

# 基于 VxWorks 的小型无人机飞行控制软件设计

张 朋, 李春涛

(南京航空航天大学 自动化学院, 南京 210016)

**摘要:** 针对小型无人机功能日益复杂, 迫切需要提高实时性与可靠性等现状, 开发了一套基于 VxWorks 实时操作系统的小型无人机飞行控制软件, 实现了无人机自主起飞、空中巡航和自主着陆等飞行控制功能; 在完成软件需求分析的基础上, 设计了飞行控制软件的总体结构, 并结合 VxWorks 操作系统的运行机制给出飞行控制软件模块化设计方案, 着重介绍了多任务环境下任务划分及优先级分配策略; 半物理飞行仿真试验表明: 该飞行控制软件能够实现自主、指令、人工 3 种飞行模式下的飞行控制功能, 具有良好的实时性和可靠性, 满足飞行控制软件最初的设计需求, 同时大大降低了开发难度, 提高了软件的可维护性和可移植性。

**关键词:** 小型无人机; 飞行控制软件; 模块化; VxWorks; 实时性

## Flight Control Software Design for Small Unmanned Aerial Vehicle Based on VxWorks

Zhang Peng, Li Chuntao

(School of Automation, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

**Abstract:** Aiming at small UAVs' increasingly complex functionality and actuality that needs to improve reliability and real-time performance urgently, develops flight control software based on VxWorks real-time operating system for small UAVs to realize the autonomous flight control, including takeoff, cruise, landing etc. The overall structure of flight control software is given based on software requirements analysis, and combines with the operating mechanism of VxWorks operating system to give modularization design of flight control software, emphatically introduces the tasks division and priority allocation strategy under multitasking environments. The results of Hardware-in-the-Loop simulation shows that tasks management by VxWorks real-time operating system for flight control software meets the design requirements completely, also remarkably improves reliability and real-time performance, furthermore, greatly reduces the developing difficult and enhances maintainability and portability.

**Keywords:** small UAV; flight control software; modularity; VxWorks; real-time

### 0 引言

随着小型无人机的应用日渐广泛、功能日趋复杂, 作为其核心的飞行控制系统对可靠性和实时性的要求也越来越高。这种情况下, 顺序执行的前后台飞行控制系统在多任务实时处理能力方面就表现出很大的局限性<sup>[1]</sup>; 任务响应时间在最坏情况下取决于整个循环的执行时间, 无法分配任务优先级, 并且不同目标平台之间软件可移植性较差。为了提高飞行控制软件的实时性与健壮性, 迫切需要引入嵌入式实时多任务操作系统对小型无人机飞行控制软件进行设计与管理。VxWorks 作为一个高性能、可裁减的嵌入式实时操作系统 (RTOS), 自问世以来, 以其良好的可靠性和卓越的实时性被广泛地应用在各类高精尖技术及实时性要求极高的领域<sup>[2]</sup>, 符合小型飞行控制软件的实时性和可靠性要求。

### 1 飞行控制软件需求分析

小型无人机飞行控制软件的设计开发需要综合考虑功能性要求和非功能性要求 (性能指标)。其中, 功能性要求主要包

括自主、指令和人工 3 种导航模式下的飞行控制与管理功能<sup>[3]</sup>。1) 自主导航模式下, 能够按照预设任务航线自动跟踪高度和航迹完成自主起飞、空中航迹跟踪及自主着陆等阶段的飞行控制; 2) 指令导航模式下, 飞控系统能够准确及时地响应地面站的遥控指令, 执行纵向模态和横侧向模态的指令飞行动作; 3) 人工导航模式下, 接收地面站 Futaba 遥控量直接对舵面进行操纵。此外, 飞行过程中还要对无人机进行实时监控, 对故障和突发事件能够迅速作出应急处置, 最大程度保证无人机飞行安全。飞行控制软件整体架构如图 1 所示。

