

# 基于 ZYNQ 的机轮承载开关原位检测设备设计

姜庆阳<sup>1</sup>, 刘勇<sup>1</sup>, 吴月<sup>2</sup>, 宁显平<sup>2</sup>

(1. 海军航空大学, 山东烟台 264001;

2. 中国人民解放军海军 92329 部队, 辽宁葫芦岛 125000)

**摘要:** 针对机轮承载开关的传统测试方法存在的测试效率低下、测试精度不高等问题, 设计一套基于 ZYNQ 的便携式机轮承载开关原位检测设备; 该设备使用 ZYNQ 7020 作为控制器, 采用分辨率为 16 位的 AD 转换芯片 ADS8864 对承载开关、激光测距传感器进行信号采集, 通过 AXI 总线将数据缓存到 ARM 端的 DDR3, 采用 FPGA 模拟开关量信号, 使用 Qt 设计人机交互界面, 最终实现机轮承载开关的地面检测; 经验证, 该设备能够实现承载开关的四路通道通/断及一致性状态的自动检测, 辅助地勤人员完成协同起落架保障任务, 测距精度误差在  $\pm 1$  mm 以内, 通道一致性误差在 0.2 ms 以内, 已在多型飞机得到应用, 使用效果良好。

**关键词:** ZYNQ 7020; Linux 操作系统; 机轮承载开关; AD 转换; 信号模拟; IP 设计

## Design of In-situ Detection Equipment for Aircraft Wheel Load Switch Based on ZYNQ

JIANG Qingyang<sup>1</sup>, LIU Yong<sup>1</sup>, WU Yue<sup>2</sup>, NING Xianping<sup>2</sup>

(1. Naval Aviation University, Yantai 264001, China;

2. Unit 92329 of People's Liberation Army Navy, Huludao 125000, China)

**Abstract:** Aiming at the problems of low testing efficiency and low testing accuracy in the traditional testing methods for aircraft wheel load switches, a portable in-situ detection device for aircraft wheel load switches based on the ZYNQ is designed. This device selects a ZYNQ 7020 as the controller, and adopts a 16-bit AD conversion chip ADS8864 to collect the signals through the load switch and laser distance sensor. The data is buffered to the DDR3 of ARM side through AXI bus. The FPGA is used to simulate the switch signal, and the Qt is used to design the human-machine interaction interface. Finally, the ground detection of the aircraft wheel load switch is realized. After verification, this device can automatically detect the four-channel on/off and consistency status of load switch, and assist ground crew to complete collaborate landing support tasks. The distance measurement accuracy error is within  $\pm 1$  mm, and the channel consistency error is within 0.2 ms. It has been applied to multiple types of aircraft, with a good operational result.

**Keywords:** ZYNQ 7020; Linux operating system; wheel load switch; AD conversion; signal simulation; IP design

## 0 引言

飞机机轮承载开关是机上相关系统判断飞机处于地面/非地面状态的传感器, 该机件产生故障时会威胁飞行安全, 因此, 对于机轮承载开关的状态检测尤为重要。飞机机轮承载开关向机上传控系统、电源系统及通导系统、非航空电子系统监控处理机提供前轮承载

/非承载信号, 用于判断飞机与地面的接触状态。该信号是电传控制系统控制率转换和飞行前自检测、地面维护自检测的联锁条件, 同时也是电源系统、通导系统及非航电系统地面维护自检测的联锁条件。当该机件故障或该信号异常时, 会导致相关系统地面维护自检测无法进入或空中误进入维护自检测、地面/空中控制率转换异常、地面无法折叠机翼或空中误折叠机翼等严重问

收稿日期: 2025-04-02; 修回日期: 2025-06-09。

基金项目: 山东省泰山学者基金(TSTP20221146)。

作者简介: 姜庆阳(1995-), 男, 硕士, 助教。

通讯作者: 刘勇(1982-), 男, 博士, 教授。

引用格式: 姜庆阳, 刘勇, 吴月, 等. 基于 ZYNQ 的机轮承载开关原位检测设备设计[J]. 计算机测量与控制, 2026, 34(4): 27

题,对飞行安全造成严重危害。此外,机轮承载开关可以配合完成对飞机起落架的维护检修、飞机电传系统的功能验证等工作。

传统的机轮承载开关原位检测方法大都依靠飞控检查仪、万用表等工具组合完成,需要多人协同开展前起落架支柱匹配性调节和检查的工作,现有的检测方法过程简单、易于操作,能够满足一般条件下的测试要求,但对于部队外场的飞机维护工作,存在检测效率低下、检测精度不高以及功能单一等问题。

近年来随着仪器科学的发展,越来越多的研究倾向于使用自动化程度较高的便携式设备解决部队对于机轮承载开关原位检测的需求。例如,文献[1]设计了一套针对起落架单元的综合检测系统,使用数字量输入板卡采集轮载开关的信号并进行处理;文献[2]中设计的无人机起落架信号模拟系统,使用按键模拟轮载开关多个通道的离散量信号;文献[3]中研制了一种便携式轮载开关检查装置,该设备内置检测电路,将轮载开关接入后,使用指示灯显示通/断情况。以上的研究进展在一定程度上促进了轮载开关的检测自动化程度,却存在以下不足:1)检测设备功能单一,检测功能、测距功能和信号模拟功能相互独立,无法精密配合使用;2)自动化程度仍旧不高,无法独立完成对飞机起落架的维护自检工作。

