

远程遥测姿态控制系统设计

张凤英^{1,2}, 刘文怡^{1,2}, 杨慧³, 马睿^{1,2}

(1. 中北大学 电子测试技术重点实验室, 太原 030051;

2. 中北大学 仪器科学与动态测试教育部重点实验室, 太原 030051;

3. 中国运载火箭技术研究院, 北京 100076)

摘要: 为全面测控飞行器姿态, 设计了一种能实时监测、控制飞行器姿态倾角的远程遥测系统; 采用 FPGA 进行中央逻辑控制, 构建了智能变送模块; 将上位机作为终端设备, 结合步进电机 24BYJ48-5V 与双轴倾角传感器 ROB100 等前端设备, 经过硬件及软件调试, 完成步进电机闭环控制, 实现 $-90^{\circ} \sim +90^{\circ}$ 范围内对飞行器任意倾角值的实时测量与控制, 测试精度达 0.5° ; 通过大量试验结果及分析表明, 该系统可靠性高、可移植性强, 能够完成对飞行器姿态的实时测控, 各项性能指标均满足项目需求。

关键词: FPGA; 智能变送; 步进电机; 倾角传感器; 闭环控制

Design of Telemetry Posture Control System

Zhang Fengying^{1,2}, Liu Wenyi^{1,2}, Yang Hui³, Ma Rui^{1,2}

(1. Lab. of Science and Technology on Electronic Test & Measurement, North China University, Taiyuan 030051,

China; 2. Ministerial Key Laboratory of Instrumentation Science & Dynamic Measurement North China University,

Taiyuan 030051, China; 3. China Academy of Launch Vehicle Technology, Beijing 100076, China)

Abstract: Aimed at test the posture of aircraft roundly, designed a telemetry system which can real-time monitor and control the posture angle of aircraft. The logic control of this system was completed by FPGA, formed a smart transmitting module. Used the host computer as terminal device, combining the front device like stepping motor 24BYJ48-5V and tilt sensor ROB100, through debugging of hardware and software completed stepping motor close loop control. Real-time measurement and control of any aircraft angle between -90° to $+90^{\circ}$ are implemented, and the measurement precision can achieve 0.5° . The abundant experimental and analysis proved that, this system has the advantages of reliability and easy expansion, it can complete the real-time test of aircraft, which meets the requirement of various function index.

Keywords: FPGA; smart transmitting; stepping motor; tilt sensors; close loop control

0 引言

飞行器在飞行过程处于颠簸状态, 可能出现俯仰角、横滚角, 准确测量与控制飞行器姿态倾角, 是现代航天领域的重要测控环节^[1]。传统的倾角姿态测控系统常用 DSP 作为中控单元^[2], 其有限的硬件资源及串行运行的算法, 很难满足对多个前端同时控制的需求。本文以 FPGA 作为中央控制单元进行智能变送, 采用倾角传感器与步进电机作为前端设备, 构建了倾角测控系统, 为飞行器姿态角度的测控提供了一种全新的手段。

1 总体设计

整个系统主要包括上位机、智能变送模块、RS485 网络总线、TII 传输接口、前端测量与控制模块 (倾角传感器及步进电机)、电源模块, 系统框图如图 1 所示。本设计采用 XIN-LINX 公司的 XC2S200 型 FPGA, 进行智能变送模块的中央逻辑控制。系统正常工作时, 上位机通过 485 总线读取网络适配器回传的倾角数据并进行分析、处理; 同时给倾角传感器、步

进电机下发相应的操作指令。当上位机下发状态回传指令时, FPGA 控制采集部分对倾角传感器、步进电机的信号进行调理、采集, 并将采集的倾角信息通过 TII 接口 (传感器独立接口) 传输至网络适配器, 最终回传到上位机; 当上位机下发姿态校准指令时, 根据总线通信协议, 通过 FPGA 对接收的数据进行解析, 并将设定角度值与当前倾角进行比对、运算, 产生个数、频率一定的控制脉冲指令对姿态倾角进行调节。

