

电力巡检吊舱大容量存储系统的设计与实现

易琳¹, 马鹏阁², 王柯¹, 钱金菊¹, 彭向阳¹, 王增光³

(1. 广东电网有限责任公司电力科学研究院, 广州 510000; 2. 郑州航空工业管理学院, 郑州 450000;

3. 中国航空工业集团公司洛阳电光设备研究所, 河南 洛阳 471000;)

摘要: 随着电力巡检技术的发展, 无人机挂载光电巡检吊舱进行自动巡检任务成为电力巡检作业的一个重要模式; 大量巡检数据的存储是光电巡检吊舱巡检任务的重要组成部分; 为解决电力巡检吊舱大量巡检数据的存储问题, 针对电力巡检吊舱存储系统的特点进行了分析, 对存储系统的接口进行了详细的研究, 提出以低功耗处理器为硬件核心, WinXPE 嵌入式操作系统为系统软件平台的存储系统; 该存储系统使用通用计算机硬件平台和操作系统, 解决易用性问题, 同时具有其嵌入式系统的特点; 实现了电力巡检吊舱的红外热像仪热图数据、可见光摄像机视频、照片、定位定姿数据、控制数据等多类型、大容量的数据存储; 并经过实践验证, 满足电力巡检吊舱系统对功耗、体积、功能、性能等方面的要求, 运行稳定、可靠。

关键词: 无人机电力巡检; 光电吊舱; 大容量信息存储; XPE 系统

Design and Implementation of Large Capacity Storage System for Power Inspection Pod

Yi Lin¹, Ma Pengge², Wang Ke¹, Qian Jinju¹, Peng Xiangyang¹, Wang Zengguang³

(1. Guangdong Electric Power Grid Co., Ltd. Electric Power Research Institute, Guangzhou 510000, China;

2. Zhengzhou University of Aeronautics, Zhengzhou 450000, China;

3. Luoyang institute of Electro-optical Equipment of AVIC, Luoyang 471000, China)

Abstract: With the development of electric patrol technology, the automatic inspection task of the optoelectronic patrol pod by unmanned aerial vehicle (UAV) has become an important mode of power inspection. The storage of a large number of inspection data is an important part of the inspection task of the optoelectronic inspection pod. To solve the storage problem of a large number of power patrol inspection data, according to the characteristics of electric power pod storage system is analyzed, the interface of the storage system is studied in detail, based on low power processor core, WinXPE embedded operating system for storage system software platform. The storage system uses the general computer hardware platform and operating system to solve the usability problems, and also has the characteristics of its embedded system. The storage system realizes data storage, such as data, videos, photos, positioning data, control data and so on. It is verified by practice that the power, volume, function and performance of the power patrol cabin system are satisfied, and the operation is stable and reliable.

Keywords: UAV power patrol; photoelectric pod; large capacity information storage; XPE system

0 引言

国内电力线路具有分布范围广、地形环境复杂等特点, 特别是有些杆塔线路架设在高山、峡谷、河流等地方, 不便于巡线人员到达, 采用人工巡线的方法并不能很好的完成巡检任务。随着无人机和光电巡检吊舱技术的发展和运用, 无人机挂载光电巡检吊舱逐渐成为电力巡线的一个重要手段, 弥补了传统巡线方式的不足, 提高巡检效率。

电力巡检数据信息是无人机电力巡线的重要目的, 也是电力巡检自动化、数字化的重要组成部分; 是后期任务管理、数据分析、数据存档、数据查询的重要数据源。无人机电力巡检数据存储系统是巡检系统的一个必不可少的组成部分。

