文章编号:1671-4598(2026)05-0001-07 DOI:10.16526/j.cnki.11-4762/tp.2026.05.001 中图分类号:TP213 文献标识码:A

基于 LabVIEW 的起落架收放控制故障注入系统设计

李隆鹏
(中航飞机起落架有限责任公司,长沙 410200)

摘要:起落架收放控制系统是飞机重要的功能系统,使用 LabVIEW 虚拟仪器图形化开发环境作为软件平台,结合 PC 机和 NI 数据采集卡等硬件,设计了一款起落架收放控制故障注入系统;该系统能够实时监测起落架收放控制过程,对接近传感器信号和电磁阀信号进行故障注入,并对故障测试过程进行数据记录和分析;该系统应用了故障注入优先级策略,有效保证了测试过程的安全性;以双余度起落架收放控制系统为研究对象,在不同工况下,根据算法分级注入接近传感器信号和电磁阀信号,对起落架收放控制系统实现了充分测试;经试验验证,该故障测试系统具有灵活、安全的优点,测试覆盖率不低于 95%。

关键词:接近传感器故障;电磁阀故障;起落架收放控制;故障注入;虚拟仪器

Design of Fault Injection System for Landing Gear Retraction and Extension Control Based on LabVIEW

LI Longpeng
(Landing Gear Advanced Manufacturing Co., Ltd., AVIC, Changsha 410200, China)

Abstract: The landing gear retraction and extension control system is an important functional system of aircraft. Using LabVIEW virtual instrument graphical development environment as a software platform, combined with its hardware such as a PC and NI data acquisition card, a fault injection system for landing gear retraction and extension control is presented. This system can monitor the landing gear retraction and extension control process in real time, conducts fault injection on proximity sensor signals and electromagnetic valve signals, and records and analyzes the data during the fault testing process. Additionally, A fault injection priority strategy is applied in this system to effectively ensure the safety of the testing process. A dual-redundancy landing gear retraction and extension control system is taken as the research object, based on the grading of the algorithm, and the signals of proximity sensors and electromagnetic valves at different operating conditions are injected, achieving the comprehensive test of the system. Experimental verification shows that this system has the advantages of flexibility and safety, with a testing coverage rate of not less than 95%.

Keywords: proximity sensor failure; solenoid valve failure; landing gear retraction and extension control; fault injection; virtual instrument

0 引言

起落架收放控制系统是飞机重要的功能系统,一般包括收放手柄、控制单元、接近传感器和液压电磁阀,用于实现飞机起落架的位置指示和收放控制。起落架接近传感器一般采用电感式。电感式接近传感器具有无火花、无机械磨损、使用寿命长、环境适应性强、工作可靠等突出优点,在民机领域广泛应用[1]。其基本原理是利用传感器本身与目标间位置的变化而导致感应电感值的变化,该电感值引入后端处理即可进行测量处理。

起落架收放控制系统可能的故障点较多,其中以接近传感器信号故障和电磁阀故障最为常见。当环境温度变化时,接近传感器线圈电阻和铁芯磁导率会随之发生变化,从而导致线圈的电感值发生变化[2],进而可能引起收放控制系统的位置解算误报远离、误报接近等错误。另外,接近传感器、电磁阀及其线束回路还可能发

收稿日期:2025-06-06; 修回日期:2025-07-17。
作者简介:李隆鹏(1982-),男,硕士,高级工程师。
引用格式:李隆鹏. 基于 LabVIEW 的起落架收放控制故障注入系统设计[J]. 计算机测量与控制,2026,34(5):1-7,32.

生开路故障、短路故障和供电电压故障[3]。由于起落架收放控制系统直接影响飞机起飞、降落的安全性，起落架收放控制系统必须对这些故障进行识别和保护，并根据可能造成的安全性影响适当调整控制策略。而针对起落架收放控制系统进行接近传感器和电磁阀信号的故障注入，测试其安全性就极为必要。

目前国内学者对接近传感器和电磁阀的故障分析和故障诊断开展了相关研究工作[4-9]。郑连泽和王伟钢对全金属电感式接近传感器工作原理、等效电感的测试方法、关键技术和解决途径及其在军工领域的应用等方面进行了深入研究。郭键、董萍萍对传感器测量系统精度影响因素进行了分析，改善了电感式传感器测量系统的精度，设计了高精度电感式传感器测量系统。梁锦对电感式传感器故障的原因进行了分析，阐明了实现诊断的方法。师义伟对 A320 飞机接近传感器的相关故障问题展开研究，提出了合理的故障判断和隔离方式。陈昕冉、葛红娟和李世宇等研究了高低温、结冰等环境因素对传感器输出特性的影响。刘赞、张婷和肖晓蕾基于液压系统工作原理，对液压电磁阀性能检测和故障复现进行了研究。王金铎、付晓锋和吴麟等针对某型飞机襟翼液压电磁阀故障，通过对襟翼液压电磁阀的构造和工作原理等进行分析，研究襟翼液压电磁阀故障产生的原因。詹湘琳、刘洪越和荆涛对航空变量柱塞泵系统中电磁阀进行检测与诊断，准确诊断了电磁阀的故障类型。赵帅杰、周虎和梁宽等针对运载火箭电磁阀测试问题，对电磁阀数据采集系统展开了研究。虽然国内外对于电感式接近传感器以及电磁阀的故障及其注入的基本方法进行了相关研究，但受限于以往技术和测试要求等因素，对于如何实现接近传感器以及电磁阀故障自动注入、如何进行系统级组合故障测试，实现高测试覆盖率尚无有效的方案。

