

基于 STM32 的雷达信号跟踪控制系统设计

尹鹏, 崔更申, 凌鸣, 黄廷辉, 贺文

(桂林电子科技大学 计算机科学与工程学院, 广西 桂林 541004)

摘要: 雷达信号跟踪控制系统是航空测控系统的重要组成部分, 主要作用是对航空器进行探测定位跟踪; 为了保证航空器运行过程中, 天线能够实时地对准航空器, 保证通讯的稳定性和实时性, 设计了一种基于 STM32 的雷达信号跟踪控制系统; 雷达信号跟踪控制系统采用了 STM32F407IG 控制芯片作为信号跟踪控制系统的处理器; 通过处理来自四相调制接收机的方位差电压 ΔA 信号和俯仰差电压 ΔE 信号, 决定需要的控制动作; 为了保证方位差电压 ΔA 信号和俯仰差电压 ΔE 信号的可靠性, 设计实现了信号的硬件校正以及软件滤波; 使用 PWM 脉冲功能控制步进电机转动, 利用驱动器实现电机运动精度和速度的可控; 采用高精度高速率的模数转换器提高差电压信号数字化的可靠性和实时性; 采用旋转变压器实时反馈运动位置, 形成闭环控制, 保证运动的可靠性; 通过软硬件的反复调试和测试, 接收机输出的方位差电压 ΔA 和俯仰差电压 ΔE 电平保持在比较低的范围内, 并且通讯长时间正常稳定, 证明了雷达信号跟踪控制系统实现了对航空器的跟踪控制功能。

关键词: 信号跟踪控制; STM32; 差电压; PWM 脉冲; 闭环控制

Design of Radar Signal Tracking Control System Based on STM32

Yin Peng, Cui Gengshen, Ling Ming, Huang Tinghui, He Wen

(School of Computer Science and Engineering, Guilin University of Electronic Technology, Guilin 541004, China)

Abstract: The radar signal tracking control system is an important part of the airborne measurement and control system. In order to ensure that the antenna can be aligned with the aircraft in real time, and ensure the stability and real-time of the communication, a radar signal tracking control system based on STM32 is designed. The STM32F407IG control chip is used as the processor of the signal tracking control system. The desired control action is determined by processing the azimuth difference voltage ΔA signal and the pitch difference voltage ΔE signal from the four phase modulation receiver. In order to ensure the reliability of the azimuth difference voltage ΔA signal and the pitch difference voltage ΔE signal, the hardware and software filter are designed. PWM pulse function is used to control the stepper motor rotation, and the motor can be used to control the motor precision and speed. To improve the reliability and real-time performance of the differential voltage signal by using the high precision and high speed ADC. Real time feedback is used to form the closed loop control to ensure the reliability of motion. Through repeatedly debugging and testing of software and hardware, the receiver output voltage range difference ΔA and pitch difference voltage ΔE level remained at relatively low range, and communication is normal and stable for a long time. This proves that the radar signal tracking control system realizes the tracking control of the aircraft.

Keywords: signal tracking control; STM32; difference voltage; PWM pulse; closed loop control

0 引言

随着科学技术水平的提高, 各类航空测控系统不断得到发展, 作为其分支的航空测角分系统也是日趋完善。对于不同任务的航空测角分系统, 虽然有多种设计方式, 但其共同点是都包含了信号跟踪控制系统的设计。信号跟踪控制系统是航空测角分系统的重要组成部分, 它的主要功能是通过接收机接收到的天线信号进行必要的处理, 来控制天线的运动状态, 保证天线与航空器的正常通讯。由于航空器的运动轨迹、运动状态等具有不确定性, 需要相应的调整天线的运动状态, 保证通讯的实时可靠。所以本文设计了基于 STM32 的雷达信号跟踪控制系统。

1 系统设计总体方案

对于雷达信号跟踪控制系统的设计, 采用意法半导体公司的控制芯片 STM32F407IG 作为整个控制系统的 MCU (Microcontroller Unit) 控制整个系统的运行。使用模数转换芯片 AD7324 采集需要跟踪的信号。利用 MCU 内部的高级定时器产生 PWM 脉冲信号来给驱动器发送脉冲命令, 达到控制步进电机转动的目的。利用旋转变压器模块实时反馈实际的旋转角度, 以实现闭环控制。跟踪信号是通过跟踪接收机反馈到系统中, 自身也能作为反馈依据, 反映出跟踪的效果。信号跟踪控制系统的主体结构如图 1 所示。

