

主轴回转精度测试的测速 跟踪数据采集系统

郑耀林 陈宝珊 陈希达

(精密机械工程系)

摘 要

本文以 TP801B 单板机为核心, 配置 ADC0809 及相应的软件, 设计一种新的测速跟踪数据采集系统. 它可实时地跟踪主轴转速的变化而修改采样周期, 使采样点的位置固定. 在用于主轴回转精度的测试中, 效果良好, 采样点数最大误差为 1 点. 同时对实测数据也作了一定的评定.

一、前 言

随着现代科学技术的不断发展, 对零件加工精度的要求越来越高. 特别是宇航等高精尖的技术行业中, 精度要求已达到百分之几微米, 甚至于更高. 为了达到超高精度的要求, 对加工条件、材料以及加工母机等都作了大量的研究和改进, 而实践证明, 在零件加工过程中, 主轴回转误差往往是影响加工精度的关键. 为了更好地进行理论分析, 需要对主轴的回转精度进行测试. 目前, 先进的方法是在线测试(即动态测试). 在测试过程中, 首先在主轴回转状态下采集数据. 为了便于计算机进行数据处理和计算、评定, 需要把误差信号的模拟量转换为数字量. 这可借助于廉价的单板机来完成.

数据采集, 有人工、定时、光电码盘等方法, 其中以光电码盘采样方法精度为最高. 这种方法是把码盘装于主轴上随主轴一起旋转, 并通过光电转换技术进行采样. 它的采样点不随主轴转速的变化而变动. 但是, 码盘的直径大, 又增加主轴的负荷, 而且码盘的点数不能如意变更.

我们根据实际情况, 提出一种切实可行的方法, 即测速跟踪数据采集系统. 这种方法是利用购置的 TP801B 单板机、TP801AD-082 模数接口板及配置相应的硬件和软件, 便可实时地跟踪轴速的变化而改变采样间隔, 使采样点位置保持不变.

本文 1987 年 2 月 16 日收到.

二、系统的组成及基本原理

测速跟踪数据采集系统的原理框图如图 1 所示。其原理是：

一方面，振动一位移测量仪 DWY-3 测得标准环 B 的位移误差信号，经低通滤波器后，送入极性变换电路转换为单极性信号，然后送入 ADC0809，以备采集和转换。

另一方面，利用与主轴一起转动的圆盘 C（例如皮带轮或其它转体），改作成测速盘，这样做就不会增加主轴的负荷。具体作法是，在该盘的一个侧面同一圆周上均匀地开四个盲孔，（也可以开成通孔、狭槽等），分一圆周为四等分，每等分为 90°（以下称 90° 为一个区）。WFC—Ⅲ 测振仪的涡流探头不接触地对着盲孔所在圆周。当主轴旋转时，在探头与盲孔对应处相当于位移有大的变化。由于涡流磁场的作用，使探头线圈的等效阻抗发生大的变化，最终使 WFC—Ⅲ 每转输出四个钟形脉冲，经放大和整形后，由控制脉冲发生单元产生四个窄脉冲送入 TP801B 单板机，通过软件去控制该系统执行每区的不同任务，即测速、计算采样周期、采集及等待等内容，具体见图 2。

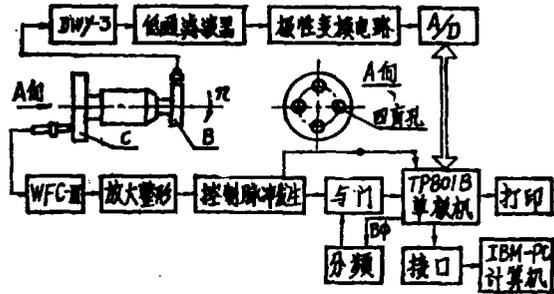


图 1

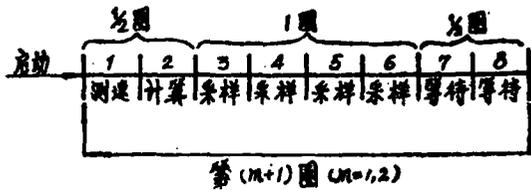


图 2

由图 2 可见，当采集一圈数据时，由测速、计算到采集完毕共需 1.5 转的时间，这时假设主轴的转速不变，如果要采集多圈并从同一起点开始，只要由软件设定等待半圈（两个区）即可方便地实现。