近年来，随着计算机技术和虚拟仪器（VI，virtual instrument）技术的快速进步，基于 VI 的自动化测试系统在众多领域内受到人们的广泛关注。VI 自动化测试系统主要由数据采集卡、PC 机及接口、测试系统软件等组成，可以替代传统实物仪器完成测量和测试功能，具有更加丰富的功能[4]。国内学者在基于 LabVIEW 平台开发测试系统方面进行了有益探索[10-14]。杨建波、李霄和任佳基于 LabVIEW、Matlab 环境开发了一套适用于起落架落震试验的数据分析系统，实现了文件获取、参数识别、数据对比、数据合并、结果输出的自动化处理；开发了数据监测程序，对加速度、气腔压力等试验中信号故障率较高的信号实时监测。李艳萍和韩春雪基于 LabVIEW 设计了继电保护测试仪自动检测系统，实现了继电保护测试仪的全自动检测。高延超、梁克和仪德英基于 LabVIEW 设计了高速多通道航天器通用测试系统，系统基于 LabVIEW 平台进行系统软件开发，实现了多通道高速并行数据采集控制、数据实时显示、数据存储等功能。李俊杰和王磊研发一款适用于大型客机的起落架系统机上地面试验接口测试设备，通过信号隔离、提取、模拟，实现起落架机上地面检测实验；软件部分采用可图标视化友好界面，方便检测工人使用，并根据需要可添加附加的功能。万凯歌基于 LabVIEW 设计了新能源汽车充电检测系统，采用神经网络算法对测试数据进行分析。由于起落架系统级故障测试的特殊性，以及飞机对起落架收放系统的测试要求越来越高，目前缺少具备适合起落架收放系统测试的整体方案[15-20]。随着新技术的出现、计算机技术的发展，对于如何将起落架收放控制系统与新的测试平台相结合，并安全的实现故障注入自动化测试还需要进行研究。

本文基于 LabVIEW 平台设计了一种起落架收放控制故障注入系统，在故障注入模式下，模拟接近传感器和电磁阀信号的故障，实现起落架收放控制系统故障安全性测试；在正常模式时，保证原有起落架收放控制系统的正常工作。该系统根据故障注入优先级策略分级注入接近传感器信号和电磁阀信号，实现了起落架收放控制的故障保护测试，具有安全性高、灵活性好的优点，测试覆盖率不低于 95%。

1 起落架收放控制系统架构及原理

起落架收放控制系统集位置解算和收放控制两大功能于一体，主要包括收放手柄、控制单元、接近传感器和液压电磁阀等设备。飞机级对起落架收放控制系统的安全性要求是不能出现灾难性事故。灾难性事故包括“任意起落架非指令放下”、“任意起落架非指令收上”和“无通告的任意起落架无法放下”。

为满足飞机的安全性要求，实现 A 级功能，起落架收放控制系统一般采用双余度架构设计，其系统架构如图 1 所示。系统所含设备除液压电磁阀外，其他设备均为电气双余度，且互为备份，满足故障安全要求。

起落架位置接近传感器主要包括前起落架上/下位锁接近传感器、前起落架舱门上/下位锁接近传感器、左右主起落架上/下位锁接近传感器、左右主起落架下到位接近传感器、以及前/主起落架轮载接近传感器等。两个余度的控制单元按主备方式工作，起落架位置解算和收放控制逻辑同步运行。控制单元通过对接近传感器信号进行解算，综合各自位置状态信息后判断起落架的位置，并根据起落架控制手柄指令以及控制单元的主备模式，经内部逻辑判断控制驱动起落架各收放液压电磁阀，实现起落架的收放控制功能。同时，控制单元将内部逻辑解算得到的系统状态、起落架位置及离散量等信号发送给机上其他系统，实现起落架位置指示与告警功

