

基于嵌入式 Linux 的飞机重心调控系统设计

范蟠果, 陈凯峰, 邢保毫

(西北工业大学 自动化学院, 西安 710129)

摘要: 在飞机定型试飞时, 为了测试飞机重心处于使用包线范围内的飞行性能和操稳特性, 需要对飞机的重心位置进行调控; 因此, 设计了一套基于嵌入式 Linux 的飞机重心调控系统, 详细说明了系统的硬件设计、软件设计以及对嵌入式 Linux 实时性的改进增强; 上位机采用 Labwindows/CVI 设计监控界面, 可实时监控系统状况; 下位机控制器采用 TI 的 AM4379 作为主控芯片, 在嵌入式 Linux 操作系统软件平台上进行采集、控制、传输等任务; 驾驶舱终端采用 QT 设计人机界面; 经过试验表明, 系统具有可靠性高、任务响应及时、调节速度快、调节精度高等优点。

关键词: 重心调控; ARM; 嵌入式 linux; Labwindows/CVI

Barycentre Control System of Trial Flight Based on Embedded Linux

Fan Panguo, Chen Kaifeng, Xing Baohao

(College of Automation, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710129, China)

Abstract: in order to test the control-stability and performances of the airplane, adjusting the barycentre of the trial flight is needed. So a set of barycentre control system is presented, which consists of the main computer, the controller and the cockpit terminal. the main computer is used to monitor the system, and the monitoring screen is designed by Labwindows/CVI; The controller runs Linux OS on the AM4379 processor chip, completing tasks such as datas acquisition, I/O control and transmission. The cockpit terminal uses QT tool to design the HMI. The hardware design, software design and the RT-performance improvements of the embedded Linux are mainly introduced. Tests show that this system has advantages of high reliability, short-time delay and fast control speed.

Keywords: barycentre control; ARM; embedded Linux; Labwindows/CVI

0 引言

目前, 在芯片发展方面, 高端 ARM 处理器具有许多优点: 如集成度高、芯片上扩展多种功能接口(如 USB、网口、UART 接口)、运算处理速度快等; 同时在操作系统方面, 嵌入式 Linux 的内核可任意裁剪、源代码开放、对硬件支持好。因此, 已经有许多基于 ARM 的嵌入式 linux 微控制器应用在如工业过程控制、电网设备监测、石油化工、航空航天等系统中。

在本文设计的飞机重心调控系统的方案由三部分组成: 上位机、下位机控制器、驾驶舱终端。监控中心的上位机使用 Labwindows/CVI 设计, 通过 Labwindows/CVI 简单易用的编程环境, 可以高效灵活地设计出本系统的监控动画^[1]; 下位机控制采用基于 ARM AM4379 芯片的嵌入式 Linux 微控制器; 驾驶舱终端采用 QT 工具, 设计了在嵌入式 linux 系统上的终端交互界面。

考虑到飞机重心调控系统对实时性的要求较高, 而实时性是嵌入式 Linux 系统面临的挑战之一。所以, 为了减小系统的响应延迟时间, 在进行方案设计时, 一方面将部分实时任务交由 AM4379 芯片上的 PRU-ICSS(可编程实时单元子系统和工业通信子系统)处理, 充分利用芯片的并发处理能力; 另一方面在软件上对嵌入式 Linux 系统的实时性进行改进增强。

1 系统整体方案

系统的设计目标是: 根据不同试飞科目要求, 自动调节飞

机重心并保持在目标值。要求系统的实时性好、调节精度高、运算速度快, 具有良好的人机交互界面, 并且能够对重心相关数据进行分析、存储、传输。

1.1 系统组成结构

系统的组成结构如图 1 所示, 主要包括上位机、下位机控制器、驾驶舱终端以及配重 4 个部分。

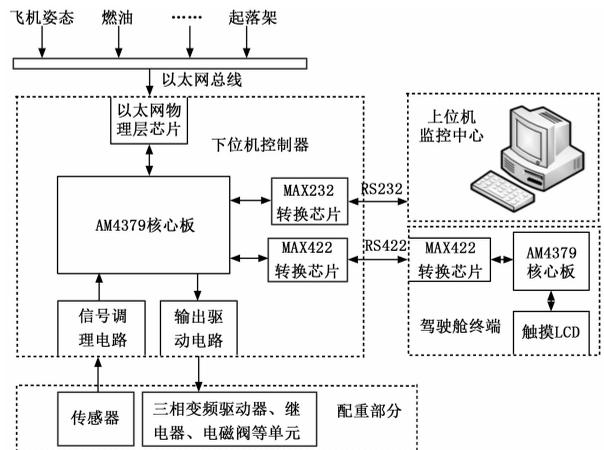


图 1 系统组成结构框图

上位机以 Labwindows/CVI 软件开发监控界面, 通过 RS232 方式与嵌入式控制器之间进行通信。监控界面以图形和动画的方式来呈现系统的实时运行状态并具有故障显示和报警功能。在系统启动后, 可由操作人员进行系统参数设置、选择调节方式、启动当前调节等操作。