针对以上问题,设计一种基于 ZYNQ 的便携式飞机机轮承载开关原位检测设备,实现承载开关的响应状态及通道一致性、飞机电传系统相关功能的检验,并集成了测距、人机交互等模块,进一步完善了原位检测设备的功能。

## 1 机轮承载开关测试原理

### 1.1 原位测试

机轮承载开关安装在飞机前起落架支柱上,原位测试是指在不拆卸部件的情况下,直接在安装位置对其开关状态、通道一致性、与电传系统交互功能等指标进行测试。

由于机轮承载开关具有 4 余度输出信号,分别输入到飞机的相关电控系统,且随着开关与地面的接触面不同,会导致四路信号的输出顺序、输出结果不同,当各通道时间间隔过大时,会导致电控系统对飞机的地/空状态判断不准(比如某机型的轮载开关通道间最大时间间隔超过 5 ms 阈值时,进行警告报错),故该设备应检测四余度输出信号的通道一致性,判断承载开关是否故障。

此外,该设备还应验证轮载信号是否正确传输至飞机电传分系统,具体的,模拟 4 通道开关接通、断开或部分通道接通等各种状态,验证电传计算机是否能够准

确检测到机轮承载状态变化情况,为相关故障隔离提供帮助<sup>[4-5]</sup>。

### 1.2 协同起落架测试

根据飞机维修手册规定,安装前轮承载开关时,应按要求完成承载开关同前起落架支柱匹配性调节和检查。

某型飞机配备有两个前轮承载开关,并排安装在飞机前起落架支柱上。为模拟飞机降落时前起落架的收放过程、检验实际工况下轮载开关的可靠性,地勤人员使用千斤顶对飞机进行顶升操作,使飞机前起落架支柱呈现伸缩变化,并对轮载开关状态进行测试。具体的,当支柱压缩量在 45~48 mm 时,左、右前轮承载开关输出信号由非承载转换为承载;前起落架支柱释放过程中,当支柱剩余行程不小于 25 mm 时,输出信号由承载转换为非承载。这不仅要求对轮载开关信号进行检测,也要在轮载开关输出信号变换时,使用测距仪器对飞机支柱的压缩量和释放量进行测试。

## 2 系统总体设计

系统组成如图 1 所示,主控模块是整个系统的核心,用于控制和协调各功能模块的运行,采用集成 ARM+FPGA 结构的 ZYNQ 7020 作为主控芯片实现对整个系统的调度。主控模块的主要功能为:通过轮载开关信号检测电路采集 4 路开关量信号,显示四路信号的通道一致性,当通道间时间差大于阈值时进行报警;通过激光测距信号检测电路采集模拟量信号,测量飞机前起落架支柱的压缩量;具有多种通信接口,比如 SPI 接口用于对 AD 转换芯片的控制,RS232 通信接口用于测试数据的传输;能够搭载 Linux 系统,设计良好的人机交互界面,地勤人员通过观察轮载开关通/断情况辅助进行前起落架支柱压缩量的测试。

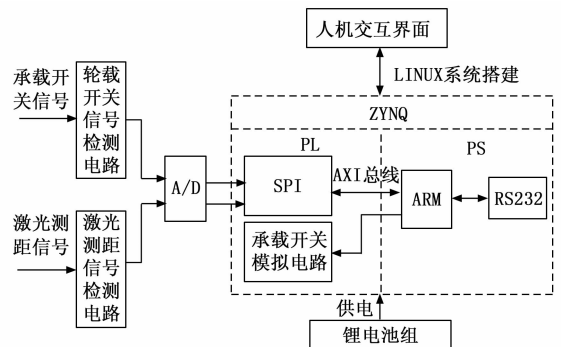


图 1 系统总体设计框图

检测设备主要实现轮载开关信号的检测和模拟以及测距功能,具体的,承载开关与激光测距传感器输出的模拟信号作为前端输入信号,经过信号调理后使用 AD 芯片进行采集,采集到的数据通过 AXI 总线传输到 DDR3 进行存储,由 ARM 进行处理,判断机轮承载开

关的工作状态并显示; 根据需求在界面设置承载开关各通道参数, 由 FPGA 输出开关量信号<sup>[6-7]</sup>。

### 3 硬件设计

硬件电路主要包括处理器模块、承载开关信号检测模块、激光测距信号检测模块、承载开关模拟模块等部分。

#### 3.1 处理器模块

本文采用的 ZYNQ 7020 芯片, 该芯片集成了处理器系统 (PS, processing system) 和可编程逻辑电路 (PL, programmable logic) 部分<sup>[8-9]</sup>, 其中, 处理器芯片为 ARM 的双核处理器, 可编程逻辑电路为 FPGA, 使用 AXI 内部总线实现通信, 这种结合方式大大减少了数据处理延时, 实现纳秒级实时响应。此外, 该芯片采用 28 nm 工艺, 支持硬件级的动态电压与频率调整, 可根据负载需求实时调节处理系统 (PS) 和可编程逻辑 (PL) 的功耗, 实现分区供电, 支持低功耗的外设与接口, 并利用 PL 辅助 ARM 完成算法运算, 有效地降低了芯片功耗。

与传统的 FPGA 及 SoC 芯片相比, ZYNQ 7020 具有 FPGA 的可扩展性和灵活性<sup>[10]</sup>, 以及专用集成电路的相关性能。在设计一个高效的数据采集和处理系统时, 当进行多路输入信号的采集以及预处理阶段时, 利用 FPGA 高速的并行处理能力来执行这些要求实时性的任务。ARM 处理器负责调度整个系统充当系统的控制核心, 包括下达采集指令、接收数据以及数据的上传等功能<sup>[11-12]</sup>。