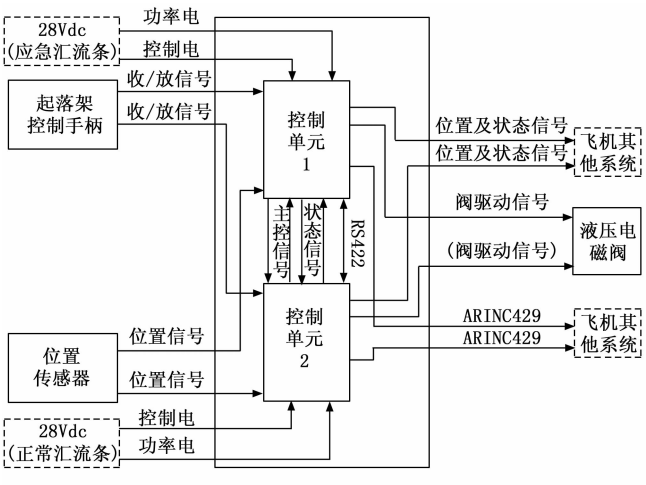

图 1　起落架收放控制系统架构

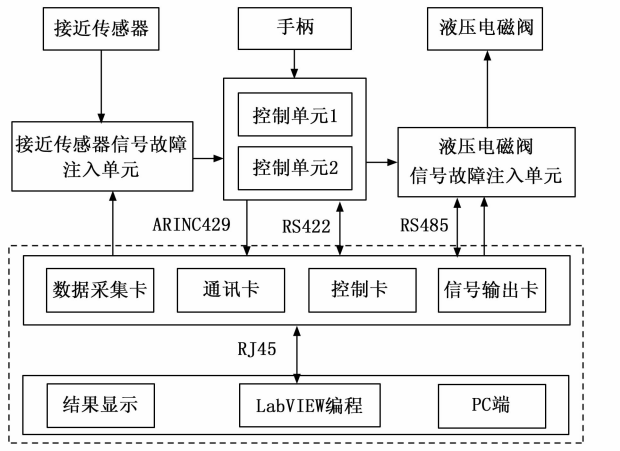

图 2　故障注入系统总体架构

能。系统默认控制单元 1 为主控设备，控制单元 2 为备控设备，当主控设备报故时自动切换至备控设备，实现起落架收放控制系统的故障安全。

2　故障注入系统设计

2.1　故障注入功能需求

考虑起落架系统级试验的实际使用需要，开发的起落架收放控制故障注入系统应具有故障注入和正常测试两种工作模式，以满足在不同的试验方案和各种工况条件下进行试验的要求。

在故障注入模式下，模拟接近传感器的开路、误报远离、误报接近和短路故障，以及模拟电磁阀的开路、短路和供电电压故障，将各类故障互斥地注入到起落架收放控制系统，实现起落架收放控制系统故障安全性测试；在正常测试模式时，不改变原有系统电气连接和功能，保证起落架收放控制系统正常工作。

起落架收放控制信号故障组合较多，考虑到控制单元自检保护的不确定性，以及故障注入对起落架收放系统可能造成的损伤风险大小，需要进行误操作保护和故障优先级设计，优先注入损伤风险小的故障，最后注入破坏性的故障，保证系统测试的安全性。

起落架收放控制故障注入系统采用 LabVIEW 实现软件设计，对采集到的数据进行计算和分析，根据测试用例控制所需故障的注入，并在用户界面上实时显示起落架位置状态，同时将每次测试的数据记录到数据库，以便后续数据回放查询和试验结果分析。

2.2　故障注入系统总体架构

根据起落架系统级试验故障注入的需求，起落架收放控制故障注入系统主要由接近传感器信号故障注入单元、电磁阀信号故障注入单元、测试控制装置（含硬件测试板卡和软件操作界面）组成。其系统总体架构如图 2 所示。

由于起落架收放控制系统所涉及的接近传感器、液压电磁阀信号的故障组合较多，同时需兼顾多模式、高安全性和灵活性的需求，需要针对接近传感器信号故障注入单元、液压电磁阀信号故障注入单元，以及测试控制装置的功能性和安全性进行软硬件综合设计。

2.3　接近传感器信号故障注入单元

由于起落架系统需要的位置指示信息较多，包含前起落架及舱门、左/右主起落架及舱门的到位信号以及轮载信号，并且每个位置信息均采用双余度配置，即采用两套相同的接近传感器，所以接近传感器的数量总量较大；而每个接近传感器均存在开路、误报远离、误报接近和短路 4 种，其故障总数也较多。受限于测试通道、软硬件资源等因素，需要考虑故障注入测试设备的优化设计，兼顾测试充分性和灵活性，避免设备过于庞大和复杂。以单组通道为例，其硬件原理如图 3 所示。

接近传感器信号故障注入单元通过两个选择开关 S1 和 S2，将起落架收放控制系统的控制器余度 1 与接近传感器余度 1 之间直接连接，收放控制器余度 2 与接近传感器余度 2 之间通过各故障模块连接；硬件模块开路故障注入信号 K1、误报远离故障注入信号 K2、误报接近故障注入信号 K3、以及短路故障注入信号 K4 按顺序依次串联连接。当接近传感器余度 2 故障注入测试完成，可通过选择开关 S1 和 S2 切换，实现接近传感器余度 1 故障注入。一般起落架接近传感器远离时的电感值小于 5 mH，接近时的电感值大于 5．3 mH，因此图中误报接近模块的串联电感 L_s 为 1 mH，误报远离模块的并联电感 L_p 为 5 mH。接近传感器信号故障注入单元通过两个选择开关实现了两个余度的接近传感器交替测试，有效降低了故障注入装置的复杂度，减小设备体积，简化结构。

