机床主轴回转精度 APPLE—Ⅱ微机测试系统

宋京伟　楼柏青　刘庆江

（机械工程系）

摘　要

本文介绍了APPLE—Ⅱ微机与其它通用仪器组成的机床主轴回转精度测试系统。该系统通过与软件配合，能对回转工件类和回转刀具类机床主轴回转精度进行测试，可以自动采集数据，用几种方法评价回转误差，并能显示和打印出圆图象及评价结果，还可以对回转误差信号做频谱分析。

一、前　言

机床主轴的回转精度直接影响着工件的加工精度和表面粗糙度，通过对主轴的回转精度测试，查明主轴的回转误差源，从而采取措施以提高主轴的回转精度，这是现代机床设计和机械制造业中的重要研究课题。在高等工科院校机械制造专业教学大纲中也安排了机床主轴回转精度测试实验。但由于受到专用仪器的限制，不少院校未能开出该实验，即使已开了该实验的院校一般也只是采用“双向法”（VUOSO法）。这种方法在原理上所存在的问题且不分析，实验时是在示波器上显示“李萨育圆图象”，然后将示波器屏幕上显示的圆图象拍照下来，最后将照片上的圆图象用同心圆板来读取回转误差值，实验过程长而麻烦，误差较大，而且当时一般无法进行回转误差的价评和分析回转误差源，实际上只是做一个误差圆图象的测试演示，这样就很难达到实验目的。

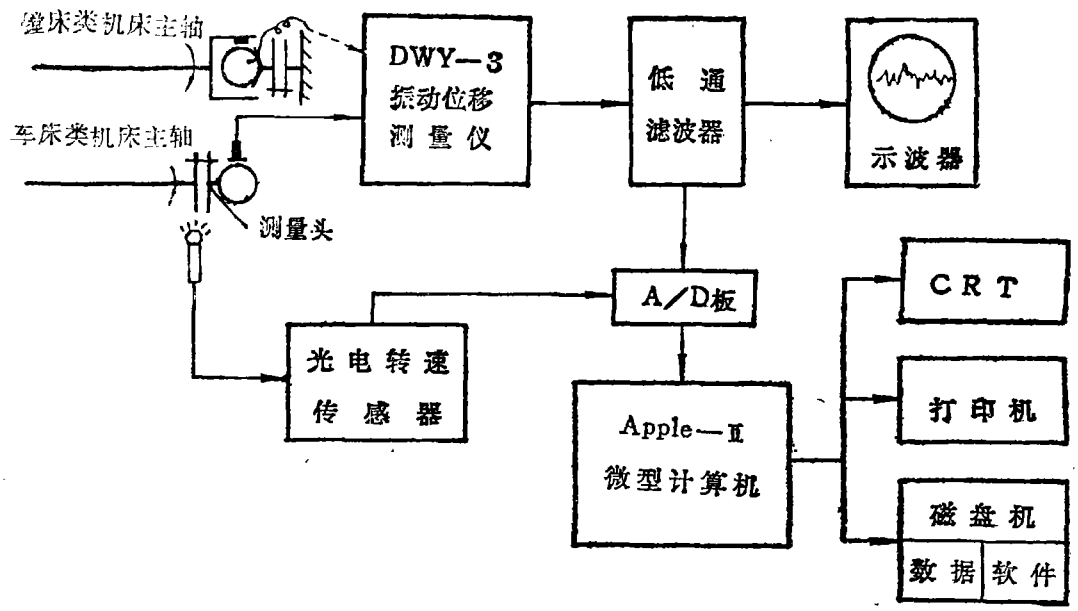
随着微型计算机技术的发展和普及，一般的实验室都配备了微机系统，这样为机床主轴回转精度测试实验中的测量数据采集、记录显示、回转误差的评价等创造了有利的条件。本文介绍的系统就是利用目前在国内广泛使用的APPLE—Ⅱ微机与其它常用的通用仪器组合而成，利用软件采取人机对话方式，来进行机床主轴回转精度测试实验，完成实验所要求的各项内容。

