

# 高精度齿轮分度误差及 齿轮装置传动误差的测量

王 慧 娥

本文着重介绍齿轮分度误差和齿轮装置传动误差的测量。其中有磨齿机分齿盘齿距误差的测量、齿轮周节累积误差的测量、齿轮装置传动误差的测量。选择测量方案和设计测试装置,都以满足精度指标为基础。因此使齿轮的加工和齿轮装置的传动精度都有了可靠的保证。同时长期的使用也证明,研制的齿轮与齿轮装置的精度一直可靠。

## 一、磨齿机分齿盘齿距误差的测量

根据齿轮传动装置设计的要求,采用直齿圆柱齿轮。模数  $m = 2.25$ ,

齿数  $Z = 120$ ,

压力角  $\alpha = 20^\circ$ ,

齿轮的宽度  $B = 16$ ,

齿轮的精度,周节累积误差  $F_p = 6''$ ,

周节极限偏差  $F_{p_i} = 3''$ 。

用国产 y7431 型磨齿机磨制这种高精度齿轮是困难的。因为这种机床的分度系统包括轴系和分齿盘,原机床的主轴是滑动轴承,主轴的回转误差为 2 微米,机床出厂时配带的分齿盘,其齿距误差在  $15'' \sim 30''$  之间,显然用这样的轴系和分齿盘加工齿轮,精度是不能满足要求的,因此必须精化轴系和分齿盘。

主轴经改装为密排滚珠轴承后,精度能达到 1 微米以内。分齿盘的精化有两种方法:一种是将分齿盘从机床上取下来,用高精度的测角设备边测边修,达到精度后再把分齿盘装在机床上。但是这种研修方法,由于分齿盘的重新安装会带来安装误差,较难保证研修的精度。另一种方法是在机床上测

量分齿盘的精度,根据测量的数据进行研修,研修到精度后就可以弯齿。分析了磨齿机的工作特点,认为后者是按机床工作状态进行测量和研修的,容易保证分齿盘工作时的分度精度,所以采用后一种方法。

按齿轮的精度要求,分配给分齿盘齿距误差的公差  $\Delta_{分} = 3''$ ,根据零件的公差,就可确定检验分齿盘测量方法的极限误差,通常把测量方法的极限误差和被测零件的公差,两者的比例数称为精度系数即:

$$A = \frac{\text{测量方法的极限误差}(\Delta_{lim})}{\text{被测工件的公差}} \dots\dots(1)$$

对于高精度的零件 A 可取  $\frac{1}{3} \sim \frac{1}{2}$ 。测量分齿盘的齿距误差,当取  $A = \frac{1}{2}$  时,则用公式(1)计算测量方法的极限误差:

$$\Delta_{lim} = \frac{1}{2} \times 3'' = 1.5'' (\text{角秒})$$

因此必须按  $1.5''$  的精度指标,选择测量方法和设计测试装置。

对于直接在机床上测量分齿盘的方法,利用现有的高精度测角仪器很不方便,如 T<sub>1</sub> 经纬仪,虽然仪器的测角精度能满足要求,但是由于仪器的体积大、重量重、不能卧着装在主轴上,所以无法使用。又如利用 12 面或 36 面多面体进行全组合测量,精度也能满足

要求，由于多面体的面少，若测量 120 牙的分齿盘就要多次转位，不能直接测出每个牙的误差，所以也不适用。为了解决能在机床上直接测量分齿盘的精度，我们自行设计了一套专用的测量装置，其外形如图 1 所示。

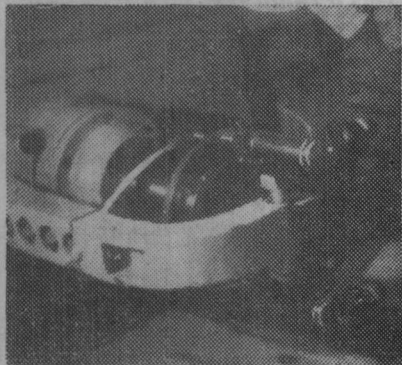


图 1 分齿盘测量装置

### 1. 测量方法和原理

这套测试装置的测量原理，是比较分齿盘实际转角与标准的理论转角之差。

将分齿盘 2 与光学度盘 4 共同装在机床主轴 3 上，以光学度盘做为标准的角度。测量时先将定位爪 1 插入分齿盘 2 的齿槽内，然后用高放大倍数的读数显微镜 5 瞄准光学度盘的  $0^\circ$  和  $180^\circ$  的刻线，记下显微镜测微鼓的读数，然后拔出定位爪 1，转动主轴再将定位爪 1 插入相邻的齿槽内，此时光学度盘已转到  $3^\circ$  和  $183^\circ$  的位置，再用两个显微镜瞄准度盘上的刻线，读取测微鼓的读数，前后两次测微鼓读数之差即为分齿盘一个齿的角距偏差。顺次测量一周，取最大和最小偏差之和即为分齿盘的齿距累积误差。