通常具有自主任务功能的无人机电力巡检吊舱具有以下

几种传感器: 可见光摄像机、红外传感器、照相机、定位定姿系统。可见光摄像机主要是获取电力设施的高清视频影像, 从整体上观察电力设施是否存在缺陷; 红外传感器获取电力设施的红外热图数据, 对异常发热点进行成像探测, 判断电力设施是否存在破损故障; 照相机提供电力设施高分辨率照片, 用于观察电力设施的局部细节, 查看销钉级的故障; 定位定姿系统主要为吊舱提供 GPS 位置和姿态信息, 用于电力巡检吊舱的自动精确瞄准目标。以上电力巡检吊舱的传感器信息作为巡检数据均需要进行存储和记录。由于常规巡检用无人机的作业时间一般不超过 4 小时, 所以电力巡检吊舱存储系统满足 4 小时的数据记录要求。

1 系统设计原则

存储系统主要满足巡检吊舱各类数据采集和存储功能, 数据内容包括可见光视频数据、红外热图数据、照相机照片、GPS 信息、巡检吊舱状态信息等。存储系统位于电力巡检吊舱的内部, 所以该存储系统需要和吊舱进行一体化集成设计, 既要满足电力巡检吊舱的整体设计要求, 又要

收稿日期:2017-11-15; 修回日期:2018-01-02。

作者简介:易琳(1986-),男,江西宜春人,工学博士,工程师,从事电力智能巡检及应用研究工作方向的研究。

满足大容量数据的存储需求。

存储系统设计时需要从以下几个方面进行考虑:

功耗: 电力巡检吊舱内部是一个气密空间, 如果发热量过大, 不利于其内部各传感器性能的发挥, 同时影响元器件的工作寿命, 所以吊舱内部各模块功耗要严格控制。存储系统功耗不宜过大, 设计目标在 15 W 以内。

密封性: 巡检吊舱是一个密封的整体, 存储系统的数据进行存储和导出时, 不能影响电力巡检吊舱整体的密封性。存储系统对外接口的插座采用密封插座形式。

小体积: 存储系统位于吊舱的内部, 吊舱内部结构紧凑, 对各个模块的体积有严格的要求, 所以存储系统需要以尽可能小的体积, 完成其功能。

抗振性: 无人机进行巡检任务时, 巡检吊舱处于机载振动环境中, 存储系统需要连接牢固、可靠, 可以在机载振动环境中进行长期稳定的工作^[1]。

嵌入式: 在整个运行过程中, 没有用户界面可以观察, 在进行存储、停止存储、系统非正常断电的过程中不应损伤存储器和存储系统, 且存储系统再次通电能够正常运转。

大容量: 由于存储系统需要记录巡检吊舱采集的可见光视频信息、红外热图信息、可见光照片、控制指令信息、位置状态信息等, 数据量很大, 存储系统需要能够同时处理众多类型的数据信息并能长时间存储。无人机巡检作业的最大时长定为 4 小时, 存储系统需要完成巡检周期内的数据存储工作。

2 系统设计和实现

2.1 系统接口和组成

根据存储系统需要实现的功能, 存储系统需要和各传感器进行交联和采集数据。存储系统对外的接口包括以下几个方面:

- 1) 可见光视频的 SDI 接口;
- 2) 红外热图的网络接口;
- 3) 照相机的 USB 接口;
- 4) 定位定姿系统的串行通讯接口;
- 5) 命令状态信息的串行通讯接口;
- 6) 对外导出数据的网络接口。

存储系统需要具备以上接口, 同时存储系统具备处理数据和存储数据的能力。按照功能模块划分, 存储系统分为以下几个部分, 如图 1 所示, 存储系统包括: SDI 视频信号存储模块、热图网络数据存储模块、定位数据存储模块、命令状态数据存储模块、USB 照相数据接口模块和数据导出模块。

2.2 数据容量分析

存储系统的容量需要解决的首要问题, 现在分别对存储的各个类型的数据进行逐个分析计算。视频信号为 SDI 高清视频, 以分辨率 $1\,920 \times 1\,080$, 帧率 25 p 来计算, 根据每秒的数据量 = 分辨率 \times 每个像素需要的字节数 \times 帧率计算, $1\,920 \times 1\,080 \times 3 \times 25 = 155520000\text{B} \approx 155\text{ MB}$ (注 B = byte, b = bit), 4 个小时的数据量为: 4 小时 \times 60 分 \times 60 秒

