场景的协同设计,结合中断机制分析与代码审查技术,构建覆盖全生命周期的测试验证体系。为复杂嵌入式环境下 RT 软件的可靠性保障提供了系统性解决方案。

### 1 1553B 总线 RT 软件设计及分析

1553B 总线包括 3 种终端<sup>[13]</sup>:总线控制器(BC)、总线监控器(BM)和远程终端(RT)。作为主从式总线,通信由 BC 发起,RT 负责响应,RT 无法主动发起通信。

受限于下位机 RT 设备的处理能力,通常 BC 软件需要严格控制与各下位机 RT 软件通信的周期及消息间隔,避免因消息响应或处理不及时导致通信异常。远程终端 RT 系统设计时,处理 1553B 总线消息数据的方式主要有 3 种:查询方式、中断读命令字寄存器方式和中断遍历消息堆栈的方式。

这 3 种方式的选择主要取决于 BC 发送消息的间隔和系统实时性处理要求。当消息处理实时性要求不高且消息间隔远大于 RT 软件的最大主流程处理时间时,可优先选择设计相对简单的查询方式,例如一些对实时性要求不是极高的卫星地面测试系统对非关键数据采集的场景。当系统实时性处理要求较高,但相邻消息间隔远大于软件响应 1553B 总线中断时间时,可优先选择中断读命令字寄存器方式,该方法能快速响应总线上的消息,例如飞机的自动驾驶系统中飞行控制软件需要实时获取通过 1553B 总线传输的各种传感器信息的场景。若系统数据量大、消息类型多样、实时性和可靠性要求都较高,例如大型舰艇作战系统有众多的设备通过 1553B 总线进行通信,且多个设备同时有消息需要处理的场景,则应优先选择中断遍历消息堆栈方式,但该方法需要较大的内存空间来存储消息堆栈,对硬件资源要求较高。消息堆栈管理复杂,可能出现堆栈溢出等问题。

#### 1.1 查询方式简介

查询方式是软件在每个主循环过程中判断中断寄存器相关位是否置位,而后再对消息命令字寄存器中的消息命令字进行读取并处理。具体流程如图 1 所示。

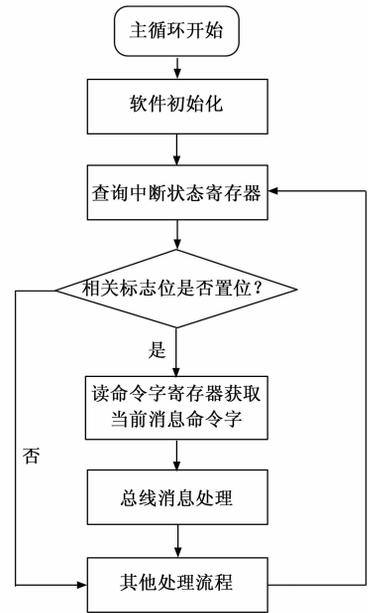


图 1 查询方式处理流程

查询方式下,若当前消息处理过程中,收到新的总线消息,需在下一个主循环才能处理。当消息间隔时间小于主循环的最大处理时间时,存在消息被覆盖的风险。

#### 1.2 中断读命令字寄存器方式简介

该方式使用中断服务子程序获取消息命令字,并置位相应的消息处理标志字,主循环判别到相关的消息处理标志字后,进行相应的数据处理。具体流程如图 2 所示<sup>[14]</sup>。

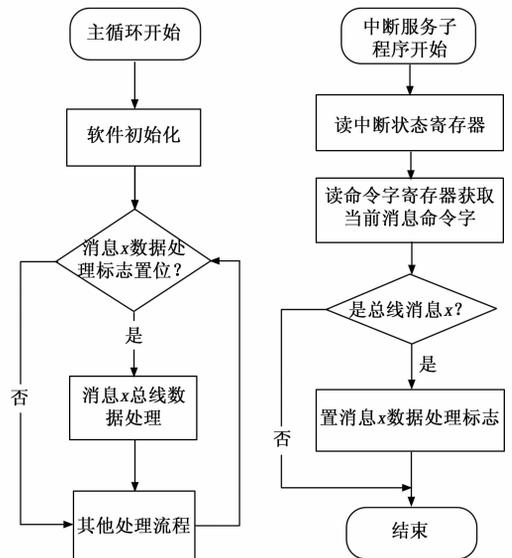


图 2 中断读命令字寄存器方式处理流程

中断读命令字寄存器处理方式响应速度快、资源消耗低。但当相邻消息间隔大于软件响应 1553B 总线中断

时间时,存在丢消息的风险。

### 1.3 中断遍历消息堆栈方式简介

该方式是对中断读命令字寄存器处理方式的一种改进,通过遍历消息堆栈,避免因消息间隔过短,导致的丢消息的风险。但该方法实现复杂,资源消耗较大,容易产生其他应用问题。具体流程如图3所示<sup>[8]</sup>。