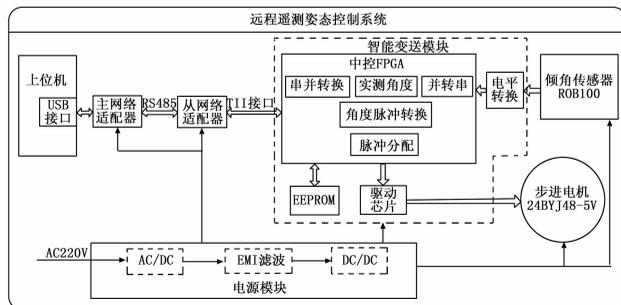


图 1 系统框图

收稿日期: 2014-07-11; 修回日期: 2014-09-01。

作者简介: 张凤英 (1990-), 女, 硕士研究生, 主要从事自动测试与控制技术方向的研究。

刘文怡 (1970-), 男, 博士, 教授, 博导, 主要从事网络操作系统和系统集成技术方向的研究。

2 实现原理及硬件设计

2.1 总线通信 485 接口

主、从网络适配器之间通过 RS485 总线进行数据传输, 设计采用接口芯片 MAX491 实现 RS485 总线通信, 其传输速

率达 2.5 Mbps, 硬件接口电路如图 2 所示。当上位机下发指令时, FPGA 将 MAX491 的接收使能管脚“RE/”置低, 通过差分接收端“A”、“B”进行 RS485 总线信号的接收; 当上传数据时, FPGA 将接口芯片的发送使能管脚“DE”拉高, MAX491 通过输出端“Y”、“Z”, 将“DI”端的信号以一组 RS485 差分信号回传。

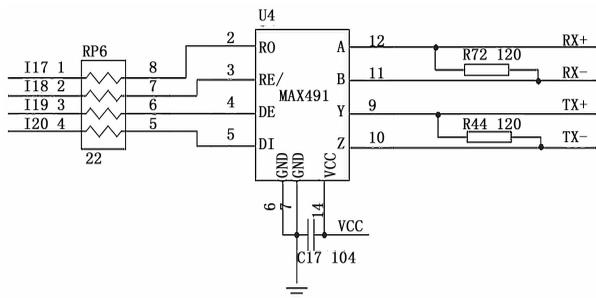


图 2 RS485 总线接口电路

2.2 TII 接口

网络适配器与智能变送模块之间进行的通信, 需要数据链路的传输及协议。为此设计一种 10 线程的通信线路, 实现数据的读写及对智能变送模块的触发。采用芯片 SN74ALVC164245 作为通信的硬件基础, 硬件设计原理如图 3 所示。网络适配器发出“DCLK”信号, “DCLK”空闲时为高, 在发送和接收数据时产生 8 个 CLK, 约定数据双方在下降沿发数, 上升沿收数。表 1 所示为 TII 接口 10 线程相应的功能定义及标识。

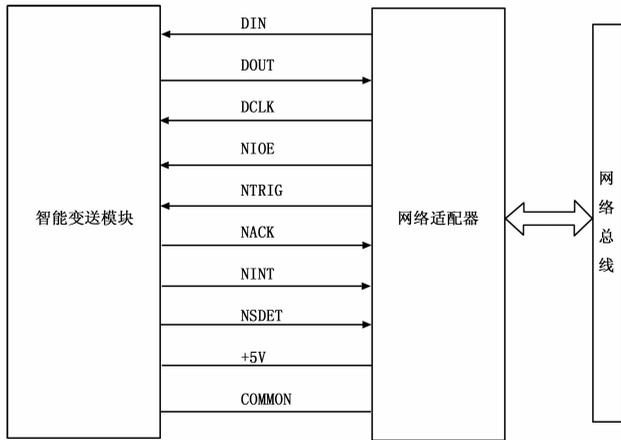


图 3 TII 接口硬件设计原理图

2.3 姿态测量与控制

当对飞行器进行姿态倾角测量时, 为精确测量水平面内的任意角度, 设计采用双轴倾角传感器 ROB100, 此传感器内置角度转换及温度补偿, 体积小, 精度高^[3], 满足任务要求。系统上电后, ROB100 测量重力加速度的变化并将其转换成倾角变化, 最终通过 RS232 接口输出 16 位二进制补码格式倾角数据。为确保 FPGA 能准确地采集倾角数据, 根据倾角传感器的引脚功能, 设计采用 MAXIM 公司的电平转换芯片 MAX232, 进行传感器输出数据的采集。MAX232 内部集成 RS-232C 驱动器, 符合所有 RS-232C 的技术标准, 连接电路

