

转子自适应动平衡测试系统的研究

张鹏举, 陈昆昌, 李仁旺, 刘海霞, 王莹

(浙江理工大学机械与自动控制学院, 杭州 310018)

摘要: 针对工业中旋转机械的转子不平衡问题, 提出基于 ARM 嵌入式技术的解决方案, 研制转子自适应动平衡测试系统, 阐述系统硬件的设计思路和软件的实现过程。在转子无试重条件下, 该系统根据双面影响系数法和自学习机制, 一次得出不平衡量的计算方法。根据转子转速这一关键因素, 实现了动平衡测试的自适应过程。

关键词: 刚性转子; 自适应; 影响系数法; 动平衡

Research on Rotor Self-adaptive Dynamic Balance Test System

ZHANG Peng-ju, CHEN Kun-chang, LI Ren-wang, LIU Hai-xia, WANG Ying

(College of Mechanical and Automation Control, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018)

【Abstract】 In allusion to the rotors imbalance problem of revolving machines in the industry, this paper puts forward a solution based on ARM embedded technology and develops a test system of self-adaptive dynamic balance for rotors. The designing thoughts and process of hardware and software are expatiated. The system realizes a method that rotors can gain the unbalanced amounts only once without trial masses, based on two-side influencing coefficient method and self-learning mechanism. Considering a critical factor-rotor speed, the system also realizes a self-adaptive process of dynamic balance test.

【Key words】 rigid rotor; self-adaptive; influencing coefficient method; dynamic balance

旋转机械在电力、航空、机械化工、纺织等国民经济领域中起着非常重要的作用, 伴随着我国制造加工业的发展, 产品的质量和精度向着更高效、更精密的层次发展, 这就迫切要求解决这些旋转机械的转子因制造、安装的问题而引起的不平衡问题, 根据现有的转子动平衡理论和方法^[1-2], 采用双面平衡影响系数法, 即可精确地得出转子校正面的不平衡量。随着微电子技术的不断发展, 32 bit 的嵌入式处理器在工业控制、智能仪器、仪表等诸多领域得到了广泛的应用。ARM 技术是嵌入式系统方面的主流技术^[3], 该系统正是 ARM 处理器在转子自适应动平衡测试方面的具体应用, 通过自学习机制, 对轴承等系列的转子进行参数标定, 使得自适应测试有了参考依据, 测试中系统就会自动地显示出当前转子的不平衡量, 为下一步的校正提供精确的数据支持。

1 双面影响系数法

本系统采用双面影响系数法^[4]进行参数的标定。双面影响系数法, 就是在转子的两个校正面上分别加上一个试重, 通过加试重, 使转子在两个测量平面上的振动幅值及相位发生变化, 从而计算出外加试重在不同作用面上对转子振动及相位的影响系数, 最终确定转子的不平衡量。刚性转子结构见图 1。

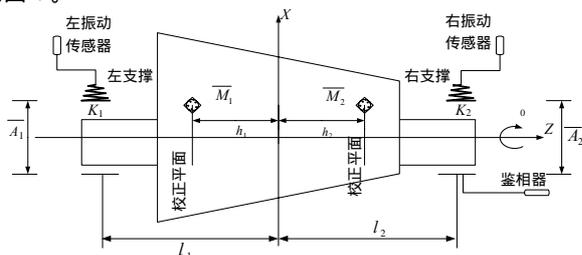


图 1 测量时刚性转子结构

设归化的测量平面为校正面 1 和校正面 2, 不平衡量为 \bar{U}_1 和 \bar{U}_2 , 在平衡转速 Ω_0 时, 测得两校正面的振动分别为 \bar{A}_{10} 和 \bar{A}_{20} , 考虑到两校正面的相互影响, 不平衡量为 \bar{U}_1 和 \bar{U}_2 时, 产生的振动幅值为

$$\begin{cases} \bar{A}_{10} = \alpha_{11}\bar{U}_1 + \alpha_{12}\bar{U}_2 \\ \bar{A}_{20} = \alpha_{21}\bar{U}_1 + \alpha_{22}\bar{U}_2 \end{cases}$$