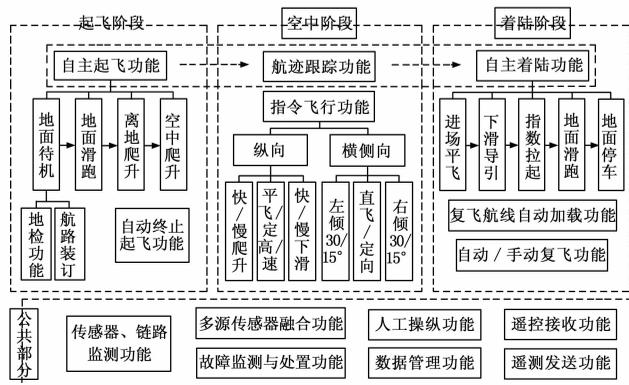


图 1 飞行控制软件整体架构

收稿日期: 2013-12-30; 修回日期: 2014-02-26。

基金项目: 飞行器一体化技术重点实验室航空基金项目 (20125852057)。

作者简介: 张 朋 (1989-), 男, 山东人, 硕士研究生, 主要从事无人机飞行控制技术研究。

为了满足无人机小型化要求,采用资源丰富、集成度高的 PowerPC 系列微控制器 MPC565 作为硬件平台,相对于分布式系统来说,CPU 任务负荷有所提高<sup>[4]</sup>,对 CPU 多任务处理能力提出更加严格的要求。并且考虑到小型飞行控制计算机的体积要求,采用单余度的飞行控制系统,因此,对飞行控制软件的实时性和可靠性等非功能性要求也更为苛刻。

## 2 飞行控制软件设计

按照软件工程层次化的设计思想,首先将整个飞行控制软件划分为 3 个层次:设备驱动层、操作系统层和软件功能层。然后根据功能需求的不同,采用模块化设计的方法<sup>[5]</sup>,将飞行控制软件细分为以下功能模块:数据采集模块、标准 I/O 模块、解码模块、监测模块、故障处置模块、数据融合模块、调度管理模块、数据管理模块、遥控遥测模块、导航模块、控制律模块和舵机控制模块等,各模块功能既相互联系又相互独立,共同实现整个飞行控制软件的飞行控制功能,如图 2 所示,数据采集模块实时采集无人机当前的姿态、速度、位置等传感器信息,经过数据融合模块处理后将导航信息传送给导航模块,由导航模块负责自主、指令和人工 3 种飞行模式的切换与调度,通过对导航信息或地面遥控器控制量进行解算得到舵面控制量,经过舵机控制模块的转换驱动舵机偏转,实现无人机的飞行控制与管理功能。监测模块全程对无人机的故障状态进行监测,当传感器或链路发生故障时,转入执行相应的应急故障处置策略,最大程度的保障无人机的飞行安全。

Flash 启动。

3) 确定 WDB 调试代理方式。修改引导行,以串口作为 WDB 调试代理方式,并添加代码拷贝函数实现 VxWorks 映像从 ROM 到 RAM 的搬移,以减少 VxWorks 引导加载时间,提高软件开发效率。

BSP 定制完成后,通过 Tornado 开发环境生成引导程序 (bootrom),然后根据飞行控制软件的需要对 VxWorks 操作系统内核组件进行裁剪,生成 ROM 驻留型 VxWorks 映像。为了实现 MPC565 内部 Flash 引导启动 VxWorks 操作系统,需要将复位配置字、引导程序和 VxWorks 映像分别固化到内部 Flash 三个不同的地址段,如图 3 所示。飞控机上电后,首先执行引导程序,进行目标板的初始化,并把代码段和数据段拷贝到 RAM\_HIGH\_ADRS 地址处继续运行,引导成功后,直接将 VxWorks 映像从内部 Flash 拷贝到 RAM\_LOW\_ADRS 处,并将程序指针指向该地址段开始启动 VxWorks。至此,目标飞控机的 VxWorks 操作系统移植完成。

