

doi: 10.7690/bgzdh.2018.02.002

## 基于无人机的嵌入式标校系统

李知宇<sup>1</sup>, 刘爱东<sup>2</sup>, 王 丰<sup>3</sup>

(1. 海军航空大学研究生管理大队, 山东 烟台 264001; 2. 海军航空大学 201 教研室, 山东 烟台 264001;  
3. 海军航空大学训练部数字化校园办公室, 山东 烟台 264001)

**摘要:** 针对着舰引导系统标校装置中各模块体积大、功率大产生的架设不便和各合作目标独立的问题, 结合校飞需求, 设计一种便于无人机架设的小型化、轻功率的嵌入式标校方案。该方案合理运用嵌入式软件开发有关技术, 对着舰引导系统各合作目标进行分析, 完成了小型化和一体化的校飞系统设计与实现。研究表明: 该系统在 ARM 芯片处理器的统一协同控制和时统下工作, 有较强的实用价值, 为无人机校飞领域开辟了新的思路。

**关键词:** 着舰引导系统; 无人机; 嵌入式设计; 时统

**中图分类号:** TJ8   **文献标志码:** A

## Embedded Calibration System Based on UAV

Li Zhiyu<sup>1</sup>, Liu Aidong<sup>2</sup>, Wang Feng<sup>3</sup>

(1. Brigade of Graduate, Navy Aeronautical University, Yantai 264001, China;

2. Department of Ordnance Science & Technology, Navy Aeronautical University, Yantai 264001, China;

3. Department of Training Digital Campus Office, Navy Aeronautical University, Yantai 264001, China)

**Abstract:** Aiming at the problems of inconvenience of erecting and the independence of cooperation targets that have the problems with large volume and high-power in the calibration devices of landing guidance system and with the needs of the calibration based on UAV, the small size and light power embedding a calibration system based on the unmanned aerial vehicles (UAV) is put forward. The paper uses the embedded software and hardware technology to design the project, analyzing and completing the integrating the cooperation system of the guidance system. The results of the research indicate that the system works with unify-time under the control of the ARM chip processor and has high practical value. The paper opens up new ideas for the calibration based on UAV.

**Keywords:** landing guidance system; UAV; embedded design; unify-time

### 0 引言

随着服役时间的增加, 航母船体变形、机械磨损以及外部撞击等因素会导致系统设备的水平、方位零位发生变化, 电器元器件的老化导致电器零位发生漂移, 这些都会影响着舰引导系统的精度。为保障舰载机的安全降落, 对着舰引导系统的定期标校, 是航母着舰引导系统安全可靠工作的重要保障<sup>[1]</sup>。

无人机校飞作为一种标校方式, 完成着舰引导系统下滑道检查, 是一种非常有效的标校方法, 相比于直升机校飞, 具有安全有效的优点。基于大型无人机的校飞存在操作不便、安全性不高的缺点, 以及校飞中存在各合作目标独立工作、功耗过高且体积过大导致架设不便的问题, 随着航母保障工作的常态化, 迫切需要小型化的无人机搭载标校系统进行标校; 因此, 笔者设计一种需要小型化、轻功率和易于无人机架设的一体化标校系统。

### 1 系统分析

着舰引导系统主要由着舰引导雷达、光学助降装置、中线电视等设备组成。校飞系统组成框图如图 1 所示。对着舰引导系统设备的标校, 需要对着舰引导系统设备提供合作目标, 形成闭环的标校回路, 完成着舰引导系统设备的测量工作。中线电视标定装置与雷达应答机作为合作目标, 完成中线电视与着舰引导雷达的测量工作。对于光学助降装置, 为了形成闭环的标校回路, 标校系统通过光学标定摄像头拍摄舰载机着舰时光学助降装置的光学信息并且存储, 也可将光学标定摄像头作为合作目标分析处理; 设备标校过程中, 真值测量设备与其他测量设备需在统一的时间系统下工作; 标校系统自身需要获取约定真值(以下简称真值), 将着舰引导系统设备的测量数据和真值进行比对, 从而对着舰引导系统设备进行标定。整个系统需要在处理器的统一协同控制下工作。

