

【文章编号】 1004-1540(2008)02-0129-04

# 显微放大率测量方法的不确定度分析

贾晓航

(国家食品药品监督管理局 杭州医疗器械检验中心, 浙江 杭州 310009)

**【摘要】** 确定现行光学仪器目视显微放大率测量方法的准确限度, 可通过建立目视显微放大率测量方法的误差链, 找出误差源, 根据误差源属性进行 A 类或 B 类不确定度分析, 从而得出目视显微放大率测量方法合成的扩展不确定度可以达到  $U_{90}=0.4\%$ 。现行光学仪器目视显微放大率测量方法, 可以满足 1.2% 允差要求的检验; 按 2 次检测合并要求, 可以满足 1.7% 允差要求的检验。

**【关键词】** 学测量; 显微放大率; 不确定度

**【中图分类号】** TH742

**【文献标识码】** A

## Analysis of uncertainty of measurement method for visual micromagnification

JIA Xiao-hang

(Medical Supervising and Testing Center of Hangzhou, State Food and Drug Administration, Hangzhou 310009, China)

**Abstract:** To determine the accuracy limits of the current method for optical instruments' visual micromagnification, the error chain of the measurement method for instruments' visual micromagnification was established to find the error sources and to analyze the type A or type B uncertainty according to the characteristic of error sources. The combined extended uncertainty of the measurement method for visual micromagnification could achieve  $U_{90}=0.4\%$ . The current method for optical instruments' visual micromagnification can achieve the accurate requirement of magnification measurement whose tolerance limit is 1.2%. It can achieve the accurate requirement of measurement whose tolerance limit is 1.7% when combining the margin value of the results of twice measurements.

**Key words:** optical measurement; micromagnification; uncertainty

## 1 原理和方法

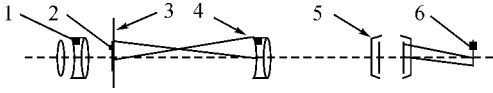
### 1.1 原理

目视显微放大率在现行的光学仪器标准中采用如图 1 所示测量光路, 其测量方程式如下:

$$\Gamma = 250 h / (H \cdot f_0) \quad (1)$$

式(1)中:  $\Gamma$ —显微放大率, (x);  $h$ —标尺像高, (mm);  $H$ —标尺高, (mm);  $f_0$ —测量物镜焦距, (mm)。

测量不确定度的分析, 根据不确定度传播律建立合成标准不确定度方程<sup>[1]</sup>。按各变量独立不相关



1—目镜;2—标尺像;3—分划板;4—测量物镜;5—被测设备光组;6—标尺

图1 显微放大率测量光路图

Figure 1 The optical path of microscope magnification measurement

考虑,协方差为零状态,合成标准不确定度方程<sup>[2]</sup>:

$$u_c = (\sum(\delta f(x_i)/\delta x_i)^2(u_{x_i})^2)^{1/2}.$$

若令  $f(x_i) = f(H, h, f_0) = 250h/(H \cdot f_0)$ , 则式(1)的合成标准不确定度公式为:

$$u_c = [(250h/H^2/f_0)^2 u_H^2 + (250/H/f_0)^2 u_h^2 + (250h/H/f_0^2)^2 u_{f_0}^2]^{1/2}$$

即:  $u_c = [(\Gamma/H)^2 u_H^2 + (\Gamma/h)^2 u_h^2 + (\Gamma/f_0)^2 u_{f_0}^2]^{1/2}$

或以相对不确定度表示,合成相对标准不确定度公式可改写为:

$$u_c/\Gamma = [(u_H/H)^2 + (u_h/h)^2 + (u_{f_0}/f_0)^2]^{1/2} \quad (2)$$

## 1.2 方法

1.2.1 工具和测量规定 不确定度分析中,采用工具的参数为:测量望远镜——转鼓直读式,最小格值(最小分度)0.01 mm;物镜焦距  $f_0$  80.815 mm,相对孔径  $D/f$  1/4;目镜分划板为双丝夹缝瞄准方式;目镜放大率  $\Gamma \geq 15x$ . 标尺直读最小格值0.10 mm.

