

# 具有新概念的 $\dot{\theta}$ 运动误差及形状误差的 分离法——虚位数据法

洪迈生<sup>1</sup>, 李自军<sup>1</sup>, 苏恒<sup>1</sup>, 叶飞帆<sup>2</sup>

(1. 上海交通大学机械与动力学院, 上海 200030; 2. 宁波大学工学院, 浙江 宁波 315211)

**[摘要]** 提出了一种基于信号重建的虚位数据法, 用此方法, 可以按需要任意选择只分离形状误差或只分离运动误差, 或者任意安排分离这两类误差的先后顺序, 而不必变更传统的形状误差检测—分离系统, 方式灵活, 使用方便。

**[关键词]** 虚位数据; 信号重建; 形状误差; 运动误差; 误差分离技术

**[中图分类号]** TH161.5 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742(2002)10-0048-04

## 1 引言

由于误差分离技术(error separation techniques, EST)能在临床(on machine)测量中就地分离出工件的形状误差和装备(测量机或加工机)的运动误差, 且在纳米级测量和建立虚拟量仪(virtual gauge, VG)中的地位越来越重要<sup>[1,2]</sup>, 因此对它的研究依然长盛不衰。据笔者的不完全统计, 国内外迄今已发展了多达70余种误差分离方法, 对象遍及圆、球、圆柱、直线、平面、螺旋面、角分度和齿轮……, 以及相应的测量机或加工机的运(传)动误差, 而且还在不断的深入中。

误差分离方法虽多, 但都可归入多步法和多点法两大类。在已发表的相关论著中, 不论是多步法还是多点法, 几乎都只使用实位数据, 即按测头相对于装备和工件在测量中的实际位置读出数据, 并几乎都只直接使用这些实位数据建立测量读数方程供后续分离运算。其结果是: 迄今为止的各种误差分离方法, 几乎都只先行分离形状误差。

当然, 识者多认为: 多步法需要进行多次转位并读数的反复操作, 只适用于装备的运动误差重复

性良好的场合, 例如具有高精度主轴回转运动和精密分度转台的圆度仪, 计量国际比对使用的就是多步法; 多点法则在一次性连续操作中就可采集完所有数据, 适用于要求实时性强、一次安装就能分离工件形状误差和装备运动误差的场合, 对运动误差的重复性要求就相对较低, 常成为实现临床精密加工补偿或临床诊断的“加工、测量与控制一体化装备”的必要组成部分<sup>[1~11]</sup>。但工程上还常有只需先行分离运动误差的必要。由于运动误差的重复性通常未必良好: CIRP建议的统一文件和国际传动协会制定的标准T17-91都为此特别阐明传动主轴回转误差中包含了不具备重复性的非同步误差<sup>[12,13]</sup>。又由于误差分离系统的功能受其传递特性的限制, 通常分离并不充分, 导致先行分离过程中的误差残留归入后分离得到的误差中去<sup>[5,6]</sup>。因此存在着先分离形状误差、后分离运动误差, 以及先分离运动误差、后分离形状误差, 然后再相互印证的需要。此外, 不少以装备诊断为目的的误差分离应用, 只要求直接掌握装备运动部件的运动误差, 并不在乎形状误差如何。在这些情况下, 所提出的虚位数据法就十分必要了。

**[收稿日期]** 2002-03-15; **修回日期** 2002-06-11

**[基金项目]** 国家自然科学基金资助项目(50075056)

**[作者简介]** 洪迈生(1938-), 男, 浙江宁波市人, 上海交通大学教授, 博士生导师

## 2 实位数据和虚位数据

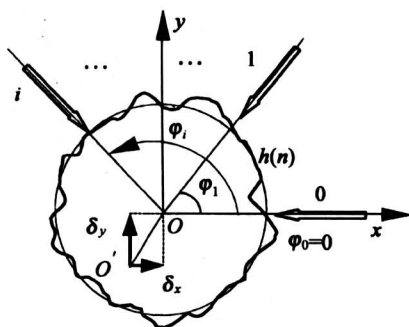
为叙述方便，这里先介绍笔者提出的实（移）位数据和虚（移）位数据的含义。

实位数据（actual-position reading），即当地数据（original reading）：多点法 EST 中，传感器测头所在的原位测位处所采集到的读数；或多步法 EST 中，传感器按系统要求移步到各指定位置处测头所采集到的读数。因此，又称为原位数据或一次相移数据，其特点是形状误差的读数起点随测头的实际位置而异，而运动误差的起点都相同。