其中, $\alpha_{ij}(i, j = 1, 2)$ 为影响系数, 影响转子质量、转动惯量、转子转速、支承系统刚度、转子支承尺寸以及不平衡量位置尺寸等。所以, 不同系列的转子、同一系列不同安装条件使得影响系数不尽相同, 然而同一系列转子在测量过程中, 视其影响系数基本不变。测量中为避免试重不当的影响, 其重量可由下式得到

$$P = A_0 \frac{Gg}{r\omega^2 s}$$

其中, P 为转子某一校正面上试加重量(kg); A_0 为转子某一测点的原始振幅(μm); r 为加重半径(m); ω 为平衡转速(rad/s); g 为重力加速度(m/s^2); s 为灵敏系数($\mu\text{m/g}\cdot\text{m}$)。

在第 1 校正面和第 2 校正面的已知角度位置分别加试重 \bar{m}_1 和 \bar{m}_2 , 测得振动分别为 $\bar{A}_{11}, \bar{A}_{12}$ 和 $\bar{A}_{21}, \bar{A}_{22}$, 则通过振动幅值与试重大小的线性关系, 可推出 4 个影响系数:

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50675208); 浙江省自然科学基金资助项目(Y605187)

作者简介: 张鹏举(1983 -), 男, 硕士研究生, 主研方向: 先进制造技术; 陈昆昌, 教授; 李仁旺, 教授、博士生导师; 刘海霞、王莹, 硕士研究生

收稿日期: 2007-10-26 **E-mail:** zpj.1102@yahoo.com.cn

$$\bar{\alpha}_{11} = \frac{\bar{A}_{11} - \bar{A}_{10}}{m_1}; \bar{\alpha}_{21} = \frac{\bar{A}_{21} - \bar{A}_{20}}{m_1}; \bar{\alpha}_{12} = \frac{\bar{A}_{12} - \bar{A}_{10}}{m_2}; \bar{\alpha}_{22} = \frac{\bar{A}_{22} - \bar{A}_{20}}{m_2}$$

得到影响系数后,即可推算出不平衡量:

$$\bar{U}_1 = \frac{\bar{\alpha}_{22} \bar{A}_{10} - \bar{\alpha}_{12} \bar{A}_{20}}{\bar{\alpha}_{11} \bar{\alpha}_{22} - \bar{\alpha}_{21} \bar{\alpha}_{12}}; \bar{U}_2 = \frac{\bar{\alpha}_{11} \bar{A}_{10} - \bar{\alpha}_{21} \bar{A}_{20}}{\bar{\alpha}_{11} \bar{\alpha}_{22} - \bar{\alpha}_{21} \bar{\alpha}_{12}}$$

2 硬件设计

根据智能仪器的设计特点,基于 ARM 的转子自适应平衡测试系统包括:(1)中央处理单元:通过动平衡算法,利用实时采集的数据及系统标定数据对转子不平衡量大小和相位进行精确测量;(2)信息采集与处理模块:通过两端振动传感器和一个鉴相器对两校正面的振动幅值及转速进行测量;对采集的模拟信号进行滤波等预处理;(3)人机交互模块:3×8 键盘功能控制;LED 功能显示;双通道模拟信号 A/D 转换;(4)通信模块:实现 RS485 的 PC 机实时通信。