收稿日期: 2017-10-20; 修回日期: 2017-11-22

作者简介: 李知宇(1992—), 男, 山东人, 在读硕士, 从事嵌入式系统与技术研究。

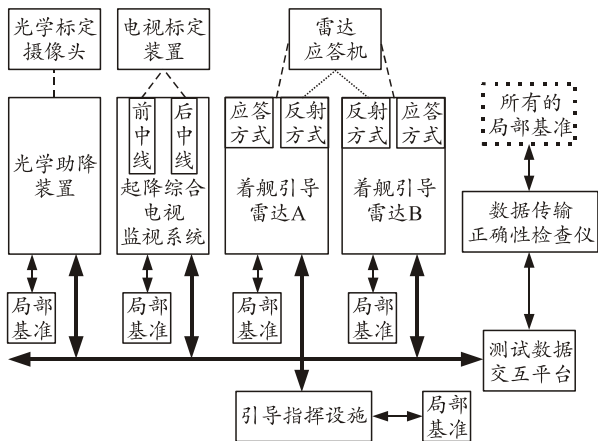


图 1 校飞系统组成

## 2 系统组成

基于无人机的嵌入式标校系统的基本组成框图如图 2 所示。

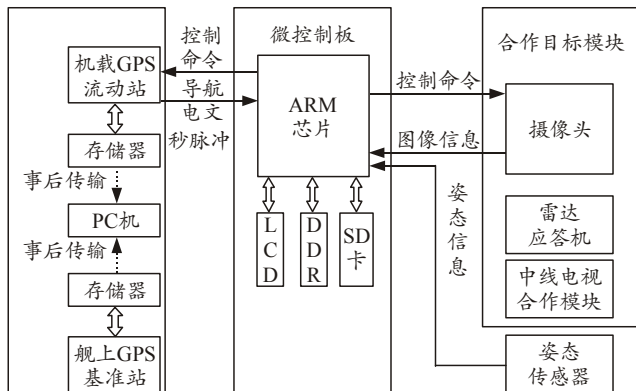


图 2 嵌入式标校系统的组成

无人机搭载着嵌入式标校系统沿特定的下滑轨迹着舰时，合作目标模块的加载完成着舰引导系统设备测量工作，形成的闭环标校回路。GPS 模块采用载波相位事后差分相对定位技术，在理想着舰点和无人机上分别加载 GPS 接收机，获取 GPS 导航电文与秒脉冲信息，并分别存储导航电文，事后将导航电文传输至 PC 机上进行差分处理获得无人机的精确飞行轨迹<sup>[2-3]</sup>，作为标校系统的真值；同时机载的 GPS 接收机作为授时模块，完成系统的授时，使系统在统一的时间下工作；微控制板是整个系统的核心部分，负责控制整个系统的运行，完成数据的处理功能；事后将着舰引导系统设备测量数据与真值进行对比，从而对设备进行标定。

## 3 方案设计

### 3.1 微控制板

微控制板是整个系统运行的核心部分。嵌入式标校系统任务重，需要高性能的处理器。笔者采用

ARM 公司首推的支持 64 位指令集的 ARMv8 处理器，该处理器也支持 32 位的指令，主频 1.2 GHz 的四核 ARM 处理器构成整个系统的控制中心。微控制板的基本组成有 ARM 处理器芯片、RAM 缓存、1 G 的 DDR 内存、16 G 的 SD 卡、定时计数器以及各种 IO 接口等。操作系统采用 LINUX 系统。

### 3.2 GPS 模块

GPS 模块采用载波相位事后差分相对定位技术，用来对无人机与理想着舰点的相对位置进行精确测量，在理想着舰点上装载 GPS 接收机作为基准站，无人机上装载 GPS 接收机作为流动站。载波相位动态差分相对定位技术能达到厘米级的精度<sup>[4]</sup>，可满足标校的要求。为节省成本和降低功耗，将实时差分改为事后差分，基准站与流动站分别保存 GPS 导航电文到存储器，事后传输至 PC 机进行差分处理，获得无人机的精确飞行轨迹作为标校系统的真值<sup>[5]</sup>，事后与着舰引导系统系统设备的测量数据进行对比，从而对下滑道指示一致性进行标定。同时标校系统实时提取出 GPS 模块的系统时间作为时统。笔者采用瑞士 U-blox 公司 69 mW 的超低功率 U-blox 芯片，尺寸为 9.7 mm×10.1 mm×2.5 mm，U-blox 芯片通过 UART 接口串行输出导航电文以及秒脉冲信息。