#### 3.2 视频信号生成模块

视频图像的显示使用 HDMI 屏幕, 需要调用硬件系统中的 AXI4-Stream to Video Out、AXI4-Stream Subset Converter IP 等系列 IP 核来实现, 能够实现 AXI4 接口与视频接口的数据交互。

具体地, 使用 Processing system IP 核作为硬件系统基础, 可以对芯片的各种端口与功能进行参数设置。Video Timing Controller IP 主要用于生成和控制视频信号的时序, 确保图像数据按照 HDMI 协议正确传输和显示, AXI4-Stream Subset Converter IP 用于调整数据流的位宽、对齐方式或协议子集, 以适应不同模块的接口要求, AXI4-Stream to Video Out IP 用于将 AXI4-Stream 数据流转换为视频时序信号, 以便驱动显示器, RGB to DVI Video Encoder IP 是一种数字视频编码模块, 用于将 RGB 格式的像素数据转换为 DVI (Digital Visual Interface) 信号, 使其能够通过 DVI 接口传输到显示器, 以上 4 个 IP 核的设计共同完成了 HDMI 信号的输出, 作为上位机界面显示的基础, 视频信号生成模块的 IP 核设计如图 2 所示。

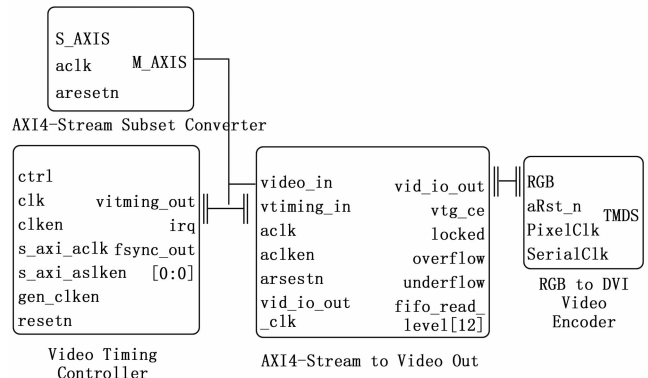


图 2 自定义 IP 核设计框图

#### 3.3 轮载开关信号检测模块

该电路对机轮承载开关的四路信号进行调理, 使信号能被 AD 转换芯片采集, 转换为后续可处理的数字信号, 主要实现硬件消抖、隔离功能。

由于机械按键的物理特性, 按键被按下或释放的过程中, 存在一段时间的抖动, 这就导致在识别的时候可能检测为多次的按键按下, 对于信号的状态检测带来识别困难, 所以在使用按键时往往需要设计硬件消抖电路。承载开关的信号检测电路如图 3 所示, TLP521 是光耦, 用于隔离模拟信号; 利用电容充放电的延时原理, 设计按键消抖电路, 可有效消除纹波; PESD3V3L1BA 器件是一个低电容双向二极管, 起到静电保护的作用; 电容会吸收抖动产生的高频噪声, 提供一个较短的电荷释放路径, 让静电通过这些器件来泄放到地上。从图 3 可知, 当按键 S1 未被按下时, 此时光耦不通, 引脚 4 为高电平, 当按键 S1 按下时, 光耦内部导通, 引脚 4 状态为低电平, 此时检测引脚的输入电平, 即可判断按键是否被按下。

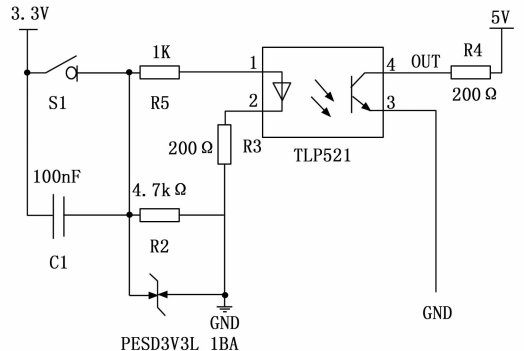


图 3 承载开关信号检测电路图

#### 3.4 激光测距信号检测模块

激光测距传感器布置在飞机前起落架上, 当前起落架的支柱发生压缩或释放时, 激光测距传感器随支柱移动, 激光照射在末端凸台处, 实时测量支柱的距离变换量。为具有更好的抗干扰性能, 本方案选用的激光测距

传感器为模拟输出 4~20 mA，测量距离为 30 m，测量精度可达±1 mm，距离计算公式如下：

$$Distance = \frac{I - 4\text{mA}}{20 - 4\text{mA}} \times 30 \quad (1)$$

其中：Distance 为实测距离，I 为实测电流大小。相应地，为便于后续 AD 转换芯片采集信号，设计激光测距信号检测电路，对激光测距传感器的输出信号进行放大和处理，该电路主要包括输入电流—电压转换、滤波、AD 采集等部分，电路如图 4 所示。

输入电流—电压转换部分主要将传感器输出的电流信号转换为电压信号，因为主控芯片的对应引脚电压输入范围为 0~3.3 V，且激光测距传感器输出 4~20 mA 信号，所以采样电阻取值 120 Ω，则转换的电压范围为 0.48~2.4 V，二极管 D1 用于限制电压，二极管 D2 用于防止电流源反接。

