

基于 DSP 的航空发动机转速传感器设计*

徐 科, 黄金泉, 张天宏, 蒋文亮

(南京航空航天大学 能源与动力学院, 江苏 南京 210016)

摘 要: 提出了一种基于 TMS320 LF2407A DSP 的航空发动机智能转速传感器。设计了转速信号处理电路、显示电路、数字信号处理 (DSP) 与控制器局域网 (CAN) 总线接口电路和电源电路。提出采用动态分频技术的转速测量方法, 并分析了其在 2407A DSP 上的实现, 提高了转速测量的精度。实验结果表明该智能转速传感器功能强大、实时性好、精度可达 0.01%, 可应用于航空发动机分布式控制系统中。

关键词: 航空发动机; 转速测量; 智能传感器; 数字信号处理

中图分类号: V241.73 文献标识码: A 文章编号: 1001-4055 (2004) 02-0180-04

A speed sensor design based on DSP for aeroengines

XU Ke, HUANG Jin-quan, ZHANG Tian-hong, JIANG Wen-liang

(Coll. of Energy and Power Engineering Nanjing Univ. of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: A smart speed sensor based on DSP for aeroengines was proposed. The speed signal processing circuit, the driving LED circuit, and the interface circuit between DSP and CAN buses were designed. A new speed measurement method by dynamically dividing frequency of speed signal was proposed. The precision of speed measurement was improved. The experiment indicates that the real-time response of the smart speed sensor has satisfactory performance and the relative error of speed measurement is less than 0.01%. The smart speed sensor is suitable for aeroengine distribution control systems.

Key words: Aircraft engine; Rotating speed measurement; Intelligent sensor; Digital signal processing

1 引 言

分布式控制是航空发动机控制的重要发展方向^[1,2]。分布式控制系统把低级处理功能从 FADEC 系统的电子控制器 EEC (Electronic engine control) 下放到现场的传感器和作动器中, FADEC 仅仅完成高级控制逻辑和算法功能, 在传感器和作动器中集成微处理器, 使之成为智能传感器和智能作动器, 并通过数据总线与 EEC 通讯。用智能装置代替 EEC 实现激励、滤波、A/D、时间平均、测量、线性化、温度补偿等一些简单功能, 减轻了电缆的重量。智能传感器和智能执行机构以固定的速率通过数据总线向 EEC 发送信号和状态信息。

转速是航空发动机中非常重要的一个状态参数, 本文的智能转速传感器是针对航空发动机控制系统

中经常采用的磁电式测量元件(音轮) 设计的。音轮与转轴一起在磁场中旋转, 连续旋转时由于电磁感应从线圈中输出连续的脉冲信号, 从而将发动机的转速转变为具有一定频率的脉冲信号。脉冲信号频率与转速的关系为

$$f = nz/60(\text{Hz}) \quad (1)$$

式中 n 为发动机转速(r/min), z 为音轮的齿数, f 为脉冲的频率值。通过式(1) 可以很方便地从脉冲频率计算出转速, 因此本文下面的转速测量均是针对脉冲信号的频率测量, 所提及的转速信号实际指的也是音轮输出的脉冲频率信号。音轮转速测量范围为几百 r/min ~ 几万 r/min , 输出频率为 20Hz~ 20kHz。

传统的单片机由于运算速度慢、功能单一、没有片内存储器等缺点不能胜任分布式控制智能装置的要求。数字信号处理(DSP) 的高速运算能力使很多

* 收稿日期: 2003-05-26; 修订日期: 2003-09-25。

基金项目: 航空科学基金资助 (03C52020)。

作者简介: 徐 科 (1979—), 男, 硕士生, 研究领域为航空发动机控制。

复杂的控制算法和功能得以实现,而且DSP将实时处理能力和控制器的外设功能集于一身,因此本文选用DSP作为智能转速传感器的微处理器,设计了一种在实验室环境下基于TMS320 LF2407A DSP的航空发动机分布式控制系统智能转速传感器。该智能传感器集成度高、实时性好、精度高、组网能力强,适合于分布式控制系统。

2 转速测量的方法

转速测量的方法主要有测频法和测周法。测频法在一定时间间隔 t 内,计数转速信号的脉冲数为 N ,则转速信号频率 $f_x = N/t$,其误差来自于 N 的整数量化造成的 ± 1 误差,最大相对误差 $E_{\max} = (1/N) * 100\%$ 。测周法在被测转速信号的一个周期内,计数内部时钟的脉冲数 m_0 ,则转速信号频率 $f_x = f_c / m_0$, f_c 为内部时钟频率,其误差来自于计数脉冲的整数量化造成的 ± 1 误差,最大相对误差 $E_{\max} = (1/m_0) * 100\%$ 。测频法和测周法在整个转速测量范围内均不能获得较高的精度。