本文于1986年9月15日收到

中国知网 https://www.cnki.net

二、测试系统工作原理

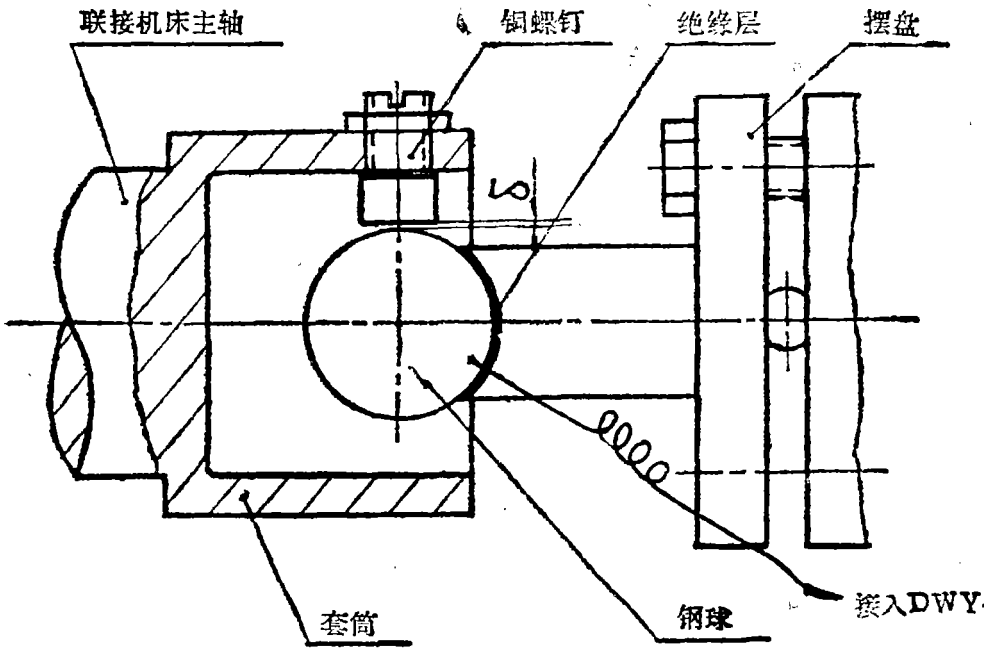
在理想的情况下，机床主轴回转轴线在空间的位置是固定不变的。但是在实际上由于存在着轴承的轴颈加工误差，存在着回转过程中的静力学和动力学等方面的影响因素，主轴的回转轴线在空间位置是不断变化的，这一变化称为误差运动。在机床主轴的回转误差运动中，加工零件影响最大的是敏感方向的误差运动，为了测量它，则可用一只位移传感器置于该方向来检测，即单向法测量。下面以回转工件类机床（车床类）为例，介绍具体测量法。在机床主轴上固定一个精密钢球，钢球通过摆盘可使安装偏心调节到最小，电容传感器固定在刀架处，通过随主轴一起旋转的钢球拾取位移信号（包括回转误差和钢球残余偏心引起的一次谐波分量）。电容传感器输出的位移信号经DWY—3电容式振动位移测量仪变换、放大，以电压信号输出，送入低通滤波器中滤去高频干扰信号，然后经过A/D转换器转换成离散的数字量送入APPLE—Ⅱ微机内存，再根据需要，通过软件实现对数据的处理。实验系统组成框图如图一所示。



图一　　测试系统组成框图

对回转刀具类（镗床类）机床的测试，可以采用图二所示结构的测量头。这种测量头钢球固定不动，与摆盘绝缘，把钢球与DWY—3振动位移测量仪的原电容式传感器的输出线连接，不用原电容式传感器，而以钢球取代它，由钢球形成电容的一个极板。在主轴上联接一套筒，上面安装一个小铜螺钉，形成电容的另一极板并接地，调整螺钉端面与钢球的距离可达到调整初始间隙δ的目的。当机床主轴回转时，误差信号则可通过钢球送进DWY—3，解决了用单向法测回转刀具类机床主轴回转精度存在的困难和问题。