下位机控制器采用了基于 ARM Cortex-A9 的 32 位 RISC

收稿日期: 2015-10-28; 修回日期: 2015-11-24。

作者简介: 范蟠果(1960-), 男, 陕西西安人, 硕士生导师, 副教授, 主要从事计算机测控方向的研究。

处理器 AM4379, 运行嵌入式 Linux 系统作为软件平台。控制器上配置有以太网物理层芯片、MAX232 以及 MAX422 电平转换芯片分别用来与机载数据、上位机、驾驶舱终端的通信。

驾驶舱触摸屏上显示飞机实时重心和系统当前调节模式, 飞行员可以通过触摸屏设定飞机重心和切换调节方式。

配重部分由传感器、三相变频器驱动器、配重物、电磁阀、电气设备、三相电机等组成。传感器采集的信号经过信号调理电路后接入核心板, 用于计算配重物各部分的重量及坐标位置; 核心板输出的控制信号, 经过输出驱动电路后输出给变频器、电磁阀等设备。三相电机通过变频器实现软启动, 电机运行时由三相变频器的变频调速来控制重心调节的速度及精度。

1.2 系统的控制结构

系统的控制结构如图 2 所示。控制器通过以太网总线通信方式获取飞机当前的姿态、燃油消耗、飞机起落架状态等数据, 同时采集配重部分的传感器信号获得系统配重物的分布情况, 根据以上信息解算出飞机实时重量和重心并与预设重心比较; 然后根据上位机或者驾驶舱终端的调控指令, 选择相应的控制策略来调节配重物的分布, 从而改变飞机重心位置。

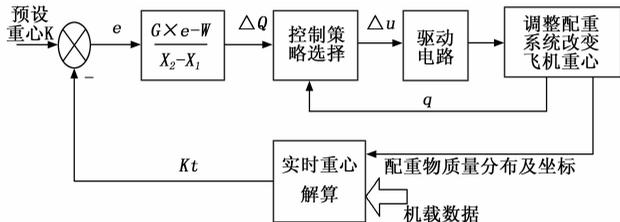


图 2 控制系统结构图

2 硬件设计

2.1 下位机控制器硬件设计

控制器的处理芯片选用 TI 的 AM4379, 芯片的主频高达 1 000 MHz, 32KB L1 指令缓存和数据缓存、256KB L2 缓存以及 256KB 可访问所有主机的片上 RAM。芯片上包含有一个可编程实时 PRU-ICSS (单元子系统和工业通信子系统)。

PRU-ICSS 子系统的优点: 它与 ARM 内核分离, 允许单独操作和计时, 支持 UART 等多种外设接口, 支持 Ether-Cat、Ethernet Powerlink 等多种高速实时通信协议。

该子系统的可编程特性及其对引脚事件和 SoC 资源的访问权限, 使得它可以灵活地实现快速实时响应、专用数据处理操作以及自定义外设接口, 并减轻片上处理器内核的任务负担^[2]。

在设计控制器时, 综合考虑了系统任务的实时性和主处理器的任务量两个方面, 在硬件上即对系统任务进行划分: 由 PRU-ICSS 子系统负责采集传感器输入的信号、读取以太网总线上的数据、通过 RS422 协议与驾驶舱终端进行通信; 由处理器内核负责数据的运算处理、传输以及

输出控制信号。从而使得任务可以在内核处理器和 PRU-ICSS 子系统上并发地被执行处理。

下位机控制器的结构如图 3 所示。

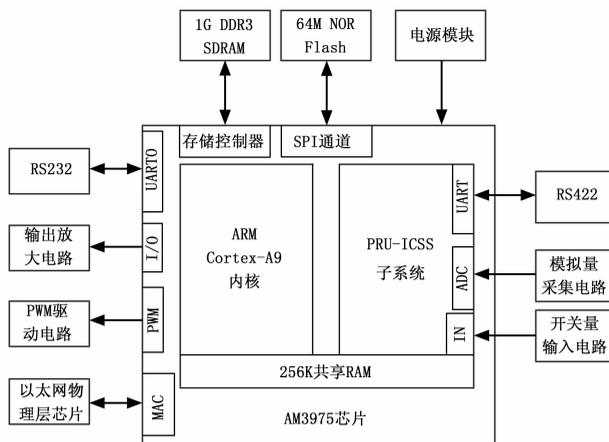


图 3 下位机控制器结构框图

控制器采用 2 片 16 位宽的 SDRAM DDR3 芯片 MT41K256M16HA 并联为 32 位数据宽的 1G 内存; 并配置了 64M 的 NOR FLASH 芯片 MX66L51235F 作为非易失性存储器。

