

文章编号:1004-9037(2009)增刊-0315-04

## 飞机结构应变信号的采集与预处理系统

薛 军<sup>1</sup> 纪 敦<sup>2</sup> 李 猛<sup>3</sup> 吴志超<sup>1</sup>

(1. 北京航空工程研究中心, 北京, 100076; 2. 空军可靠性办公室, 北京, 100843;  
3. 空军第一航空学院, 信阳, 464000)

**摘要:**介绍了某型飞机结构疲劳危险部位的机载应变采集与预处理系统的设计与组成。系统以 Compact RIO 技术构建硬件平台, 通过 FPGA 开发, 采取文件细分的思想, 运用断点保护的方法, 自动完成数据的采集和预处理。系统将应变数据处理成有效峰谷值, 填充到频次矩阵中, 解决了机载应变采集系统设备存储空间有限的问题。该系统完成了 200 多个飞行小时的科研试飞, 结果表明系统简捷有效。

**关键词:**寿命监控; 应变监控; 现场可编程门阵列

**中图分类号:** TP274.2

**文献标识码:** A

## Strain Data Acquisition and Preprocessing System for Aircraft Structure

Xue Jun<sup>1</sup>, Ji Dun<sup>2</sup>, Li Meng<sup>3</sup>, Wu Zhichao<sup>1</sup>

(1. Beijing Aeronautical Technology Research Center, Beijing, 100076, China;

2. Reliability Office of Air Force, Beijing, 100843, China;

3. The First Air Force Engineering Aeronautic College, Xinyang, 464000, China)

**Abstract:** The design and the construction of in-flight strain data acquisition and preprocessing system are described for an aircraft critical location. The system hardware platform consists of compact RIO. On the FPGA, the software can automatically complete strain data acquisition and preprocessing by file subdivision and interrupt protection. To save storage space in-flight strain data record system, the software can fill the frequency matrix with all real peaks and valleys from the strain data. Results show that the system is proved to be simple and effective by more than 200 h trial flights.

**Key words:** structural life monitoring; strain monitoring; filed programmable gate array (FPGA)

## 引 言

飞机结构健康状态监控技术越来越受到重视, 世界上许多航空技术发达国家都开展了该项技术的专题研究, 并将其列入航空技术重点发展项目。飞机结构健康监控系统 (Aircraft structural health monitor system, ASHMS) 主要是通过对集成于结构中传感网络采集到的信息进行提取与分析, 从而完成对结构状态、完整性与可靠性的推断, 以保证飞机在整个服役期限内具有较高的战备完好性和重复使用能力, 全面提高飞机的作战能力, 充分发挥飞机的使用效能和使用潜力。系统一般包含: (1) 传感器系统; (2) 数据采集处理与传输系统; (3)

损伤识别、模型修正、安全评定与安全预警系统; (4) 数据管理系统。目前, 由于智能结构与传感器技术的限制, 国内在该领域的研究工作还处于理论探索和实验室验证阶段。基于国内现有的技术水平, 结合某型号飞机的单机寿命监控工作, 本文提出了一种基于 FPGA 的机载飞机关键疲劳危险部位的应变采集与预处理系统。

## 1 系统硬件设计

系统以 Compact RIO 技术为核心构建硬件平台。Compact RIO 是一种小巧而坚固的控制和数据采集系统, 采用可重新配置 I/O (Reconfigurable I/O, RIO) FPGA 技术实现超高性能和可自定义功能。其基本结构包括一个可重复配置 I/O FPGA

核的底板和一个嵌入式实时处理器,FPGA 核可提高专用硬件电路的可靠性和硅片上的并行执行性能,嵌入式实时处理器用于独立和分布式实时操作。本数据采集盒由实时控制器、可重复配置的底板、I/O 模块、接口电路、滤波电路和 DC-DC 隔离电源等组成,其原理结构如图 1 所示。