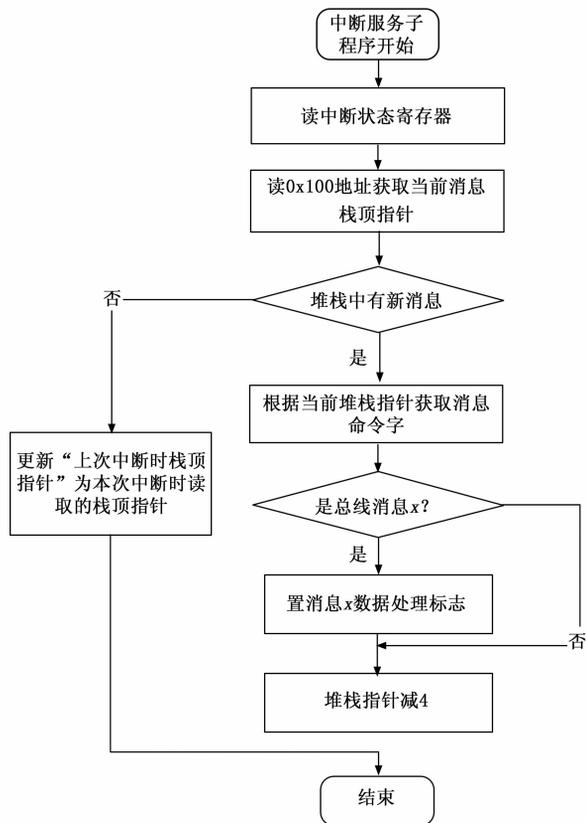


图3 中断遍历消息堆栈方式处理流程

## 2 1553B 总线 RT 软件典型缺陷及分析

在工程实践所涉及的 45 个 1553B 总线 RT 软件测试项目里,对其中的典型缺陷展开了深入数据分析。结果显示:在 15 个项目当中存在中断类缺陷,其占比接近 33%;另有 9 个项目出现恢复性处理措施不到位的问题,占比达 20%;还有 6 个项目暴露出广播指令解析错误这一类缺陷,占比约 13%。这些缺陷直接致使指令响应异常、软件恢复运行后功能异常以及数据传输异常等严峻问题,给系统功能的正确性带来极大威胁。除此之外,像消息处理机制设计存在缺陷、1553B 总线 RT 端写入数据有时差问题等其他类型的缺陷,尽管它们的发生率相对较低,然而一旦出现,修复成本颇高。因为此类问题不仅需要投入大量人力、物力去排查根源,还可能涉及复杂的代码重构或系统调试流程。所以即便其发生频次不高,同样会给项目造成较大损失,绝不可轻视。

本文立足于航天嵌入式软件工程实践,精心挑选出具有代表性的 1553B 总线 RT 软件缺陷案例,分别从问题所呈现出现象,以及缺陷背后的内在机理这两个关键维度,展开全面且系统的剖析。同时,通过构建缺陷模式与测试场景之间的映射关联,力求为动态测试以及静态测试技术的优化研究,提供扎实可靠的数据支撑,助力相关技术迭代升级,保障工程实践的高质量推进。

### 2.1 消息处理机制不合理导致指令接收异常

#### 1) 现象描述:

BC 端向 RT 端发出有效的总线 B 指令(摄像机切换高速指令)后,RT 端未正常响应,导致摄像机未正常切换高速。

#### 2) 机理分析:

RT 软件消息处理机制为中断读命令字寄存器方式。先对 RT 软件响应总线消息路径进行分析,得到最短路径为  $50 \mu\text{s}$ ,最长路径为  $80 \mu\text{s}$ 。再对总线上传输的指令进行分析,BC 端向 RT 端发出有效的总线 B 指令后,在  $50 \sim 80 \mu\text{s}$  内又发出另一条总线指令,则 RT 软件在读取最近命令字时,会将最新的一条总线指令命令字读出,导致上一条有效的总线 B 指令未正常接收,从而引发了现象描述中的问题。

可见摸清总线上传输指令最小间隔,开展 RT 软件消息处理机制分析,保证系统无设计缺陷尤为重要。

### 2.2 错误的解析广播指令为总线 B 指令

#### 1) 现象描述:

RT 终端地址为 10,RT 子地址 1 用于接收 BC 端发送的总线 B 指令,RT 广播子地址 3 用于接收时间广播数据(RT 不接收其他广播数据)。在动态测试过程中发现,当 BC 端给出其他 RT 终端的广播消息,如(RT 地址为 31,子地址为 1 的广播消息),此时软件应丢弃此广播消息,但软件却错误将此消息接收,并解析为 B 指令执行相应功能。

#### 2) 机理分析:

1553 总线有一张查找表,这张表中为每个子地址的接收、发送、广播、子地址控制字均提供了 1 个地址单元的分配,如图 4 所示。

RT 软件初始化配置时,设置广播子地址与其他指令接收子地址采用非分离模式,B 指令接收子地址 1,数据存放首地址为:  $0 \times 141$ ;时间广播数据子地址 3,数据存放首地址为:  $0 \times 143$ 。该软件在读取堆栈消息的接收命令字时,仅对 RT 子地址 1 或 3 进行了判断,未对 RT 地址 10 或广播消息 RT 地址 31 判断。导致错误的将给其他终端的广播消息,解析为功能子地址消息处理。

AREA A	AREA B	DESCRIPTION	COMMENT
0140	01C0	Rx (/Bcst)SA0	Receive (/Broadcast)
⋮	⋮	⋮	Lookup
015F	01DF	Rx (/Bcst)SA31	Pointer Table
0160	01E0	Tx SA0	Transmit Lookup
⋮	⋮	⋮	Pointer Table
017F	01FF	Tx SA31	
0180	0200	Bcst SA0	Broadcast Lookup
⋮	⋮	⋮	Pointer Table
019F	021F	Bcst SA31	(Optional)
01A0	0220	SACW SA0	Subaddress Control
⋮	⋮	⋮	Word Table (Optional)
01BF	023F	SACW SA31	

图 4 地址单元的分配图

可见广播子地址应设置为与接收子地址分离的方式，并且在 1553B 总线中断接收命令字判断时应增加 RT 地址的判读。作为测试人员，1553B 总线广播消息接收处理应引起足够的重视，应严格按照总线协议测试正常广播消息、RT 地址异常（不为 31）广播消息、子地址异常（子地址为其他接收指令子地址）广播消息的情况进行充分测试。