飞机上的直流电源为 28 V, 经过 TPS5402D 电源芯片转换成 3.3 V 和 1.8 V 给处理器内核及外设供电。

1 Gb 以太网收发器 KSZ9031RN (以太网物理层芯片) 为控制器提供以太网的收发功能, 以太网芯片的接口电路原理如图 4 所示。

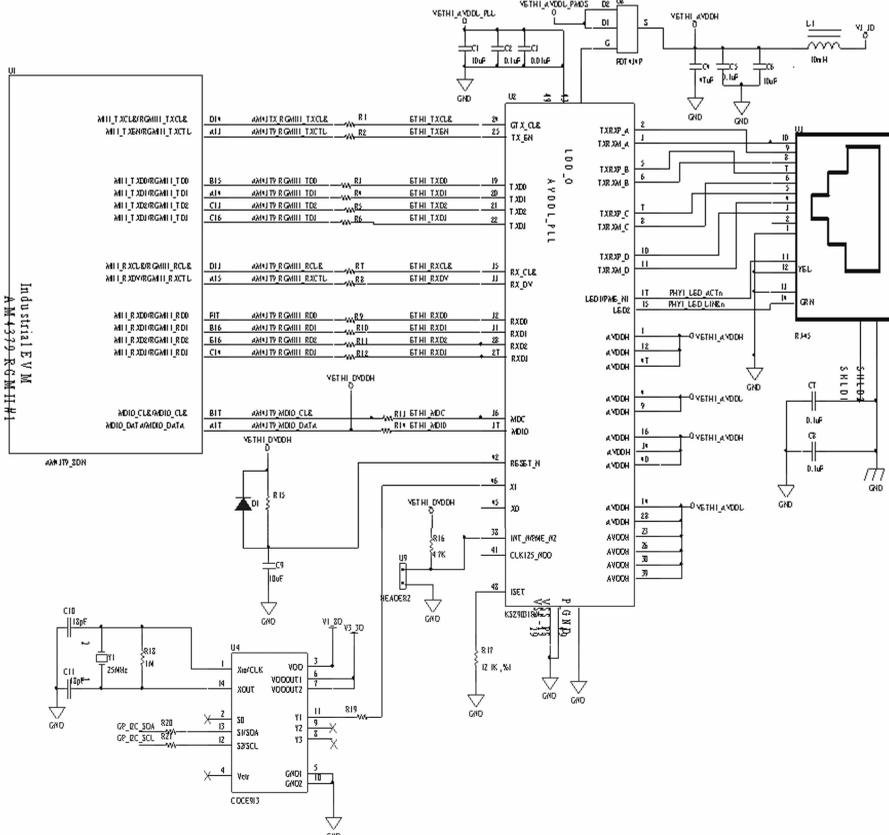


图 4 以太网接口电路原理图

等多方面性能都有显著提高^[3]，但嵌入式 linux 还不是硬实时，因此为了满足本系统实时性方面的要求，需要对其作一些相关的改进。

针对嵌入式 Linux 系统时钟中断的精度不高、核心态进程不可被抢占、虚拟内存的内存管理方式所带来的实时性不足，进行以下优化：

1) 修改系统时钟粒度：系统时钟粒度是整个操作系统的节拍，决定了该系统调度的分辨率。linux 系统中在每一个时钟 tick 的中断服务程序中，都会对所有进程的可运行标志和权值等进行检查，并对时间片进行处理，这将直接影响到能否及时地把 CPU 分配给需要及时运行的进程。在未经修改的嵌入式 Linux 操作系统中每间隔 20 ms，硬件定时器会产生一次中断，引发新的进程调度时机，本系统中，我们将时钟粒度修改为 1 ms，来提高实时性能。

2) 系统时钟每隔 1 ms 会产生一个时钟中断，该中断进程是运行在内核态的，本文将计算飞机重心以及输出控制任务放入处于内核态的该中断处理程序中。

因此，内核程序每隔 1 ms 会根据传感器数据和以太网数据解算一次飞机当前重心并与设定值进行比较，然后选择对应的控制策略来调整配重系统从而调节飞机重心。由于该实时任务融合进了操作系统内核的时钟中断程序中，因而能够对其他非实时任务进行内核抢占，满足实时解算、输出控制信号的要求。