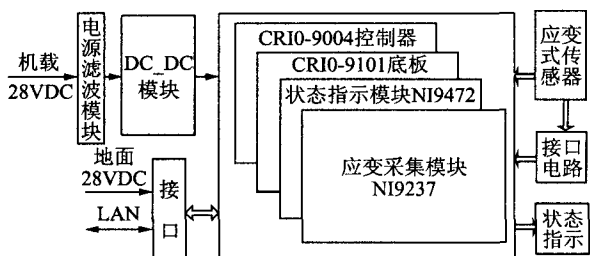


图 1 硬件系统结构框图

数据采集和控制系统由 cRIO-9004 控制器、cRIO-9101 可重复配置底板、NI9472 以及 NI9237 组成。LAN 接口可与地面维护计算机(简称“上位机”)进行数据传输;NI9472 用于设备的状态指示;8 路应变式传感器通过接口电路与 I/O 模块 NI9237 相连。系统空中工作时,用机上 28VDC 对设备进行供电;数据下载时,则采用地面 28VDC 电源直接对设备供电。

## 2 系统软件设计

系统使用 LabVIEW 8.2、LabVIEW RT 模块和 LabVIEW FPGA 模块开发<sup>[1-2]</sup>。软件设计主要包括数据采集盒软件设计和上位机软件设计。数据采集盒的功能主要是采集存储应变信息、数据处理

以及桥路检查等;上位机的主要功能是数据下载、参数设置等。上位机和数据采集盒通过 LAN 连接,基于 TCP/IP 协议进行通信,其总体程序流程图如图 2 所示。

采集到的数据运用在每一个飞行起落,数据采集盒自动创建一个独立文件夹的方式存储,一次飞行的全部数据存储在一个文件夹内。为了方便获取数据的记录时间,在记录存储数据时文件夹以时间命名,即“SG8\_年月日\_时分秒”。由于数据采集盒由飞机直接供电,飞机着陆后飞行员可能随时关闭飞机电源系统结束工作。若按文件一般的存贮方式,有可能造成大量的数据丢失。为避免此问题,需要为系统配置供电电源和设置座舱操作开关,但会给飞行员带来额外的操作负担,并增加机载系统的复杂程度。为了解决这个问题,本文在程序设计中,采取文件细分的思想,也就是在每一个飞行起落建立的文件夹中,每隔 30 s 创建一个子文件,每个子文件只存储 30 s 的数据。这样,每次飞行结束后的随机断电,只会丢失可忽略不计的断电前 30 s 地面数据。

## 3 数据预处理系统

疲劳载荷对结构造成损伤主要是由于载荷的不断交替变化而引起的。因此,疲劳载荷的表征方法必须反映出载荷峰值、谷值的各种变化情况及其发生频次。数据预处理系统的主要任务就是把原始数据处理成峰、谷值,然后再根据级差设置填充马尔可夫频次阵<sup>[3]</sup>。在填充马尔可夫频次阵前,数据要进行滤波、历程峰谷值的寻找。