为保证测试安全性，在硬件电路设计时增加了误操作保护和故障优先级设计。在未接收到测试允许信号时

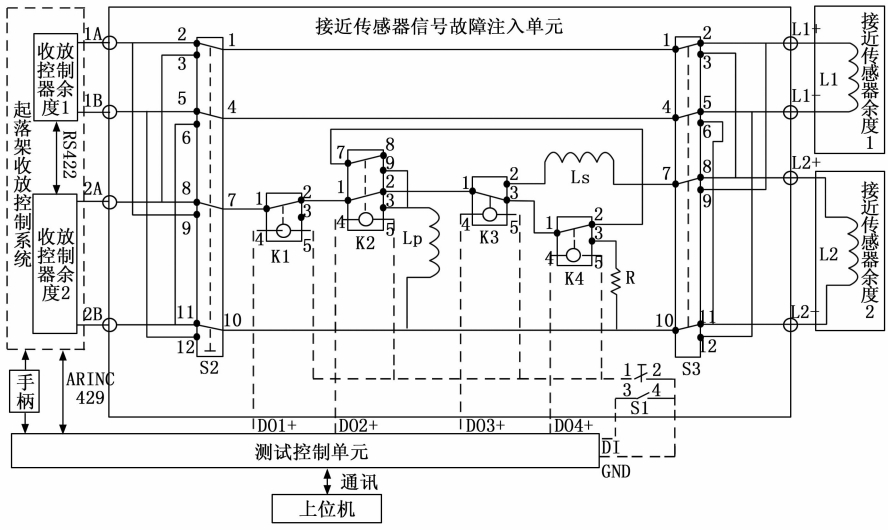

图 3 接近传感器信号故障注入单元单通道硬件原理

此图中电阻 R 为 5 Ω。电磁阀供电故障可以与开路故障或短路故障进行任意组合。

为保证测试安全性，在硬件电路设计时增加了误操作保护和故障优先级设计。在未接收到测试允许信号时默认正常模式，不改变原有起落架收放系统的连接和功能，防止误操作。在故障注入测试允许时，将电磁阀开路故障和短路故障互斥地注入到起落架收放控制系统，通过测试控制装置编程能够改变故障注入时刻，并通过改变可编程 DC 电源模块输出电磁阀供电电压大小，实现电磁阀信号供电电压故障注入。根据故障可能导致的起落架收放控制系统损伤风险，按照电磁阀开路故障和短路故障的优先级，从高到低依次与收放控制系统连接。电磁阀信号故障注入单元通过硬件电路保证了即使在测试控制装置意外输出多个故障注入信号的情况下只能注入优先级最高的故障。

默认正常模式，不改变原有起落架收放系统的连接和功能，防止误操作。在故障注入测试允许时，通过测试控制装置编程改变故障注入时刻。根据故障可能导致的起落架收放控制系统损伤风险，按照接近传感器的开路故障、误报远离故障、误报接近故障、以及短路故障的优先级，从高到低依次与收放控制系统连接。通过硬件电路保证了即使在测试控制装置意外输出多个故障注入信号的情况下，故障注入装置也只能注入优先级最高的故障。

2.4 电磁阀信号故障注入单元

在起落架收放控制系统与液压电磁阀之间串联连接电磁阀信号故障注入单元。电磁阀信号故障注入单元包括开路故障模块、短路故障模块以及可编程 DC 电源模块。以单组通道为例，其硬件原理如图 4 所示。

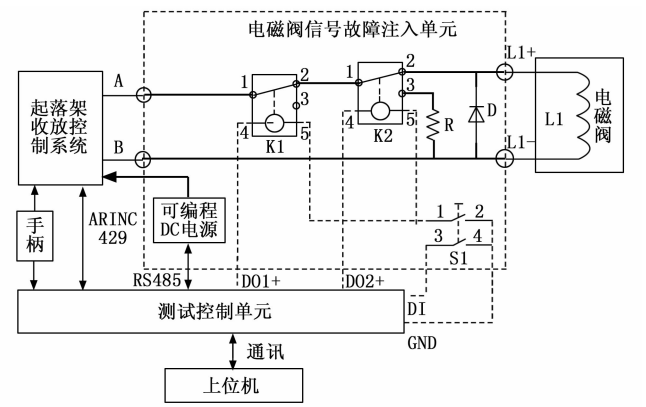

图 4 电磁阀信号故障注入单元单通道硬件原理

可编程 DC 电源模块提供起落架收放控制系统的功率供电，其电压可在 0～50 V 范围内任意调节，支持 RS485 通讯进行输出电压控制，以模拟电磁阀供电故障；开路故障模块 K1 和短路故障模块 K2 按顺序与电磁阀线圈依次连接。一般起落架液压电磁阀的工作电流小于 1A，考虑到短路故障时需要对电流进行限流，因