如果采用一圈测速、一圈计算、一圈采集的办法（即只开一盲孔），当然也可以，但此时必须假定在三圈时间内主轴的转速不变，这显然不如前者合理和精确，因为三圈内主轴转速的变化可能性要比 1.5 圈的大。

至于分为更多的区（开更多的盲孔），由于每区的时间短，当小于计算区总指令时间时，使计算区指令无法执行完，因而受到限制，区数不能分得太多。对于中、低速轴系，以四区为宜。且四区法在工艺和计算和取数都比较方便。

三、硬件电路及其工作原理

整个硬件电路如图 3。它主要由控制通道和误差信号通道两大部分组成，现分述如下：

1. 控制通道 (脉冲发生单元)

由运算放大器 LF358、施密特触发器 74LS132、单稳态触发器 74LS123、双 D 触发器 74LS74、与门 74LS08 等器件组成。

信号的传递过程是：当主轴旋转时，由测振仪 WFC—Ⅲ 每转输出四个钟形波 u_c 经反相比例放大后，由施密特触发器整形变为方波 u_p ，再经单稳后输出窄脉冲 u_g 。 u_g 的宽度由 R_e 和 C_e 的乘积决定和调整。 u_g 分为两路：一路送入 TP801B 的 PIO 的 B 口 PB5，作为每区的起止动作（即作为每区执行中断服务程序的开始和结束用）；另一路输入 D 触发器进行二分频，得矩形波 u_H 。 u_H 又分为两路：一路送至 PIO 的 A 口 PA 0，作为第一圈采集时的测速中断服务程序的控制脉冲（上升沿有效）；另一路与 u_1 一起送入与门，相与后送至 CTC 0 通道的 CLK/TRG0 端，作为 CTC 计数用的标准脉冲 u_I ， u_I 在测速的 1/4 转时被 CTC 计数。其中 u_1 是 TP801B 的时钟 $B\phi$ 经 D 触发器二分频后得到的。 $B\phi$ 之所以要进行二分频，是因为 CTC 要求被计数的脉冲频率 f_m 至少要低于两倍以上的 $B\phi$ 频率 f_ϕ ，即 $f_m \leq 2f_\phi$ 。各点波形见图 4。

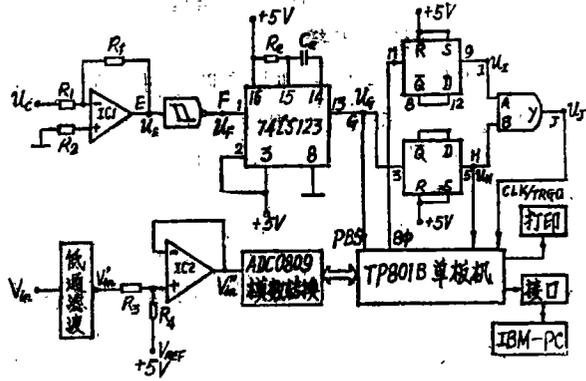


图 3

2. 误差信号通道

由图 2、3 可见，电容传感器检测标准环或工件（作电容的一个极）的位移误差信号，经 DWY-3 转为电压变化信号 V_{in} ，送入低通滤波器滤掉无用的高频干扰信号后，此时的信号是正负变化的双极性信号 V''_{in} ，而 ADC0809 要求单极性的 0—5V 的模入电压信号，为此把 V''_{in} 经极性变换电路变为单极性电压信号 V'_{in} 。极性变换电路中， $V_{ref(+)}$ 为 +5.00V，要求足够稳定与准确， $R_4 < 50k\Omega$ ，且 $R_4 = R_3$ 。一旦 CPU 发出采样指令，ADC0809 便把误差电压信号转换为数字量，并由 CPU 读入存于指定的 RAM 区。