当 2 台接收机的距离较近，尤其是在 3.5 km 之内时，对 2 台接收机的载波相位进行站间一次差分，GPS 卫星钟差、电离层延迟、对流层延迟以及卫星的距离变化率都可以忽略。

工作时，舰上理想着舰点的基准站 T 与无人机上的流动站 C 将可见星包含载波相位观测值、卫星序号以及测量时刻等信息的 GPS 导航电文存储，事后差分，解算出整周模糊数，进行相对位置的解算。

相对位置的解算公式<sup>[6-7]</sup>：

$$r_c^j - r_T^j + c(\tau_c - \tau_T) = \lambda(N_C^j - N_T^j) + \lambda(\varphi_C^j - \varphi_T^j)。$$

其中： $r_c^j - r_T^j$  为解算所需的相对位置； $\varphi_C^j$ ， $\varphi_T^j$  是流动站、基准站对卫星 j 的载波相位观测值； $\tau_c$ 、 $\tau_T$  是流动站、基准站的测量时间； $N_C^j$ 、 $N_T^j$  是流动站、基准站的整周模糊数。

GPS 系统时间主要是从 GPS 导航电文中获得，每个 GPS 导航总电文由 1 500 bit 组成，分为 5 个子帧，每个子帧 300 bit，每个子帧均以遥测字 TLM 打头，后跟一个转换字 HOW，均为 30 bit，格式如表 1<sup>[6-7]</sup>所示。

表 1 导航电文的格式

帧编号	遥测字	转接字	数据块内容
子帧 1~5	TLM	HOW	1~5 号数据块, 星历参数、轨道参数等

星历参数包括 GPS 系统时间和有关改正参数, 可提取出来, 分析计算得出准确的 GPS 系统时间。

秒脉冲是 GPS 接收机每秒收到的脉冲信号, 处理器根据秒脉冲信号和定时计数器产生所需要的时钟信号同步系统的工作。

### 3.3 合作目标模块

#### 3.3.1 中线电视标定模块

中线电视标定模块采用 LED 灯作为中线电视合作目标的方式, 处理器通过 GPIO 接口发送控制命令, 控制 LED 灯的状态, 事后将中线电视的测量数据与真值进行比较, 标定中线电视。

#### 3.3.2 雷达应答机

雷达应答机作为着舰引导雷达的合作目标, 完成着舰引导雷达的测量。处理器通过 GPIO 接口发控制命令控制雷达应答机的状态。事后将雷达应答机的测量数据与真值进行对比, 从而对着舰引导雷达进行标定。

#### 3.3.3 光学标定摄像头模块

光学标定摄像头在处理器的统一控制下, 拍摄光学助降装置的图像信息, 将采集的图像数据压缩存储。笔者采用 RER-USBFD01 基于 USB 接口的摄像头模组, 由主控芯片和传感器芯片组成<sup>[8-10]</sup>。传感器采用 CMOS 类型传感器, 负责采集图像数据。传感器芯片为 OV2710, 200 万像素, 质量为 30 g, 支持 UVC 协议和 MJPEG 格式。其结构框架如图 3 所示。

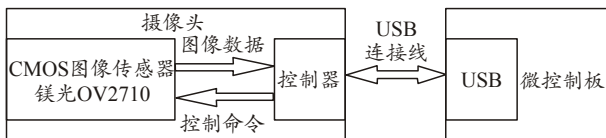


图 3 USB 接口摄像头结构

CMOS 图像传感器芯片主要负责采集图像数据, 控制器负责处理采集的图像数据和与处理器间的通信<sup>[11-12]</sup>。

摄像头模块需要完成的工作有:

- 1) 图像的压缩, 将原始的图像数据转换成 JPG 格式;
- 2) 将同步工作的标校系统采集的图像信息存储。

### 3.4 姿态传感器

姿态传感器测量机载嵌入式标校系统的姿态信息, 笔者采用 LPMS-CU2 小型姿态传感器, 质量为 20 g, 最高采样频率可达 400 Hz, 输出数据格式包括原始数据、欧拉角和四元素等格式, 处理器通过 USB 接口控制姿态传感器状态和读取传感器的数据, 采用特定的存储格式的方式, 存储同步工作系统下采集的传感器数据。

### 3.5 时统

嵌入式标校系统在统一的时间系统下工作, 同步各个模块的工作。时统来源于 GPS 模块的授时。标校系统根据秒脉冲的整秒报时功能和定时计数器的定时功能同步系统真值测量设备和其余测量设备工作<sup>[12-15]</sup>。系统同步设计方案如图 4 所示。

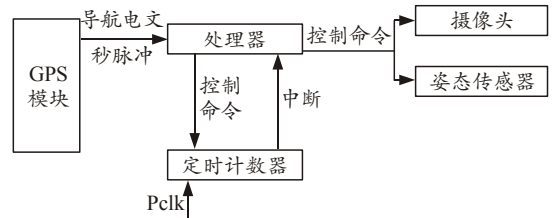


图 4 系统同步总体设计

GPS 模块接收秒脉冲和 GPS 导航电文 2 种信息: 秒脉冲是 GPS 模块每秒接收到的整秒脉冲信号, 导航电文包含 GPS 系统时间。处理器分析导航电文, 获取 GPS 系统时间作为时统对标校系统授时<sup>[14-15]</sup>。系统工作前, 定时计数器根据标校系统所需的工作频率要求, 对定时计数器的定时缓冲寄存器 TCNTBn 与比较缓冲寄存器 TCNTPn 的值进行初始化, 当秒脉冲信息到来时, 开启定时计数的定时计数功能, 对 pclk 时钟信号进行计数, 当计数完毕时, 产生中断, 处理器发出控制命令控制摄像头与姿态传感器采集数据<sup>[13]</sup>。当下一个秒脉冲信号到来时, 定时计数器的的定时缓冲寄存器 TCNTBn 清零, 重新开始上述工作。

### 3.6 数据存储

系统的模块较多, 产生的数据量如表 2 所示。

表 2 各设备产生的数据量

设备	大小	描述
GPS 模块	1 500 bit	每次传输总电文 1 500 bit(30 s 传输)
摄像头	<500 kB	压缩后 JPG 格式
姿态传感器	144 bit	一次输出的总信息量(包括加速度、陀螺仪、磁场信息)

为了事后处理系统同步工作采集的数据, 笔者设计一种特殊的存储格式, 存储同步工作的数据,

设计格式如图 5 所示。

0	16	32	48	208	352 可变长度
序号	长度1	长度2	工作时刻	姿态信息	图像信息

图 5 存储格式设计

前 2 个字节 16 bit 的短整型数据代表此数据块的序列号；长度 1 用 16 bit 短整型数据代表图像信息数据量大小；长度 2 采用 16 bit 短整型数据代表此数据块总的的数据量大小，为了形成类似链表结构方便查找某一数据块而设计；系统的工作时刻存储空间为 160 bit，记录日、时、分、秒、毫秒信息，每个时间单位用 32 bit；姿态信息与图像信息存储在相应位置中。

系统的 SD 卡为 16 G，其中操作系统占用 4 G，标校系统的工作频率为 5 Hz 时，机载的嵌入式标校系统存储数据所需空间理论极限不超过 5 G。当工作频率为 10 Hz 时，系统存储数据所需空间理论极限不超过 10 G，能够满足着舰引导系统标校的要求。

### 3.7 电源

电源方面，采用输出为 5 V 直流电的蓄电池供电。系统中各个模块的电气特性如表 3 所示。

表 3 各模块的电气特性

设备	功率	电气特性
微控制板	<3.5 W	5 VDC, 700 mA 的电源供应
U-blox 芯片	69 mW	3.6 VDC, 23 mA(有转换电路)
摄像头	<1.1 W	5 V, 120~220 mA
LED 灯	165 mW	3.3 VDC(微控制板输出供电)
姿态传感器	155 mW	5 VDC 供电

