

文章编号 1004-924X(2003) 04-0363-05

基于均值平移的动态测量重复性的评定方法研究

石照耀¹, 费业泰²

(1. 北京工业大学 机电学院, 北京 100022;

2. 合肥工业大学 仪器仪表学院, 安徽 合肥 230009)

摘要: 对动态测量重复性的常规评定方法进行了深入分析, 指出了其局限; 提出了评定动态测量重复性的新方法——均值平移法。理论分析对比与实际测量数据的计算都表明, 均值平移法客观地从整体上反映了动态测量重复性。同时, 对动态测量重复性与动态测量中指标量的测量重复性进行了辨析。所述方法在精密仪器验收、各种检测规程的制订和动态测量误差的处理中都有实用价值, 也适用于动态测量的再现性评定。

关键词: 动态测量; 测量重复性; 测量误差; 数据处理

中图分类号: TH744. 3 文献标识码: A

Assessing the repeatability of dynamic measurement based on mean line

SHI Zhao-yao¹, FEI Ye-tai²

(1. *Beijing University of Technology, Beijing 100022, China;*

2. *Hefei University of Technology, Hefei 230009, China*)

Abstract: The measurement repeatability is a critical specification in precision measurement. The assessment method for the repeatability of static measurement is clear and definite based on all kinds of technical codes such as ISO, GB, and so on, but the assessment method for the repeatability of dynamic measurement (RDM) is unclear and equivocal. With the equipment for dynamic measurement being employed more and more, how to assess RDM becomes a sophisticated problem. After reviewing the prevailing assessment method of RDM and identifying its limitations, the paper proposes a novel method for assessing RDM, which is based on the mean line of measurement data. The theoretic analysis of the new method and the comparison between the prevailing method and the new method are conducted. Furthermore, the examples of the computation of practical measuring data are given by means of the above mentioned methods. It is indicated, by the theoretic analysis and the computation, that new method can objectively reflect the dynamic measurement error in general. Finally, RDM and the repeatability of the characterized item in dynamic measurement are clarified. The new method is utilized to accept the new measuring instruments, and verified by measurement data. It is also applied to the assessment of measurement reproducibility.

Key words: dynamic measurement; measurement repeatability; measurement error; data processing

收稿日期: 2003-01-16; 修订日期: 2003-04-19.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(No. 59735120)

1 引言

测量重复性是仪器精度检定和测量结果评定中最常用最直观的指标。在国家计量技术规范 JJF 1001-1998《通用计量术语及定义》中,测量重复性的定义为:在相同条件下,对同一被测量进行连续多次测量所得结果之间的一致性。这里相同条件是指相同的测量程序、相同的观察者、使用相同的测量仪器、相同地点、在短时间进行重复测量。相同的条件又称为重复性条件。

对静态测量而言,测量误差的评定方法简单,并且使用者的方法基本上是一致的^[1]。但对动态测量误差的评定,目前仍处在探索阶段,缺乏统一的方法^[2]。动态测量重复性是评价动态测量精度的一个主要指标,在动态测量越来越普遍的背景下,探讨动态测量重复性的评定方法成为了一个十分迫切的问题。

2 动态测量重复性评定的一般方法

动态测量误差评定的理论基础是随机过程^[3]。动态测量重复性评定的一般方法实际上是基于初值平移的随机过程处理方法。

2.1 一般评定方法

在重复性条件下,设对被测量 $y(x)$ 进行 N 次测量,在空间轴上以同一起点为零点,在各个相等的 x 处得到测量结果序列 $y_i(x) (i = 1 \sim N)$ 。则测量结果可表示为^[4]

$$y_i(x) = y(x) + e_i(x), \quad (1)$$

其中 $x \in [0, L]$, L 为测量范围; $e_i(x)$ 为测量误差。

整个测量数据样本为

$$Y(x) = \{y_1(x), y_2(x), \dots, y_N(x)\}, \quad (2)$$

对式(2)中每一个现实 $y_i(x)$, 相对起测点 $y_i(x_1)$ 作平移处理。于是,得到新的数据样本 $Y_i(x_j)$

$$Y_i(x_j) = y_i(x_j) - y_i(x_1), \quad (3)$$

其中 $j = 1 \sim M$, M 为一个现实的采样点数;

$$Y_i(x_1) = 0$$

以式(3)为基础,可获得表征动态测量重复性的指标:极差或标准差。

(1) 极差

①计算每一个位置 x_j 的极差

$$w(x_j) = \max_{i=1}^N Y_i(x_j) - \min_{i=1}^N Y_i(x_j), \quad (4)$$

显然, $w(x_1) = 0$

②计算重复性

取测量范围内被测点中的最大极差作为整个动态测量的重复性评定结果。

$$w = \max_{j=1}^M [w(x_j)], \quad (5)$$

在动态测量中,为考核测量结果(或测量仪器)的重复性,当测量次数 N 较少时,其重复性计算常采用极差作为评定结果。

(2) 标准差

①计算每一个位置 x_j 的平均值

$$\bar{Y}(x_j) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N Y_i(x_j), \quad (6)$$