2.5 测试控制装置

测试控制装置的硬件主要包括 NI 控制机箱、计算机等设备。NI 控制机箱组成如表 1 所示。起落架收放控制系统通过接近传感器信号故障注入单元、电磁阀信号故障注入单元连接接近传感器和液压电磁阀，再接入 NI 控制机箱，并通过网络连接到 PC 端进行数据处理。NI 数据采集卡支持 LabVIEW 软件的驱动程序，系统中收集的各类数据均通过计算机中的 LabVIEW 软件进行存储和处理。

表 1 NI 控制机箱组成

板卡名称	板卡型号	主要性能
嵌入式控制器	PXI-8115	Intel® Core™ i5-2510E
数字 IO 卡	PXI-6528	24 通道隔离输入 24 通道隔离输出
继电器卡	PXI-2565	16 通道 SPST
通讯卡	PXI-8433/4	4 通道 RS485/RS232
通讯卡	PXI-C429/4	4 通道 ARINC429

2.6 电磁兼容设计

由于故障注入系统包含大量接近传感器、电磁阀及 NI 数据采集卡的信号交互，需要对系统进行必要的电磁兼容设计。故障注入系统所含电缆均采用双绞屏蔽电缆，其屏蔽层与地平面进行良好搭接；输入信号与输出信号接口处均采用 LC 低通滤波。通过采用以上屏蔽、接地和滤波的方式，提高了信号的抗干扰性，有效保证了系统运行的稳定性。

3　软件设计

3.1　软件流程

3.1.1　接近传感器信号故障注入

测试系统通过测试控制装置编程改变接近传感器信号故障注入单元的故障信号注入时刻和持续时间，将接近传感器的开路故障、误报远离故障、误报接近故障、以及短路过载互斥地注入到起落架收放控制系统，保证每次仅有一种故障注入，便于对起落架收放控制系统进行全面测试。测试软件流程如图 5 所示。测试控制的软件逻辑中接近传感器的开路故障、误报远离故障、误报接近故障、以及短路过载的优先级为从高到低，结合硬件电路的设计，保证了测试的安全性。

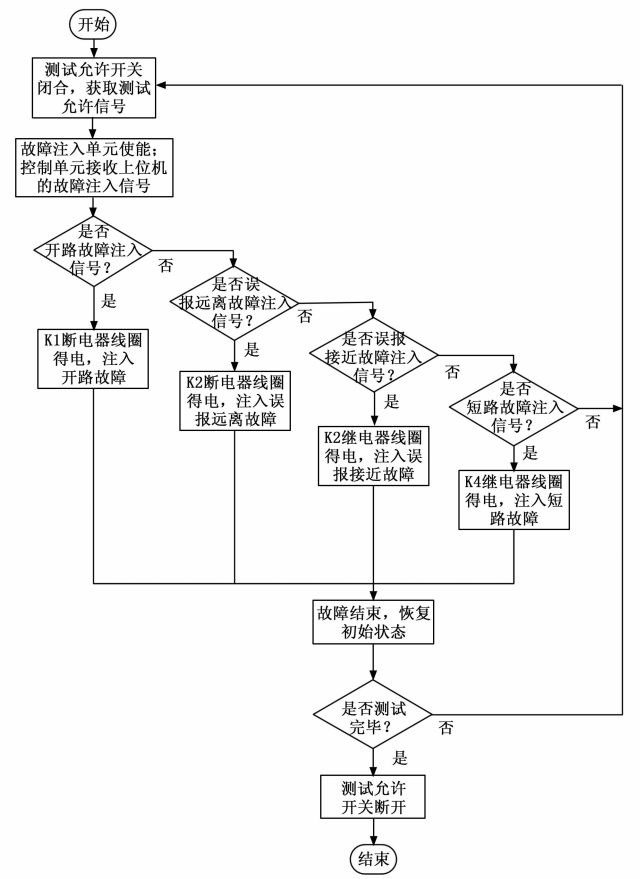

图 5　接近传感器信号故障注入软件流程

3.1.2　电磁阀信号故障注入

测试系统通过 RS485 总线通讯设定电磁阀信号故障注入单元可编程 DC 电源模块的输出电磁阀供电电压大小，注入电磁阀供电电压故障；并通过测试控制装置编程改变电磁阀信号故障注入单元的故障信号注入时刻和持续时间，将电磁阀的开路故障和短路过载互斥地注入到起落架收放控制系统，以便对起落架收放控制系统进行全面测试。测试软件流程如图 6 所示。测试控制的软件逻辑中电磁阀的开路故障、短路过载的优先级为从高到低，并且在短路故障注入时，当注入持续时间达到设定的持续时间时自动取消短路故障注入，结合硬件电路的设计，进一步提高了测试安全性。