虚位数据（virtual-position reading），即异地数据（shifting reading）：将已获得的上述实位数据做整体的空间再移位（相当于时域上再时延）后所得到的数据。根据 Fourier 变换的“时延即相移”的性质，又称“异位数据”或“二次相移数据”，其特点是形状误差的读数起点和运动误差的起点均随空间再移位而同时变异。由于这种“再移位”仅仅是通过软件对已获得的数据再排列而进行，仅属于对获得信号的信号重建，并不牵涉到对测头测位的再布置和数据的再采集等硬操作，故又称“虚（移）位读数”。

具体来说，对于最基本的圆和直线形状误差及相应的运动误差的分离检测，当使用位移传感器时，不论是多点法的第  $i$  个测头，还是多步法的第  $i$  步测量，在再移位  $p_i$  的先后，均分别有<sup>[6~8,10]</sup>：

测圆时（参见图 1 a）：  
 实位数据  $z_i(n\Delta\theta) = h((n + p_i)\Delta\theta) + \delta_x(n\Delta\theta)\cos(p_i\Delta\theta) + \delta_y(n\Delta\theta)\sin(p_i\Delta\theta)$ , (1)



a. 圆—回转运动误差分离法

虚位数据  $z_i(n\Delta\theta + p_j\Delta\theta) = h((n + p_i + p_j)\Delta\theta) + \delta_x((n + p_j)\Delta\theta)\cos(p_i\Delta\theta) + \delta_y((n + p_j)\Delta\theta)\sin(p_i\Delta\theta)$ , (2)

测直线时（参见图 1 b）：

实位数据  $z_i(n\Delta l) = h((n + p_i)\Delta l) + \delta_y(n\Delta l) + p_i\Delta l\beta(n\Delta l)$ , (3)

虚位数据  $z_i(n\Delta l + p_j\Delta l) = h((n + p_i + p_j)\Delta l) + \delta_y((n + p_j)\Delta l) + p_i\Delta l\beta((n + p_j)\Delta l)$ 。 (4)

等间隔采样条件下，可省略两采样点之间的采样角  $\Delta\theta$  或采样间距  $\Delta l$ ，把上列四式分别简写为

测圆时： $z_i(n) = h(n + p_i) + \delta_x(n)\cos\varphi_i + \delta_y(n)\sin\varphi_i$ , (5)

$z_i(n + p_j) = h(n + p_i + p_j) + \delta_x(n + p_j)\cos\varphi_i + \delta_y(n + p_j)\sin\varphi_i$ , (6)

测直线时： $z_i(n) = h(n + p_i) + \delta_y(n) + l_i\beta(n)$ , (7)

$z_i(n + p_j) = h(n + p_i + p_j) + \delta_y(n + p_j) + l_i\beta(n + p_j)$ , (8)

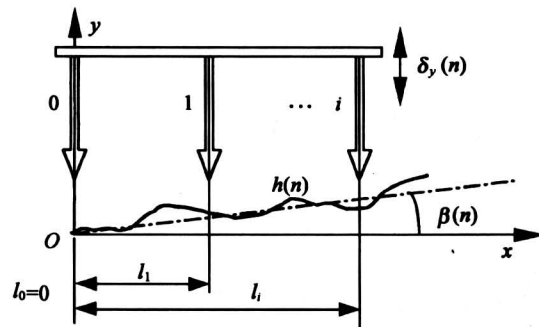
式(1)至式(8)中， $z_i(n)$ ， $z_i(n + p_j)$ 分别为实位数据和虚位数据；

$h(n + p_i)$ 为第  $i$  个测头（或单测头的第  $i$  步）测位处的形状误差读数；

$\delta_x(n)$ ， $\delta_y(n)$ ， $\beta(n)$ 分别为运动误差沿坐标  $x$ 、 $y$  轴的平移分量和绕轴  $y$  的转动分量；

$\varphi_i = p_i\Delta\theta$ ， $l_i = p_i\Delta l$ 分别为描述测头实际位置的角参数和线值参数；

$n$ ， $p_i$ ， $p_j$ 分别为离散数字变量、实移位数和虚移位数，均为整数。



b. 直线—直行运动误差分离法

图 1 基本的误差分离方法

Fig.1 Error separation method

### 3 误差分离技术的统一方程

将众多的对象不一、形式各异的一维误差分离方法的基本测量读数方程统一表达为<sup>[8]</sup>:

$$Z = AH + BA, \quad (9)$$

式中,  $Z = [z(n + p_0 + p_j), z(n + p_1 + p_j), \dots, z(n + p_{d-1} + p_j)]^T$  为读数列向量;

$$A = \begin{bmatrix} a_{0,0} & a_{0,1} & \dots & a_{0,d-1} \\ a_{1,0} & a_{1,1} & \dots & a_{1,d-1} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{d-1,0} & a_{d-1,1} & \dots & a_{d-1,d-1} \end{bmatrix},$$

$$B = \begin{bmatrix} b_{0,0} & b_{0,1} & \dots & b_{0,e-1} \\ b_{1,0} & b_{1,1} & \dots & b_{1,e-1} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ b_{d-1,0} & b_{d-1,1} & \dots & b_{d-1,e-1} \end{bmatrix},$$