②计算每一个位置的标准差

$$\sigma(x_j) = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N [Y_i(x_j) - \bar{Y}(x_j)]^2}, \quad (7)$$

显然, $\sigma(x_1) = 0$

③计算重复性

取测量范围内被测点中的最大标准差作为整个动态测量的重复性评定结果。

$$\sigma = \max_{j=1}^M [\sigma(x_j)], \quad (8)$$

在动态测量中,为考核测量结果(或测量仪器)的重复性,若测量次数 N 较多,则采用标准差评定动态测量重复性。

2.2 问题

以极差计算为例。将式(1)代入式(3),得

$$\begin{aligned} Y_i(x_j) &= y(x_j) + e_i(x_j) - y(x_1) - e_i(x_1) \\ &= y(x_j) - y(x_1) + e_i(x_j) - e_i(x_1), \end{aligned} \quad (9)$$

将式(9)代入式(4)并整理,得

$$\begin{aligned} w(x_j) &= \max_{i=1}^N [e_i(x_j) - e_i(x_1)] - \\ &\quad \min_{i=1}^N [e_i(x_j) - e_i(x_1)], \end{aligned} \quad (10)$$

由式(10)可知,在这种重复性评定方法中,起测点的测量误差 $e_i(x_1)$ 被 1:1 地引入其它测点的极差计算中。也就是说,第一个被测点的随机误差将影响整个样本的重复性评定。在标准差计算时,情况也类似,初值平移的结果是导致了在第一点其标准差 $\sigma(x_1) = 0$ 。事实上,在一般测量中,要使第一个被测点的标准差为零是很难的。一般说来,为了客观地表征动态测量重复性,应充分考虑全体数据的整

体影响, 弱化局部正常测点的影响。

3 基于均值平移的动态测量重复性评定方法

基于均值平移的动态测量重复性评定方法的基本原理如下:

对式(2)中每一个现实 $y_i(x)$, 相对其均值 \bar{y}_i 作平移处理。于是, 得到新的数据样本 $Y_i(x)$

$$Y_i(x_j) = y_i(x_j) - \bar{y}_i, \quad (11)$$

其中

$$\bar{y}_i = \frac{1}{M} \sum_{j=1}^M y_i(x_j), \quad (12)$$

以式(11)的计算数据为基础, 极差计算根据式(4)、(5)进行, 显然, $w(x_1) \neq 0$; 标准差计算根据式(6)、(7)进行, 显然, $\sigma(x_1) \neq 0$ 。

这里对本方法作一分析。仍以极差计算为例, 标准差计算的情形类似。将式(1)、(12)代入式(11)并整理, 得

$$\begin{aligned} Y_i(x_j) &= y(x_j) + e_i(x_j) - \frac{1}{M} \sum_{j=1}^M [y(x_j) + e_i(x_j)] \\ &= y(x_j) - \frac{1}{M} \sum_{j=1}^M y(x_j) + \\ &\quad e_i(x_j) - \frac{1}{M} \sum_{j=1}^M e_i(x_j), \end{aligned} \quad (13)$$

将式(13)代入式(4)并整理, 得

$$\begin{aligned} w(x_j) &= \max_{i=1}^N \left[e_i(x_j) - \frac{1}{M} \sum_{j=1}^M e_i(x_j) \right] - \\ &\quad \min_{i=1}^N \left[e_i(x_j) - \frac{1}{M} \sum_{j=1}^M e_i(x_j) \right], \end{aligned} \quad (14)$$

在式(14)中, $\sum_{j=1}^M e_i(x_j)/M$ 为一个现实的各点测量误差的平均值。对随机误差而言, $\sum_{j=1}^M e_i(x_j)/M \rightarrow 0$; 基于此, 本方法避免了起测点的随机误差对整个重复性评定的影响, 因而较真实地从整体上反映了动态测量的重复性。

对起测点易受随机误差干扰的动态测量, 如刀具的刃口的测量, 采用均值平移法能比较真实地反映被测对象的动态测量重复性。

4 动态测量中指标量的重复性评定

对于被测量 $y(x)$, 有时需要从 $y(x)$ 中提

取指标量。例如, 在测量滚刀全长螺旋线误差时, 需要获取相邻齿螺旋线误差、一圈螺旋线误差和三圈螺旋线误差等指标量。在动态测量误差评定时, 对指标量的重复性评定也是一个重要方面。