中国知网 https://www.cnki.net



图二　　回转刀具类机床用测量头

三、系统介绍

测试系统是通过软件控制进行工作的，系统软件由采样、消偏及产生基圆、回转误差评价、FFT、存盘显示打印几个程序块组成。整个系统程序流程框图如图三所示，下面就各部分进行介绍。

1、采样

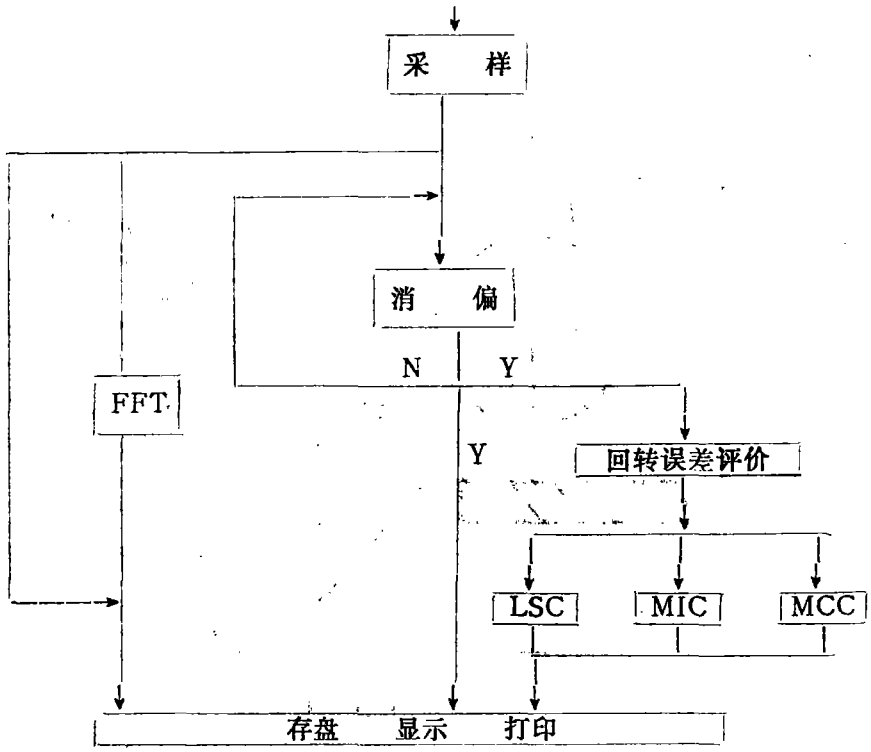
由传感器测出的误差信号经A/D转换后变成了相应的离散数字量。我们使用的A/D转换器是APPLE—Ⅱ微机用AD/DA接口板，它插在机内标准扩充插座上与主机相连接。采样程序是用BASIC语言与6502汇编语言混合编制，为满足不同机床及转速需要，采样频率可以选择。在选择采样频率时，一是要根据采样定理，使采样频率大于信号最高频率的两倍；另一是要考虑到在评价回转误差时，每转内所离散的点数不能太少。采样频率f与每转内离散点数N及转速n的关系是：

$$f=\frac{N\cdot n}{60}\quad(HZ)\qquad(1)$$

在高转速时，采样频率应考虑每转内离散点数目。在低转速时，采样频率可由信号频率决定。我们共设置了七档采样频率10k、5k、2k、1k、500HZ、200HZ、100HZ等。如果每转内离散点取点N＝100点，采样频率f＝10k，转速n则可测到6000转/分。