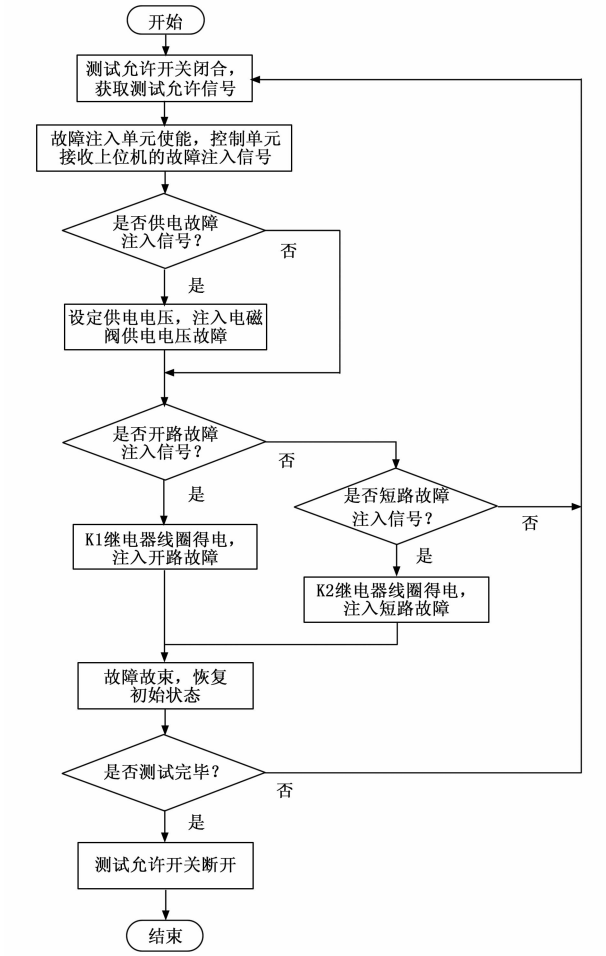

图 6　电磁阀信号故障注入软件流程

3.1.3　自动测试控制

测试控制主要包括系统初始化设置，故障注入控制、通讯信息解析、数据采集处理和存储功能。测试软件流程如图 7 所示。根据起落架收放控制系统的测试用例，分别进行接近传感器信号故障注入、电磁阀信号故障注入，以及两个余度的信号故障组合注入。通过对单路信号故障、多路信号故障、双余度信号交联故障（如余度 1 传感器开路，余度 2 电磁阀短路）等不同工况的测试，系统故障测试覆盖率≥95%。故障注入系统接收测试允许指令，可以自动执行测试用例，并记录测试数据，测试完成恢复至初始状态，大大提高了测试效率。

3.2　LabVIEW 软件设计

起落架收放控制故障注入系统采用 LabVIEW 软件进行程序开发，通用性好，易于编程，调试周期短，从而降低了设计的成本。LabVIEW 软件包含数据实时采集处理程序开发和上位操作显示界面设计，程序单次执行周期为 100 ms。

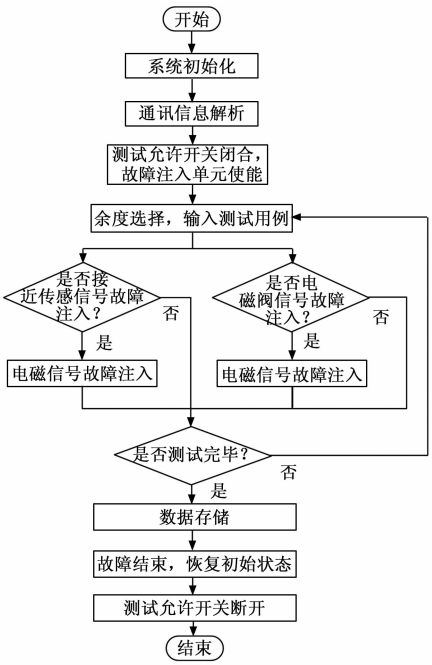

图 7 自动测试控制软件流程

接近传感器信号故障注入系统可独立完成 9 个通道的接近传感器信号开路、误报远离、误报接近和短路故障注入。结合接近传感器信号故障注入单元的硬件切换功能，可以完成 18 个接近传感器通道，共计 72 种故障注入。

电磁阀信号故障注入系统可独立完成 9 个通道的电磁阀信号开路、短路故障注入，以及供电电压故障。

4 试验结果与分析

根据图 2 所示的系统架构和以上软硬件详细设计，研制了一套起落架收放控制故障注入系统，如图 8 所示。其中右侧放大图自上而下分别为电磁阀信号故障注入单元、接近传感器信号故障注入单元和 NI 控制机箱。