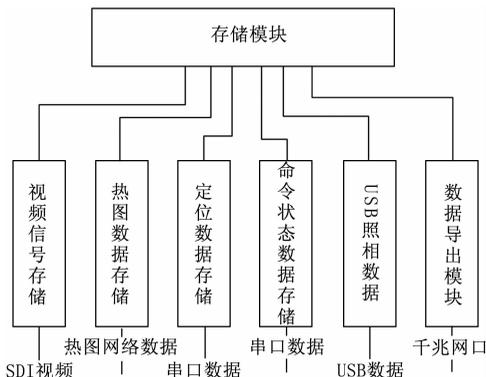


图 1 存储系统功能组成图

$\times 155\text{ MB} = 2232000\text{ MB} \approx 2.23\text{ TB}$ 。根据计算所得, 视频信号如果按照每个像素进行存储数据会非常庞大, 不利于后期的存储和数据分析。根据后期数据处理的要求, 视频信号在满足清晰度的情况下, 可以通过压缩以节省存储空间。视频信号按照 H264 编码方式进行压缩存储, 可以很大规模的降低存储容量, H264 编码方式对 1 080 P 视频信号的极高码率约为 2 MB/s, 4 个小时的数据量约为 4 小时 \times 60 分 \times 60 秒 \times 2 MB $\approx 28\text{ GB}$, 可见通过压缩编码处理, 存储 4 个小时 1 080 p 的 SDI 高清视频信号需要的存储空间约为 28 GB。采用压缩处理的方法需要视频存储模块具有 SDI 信号采集、压缩编码、存储的能力。

红外热图数据以常见的分辨率 640×480 为例, 每个像素存储需要 2 个字节, 由于红外热图数据需要后期进行每一点的温度测量和解算, 所以红外热图数据需要进行无压缩的原始数据存储。每个拍摄点的时间约为 1 秒左右, 每秒钟采集 9 帧热图画面, 每秒的数据量 = $640 \times 480 \times 2 \times 9 = 5\,529\,600\text{ B} \approx 5.5\text{ MB}$, 4 个小时的数据量为: 4 小时 \times 60 分 \times 60 秒 \times 5.5 MB $\approx 79\,200\text{ MB} \approx 79\text{ GB}$ 。根据数据率 (5.5 MB \times 8 = 44 Mb) 的计算, 红外热图数据的网口传输率不低于 100 Mbps。(目前网口分 3 种 10 兆网、百兆网和千兆网)

定位定姿串行数据, 以 100 ms 为周期, 每个周期 32 个字节的数据计算, 4 个小时的数据量为: 4 小时 \times 60 分 \times 60 秒 \times (10 \times 32) $\approx 4.6\text{ MB}$ 。

命令状态串行数据, 类似定位定姿串行数据, 数据量约为 4.6 MB^[2]。

照相机的照片存储在相机的存储卡内, 这样可以保证照片的存储照片的速度。进行照片导出和删除操作时通过相机的 USB 口进行。

根据上述计算结果: 4 个小时总的数据存储容量约为: 28 G + 79 G + 4.6 M + 4.6 M $\approx 107\text{ G}$, 所以存储容量需要大于 107 GB。数据的存储速度约为: 2 M + 5.5 M = 7.5 M (B/s) = 7.5 \times 8 M (b/s) = 60 M (b/s), 存储器的存储速度需要大于 60 Mb/s, 根据冗余设计的原则, 存储器的存储速度不低于 100 Mb/s。