系统结构见图 2。

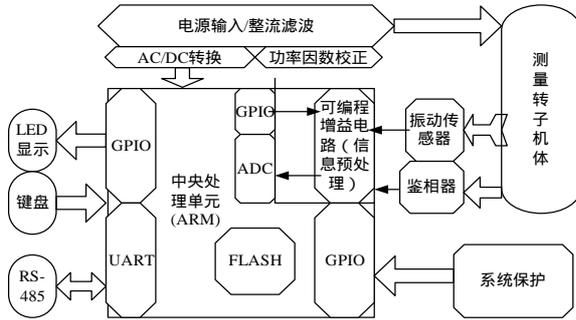


图 2 系统结构

2.1 中央处理单元

系统中央处理单元的控制芯片采用的是 ARM 内核的 Philips LPC2114^[5],它是一个基于支持实时仿真和跟踪的 16/32 bit ARM7TDMI-STM CPU 的微控制器,并带有 128 KB 嵌入的高速 Flash 存储器。64 管脚 LQFP 封装,使它的体积更小;3.3 V 和 1.8 V 系统电源,内部 PLL 时钟调整,令其功耗更低。本系统用到了它的 SPI 串行接口,实现显示电路的控制;10 bit ADC 来完成模数转换;高速的 Flash 存储实时测量的数据;并利用其 UART 接口作为与上位机的通信等。

2.2 信息采集与处理模块

2.2.1 信息采集

该模块主要完成测量转子不平衡量的模拟量,并对其模拟信号进行预处理。其中,采集模块将振动传感器置于转子支撑上,将转子的振动物理量转化为电信号,而鉴相器装在转子的下方,通过转子旋转的周期脉冲计算转速。考虑到本系统采用的是双面影响系数法,而加试重又有其大小和位置的任意性,从而造成振动干扰变化的增加,所以,对于试重前后的准确测量尤为重要,这就要求对直接从传感器得到的模拟信号进行调理和分析,才能最终完成对不平衡量幅值和相位的精确测量。

2.2.2 信息处理

由于传感器采集的模拟电信号电压小于 50 mV,因此必须对此微弱信号进行预处理才能使用。于是处理模块采用了美国 Maxim 公司推出的 CMOS 双二阶通用开关电容有源滤波器 MAX261^[6],可以采用微处理器控制其精确滤波器函数,无需外围元件多种形式的滤波器,其内部含有两个二阶滤波单元,每个单元中心频率、Q 值、滤波器工作模式均可由程序设置。与数字滤波器相比,其处理速度快、整体结构简单。

MAX261 原理见图 3。

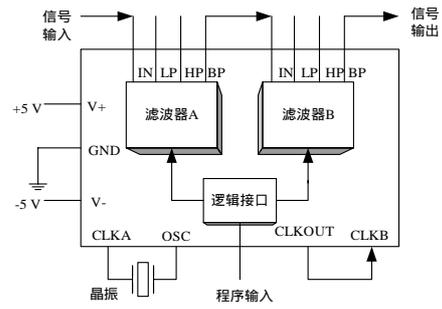


图 3 MAX261 原理

系统从设计要求、应用前景以及通用性等方面都要求能满足不同转子(通常为 600 rap/min ~ 60 000 rap/min,即转频 10 Hz ~ 1 000 Hz)的动平衡测试,另外还考虑到未知噪声信号对放大器饱和的影响,采用自适应两级带跟踪滤波放大,可以将采集的微弱信号转化为一定幅度的平稳信号。系统以转子的转频为基准信号,根据此中心频率,通过映射关系可以实时对 MAX261 设置相应的参数,实现合适带宽,达到自适应的目的,其中工作模式设为模式 2, F5 ~ F0=000100,品质因数 $Q_0 \sim Q_0 = 0100000$, M1 ~ M0=01,编程输入为 0100000 00010001。

2.3 人机交互模块

经过预处理的模拟振动信号便可直接进入 2 个 A/D 转换通道,此模块主要是 ARM 的外围扩展接口电路,包括键盘扫描、LED 驱动、A/D 通道及转频脉冲输入。电路如图 4 所示。P0.0~P0.7 作为为键盘纵向输入端,P0.8~P0.10(即 W1~W3)作为为键盘横向输入端;转频脉冲通过反相施密特触发器 74LS14 转化为规则的脉冲信号,并且该模块设置了两个排插,可以实现脉冲上升沿与下降沿的转换;在 LED 驱动中用到了 74LS245 作为 595 的锁存及时钟、数据信号的驱动。