### 2.3 中断服务程序中使用信号量引发通信问题

#### 1) 现象描述:

BC 端向 RT 端进行 5 ms 周期的 RT->BC 方向数据通信时，发现 RT 发送的数据一直为不变化的固定值，数据更新异常。

#### 2) 机理分析:

软件运行在奔腾处理器下 VxWorks 操作系统中，采用多任务，实时处理方式进行程序设计。对程序结构分解如图 5~7 所示。

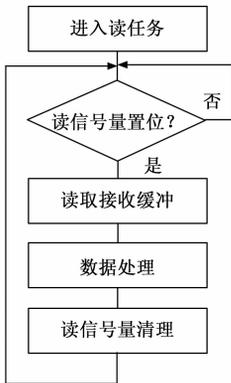


图 5 读任务流程图

从读写任务和中断的单独处理过程看，似乎没有任何问题，但是将三者放在时间轴上观察，便可发现问题。

图 8 中竖向箭头代表中断来临，由于接收中断对应接收任务处理机制与发送中断对应发送任务处理机制相同，此处仅以发送中断和发送任务处理为例进行分析。

在  $t_1$  时间段内，1 时刻来了中断，2 时刻进行中断

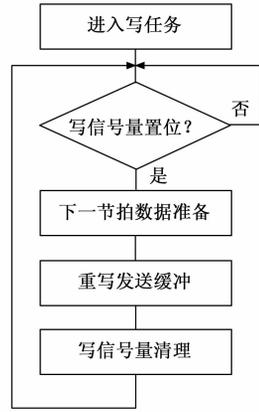


图 6 写任务流程图

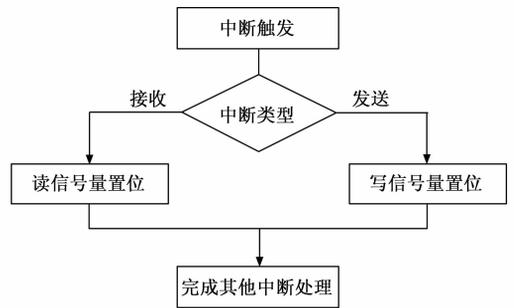


图 7 中断处理流程图

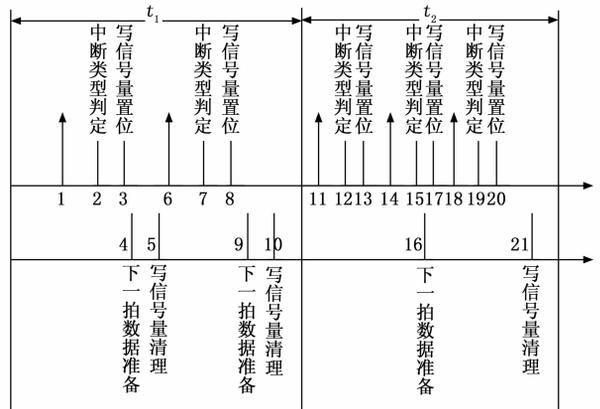


图 8 写任务与中断在时间轴上的关系

判定，发现为 1553B 发送中断，3 时刻对写信号量进行置位。4 时刻写任务运行到判定信号量处，即刻进入循环，此时本节拍数据已被 BC 取走。4 时刻开始准备下一节拍数据，准备完毕后大约在 5 时刻再将写信号量清理，表示写任务在周期内处理完毕。之后 6 时刻再来一个发送中断，如此正常运行，程序没有任何问题。

然而，如果遇到  $t_2$  时间段这种状况，程序运行便会出问题。11 时刻中断来临，还没等到下一节拍数据准备好，也没等到信号量重新清理的 21 时刻结束，在

之前 14 和 18 时刻又出现新的中断。如此信号量被两次置位, 根据 VxWorks 实时操作系统任务调度机制, 写任务便被操作系统以出错方式进行永久挂起。RT 将永远无法准备下一节拍数据, 如此便出现 1553B 的 BC 收到 RT 缓冲区数据一直为不变化的固定值。显然, 5 ms 一个周期的发送和接收中断, 一旦使得某一个周期的发送或接收任务出现了永久性挂起, 自此 1553B 通信将不能正常工作。

本故障的本质在于中断和信号量不能同步。中断来临具有随机性, 而且中断服务程序在操作系统处理中具有高于任何任务处理的优先级, 在中断中进行信号量置位, 显然是不合适的。任务没处理完便出现中断, 会使处理一半的任务出现时序错乱。

### 2.4 1553B 应用问题分析

#### 1) 现象描述:

某软件应用 1553B 总线与上位机进行通讯, 在进行系统测试时发现, 子地址 29 的一条勤务指令未响应, 造成子地址 3 的数据错位, 上位机收到错误数据。

#### 2) 机理分析:

发生问题时的针对该 RT 总线消息工况如下: SA3, SA3, SA3, SA7, SA3, SA29。

1553B 总线中断处理程序的流程图如图 9 所示。

如果软件在处理 SA7 中断时, 已经完成了 SA7 的处理后, 进入图中 B 点, 此时无总线中断请求, 程序运行至 C 点时, 恰巧产生了 SA29 中断请求, 该中断请求标志将被 D 框清除, 退出中断程序后, 虽然 SA29 事件仍保留在 65170 的堆栈中, 但由于 65170 无中断请求输出, SA29 事件将在后一个其它中断产生请求信号时才能被一起响应。

可见中断服务程序中应第一时间清除本次中断标志位, 延迟清除中断标志位将增加误清除下一次中断请求标识的可能。

造成本次问题的另一处原因在于: 1553B 总线接收到消息后将 Command Word、Data Block Pointer、Time Tag Word、Block Status Word 四个数据字压入总线堆栈, 软件是通过在中断服务程序中查询上述 4 个数据中的内容获取子地址、数据长度、消息状态等内容。进入中断表示当前消息结束, 所以可知消息结束标志是有效的, 消息得到处理, 当处理完本帧后, 程序又查询堆栈是否有其它消息处理, 若有则读取总线堆栈的 4 个数据字, 读取后更新读取指针, 判断消息是否结束, 若结束则处理, 否则丢弃。如果遇到消息尚未结束, 但是总线堆栈中的四个数据字已经先放入堆栈了, 由于消息数据还未处理完毕所以 EOM 信号还没有发出, 此时读取的消息结束标识为尚未结束, 流程认为是不完整的异常帧