2.1 动态分频法

针对测周法在高转速时误差较大,本文提出采用动态分频技术^[3]的转速测量方法,将被测转速的频率进行 $1/m_1$ 分频,即在被测转速信号的 m_1 个周期内,计数内部时钟的脉冲数 m_2 ,则转速信号频率

$$f_x = f_c m_1 / m_2 \quad (2)$$

式中 m_1 是变化的,根据所测转速的值变化,转速越高, m_1 越大;转速越低, m_1 越小。 m_2 始终保持为一个较大的数,最大相对误差

$$E_{\max} = (1/m_2) * 100\% \quad (3)$$

误差与转速无关,这样就解决了测周法在转速较高时 m_0 较小而带来的较大误差问题,可以达到非常高的精度。本文即采用动态分频法进行转速测量。

3 智能转速传感器系统构成及设计

3.1 TMS320 LF2407A DSP 结构、特点

TMS320 LF2407A DSP 是一款低价格、高性能的16位定点DSP,有以下一些特点^[4]:功耗低,供电电压降为3.3V;实时性好,指令最快执行速度可达40MIPS;片内自带32K字的FLASH程序存储器,2.5K字的数据/程序RAM;两个事件管理器(EVA和EVB),各包括:两个16位通用定时器、8个16位的PWM通道、3个捕捉单元、2个正交编码脉冲单元;总

共16通道的10位A/D转换器;串行通信接口(SCI)和16位的串行外设接口(SPI);内嵌CAN2.0B模块;看门狗定时器模块和基于锁相环的时钟发生器;高达40个可单独编程或复用的通用输入/输出引脚(GPIO)。

3.2 智能转速传感器系统构成

智能转速传感器系统构成(图1)主要包括上电自检电路、转速信号处理电路、显示电路、DSP与CAN的接口电路和电源电路几部分。

智能转速传感器具有上电自检功能,上电时电子模拟开关先拨到上电自检电路,上电自检电路产生一个固定频率的正弦波信号,2407A DSP首先测量出这个正弦波信号的频率,判断这个频率是否和其设定频率一致,如一致则认为电路工作正常,将电子模拟开关拨到发动机转速信号,测量发动机的转速,并通过显示电路显示出来;如不一致则通过CAN总线发出报警信号。

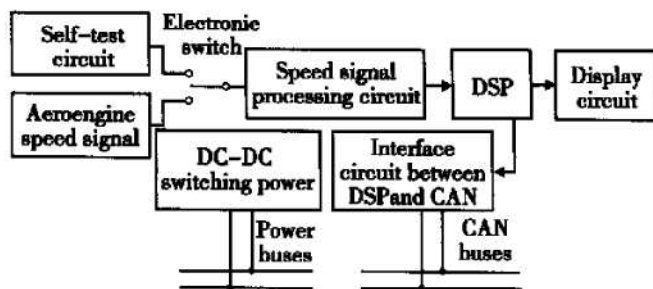


Fig. 1 Hardware structure of smart speed sensor

3.3 转速信号处理电路

转速信号处理电路包括钳位、放大、比较和光隔组成(图2)。电子开关的控制信号由DSP的I/O口输出。采用两个二极管反向并联将输入信号钳制在 $\pm 0.7V$ 左右,这样防止当转速较高时,过高的输入信号将电路损坏。利用LM358组成的反相放大电路,将 $\pm 0.7V$ 放大到 $\pm 7V$ 左右。由LM393组成时滞比较电路,这样可以有效防止波形不稳造成的比较不准。比较电路的比较基准选为地,经过比较电路,转速信号变成了方波信号。由于发动机的转速信号频率最高不超过20kHz,所以光隔选用TIL117就可以了,将方波信号的幅值变为0~3.3V,而且还隔离了模拟电路与数字电路,增强了抗干扰能力。最后将信号接入2407A DSP的TCLKINA(EVA的外部时钟输入引脚)来实现转速测量。

3.4 显示电路

2407A DSP利用其自带的16位SPI模块,可以很

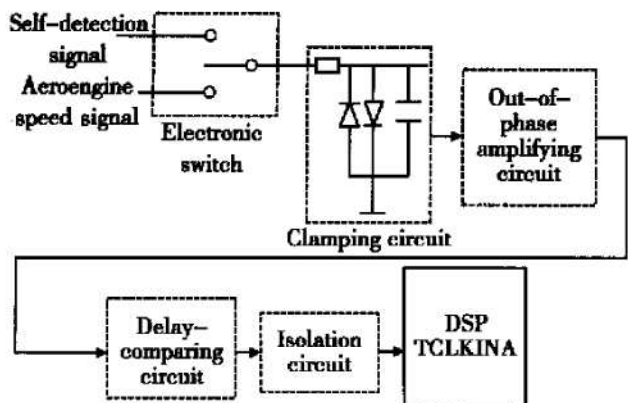


Fig. 2 Speed signal processing circuit

方便地驱动外设芯片,如数码管显示电路。考虑到智能转速传感器的集成度和体积,只是在其上预留了显示电路接口。显示电路采用由 74LS164 组成的移位静态显示方式,具有抗干扰能力强,显示亮度高,稳定可靠,编程简单等优点。只需将 2407A DSP 的 SPI 口的 SPISIMO 和 SPICLK 与其相连即可,其中 SPISIMO 作为数据线,SPICLK 作为时钟线,软件采用 8 位发送的方式。2407A DSP 是 3.3V 供电,显示电路是 5V 供电,本文用 74LS245 实现电平转换。