ADC0809 模数转换器是脉冲启动转换类型的芯片，能和微处理器直接配套使用，它与 TP801B 的连接简图如图 5。通过地址总线 A_0-A_7 、数据总线 D_0-D_7 、时钟 $B\phi$ 以及控制线 IOW 、 IOR 和 $IORQ$ 互相连接。

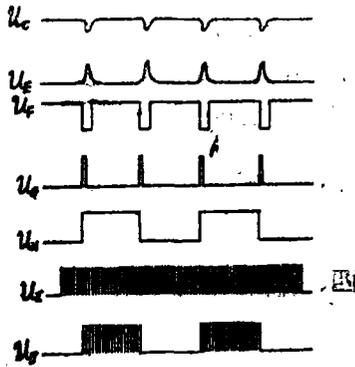


图 4

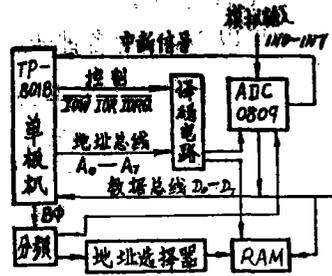


图 5

ADC0809 的转换时间约 $100\mu\text{s}$ 左右。

3. CTC 通道的连接

780—CTC 芯片是一种具有四个独立通道的可编程器件, 它的每个通道都有定时和计数两种功能。在本系统中, 用作测速时的外触发计数器, 其通道的选用要根据所需计数的最大值 Q_{max} 来确定。而 Q_{max} 又与主轴转速有关。设主轴最低转速为 n_{min} , 计数用的标准脉冲周期为

$$T_m = 1/f_m = 2T_\varphi$$

$T_\varphi = 0.5008\mu\text{s}$ 为 TP801B 的时钟周期, 则 1/4 转所需计数的脉冲数为

$$Q_{max} = 10^6 \times \pi / n_{min} \times 4T_\varphi$$

当 $n_{min} = \frac{14}{3}\pi \text{ rad/s}$ 时, 由 Q_{max} 可求得需要三个通道才能满足要求。因此, 可直接把 TP801B 的 CTC 的 0、1、3 通道作如图 6 的连接。

由于 CTC 的计数是由减 1 计数器来执行, 且本系统取定标系数为 256, 则当 CPU 读入减 1 计数器的值时, 尚需用 256 减去该值才是真正的测速计数值。设某时刻 CTC 的计数总真值为 Q , 0、1、3 通道的真值分别为 Q_0 、 Q_1 、 Q_3 , 则

$$Q = Q_0 + 256Q_1 + 256^2Q_3$$

此时的转速为

$$n = 10^6 \times \pi / 4T_\varphi Q = 10^6 \times \pi / 2T_m Q \text{ (rad/s)}$$

4. 采样点数 N 的确定

据奈奎斯特 (Nyquist) 采样定理

$$f_c \geq 2f_{max}$$

式中, f_c 为采样频率; f_{max} 为采样信号最高频率的谐波分量。

本系统取 $f_c = 3f_{max}$ 。

设主轴回转误差信号基频为 f_0 , 则主轴旋转一圈的采样点数为

$$N = f_c / f_0 = 2\pi f_c / n$$

可见, 转速越低, N 越大。若最低转速为 n_{min} , 可得

$$N_{max} = 2\pi f_c / n_{min}$$

本系统在 MG135 高精度磨床的实测中, $f_{max} = 280\text{Hz}$, 故 $N_{max} = 360$ 点, 每区为 90 点。

如果以 N_{max} 为各种转速的采样数目, 在转速为 n 时, 采样周期 T_h 为

$$T_h = 2\pi \frac{1}{n} \times \frac{1}{N_{max}} = \frac{n_{min}}{f_c n} = \frac{2T_m Q n_{min}}{10^6 \pi f_c} \text{ (S)}$$