由于存储系统位于巡检吊舱的内部, 存储数据需要在巡检结束时需要进行导出。导出时间设计上不大于 30 分

钟。以 107 GB 数据量计算，数据传输率： $107\text{ G} \times 8/30/60\text{ bps} \approx 476\text{ Mbps}$ ，目前通用的接口中 USB3.0 和千兆网口可以满足要求。USB3.0 的最高传输率为 5.0 Gbps，千兆网的最高传输率为 1.0 Gbps。由于数据导出时需要通过密封连接器进行导出电缆的连接，同时考虑到吊舱的机载环境，从接口的可靠性、信号传输的抗干扰能力、接口应用的广泛性等方面综合考虑，选择千兆网口作为数据的导出接口。

2.3 存储系统的选型与构建

根据设计需求，存储系统处理机既要满足体积小、功耗低，又要满足多接口需要，还要满足数据的存储容量和数据存储速度的要求。经过对比选择，采用以 ATOM D2550 低功耗处理器为核心的 3.5" 工业主板，板块尺寸为 146 mm×102 mm，该尺寸的板块可放入吊舱内部，满足体积小、功耗低的要求；该主板具有 1.86 GHz 的处理器，配置 DDR3 2 GB 板载内存，具有 2 个千兆网口、6 个串口、2 个 USB 口和 1 个 miniPCIE 插槽和 1 个 miniSATA 插槽，满足存储系统的接口要求；同时系统最大功耗为 13 W，低于设计功耗 15 W，满足存储系统的功耗要求；内存等采用板载贴片的形式，散热采用冷板的结构形式，满足机载振动环境的要求；该主板为工业级使用环境，满足系统的环境温度要求。吊舱对外的网络采用雷莫公司的气密连接器，满足吊舱的整体气密要求，同时又满足千兆网的传输要求。

存储系统的 miniSATA 插槽配备 1 个 miniSATA 硬盘，容量为 240 G，写入速度为 530 MB/s，满足存储系统的存储容量要求和存储速度要求。

系统 miniPCIE 插槽配备 miniPCIE 接口的 SDI 视频采集卡，该采集卡具备以下几个功能：

- 1) SDI 视频接口 1 路输入，1 路环出；
- 2) 可采集分辨率 1 920×1 080，60 p/50 p/30 p/25 p 的 SDI 信号；
- 3) MiniPCIE 接口形式；
- 4) 具有硬件压缩功能。

此接口的采集卡可以完成 SDI 信号的采集、压缩、环出功能。

存储系统的原理如图 2 所示。

存储系统的硬件组成包括多接口低功耗工业主板、mini-SATA 大容量高速电子盘和 miniPCIE 接口的 SDI 采集卡等。

2.4 操作系统的选择

存储系统的硬件构建完成后，存储系统的操作系统也是其重要组成部分；传统的 WindowsXP 系统使用方便、软件兼容性强、开发环境选择多，但是该存储系统集成在吊舱内部，没有显示输出，具有操作不可见等特点，而吊舱的使用过程中，不会专门对操作系统进行关机。吊舱断电情况下容易造成 XP 系统崩溃，XP 系统的特性也决定了其不太适合做嵌入式操作系统。

需要选择一种既具有 Windows 系统的优点，又符合嵌入式系统的使用需求，Windows XPE 嵌入式系统为我们完美的解决了这个问题。Windows XPE 是 Windows XP 系统

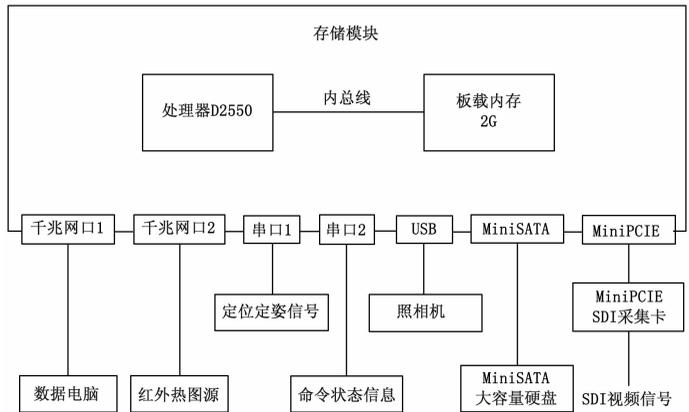


图 2 存储系统原理框图

的组件版本，拥有 Windows XP 系统的所有功能和属性，具有系统内核小、占用系统资源少、启动速度快、拥有写保护、软件兼容性强、基于 win32 编程、可移植性强、可维护性高等特点。