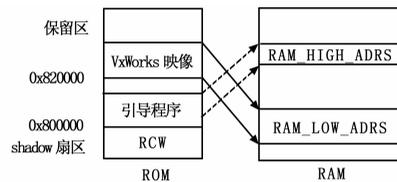


图 3 VxWorks 启动过程

## 4 任务划分与优先级分配

### 4.1 任务划分

飞行控制系统属于多任务实时系统,随着其功能的不断完善和性能需求的不断提高,任务复杂度也越来越高,多任务的合理划分对飞行控制软件的稳定可靠运行起着至关重要的作用<sup>[7]</sup>。参照操作系统任务划分的 H. Gomma 原则并结合飞行控制软件自身的运行特点对各功能模块进行任务划分,并总结了如下几条多任务划分规则:

- 1) 不同的外设划分为不同的任务;
- 2) 突发性事件划分为不同的任务;
- 3) 含有大量运算的事件归为一个任务;
- 4) 功能耦合比较紧密的事件归为一个任务;
- 5) 实时性要求较高的事件单独划为一个任务;
- 6) 周期性发生的事件划分为不同的任务;
- 7) 时间互斥事件划分为不同的任务;

参照多任务划分规则,将飞行控制软件各功能模块细分为起飞、着陆等 22 个任务(如表 1 所示),通过多任务实时调度,减少不同任务之间的功能耦合,提高飞行控制软件的实时性和健壮性。

导航模块在飞行控制软件中处于决策者地位,是无人机完成飞行控制功能的关键任务。按照飞行模式的不同可以将其划分为人工、指令、自主 3 种导航模式,根据规则 2),将指令导航划分为一个单独的任务,只有在收到指令导航命令后才会触发该任务,具有一定的随机性,属于突发性任务。人工导航可以独立完成无人机的导航任务,对其他功能模块依赖性很小,属于功能耦合比较强的任务(规则 4)),因此,将其单独划分为一个任务。自主导航是 3 种导航模式中最复杂也是最重要的一个,根据功能要求的不同可以分为起飞段、空中段和着

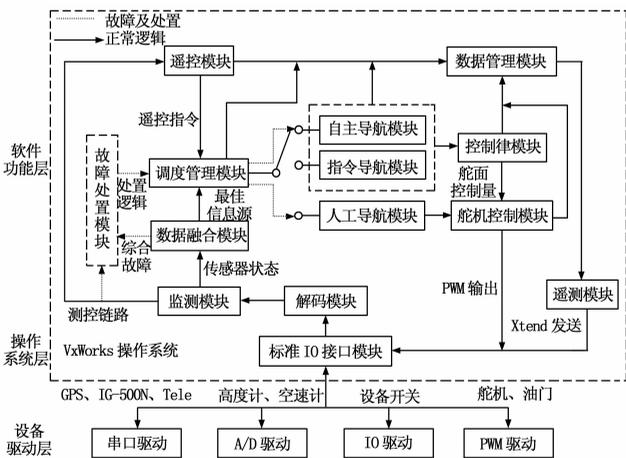


图 2 飞行控制软件功能流程图

## 3 VxWorks 实时操作系统移植

为了实现 VxWorks 操作系统在目标机中正常启动运行,需要根据目标机资源对 VxWorks 操作系统进行移植,即板级支持包<sup>[6]</sup>(简称 BSP)的开发。BSP 作为介于目标机硬件和 VxWorks 操作系统之间的中间层软件,完成目标机上电时的初始化工作,配置外围设备使其工作于正常状态,为 VxWorks 操作系统及上层软件提供了一个与硬件无关的软件平台。目标飞控机以 MPC565 作为硬件平台,BSP 开发需要解决的问题有:

- 1) CPU 配置。完成各中断、时钟等寄存器配置,设置 ROM 和 RAM 的地址、容量等参数,初始化外围设备。
- 2) 确定引导程序启动方式。配置复位配置字 (RCW),完成内部 Flash 基地址的映射,使引导程序从 MPC565 的内部