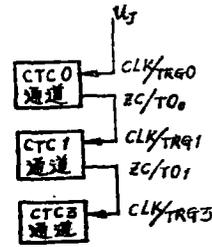


图 6

四、系统软件设计

软件是测速跟踪数据采集系统的主要关键部分。为保证良好的跟踪主轴转速变化性能并固定采样点位置, 我们设置 TP801B 单板机的 P10A 口和 B 口均为位控方式, CTC 为外触发

计数方式。

当 TP801B 接收到开始工作指令后，立即处于待命工作状态，并使 CTU 对 PA 0 执行位检测指令。在检测到 PA 0 位 (u_H) 为低电平时，立即开中断，使 CPU 处于响应中断的预备状态。当每圈四脉冲的第一个到来时，加在 PA 0 的 u_H 亦为上升沿 (上升沿有效)，CPU 立即响应中断并执行测速中断服务程序，一方面 CTC 对 u_H 进行计数，另一方面对 PIO 的 B 口进行初始化。当第二个脉冲到来时，CPU 改为响应加在 PB5 的 u_G 的中断请求，立即执行计算采样周期 T_h 的中断服务程序，关闭 CTC 并读入计数值；关闭 PA 0，算出的 T_h 包括执行指令用时、A/D 转换时间 $100\mu s$ 和延时时间。

由于最后的延时 T'_h 有整数部分，又有小数部分，如果把小数部分采用四舍五入的办法处理，将会因延时常数的加 1 (或减 1) 使 T_h 产生较大误差，最终使采样点数和位置变化。为避免这一情况，我们设置了软件延时开关，其原理是：先对 T'_h 的整数部分延时，然后把 1 分为五档，通过软件判断小数在其中的某档间，确定出附加的延时值，从而把 T_h 的误差缩小到最低限度，具体分档如下：

- $0 \leq \text{小数部分} < 0.125$ ；附加延时为 0；
- $0.125 \leq \text{小数部分} < 0.375$ ；附加延时 4 个 T 状态；
- $0.375 \leq \text{小数部分} < 0.625$ ；附加延时 8 个 T 状态；
- $0.625 \leq \text{小数部分} < 0.875$ ；附加延时 12 个 T 状态；
- $0.875 \leq \text{小数部分} < 1$ ；附加延时 16 个 T 状态；

采用上述的软件延时开关后， T_h 的最大误差为 2.875 个 T 状态 ($1.44\mu s$)，经实际运行，效果甚佳，每圈采样点数变化很小。

当第三、四、五、六个脉冲分别到来时，由 PB5 控制，使 CPU 执行采样 1 圈的任务，每区置有区标志及存入 T_h 值。故每区的第一点 A/D 由单独程序完成，第二点 A/D 以后由另一循环程序完成。

如果本区的点数尚未采集完毕，而下一区的中断控制脉冲又到来，则由软件设置立即转入下区的第一点 A/D 程序，同时，把本区自行入栈保护的地址由软件改为再下一区首址，这样，本区未采集完程序再不会被执行，保证了后面区程序的顺利执行。

如果要采集多圈 (受 RAM 容量的限制)，由软件设置连续等待两区时间，然后从同一起点又进行测速、计算和采集。但从第二圈起，均由 PB5 控制。

此外，软件还设置对应于四个盲孔的采样，连续采集 25 圈 (100 点)，以资比较，同时还设置了峰峰值搜索程序，二一十进制转换程序和显示、打印及最小二乘圆等程序。整个系统程序流程图如图 7。

