

文章编号:1007-1385(2006)03-0019-03

数字嵌入式航空发动机气动失稳预警系统的研制与应用

李 军 刘广鸿 刘世官

(沈阳航达机载设备公司 设计所,辽宁 沈阳 110034)

摘 要: 如何对航空发动机失速和喘振这两类气动失稳进行测量、变换,以便对气动失稳进行控制,确保发动机安全和性能是当前国内外航空界的一项重要研究内容。以涡扇发动机为研究对象,在对整机与压气机部件失速和喘振现象深入研究的基础上,以 DSP 为核心,研制出气动失稳预警系统。在 APTD 专项试验中的应用表明:该系统具有实时性强、可靠性高和动态性能好的特点。在飞机、发动机与压气机部件试验以及燃机气动失稳预报和控制等工程应用中,具有广阔的应用前景。

关键词: 气动失稳; 发动机; 数字嵌入; 控制

中图分类号: V233.7*33

文献标识码: A

现代高性能压气机除了具有高压比、高效率外,还应具有宽广的稳定工作范围。高性能的要求与宽稳定工作范围构成一对矛盾,因此,高性能压气机的稳定性问题变得越来越重要。在发动机研制、试验和使用过程中,压气机工作范围内存在的旋转失速和喘振这两类气动失稳现象,不仅严重制约了发动机性能的提升,耦合激振频率还可导致叶片共振和颤振,引发机械故障,严重时会引起发动机空中停车,危害性极大。如何对航空发动机失速和喘振这两类气动失稳现象进行测量、变换,以便对气动失稳进行控制,确保发动机性能和安全是当前国内外航空界的一项重要研究内容。

1 气动失稳预警系统的原理与功能

系统的工作原理是基于从压气机出口差压信号中按频率和相对幅度分离出一种表征动力装置不稳定的工作信号。根据该信号的特征,将其划分为三个区间,分别对应于发动机工作正常、偏移正常和失稳三个工作状态,从而实现防喘和退喘功能。其系统测量原理框图如图 1 所示。

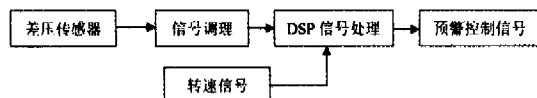


图 1 气动失稳预警系统原理框图

通电后,系统首先完成自检,2 秒后进入工作状态。当检测到失速或喘振征兆时,系统给出预警信号;当检测到严重失速或喘振信号时,将发出控制指令信号供给电调系统来进行实时控制,使发动机快速退出失稳工况,以确保发动机的性能和安全。

2 气动失稳预警系统硬件电路

在发动机试验和使用过程中,气动失稳从开始产生至完全发展所经历的时间非常短,而且其频率较高,发动机突变型喘振具有突发性的特点,这就要求气动失稳硬件电路在保证系统频响的基础上,还应具备连续采集和快速实时分析和响应的能力。

气动失稳变换器硬件电路结构框图如图 2 所示。在电路设计上,选用 TI 公司的 VC33 浮点 DSP 芯片,并以其为核心研制出数字信号实时处理电路。与传统单片信号处理器相比,DSP 具有以下特点^[1]:①采用程序总线 and 数据总线独立并存的哈佛结构,取指和执行能重叠运行;②采用了流水线操作,减少了指令的执行时间增强了处理器的实时处理能力;③集成了专用的硬件乘法器,提高了处理器的性能;④采用特殊的 DSP 指令,简化了程序代码;⑤DSP 的特殊结构使其结构指令周期在 70ns 以下,使 DSP 芯片能够实时的运算。

数据采集电路中的缓冲存储器,确保了在数据采集时,能够进行连续采集。与俄罗斯气动失

收稿日期:2006-01-12

作者简介:李军(1969-),男,河北乐亭人,工程师

稳模拟信号处理电路相比,采用该数字信号处理电路对失稳信号特征进行处理和分析时,具有更大的灵活性:(1)对失稳先兆及失稳信号可进行较为详细的时域、频域和时频域分析,从而使气动失稳分级报警与控制的实现成为可能;(2)对失稳限制值的定位更精确,提高了系统的可靠性;(3)数字通信标准接口使其和其它设备相连更容易。