在实际运行中, 航空测控系统涉及到两个关键设备——天线和航空器。天线与航空器通讯信息中的和信号 \sum 和差信号 Δ 是进行目标跟踪的主要依据。

天线与航空器通讯信息中的差信号 Δ 通过馈源输出, Δ 首先经过低噪放大, 然后经过数字移相器进行 $0, \pi, \pi/2, 3\pi/2$ 的相位低频扫描以及相位补偿, 经过移相后的差信号以及和信号相加得到单通道信号 E , 此时的 E 已经包含了方位差信号和俯仰差信号信息, 信号 E 经过放大变频, 成为中频信号, 经过包络检波或者与自身限幅信号相干检波即可得到方位差电压 ΔA 和俯仰差电压 ΔE 。方位差电压 ΔA 和俯仰差电压 ΔE 可分

收稿日期:2017-02-01; 修回日期:2017-02-27。

基金项目:国家自然科学基金资助项目(61063040);广西可信软件重点实验室(桂林电子科技大学)开放课题资助项目。

作者简介:尹鹏(1990-),男,山东济南人,硕士生,主要从事嵌入式物在网中的应用。

崔更申(1970-),男,广西桂林人,博士,副教授,主要从事嵌入式应用的研究。

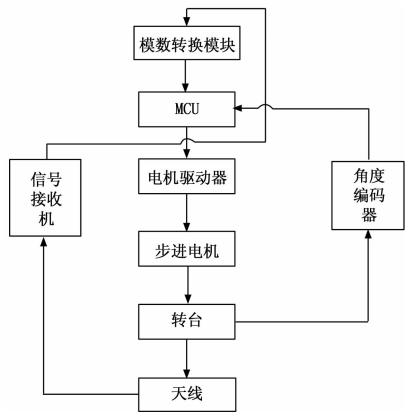


图 1 信号跟踪控制系统主体结构图

别作为方位电机和俯仰电机的运动依据, 通过控制对应位置上的电机运动, 带动天线对准目标。天线与航空器的对准程度是以差电压为参考的, 差电压的绝对值越小, 表示天线的中轴与航空器的偏离角度越小, 反之, 差电压的绝对值越大, 表示天线的中轴与航空器的偏离角度越大; 差电压的正负表示了天线中轴相对于航空器的偏离方向。

2 跟踪信号检测设计实现

跟踪信号检测模块是对需要跟踪的信号进行采集。此部分设计方案包含两部分内容: 跟踪信号检测电路设计和跟踪信号的校正。跟踪信号检测电路设计对电路实现中的关键不部分进行了说明; 跟踪信号的校正以电路设计的形式实现了信号的校正。

2.1 跟踪信号的校正

经过相干检波得到的方位差电压 ΔA 和俯仰差电压 ΔE , 存在信号间的耦合, 所以不是一个准确的值。在信号的调制阶段, 调制信号与跟踪信号之间有一个固定的相位关系, 而在信号的解调阶段, 解调信号与跟踪信号之间也有一个固定的相位关系。由于实际开发的电路, 受线路以及芯片自身的影响, 虽然调制信号和解调信号来自同一个时钟源, 但也很难保证这两个相位关系的一致性, 所以需要利用调相电路在某一端对相位进行校正, 此处的校正电路设计在信号解调端, 如图 2 所示。