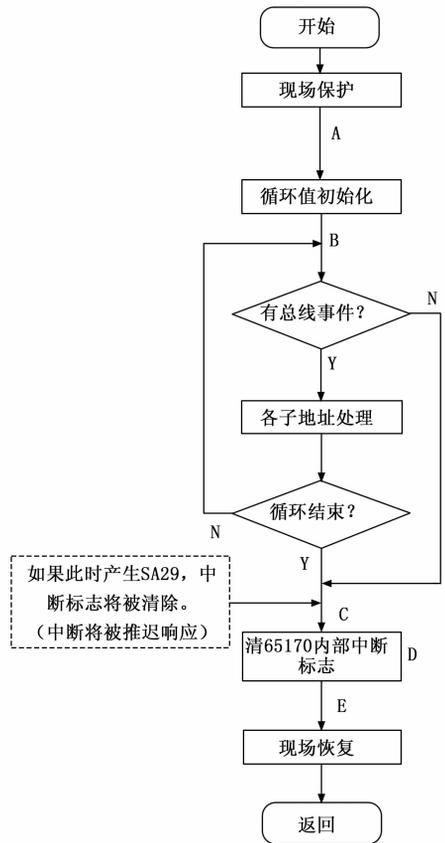


图 9 1553B 中断流程图

数据, 于是丢弃了此帧数据, 造成了有效指令的丢失。

可见 1553B 中断服务程序处理当前 EOM 消息时, 下一个消息的 Command Word、Data Block Pointer、Time Tag Word、Block Status Word 四个数据字会不受影响的进入堆栈, 此时不应急于处理下一个 EOM 中断, 由于 EOM 信号有可能还没有产生, 会造成消息数据被错误的丢弃。

对于测试人员来说, 应对 1553B 总线接口开展多循环的强度测试, 并事后分析数据传输的时序、内容的正确性, 尽早暴露小概率异常事件。

### 2.5 1553B 总线 RT 端写入数据时差问题

#### 1) 现象描述:

RT 端首次响应中断时, 数据无法写入 BC 端, 第二次才能写入, 导致数据向后错一拍, 不能和上位机时序配合。

#### 2) 机理分析:

BC 向 RT 发出发送指令字, RT 核实指令字后, RT 向 BC 发送状态字和数据字, 由于 RT 收到 BC 指令后的响应时间极短, 导致新的数据还未来得及更新总线缓存区, BC 端已经将原来缓存区的数据取走。第二次 BC 端读取数据时, 才读的是第一次更新的数据。

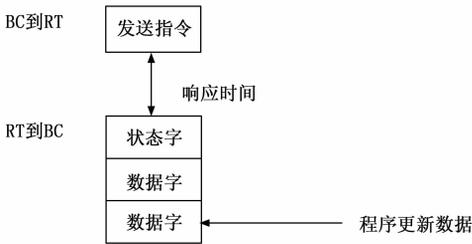


图 10 1553B 中断响应分析

可见了解 1553B 总线数据传输控制原理和时序分析对软件设计师和测评师非常重要。软件实现时应提前或及时将所需数据放入了缓冲区，以避免 BC 来取时数据还没有准备好或没有更新，导致取得仍是上一帧的数据。

### 2.6 初始化未考虑程序恢复性要求

#### 1) 现象描述:

要求: 软件进入陷阱后程序复位, 保留运行模式等关键信息。

测试和代码审查发现, 软件进入陷阱后程序复位, 关键信息被清除。

#### 2) 机理分析:

程序初始化运行流程如图 11 所示。

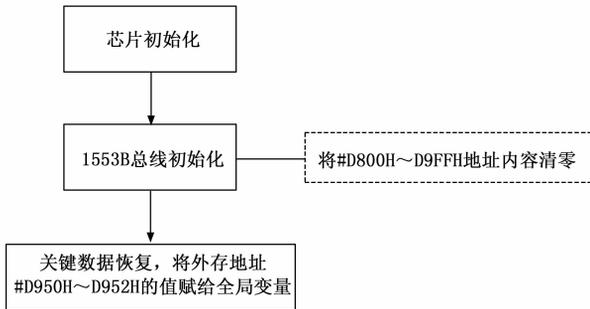


图 11 程序初始化运行流程

程序在运行过程中将关键数据写入外存地址 #D950H~D952H, 程序运行出错进入陷阱后跳至初始化重新运行。由上图可以看出, 初始化程序先运行了 1553B 初始化再进行关键数据恢复, 但是在 1553B 初始化中已将外存地址清零, 因此关键数据被清空, 无法恢复。

可见初始化工作不仅是一个程序运行的开始, 在一个有恢复性要求的程序中, 也包含了对恢复性的实现要求。因此, 程序设计时要考虑周全, 不能只将其作为任务启动前的净化操作, 更应该考虑任务执行过程中的信息保留和机制恢复要求。

## 3 1553B 总线 RT 软件测试技术研究

通过对 1553B 总线 RT 软件消息处理机制以及典型

缺陷的分析, 可见问题产生的机理复杂多样, 有消息处理机制选取不合理问题, 也有容错性处理不足、中断处理不完善、资源使用冲突、时序设计缺陷等问题。单纯依靠某一种类型的测试, 并不能有效的与软件应用背景相结合保证测试充分性和有效性。本文将结合上述 RT 软件设计和典型缺陷分析结果, 结合军用软件测试类型<sup>[15]</sup>, 对 1553B 总线 RT 软件测试技术进行分解说明, 提升软件测试有效性和充分性。

### 3.1 动态测试技术

#### 3.1.1 功能测试

功能测试主要是验证软件是否具备所需的功能, 如数据收发、状态监测等功能, 一般依据设计方提供的需求规格说明、协议文件等使用等价类、场景表及判定表等方法逐一开展测试设计, 此外测试还需关注总线数据各种可能的发送时序。