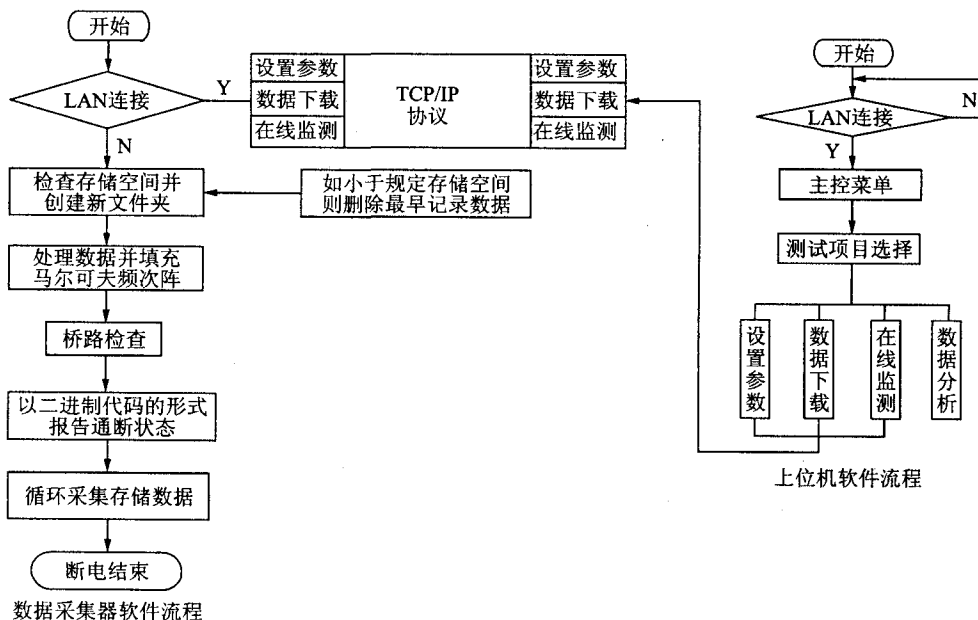


图 2 程序流程图

### 3.1 滤波

对信号的初次滤波,采用平均值滤波,通过FPGA电路来实现,速度快。平均值滤波不仅能够完全消除工频干扰,而且对其他形式的干扰也有一定的抑制作用。其计算公式如下

$$a = \frac{\sum_{i=1}^n a_i}{n} \quad \left( n = \frac{2\,000}{F_s} \right) \quad (1)$$

式中: $a$ 表示采样值, $F_s$ 表示采样率。

### 3.2 峰谷值的寻找

寻找峰谷值是为了得到飞机结构疲劳危险部位的应变数据的有效历程。文中采用了差值比较法,就是根据级差的设置情况采取逐点比较的方法来得到历程的峰谷序列。其比较算法思想如图3所示。图3中上次状态 $a$ 是上一次历程最后一点,为峰值或谷值,此点作为下一次比较的起点,做为预置的峰或谷,是否为峰或谷,要看后续数据的变化情况。装机第一次数据处理,上次状态 $a$ 为空,这样把第一次飞行数据的第一点作为比较起点,但是这一点既不为预置峰,也不作为预置谷。峰、谷值的寻找其实也是一个数据滤波的过程。

### 3.3 数据处理速度

数据处理的速度由文件的大小决定,文件的大小与采样率和时间有关,根据数据处理速度可以合理设置预热时间和采样率。

根据地面可靠性实验,设备处理5 h采样率为10 Hz的数据需要2.5 min;处理2.2 h采样率为50 Hz的数据需要4 min;处理1 h采样率为100 Hz的数据需要3.3 min。数据采集盒能够存储数据的容量(按小时记)的计算公式如下

$$h = \frac{490 \times 1\,024 \times 1\,024}{F_s \times 8 \times 4 \times 3\,600} \quad (2)$$

如果采样率为10 Hz时,数据采集盒可以存储446 h的数据;采样率为50 Hz时,可存储89 h;采样率为100 Hz时,可存储44.6 h的数据。

因此,为了把采集的数据及时处理掉,应合理设置预热时间和采样率。

### 3.4 填充马尔可夫频次阵

马尔可夫频次阵是一个二维方阵,其行号(或列号)代表着相应的载荷状态。与概率阵有所不同的是,第 $i$ 行 $j$ 列内的元素数值,不再代表从 $i$ 状态转移到 $j$ 状态的概率,而是代表着这种状态转移实