陆段 3 个阶段, 将其分别划分为自主起飞、航迹跟踪和自主着陆 3 个时间上互斥的任务, 每个任务独立完成各阶段的导航与控制功能。为避免功能互斥任务冲突, 在触发下一阶段导航任务时, 将关闭当前阶段与之互斥导航任务, 降低 CPU 的任务负荷, 减少各飞行阶段之间的控制耦合, 提高飞行控制软件的健壮性。

表 1 任务划分及优先级分配

功能模块	任务名称	划分规则	优先级
调度管理模块	VxWorks 任务	—	0~50
控制律模块	控制律解算任务	规则(c)(e)	101
导航模块	起飞、着陆任务	规则	102
	自主、指令、人工导航任务	(b)(d)(g)	103
监测模块	IMU 监测任务	规则(a)(f)	104
	GPS 监测任务		105
	链路监测任务		106
	模拟量监测任务		107
遥控接收模块	遥控接收任务	规则(a)(f)	108
故障处置模块	航迹返回、盘旋、复飞、迫降任务	规则(b)(e)(g)	109
舵机控制模块	舵机输出任务	规则(e)(f)	110
数据融合模块	内回路融合任务	规则	111
	外回路融合任务	(d)(e)(f)	112
数据采集模块	GPS 接收任务	规则	113
解码模块	模拟量采集任务		114
数据管理模块	IMU 接收任务		(a)(d)(f)
遥测发送模块	遥测发送任务	规则(a)(f)	121

### 4.2 优先级分配

任务划分完成后, 综合考虑各任务在飞行控制软件中的重要度、实时性要求、执行频率及任务间的同步方式, 为每个任务分配相应的优先级。VxWorks 操作系统支持 256 级优先级(0~255), 系统任务和设备驱动任务的优先级一般处于 0~100 范围内, 为了更好地协同工作, 应用程序的任务优先级一般分配在 101~255。首先, 根据任务在飞行控制软件中所扮演角色的重要度, 先将任务划分为 3 大类: 高优先级类(101~110)、中优先级类(111~120)和低优先级类(121~130)。

控制律解算任务、导航任务及舵机输出任务是整个飞行控制软件的主控任务, 在无人机飞行过程中起着主导作用, 属于高优先级类任务。遥控接收任务、监测任务和故障处置任务为飞行控制软件提供信息监测及应急处置措施, 是保证无人机飞行安全的关键任务, 因此也属于高优先级任务。传感器接收任务和数据融合任务为飞控系统提供准确无人机状态信息, 属于中优先级类任务。遥测发送任务用于地面人员对无人机进行实时监控, 对实时性和频率要求不高, 对整个系统的影响最小, 因此把它归为低优先级任务。

同一重要类别的任务以实时性和频率要求为指标, 对其优先级进一步细分, 分配结果见表 1。以高优先级任务为例, 控制律解算任务对实时性和频率要求极高, 所以分配最高优先级。导航任务充当决策者地位, 分配次高优先级。监测任务和故障处置任务(遥控接收任务也归为一种应急处置措施)属于事件相关任务, 根据任务同步的先后顺序, 优先级依次降低。

### 4.3 任务调度

飞行控制软件任务复杂且繁多, 任务调度的合理性直接影响飞行控制软件的飞行控制品质。VxWorks 操作系统采用基于优先级的抢占式任务调度算法作为它的默认调度策略(如图 4 所示), 同时也支持时间片轮转调度算法。根据飞行控制软件任务优先级分配结果(表 1), 采用基于优先级的抢占式任务调度算法来实现飞行控制软件各任务的调度, 高优先级任务可以打断低优先级任务的执行抢占 CPU 资源, 高优先级任务执行完毕后, 继续执行之前被打断的低优先级任务, 这种调度算法可以保证飞行控制软件中高优先级任务的实时性。对于不允许被打断的低优先级任务, 可以通过在任务执行前上锁, 任务执行之后解锁的任务抢占锁方式, 有效地满足了任务优先级和任务连续性的需求, 提高了飞行控制软件的可靠性。