测量规定为:目视检查保证测量望远镜与被测设备光轴平行;放置标尺时应目视检查保证标尺与被测设备光轴垂直;标尺对准时,目视通过测量望远镜目镜左右移位检查标尺像与分划板双丝的像面重合性,两像应无移位现象;测量望远镜转鼓应单向旋转对准,以消除空回;测微目镜读取标尺像时取值转鼓不少于1圈(1圈读数1 mm);测量环境:在空气中测量,环境温度要求:  $23^\circ\text{C} \pm 5^\circ\text{C}$ .

1.2.2 误差链和误差源分析 对式(2)的标准不确定度分量  $u_H$ 、 $u_h$ 、 $u_{f_0}$  分别分析误差源<sup>[3]</sup>以建立误差链.

a)  $u_H$  主要产生因素为标尺的制造误差产生,包括:刻划误差导致的不确定度  $u_{H11}$ ,和刻划积累误差导致的不确定度  $u_{H12}$ ;测量环境变化(热胀冷缩和变形)导致的不确定度  $u_{H2}$ ;标尺放置不垂轴的随机效应导致的不确定度  $u_{H3}$ .

$u_H$  的相对标准不确定度分量表述如下:

$$u_H/H = [(u_{H11}/H)^2 + (u_{H12}/H)^2 + (u_{H2}/H)^2 + (u_{H3}/H)^2]^{1/2} \quad (3)$$

b)  $u_h$  主要由下列因素产生:测微目镜转鼓刻划误差和刻划积累误差导致的不确定度  $u_{h11}$ 、 $u_{h12}$ ;测微目镜转鼓及导轨空隙与导轨不直度导致的不确定度  $u_{h2}$ ;测量环境变化(热胀冷缩和变形)导致的不确定度  $u_{h3}$ ;双丝夹缝瞄准误差和手调灵敏度的随机效应导致的不确定度  $u_{h4}$ ;测微目镜转鼓估读误差导致的不确定度  $u_{h5}$ ;测微目镜分划板双丝与标尺像不平行的随机效应导致的不确定度  $u_{h6}$ ;测量望远镜对焦不确定引起的随机效应导致的不确定度  $u_{h7}$ .

$u_h$  的相对标准不确定度分量表述如下:

$$u_h/h = [(u_{h11}/h)^2 + (u_{h12}/h)^2 + (u_{h2}/h)^2 + (u_{h3}/h)^2 + (u_{h4}/h)^2 + (u_{h5}/h)^2 + (u_{h6}/h)^2 + (u_{h7}/h)^2]^{1/2} \quad (4)$$

c)  $u_{f_0}$  主要由下列因素产生:物镜焦距测量误差导致系统效应的不确定度  $u_{f_01}$ ;物镜装配偏焦(包含调校用光具座不确定度引入、人眼分辨率引了及像差导致的)系统效应的不确定度  $u_{f_02}$ .

$u_{f_0}$  的相对标准不确定度分量表述如下:

$$u_{f_0}/f_0 = [(u_{f_01}/f_0)^2 + (u_{f_02}/f_0)^2]^{1/2} \quad (5)$$

1.2.3 误差源贡献分析 由式(2)中可知,合成相对标准不确定度的各分量:  $u_H/H$ 、 $u_h/h$ 、 $u_{f_0}/f_0$  权重一致,因此各分量的误差贡献可以直接比较.

a)  $u_H$  源分析:

在式(3)中,各分量权重一致.其中,

— $u_{H11}$ 、 $u_{H12}$ :考虑到标尺作为标准器,  $u_{H11}$ 、 $u_{H12}$  其不确定度传递应可控制在微级水平;

— $u_{H2}$ :标尺采用玻璃材料制作,具有较高温度稳定,可忽略;

— $u_{H3}$ :一般经验操作,可控制在  $\pm 5^\circ$ ,转换至横向尺度,最大相对偏差  $\Delta H/H = -(\cos 5^\circ - 1)H/H \approx -0.0038$ .