由于在回转误差评价计算时，应按整圈数取离散点数目，在系统中设置了一个光电转速传感器来发出定圈信号，以便能够决定从哪一点起到哪一点止是同一转的离散数字量。

中国知网 https://www.cnki.net

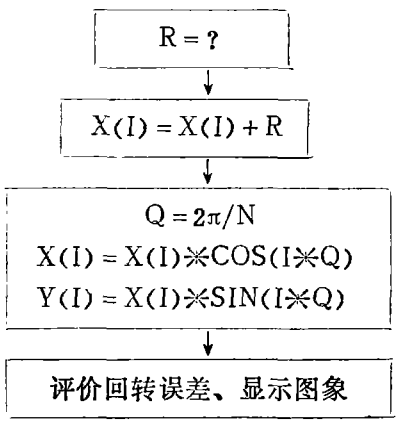


图三　　系统程序流程框图

考虑到多段平均和频谱分析的需要，数据总采样点数最多一次可达16k，并能存入磁盘供反复调用。

2、基圆的产生和残留偏心的消除

在本测试系统中，基圆的产生是用软件实现的。方法非常简单，只需把每转的各个离散数字量X(I)（I＝0，1，2，…N－1）都加上一个常量R（基圆半径），再将它们分别分解成两个互相垂直方向上的分量$X_1(I)$、$Y_1(I)$，这就完成了被测信号与基圆的叠加。选用不同R值就得到了不同大小的基圆。软件产生基圆框圆见图四



图四　　软件产生基圆框图

中国知网　https://www.cnki.net

钢球的安装残留偏心e在调整中不可能为零，由于偏心e的存在，在测量信号中则会产生一次分量，造成基圆的畸变和测量误差，其测量误差的相对误差ε，可由下式确定。〔四〕

$$\varepsilon = \frac{e^2}{2 \cdot R \cdot \triangle} \times 100\% \qquad (2)$$

其中　△——回转误差；　R——基圆半径。

由式（2）可知，ε同R成反比。在前面提及的“双向法”（VUOSO法）测量中，基圆是由偏心e产生，而由于受到屏幕尺寸及放大比例的限制，基圆半径就不能取得太大，一般偏心量常取回转误差的4～8倍，也会引起较大的测量误差。

用软件产生基圆时，其大小除在CRT上显示时受到一定限制外（仅影响看圆图象，可缩小比例），可将基圆半径选得足够大，使偏心引起的测量误差限制在可以忽略的范围内。

对消除钢球的残留偏心目前已有多种方法，本系统是采用数字式残留偏心减去法，下面具体介绍实现方法。

钢球残留偏心在信号中是一次分量，在每转中可用下式表示

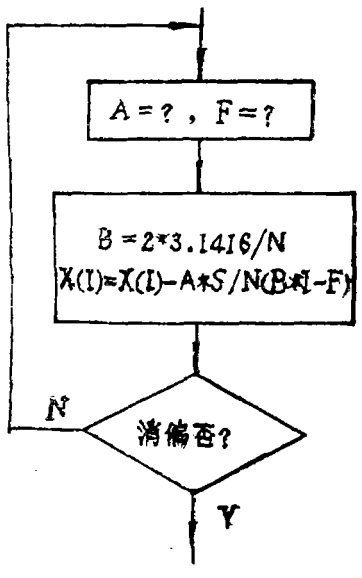
$$X_{偏}(t) = A \cdot SIN(2\pi ft + F) \qquad (3)$$

式中　A——偏心量幅值；F——初相角；f＝n/60(HZ)是偏心分量的频率，（其中n——转速）。

也就是说，在回转误差信号中叠加了一个幅值为A、相对相位角为F，频率为n/60的正弦信号，对应在每个离散量中也都叠加了该正弦信号一个相应离散量。在钢球一次安装调整好后，所测得信号中的$X_{偏}(t)$的幅值A为定值，初相角φ值由于每次采样时起点不同，φ值相对采样后的信号也不同，但总在0～2π之间。在作消偏处理时可用人机对话形式来试凑A值和φ，将每个离散的数字信号依次减去相对应的离散的$X_{偏}(t)$值，离散的$X_{偏}(t)$为

$$X_{偏}(I) = A \cdot SIN\ (2\pi I/N + F) \qquad (4)$$

式中　I——0，1，2，3，……，N－1；N——一转中离散点数。



相减后得到的离散数字信号则为已消除了残余偏心的信号。在试凑过程中可通过屏幕观察信号曲线图形来控制，一般只需试凑3～5次则可得到较满意的结果。这种方法简单易行，不需增添任何装置，因机床主轴本身运动产生的一次分量是随机的，一般与偏心不可能每次同相，所以消偏后对机床本身运动产生的一次分量给予保留，消偏程序框图见图五。