如图 4 所示。

表 1 TII 接口 10 线程功能定义表

组名	线	标识	驱动方	功能
数据	DATA-OUT	DOUT	STIM	从 STIM 到 NCAP 的地址或数据传输
	DATA-IN	DIN	NCAP	从 NCAP 到 STIM 的地址或数据传输
	DATA-CLK	DCLK	NCAP	在该时钟正边沿锁存 DIN 与 DOUT 信号
	N-IO-ENABLE	NIOE	NCAP	数据使能
触发	N-TRIGGER	NTRIG	NCAP	触发
中断	N-IO-INTERRUPT	NINT	STIM	由 STIM 向 NCAP 发出服务请求
支持	POWER	POWER	NCAP	5V 电源
	COMMON	COMMON	NCAP	地(逻辑)
	N-ACKNOWLEDGE	NACK	STIM	完成触发确认和数据收到确认
	N-STIM-DETECT	NSDET	STIM	由 NCAP 来检测是否连接了 STIM

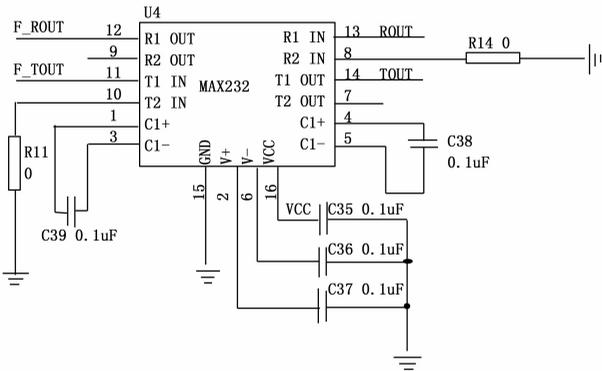


图 4 倾角传感器输出信号接收电路

在姿态倾角控制时, 采用了通用的 STM2296 型步进电机, 精度达 0.5°。传统的步进电机控制系统常以 DSP 作为中控单元进行复杂的算法运算, 但其串行运行的控制算法很难满足对多轴步进电机控制的性能要求, 因此本设计采用 FPGA 控制脉冲分配电路的输入端。系统正常工作时, 以线圈 A 相超前 B 相 90°通电时为电机正向转, 线圈 B 相超前 A 相 90°通电为负向转^[4]。通过 FPGA 控制两相线圈导通脉冲的相位, 实现对步进电机转向的控制; 每 1/4 周期步进电机行进一个步进角, 由 FPGA 控制脉冲频率, 实现电机转速的控制。

3 软件设计

3.1 总线通信协议

为提高系统逻辑可靠性和稳定性, 设计了总线通信协议, 协议约定每一帧数据包包含 12 字节, 上位机下发命令帧后, 由 FPGA 进行判定, 若检测到完整的 12 字节信息, 则根据通信协议对命令帧进行解析, 否则舍弃。如表 2 所示, 帧头“FA”、“FB”及帧尾“EB”、“90”共同作为命令帧判别标识; 遥测系统通过接收上位机下发的“命令字”做相应的

操作；根据“地址信息”对挂载在 RS485 总线上的适配器进行访问；“从属信息”为系统能够准确读取适配器模块信息提供判定依据；“数据”作为各适配器模块的有效数据载体进行传输。