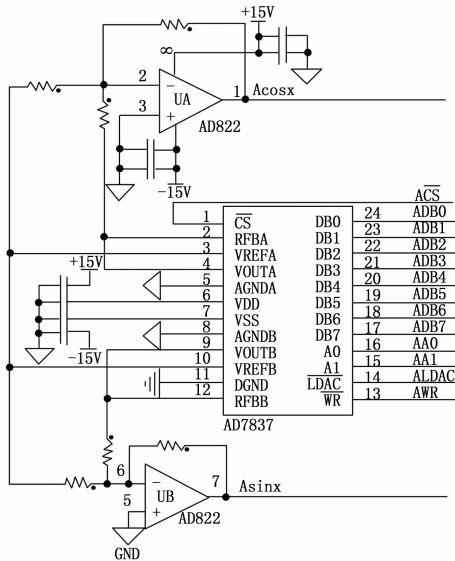


图 2 跟踪信号校正电路原理图

相位调整的本质是方位差电压 ΔA 和俯仰差电压 ΔE 组成的矢量信号 Δ 进行坐标变换。左边变换公式 (1)、(2) 为:

$$\Delta A' = \Delta A \cos\theta + \Delta E \sin\theta \quad (1)$$

$$\Delta E' = \Delta E \cos\theta + \Delta A \sin\theta \quad (2)$$

方位差电压 ΔA 作为这部分电路的输入信号, 通过 AD7837 可得到信号 $\Delta A \sin x$ 和 $\Delta A \cos x$, 利用相同的电路可得到俯仰差电压的转换信号 $\Delta E \sin x$ 和 $\Delta E \cos x$ 。通过加法器电路就能得到准确的方位差电压 $\Delta A'$ 和俯仰差电压 $\Delta E'$ 。

2.2 跟踪信号检测电路设计

天线馈源输出的信号频率是 2.2~2.4 GHz, 属于 S 波段的高频信号, 需要通过下变频组件对该信号进行降频操作, 此处选用的是 70 MHz 的下变频组件, 可以将 S 波段信号降频到 70 MHz, 跟踪信号检测电路是基于 70 MHz 信号进行设计。此处对跟踪信号检测电路的几个关键电路进行解释。

对天线馈源反馈的信号进行调制和解调是得到方位差信号和俯仰差信号的关键。根据信号跟踪原理, 需要使用数字移相器对天线馈源信号进行 $0, \pi, \pi/2, 3\pi/2$ 的相位调制, 跟踪信号的四相调制电路原理如图 3 所示。

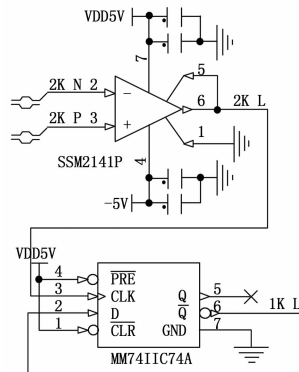


图 3 四相调制电路原理图

图 2 中的电路是数字移相器的关键电路, 以 MCU 的控制信号 (2K_N 和 2K_P) 作为输入, 经过降频得到 1 kHz 的脉冲信号, 输出的信号直接控制数字移相器, 高两位的脉冲信号 (2K_L 和 1K_L) 可组合成需要的四相调制 (二进制组合): 00 表示 0 移相, 01 表示 π 移相, 10 表示 $\pi/2$ 移相, 11 表示 $3\pi/2$ 移相。经过移相后的差信号与和信号相加得到单通道信号 E , 信号 E 经过放大变频, 成为中频信号, 经过包络检波以及与自身限幅信号相干检波即可得到方位差电压 ΔA 和俯仰差电压 ΔE 。包络检波是信号解调的重点, 包络检波电路原理如图 4 所示。

Log input 为检波前的中频信号, Env 为包络检波检出的信号, Env 本身属于交流信号, 需要与自身的限幅信号进行相干检波才可以得到对应的直流电平信号, 限幅信号的幅度可调整, 但是要保证限幅信号的相位和包络检波得出的信号相位一致, 对于全量程范围内的相干检波操作, 本设计对应的电平范围在 $-10 \sim +10$ V (这个范围是可调的, 此处是为了方便后面 AD 芯片检测所选用的范围), 也就是说在可追踪的信号范围内, 允许出现的并且能够检测的跟踪信号电压范围在 $-10 \sim +10$ V。