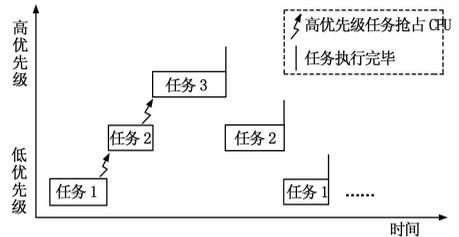


图 4 基于优先级的抢占式任务调度

## 5 仿真实验

### 5.1 性能测试

为了验证 VxWorks 实时操作系统环境下飞行控制软件设计的合理性, 需要对软件的实时性及任务负荷进行测试。Tornado 开发环境提供了一个专门用于任务状态分析的工具—WindView, 它以图形化的方式详细记录了各任务(包括系统任务)以及中断服务程序之间的调度关系。表 2 给出了飞行控制软件全负荷工作状态下各任务运行周期及 CPU 占用率的统计情况(CPU 占用率计算方法: 各任务总的运行时间占飞行控制软件运行总时间的百分比, 并进行多次测量得到各任务 CPU 占用率的范围)。

表 2 任务运行周期及 CPU 占用率统计

任务名称	设计周期/ms	运行周期/ms	CPU/(%)
控制律解算任务	10	9.84~10.56	0.67~1.8
自主导航任务	20	19.24~20.84	0.83~1.04
IMU 监测任务	20	19.65~20.33	0.36~0.74
测控监测任务	50	49.84~50.32	0.13~0.2
GPS 监测任务	50	49.44~50.81	0.16~0.24
遥控接收任务	25	23.86~26.89	0.19~1.45
舵机输出任务	20	19.23~20.67	0.49~1.43
内回路融合任务	10	8.86~11.84	0.57~1.04
外回路融合任务	40	37.92~42.48	0.28~0.45
GPS 接收任务	25	23.56~27.72	0.24~3.2
AD 采样任务	50	46.84~53.59	0.89~2.3
IMU 接收任务	10	8.59~12.76	0.26~4.3
遥测发送任务	50	47.46~52.85	0.68~1.4
其他中断	—	—	15.16~27.4
CPU Idle	—	—	51.1~62.4

表 2 中从上到下各任务的优先级依次降低, 从统计数据可

以看出，优先级较高的任务的实际运行周期在设定周期上下进行小幅度的波动，波动幅值都保持在微妙级别。存在这种现象的原因是因为飞行控制系统中工作于中断模式下的传感器信息量较大，系统产生中断接收传感器信息的过程中耗费了大量 CPU 资源（表 2 中的中断负荷可以说明这一点），而系统中断的优先级要远高于其他上层任务，所以即便优先级最高的任务也会被其他系统中断抢占，这是任何操作系统都无法避免的，但这种中断抢占时间都维持在微妙级别，不会对系统上层任务的实时性造成影响。随着任务优先级的降低，低优先级任务被高优先级任务抢占的概率也会增大，周期波动的赋值也随之增大，这也正式 VxWorks 基于优先级抢占调度算法的特点所在。

表 2 中所有任务的 CPU 占用率最大值之和大约为  $Total = 46.6\%$ ，与 WindView 工具实测的 CPU 最小空闲率  $51.1\%$  (GPS Idle) 基本相吻合，由此看来，该飞行控制软件的设计符合最初的设计需求，完全满足实时性、可靠性等性能要求，并且留有大量 CPU 空闲时间，为后续的软件开发和升级提供了便利。

### 5.2 半物理飞行仿真试验

半物理飞行仿真验证平台由飞行控制计算机、Tornado 开发主机、装有 FlightGear 的 PC 机（双显示器）、地面基站、监测 PC 机和 Futaba 遥控器组成。半物理飞行仿真环境原理如图 5 所示。