3.5 DSP 与 CAN 总线的接口电路

CAN 总线是现场总线中的一种,采用等层通信和总线拓扑结构,具有下列主要特性^[5]:采用循环冗余码检验、框架检测、确认信号出错检测、总线监控、位填充等 5 种错误监测和纠错措施,具有很高的可靠性,平均误码率小于 10^{-11} ;采用独特的位仲裁技术,实时性好;最高位传输率达 1Mbps,远距离可达 10km;采用双绞线作通信介质,接口简单,组网成本低。CAN 的种种优点使得它成为分布式控制系统数据总线理想的选择^[6]。2407A DSP 芯片内嵌 CAN 控制器,该芯片与 CAN 物理总线的接口采用 82C250 驱动器芯片。82C250 采用阻抗为 120Ω 双绞线作通信介质,信号采用差动发送和差动接收。为了增强抗干扰能力,在 2407A DSP 与 82C250 之间加高速光隔,光隔采用 6N137 芯片,其速度为 10MHz。

3.6 电磁干扰产生和抑制

本文主要采用光隔和滤波技术进行抗电磁干扰^[7]。总线是智能转速传感器连接航空发动机其他控制装置的桥梁,因此外部总线是其最主要的电磁干扰来源。开关电源因为体积小、效率高、稳压范围宽,适合组成分布式控制的电源总线,开关电源同时也是一个极大的电磁干扰源。为提高抗干扰能力,本文选用了隔离型的 DC/DC 模块,将外部电源总线与

电路板的电源线隔离开;利用电感和电容组成滤波电路,可以有效的抑制 DC/DC 模块的电磁干扰。CAN 总线与 DSP 采用 6N137 光隔相连。电路板设计上将模拟电路与数字电路完全分开,用光隔进行连接;采用了大量的滤波电容;并进行了大面积铺铜,有效地增强了抗干扰的能力。实际运用时加装屏蔽外壳以抑制发动机运行环境对其产生的电磁干扰。本文是针对频率量的测量,而频率量抗干扰能力较强,当采用了以上措施后,该智能转速传感器基本上不受电磁干扰的影响,均可以获得满意的测量结果。

4 软件设计

4.1 智能转速传感器智能化软件设计

智能化软件^[8]主要由上电自检、自诊断、转速测量、报警、通信几部分组成。整个程序采用汇编语言和 C 语言混合编程,初始化程序、中断程序用汇编语言编写,计算程序用 C 语言编写。自诊断主要判断转速测量值与转速变化值是否超出实际范围,如超出实际范围则报警。转速测量是整个程序的核心部分,本文采用动态分频法进行转速测量。

动态分频的关键是如何决定 m_1 ,本文采用一个简单可行的方法实现动态分频。首先用测周法测量出 m_0 ,然后用一个常数 K 来除以 m_0 就可以求得 m_1 。2407A DSP 有 4 个定时/计数器,这里使用 T1 作为内部时钟计数, T2 作为外部转速信号(信号由 TCLKINA 输入)计数。T2 设为每 m_x 个转速频率信号产生一次中断,在这次中断中读取 T1 计数器 T1CNT 的值 m_2 。先让 $m_x = 1$,测出 m_0 ;接着让常数 $K/m_0 = m_1$,这里采用整数除法,不计小数;然后 $m_x = m_1$,测出 m_2 ,根据公式 $f_x = f_c m_1 / m_2$ 计算出转速信号频率,这里计算保留小数位以确保精度。在外部晶振为 15MHz,内部系统 2 倍频, T1 设为 1/128 分频, T2 设为 1/1 分频外部转速信号,转速信号频率范围为 20Hz~20kHz 时, m_0 的取值范围为 0BH~2DC8H,因此可以取常数 $K = 2DC8H$ 。

4.2 误差分析及实验结果

表 1 为智能转速传感器的实验结果。转速动态分频法的最大相对误差 $E_{\max} = (1/m_2) * 100\%$, $K/m_0 = m_1$, $m_2 \approx m_1 * m_0$, 所以最大相对误差

$$E_{\max} \approx (1/K) * 100\% \quad (4)$$

$K = 2DC8H$, $E_{\max} \approx 0.00853\%$,精度非常高,完全满足了航空发动机控制的要求。(下转第 186 页)