3 跟踪信号的控制实现

跟踪信号的控制实现是使用采集到的跟踪信号实现需要的控制功能。跟踪信号的控制实现主要包括四部分内容: 跟踪信

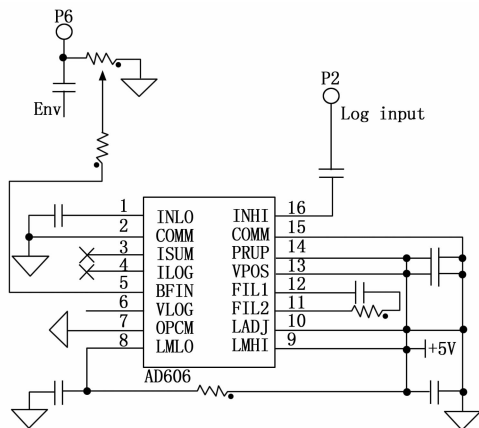


图 4 包络检波电路原理图

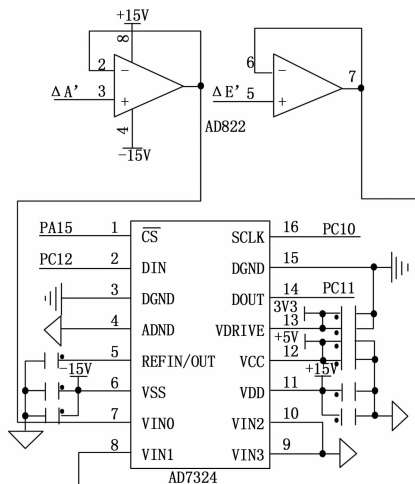


图 5 差电压数字化电路原理图

号的控制流程、跟踪信号的滤波以及数字化、跟踪信号驱动电机运动、跟踪信号控制中的反馈。跟踪信号的控制流程介绍了使用跟踪信号进行跟踪控制的整体流程；跟踪信号的滤波以及数字化介绍了对跟踪信号的软件滤波以及模数转换的实现；跟踪信号驱动电机运动介绍了利用数字化后的跟踪信号进行电机控制的实现；跟踪信号控制中的反馈介绍了测控系统中的反馈机制，主要是测角反馈和跟踪信号自身到系统的反馈。

3.1 跟踪信号的控制流程

跟踪信号检测电路采集到的方位差电压 $\Delta A'$ 和俯仰差电压 $\Delta E'$ ，经过 AD 转换得到数字化差电压值 V_a 和 V_e 。 V_a 和 V_e 通过 SPI 总线传递给 MCU，MCU 首先对数字差信号进行软件滤波，然后利用 MCU 内部的定时器产生 PWM 脉冲控制电机转动，从而使天线向航空器方向转动，并且利用 PID 的控制方式对系统控制进行调整。系统运行中，控制所需要的反馈参考信息来自实时变化的差电压以及 与电机同步的角度编码器（基于旋转变压器）。

3.2 跟踪信号的滤波以及数字化

方位差电压 $\Delta A'$ 和俯仰差电压 $\Delta E'$ 是模拟量，其电压范围： $-10 \sim +10$ V。该范围的模拟电压不能直接作为控制电机运动的信号量使用，需要将差电压进行数字化，得到的数字化的差电压信号作为 MCU 的控制依据间接控制电机转动。

使用 ADI 公司的模数转换芯片 AD7324 实现了差电压信号的数字化。AD7324 是四通道、十二位的 A/D 转换芯片，支持 SPI 数据传输方式，即 MCU 可通过 SPI 总线与 AD7324 进行数据交互。AD7324 可设置四种不同的电平转换范围： $-10 \sim +10$ V， $-5 \sim +5$ V， $-2.5 \sim +2.5$ V， $0 \sim +10$ V。为了满足差电压的范围，选择的电平采集范围为 $-10 \sim +10$ V。MCU 通过 SPI 总线设置 AD7324 的电平转换范围。A/D 转换电路如图 5 所示。