3.3 驾驶舱终端软件设计

驾驶舱终端软件分为：终端交互界面开发、PRU-ICSS 子系统程序两部分。

终端交互界面是以嵌入式 LINUX 作为软件平台，利用 QT 工具开发图形化用户界面：一方面显示当前飞机重心数据和可进行的操作选项，另一方面飞行员通过触摸 LCD 可以选择调节模式、设定飞机重心。

PRU-ICSS 子系统程序通过 RS422 串口完成与下位机控制器的通信：将飞行员设定的调节模式、飞机重心数据发送给下位机控制器，并从下位机控制器中获取实时重心相关数据以及调节进度信息。

4 试验结果与分析

为了验证飞机重心调控系统功能的正确性以及各项指标是否达到要求，对整个系统做了多次地面试验进行测试。一方面记录下飞机实时重心、系统调节时间等数据，并计算出重心的调节误差、调节速度；另一方面通过上位机记录并绘制出重心的动态保持曲线，分析动态保持时的重心误差。

4.1 调节速度及误差分析

通过驾驶舱终端或者监控中心设定目标重心值，此时实时重心偏离设定重心，系统自动启动调节，将飞机重心调节到预设值。多次试验的记录数据如表 1 所示，分析表中数据可知系统调节速度大于 0.9%MAC/min，调节误差小于 0.03%MAC，符合设计指标要求。

4.2 重心动态保持误差分析

表 1 中第二次试验的重心动态保持曲线如图 8 所示：系统启动调节时，飞机初始重心值为 21%MAC，预设重心设定为

表 1 重心自动调节数据记录表

试验	设定重心 %MAC	调节前重心 %MAC	重心调节方向	完成调节时间 /min	调节速度 %MAC/min	完成调节后重心 %MAC	重心调节误差 %MAC
1	19.00	17.00	前向后	2.03	0.99	19.02	0.02
2	22.00	21	前向后	1.00	1.00	22.02	0.02
3	24.00	22.02	前向后	1.90	1.04	24.03	0.03
4	30.20	32.50	后向前	2.02	1.14	30.19	-0.01
5	28.00	30.19	后向前	1.99	1.10	27.98	-0.02
6	26.00	27.98	后向前	1.80	1.10	25.99	-0.01

22%MAC，到 1 min 时，飞机重心被调节到 22.02%MAC。但之后随着飞机燃油（或者飞机姿态、起落架状态等）的影响，重心值发生改变；此时，调控系统朝燃油影响的相反方向调节配重物，将重心稳定在 22%MAC 到 22.2%MAC 的范围内。

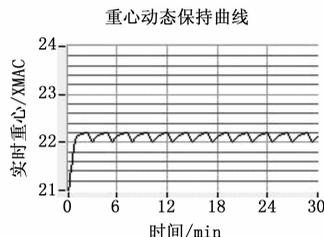


图 8 重心动态保持曲线

5 总结

本文以飞机重心调控系统为项目背景，设计了整个系统的监控方案，包括上位机、下位机控制器、驾驶舱终端 3 个方面的硬件及软件详细设计。在设计下位机控制器时，一方面利用 AM4379 芯片上自带的 PRU-ICSS 子系统来分担处理器任务，使得多个任务可以并发执行，提高了系统的实时性能；另一方面，通过对嵌入式 Linux 操作系统的实时性改进增强来满足响应时间的要求。通过实验室试验测试，系统的性能指标均能达到要求。

参考文献：

[1] 李晖华. 基于 DSP 的飞机自动控制系统设计 [D]. 西安: 西北工业大学, 2007.
 [2] 赵喜洋. 基于虚拟仪器的飞机重心控制系统的设计 [D]. 西安: 西北工业大学, 2013.
 [3] 袁辉建. 嵌入式 LINUX 的实时性增强及其在测控系统中的应用 [D]. 重庆: 重庆大学, 2007.
 [4] 穆胜亮 秦贵和. 基于 3G 网络和 CAN 总线的汽车远程控制系统设计 [J]. 计算机测量与控制, 2015, 23 (7): 2396-2399.
 [5] 张立辉, 赵云忠, 王建生. 基于嵌入式 Linux 的实时性分析 [J]. 微电子学与计算机, 2007, 24 (6): 100-103.
 [6] 王建新, 隋美丽. Labwindows/CVI 虚拟仪器测试技术及工程应用 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2013.
 [7] 张永忠. 含缺陷高聚物材料热致磁致效应测量控制系统设计 [J]. 计算机测量与控制, 2014, 22 (2): 406-409.