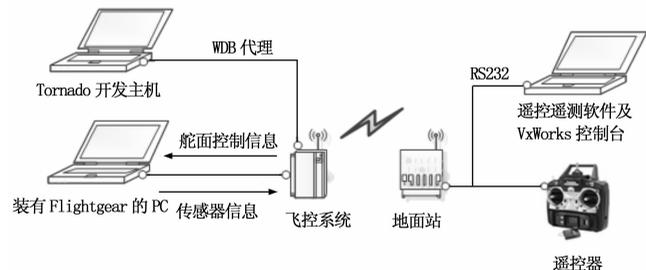


图 5 半物理飞行仿真环境原理图

为了满足小型无人机飞行控制软件快速开发要求，利用 FlightGear 内置的六自由度数字飞机模型对样例无人机进行飞行模拟<sup>[8]</sup>，将六自由度信息和传感器信息通过串口发送给飞控机，同时飞控机也将实时解算的舵面控制信息传送给 FlightGear，构成一个完整的仿真回路。地面基站通过无线电台与飞控机进行通讯，接收飞控机下传的飞行状态信息供地面遥控遥测软件实时显示，同时上传地面站遥控指令和 Futaba 遥控器指令，实现地面人员对无人机的操纵。Tornado 开发主机用来实时监测飞行控制软件各任务的运行状态和调度关系，并向控制台打印输出调试信息（包括异常信息）。

半物理飞行仿真验证即功能验证，包括人工、指令和自主 3 大导航功能。其中，人工导航主要由地面 Futaba 遥控器对舵面进行直接操纵，逻辑比较简单，主要对两者进行详细说明。

#### 5.2.1 指令导航飞行仿真试验：

当无人机到达安全飞行高度之后，切换当前飞行模式为指令飞行模式。

首先，对无人机纵向飞行模式（快爬升、慢爬升、平飞、

快下滑、慢下滑）进行了仿真功能验证，如图 6 所示，给出高度和俯仰角在纵向模式切换过程的响应曲线对照图。在①时刻，无人机收到地面遥控遥测软件发送的快爬升指令，并立即作出响应，接入纵向快爬升控制律，保持  $15^\circ$  的俯仰角进行快速爬升；②时刻，无人机又收到慢爬升指令，随即接入慢爬升控制律，将  $15^\circ$  俯仰角平稳的过渡到  $5^\circ$  俯仰角，并保持  $5^\circ$  俯仰角实现无人机的缓慢爬升，爬升速率的大小可以通过高度曲线的斜率直观反应出来；③⑥时刻执行平飞指令，接入高度跟踪控制律保持当前高度平飞，此时有大约  $3^\circ$  的俯仰角补偿量；④⑤时刻与①②时刻相类似，依次执行快下滑和慢下滑指令，接入不同的控制律，保持给定的控制目标值完成相应的飞行动作。

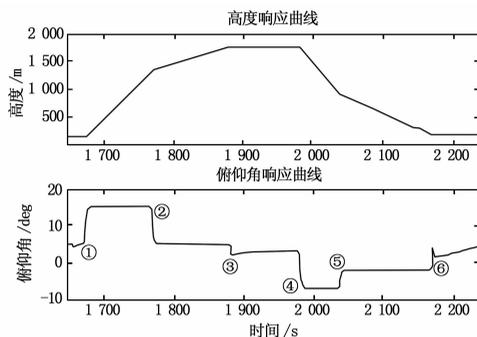


图 6 纵向飞行模式仿真结果

无人机横侧向飞行模式（左倾  $30^\circ$ 、左倾  $15^\circ$ 、直飞、右倾  $30^\circ$ 、右倾  $15^\circ$ ）的仿真功能验证结果如图 7 所示。在①时刻，飞行控制软件收到左倾  $30^\circ$  指令后迅速进行响应，接入滚转角保持控制律，保持  $30^\circ$  的滚转角向左滚转，由于航迹角范围为  $0\sim 360^\circ$ ，所以航迹角过  $0^\circ$  或  $360^\circ$  时会发生跳变；②时刻，无人机收到左倾  $15^\circ$  指令，滚转角由  $30^\circ$  平缓过渡到  $15^\circ$ ，并保持  $15^\circ$  滚转角向左缓慢滚转，从航迹角响应曲线也可以看出，此刻航迹角的变化幅度减缓；在③⑥时刻，无人机执行直飞指令，接入航迹保持控制律保持当前航迹角直飞；④⑤时刻依次执行右倾  $30^\circ$  和右倾  $15^\circ$  指令，过程同①②类似。