AD822 在该电路中作为跟随器使用，提高转换的准确度；PA15、PC12、PC10 和 PC11 是 MCU 与 AD7324 进行 SPI 通信的引脚。

在实际的信号跟踪中，经过跟踪信号检测电路采集到的方位差电压 $\Delta A'$ 和俯仰差电压 $\Delta E'$ 会出现波动比较严重的情况，相应的在经过 AD 转换后，得到的数字化数据也是会发生波动较大的情况。此处采用卡尔曼软件滤波的方式来解决跟踪信号波动较大的问题。根据卡尔曼滤波算法进行跟踪信号的差电压进行滤波，以方位差电压 $\Delta A'$ 为例，具体代码如下：

$$V_{pre} = V_{opt};$$

$$P_{pre} = \sqrt{P_{opt} * P_{opt} + P_{roceNoise} * P_{roceNoise}};$$

$$K = \sqrt{P_{pre} * P_{pre} / (P_{opt} * P_{opt} + M_{eaNoise} * M_{eaNoise})};$$

$$V_{opt} = V_{pre} + K(V_{mea} - V_{pre});$$

$$P_{opt} = \sqrt{(1 - K) * P_{pre} * P_{pre}};$$

其中， V_{opt} 表示最优差电压值， V_{pre} 为预测的差电压值， P_{pre} 为预测的差电压误差， K 为卡尔曼增益， P_{opt} 为计算后得到的最优差电压误差。

3.3 跟踪信号驱动电机运动的原理

跟踪信号驱动电机运动主要介绍了利用采集到的跟踪信号实际控制电机运动，包括了两部分内容：跟踪信号控制电机运动的原理和跟踪信号控制电机运动的实现。

MCU 通过向电机驱动器发送控制命令来驱动电机转动，以此来带动天线运动。

MCU 根据数字化后的方位差电压 ΔA 和俯仰差电压 ΔE ，分别对方位电机和俯仰电机进行操作。由于方位运动和俯仰运动的控制方式是一样的，所以此处以方位差电压 ΔA 为例解释方位运动过程。

假设方位差电压 ΔA 的数值为 V_a ， V_a 的大小代表了天线的中轴指向与跟踪目标（航空器）的偏离程度。 V_a 的绝对值越大，表示天线的中轴指向与跟踪目标的角度偏离越大，此时需要提高步进电机的转动速度，并重新设置转动角度；反之， V_a 的绝对值越小，表示天线的中轴指向与跟踪目标的角度偏离越小，此时需要降低步进电机的转动速度，并重新设置转动角度。 V_a 的数值是可正可负的，其符号位用来判定步进电机需要进行转动的方向， $V_a > 0$ 表示步进电机需要进行顺时针转动， $V_a < 0$ 表示步进电机需要进行逆时针转动。

3.4 跟踪信号控制电机运动的实现

步进电机的运动依靠的是脉冲信号，MCU 虽然可以产生脉冲信号，但驱动力有限，无法满足步进电机的动力要求，所以需要外加步进电机驱动器，通过控制电机驱动器间接实现对步进电机的控制。利用 MCU 的通用 I/O 端口控制驱动器来决定电机转动的方向、使能和释放。

MCU 内部的定时器自带 PWM 功能，可通过设置对应的寄存器产生所需要的脉冲信号。设置的寄存器中比较关键的寄存器是预分频寄存器和周期计数寄存器，这两个寄存器决定了 PWM 的频率。频率计算如公式 (3) 所示：

$$PWM_f = \frac{f}{(M+1)(T+1)} \quad (3)$$

式 (3) 中, PWM_f 表示 PWM 的频率, f 表示产生 PWM 的定时器时钟频率, $M+1$ 表示预分频值, $T+1$ 表示周期计数值。设定 MCU (STM32F407IG) 的定时器时钟频率 f 为 MCU 允许的最高的时钟频率 168 MHz (整个系统运行中, 该值不改变), 改变 PWM_f 就需要调整预分频值和周期计数值。预分频值 M 设置了 f 的分频系数, 决定了周期计数值的单次计数的时间; 周期计数值 T 设置了周期计数的次数, 决定了一个周期需要计数的次数; 而每个周期 $T+1$ 等同于 PWM 的一个脉冲周期。