假设被测软件存在广播数据接收中断和遥测数据接收中断。其中遥测数据 1 s 发送一次, 每周期传输 588 字。广播数据采用 A、B 总线发送, 1 s 中 A、B 总线各发送一次且软件接收先收到的广播数据, 广播数据每周传输 32 字。在进行测试用例设计时, 考虑不同数据发送顺序组合, 至少应覆盖如下场景:

1) 遥测数据—B 总线广播数据—A 总线广播数据 (先遥测再广播);

2) B 总线广播数据—A 总线广播数据——遥测数据 (先广播再遥测)。

其中测试场景 1 先遥测再广播, 遥测数据传输字节多处理时间长, 假设主程序遥测数据接收时间内, B 总线上先来了广播数据中断且被响应, 但主程序此时还在接收遥测数据, 所以主程序对广播数据的接收将被延后, 假设此时又来了 A 总线广播数据中断, A 总线广播数据中断也被响应, 当主程序遥测数据接收完成后去处理广播数据时, 由于主程序判断出当前广播数据为“后到的广播数据”, 而将此次广播数据丢失, 从而导致 A、B 总线上的广播数据均未被接收, 导致问题发生。而反之如果使用测试场景 2, 由于广播数据少处理时间短, 则很难触发上述问题。可见不同的数据发送顺序组合对测试结果的影响确实不同, 当总线上各数据发送时间不唯一确定时, 应考虑各种数据发送顺序组合进行测试, 充分验证软件设计逻辑的正确性和完备性。

#### 3.1.2 接口测试

接口测试不同于功能测试, 主要关注接收数据接收、发送是否满足协议要求, 至少需完成以下测试:

- 1) 测试正常数据接收处理;
- 2) 测试异常数据接收处理;

异常情况一般应覆盖: RT 地址、子地址异常; 帧标识错、数据长度异常、校验和错、数据内容超出合法范围、帧内容数据中包含帧标识等;

3) 测试发送数据时序和内容满足协议要求。

除上述常规测试外, 1553B 总线 RT 软件接口测试需特别开展消息间隔最大、最小边界情况下的测试, 确认在边界情况下, 1553B 总线数据收、发功能是否正常。

### 3.1.3 性能测试

通过前面章节的分析可知, 1553B 总线 RT 软件消息处理方式的选择取决于 BC 发送消息的间隔和系统实时性处理要求。因此 RT 软件测试时, 应对消息识别和消息数据处理延时相关时间性能进行充分摸底测试, 并与总线通信协议要求和需求规格说明中的性能要求进行对比, 确认软件处理机制是否符合总线通信协议和任务要求。

在性能测试阶段, 至少应开展:

- 1) 软件主流程最大处理时间测试;
- 2) 软件各 RT 子地址数据处理最大延迟时间, 注意应覆盖所有 RT 子地址, 该时间应小于总线通信协议中规定的 RT 子地址消息的最小通信周期;
- 3) 软件各中断最大处理时间测试, 考虑到软件中存在不止 1553B 中断, 且各中断之间优先级不定, 因此在开展性能测试时, 应对软件各中断最大处理时间进行测试, 在此基础上通过理论计算获取软件主流程、软件各 RT 子地址数据处理最大延迟时间性能底数, 确保软件实现与任务要求的一致性。

### 3.1.4 安全性测试

关于 1553B 总线故障注入测试, 冯收等人给出了物理层和数据链路层测试项目和测试用例设计方法<sup>[12]</sup>, 本文根据航天 1553B 总线 RT 软件典型缺陷, 对安全性测试场景设计进行说明, 具体见表 1。

表 1 安全性测试场景设计

类别	安全性测试场景设计
广播数据异常	当总线上有多个广播指令, 应模拟所有广播指令确认被测 RT 终端是否只响应任务要求的广播指令 设置某 RT 功能子地址异常指令, 使其子地址与广播指令子地址一致, 确认 RT 终端是否不错误响应成广播指令
时序异常	数据时序打乱执行, 确认软件运行情况
总线通信中断	总线通信中断再恢复的情况, 确认软件故障处理是否正确, 是否能及时恢复正常
数据缓冲区异常	对于环形缓冲区测试应设置: (当前数据指针 + 接收数据长度) > (环形缓冲区长度的情况)
消息个数超限	测试 1553B 总线消息个数大于消息堆栈中给定的最大消息数

以“广播数据异常”测试场景举例。假设 1553B 总线上有 1 个 BC 端和 2 个 RT 终端, RT 终端地址分为 RT9 和 RT5, 其中 RT9 终端上运行被测件。1553B 总线广播消息包含 2 种:

- a) 广播绝对时间码, 占用广播子地址 6 (RT 地址 31), 由 RT9 终端接收;
- b) 广播相对时间码, 占用广播子地址 2 (RT 地址 31), 由 RT5 终端接收;

则开展 RT9 终端上被测软件安全性测试时, 必须完成以下测试:

1) 测试发送“广播相对时间码”RT9 终端的响应情况。由于需求要求该广播消息由 RT5 终端接收, 因此 RT9 终端不应响应此广播消息。若 RT9 终端未判断是否为广播消息 (RT 的值为 31), 而是错误的将此消息解析为该终端的功能子地址 2 的指令数据, 则将给系统带来极大的风险。

2) 测试 BC 端向 RT9 终端发送功能子地址为 6 的异常消息时软件响应情况。因为 RT9 终端的子地址 6 为广播数据接收子地址 (RT 的值为 31), 因此 RT9 终端不应响应此消息, 而不能错误的当成广播消息接收处理。