电压调理部分用于调理电压值，并衰减两端电压，便于 ADC 的电压采集。本方案使用的运算放大器为 AD8606，该运放的输出范围为 0.1~2.4 V，具有 100 mV 的余量以确保线性，与后续 ADC 的输入范围（0~2.5 V）相匹配。此外，该运放的另一个通道用作跟随器，缓冲 ADS8864 的参考电压值。

运算放大器后面使用 RC（C3、R6）滤波器，以降低带外噪声，RC 滤波器的截止频率设置为 398 kHz，与 ADC 的采样率相匹配。

在本方案中，为提高轮载开关信号和激光测距信号的测试精度，故采用外置的 16 位 AD 转换芯片 ADS8864 作为采集芯片，它的采样率为 400 kSPS，采样精度为 16 bit，SPI 通信兼容串行接口，能够满足测试需求。

在激光测距信号检测电路中，对各部分进行分析如下：

ADC 的输出电压计算公式为：

$$V_{out} = I_{in}R_1 \left(1 + \frac{R_5}{R_3 \parallel R_4}\right) - V_{ref} \frac{R_5}{R_4}$$

其中：I<sub>in</sub> 为传感器输出电流信号，为 4~20 mA；R<sub>3</sub>∥R<sub>4</sub> 表示两个电阻并联，所以，电路的低频增益为：

$$G = \frac{\Delta V_{out}}{\Delta I_{in}} = R_1 \left(1 + \frac{R_5}{R_3 \parallel R_4}\right) = \frac{(2.4 - 0.1)V}{(20 - 4)\text{mA}} \quad (2)$$

同时 R<sub>1</sub> 上的电压降不得超过输出范围的上限，即：

$$R_1 \times I_{in(max)} = R_1 \times 20\text{mA} \leq 2.4\text{V} \quad (3)$$

当 R<sub>1</sub> 取值 120 Ω 时，R<sub>3</sub>∥R<sub>4</sub> 代入式（2）计算得到 0.198，对于最小输入电流，取 I<sub>in</sub> = 4 mA，ADC 芯片的基准电压为 2.5 V，代入式（1）中得到式（4）：

$$V_{out(min)} = 0.1\text{V} = 4\text{mA} \times R_1 \left(1 + \frac{R_5}{R_3 \parallel R_4}\right) - V_{ref} \frac{R_5}{R_4} \quad (4)$$

得到 R<sub>3</sub> = 0.19，因此可以确定 R<sub>3</sub>、R<sub>4</sub> 和 R<sub>5</sub> 的值，比如，选定 R<sub>5</sub> 为 2 kΩ，则 R<sub>3</sub> 的值为 10.53 kΩ，R<sub>4</sub> 的值为 247 kΩ。此外，由于激光测距精度要求较高，且电路的主要误差来源于电阻，因此需要进行校准，尽可能消除误差。因为测距结果与输出电流信号成比例关系，所以本方案选用两点校准方法。首先，激光测距传感器输出最小值 4 mA，此时记录 ADC 的采集值 U<sub>1</sub>，修改为输出值为最大 20 mA，记录此时 ADC 的采集值 U<sub>2</sub>，此时的增益系数为：

$$G = \frac{\Delta V_{out}}{\Delta I_{in}} = \frac{(U_2 - U_1)V}{16\text{mA}} \quad (5)$$

此时可以记录现在可以使用公式（6）计算与 ADC 输出的任何电压值相对应的输入电流，进而得到距离值与电流的关系：

$$I_{in} = 4\text{mA} + \frac{U_x - U_1}{G} \quad (6)$$

### 3.5 承载开关信号模拟模块

该模拟模块需要按照指定时序，模拟机轮承载开关的四路信号输出。使用 vivado 设置 GPIO 参数，使用定时器设置好时间间隔，进行电平翻转，输出相应的开关量信号即可。

### 3.6 通信模块

本文主要用到 RS232 和 SPI 通信功能，因为 ZYNQ 7020 的 ARM 端留有特定的通信接口，本文只需在固件设计时在 Processing\_system IP 核进行选中，具体的