对每一个现实 $y_i(x)$, 按一定规则可获得某指标量 z_i , z_i 是 $y_i(x)$ 的函数:

$$z_i = F_i[y(x)], \quad (15)$$

则指标量的测量重复性为

① 标准差

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N [z_i - \bar{z}]^2}, \quad (16)$$

其中 $\bar{z} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N z_i$

② 极差

$$w = \max_{i=1}^N (z_i) - \min_{i=1}^N (z_i), \quad (17)$$

动态测量重复性与动态测量中指标量的测量重复性是两个完全不同的概念, 虽然它们都以相同的测量数据为基础进行计算并有一定的相关性, 但其大小和作用是完全不同的。对动态测量重复性而言, 它的计算涉及到整个样本空间, 每一个数据点都参加了计算; 而指标量的重复性并不一定要求每一个数据点参加计算, 因为指标量是根据式(15)计算得到的; 而式(15)是根据某种定义确定的, 它可能不涉及一个现实的全部数据。从本质上说, 是动态测量重复性决定指标量的重复性。因此, 在实际应用中分清各自的作用是十分必要的。对仪器验收, 采用动态测量重复性更能全面地反映仪器的精度质量。一般说来, 动态测量重复性达到要求, 其指标量的重复性也能达到要求; 反之, 不一定成立。相对而言, 指标量的重复性更容易达到要求。

5 动态测量重复性评定实例^[5]

在 CGW300 滚刀测量机^[6]上测量某滚刀的切削刃螺旋线误差。滚刀参数为 $m 2, \alpha 20^\circ, 12$ 槽、右旋。在全长范围内(有效齿 48 个)对该滚刀的切削刃螺旋线误差测量 5 遍, 各刃口的测量结果见表 1(已相对第一刃口作平移处理)。

表 1 滚刀螺旋线误差测量数据

Tab. 1 Measurement data of helix deviation of hob

序号	Y ₁	Y ₂	Y ₃	Y ₄	Y ₅	序号	Y ₁	Y ₂	Y ₃	Y ₄	Y ₅
1	0	0	0	0	0	25	4.98	3.17	3.92	4.46	4.02
2	1.12	0.4	0.09	1.1	0.66	26	3.71	2.46	2.51	3.90	2.74
3	1.88	1.53	0.99	2.01	1.60	27	4.33	2.83	3.80	4.28	3.90
4	3.60	3.03	2.75	3.95	2.92	28	5.84	4.24	4.70	5.03	5.38
5	5.57	4.22	3.69	4.20	4.39	29	8.31	6.53	6.77	7.53	7.66
6	6.57	5.26	5.25	5.70	6.08	30	9.69	7.81	8.02	9.04	7.6
7	7.73	6.61	6.04	7.33	6.15	31	10.75	9.22	9.37	10.60	9.51
8	8.08	7.05	6.76	7.49	6.40	32	10.35	8.66	8.69	9.95	9.17
9	7.02	6.37	5.83	7.09	5.81	33	9.70	8.42	8.82	9.83	8.92
10	6.46	5.84	5.30	6.25	5.47	34	9.26	7.39	7.85	8.40	8.12
11	4.22	3.75	3.40	3.94	3.69	35	8.05	7.24	6.89	7.90	7.09
12	3.25	2.00	2.03	3.04	1.85	36	6.15	5.68	6.14	6.68	6.43
13	1.66	1.35	1.31	2.07	0.83	37	4.99	4.18	4.18	4.56	5.56
14	3.13	2.29	1.53	1.76	1.92	38	6.18	4.84	4.58	4.88	5.22
15	2.98	2.39	1.60	2.58	1.99	39	6.41	5.09	4.84	5.26	6.04
16	4.23	4.14	3.29	4.55	3.65	40	8.22	7.13	7.31	7.20	7.10
17	6.96	6.02	6.26	6.81	5.65	41	10.23	9.38	9.13	9.79	8.70
18	8.43	7.80	7.55	8.00	7.53	42	10.48	10.17	9.60	10.08	10.52
19	10.84	9.71	9.39	10.19	9.81	43	11.61	11.45	11.54	11.33	11.68
20	9.84	8.81	9.05	9.66	9.16	44	11.70	10.55	10.51	11.05	10.74
21	9.87	8.50	8.49	9.01	8.63	45	10.89	10.40	10.61	11.12	10.78
22	9.39	7.85	8.31	8.57	8.64	46	10.21	9.62	9.61	10.34	9.22
23	7.41	5.32	6.31	6.79	5.83	47	8.00	7.90	7.87	7.82	7.63
24	6.70	5.14	5.82	6.58	4.99	48	8.13	7.47	7.46	8.48	7.76