### 3.1.5 强度测试

对 1553B 总线类软件通常要完成通信强度测试, 即测试通信频率达到什么情况时软件无法正常处理; 具体测试方法是逐渐缩短通信周期直到软件无法正常响应, 得到软件通信处理的强度。值得注意的是当缩短通信周期后, 适当延长软件测试时间, 往往可以加速暴露一些资源使用冲突问题。因此在进行强度测试时, 在考虑增加频率的情况下应适当延长软件测试时间, 使软件问题充分暴露。强度测试场景设计见表 2。

表 2 强度测试场景设计

强度测试场景设计	
强度测试	指令间隔拉小/拉大(过小忽略后一帧)
	超过指定的一次性接收最大指令个数
	所有子地址数据一起循环发送
	总线允许的消息发送最小时间间隔的情况下, 发送不同的指令

### 3.1.6 可恢复性测试

通常 1553B 总线通信类软件应具备可恢复性, 即当 1553B 总线异常时, 应能完成 1553B 接口芯片自动重新初始化操作。测试时可人为设置 1553B 总线 BC 端不发送总线消息来模拟 1553B 总线通信异常, 查看 1553B 接口芯片是否会重启, 且重启后是否满足任务要求。

## 3.2 静态测试技术

软件测试方法分为静态测试和动态测试, 二者相辅

相成,缺一不可<sup>[16]</sup>。由于测试环境、设备状态等诸多条件的限制,许多问题并不一定能在动态测试过程中完全暴露,而静态代码审查则提供了很好的补充测试手段。

代码审查通常应制定代码审查单并通过专家评审,采用人工审查结合静态分析工具的方法开展,审查要点应覆盖:代码和设计的一致性、代码执行标准(GJB8114等)的情况、代码逻辑表达的正确性(如逻辑表达式正确、各判断分支都得到处理等)、代码结构(如函数参数个、圈复杂度等)的合理性以及代码的可读性。

针对 155B 总线存在中断的情况,须开展中断分析<sup>[17]</sup>,分析各种缺陷模式<sup>[18]</sup>包括中断开关时机、中断资源冲突、中断时序、中断嵌套、中断处理时间等正确性,包括:

- 1) 在软件初始化过程中不会有中断产生,若必须有中断存在,则需确认打开的中断不会影响初始化的正常进行;
- 2) 硬件故障后重新初始化时需先关闭中断;
- 3) 需分析主程序、各个中断之间共用的全局变量、

接口、地址等资源的读写情况,确认不存在读写冲突;

4) 需逐个分析各中断的响应是否会被悬挂和推迟,若有中断被推迟,则需确认被推迟后也能满足时序要求;

5) 需分析是否存在中断嵌套,若产生中断嵌套,需确认软件有充分的可靠性措施(如中断嵌套现场保护、嵌套中断正确返回、无资源冲突等);

6) 需逐个测试每个中断的处理时间(各分支),以分析时序冲突风险。

### 3.3 1553B 总线 RT 软件测试审查单

结合 1553B 总线 RT 软件设计分析及典型缺陷分析,设计 1553B 总线 RT 软件测试专有审查单(详见表 3),旨在帮助测试人员全面、系统地审查软件测试工作,确保测试的充分性和有效性,提升软件质量。审查单的内容涵盖了消息处理机制、典型故障、动态测试、静态测试等多个方面的需要注意的检查项,每个检查项都有明确的要求和备注,为测试人员提供了具体的操作指南。

在运用审查单开展工作的过程中,首先,测试人员应仔细阅读检查单,了解每个检查项的具体要求和相关

表 3 1553B 总线 RT 软件测试审查单

序号	检查项	要求	备注
1	消息处理机制审查	若对消息处理实时性要求不高且软件主流程最大处理时间较短时,才可采用查询方式。	参见 2.1 节
2		当会产生中断的消息与任意下一条消息的最小间隔大于软件响应 1553B 总线中断时间时,才可选择中断读命令字寄存器方式。	
3		当会产生中断的消息与任意下一条消息的最小间隔不大于软件响应 1553B 总线中断时间 100 $\mu\text{s}$ 以上,且消息处理实时性要求较高时 <sup>[19]</sup> ,必须采用中断遍历消息堆栈方式。	
4	典型故障审查	广播子地址是否初始化为与接收子地址分离的方式,寄存器 2 是否配置为 8a9fh/aa9fh,1553B 总线中断接收命令字判断时是否对 RT 地址进行判读。	参见 2.2 节
5		是否进行了 RT 地址异常、RT 子地址异常情况处理。	
6	典型故障审查	在具有多任务实时操作系统程序设计中,一旦涉及中断,中断的频频出现可能会打断信号量的置位,导致外界控制出错。因此,需检查是否在 1553B 中断中同步外界全局信号量。	参见 2.3 节
7		针对 1553B 中断服务程序中使用的全局变量检查是否存在资源使用冲突;1553B 中断数据处理时,对关键变量、接口操作的处理是否进行了开关中断的保护,以防止下一个 1553B 中断的响应改变变量状态,导致新数据被先处理,老数据被覆盖、关键状态被改写、关键接口状态被改写等问题 <sup>[20]</sup> 。	
8		中断服务程序中是否第一时间清除本次中断标志位,延迟清除中断标志位将增加误清除下一次中断请求标识的可能。	
9		是否避免在 1553B 当前 EOM 中断服务程序中处理下一个 EOM 中断消息的内容,若一定要在当前 EOM 中断中处理下一个 EOM 中断消息的内容,是否根据 EOM 信号判断数据是否完整,无 EOM 信号则不处理,而不是丢弃下一个消息,丢弃下一个消息可能造成正常数据帧被抛弃。	
10	典型故障审查	是否对 1553B 总线接口开展强度测试,并事后分析数据传输的时序、内容的正确性,关注交互数据的时序,是否存在时序上的不合理导致漏帧 <sup>[21]</sup> 。	参见 2.4 节
11		是否提前或及时将所需数据放入了缓冲区,以避免 BC 来取时数据还没有准备好或没有更新,导致取得仍是上一帧的数据。	
12	典型故障审查	检查异常恢复初始化流程,是否将关键变量的恢复放到了 1553B 初始化的前面执行,若放到后面执行,可能导致关键变量内容被初始化清零,无法恢复异常之前的状态。	参见 2.5 节
13		是否开展有效的功能、接口、性能、安全性、强度及可恢复性测试。	
14	静态测试	是否开展有效的中断分析。	参见 3.2 节