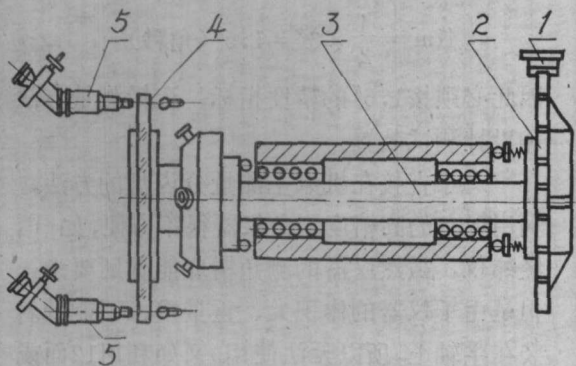


图 2 分齿盘测量原理简图

### 2. 测量方法的极限误差

对测量精度有影响的因素如下：

(1) 度盘的刻线误差  $\Delta_1 = \pm 0.5''$ 。

(刻线的直径误差)

(2) 读数显微镜分划板标线，对度盘刻线的瞄准误差，根据读数显微镜的测量原理，瞄准误差：

$$\Delta_2 = \theta''_{\text{仪}} = \frac{\theta''_{\text{眼}} \times 250}{\beta_{\text{总}} \times D/2} = 0.07''$$

D——度盘刻划直径。

$\theta''_{\text{眼}}$  为双刻线瞄准时，人眼瞄准经验数值  $\theta''_{\text{眼}} = 10''$

$\beta_{\text{总}}$  是读数显微镜总的放大倍数， $\beta_{\text{总}} = \beta_{\text{物}} \times \beta_{\text{目}}$  当  $\beta_{\text{物}} = 20x$ ， $\beta_{\text{目}} = 16.6x$ ，则总的放大倍数  $\beta_{\text{总}} = 332x$ 。

(3) 主轴轴系晃动的实测值

$$\Delta_3 = 0.2\mu_0$$

换算成角值  $\Delta_3 = 0.3''$ 。

(4) 测微鼓格线的估读误差通常取

$$\Delta_4 = \frac{1}{5}a, \text{ 其中: } a$$

表示测微鼓每格所代表的角值，a 值的计算公式如下：

$$a = \frac{S}{n \times \beta \times D \times 0.002424} \dots\dots (2)$$

(2) 式中

a——测微鼓每小格所代表的角值；

S——测微鼓每转一周的螺距，现在

$$S = 0.45\text{mm};$$

n——测微鼓一圈总的格数  $n = 50$ ；

$\beta$ ——物镜的放大倍数  $\beta = 20x$ ；

D——度盘的刻划中径， $D = 210\text{mm}$ 。

0.002424 为线值换算角值的换算单位，

根据计算可得：

$$a = 0.88'', \text{ 所以 } \Delta_4 = \frac{0.8''}{5} = 0.176''$$

上述各项误差都是随机的，独立出现的，因此可用这些误差计算测量方法的极限误差。

$$\begin{aligned} \Delta_{\text{极}} &= \pm \sqrt{\Delta_1^2 + \Delta_2^2 + \Delta_3^2 + \Delta_4^2} \\ &= \pm \sqrt{(0.5'')^2 + (0.07'')^2 + (0.3'')^2 + (0.176'')^2} \\ &= \pm 0.61'' \end{aligned}$$

所以计算的测量方法极限误差为  $\pm 0.61'$  在  $1'.5$  内。

为了提高分齿盘齿距误差的测量精度，可采用多次测量的方法。如图 3 所示，是研

修完的 120 牙的分齿盘齿距误差曲线，这条曲线是在等精度的条件下，测量六次取每齿六次的平均值，按平均值绘制的误差曲线。分齿盘齿距累积误差  $F_p = 2.7'$ 。