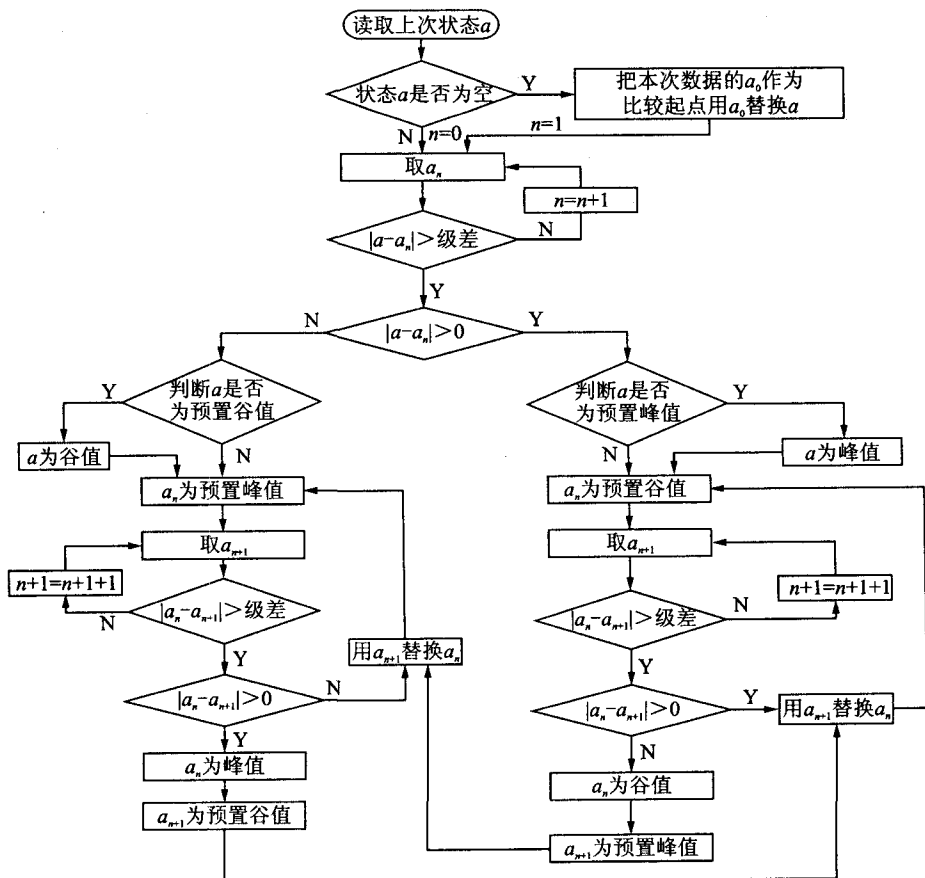


图3 峰谷值判别流程图

际发生的频次。

在填充时,对于历程中的任一个峰谷点,先查看它的前一点(转移起点)状态相应于矩阵的哪一行( $i$ 行),再查看它的当前状态相应于矩阵的哪一列( $j$ 列),查清行列号后,将矩阵 $i$ 行 $j$ 列元素之值增加1次,就处理完了这个载荷点;逐次处理完历程中的所有峰谷点,马尔可夫阵就自然填充完成了。

### 3.5 数据预处理时机

数据预处理放在数据采集盒上进行,这样就直接可以从数据采集盒下载马尔可夫频次阵,方便地面维护和操作人员;同时由于数据在采集盒上处理了,每次处理完后只需去刷新累计马尔可夫频次阵,而8个累计马尔可夫频次阵只占用了很少存储空间,所以就不存在存储空间不够用的问题。但是存在断点保护和数据处理时机问题。

数据采集盒的主要工作是采集存储应变信息,在数据处理的过程中就不能够采集存储数据,所以什么时机进行数据处理是人们必须解决的一个问题。结合某型飞机的使用特点,从发动机开始工作到飞机起飞之间大概有10多分钟的预热时间,这段时间飞机是在地面上,监控点应变变化很小,因此数据处理可放在预热时间内进行。数据采集盒采用的处理器速度是200 MHz,而数据处理时间(数据处理时间小于预热时间)是有限的,所以就会出现数据没处理完而时间到的情况,为了解决这个问题作者采取了断点保护的措施。如果预热时间到而数据还没有处理完,系统会把处理完的最后数据的位置记录下

来,在下一次开机时,接着记录位置继续处理下去,从而保证了处理数据的完整性和连续性。

## 4 结束语

本文介绍了某型飞机机体结构疲劳危险部位的机载应变采集与预处理系统的设计与组成。通过FPGA开发,系统实现了数据采集和预处理的自动化,将预处理后得到的应变有效峰谷历程填充到马尔可夫频次阵中,解决了机载应变监控系统设备存储空间有限的问题。通过200多个飞行小时的科研飞行验证,系统达到了预定功能,实现了对某型飞机结构疲劳危险部位的外场应变监控。

### 参考文献:

- [1] 徐志军. 大规模可编程逻辑器件及其应用[M]. 成都: 电子科技大学出版社, 2000.
- [2] 崔俊杰, 郭宏. 基于FPGA的实时数据采集与远程传输系统设计[J]. 数据采集与处理, 2005, 20(3): 366-370.
- [3] 陈志伟, 高海龙, 王智, 等. 用马尔可夫频次矩阵表征疲劳载荷[J]. 疲劳与断裂, 2002: 293-296.

作者简介: 薛军(1972-), 男, 高级工程师, 研究方向: 飞机结构强度、寿命和单机寿命监控, E-mail: xuejun781@sina.com; 纪敦(1972-), 男, 工程师, 研究方向: 飞机结构可靠性和寿命管理; 李猛(1978-), 男, 讲师, 研究方向: 信号处理电路与系统; 吴志超(1964-), 男, 高级工程师, 研究方向: 飞机结构疲劳试验与寿命。