图五　消偏程序框图

中国知网 https://www.cnki.net

3、回转误差的价评

回转误差的评价在主轴回转精度测试中是一个关键内容。在回转误差评定中，一般都是对误差圆图象进行的圆度误差评定，圆度误差的大小就反映了回转误差大小。圆度误差评定有多种方法，在本系统中采用了最小二乘圈法(LSC法)，最大内接圆法（MIC法），最小外接圆法(MCC法)等几种评价方法。LSC法从误差理论的角度看，评定基准最合理和最可信赖，此法突出的优点是：不仅回转误差的数值是唯一的，而且中心位置也是唯一的，评定结果不易受个别大误差的影响，能反映整个实际轮廓的综合情况，更符合对另件的功能要求，而且计算相对比其它几种方法简单。MIC法相当于用一只精密塞规去密配孔，所以一般适用于回转刀具类机床主轴回转误差的评价。MCC法相当于用一只精密环规去密配轴，所以一般适用于回转工件类机床主轴回转误差的评价。这几种方法可根据不同的机床在实验中选用。

回转误差评定问题在没有使用计算机的情况下，一般很难进行定量计算，在使用计算机后，这个问题就变得易如反掌，在本系统中用BASIC语言编制了上述几种方法的计算程序，用LSC法评价时，圆图象一转离散成120个点，不到半分钟即可计算出最小二乘圆半径、圆心坐标和回转误差。然而在回转误差评定中，只有最小二乘圆法能用数字公式计算，其它方法均无法用一个或几个简单的公式来描述，为此我们根据优化的原理，用寻优的方法来找出符合MIC法和MCC法的评价结果。

4、显示和打印

在实验过程中，一般都希望能够直接观察到测试信号曲线，误差圆图象等，因此除用示波器直接观察监视DWY—3输出波形外，还在软件中安排了显示绘图程序，可以在计算机屏幕上直接显示出采样下来的曲线波形情况、误差圆图象、几种评价圆与误差圆图象的关系以及几种评价圆的圆心坐标和回转误差值，以便直接观察各程序块执行后的结果，了解程序运行情况。在屏幕上显示的内容均可用打印机打印下来。（参见图六、七、八）

5、频谱分析

在分析回转误差源的时候，常需对误差信号进行频谱分析，在系统软件中考虑到了这种需要，可以对测得的信号进行FFT分析，得到被测信号的频谱，并也可显示打印频谱图。

四、测试实验结果

系统通过联机调试并标定后，在CA6140车床上进行了多次测试实验，下面就是实验结果举例。测试条件：

主轴转速：1120转/分，　　采样频率：5kHZ。

评价方法：（1）最小二乘圆法（LSC法），见图七。

（2）最大内接圆法（MIC法）。

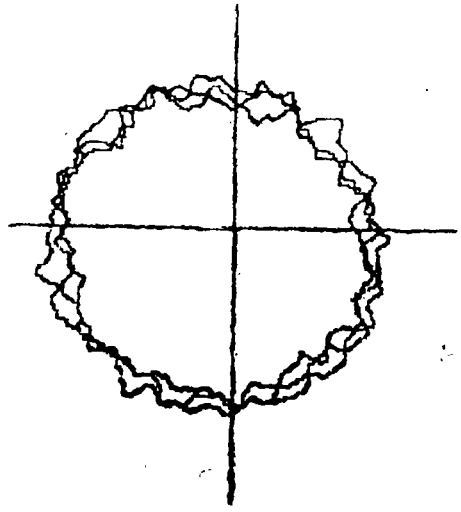
（3）最小外接圆法（MCC法）。

频谱图见图八。

从评价结果来看几种方法的评价结果比较接近，（实际上几种评价结果不可能相同）评价结果也符合判定的判断准则，即对MCC法，最小外接圆符合“(1)评价圆和最外凸的三点相接，这三点构成锐角（或直角）三角形(2)和最外凸的两点相接构成直径”中之一项。从测