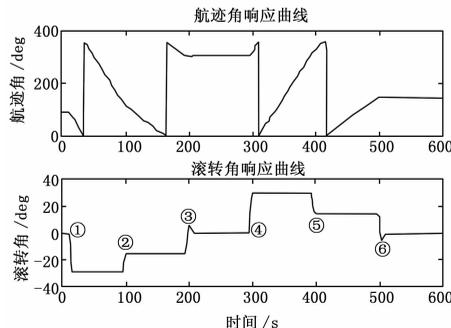


图 7 横侧向飞行模式仿真结果

从飞行模式响应曲线来看，飞行控制软件能够准确及时地响应地面发送的模式切换指令，并按照预先设计的控制逻辑完成控制目标和控制策略的平稳过渡，保证了无人机模式切换过程的稳定性，反映出飞行控制软件各任务设计的合理性及良好的实时性和可靠性，同时也验证了指令飞行模式下各飞行模式

控制逻辑和控制律结构的正确完备性。

### 5.2.2 自主导航飞行仿真试验

自主导航飞行仿真试验是检验无人机飞行控制软件飞行控制品质的主要手段<sup>[9]</sup>, 它需要各任务的协调配合, 对系统实时性和可靠性要求高。自主飞行过程中, 可以通过地面遥控遥测软件对无人机航迹、高度跟踪能力进行实时观测。根据遥控遥测软件记录的位置信息绘制了自主飞行航迹曲线(图 8), 另外, 通过 FlightGear 三维视景动画可以直观地显示当前无人机的飞行品质。从航迹跟踪的效果来看, 自主飞行仿真过程中实际飞行航路与预设航路吻合, 高度差保持在容忍范围以内( $\pm 3$  m), 各任务的调度频率和时序也正常, 在满足实时多任务软件设计要求的前提下, 达到了飞行控制软件设计的控制目标。

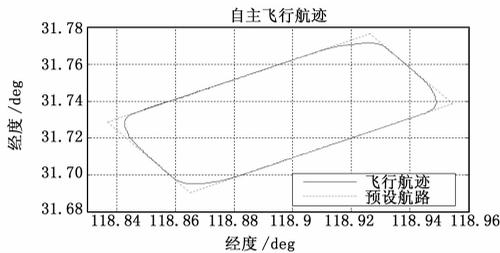


图 8 自主飞行航迹曲线

## 6 结束语

小型无人机功能复杂, 飞行过程中受外界环境等不确定性因素影响较大, 实时多任务操作系统能够以更加优化的策略来

管理软硬件资源, 不仅满足飞行控制软件对实时性和可靠性的要求, 而且提高了软件的模块化程度、可维护性和可移植性。因此, 使用实时操作系统来设计开发小型无人机飞行控制软件必将成为未来的一种趋势。