因此分量  $u_H$  的主要贡献是  $u_{H3}$ ,具随机效应.式(3)可改为:

$$u_H/H = u_{H3}/H \quad (6)$$

b)  $u_h$  源分析:

在式(4)中,各分量权重一致.其中,

— $u_{h11}$ 、 $u_{h12}$ 、 $u_{h2}$ 、 $u_{h3}$ :该四个分量由测微目镜产生,测微目镜由专业制造商设计和制作控制,应

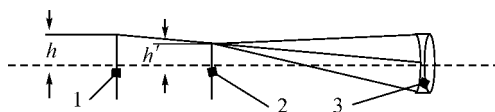
认为能满足使用,而不影响估读和瞄准的准确度,可不考虑;

$u_{h4}$ —双丝夹缝瞄准与手调灵敏度是联系在一起的两因素,双丝夹缝瞄准的最大允许误差经验值为: $5''^{[4]}$ ,转换至横向尺度,最大绝对偏差  $\Delta h/h = \pm f_e \cdot \tan(5'') = 250/\Gamma_e \cdot \tan(5'') = (\pm)2.42E(-5)\text{mm}$ ,可忽略,而手调灵敏度的最大允许误差一般由人手调灵敏度确定,人手调灵敏度为  $0.5^\circ \sim 1^\circ$  转角,取  $1^\circ$  评估,转鼓一圈 100 分划,最小格值为  $0.01\text{ mm}$  横向尺度,即  $0.01\text{ mm}$  横向尺度对应  $3.6^\circ$ ,则  $1^\circ$  转角转换至横向尺度  $\Delta h = 0.01/3.6 \approx 0.003\text{ mm}$ ,对应手调灵敏度的最大允许误差是  $\pm 0.003/2\text{ mm}$ ,即分量  $u_{h4}$  的最大偏差  $\pm 0.003/2\text{ mm}$ ,具随机效应;

— $u_{h5}$ :测微目镜转鼓估读最大允许误差为  $1/2$  最小格值,即  $u_{h5}$  的最大偏差  $\pm 0.005/2\text{ mm}$ ,具随机效应;

— $u_{h6}$ :分划板双丝与标尺像不平行根据人眼灵敏度可控制在  $\pm 0.5^\circ$ ,转换至横向尺度  $\Delta h = -(\cos 0.5^\circ - 1)h = -3.808E(-5)h$ ,可忽略;

— $u_{h7}$ :测量望远镜对焦的不确定,如图 2 示.



1—分划板;2—标尺像;3—测量物镜

图 2 测量离焦示意图

Figure 2 The measurement of deviation from focus

图 2 中当标尺像与分划板面的分离距在焦深内,则标尺像与分划板面的不重合不可辨,导致对焦的不确定.由于测微目镜的分划板是透明的,所测的标尺像不在分划板上.因此产生  $dh = h' - h$ .对焦的不确定导致被测设备离焦,主要由弥散斑的不可辨及标尺对焦位移灵敏度引起.若对焦位移灵敏度用微米级位移器调节,可不考虑.主要讨论弥散斑的不可辨.弥散斑由测量望远物镜、目镜的衍射限和像差<sup>[5]</sup>,以及人眼灵敏度限三者中最大值确定.而设计要求目镜的相对口径大于物镜的相对口径,且焦深及像差因素按标准器要求,应包含在瞄准误差里,可不考虑.测量望远物镜的衍射限  $= 1.22\lambda/(D/f_0) = 1.22 \times 0.555E$

$(-3)/(1/4) = 0.00046\text{ mm}$  很小,物镜像差按  $1/4\lambda$  残留波像差设计可不考虑,重点是人眼灵敏度限因素.人眼灵敏度限因素转换至弥散斑高计算如下:已知:人眼灵敏度限  $\xi = 1'$ ,对应弥散斑高  $T_f = f_e \cdot \tan(\xi) = 0.00485\text{ mm}$ .弥散斑  $T_f$  导致的轴向离焦(焦深)  $d_f = T_f/(D/f_0) = 0.00485/(1/4) = 0.019\text{ mm}$ ,因此, $u_{h7}$  分量的最大相对偏差  $dh/h = d_f/f_0 = (\pm)0.00024$ ,可不计.