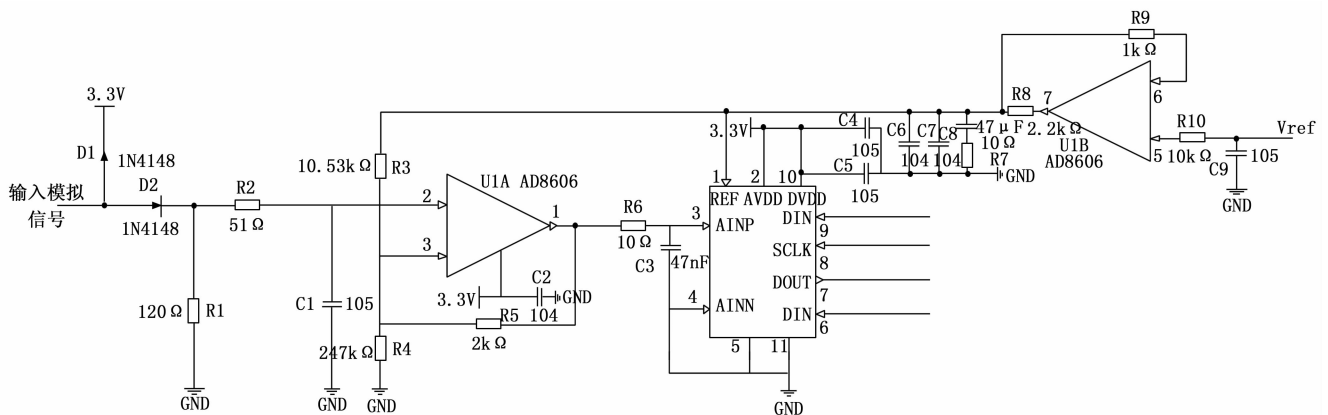


图 4 激光测距信号检测电路图

IP 核如图 5 所示。

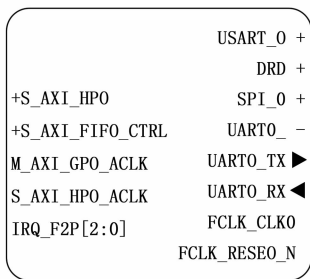


图 5 Processing\_system IP 核设计框图

### 3.6.1 RS232 通信

ZYNQ 7020 芯片预留了 UART 接口, 在外部电路中设计 UART 转 RS232 电路, 实现与上位机进行 RS232 通信, 如图 6 所示。

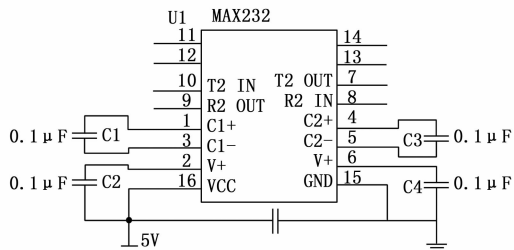


图 6 UART 转 RS232 电路图

将采集的数据使用 RS232 发送至上位机进行数据存储分析, 波特率为 384 000 bps, 通信帧定义如表 1 所示。

表 1 RS232 通信帧定义

字节序号	内容	说明
1~2	EB 90	帧头
3		数据类型
4~5		数据
6~7		CRC 校验

通信帧的前两个字节作为帧头, 第 3 个字节描述数据类型, 比如通道一致性数据、距离数据等, 第 4~5 个字节是具体的数据内容, 最后两个字节使用 CRC16 对前面的数据进行校验, 确保数据的正确传输。

### 3.6.2 SPI 通信

ZYNQ 7020 芯片通过 SPI 与 ADS8864 进行通信,

具体的连接如图 7 所示。

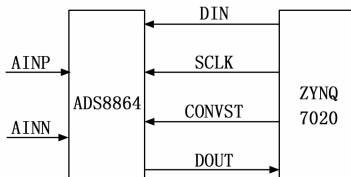


图 7 ADS8864 与 ZYNQ7020 连接图

由于在 FPGA 内的程序执行完全是按照时钟进行, 因此对于 ADS8864 严格正确的时序控制是保证数据正确采集的前提, AD 转换芯片的时序控制如图 8 所示。

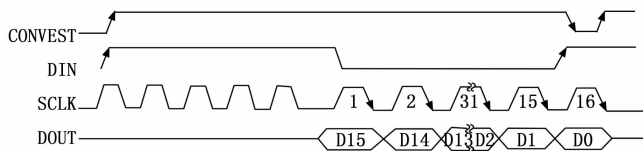


图 8 ADS8864 工作时序图

CONVST 为转换启动信号, 下降沿触发, 负责启动 ADC 采样与转换过程; SCLK 为串行时钟, 用于同步数据输出和配置寄存器; DOUT 为转换后的 16 位数据, 在 SCLK 下降沿逐位输出转换结果。在 CS 工作模式下, ZYNQ 7020 拉低 CONVST, ADS8864 对开关量信号与激光测距信号进行采样, BUSY 拉高, 当检测到 BUSY 信号变低时, ZYNQ 7020 生成 16 个 CLK 周期, 分别在下降沿读取 DOUT 数据, 此时拉低 CONVST 完成一次转换过程。

### 3.7 电源电路

设备采用锂电池供电, 本文的锂电池输出的额定电压为 DC12 V、额定电流为 4 A, SPI 通信用于读取电池信息。电源转换电路主要采用 DC-DC 电源芯片, 将锂电池输入的 DC12 V 直流电源转换各电路需要的电源电压, 本方案中主要转换为 DC5 V、DC3.3 V、DC2.5 V, 详细电路如图 9 所示。

本文使用 LM2596-5 V 芯片, 将 DC12 V 转换为 DC5 V, 给触摸屏、AD 芯片、光耦芯片等进行供电, 本文选用 LM1117-3.3 芯片将 DC5 V 转换为 DC3.3 V, 用于处理器供电, 使用 ADR4525 将 DC3.3 V 转换为 DC1.8 V, 给处理器供电。

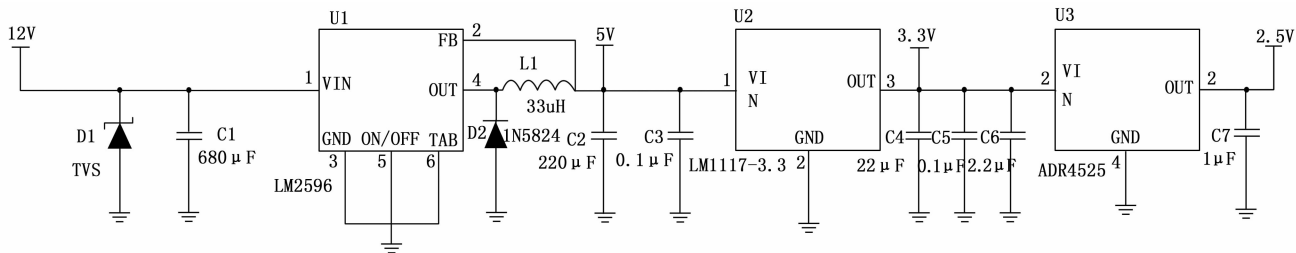


图 9 电源电路图

### 4 软件设计

软件设计主要分两部分完成，嵌入式软件设计部分主要实现 Linux 系统搭载，完成接口驱动设计、数据采集及存储功能等，并接受软件命令，实现软件对硬件资源的调配；上位机软件部分实现设备与用户的交互，建立合理完整的测试流程，协助用户完成测试任务。