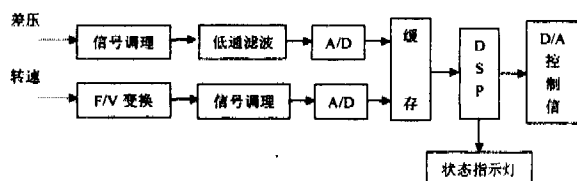


图2 气动失稳变换器硬件电路结构框图

3 气动失稳信号的检测及其算法实现

3.1 气动失稳监测参数

当发动机向失稳边界靠近时,其流路内的压力、温度和流速均会产生相应的变化。根据这些信号的变化特征,可以单独或综合判定发动机的工况。本系统选用高压出口差压和高压转速作为气动失稳的监测参数。差压提取气动失稳特征参数的幅度和时间分辨率均优于脉动总压和静压。

气动失稳工况是用差压脉动最大变化幅度 A 来表征,其在某一段时间 T 内的计算公式如式(1)。

$$\frac{P_{\max} - P_{\min}}{P} \quad (1)$$

式中: P_{\max} 、 P_{\min} 、 P 分别为 T 时间内差压信号的最大值、最小值和平均值。

3.2 气动失稳信号检测算法及其实现

实时和高效是系统研制过程中应引起特别注意的问题。在进行 DSP 系统软件开发时,除需优化程序结构外,在编程时要充分考虑 C 语言和汇编语言的优缺点,从而选择最佳的软件开发方案。C 语言编译器虽具有优化功能,但因其未能充分利用 DSP 的硬件资源,所以效率较低,在编写诸如 FFT 等数学运算密集代码时,与汇编语言相比,效率可相差十倍以上。在满足系统实时性要求的前提下,可优先使用 C 语言进行 DSP 软件开发。DSP 应用程序往往用 C 语言和汇编语言混合编程来实现,这样可充分利用片内的存储器资源,核心程序应放到片内全速运行,以达到最佳的

实时性能^{[2],[4]}。

气动失稳检测软件可分为系统自检、数据采集、数据预处理、气动失稳特征提取和报警与控制信号输出 5 个模块,其软件流程框图如图 3 所示。在数据采集过程中,DSP 板上的缓冲存储器被划分成两个相同长度的存储器,它们交替存储和释放数据,从而确保系统能够实现数据的连续采集。影响数据连续采集的另一个重要因素是数据处理速度与程序结构及其算法的效率。一般情况下, t_p 、 t_s 、 t_r 需满足式(2)才能保证数据连续采集。

$$A = t_p \leq t_s - t_r \quad (2)$$

式中 t_p 、 t_s 、 t_r 分别为数据处理和采集与读取一个数据块所需的时间。

数据块滚动技术是实时准确提取气动失稳特征的关键技术之一。对突变型喘振或只有一个喘振周期的波形来说,利用它能够保证恰好(或近似)完整地提取到喘振波形的第一个下跳沿,并对数据进行处理。这可以提高系统的实时性。数据块滚动工作流程为先进后出,循环往复,数据实时更新。数据块长度越短,对发动机喘振波形特征的描述就越精确。

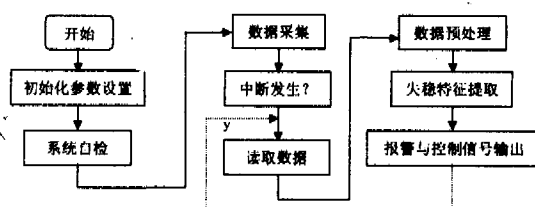


图3 气动失稳检测软件流程框图

4 工程应用

在某压气机 APTD 专项试验中,在均匀进口流场和畸变进口流场下对该气动预警系统进行了 10 次验证,分析数据结果如表 1 所示。在台架中的应用表明该系统具有较强的抗干扰能力,其硬件处理电路和软件分析算法已达到航空发动机防喘报警的要求。从具体的性能测试数据来看,失稳输出控制信号的响应时间小于 50ms,优于俄国 ЛБС 产品 50ms 的响应时间。