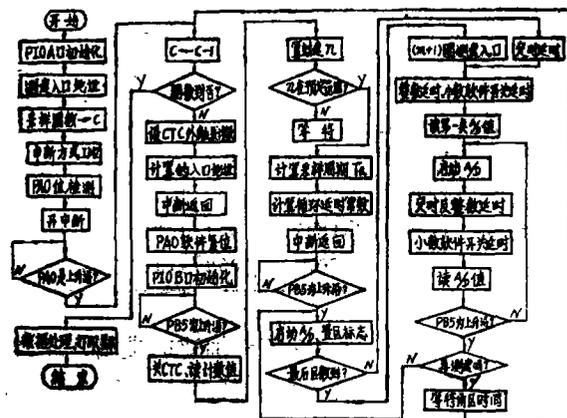


图 7

五、实 测 数 据

1. 误差位移 δ (μm) 与数字量 B 的关系

因为 ADC0809 的数字量 B 与模入量 V''_{in} 的关系为

$$B = \frac{V''_{in} - V_{ref(-)}}{V_{ref(+)} - V_{ref(-)}} \times 256$$

$$= \frac{V''_{in}}{5} \times 256$$

式中

$$V_{ref(+)} = 5V, \quad V_{ref(-)} = 0V$$

低通滤波器 (在通带内增益为 1) 的输入电压 V_{in} 与极性转换电路的输出电压 V''_{in} 的关系为

$$V_{in} = 2V''_{in} - 5 = \frac{5}{128} (B - 128)$$

DWY-3 输出电压 V_{in} 与误差位移 δ 的关系可由实际标定测出, 设求得标定系数为 k , 则

$$\delta = kV_{in} = k \frac{5}{128} (B - 128)$$

$$= K (B - 128)$$

式中, $K = k \frac{5}{128}$, 求得 $k = \frac{1}{1.838}$, 则 $K = 0.02125$

2. 测试数据分析

把此系统用于 MG135 高精度磨床中进行多次实际测试, 在各种不同的主轴转速下 (由 $14\pi/3 \text{ rad/s}$ — $242\pi/15 \text{ rad/s}$), 每圈采集点数基本上是固定的, 最大变化为 1 个点。同时把采集的数据送入 IBM-PC 计算机进行误差评定计算, 得出主轴回转误差如表 1, 其中包括形状误差及振动误差, 单位为 μm ;

表 1

次数 转速 rad/s	1	2	3	4	5	6	7	8	9	均 值	标准差
$134\pi/15$	1.3021	1.2847	1.3860	1.2153	1.2674	1.2847	1.3194	1.2647	1.3542	1.3055	0.0370
$166\pi/15$	1.3021	1.3021	1.4062	1.3715	1.2847	1.2847	1.2847	1.3889	1.3542	1.3194	0.0373
$207\pi/15$	1.3021	1.2847	1.2674	1.2153	1.2590	1.2674	1.2500	1.3889	1.3368	1.2882	0.0434
$242\pi/15$	1.2674	1.2674	1.4062	1.4236	1.2847	1.3889	1.3368	1.3194	1.2326	1.3483	0.0541

由表 1 可看出: (1) 随着轴速的提高, 回转误差的变化总的趋势是增加的, (2) 测试的重复精度随轴速的提高而降低。这与形状误差和振动均有密切关系, 若把标准环 (或工件) 的形状误差以及振动误差预先存入单板机中, 然后把测试所得误差减去预存误差, 则精确度必将大大提高。

六、结 论

由设计和实测结果可见:

(1) 测速跟踪数据采集系统可实时地跟踪主轴转速的变化而达到定住采集点位置, 比用光电码盘方法更灵活、更方便。

(2) 本系统适用于中低速轴系, 只要适当地缩小计算采样周期程序所花时间, 也可用于高速轴系。

参 考 文 献

- [1] 徐享钧等, 软件定点采样主轴回转精度测量系统, 上海机械学院学报, 2(1985)。
- [2] 周明德编著, 微型计算机硬件软件及其应用, 清华大学出版社, (1982)。
- [3] JOSEPH, J.C., Designing Microprocessor-Based Instrumentation, Reston Publishing Company, Inc., Reston Virginia; (1982), 263—271.

A Data Acquisition System by Measuring Revolutions and Tracking for Testing Rotational Accuracy of Spindle

Zheng Yaolin Chen Baoshan Chen Xida

Abstract

A new data acquisition system by measuring revolutions and tracking is suggested in this paper. This is a system consisted of a single board microcomputer of TP801B, ADC 0809, and corresponding interface and software. It is capable of tracking in real-time for the change of revolutions of spindle and modifying the period of sampling to fix the position of sample points.

It is an effective system for testing rotational accuracy of spindle. The number of sample points shows a maximum error of 1. The error of measured value is also evaluated.