备注信息,明确审查的重点和目标。准备被测软件的相关文档,以及测试大纲、测试用例、测试记录等测试文档,以便在审查过程中进行对照检查。

其次,测试人员使用统一的审查结果记录表格,详细记录每个检查项的审查结果。记录内容应包括检查项序号、检查项名称、审查结果(合格或不合格)、问题描述(如有)、相关证据(如测试数据、代码片段等)。

再次,测试人员对于审查过程中发现的问题,应进行深入的成因分析。分析问题产生的根本原因,如设计缺陷、编码错误、测试疏漏等。通过问题成因分析,为后续软件设计、编码、测试等方面的优化和改进提供依据。

最后,定期对 1553B 总线 RT 软件测试过程中的经验和教训进行总结和分享,不断积累完善审查单的内容和审查流程,提高审查单的实用性和有效性。

## 4 工程应用与效益分析

### 4.1 工程应用案例

选择卫星型号某星载计算机作为本次应用案例的被测试对象。

依据本文 3.1 节动态测试技术有效整合传统测试类型,通过功能、接口、性能等六类动态测试场景的协同设计,结合场景表、边界表、组合判定表等标准化的用例设计表格,自动生成动态测试用例。依据本文 3.2 节静态测试技术,制定代码审查单与中断分析检查单,通过人工结合静态分析工具进行编码规范性的审查及文实一致性审查。最后根据 1553B 总线 RT 软件测试审查单(见表 3)对软件测试工作进行全面、系统地审查。

实验结果:

- 1) 缺陷检测:累计发现 37 项隐性缺陷,其中:
  - ⇒严重级(5 项):中断信号量异步导致任务挂起;
  - ⇒一般级(25 项):广播消息过滤逻辑漏洞;
  - ⇒建议级(7 项):代码注释不完整。

2) 效率提升:

- ⇒测试用例自动生成率提高至 85% (原人工设计耗时占比 60%);
- ⇒缺陷定位平均时间由 4.1 小时缩短至 1.6 小时。

### 4.2 实验结果对比分析

将本文方法与现有测试方法对比(表 4):

表 4 测试方法对比

指标	本文方法	传统方法
缺陷检出率/%	98.7	75.5
测试周期/人天	16	30
缺陷定位平均时间/小时	1.6	4.1

有效性验证:与传统方法对比(表 4),本文方法缺陷检出率提升 23.2%,主要得益于动态-静态协同

测试覆盖了时序敏感缺陷(如 2.5 节写入时差问题);

效率提升:自动化测试用例生成率提高至 85%,缺陷定位时间缩短 61%,源于典型故障结合标准化的用例设计表格。

## 5 结束语

本文结合 1553B 总线 RT 软件设计特点及典型缺陷分析,提出了一套完整的动态与静态测试技术框架。通过制定针对性的测试方法与审查单,不仅提升了 RT 软件的测试有效性,也为工程实践提供了重要参考,为 1553B 总线 RT 软件的可靠性保障奠定了基础。

参考文献:

- [1] GJB 289A-97 数字式时分制指令/响应型多路数据传输总线[S]. 国防科学技术委员会,1997.
- [2] 牛文娟,张方,饶张飞.一种高速 1553B 总线控制器自动测试平台的开发[J]. 计算机测量与控制,2020,28(10):7-9.
- [3] 施睿,庄传刚,张晋,等.高速 1553B 智能通用总线测试平台设计[J]. 遥测遥控,2022,43(1):111-118.
- [4] 张军,杨柯,颜运强,等.1553B 接口仿真测试系统设计及典型软件缺陷分析[J]. 测控技术,2016,35(2):115-117.
- [5] 上官子粮,仲宇.飞行软件通用仿真测试平台中 1553B 接口测试方法的研究[J]. 航天控制,2011,29(3):80-86.
- [6] 朱珂,刘彦伟,丁凯,等.一种快速可重构的 1553B 总线测试软件设计[J]. 现代电子技术,2015,38(14):59-63.
- [7] 范祥辉,赵刚,王世奎,等.高速 1553B 总线有效性测试平台设计与实现[J]. 现代电子技术,2017,40(3):23-26.
- [8] KIM SEUNG HAN, CHO CHANG HOOM, KIM DONG SEONG. Design and Implementation of MIL-STD-1553B Fieldbus Based Embedded System[J]. The Journal of Korean Institute of Communications and Information Sciences, 2018, 43(8):1273-1281.
- [9] LU HU, SHI HAOSHEN. Design and Implementation of Universal Testing System for 1553B Bus Interface[C] // Beijing: The Seventh International Conference on Electronic Measurement and Instruments, 2005:519-522.
- [10] 王新亮,陈凯,薛琪琪,等.基于 1553B 总线的飞控软件测试仿真平台设计[J]. 计算机测量与控制,2020,28(11):12-20.
- [11] 刘彦伟,程钊,张青青,等.基于仿真卡的通用 1553B 总线测试软件设计[J]. 测控技术,2014,33(11):104-106.
- [12] 冯收,凤雷,乔家庆,等.1553B 总线 RT 有效性测

试方法研究 [J]. 计算机测量与控制, 2012, 20 (10): 2614 - 2616.

[13] Data Device Corporation. ACE/Mini-ACE series BC/RT/MT advanced communication engine integrated 1553 terminal user's guide [M]. New York: Data Device Corporation, 1995.

[14] 朱剑辉, 郑 渊, 洪小骏, 等. 无消息间隔约束的 1553B 总线通信软件设计方法 [J]. 上海航天, 2023, 40 (4): 54 - 58.