#### 4.1 嵌入式软件设计

由于对承载开关信号的测试精度要求较高，且需要设计良好的人机交互界面，对于系统的性能提出一定要求，所以本文在 ZYNQ 上搭建 Linux 系统。Linux 内核为用户空间提供了系统调用接口，允许用户在应用层开发程序时调用内核的功能，而内核包含启动文件、根文件系统和设备驱动等，用户通过编写驱动程序，调用 ZYNQ 的硬件资源，从而实现了应用程序对硬件资源的调用。这种方式通过合理调度资源，协同软硬件设计，提高处理速度和效率，进一步提高测试精度。其架构如图 10 所示<sup>[13-14]</sup>。

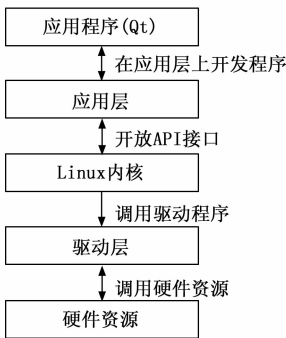


图 10 Linux 系统架构图

本文的嵌入式软件设计主要指 Linux 系统移植和相关驱动程序设计<sup>[15-16]</sup>。

##### 4.1.1 Linux 系统移植

在 ZYNQ 上移植 Linux 系统并进行工程应用，主要包含以下 4 个部分：

1) 引导加载程序 (Bootloader) 的制作。本文选用 u-boot 作为启动方式，将工程生成的 bitstream 文件、u-boot 和 FSBL 文件，编译得到 BOOT. bin 文件。

2) Linux 内核的编译。根据需求编译内核，主要涉及配置设备树和设计相应的驱动程序。

3) 文件系统的下载。本文选用 EXT4 作为 Linux 内核挂载的根文件系统，提供系统配置文件和应用程序所需的库函数。

4) 应用程序设计。在完成操作系统的搭载后，根据工程需求，完成应用程序的设计，本文主要使用 Qt 完成界面设计。

本文使用赛灵思提供的 Petalinux 工具完成 Linux 系统的移植与定制。首先，使用 vivado 进行硬件工程

设计，生成 bitstream 文件，并在 Vitis 中生成相应的 FSBL 文件，下载官方提供的 u-boot 文件，联合编译生成 Boot. bin 文件，作为操作系统的启动文件。其次，下载官方的内核文件，完成 Linux 内核的编译，需要注意的是，要根据工程所需的硬件资源，配置设备树，并设计相应的驱动程序，得到 UImage 和 devicetree 文件。最后，下载 EXT4 文件系统作为根文件系统，并将 Qt 运行所用到的库放在其中。制作 SD 卡，作为操作系统启动的存储空间，将上文提到的 Boot. bin、UImage 和 devicetree 文件放在 FAT 区，将根文件系统放在 EXT4 区，从而完成了 Linux 系统的移植，图 11 是 Linux 系统移植的流程框图。

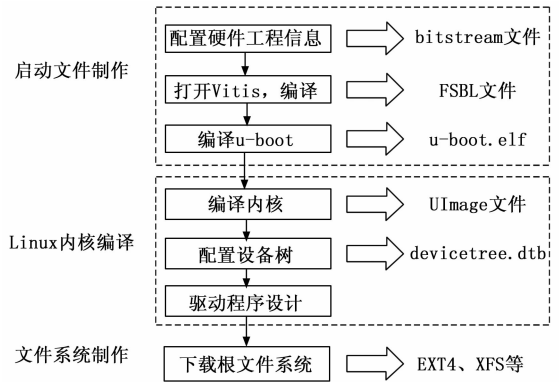


图 11 Linux 系统移植的流程框图

##### 4.1.2 驱动程序设计

驱动程序是操作系统与硬件之间的纽带，通过驱动程序设计，Linux 系统能够高效地管理和控制硬件设备，确保系统的稳定性、性能和兼容性，本文主要根据用到 HDMI、USB 和 SPI 接口等，以下对 USB 和 SPI 驱动设计进行简要介绍<sup>[17]</sup>。

###### 1) 部分 USB 驱动代码：

```

static int __init usb_test_init (void) { return usb_register (&usb_drv_struct); }; // 创建驱动文件，使用 usb_register 向 Linux usb 子系统注册；

static struct usb_device_id usbmouse_as_key_id_table [] = {}; //当系统接入新的 USB 设备时，内核会遍历已注册的 USB 驱动，并调用已匹配的驱动程序；

static int usbmouse_as_key_probe (struct usb_interface * intf, const struct usb_device_id * id) {}; //当设备匹配好对应的 USB 驱动时，调用该函数进行初始化；

static struct usb_driver usbmouse_as_key_driver = {}; //表示 USB 驱动程序的结构体函数；

static void usbmouse_as_key_irq (struct urb * urb) {}; //当 USB 设备完成一次数据传输时，内核调用该函数处理接受到的信息。
  