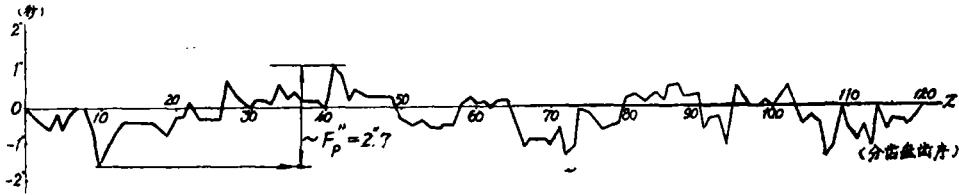


图 3 研修后的分齿盘齿距误差曲线

## 二、齿轮周节累积误差及极限偏差的测量

对于周节累积误差为  $6'$ ，周节极限偏差为  $3'$  的齿轮，用一般的齿轮测量仪器已不能满足精度要求，为此采用了一套组合的测量装置。包括一、二等大地测量用的 OT—02 经纬仪，平行光管，回转工作台及齿轮定位机构。测量装置的外形如图 4

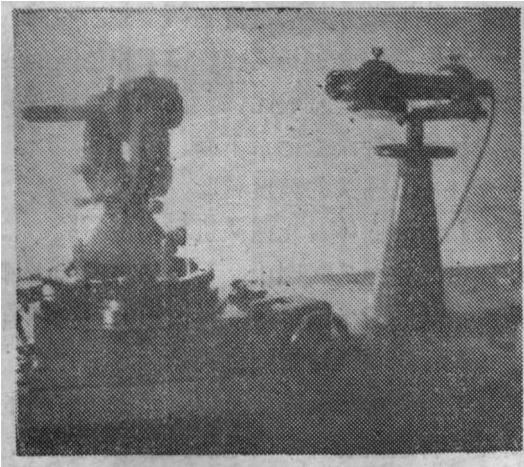


图 4 齿轮测量装置

这套装置测量齿轮分度误差，对测量精度有影响的因素包括：经纬仪水平度盘的刻线误差  $\Delta_1$ ，望远镜瞄准标线的对准误差  $\Delta_2$ ，利用测微器读数时，水平度盘分格线的符合误差  $\Delta_3$ ，齿轮与回转台的安装偏心误差  $\Delta_4$ ，定位装置的千分表对“0”位的误差  $\Delta_5$ 。其他如照明，振动等也会对测量产生

影响，但是可采取措施减少其影响。

OT—02 经纬仪，按技术指标，水平角的测量精度可达  $\pm 1.5'$ 。为了提高测角精度，又对水平度盘的刻线误差  $\Delta_1$  进行了检验。采用 C. B. 耶利谢也夫方法 (С. В. Елисеv) 按一、二等三角测量和方位角测量仪器鉴定规程规定，要求每隔  $3^\circ$  检验水平度盘的直径误差。而现在所测量的齿轮齿数  $Z = 120$ ，也是每个齿距为  $3^\circ$ ，因此检验水平度盘的直径误差，正好是检验测量齿轮时使用的度盘角度。

C. B. 耶利谢也夫法，检验水平度盘直径误差，需要观测三个固定角： $36^\circ$ 、 $45^\circ$  和  $60^\circ$ 。假如第一个固定角是  $36^\circ$ ，它的最或是值是  $C_1$ ，用这个固定角依次和度盘上的  $0^\circ \sim 36^\circ$ ； $36^\circ \sim 72^\circ$ ； $72^\circ \sim 108^\circ$ ； $108^\circ \sim 144^\circ$ ； $144^\circ \sim 180^\circ$  各分划线进行比较。由于测定的是直径误差，所以比较至  $180^\circ$  分划线为止，把它叫做第一系列，然后建立起观测方程式。应用同样的方法，对第二个固定角  $45^\circ$  也依次和度盘上的  $0^\circ \sim 45^\circ$ ； $45^\circ \sim 90^\circ$ ； $90^\circ \sim 135^\circ$ ； $135^\circ \sim 180^\circ$  进行比较，第三个固定角  $60^\circ$ ，依次和度盘上的  $0^\circ \sim 60^\circ$ ； $60^\circ \sim 120^\circ$ ； $120^\circ \sim 180^\circ$  进行比较建立第二个系列，第三个系列的观测方程式，用对称联系法可以得出计算公式，具体的计算方程式可参考资料 [1]。根据计算的结果可求出水平度盘每隔  $3^\circ$  的直径误差，误差曲线如图 5 所示。由曲线可得度盘的最大直径误差为  $+0.9'$ ，现取  $\Delta_1 = 0.9'$ 。