为了保证标校系统能够顺利完成任务，需保证系统半小时工作后有 20% 的剩余电量。通过对上述各模块的电气参数分析，计算得出大约需要 611 mAh 的容量蓄电池即可满足系统供电要求。这证明了系统的功耗低。

最终，整个系统的硬件连接如图 6 所示。

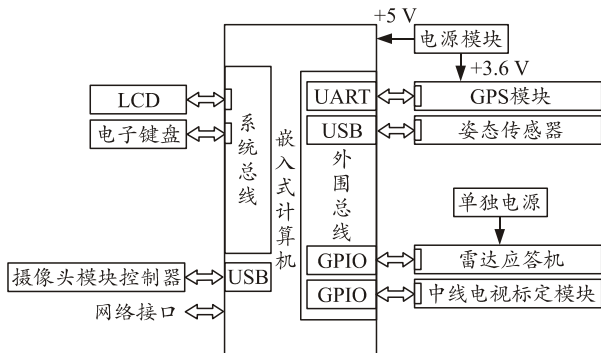


图 6 嵌入式标校系统的硬件组成

## 4 结束语

笔者针对校飞存在的问题，对合作目标进行分析，给出了以 ARM 芯片为核心控制器的嵌入式标校系统的一体化设计方案，将各个合作目标在 ARM 芯片的控制下合为一个整体。系统具有小型化、低功耗，便于无人机架设的优点，操作简便，满足着舰引导系统标校的常态化保障的需求。

文中的创新点有：1) 真值测量设备与测量设备在统一的时间系统下工作；2) 各个标校模块以 ARM 芯片为核心工作，运用嵌入式有关开发技术，改变了合作目标分离的问题，实现一体化标校。

## 参考文献：

- [1] 钟兴泉. 航母着舰引导系统标校方法研究[J]. 现代导航, 2014, 5(3): 175-178.
- [2] 蔡桂祥. RTK 接收机关键模块的设计与实现[D]. 上海: 上海交通大学, 2007.
- [3] 杨开伟, 李娟娟, 杜慧聪. 嵌入式 GPS/BDS 双系统 RTK 算法实现及性能测试[J]. 全球定位系统, 2016, 41(3): 35-38.
- [4] 周巍, 郝金明, 徐兆磊, 等. 基于无人机平台的测控设备精度鉴定系统[J]. 测绘通报, 2013, 59(6): 16-44.
- [5] 郑国勇. 嵌入式 GPS 接收机研制[D]. 广州: 华南理工大学, 2009.
- [6] 袁建平, 罗建军, 越晓奎. 卫星导航原理与应用[M]. 北京: 中国宇航出版社, 2009: 94-99, 129-138, 267-269.
- [7] 胡涛, 张立新, 蒙艳松. GPS 和 Galileo 导航电文设计分析[J]. 电子设计工程, 2013, 21(22): 84-87.
- [8] 刘春成. 基于嵌入式 Linux 的 USB 摄像头驱动开发[J]. 计算机工程与设计, 2007, 28(8): 1885-1888.
- [9] 宋丽华, 高珂. 嵌入式 Linux 下 USB 摄像头驱动实现[J]. 计算机工程, 2010, 36(9): 282-284.
- [10] 周顶辉, 王艳秋. USB 摄像头在嵌入式 Linux 中的应用[J]. 装备制造技术, 2010, 38(3): 129-130.
- [11] 陈利强. 基于 ARM 芯片的嵌入式图像处理平台开发[D]. 广州: 华南理工大学, 2011.
- [12] 白中英. 计算机组成原理[M]. 北京: 科学出版社, 2012: 141-144, 171-174.
- [13] 张福炎. 嵌入式系统开发技术[M]. 北京: 高等教育出版社, 2015: 136-141, 159-169.
- [14] 邓伟. 基于 GPS 时钟同步系统的实现与应用[D]. 北京: 北京邮电大学, 2015.
- [15] 邓伟, 翁子凡. 基于 GPS 接收机的 NTP 网络授时精度测量[J]. 软件, 2014, 35(11): 82-85.