分别为形状误差和运动误差的映射矩阵, 其中元素  $a$  和  $b$  均是传感器的配置和方位参数;  $H = [h(n + p_0 + p_j), h(n + p_1 + p_j), \dots, h(n + p_{d-1} + p_j)]^T$  为形状误差列向量;  $\Delta = [\delta_x(n + p_j), \delta_y(n + p_j), \dots, \beta(n + p_j)]^T$  为运动误差列向量; 其中  $d$  为多步法 EST 的测位数或多点法 EST 的测点数;  $e$  为多步法或多点法 EST 系统中发生的运动误差分量数;  $h$  为各测位或各测点处形状误差读数;  $\delta_x, \delta_y, \beta$  依次为运动误差沿坐标  $x, y$  的平移分量和绕坐标  $y$  的转角分量;  $n$  为离散整数,  $n = 0, 1, \dots, N-1, N$  为总采样点数;  $p_i, p_j$  分别为实移位数和虚移位数。

所谓 EST 的首次分离操作, 就是要设法找到一个不为零的行向量  $C = (c_0, c_1, \dots, c_{d-1})$ , 使之左乘  $Z = AH + BA$  后, 得到  $CZ = CAH + CBA$ 。令  $CBA = 0$  而只留下  $CZ = CAH$ , 或者令  $CAH = 0$  而只留下  $CZ = CBA$ 。前者先分离掉运动误差, 后者则先分离掉形状误差。两者都可借 EST 中的二次分离操作(时域法或频域法)分别先分离得到形状误差或得到运动误差。

### 4 应用

#### 4.1 先行分离得到回转运动误差

这里以先行分离径向回转运动误差在  $x$  方向上的分量  $\delta_x(n)$  为例, 用最基本的三点法测圆时, 根据测到的实位数据, 通常可建立下列原始测量读数方程:

$$\begin{bmatrix} z_0(n) \\ z_1(n) \\ z_2(n) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} h(n + p_0) \\ h(n + p_1) \\ h(n + p_2) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \cos \varphi_0 & \sin \varphi_0 \\ \cos \varphi_1 & \sin \varphi_1 \\ \cos \varphi_2 & \sin \varphi_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta_x(n) \\ \delta_y(n) \end{bmatrix}. \quad (10)$$

由实位数据组成的上述方程中,  $A$  矩阵各列只含一个元素, 无法做到  $CAH = 0$ , 只能通过  $CBA = 0$  先分离得到圆形状误差。为此, 令  $p_i = p_0 = 0$ , 将已获得的  $z_0(n)$  再做两次整体移位:  $[z_0(n + p_j), j = 0, 1]$ , 使成为虚位数据  $z_0(n + p_1)$  和  $z_0(n + p_2)$ , 并选另两个原实位数据  $z_1(n)$  和  $z_2(n)$ , 组成新的  $Z$ , 代入  $Z = AH + BA$  式, 得:

$$\begin{bmatrix} z_1(n) \\ z_0(n + p_1) \\ z_2(n) \\ z_0(n + p_2) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 1 & 0 \\ 0 & 1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} h(n + p_1) \\ h(n + p_2) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \cos \varphi_1 & \sin \varphi_1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \cos \varphi_0 & \sin \varphi_0 & 0 & 0 \\ \cos \varphi_2 & \sin \varphi_2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \cos \varphi_0 & \sin \varphi_0 \end{bmatrix} \Delta = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 1 & 0 \\ 0 & 1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} h(n + p_1) \\ h(n + p_2) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \cos \varphi_1 & \sin \varphi_1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ \cos \varphi_2 & \sin \varphi_2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \Delta, \quad (11)$$

式中,  $\Delta = [\delta_x(n), \delta_y(n), \delta_x(n + p_1), \delta_y(n + p_1), \delta_x(n + p_2), \delta_y(n + p_2)]^T$ 。