中国知网 https://www.cnki.net

试实验情况来看，系统工作稳定，重复性好，完全能满足教学实验的要求。在机制八六届学生毕业设计中已应用本系统进行实验，效果良好。本系统在实验过程中从采样到计算结果各个步骤都可在CRT上直接观察到图象的变化情况，还可根据需要对几种评价结果进行对比，对学生理解和掌握机床主轴回转精度的测试有较大的帮助。本系统也可用于检验或科研。



图六　　误差圆图象（三圈）

THIS IS LSC

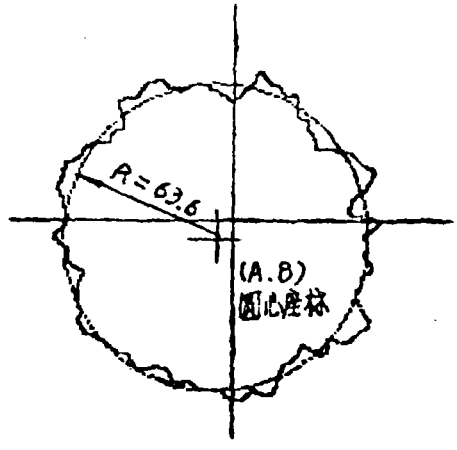
DATA FILT NAME IS N1120

R = 65（基圆半径）

A = −1.22059586　　B = 1.39652261

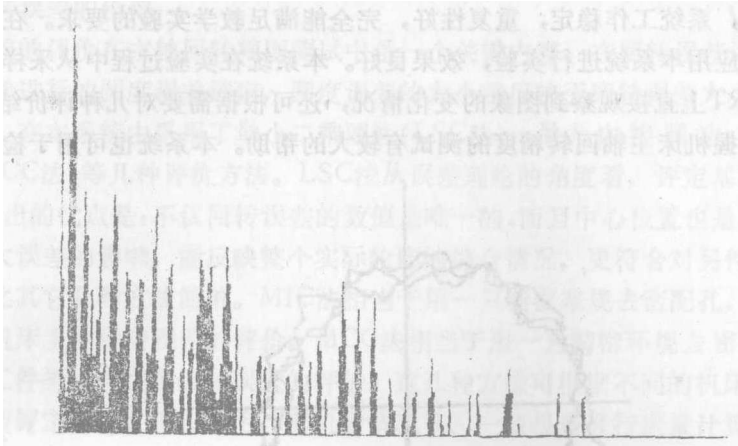
R = 63.6016347（最小二乘圆半径）

ε_r = 3.16095917（回转误差μM）



图七　　最小二乘圆法评价结果

中国知网 https://www.cnki.net



图八　频谱图

五、小　结

1、本系统采用微机与通用仪器配合，利用软件，通过“人机对话”控制测试实验过程，系统组合、使用方便，一般实验室均可利用现有条件开设“机床主轴回转精度测试”实验。

2、系统功能较多，并解决了用VUOSO法做回转精度实验时难以解决的问题。实验过程直观，有助于学生理解和掌握回转精度测试中的基本概念和具体方法。

3、系统工作稳定，重复性好，并可根据需要自编软件开发扩充功能，可用于其它教学实验如振动测试、噪声测试以及静态测量中的圆度评价等，对没有频谱分析仪的实验室还可用它作简单的频谱分析，若通过精密标定，还可用于科学研究和工厂检验。

4、微机与通用仪器配合使用，使仪器智能化，从而扩展了通用仪器的功能和使用范围，提高了精度，是实验室仪器发展的一个方向。

陈伯涛同志也参加了本系统的研制工作。

主要参考资料

〔1〕黄长艺　卢文祥编　《机械制造中的测试技术》　机械工业出版社　1981年
〔2〕《APPLE—Ⅱ使用手册》
〔3〕《机床精度与测试》　上海科技出版社　1979年
〔4〕黄伯文等　《高精度车床主轴回转误差运动数字测量法》　振动与动态测试　1983年5、6期
〔5〕周龙声编　《机床精度检测》　机械工业出版社　1982年
〔6〕俞长高　蒋锡藩主编　《机械制造中的计算机辅助设计》　机械工业出版社　1982年

中国知网　https://www.cnki.net