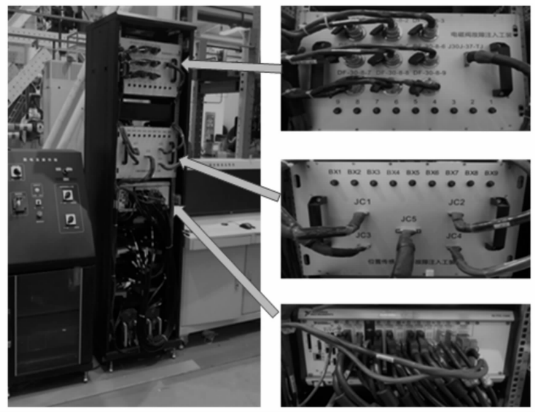

图 8 起落架收放控制故障注入系统

经 AG600 起落架收放控制系统试验验证，该故障注入系统可以实现正常模式和故障注入模式的灵活切换，其接近传感器信号故障注入、电磁阀信号故障注入功能正常。根据起落架收放控制系统的 ARINC429 通讯反馈数据，接近传感器信号与电磁阀信号故障注入数据记录分别如图 9 和图 10 所示。

故障注入响应时间如表 2 所示，其中接近传感器信号故障的响应时间以起落架收放控制单元输出的位置信号变化时刻为准，受收放控制单元自身电感解算的时间影响，故障注入所需响应时间相对较长。经试验结果分析确认，该系统满足起落架收放控制系统的故障注入需求。

传统起落架收放控制测试系统一般采用手动故障注入，受限于现场条件往往只能进行基本的开路故障注入测试，且人工测试准备时间长、效率低。而该故障注入系统采用自动故障注入测试，测试准备时间短，在故障