因此, $u_h$  的主要贡献是  $u_{h4}, u_{h5}$ ,具随机效应.式(4)可改写为:

$$u_h/h = [(u_{h4}/h)^2 + (u_{h5}/h)^2]^{1/2} \quad (7)$$

c) $u_{f_0}$  源分折:

在式(5)中,各分量权重一致,其中,

— $u_{f_01}$ :物镜焦距测量可选择最大相对允差小于  $0.1\%$  焦距仅测量, $u_{f_01}$  分量的最大相对偏差  $\pm 0.001$ ,具系统效应;

— $u_{f_02}$ :物镜装配偏焦包括了光具座、及如  $u_{h7}$  中人眼灵敏度限和物镜像差的综合.光具座可选择最大相对允差小于  $0.03\%$ ,其影响因素可不考虑.人眼灵敏度限和物镜像差因素如  $u_{h7}$ ,则  $u_{f_02}$  分量的最大相对偏差为  $\pm 0.00024$ ,可不计.

因此  $u_{f_0}$  分量的主要贡献是  $u_{f_01}$ ,具系统效应.式(5)可改为:

$$u_{f_0}/f_0 = u_{f_01}/f_0 \quad (8)$$

将式(6)、(7)、(8)代入式(2),可简化得:

$$u_c/\Gamma = [(u_{H3}/H)^2 + (u_h/h)^2 + (u_{f_01}/f_0)^2]^{1/2} \quad (9)$$

## 2 结果和分析

### 2.1 不确定度评定<sup>[6]</sup>

2.1.1 不确定度评定方式 对于随机效应为主的  $u_H, u_h$  可采用 A 类评定或 B 类评定. A 类评定,推荐重复独立测量不少于 7 次,实际测量次数  $n$  的实验标准差  $s_n$  作单次测量的标准不确定度,自由度  $\nu = n - 1$ .若任取  $m$  次的算术均值作期望的最佳估计.则最佳估计的实验标准差  $s_m = s_n/(m)^{1/2}$ .本次不确定度分析评定,采用 B 类评定方式.

2.1.2 各分量标准不确定度和自由度<sup>[7]</sup> 确定

a) $u_H$  分量标准不确定度和自由度

由式(6)知: $u_H/H = u_{H3}/H$ .

$u_{H3}$  分布(标尺放置)按均匀分布考虑,置信因

子  $k = (3)^{1/2}$ . 最大相对允差  $-0.003\ 8$ , 因此  $u_H$  分量相对标准不确定度  $u_{H3}/H = -0.003\ 8/2/3^{1/2} = 0.001\ 1$ , 取自由度  $\nu = 200$ , (标尺放置的最大允差  $\pm 5^\circ$  可能过分可靠);

b)  $u_h$  分量标准不确定度和自由度

由式(7)知:  $u_h/h = [(u_{h4}/h)^2 + (u_{h5}/h)^2]^{1/2}$ , 其中,

—  $u_{h4}$  分布(转鼓手调灵敏度)按均匀分布考虑, 置信因子  $k = (3)^{1/2}$ , 最大相对允差  $\pm 0.003/(2h)$ , 取  $h$  最小为  $1\ \text{mm}$ , 则  $u_{h4}$  分量相对标准不确定度:  $u_{h4}/h = 0.003/2/(3)^{1/2} = 0.000\ 9$ , 取自由度:  $\nu = 100$ ;

—  $u_{h5}$  分布(转鼓估读)按反正弦分布考虑, 置信因子  $k = (2)^{1/2}$ , 最大相对允差:  $\pm 0.005/(2h)$ , 取  $h$  最小为  $1\ \text{mm}$ , 则  $u_{h5}$  分量相对标准不确定度:  $u_{h5}/h = 0.005/2/(2)^{1/2} = 0.001\ 8$ , 自由度:  $\nu = \infty$ , ( $1/2$  估读, 可靠性极高).