```

###### 2) SPI 驱动设计：

在 Linux 内核中进行 SPI 的驱动设计主要有以下几

个步骤:

(1) SPI 控制器的初始化。第一步, 使用 spi\_alloc\_master, 函数分配一个 spi\_master 的空间, 第二步, 使用 spi\_register\_master 函数将之前分配的 spi\_master 注册到内核;

(2) 进行关键函数的设计。比如: spi\_register\_master 函数代表特定的 spi 设备, 注册 spi 控制器到内核中; spi\_driver 函数代表外设驱动, 即建立内核与 spi 设备的联系;

(3) 使用 struct spi\_message 和 spi\_transfer 函数实现 spi 的数据传输工作。

## 4.2 上位机软件设计

本文的应用程序主要实现人机交互界面的设计, Qt 具有丰富的功能库<sup>[17-18]</sup>, 优秀的跨平台能力, 强大的图形界面开发功能, 因此成为界面设计的优选。人机交互界面的功能主要是根据测试任务设计合理的测试流程, 便于工作的开展, 设备的工作流程如图 12 所示。

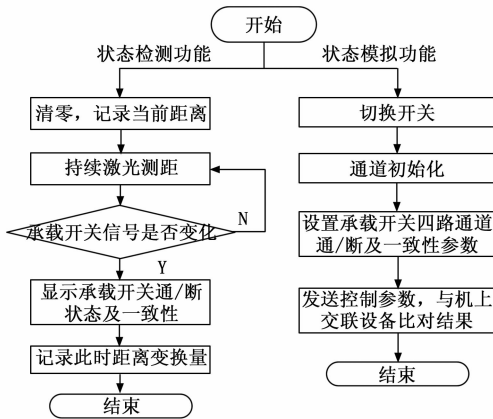


图 12 工作流程图

该设备主要有两个功能, 分别是检测承载开关信号协助测量支柱压缩量和模拟承载开关信号协助机上系统交联故障隔离。在主界面选择状态检测功能, 则首先清零测距信息, 当前轮支柱开始压缩后持续测距, 直至前轮接触地面, 设备捕捉承载开关的通道状态, 记录此时的测距数据和通道间的时间差值, 如果轮载开关的 4 个通道间时间差超过 10 ms, 显示界面进行报警, 说明该开关的性能存在问题。

若在主界面选择状态模拟功能, 可以根据需要切换开关, 初始化通道信息, 并设置通道间的时序, 确认后输出开关量信号, 与机上交联设备比对输出结果, 验证承载开关功能。

## 5 设备性能测试

机轮承载开关原位检测设备尺寸为 22 cm × 15 cm × 12 cm (长 × 宽 × 高), 前面板右侧为多种轮载开关接口与通信接口, 体积较小, 便于携带在外场测试使用,

可兼容多种机型的承载开关接口, 电池续航时间两小时以上, 检测过程自动化较高<sup>[19-20]</sup>。

为验证该设备的功能, 对于测距精度与通道一致性这两个指标进行数据统计。测距实验在实验室内进行, 使用经过校准的标定板作为测试对象, 以 20 cm 为真实值, 使用本设备的激光测距传感器进行测量作为测量值, 进行 20 次重复实验, 将二者数据的差值进行统计, 得到数据如表 2 所示。

表 2 激光测距实验数据表

实验次数	真实值/cm	实测值/cm	误差/mm
1	20.01	20.08	0.7
2	20.01	20.08	0.7
3	19.99	19.98	-0.1
4	19.98	20.06	0.8
5	19.98	19.90	-0.8
6	19.99	19.93	-0.6
7	20.01	20.06	0.5
8	19.98	19.89	-0.9
9	20.01	20.11	1
10	19.99	19.92	-0.7
11	20.00	20.10	1
12	19.98	19.90	-0.8
13	20.01	19.95	-0.6
14	19.99	20.08	0.9
15	20.00	19.90	-1
16	19.98	20.06	0.8
17	20.01	19.95	-0.6
18	19.99	20.08	0.9
19	20.01	19.95	-0.6
20	20.00	20.10	1

根据表中的数据可以看到, 距离的测量值与参考值的误差均在 ±1 mm 范围以内, 表明本设备的测距精度符合设计要求。

在通道一致性实验中, 以一个承载开关为例, 将其四路通道信号输出线缆同时接到自动化测试设备中 (ATE, automated test equipment), 对内部检测设备进行程控, 设计开关量检测程序, 采集四路开关量信号并进行排序, 测试其时间间隔, 进行 20 次重复实验, 通过观察 ATE 与本设备的显示结果, 计算每次测量的差值, 得到的数据如表 3 所示。

由于各个通道的物理结构设计不完全一致, 且飞机机轮每次接触地面的角度有所偏差, 各通道的时间间隔误差的平均值有所区别, 分别是 0.103、0.093、0.11 和 0.12 ms, 实验数据表明, 4 个通道的时间间隔误差均在 0.2 ms 以内, 符合指标要求。