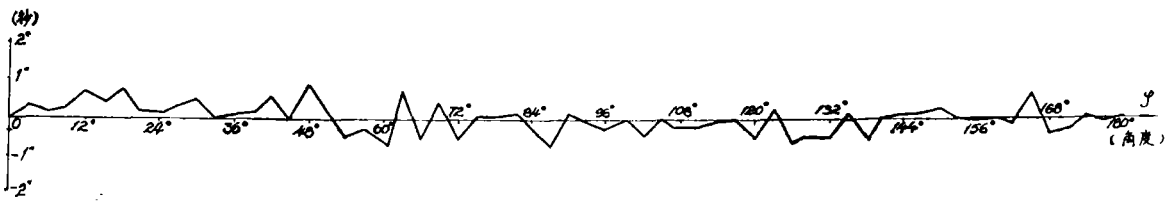


图5 水平度盘的直径误差曲线

其次望远镜瞄准平行光管分划板标线, 根据等精度条件下10次瞄准试验对准误差  $\Delta_2 = 0.2''$ 。齿轮装在回转工作台上, 与回转台轴线的安装偏心误差  $\Delta_3 = 0.75''$ 。水平

度盘读数分格线的符合误差  $\Delta_4 = 0.3''$ 。定位机构的千分表对准“0”位的误差  $\Delta_5 = 0.2''$ 。用这套组合装置测量齿轮时, 总的测量极限误差如下:

$$\begin{aligned} \Delta_{\text{总}} &= \pm \sqrt{\Delta_1^2 + \Delta_2^2 + \Delta_3^2 + \Delta_4^2 + \Delta_5^2} \\ &= \pm \sqrt{(0.9'')^2 + (0.2'')^2 + (0.75'')^2 + (0.3'')^2 + (0.2'')^2} \\ &= \pm 1.24'' \end{aligned}$$

因此测量周节累积误差为  $6''$  的齿轮, 测量精度还是能满足要求的, 而测量周节极限偏差, 这套装置的精度就低了, 但是可采用多次测量的方法来提高测量精度。

光栅头1、2分别通过连接轴3、4与齿轮装置的主动轴和从动轴相联。两个光栅头的光栅盘刻线数均为21600条线, 工作时一块随轴转动的光栅盘, 对另一块静止的指示光栅相对转动形成莫尔条纹。当齿轮付存在误差时, 就引起回转轴转动的不均匀, 从而使莫尔条纹产生变化, 通过光电转换元件, 将其转换成与回转角成比例的电信号。信号经过放大、整形、分频后就得到两个频率相同的讯号, 两路信号进行比相, 由于相位差的变化与齿轮转角误差成比例, 因此通过滤波网络就可把各种误差记录下来。

### 三、齿轮装置传动误差的测量

齿轮装置的传动精度为  $12''$ , 对于高精度的齿轮箱测量传动误差有两种方法, 静态法和动态法。静态法能保证高的测量精度, 但是不能连续测量, 效率低。动态法能实现连续测量, 效率高。

#### 1. 动态法的测量原理及装置

齿轮装置传动精度的动态测量, 其实质就在于连续的比较齿轮付实际的转角与理论转角之差。为此专门设计了一套测量装置, 该装置是由光栅头1、2, 连接轴3、4、相位计5和记录仪6组成, 测量装置简图如图6。

#### 2. 光栅头的精度检验

利用36面体对光栅头进行精度检验, 检验的方法见图7、图中, 1为待检验的光栅头, 2是36面多面体, 4是读数  $0.2''$  的准直平行光管, 3为带微调机构的回转工作台, 5是电子管繁用表, 6是固定光栅头外壳的支柱, 将这些装置牢固地装为基础平台7上, 测量时, 通过导线将光栅头中光电转换的电压信号, 输入电子管繁用表。以光栅盘任一位置为测量起点, 使繁用表的指针对准“0”位。此时使准直光管也对准多面体的一个面, 并调整多面体, 使准直光管分划板的十字线与反射的像重合, 记下测微鼓的读数, 然后转动圆工作台, 直至多面体的下一个镜面进入视场, 微调圆工作台使繁用表指针对