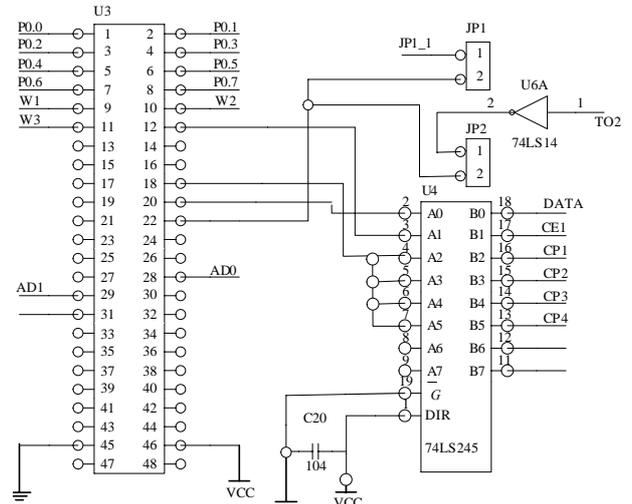


图 4 人机交互模块接口电路

2.4 外部通信模块

外部通信模块主要由 485 通信模块构成,弥补了 RS-232 通信距离短、速率低的缺点。485 通信接口采用的是 MAXIM 公司的 MAX1490 芯片,这是一款完全隔离的 485 数据接口芯片,数据信号采用差分传输方式,也称为平衡传输,传输波特率最大为 25 Mb/s。其输出管脚直接与 ARM 处理器的串口 0(UART0)相连。人机交互模块接口电路见图 4。

3 软件设计

根据系统的需要，软件主要功能分为两大部分：转子参数的标定和转子不平衡量的测量。设计采用键盘实时扫描方式，即系统初始化后处于复位模式，由定义的指向键盘处理程序的指针实时对键盘实时监控，一旦有按键按下，就会触发相应的系统模式，并激活对应功能键。这样，节省了系统资源，同时也保证了实时性。

3.1 参数标定

转子参数标定的过程是系统自学习的过程，在这个过程中，系统会对各种转子分门别类进行管理，包括转子的型号、质量、材料比重、尺寸、槽数等，为了满足不同的工作场合对转子转速要求的差别，本系统把转子平衡转速也考虑进去。鉴于参数繁多，系统采用参数归一化方式将多个参数记录为一个产品编号，并将其存入一个二维数组 $RPN[M][N]$ 中，一维是型号，另一维是转速。比如，一个型号为 R01 的转子，记录此系列的产品编号为 20070101，其中，最后一位“01”表示转子的转速为 3000 rap/min。

由于系统采用双面影响系数法得到转子的影响系数 $\alpha_{ij}(i, j = 1, 2)$ ，因此需要对转子进行无试重、左试重和右试重分别测量振动量。

程序中定义了与其相关的数据：

```
uint32 A10; //无试重条件下左侧的震动量
uint32 A20; //无试重条件下右侧的震动量
/*左试重：m1*/
uint32 A1T1; //左试重条件下左侧的震动量
uint32 A2T1; //左试重条件下右侧的震动量
/*右试重：m2*/
uint32 A1T2; //右试重条件下左侧的震动量
uint32 A2T2; //右试重条件下右侧的震动量
/*影响系数*/
fp32 a11; fp32 a21; fp32 a12; fp32 a22;
```

在按下学习键后，系统自动从复位模式进入学习模式，此时无试重、左试重、右试重及标定按键有效。在无试重、左试重和右试重的按键功能模块中都调用了 $void RecordVibration()$ 函数，它主要完成当前情况下振动量的记录。流程图见图 5。