表 2 总线通信协议

帧头	命令字	地址信息	从属信息	数据	帧尾
FA FB	CMD	访问地址	ID1 ID2	数据 1 数据 2 数据 3 数据 4	EB 90

3.2 III 接口通信时序

网络适配器进行一帧数据的收发时，将“NIOE”置低，当智能变送模块监测到“NIOE”变低，便拉低“NACK”，并传输一个字节信息后将“NACK”置高，由此循环，通信时序如图 5 所示。每一帧数据传输的整个过程“NIOE”维持在低电平，通过“DIN”引脚，数据以位流的方式由网络适配器传输至智能变送模块，通过“DOUT”引脚，变送模块向网络适配器发送数据。

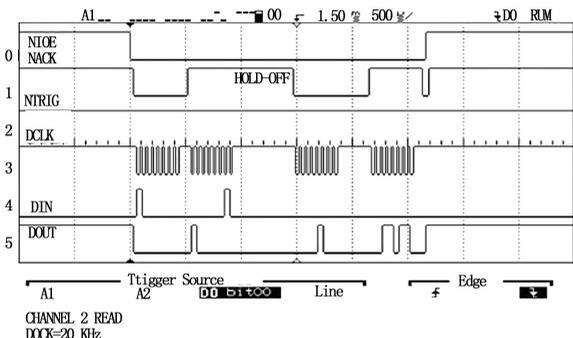


图 5 TII 接口通信时序

3.3 回传与姿态校准

倾角传感器 ROBI00 上电正常工作后，通过 RS232 接口，FPGA 接收由传感器输出的波特率为 57 600 bps 的倾角数据，并进行逻辑运算和处理，根据总线通信协议将倾角的实测值反馈给上位机，实现对智能变送部分前端设备的实时监测^[5]。倾角数据帧格式如表 3 所示（X 轴方向为横滚角，Y 轴方向为俯仰角）。

表 3 数据帧格式

字节位置	数据	说明
1	0xaa	数据帧的帧头
2	0x55	数据帧的帧头
3	AnalogX_H	X 轴倾角编码值高 8 位
4	AnalogX_L	X 轴倾角编码值低 8 位
5	AnalogY_H	Y 轴倾角编码值高 8 位
6	AnalogY_L	Y 轴倾角编码值低 8 位
7	CheckSum	校验位

码，否则舍弃。在对数据进行解码时，将接收的 16 位整数与 32 768 进行比较，根据比较结果用两种方式进行解码：解码方式 1，若接收到的 16 位整数小于等于 32 768，则倾角值 = 接收到的 16 位整数 * 90/32 768；解码方式 2，若接收到的 16 位整数大于 32 768，则倾角值 = (接收到的 16 位整数 - 65 535) * 90/32 768。以接收数据“0xaa、0x55、0xc3、0xfe、0xaf、0x92”为例进行阐述，首先将此 7Byte 数据的值相加并进行校验，0xaa+0x55+0xc3+0xfe+0xaf+0x92=0x500，数据和的低 8 位为 0x00，则数据正确，根据表 3，接收到的 AnalogX 为 0xffc3，AnalogY 为 0xfeaf，checksum 为 0x92，转换成 10 进制 AnalogX 为 65 475，该值大于 32 768；AnalogY 为 65 199，该值大于 32 768，则分别采用解码方式 2 进行解码。最终可得：X 轴倾角值 = (65 475 - 65 535) * 90/32 768 = -0.16 度；Y 轴倾角值 = (65 199 - 65 535) * 90/32 768 = -0.93 度。

智能变送部分前端设备完成姿态回传后，由上位机下发定位角度，FPGA 将接收的角度值与步进电机当前角度值进行比对与校准，通过控制状态机实现步进电机四相八拍的工作方式：A-AB-B-BC-C-CD-D-DA-A，使步进电机转动到设定的位置。采用 FPGA 控制脉冲分配电路的两个输入端，一个输入端是由 PWM 信号构成的变频时钟，当脉冲分配电路检测到 PWM 脉冲，电路的输出时序将发生变化，触发步进电机转动；另一个输入端是方向控制信号，当 FPGA 输出不同的步进时序脉冲，步进电机根据不同状态的控制脉冲向相应的方向转动。