### 参考文献:

- [1] 陈天华, 郭培源. 小型无人机自主飞行控制系统的实现 [J]. 航天控制, 2006, 24 (5): 86-90.
- [2] 马晓宁, 房建成, 盛蔚. 基于 VxWorks 的 MUAV 飞行控制系统设计 [J]. 传感器与微系统, 2009, 28 (5): 90-93.
- [3] Pongpunwattana A, Rysdyk R. Real-time planning for multiple autonomous vehicles in dynamic uncertain environments [J]. Journal of Aerospace Computing, Information and Communication, 2004, 1 (12): 580-604.
- [4] 武华, 刘军伟. 基于 VxWorks 的多任务程序设计 [J]. 计算机技术与发展, 2011, 21 (9): 163-166.
- [5] 张治生, 陈怀民, 吴成富, 等. 小型无人机飞控系统软件可靠性设计与建模研究 [J]. 计算机测量与控制, 2011, 19 (6): 1489-1492.
- [6] WindRiver System Inc. The VxWorks BSP Developer's Guide 5. 5 [Z]. 2003.
- [7] 刘大明, 李海明. 基于 VxWorks 嵌入式系统下的实时性研究 [J]. 核电子学与探测技术, 2011, 31 (2): 139-142.
- [8] Sorton E F, Hammaker S. Simulated flight testing of an autonomous unmanned aerial vehicle using flightgear [J]. Arlington, VA, AIAA, 2005, 7083.
- [9] 耿通番. 无人机实时飞行仿真平台设计 [J]. 南京航空航天大学学报, 2009, 41 (B12): 34-37.

(上接第 2679 页)

同样, 图 4 显示的是遥感器电压 1、电流 1、DSP 工作状态的三路遥测曲线, 遥感器电压 1 的正常范围是  $2.5 \text{ V} \pm 0.5 \text{ V}$ , 电流正常范围小于  $3 \text{ A}$ , DSP 工作状态的正常范围是  $2.5 \text{ V} \pm 0.5 \text{ V}$ 。由图中可以清晰地看出, 遥感器工作电压正常, 工作电流在正常范围内波动, DSP 工作状态也正常。据此可以判断, 卫星上该遥感器的工作正常。

总之, 通过卫星遥测的图形化显示, 以及异常报警信息和日志的输出, 可以清晰地反映出卫星在一定工作时间段内的工作状态和各遥测量的相互关联情况。通过遥测数据处理软件自动化存储、判别、报警, 也方便了测试工作者对遥测数据及故障的查找、回溯、定位, 提高了卫星遥测数据的故障识别和判读效率, 为后续开发应用于航天遥感器的自动化测试系统<sup>[10]</sup>提供了新思路。

## 4 结论

本文采用 Microsoft VBA 技术, 描述了一种用于卫星遥测数据处理的新手段, 构建了基于 VBA 技术的卫星遥测数据处理软件, 详述了其组成原理及实现方式, 并给出了其在卫星遥测数据处理过程中的实例应用。本设计原理简单、开发周期短, 满足了实际航天工程中的应用需求。目前, 此软件已成功应用于某航天型号的数据处理分析平台中。

### 参考文献:

- [1] 陈世平. 关于航天遥感的若干问题 [J]. 航天返回与遥感, 2011, 32 (3): 1-8.
- [2] 房长征, 马好东, 罗凯, 等. 基于遥测数据的航天器长期性能预示方法研究 [J]. 计算机测量与控制, 2013, 21 (7): 1792-1796.
- [3] 郭坚, 张猛, 赵蕾. 一种用于航天器飞控演练的数管模拟器设计 [J]. 航天器工程, 2011, 20 (2): 35-40.
- [4] 单长胜, 李于衡, 王荔斌. 在轨卫星异常报警和故障诊断方法研究 [J]. 飞行器测控学报, 2011, 30 (3): 6-10.
- [5] 张岫. Excel VBA 入门与典型实例 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2007: 1-2.
- [6] 赵志东. EXCEL VBA 基础入门 [M]. 北京: 人民邮电出版社, 2006.
- [7] Davis G H. VBA 从入门到精通 (第二版) [M]. 北京: 电子工业出版社, 2008: 288-301.
- [8] 杜冬梅. 航天器 CCSDS 遥测数据包处理方法研究 [J]. 电讯技术, 2007, 47 (2): 176-180.
- [9] 杜国明, 陈逢田. CCSDS 遥测包处理分析 [J]. 航天器工程, 2007, 16 (5): 110-114.
- [10] 杨召, 肖明清, 胡斌, 等. 国外航空自动测试描述语言发展综述 [J]. 计算机测量与控制, 2013, 21 (4): 833-836.