[15] GJB/Z 141-2004 军用软件测试指南 [S]. 北京: 总装备部军标出版发行部, 2004.

[16] 左万娟, 虞砺琨, 王小丽, 等. 航天嵌入式软件测试用例典型设计缺陷研究 [J]. 计算机测量与控制, 2019,

27 (10): 36 - 40.

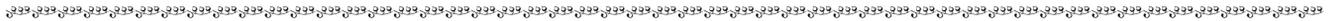
[17] 卢德中, 林晓欲, 等. 基于中断影响分析的软件集成测试策略术 [J]. 计算机测量与控制, 2014, 22 (3): 659 - 663.

[18] 高 猛, 滕俊元, 陈 睿, 等. 航天器软件典型缺陷模式的自动检测技术 [J]. 空间控制技术与应用, 2019, (5): 1 - 11.

[19] 穆 强. 星载嵌入式软件中断响应时间的分析 [J]. 计算机测量与控制, 2012, 20 (2): 536 - 537.

[20] 姚佳瑜. 嵌入式软件中断系统的测试 [J]. 电子技术与软件工程, 2018, (5): 40.

[21] 代晓倩, 尤志坚. 单片机软件中断测试技术研究 [J]. 电脑知识与技术, 2015, 11 (11): 195 - 196.



(上接第 18 页)

尽量避免透明玻璃、瓷砖、镜面等低反射率边界区, 尽量降低对平面图绘制造成影响。

参考文献:

[1] 潘琰枫, 雷立志. 建筑资料缺失的建筑物的结构安全鉴定 [J]. 长江工程职业技术学院学报, 2022, 39 (1): 14 - 18.

[2] 蔡泽宇, 金诚谦. 基于二维激光雷达点云的物体轮廓识别 [J]. 应用激光, 2020, 40 (6): 513 - 518.

[3] 王建颖, 张婧毓, 张自强, 等. 基于光学频率梳的高精度几何量检测系统 [J]. 测控技术, 2023, 42 (6): 105 - 110.

[4] 余章蓉, 王友昆, 潘俊华, 等. Trimble X7 三维激光扫描仪在建筑工程竣工测量中的应用 [J]. 测绘通报, 2021 (4): 160 - 163.

[5] 马 赶, 郭恒林, 谢 坤, 等. 手持三维激光扫描仪在平立面测量中的应用 [J]. 测绘通报, 2020 (S1): 247 - 250.

[6] 华远峰, 王 宁, 孙 博, 等. 基于三维激光扫描技术的建筑外立面测绘方法 [J]. 北京测绘, 2020, 34 (4): 532 - 536.

[7] 汪晓慧, 吴晓培. 徕卡 RTC360 三维激光扫描仪在竣工测量中的应用 [J]. 测绘通报, 2019 (10): 150 - 154.

[8] 湛逸飞, 杨必胜. 基于 LiDAR 点云法向量稳健估计的室内平面图自动生成方法 [J]. 地理信息世界, 2017, 24 (1): 92 - 96.

[9] 程万里. 面向装修场景的自动点云获取与点云应用研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2020.

[10] 任震宇. 一种建筑结构三维重建加护的研究 [J]. 自动化技术与应用, 2019, 38 (9): 117 - 123.

[11] 阮 俊, 肖兴平. 基于嵌入式系统的激光扫描检测系统 [J]. 激光杂志, 2015, 36 (3): 33 - 35.

[12] 张慕谦, 曹乐. 一种嵌入式脑电数据采集系统设计 [J].

单片机与嵌入式系统应用, 2023, 23 (7): 33 - 37.

[13] 邱 益, 张康宁, 梁 杰. 基于线激光位移传感器的孔毛刺高度测量系统 [J]. 仪表技术与传感器, 2022, (6): 105 - 108.

[14] 孔德肖, 王甲一, 李俊菽, 等. 基于四元数的两轮自平衡车控制系统研究 [J]. 电子测量技术, 2023, 46 (21): 49 - 54.

[15] 吴尧帅. 基于 UWB 的室内三维跟踪系统设计 [J] 单片机与嵌入式系统应用, 2023, 23 (11): 71 - 74.

[16] 王继虎, 樊晶晶, 孙安斌, 等. 基于扫描点云数据的零部件边缘轮廓提取技术 [J]. 测控技术, 2021, 40 (2): 58 - 63.

[17] 吕志鹏, 伍吉仓, 公 羽. 利用四元数改进大旋转角坐标变换模型 [J]. 武汉大学学报 (信息科学版), 2016, 41 (4): 547 - 553.

[18] 韩虎虎, 祁 鑫, 王鹤飞, 等. 基于激光点云数据的光伏电站智能巡检系统 [J]. 电子设计工程, 2023, 31 (4): 109 - 113.

[19] JOSE PUJOL. (2018) The linear combination of vectors implies the existence of the cross and dot products [J]. International Journal of Mathematical Education in Science and Technology 49: 5, pages 778 - 792.

[20] 徐 芳, 梅文胜. 旋转矩阵表达方法对相机检校的影响 [J]. 测绘地理信息, 2014, 39 (2): 13 - 17.

[21] 许毛跃, 张登成, 李嘉林. 四元数在欧拉方程中的应用研究 [J]. 飞行力学, 2002 (1): 67 - 70.

[22] 陈家栋, 张 钊. 基于 CUSUM 和加权欧氏距离的电器分析监测装置设计 [J]. 电子测量技术, 2023, 46 (8): 154 - 161.

[23] 刘树伟, 梁聪聪. 基于红外技术与激光雷达的新能源汽车无人驾驶障碍检测 [J]. 应用激光, 2022, 42 (9): 97 - 104.

[24] 张 燕, 赵会民, 刘作军, 等. 应用二维激光雷达的地形识别系统设计 [J]. 红外与激光工程, 2018, 47 (8): 154 - 161.