因此,  $u_h$  分量相对标准不确定度可按下述得:

$$u_h/h = [(u_{h4}/h)^2 + (u_{h5}/h)^2]^{1/2} = (0.000\ 9^2 + 0.001\ 8^2)^{1/2} = 0.002\ 0.$$

有效自由度的计算可由 Welch-Satterthwaite 公式获得:

$$\nu_{\text{eff}} = \frac{u_c^4(y)}{\sum_{i=1}^N \frac{u_i^4(y)}{\nu_i}} = 0.002^4 / (0.000\ 9^4 / 100 + 0.001\ 8^4 / \infty) = 2\ 438$$

c)  $u_{f_0}$  分量标准不确定度和自由度

由式(8)知:  $u_{f_0} = u_{f_{01}}$ .

$u_{f_{01}}$  分布(测量焦距)按梯形分布考虑, 置信因子  $k = [6/(1 + \beta^2)]^{1/2}$ , ( $\beta$  为梯形上、下底比), 一般取  $\beta = 0.71$ , 则  $k = 2$ . 最大相对允差:  $\pm 0.001\ 0$ , 则  $u_{f_0}$  分量相对标准不确定度  $u_{f_{01}}/f_0 = 0.001/2 = 0.000\ 5$ , 取自由度  $\nu = 100$ .

2.1.3 合成标准不确定度计算 将  $u_{H3}/H$ 、 $u_h/h$  与  $u_{f_{01}}/f_0$  值代入式(9), 可得合成相对标准不确定度:

$$u_c/\Gamma = [(u_{H3}/H)^2 + (u_h/h)^2 + (u_{f_{01}}/f_0)^2]^{1/2} = [(0.001\ 1)^2 + (0.002\ 0)^2 + (0.000\ 5)^2]^{1/2} = 0.002\ 3$$

2.1.4 合成标准不确定度的自由度计算 有效自由度的计算可由 Welch-Satterthwaite 公式获得:

$$\nu_{\text{eff}} = \frac{u_c^4(y)}{\sum_{i=1}^N \frac{u_i^4(y)}{\nu_i}} = 0.002\ 3^4 / (0.001\ 1^4 / 200 + 0.002^4 / 2\ 438 + 0.000\ 5^4 / 100) = 1\ 928$$

2.1.5 扩展不确定度计算 合成标准不确定度的两个输入中一个为均匀分布, 一个为均匀分布与反正弦分布合成分布, 各输入贡献接近, 其总合成分布与正态分布偏离较大. 为计算方便, 按中心极限定理估计近  $t$  分布. 按 JJF 1059-1999 规范中附录 A 表查阅, 可得所需置信水平  $P$  的包含因子  $t_p$ .

非整点  $t_p$  的计算, 按下式:

$$\frac{t_p(\nu) - t_p(\nu_1)}{\nu - \nu_1} = \frac{t_p(\nu_2) - t_p(\nu_1)}{\nu_2 - \nu_1}$$

以  $P$  为  $90\%$  计, 查表计算得:  $t_{90}(1928) = 1.645$ , 包含因子  $k_{90} = t_{90}(1928) = 1.645$ , 扩展不确定度  $U_{90} = k_{90} u_c/\Gamma = 0.023(\text{mm}) = 0.003\ 8 = 0.4\%$ .

## 2.2 分析结果报告

在目视显微放大率测量方法中:  $\Gamma = (1 \pm 0.4\%) \Gamma$ ,  $\nu_{\text{eff}} > 100$ , 括号内第二该为  $U_{90}$  的值.

## 3 讨 论

注意到各不确定度分量  $u_H/H = 0.001\ 1$ 、 $u_h/h = 0.002\ 0$  与  $u_{f_0}/f_0 = 0.000\ 5$  中,  $u_h/h$  最大, 约为其它量的 2 倍. 降低  $u_h/h$  将会大幅改善总不确定度值.  $u_h/h$  中的  $u_{h4}/h$  与  $u_{h5}/h$  分别为  $0.000\ 9$  和  $0.001\ 8$ , 改进关键为  $u_{h5}/h$  (转鼓估读). 注意到转鼓估读最大相对允差为  $\pm 0.005/(2h)$ , ( $h$  为标尺像高), 显然, 在测量方法规定中, 提高  $h$  取值会直接明显改善总不确定度值, 规定测微目镜读取标尺像时取值转鼓不少于 2 圈即  $h$  取值不小于  $2\ \text{mm}$ ,  $u_{h5}/h$  将与  $u_{h4}/h$  一致, 且  $u_h/h$  值将与  $u_H/H$  值极接近. 这是改善总不确定度值最经济的  $h$  取值, 而且不会对其它任何不确定度分量产生影响, 无须增加其它任何手段, 非常方便.