表1 10组压气机失稳状态数据分析结果

喘点状态	喘点数据 喘带号	转速 r/min	数据块	控制响应时间 (ms)	喘振频率 (Hz)	喘振类型
0.85	375	7186	J270ST-ST2	39	14	突变型
1.0	1021	8518	J270ST3	38	5	突变型
0.75	1130	7150	J270ST4	38.5	18.8	突变型
1.0	1158	8440	J270ST5	35	5.29	突变型
0.75	1178	7160	J270ST6	41	18.18	渐进型
0.75	1209	7201	J270ST6	41	18.2	渐进型
1.0	1310	8502	J270ST7	35.5	4.6	突变型
0.75	1393	7150	J270ST8	35.5	20	渐进型
0.85	1403	7227	J270ST9	44	15.8	突变型
0.72	1483	6049	J270ST10	42	19.2	渐进型

4.1 失稳预警系统失稳特征参数设置

在某压气机 APTD 专项试验中,失稳预警系统失稳特征参数设置如表2所示。

表2 失稳特征参数限制门限值

n	正常	工 况 偏移正常	失稳
$N \leq 0.4$		系统不工作	
$0.4 < N < 0.85$	$A \leq 0.7$	$0.7 < A < 0.8$	$A \geq 0.8$
$N \geq 0.85$	$A \leq 0.4$	$0.4 < A < 0.6$	$A \geq 0.6$

4.2 突变型失稳差压与 A 值检测数据分析

从某压气机相对转速 0.85 喘点前后 cha、N、Tu_P 和 P31 测试及细化波形信号中可以看出:压气机喘振过程中带有失速,气动失稳预警系统在 39ms 内给出了触发控制信号。对比 cha 与 P31 的测试波形,还可以看出,在提取气动失稳特征上,脉动差压信号比脉动静压信号具有更高的灵敏度。

4.3 渐进型失稳差压与 A 值检测数据分析

从某压气机相对转速 0.75 喘点前后 cha、N、Tu_P 和 A 测试及细化波形信号中可以看出:在压气机喘前,存在着较长时间的失稳信号,当压气机产生失速加重时,气动失稳特征参数 A 随之增

加,压气机进喘后 33ms 系统给出了报警控制信号;A 值对差压时域测试信号具有很好的跟随性,这表明气动失稳特征算法具有良好的实时性。

5 结束语

气动失稳预警系统对保障发动机飞行和试验的安全,具有重要的作用。该数字嵌入式气动失稳预警系统具有实时性强、体积小、动态性能好、易于和其它系统连接的特点。在飞机、发动机整机与压气机部件试验和燃机气动失稳预报和控制工程应用中,具有广阔的应用情景。

参考文献

- [1] 张雄伟. DSP 芯片的原理与开发应用[M]. 北京:电子工业出版社,1997
- [2] 赵负图. 信号采集与处理集成电路手册[M]. 北京:化工工业出版社,2002
- [3] 李朝青. 单片机 & DSP 外围数字 IC 技术手册[M]. 北京:北京航空航天大学出版社,2003
- [4] 张培仁. 基于 C 语言编程 MCS-51 单片机原理与应用[M]. 北京:清华大学出版社,2003

Development and application of digital inserted beforehand alarm system of aero - engine pneumatic stability fault

LI JUN LIU Guang - hong LIU Shi - guan

(Design Institute, Shenyang Hangda Aircraft equipment corporation, Liaoning Shenyang 110034)

Abstract: With the aim of control pneumatic stability fault and ensure the safety and function of aero - engine, The method To survey and change The two pneumatic stability faults include speed lost and pant vibratality of aero - engine has been an important researchful subject matter. Whirlpool fan aero - engine is the object of study of this paper, based on the deepgoing research of the phenomenon about speed lost and pant vibratality with whole engine and compressor parts, To use DSP as inner part, This paper develop the beforehand alarm system. The application during special - purpose test demonstrated the characteristics of this system: strong real time function、high dependability and fine development function. This system exist extensive application foreground with the engineering application of aircraft、generator、compressor parts test and internal combustion engine pneumatic stability faults forecast and control.

Keywords: pneumatic stability fault; generator; digital inset; control