(1) 如图 1 所示, 基于初值平移的常规方法, 其动态测量重复性计算结果为 $2.09 \mu\text{m}$ 。如图 2 所示, 基于本文所述的均值平移评定方法, 其动态测量重复性计算结果为 $1.27 \mu\text{m}$ 。计算结果表明, 动态测量重复性的评定结果与评定方法相关联, 基于均值平移的评定方法较之初值平移法, 从整体上反映了滚刀动态测量的客观情况。

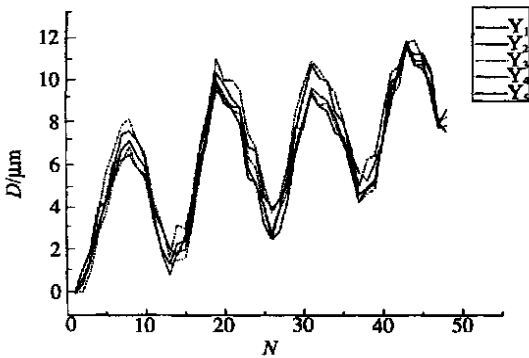


图 1 基于初值平移的动态测量重复性评定

Fig. 1 Repeatability assessment of dynamic measurement based on original point

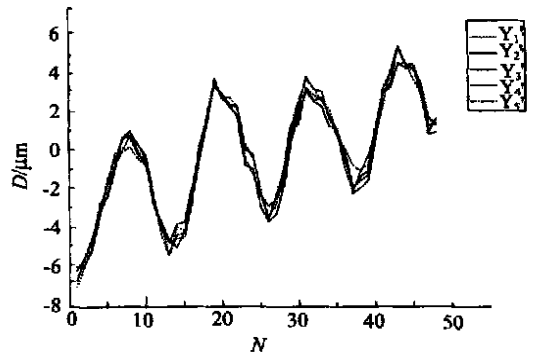


图 2 基于均值平移的动态测量重复性评定

Fig. 2 Repeatability assessment of dynamic measurement based on mean line

(2) 根据表 1 的测量数据, 可计算出该滚刀的相邻齿螺旋线误差、一圈螺旋线误差和三圈螺旋线误差以及这三项误差的测量重复性, 结果见表 2。这三个指标量的测量重复性明显不同于动态测量重复性。

表2 指标量的测量重复性(μm)Tab.2 Measurement repeatability of the characterized items in dynamic measurement of hob(μm)

指标量	第一次	第二次	第三次	第四次	第五次	重复性
相邻齿螺旋线误差	2.72	2.53	2.97	2.6	2.81	0.44
一圈螺旋线误差	9.8	8.36	8.08	8.42	8.99	1.72
三圈螺旋线误差	10.84	10.1	10.23	10.6	10.85	0.75

6 结束语

对动态测量误差的一个主要评定指标——动态测量重复性进行了研究。提出的均值平移评定

方法客观地从整体上反映了动态测量的重复性,因此,该方法对制订各种检测规程、验收精密仪器、规范动态测量的数据处理都有实用价值,也适用于动态测量的再现性评定。

参考文献:

- [1] 李慎安. 测量不确定度 10 讲[M]. 北京:中国计量出版社,1996.
LI S A. 10 Topics of measurement uncertainty [M]. Beijing: China Metrology Press, 1996. (in Chinese)
- [2] 费业泰. 现代误差理论及其基本问题[J]. 宇航计测技术, 1996, (4-5): 2-5.
FEI Y T. Modern error theory & its basic problems[J]. *Astronautic Measurement Technology*, 1996, (4, 5): 2~ 5. (in Chinese)
- [3] 卢荣胜. 动态测量实时误差修正技术研究[D]. 合肥:合肥工业大学, 1998.
LU R S. *Research on the technology of real-time error correction for dynamic measurement* [D]. Hefei: Hefei University of Technology, 1998. (in Chinese)
- [4] 林洪桦. 动态测试数据处理[M]. 北京:北京理工大学出版社, 1995.
LIN H H. *Dynamic test data processing* [M]. Beijing: Press of Beijing Institute of Technology, 1995. (in Chinese)
- [5] 石照耀. 复杂螺旋曲面特征线测量的理论与技术研究[D]. 合肥:合肥工业大学, 2000.
SHI Z Y. *Research on the theory & technology of measurement for characterized curves of complex helicoidal surfaces* [D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2000. (in Chinese)
- [6] 石照耀, 叶勇, 殷, 等. CNC 式高准确度滚刀测量机[J]. 仪器仪表学报, 1999, 20(5): 529-531.
SHI Z Y, YE Y, DING Y, et al. CNC high precision measuring machine for hobs[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 1999, 20(5): 529-531. (in Chinese)

作者简介:石照耀(1964-),男,湖南岳阳人,北京工业大学教授,博士研究生,主要从事计量测试技术、精密仪器和电磁起重技术研究, E-mail: shizhaoyao@bjut.edu.cn