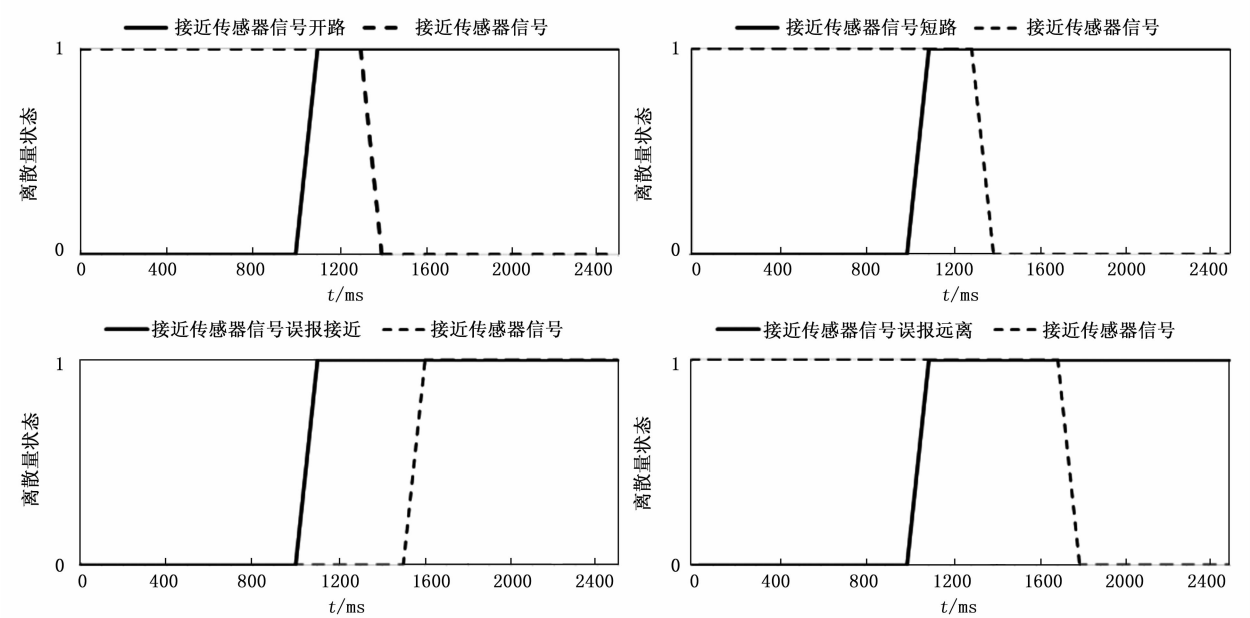

图 9 接近传感器信号故障注入数据记录

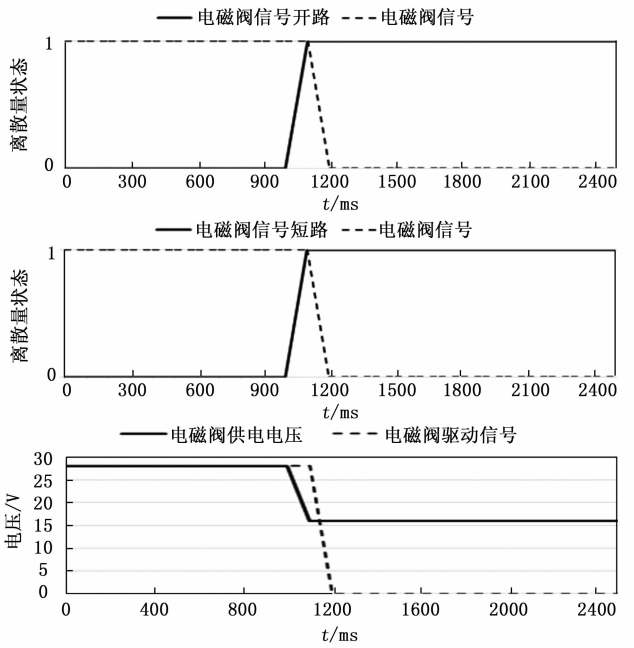

图 10　电磁阀信号故障注入数据记录

表 2　故障注入响应时间

分类	故障类型	响应时间/ms
接近传感器	开路故障	300
	误报远离故障	700
	误报接近故障	500
	短路故障	300
液压电磁阀	开路故障	100
	短路故障	100
	供电低电压故障	100

覆盖率、测试效率等方面具有极大优势。两者特点对比如表 3 所示。

表 3　与传统测试系统的对比

分类		传统系统	本系统
接近传感器	开路故障	具备	具备
	误报远离故障	无	具备
	误报接近故障	无	具备
	短路故障	无	具备
液压电磁阀	开路故障	具备	具备
	短路故障	无	具备
	供电低电压故障	具备	具备
不同故障组合测试		无	具备
测试覆盖率		＜40％	≥95％
测试方式与效率		手动，低	自动，高

5　结束语

通过设计一种基于 LabVIEW 的起落架收放控制故障注入系统，实现了起落架收放控制系统的接近传感器故障、液压电磁阀故障以及故障组合的实时注入与数据记录。结合 AG600 起落架收放控制系统的现场试验，该系统能够在正常模式和故障注入模式下持续工作，满足双余度信号故障组合注入测试的要求，具有良好的可靠性和稳定性。经试验验证，该系统提高了起落架收放控制系统极端工况下的测试充分性，测试覆盖率不低于 95％，具有测试安全、灵活、简便的优点，有望推广到其他类似型号应用。

参考文献：

[1] 郑连泽，王伟钢. 全金属电感式接近传感器的关键技术及应用 [J]. 海军航空工程学院学报，2010，25 (6)：707－710.

[2] 郭　键，董萍萍. 高精度电感式传感器测量系统设计 [J]. 工具技术，2010，44 (6)：88－90.

[3] 梁　锦. 电感式传感器故障自诊断的研究 [J]. 传感器技术，2001，20 (12)：13－14.

[4] 师义伟. 空客 A320 飞机接近传感器相关故障的研究与分析 [J]. 中国航务周刊，2021 (9)：52－53.

[5] 陈昕冉，葛红娟，李世宇，等. 航空用接近传感器环境影响因素分析与建模仿真 [J]. 测控技术，2023，42 (8)：31－37.

[6] 刘　赞，张　婷，肖晓蕾. 飞机液压电磁阀故障分析 [J]. 液压气动与密封，2019，39 (4)：79－81.

[7] 王金铎，付晓锋，吴　麟，等. 某型飞机襟翼液压电磁阀故障分析 [J]. 航空维修与工程，2021 (2)：73－75.

[8] 詹湘琳，刘洪越，荆　涛. 基于小波能量熵和邻域粗糙集的电磁阀故障诊断研究 [J]. 计算机测量与控制，2023，31 (10)：13－20.

[9] 赵帅杰，周　虎，梁　宽，等. 运载火箭电磁阀数据采集及故障诊断系统研究 [J]. 计算机测量与控制，2025，33 (5)：125－133.

[10] 杨建波，李　霄，任　佳. 基于 LabVIEW 的起落架落震试验数据分析系统设计 [J]. 计算机测量与控制，2016，24 (11)：261－264.

[11] 李艳萍，韩春雪. 基于 LabVIEW 的继电保护测试仪自动检测系统设计 [J]. 计算机测量与控制，2024，32 (7)：44－49.

[12] 高延超，梁　克，仪德英. 基于 LabVIEW 的高速多通道航天器通用测试系统设计 [J]. 计算机测量与控制，2019，27 (7)：59－62.

[13] 李俊杰，王　磊. 大型客机起落架系统机上地面试验接口测试设备系统设计及研究 [J]. 信息通信，2015 (10)：13－14.

[14] 万凯歌. 基于 LabVIEW 的新能源汽车充电检测系统设计 [J]，测控技术，2024，43 (12)：45－50

[15] CHEN J，LU L，ANDJELKOVIC M，et al. Dynamic fault mitigation for space radiation using fault injection and machine learning [J]. Journal of Electronic Testing，2025，(prepublish)：1－13.

（下转第 32 页）