PWM_f 的改变意味着步进电机转速的改变, 相应的天线的转动速度也就会发生变化, PWM_f 与天线转动速度 Vel 的关系如公式 (4) 所示:

$$PWM_f = \frac{1}{Vel * K1 * (K2/360)} \quad (4)$$

PWM_f 为脉冲的频率 (Hz); Vel 为天线转动速度 ($^\circ/s$); $K1$ 为天线转轴相对于电机转轴的减速比; $K2$ 为电机驱动器的细分值, 表示电机转动一圈需要 $K2$ 个脉冲。 Vel 需要用时间 t 和偏移角度 S 来确定, 如公式 (5) 所示:

$$Vel = \frac{S}{t} \quad (5)$$

式 (5) 中, 时间 t 取决于差电压采集的频率。偏移角度 S 是由差电压的大小决定的, 两者的对应关系需要通过实际的测试得到, 此处以方位差电压 ΔA 为例, 求偏移角度 S 。在不跟踪的情况下, 只测正向偏离, 得到方位差电压 ΔA 和偏移角度 S 的关系如图 6 所示。

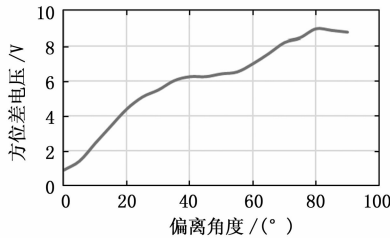


图 6 方位差电压 ΔA 和偏移角度 S 关系图

如图 6 所示, 方位差电压 ΔA 和偏移角度 S 是近似线性关系的, 如式 (6) 所示:

$$S = K * \Delta A + C \quad (6)$$

式 (6) 中, 对于固定的系统, 比例因子 K 和零点漂移值是固定的。

MCU 输出的控制信号驱动力较小, 需要经过电流放大后传输给电机驱动器, 如图 7 所示。

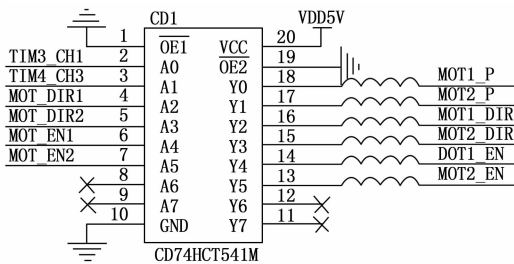


图 7 控制信号电流放大电路原理图

放大后电路后, 产生 MOT1_P 脉冲信号送到电机驱动器进行方位电机的运动控制。信号 MOT_DIR1 是 MCU 的通用 I/O, 经过电流放大电路后产生 MOT1_DIR 信号送到电机驱动器, 用来控制方位电机的运动方向。信号 MOT_EN1 是 MCU 的通用 I/O, 经过电流放大电路后产生 MOT1_EN 信号送到电机驱动器, 用来控制方位电机的释放与使能。另外的三路信号用来控制俯仰电机驱动器。

3.5 跟踪信号控制中的反馈

对于实时的自动控制系统, 为了保证控制的可靠性, 一般需要将系统设计成闭环控制。对于转台的转动, 仅靠脉冲计数的方式计算角度是不可靠的, 需要使用旋转变压器采集转动的实际角度, 确保位置的可靠性。

旋转变压器是通过激励信号和激磁信号进行控制的, 需要使用信号解析模块 HRDC2754-414 对旋转变压器进行解析。旋转变压器解析电路设计如图 8。

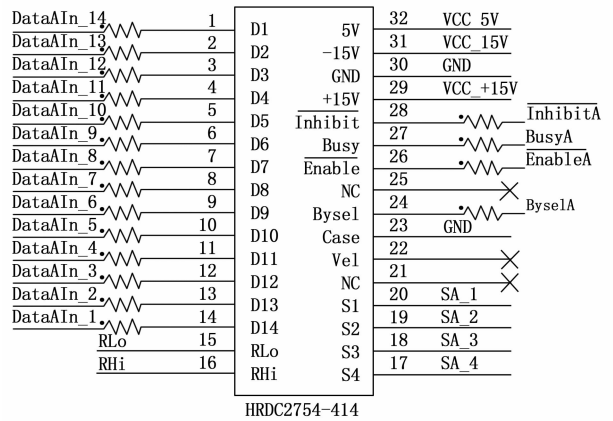


图 8 旋转变压器信号解析电路原理图

其中 RHl 和 RLo 是旋转变压器和 HRDC2754-414 共用的激励信号, 该组信号必须是来自同一个激励源, SA_1、SA_2、SA_3、SA_4 是由旋转变压器产生的激磁信号, HRDC2754-414 可通过这四个信号解析出实际的角度数值, DataIn_1 -- DataIn_14 表示了旋变角度的数值, 直接和 MCU 的 I/O 相连, 二进制表示方式, 通过每一位的电平高低来确定该位的数值, 这样可得到 14 Bit 的二进制数, 经过换算可得到实际的角度值。