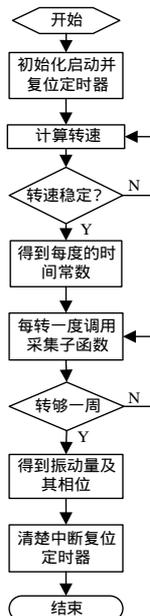


图 5 函数 $RecordVibration()$ 的流程

启动采集程序 $void Collect()$ 时，把两个校正面的振动模拟量通过 ADC 通道分别采集到 $Left[370]$ 和 $Right[370]$ 数组中，从数组中取出最大值 $LeftMax$ 和 $RightMax$ 即为所需的振动量，而最大值的数组标号就是振动量的相位 $LeftMaxPhase$ 和 $RightMaxPhase$ 。这样即可算出影响系数并保存到 Data 缓冲区，部分代码如下：

```
data[(Number-1)*4+0]=(A1T1-A10)*1.0/m1;
data[(Number-1)*4+1]=(A2T1-A20)*1.0/m1;
data[(Number-1)*4+2]=(A1T2-A10)*1.0/m2;
data[(Number-1)*4+3]=(A2T2-A20)*1.0/m2;
```

待判断系数有效后，调用函数 $void SaveCoefficient()$ 将无误的影响系数从 RAM 复制到 FLASH 中，其产品编号、转速与二维数组 $RPN[M][N]$ 相对应。

3.2 不平衡量测量

通过标定自学习的过程，系统可以对多种系列的转子在不同转速情况下的影响系数 $\alpha_{ij}(i, j = 1, 2)$ 进行记录，给自适应测量不平衡量提供了有力的依据。

不平衡量的测量过程是系统自适应调度的过程，它通过产品编号把该系列转子在不同转速情况下的影响系数分析调用出来，并通过相关公式得出不平衡量 \bar{U}_1 和 \bar{U}_2 。如果在该速度下没有相对应的系数记录，系统会通过错误功能号显示的方式及时提示用户，并自动切换到学习模式。此时，用户可以调节转子的转速达到测量要求，也可以对新的转速情况进行新的标定。下面只讨论满足转速要求的实现过程。

不平衡量的变量名的定义如下：

```
uint16 U1; //左侧
uint16 U2; //右侧
```

当测试按键按下，系统进入测试模式。此模式下，记忆按键是有效的。测试按键按下后，系统就会自动调用函数 $void Measure()$ 。此时，要求输入当前转子的产品编号，确认输入后，产品编号被变量 TEMP1 记录。然后计算转速，待到转速稳定后，查询转速表 $uint8 SpeedTable[]$ 得到对应转速编码，由 TEMP2 记录。有了 TEMP1 和 TEMP2 的数值，系统就会调用函数 $void FlashToRam(fp32 dst[][], fp32 data[], uint32 no)$ ，将 FLASH 中二维数组 $RPN[M][N]$ 对应的影响系数复制到 RAM 中的 Data 缓冲区，其中， no 为要复制的字节数。同时，系统测试开始，先为下一步测量做准备：

```
/*读取某种转子的系数并判断正确与否*/
a11=data[4*(Temp-1)+0]; a21=data[4*(Temp-1)+1]
a12=data[4*(Temp-1)+2]; a22=data[4*(Temp-1)+3]
```

判断转子影响系数有效后，将标志位 Flag2 置为 TURE，再进行以下程序：

```
if (Flag2) //如果影响系数正确
{
RecordVibration(); //调用左右通道的模拟量采集程序
A10=LeftMax; //取左侧的最大模拟量
A20=RightMax; //取右侧的最大模拟量
/*计算此转子的不平衡量*/
U1=((a22*A10-a12*A20)/(a11*a22-a12*a21));
U2=((a11*A20-a21*A10)/(a11*a12-a12*a21));
/*更新数码管的数据*/
...
Flag3=TRUE; //使能存储测量数据功能
...}
```

(下转第 276 页)