4 测试结果与分析

为验证系统的可靠性与稳定性，对其进行测试。上位机操作界面如图 6 所示，点击界面上的“打开设备”按钮，显示“设备打开成功”后，用户根据需求对姿态倾角进行设定。以设定 NCAP2 节点下智能变送前端设备的 X 轴倾角为 45°为例，在系统上电前，将智能变送前端设备角度值归零，在操作界面上 NCAP2 节点中的 TII0 接口处，将“X 倾角设置”设为 45°，经测试，步进电机以水平面为基准正向转动 45°，在上位机界面“返回”处显示出由倾角传感器测得的回传值，回传值为 44.88°，与设定值上下差不超过 0.5°。通过大量的试验表明，本系统具有高可靠性。

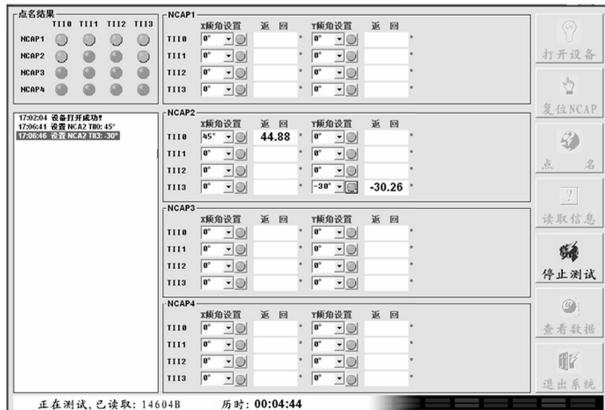


图 6 测试界面及结果

FPGA 接收到传感器回传的倾角数据便对其进行校验，若 7Byte 数据相加后低 8 位为零则数据正确，对正确数据进行解

5 结束语

本文通过 FPGA 控制智能变送前端设备和网络适配器, 完成远程遥测姿态控制系统的设计, 为飞行器姿态倾角的测量、控制提供了全新的技术手段。经过对测试结果分析, 该遥测系统工作稳定, 测量精度高, 抗干扰性强, 可广泛应用于飞行器测试。

参考文献:

[1] 陈 靖. 系统自动控制与信号处理技术 [D]. 西安: 西安电子科

技大学, 2006.

[2] 王帅夫, 刘景林, 杨士河, 等. 基于 DSP 的步进电机多轴控制系统研究 [J]. 计算机测量与控制, 2011, 19 (1): 95-97.
 [3] 吴晓鹏, 赵祥喜, 胡 炼, 等. ADIS16209 IMU 在倾角测量中的应用 [J]. 现代电子技术, 2010 (13): 110-114.
 [4] 吴 云, 陆 镔, 赵海洋, 等. 基于 FPGA 的步进电机细分驱动器设计 [J]. 自动化仪表, 2009, 30 (10): 61-63.
 [5] 戴习兵. 基于 FPGA 的卫星天线机载“动中通”倾角测量的分析与设计 [D]. 南京: 南京邮电大学, 2013.

(上接第 101 页)