Windows XPE 嵌入式系统需要在存储系统的硬件基础上开发完成，首先在存储系统处理机上建立 Windows XPE 开发环境，然后通过硬件平台分析、制作硬件信息组件、初始化配置、添加系统组件和功能组件、生成镜像和部署 XPE 系统等步骤完成 XPE 系统的生成和应用。XPE 嵌入式系统具体的生成方法和步骤参考相关文档^[3]。

2.5 存储系统软件

存储系统软件采用 VS2008 开发环境开发，以 C++ 语言为基础，进行多线程软件开发，完成多种数据的同时存储。存储软件需要完成下面几个方面的功能：

- 1) 接受上位机命令，解析命令，响应存储指令；
- 2) 将当前的存储状态进行整理上报；
- 3) 对各个文件进行分段存储，防止突然掉电造成大文件的丢失；
- 4) 解析从定位定姿系统收到的时间信息，为各命令和文件提供时间基准；
- 5) 存储可见光视频信息；
- 6) 存储红外网络热图原始数据；
- 7) 存储定位定姿信息；
- 8) 存储命令和状态信息。

2.5.1 任务设计和优先级设置

本存储系统要同时完成 4 种数据的存储。为保证存储任务的并行处理，每种数据存储对应一个线程，线程之间使用信号量实现线程同步。命令状态数据存储线程接收并解析上位机的控制指令，优先级设置为高于平常 (Above normal)；视频存储线程、红外热图数据存储线程、定位定姿信息存储线程优先级设置为正常 (normal)。

2.5.2 命令串口数据处理任务

命令状态串口数据存储线程中串口接收数据以异步 I/O 方式进行，串口数据为一帧数据，该数据具有帧头、帧尾、有效数据和检验。查找接收一帧数据的时候，先查找数据的帧头，再接收整帧数据，最后对整帧数据的有效性进行

行验证。对有效帧进行解析处理, 解析出上位机命令, 并对其他线程进行控制, 其流程如图 3 所示。

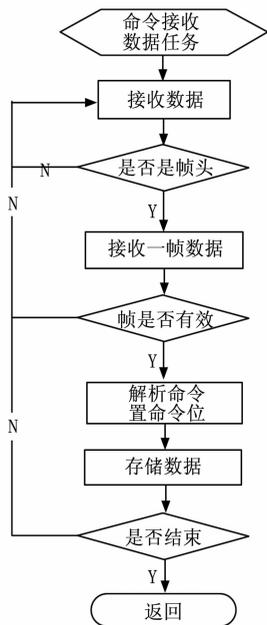


图 3 串口数据接收流程图

定位定姿信息存储线程流程和命令串口数据存储线程流程类似, 不再单独说明。

2.5.3 红外热图数据存储任务

红外组件和存储系统之间的数据交互以网络通信的模式进行。网络通信采用 Windows Sockets 套接字的方式来实现, 存储系统为服务器端 (Server), 红外热图源为客户端 (Client), 两者之间以非阻塞的方式进行异步 I/O 通讯。

存储系统红外热图数据存储逻辑如下: 进行存储任务之前, 首先创建连接并初始化, 设置非阻塞模式, 设置超时时间, 进行连接, 然后接收数据, 分析数据, 存储数据, 重复此过程。在接收数据的过程中, 如果超过 5 秒没有接收到热图数据, 认为网络通讯故障, 重新进行网络连接。红外热图进行数据存储时, 如果连续存储时间超过 10 分钟 (用户设置时间), 则将数据存入新文件, 即防止单个文件过大, 又防止系统突然掉电造成大文件丢失^[4]。热图存储流程图如图 4 所示。