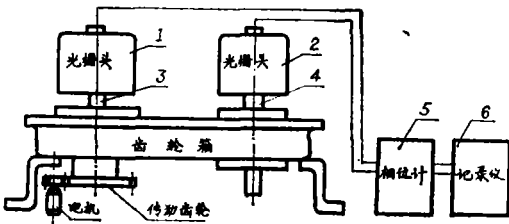


图6 光栅式测量装置简图

“0”位，若光栅头的分度无误差，此时准直光管的分划板十字线与反射回来的像一定重合，若有误差则不重合。误差的数值可由测微鼓读出，此误差就是光栅头分度  $10^\circ$  的角度误差，顺次测量一周，取其中最大的角度

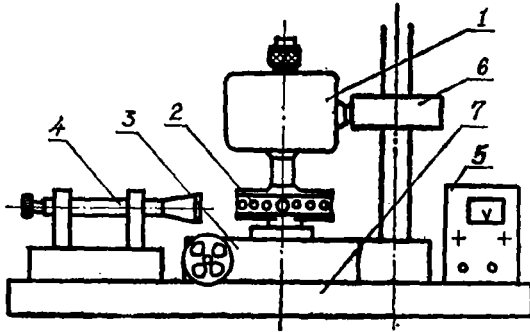


图7 光栅头精度检验简图

$$\begin{aligned} \Delta_{\text{总}} &= \pm \sqrt{\Delta_{\text{光}}^2 + \Delta_{\text{轴}}^2 + \Delta_{\text{电}_1}^2 + \Delta_{\text{电}_2}^2} \\ &= \pm \sqrt{(1.3)^2 + (1.5)^2 + (1.5)^2 + (0.5)^2} \\ &= \pm 2.54\mu \end{aligned}$$

在齿轮节圆处将线值换算成角值， $\Delta_{\text{总}} = \pm 3.88''$ 。由于齿轮装置的传动精度为  $12''$ ，所以测量方法的精度系数可取  $\Lambda = \frac{1}{3} \sim \frac{1}{2}$ 。现验算精度系数

$$\Lambda = \frac{3.88''}{12''} \approx \frac{1}{3}$$

误差做为光栅头分度误差。经检验光栅头的分度误差：

$$\Delta_{\text{光}} = \pm 2''$$

### 3. 齿轮装置的精度测试

研制的光栅测试装置，总的测量极限误差估算如下：

光栅头的最大分度误差  $\Delta_{\text{光}} = \pm 2''$ （角值换算成线值）  
 $\Delta_{\text{光}} = \pm 1.3\mu$ 。

连接轴的径向跳动  $\Delta_{\text{轴}} = 1.5\mu$ 。

电子仪器的误差  $\Delta_{\text{电}_1} = 1.5\mu$ 。

电器部分不稳定性误差  $\Delta_{\text{电}_2} = 0.5\mu$ 。

（电子仪器是指北量的相位计和中原量仪厂的记录仪）

总的测量极限误差

根据计算认为这套测试装置的精度还是能满足精度要求的。图8是这套装置测量2#齿轮箱的传动误差曲线。

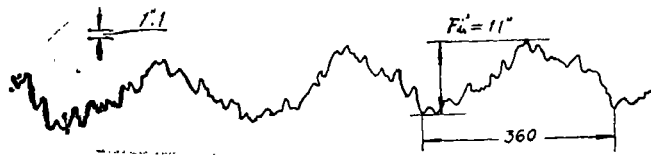


图8. 2# 齿轮箱的传动误差曲线

为了验证测试装置测量精度的可靠性，又用静态法对2#箱的传动精度进行了测试。测得的传动误差  $F_i' = 9.5''$ 。静测比动测值偏高的原因，在于静测法是间接测量，不能把每个角度的误差均反映出来。

## 结 语

研制高精度齿轮，用 Y7431 型磨齿机，

在主轴安装齿轮的位置上，装块精密的光学度盘用来测量分齿盘的齿距误差，由于测量分齿盘的齿距，完全是模拟齿轮加工时的分度过程，所以测出的分度误差能反映出齿轮加工时的分度精度。这种测量方法是属于主动测量，积极测量，因此为高精度的齿轮加工提供了可靠的精度基础。

高精度齿轮装置的传动误差，最佳的测试方法是动态测试，因为它能连续、迅速和

真实地反映齿轮装置的传动误差，这对了解  
齿轮装置的装配质量及使用质量尤为重要。

### 参 考 资 料

1. 全能经纬仪 T4 的检验与应用

夏坚白等编著 中国工业出版社 1965年

2. 高精度轴角数据传递齿轮装置

薛培中 光学机械本刊