行域上分别寻优, 将其中的最小值作为最优解。

(4) 干涉分析

得到最优刀轴矢量后, 还需进行干涉分析, 判断刀具是否与相邻叶片干涉, 干涉分析是笔者前期的工作, 参见文献[5]。如果出现干涉, 则在可行域内在最优解 α_{opt} 附近取一值, 再进行干涉分析, 直到得到无干涉刀位; 如果总是不能避免干涉, 则说明在当前工作台倾角 θ 下, 此铣床不能实现当前点的加工。严格意义上讲, 干涉条件应该为一个约束条件, 但考虑到干涉分析本来比较复杂, 若将此约束加入到求解数学模型中, 无疑将大大增加优化过程的复杂性, 所以将干涉分析单独考虑。

3 结 论

本文在分析了四坐标铣床加工叶轮局限性的基础上, 提出了确定加工刀位的方法。利用机床主轴作为初始刀轴矢量, 再经过旋转变换产生一组刀轴矢量, 并在这组矢量中搜索出与给定刀位最近的矢量, 将其作为最终的刀轴矢量。这种方法所得到的刀位可以保证在四坐标机床上实现, 所述方法已用于四坐

标叶轮的数控加工编程中, 证明是可行的。

参考文献:

[1] 胡新平, 李中庆. 用四坐标数控铣床加工整体叶轮[J]. 推进技术, 1993, 14(2). (HU Xir ping, LI Zhong-qing. Processing integral impeller 4-coordinate numerically controlled milling machine[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 1993, 14(2).)

[2] Wu C Y. Arbitrary surface flank milling of fan, compressor, and impeller blades[J]. *Transactions of the ASME, Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 1995, 117.

[3] Vafaeseefat, EIMaraghy H A. Optimal workpiece orientations for machining of sculptured surfaces[J]. *Proceeding Institute of Mechanical Engineerings*, 2000, 214(Part B).

[4] 孙春华, 陈皓晖, 刘华明. 整体叶轮侧铣数控加工刀位轨迹生成新方法[J]. 推进技术, 2000, 21(5). (SUN Chur hua, CHEN Hao hui, LIU Hua ming. Algorithm for NC cutter path generation during cylindrical milling integrated impeller[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2000, 21(5).)

[5] 蔡永林, 席 光, 樊宏周, 等. 曲面 5 轴加工中全局干涉检查与刀位修正[J]. 机械工程学报, 2002, (9).

(编辑: 王居信)

(上接第 182 页)

Table 1 Experimental result of intelligent rotating speed sensor

Speed signal frequency/Hz	20	100	500	1000	5000	10000	15000	20000
Experimental result/Hz	19. 9979	99. 9979	500. 032	1000. 01	4999. 89	10000. 1	14999. 7	20000. 3

5 结 论

DSP 的强大功能使它成为智能装置微处理器的理想选择。本文所设计的基于 2407A DSP 的智能转速传感器集成度高、外围电路少、抗干扰能力强、模块化程度高, 只需 2 根 CAN 总线, 2 根电源总线就可以方便地与外界相连; 智能化程度高, 可实现上电自检、自校正、自诊断、数值处理、通信等功能; 实时性好, 2407A DSP 运行速度最快可以达到 40M; 软硬件配置灵活, 动态分频法测量转速可以达到 $< 0.01\%$ 的精度。该智能转速传感器不仅适用于航空发动机的转速测量, 还适用于其他场合的转速测量, 具有广泛的应用前景。在此基础上, 我们可以很容易地开发出其他智能传感器, 如温度, 压力, 位移等, 为进一步研究航空发动机分布式控制系统奠定了基础。

参考文献:

[1] 黄金泉, 徐 科. 航空发动机分布式控制系统结构分析

[J]. 航空动力学报, 2003, 18(5).

[2] Shaffer P L. Distributed control systems for turbine engines [J]. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 1999, 121: 102~ 107.

[3] 王军政. 电液伺服阀控马达速度闭环数字控制系统的应用研究[J]. 北京: 北京理工大学学报, 2002, 22(2).

[4] 刘和平, 严利平, 张学锋, 等. TMS320LF240X DSP 结构、原理及应用[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2002.

[5] 阳宪惠. 现场总线技术及其应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 1999.

[6] Thompson H A. A CANbus-based safety-critical distributed aero-engine control systems architecture demonstrator[J]. *Microprocessors and Microsystems*, 1999, 23: 345~ 355.

[7] 李本忍, 宁玉杰. 工业控制系统抗电磁干扰技术研究 [J]. 小型微型计算机技术, 1994, 15(2).

[8] 刘君华. 智能传感器系统[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 1999.

(编辑: 王居信)