## 6 结束语

根据现场实际调研发现, 飞机的保障人员使用万用

表 3 通道一致性实验数据表 ms

实验次数	通道 1 误差	通道 2 误差	通道 3 误差	通道 4 误差
1	0.097	0.075	0.143	0.183
2	0.101	0.104	0.147	0.076
3	0.123	0.083	0.085	0.186
4	0.078	0.168	0.136	0.147
5	0.132	0.092	0.113	0.241
6	0.096	0.089	0.102	0.112
7	0.053	0.167	0.168	0.125
8	0.104	0.093	0.037	0.056
9	0.087	0.079	0.152	0.098
10	0.142	0.074	0.089	0.198
11	0.115	0.085	0.142	0.172
12	0.128	0.101	0.134	0.013
13	0.083	0.057	0.071	0.153
14	0.112	0.188	0.125	0.062
15	0.065	0.071	0.063	0.089
16	0.134	0.082	0.118	0.134
17	0.091	0.095	0.108	0.107
18	0.108	0.087	0.096	0.215
19	0.072	0.079	0.157	0.142
20	0.112	0.063	0.082	0.028

表、直尺等方式对飞机前轮支柱压缩量进行测试时,常常需要 2~3 人配合,花费约 20~30 min 完成一次测试流程,且测量精度不高,测试效率较低,而使用本设备可实现单人测量,将一次测量时间缩短至 5 min 以内,并实现±1 mm 的测距精度和 0.2 ms 的通道一致性测量精度,显著地提高了测试效率和测量精度,具有一定的实际应用价值。

不过本文存在以下不足:本设备的测试环境较为单一,主要在实验室以及秋季机场进行测试,未在高温、高湿度等恶劣环境下进行性能测试,对设备的测试性能检验有所不足。在未来的工作中,应在不同情境下对设备进行测试,检验温度、湿度及震动等因素对设备的测试精度、处理延时带来的影响,并努力开发智能分析功能,探索轮载开关潜在故障预测等功能,进一步辅助地勤人员进行故障排除。

本文选择的设计方案基于 ZYNQ 平台设计,结合了 FPGA 的高度硬件可编程性和完整的 ARM 处理器系统,在该系统中,ARM 处理器与 FPGA 之间的数据传输速度快且非常稳定,能够降低开发的复杂程度,此外,基于该平台搭载的 Linux 操作系统,具有强大的软件生态系统支持,便于开发复杂的应用,为相关领域的各种工程实践提出一种有效的解决方案,有广泛的应用价值。

#### 参考文献:

[1] 龚姝文,叶波,王振文.一种便携式轮载开关检查装置

[P].中国:201910201148.4,2019-03-18.

- [2] 张应猛,苗勇.无人机起落架信号模拟系统 [P].中国:201911361021.5,2019-12-25.
- [3] 周志为.某新型飞机起落架控制单元检测系统的设计 [D].西安:西安理工大学,2017.
- [4] 孙国萃,杜军,冯祥虎,等.基于 ZYNQ7000 Linux 的数据采集系统设计和实现 [J].现代信息科技,2022,6(4):85-87.
- [5] 李仑升,蹇恒源,张浩,等.基于 ZYNQ 的模拟量采集接口设计 [J].山西电子技术,2023(2):38-39.
- [6] 曹尚斌.基于 ZYNQ 的多通道数据采集系统的研究 [D].太原:中北大学,2023.
- [7] 关凯元,葛善乘,李坤龙,等.基于嵌入式技术的小型化导弹测试设备设计 [J].计算机测量与控制,2024,32(12):166-171.
- [8] 杨奥,向星岩,王刚,等.基于 FPGA 的高精度频率测量系统设计及应用 [J].计算机测量与控制,2024,32(9):133-141.
- [9] 姚洪奎,颜雁军,陈凯,等.基于 ZYNQ 平台的便携式示波器 Linux 启动 [J].电子测量技术,2020,43(9):182-188.
- [10] 王凌远,甄国涌,储成群,等.基于 ZYNQ 的内窥镜图像处理系统设计 [J].舰船电子工程,2024,44(7):108-112.
- [11] 赵方亮.智能家居中的嵌入式 Linux 移植与驱动程序设计 [D].秦皇岛:燕山大学,2016.
- [12] 胡琴.Linux 平台下硬件检测与驱动适配系统的设计与实现 [D].北京:中国科学院大学,2017.
- [13] 崔文涛,沈军,孙富礼,等.基于 ZYNQ 的通用板卡测试系统设计 [J].制导与引信,2024,45(2):20-24.
- [14] 赫忠天,曾庆立,芮天喆.基于 ZYNQ Linux 平台的 FPGA 外设控制研究 [J].电子制作,2023,31(19):110-113.
- [15] 江必铭,毛汉领,李欣欣,等.基于 ZYNQ 的多接口协议转换器设计与实现 [J].仪表技术与传感器,2024(11):34-39.
- [16] 黄齐游.基于 ZYNQ 的雷达测试仿真系统软件设计 [D].成都:电子科技大学,2023.
- [17] 张朝元,邵高平,汪洋.基于 ZYNQ-7000 的嵌入式 Linux 移植 [J].电子科技,2018,31(1):9-11.
- [18] 冯祥虎,肖世伟,杨美娜,等.基于 ZYNQ7000 Linux 的数据发射系统设计和实现 [J].现代信息科技,2023,7(4):72-74.
- [19] 孙伟成,蔡于清,林广峰,等.基于 ZYNQ-7020 的多通道超声检测系统硬件设计 [J].无损探伤,2024,48(6):12-14.
- [20] 杨银松,王晖,康勇,等.基于 ZYNQ 与 AD9361 的多样式干扰信号模拟器设计与实现 [J].舰船电子对抗,2025,48(1):93-100.