改进处理: 测量方法中规定“测微目镜读取标尺像时取值转鼓不少于 2 圈”.

## 4 结 语

本测量方法按优于最小测值  $1/3$  准确度要求, (下转第 153 页)

从上面的实验结果可以看出:本逆变器并联运行电源系统可以较好地实现功率均分.不论是在线性负载时还是在非线性负载(整流性负载)时都可以保持相当好地供电质量,输出电流的波形畸变也很小,额定负载均流的相对误差小于0.5 A.可见,系统内的环流影响较小.

### 3 结 语

利用 DSP 器件提供的高速信息处理能力,结合适当的软件算法,采用改进的主从同步控制策略和按功率偏差的均流控制策略,能够较好地解决逆变器并联运行时遇到的主要问题,实现逆变器的并联运行<sup>[3]</sup>.

市场分析结果表明,本项目实现的系统电源需求非常大,但目前由于此项目技术含量高原因,国内生产基于 DSP 控制的并机电源的厂家不多.现在市场情况供大于求,经济效益是非常惊人的.采用 SPWM 高频整流来提高 UPS 输入功率因数,可以降低线路损耗,节约电能,消除火灾隐患,还可以减少对市电的谐波污染,提高市电的供

电质量,获得较大的经济效益及社会效益.

### 【参 考 文 献】

- [1] KIM J W, CHOI H S, CHO B H. A novel droop method for the converter parallel operation [J]. IEEE Transaction on Power Electronics, 2002,17(1):25-32.
- [2] 陈 坚,康 勇,林新春,等.大功率 UPS 的并联控制技术[J]. 电力电子技术,2002,4:41-44.
- [3] 王胜东,秦娟英.基于 DSP 的单相逆变器并联控制系统设计与实现[J]. 电气应用,2005(9):26-38.
- [4] BONG H K, JIN H C, TAC W K. Improved single-phase line-interactive UPS [J]. IEEE Trans on Ind Electron, 2001,48(4):804-811.
- [5] 熊日辉,肖成勇,李云峰.最小二乘支持向量机和小波电铲供电机组状态预测[J]. 中国计量学院学报,2007(1):23-25.
- [6] 余 勇,刘正之.基于相移多重化的大功率电流型并联逆变电流[J]. 电力电子技术,2005,39(1):10-12.
- [7] ZHANG F L. TMS320C2XX User's Guide [M]. USA: Texas Instruments, 1997:205-256.
- [8] 赵良炳.现代电力电子技术基础[M].北京:清华大学出版社,1995:154-162.
- [9] 周祥才.基于 LabVIEW 的功率因数数字虚拟检测仪的设计与实现[J]. 中国计量学院学报,2007(3):6-7.

(上接第 132 页)

可满足 1.2% 允差要求的检验.按 2 次检测合并要求,本测量方法可满足  $1.2\% \times 2^{1/2} = 1.7\%$  允差要求的检验.

### 【参 考 文 献】

- [1] 刘智敏.分布传播及其在不确定度中的应用[J]. 中国计量学院学报,2008(1):1-19.
- [2] 施昌彦.测量不确定度评定与表示指南[M].北京:中国计量出版社,2000:27-28.
- [3] 施玉书,朱若谷.数显仪特征部分的误差分析[J]. 中国计量学院学报,2007(2):108-113.
- [4] 李晓彤.几何光学和光学设计[M].杭州:浙江大学出版社,1996:173-174.
- [5] 李景镇.光学手册[M].西安:陕西科学技术出版社,1986:136-142.
- [6] 国家质量技术监督局. JJF 1059-1999 测量不确定度评定与表示[S].北京:中国计量出版社,1999.
- [7] 国家质量技术监督局. JJF 1001-1998 通用计量术语及定义[S].北京:中国计量出版社,1998.