4 信号跟踪控制实验结果

对于信号跟踪控制系统, 关键的功能是在航空器运动过程中, 实现天线中轴与航空器之间保持一个基本对准的状态。所谓的对准用数字量表示为差电压 Δ 随着时间 t 保持一个稳定的值 K , 并且 K 值是一个比较小的值。

通过实验, 得到差电压与时间 t 的关系, 如图 9 所示。

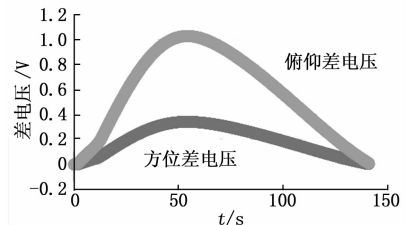


图 9 差电压实时检测图

信号 TIM3_CH1 是 MCU 定时器的输出脉冲, 通过电流

(下转第 119 页)

化在 FLASH 中软件正确性测试指令的特征及状态, 获取了被测软件对比模板; 准确分清了已编译成机器码的系统程序及各应用程序的存储单元地址; 建立了实时的数据传输通道, 实现被测软件代码按字节进行比对, 并判断其正确性。

4 检测实例

本节给出了机载计算机检测仪显示屏上运行的硬件测试软件运行界面截图(如图 6 所示)和软件测试软件虚拟机界面截图(如图 7 所示)。软件的设计遵循了软件设计原则, 使用符合部队维护操作规程, 界面简捷直观, 操作简单。通过测试, 软件运行稳定可靠, 也弥补了原检测仪不易判读的问题。

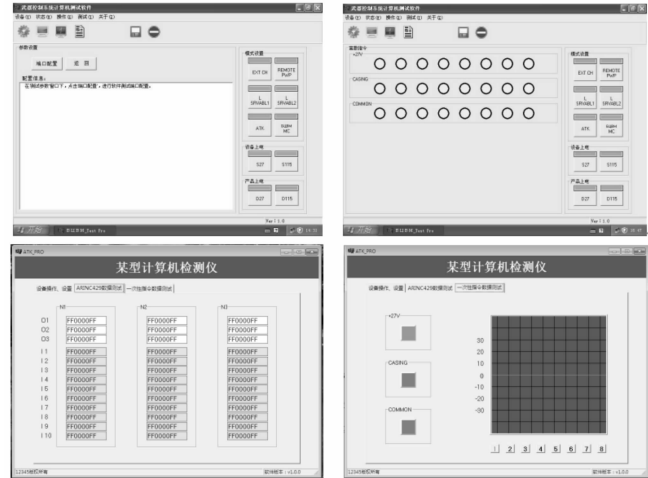


图 6 检测仪硬件测试软件运行界面

检测仪硬件测试软件运行界面通过虚拟面板模拟引俄检测设备的指示灯、开关和按钮, 操作简便, 直观可靠, 增加了数字示波器, 可以展示测试端口的波形, 便于检测维修, 同时还可以在检测后留下检测记录。

检测仪软件测试运行界面需要启动虚拟机运行在 WIN98 操作系统中, 可记录被测机载计算机的编号, 选择 FLASH 盘上的系统软件、应用软件和 POST 软件分别进行比对检验, 并在检验完成后生成测试报告, 便于维护人员深度研究和维护。

5 结束语

该检测仪软件设计充分利用了现代检测技术, 突破了国外引进装备技术限制, 兼容了双语软件环境, 具有模块化设计、(上接第 115 页)

如图 9 所示, 跟踪过程中, 方位差电压和俯仰差电压基本在 1 V 以内变化, 表示天线的电轴与航空器之间的偏移角度是比较小的, 基本满足跟踪过程中实时对准的要求。

参考文献:

[1] Sullivan A, 许福仁. 跟踪天线系统的过去、现在和未来 [J]. 国外导弹与航空运载器, 1990, 10: 35-45.
 [2] 宋晓雪. 基于船用导航雷达接收机滤波电路设计 [D]. 西安: 西安科技大学, 2013.
 [3] 魏朋涛. 基于 ARM 的伺服控制器研发 [D]. 沈阳: 中国科学院研究生院(沈阳计算技术研究所), 2016.
 [4] 童 楨. 直流无刷电机控制器设计 [D]. 南昌: 南昌大学, 2013.
 [5] 方 旭. 基于 ARM 的多通道步进电机控制系统设计 [D]. 西南交

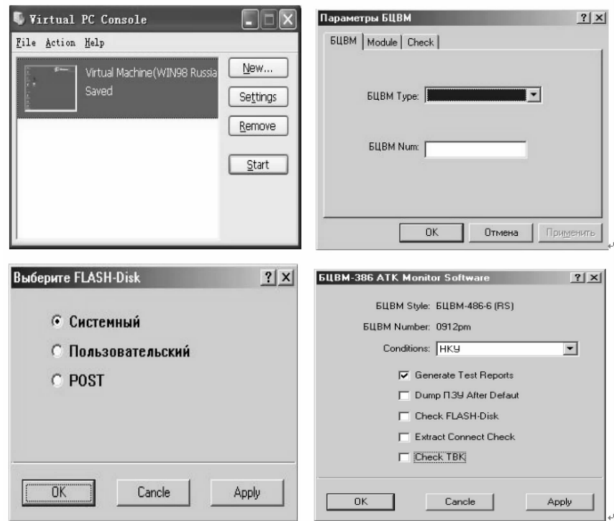


图 7 检测仪软件测试虚拟机运行界面

测控功能完善和操作简单可靠等特点。实用证明, 检测仪软件在修理厂对机载计算机离位检测时, 能够完成对机载计算机硬件、软件对比和机载武器逻辑运算控制能力的检测, 在保证某型飞机武器系统的可靠性和顺利遂行作战和训练任务方面发挥了重要作用。

参考文献:

[1] 欧阳寰, 王超勇, 等. 某型飞机武器控制系统计算机检测仪的设计与实现 [J]. 计算机测量与控制, 2016, 24 (12): 103-105.
 [2] 李小魁, 王忠勇. 基于嵌入式操作系统平台下的触摸屏驱动程序的开发与实现 [J]. 计算机与数字工程, 2009, 37 (4): 73-76.
 [3] 史永胜, 祖以慧. 基于虚拟测试仪器的诊断技术及在 VMTS 中应用 [J]. 计算机测量与控制, 2015, 23 (5): 1464-1466.
 [4] Julia C, Jaime R, Angelica D A. Applying a student modeling with non-monotonic diagnosis to Intelligent Virtual Environment for Training/Instruction [J]. Expert Systems with Applications, 2014, 41 (2): 508-520.
 [5] 周立萍, 孙青岩, 等. 逆向工程分析技术研究 [J]. 微机发展, 2004, 14 (4): 4-7.
 [6] 李志新, 黄曼慧, 等. 逆向工程中的 CAD 建模技术及软件系统 [J]. 机床与液压, 2007, 35 (9): 46-47, 78.
 [7] 张 磊, 陈兴蜀, 等. 基于虚拟机的内核完整性保护技术 [J]. 电子科技大学学报, 2015, 44 (1): 117-122.
 [8] 周金明. 航空发射遥测遥控数据通信系统的抗干扰研究 [D]. 重庆: 重庆大学, 2008.
 [9] 李文真. 基于 STM32 的步进电机伺服系统的设计 [D]. 西安: 西安工程大学, 2015.
 [10] 高艳艳. 多通道步进电机控制系统设计 [D]. 西南交通大学, 2013.
 [11] 章烈烈. 基于单片机的高精度步进电机控制研究 [D]. 武汉: 武汉理工大学, 2007.
 [12] 宋迎春. 动态定位中的卡尔曼滤波研究 [D]. 长沙: 中南大学, 2006.
 [13] 朱佳娜. 步进电机多轴运动控制系统的研究 [D]. 成都: 四川大学, 2004.
 [14] 凡守涛. 单脉冲气象雷达系统分析与设计 [D]. 西安: 西安电子科技大学, 2013.