2.5.4 视频存储任务

存储系统通过视频采集卡采集 SDI 视频信号, 视频采集卡完成视频信号的硬件压缩功能, 存储系统软件调用视频采集卡的底层驱动完成视频的分段存储。由硬件和底层驱动完成存储的方式可以大大降低 CPU 的占用率, 减少内存使用, 简化存储系统的程序。存储视频线程循环检索存储命令, 根据存储命令进行视频的存储工作^[5]。

3 试验结果与分析

该存储系统在无人机电力精细巡检吊舱的进行了设计实现和试验验证, 并随吊舱整机系统进行了温度试验、振

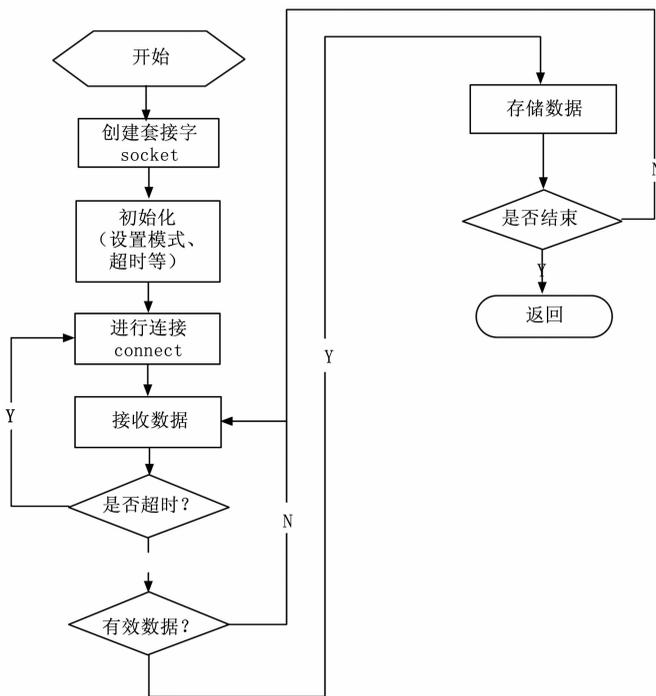


图 4 热图数据任务流程图

动试验等环境试验。试验过程中存储系统工作稳定。温度试验验证了存储系统的高低温性能满足吊舱的整机要求; 振动试验验证了存储系统的抗振性满足吊舱的整机要求; 气密性试验验证了存储系统数据导出口设计满足吊舱气密性要求; 对吊舱进行了多次的上下电试验, 存储系统均工作正常, 未出现系统崩溃等现象, 满足吊舱上下电工作模式的使用需求; 同时对系统进行了多次连续工作试验, 存储系统多次工作中的典型指标值如表 1 所示^[6]。

表 1 存储软件运行系统参数表

序号	内容	备注
1	CPU 使用率	31%
2	内存使用率	253 MB
3	4 小时存储硬盘空间	103 G
4	数据导出网络速率	830 Mbps
5	功耗	10.3 W

电力巡检吊舱的存储系统的 XPE 操作系统进行了必要性裁剪, 使用时只占用极少的内存; 同时使用 SDI 视频硬件压缩卡大大降低的 CPU 使用率, 同时又降低了存储系统的功耗, 满足长时间工作要求。占用硬盘容量、功耗、数据导出速率均满足设计要求。

4 结论

针对电力巡检吊舱多接口数据设计制造了大容量存储系统, 并集成于电力巡检吊舱内部进行了实践应用。使用结果表明该存储系统可以正确、完整地记录所需的多种类型

(下转第 146 页)