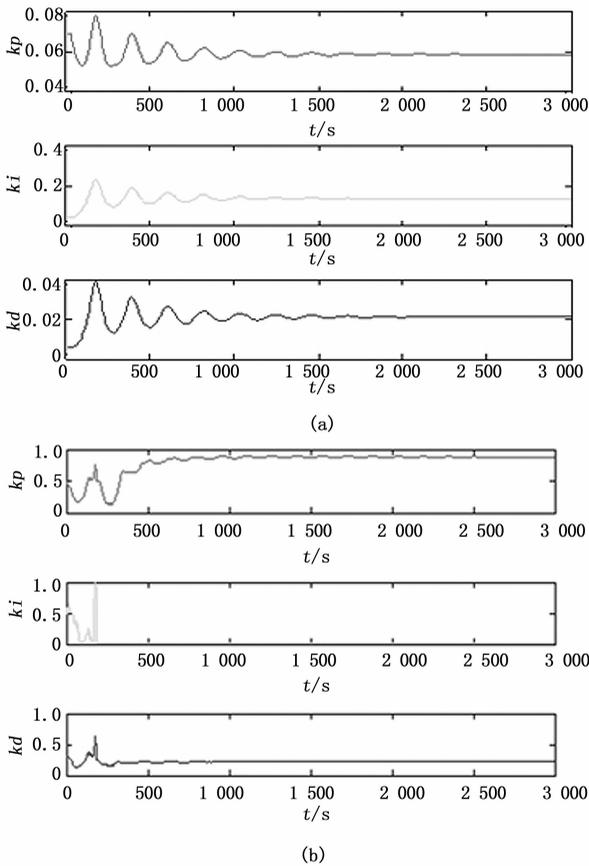


图 4 DBN-PID (a) 与 BP-PID (b) 控制下的各个参数变化曲线对比

控制算法, 引入深度学习方法, 提出了一种 DBN-PID 控制算法, 它将 DBN 和 PID 结合, 实现了对 PID 参数的自动整定, 且能够很好的近似非线性对象, 具有较强的自适应能力。实验以柞木为研究对象, 将 DBN-PID 控制算法和 BP-PID 算法分别应用在该检测系统中, 检测得到了干燥窑内空气的温度、湿度以及木材的含水率等影响干燥质量的重要参数, 并将两种算法检测到的数据进行比较分析。通过对实验数据的分析可得, 在具有相同硬件设施的条件下, 使用 DBN-PID 算法对木材干

燥窑内的各个参数进行检测的精度更高。

参考文献:

[1] 张璧光, 伊松林, 周永东. 我国木材干燥设备制造业概况与存在的问题 [J]. 干燥技术与设备, 2011, 9 (4): 176-179.
 [2] Wang X C G, Liu W, Gu L Z, et al. Development of an intelligent control system for wood drying processes [A]. 2001 IEEE/ASME International Conference on Advance Intelligent Mechatronics Proceedings [C]. 2001: 371-376.
 [3] 王 伟, 张晶涛, 柴天佑. PID 参数先进整定方法综述 [J]. 自动化学报, 2000, 26 (3): 347-355.
 [4] 胡力刚, 许伟明. 嵌入式神经网络 PID 控制器的研究与设计 [J]. 计算机测量与控制, 2010, 23 (11): 2066-2069.
 [5] Mostafa A Salama, Aboul Ella Hassanien, Aly A Fahmy. Deep belief network for clustering and classification of a continuous data [A]. IEEE International Symposium on Signal Processing and Information Technology [C]. 2010: 473-477.
 [6] 陈书谦, 张丽虹. BP 神经网络在 PID 控制器参数整定中的应用 [J]. 计算机仿真, 2010, 27 (10): 171-174.
 [7] 胡昆仑. 基于神经网络的木材干燥模型辨识研究 [D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2004.
 [8] 成发勇, 刘佩英, 姜志宏, 等. 木材窑干过程含水率实时在线检测技术述评 [J]. 林业科技开发, 2013, 27 (4): 7-11.
 [9] 常建民, 王东林, 高建民. 木材干燥全自动控制系统的研制 [J]. 北京林业大学学报, 2003, 25 (2): 72-74.
 [10] 薛巨峰, 张佳薇, 刘德胜. 双 CPU 在木材干燥窑智能化测试系统中的应用 [J]. 林业机械与木工设备, 2006, 34 (6): 40-41.
 [11] 周长建, 司震宇, 邢金阁, 等. 基于 Deep Learning 网络态势感知建模方法研究 [J]. 东北农业大学学报, 2013, 44 (5): 144-149.
 [12] Hinton G, Osindero S, Teh YW. A fast learning algorithm for deep belief nets [J]. Neural Computation, 2006, 18 (7): 1528-1554.
 [13] Hinton G. A practical guide to training restricted Boltzmann machines [R]. Report of Momentum, 2010, 9 (1): 1-20.
 [14] 陈 宇, 郑德权, 赵铁军. 基于 Deep Belief Nets 的中文名实体关系抽取 [J]. 软件学报, 2012, 23 (10): 2572-2585.
 [15] 刘 岩. 增强学习的 PID 控制参数优化快速整定算法 [J]. 计算机测量与控制, 2014, 22 (2): 467-470.