现在  $A$  矩阵中的各列都含有两个元素, 按  $CAH = 0$  并使  $CBA$  中只含一种有效的运动误差分量  $\delta_x(n)$  去反求  $C$ <sup>[14,15]</sup>。对  $\delta_x(n), \delta_x(n + p_1)$  和  $\delta_x(n + p_2)$  的进一步分离即二次分离操作, 有频域法、时域法等多种, 均属 EST 的常规操作方法<sup>[6-11]</sup>。同样, 可用于先行分离回转运动误差在  $y$  方向上的分量  $\delta_y(n)$ 。这样, 只需将原来用于先分离圆形状误差时测到的实位数据做虚位信号重建并重组读数列向量  $Z$ , 就可用分离或先行分离得到运动误差, 而且毋需重新配置或调整原有的三点法测圆系统, 更毋需再做测量操作, 十分灵便。

#### 4.2 先行分离得到直行运动误差

同样, 也可以用原来以先行分离得到工件直线

形状误差为宗的直线三点法 EST 中的某些实位数据, 加上对该实位数据做信号重建后的虚位数据, 排出下列式 (12) 和式 (13) 两种可先行分离得到装备直行运动误差的测量读数方程。

$$\begin{bmatrix} z_0(n+p_1) \\ z_0(n+p_2) \\ z_1(n) \\ z_2(n) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \\ 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} h(n+p_1) \\ h(n+p_2) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & l_1 \\ 1 & 0 & 0 & l_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta_y(n) \\ \delta_y(n+p_1) \\ \delta_y(n+p_2) \\ \beta(n) \end{bmatrix}, \quad (12)$$

$$\begin{bmatrix} z_1(n+p_0) \\ z_0(n+p_1) \\ z_0(n+p_2) \\ z_2(n+p_0) \\ z_2(n+p_1) \\ z_1(n+p_2) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} h(n+p_0+p_1) \\ h(n+p_0+p_2) \\ h(n+p_1+p_2) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & l_1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & l_0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & l_0 \\ 1 & 0 & 0 & l_2 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & l_2 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & l_1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \delta_y(n+p_0) \\ \delta_y(n+p_1) \\ \delta_y(n+p_2) \\ \beta(n+p_0) \\ \beta(n+p_1) \\ \beta(n+p_2) \end{bmatrix}. \quad (13)$$

由该两方程可见, 即使同样源于传统的三点法的实位数据, 用虚位数据法通过重构原信号和重组读数向量以便只分离或先行分离运动误差的方式也不是唯一的。

同前, 将式 (10) 至式 (13) 付之实践, 并与传统的 EST 做比较, 均取得了良好的效果<sup>[14,15]</sup>。

## 5 结论

1) 非同步误差的存在、EST 中的误差残留、对装备诊断和相互印证比对的需要, 都要求在形状误差和运动误差同时存在的前提下, 能任意选择两者之一先行分离。

2) 用所提出的虚位数据法重构和重组已获读数信号, 可将传统的 EST 改造, 成为可任意先行分离得到工件形状误差或装备运动误差的技术。

3) 该方法毋需重新配置或调整原 EST 系统, 更不必进行测量再操作, 十分灵便。

### 参考文献

- [1] 洪迈生, 梁学军, 魏元雷. 虚拟基准、虚拟量仪、虚拟仪器和误差分离技术 [J]. 振动、测试与诊断, 2000, 20 (2): 77~81
- [2] Gao W. Error separation methods for spindle error measurement with nanometer accuracy [J]. Journal of the Japan Society for Precision Engineering, 2001. 67 (7): 1067~1071
- [3] Kamigaki, Yamakawa O, Omori Y. et al. Roundness measurement and its uncertainty in an international comparison [A]. Proc of IMEKO 2000 [C]. Vienna, 2000. 139~142
- [4] 小倉一朗, 清野慧, 高 偉. 自律的形状創成法のためのインプロセス測定プロブ開発 [J]. 精密工學會誌, 1997, 63 (9): 1285~1289
- [5] 邓宗煌, 洪迈生. 三传感器误差分离技术测量精度探讨 [J]. 计测, 1993, (1): 35~38
- [6] 洪迈生, 邓宗煌. 三点法误差分离技术中的两个基本问题 [J]. 计量技术, 1994, (1): 5~7
- [7] Gleason E, Schwenket H. A spindleless instrument for the roundness measurement of precision spheres [J]. Precision Engineering, 1998, 22 (1): 37~42
- [8] 洪迈生, 魏元雷, 李济顺. 一维和多维误差分离技术的统一理论 [J]. 中国机械工程, 2000, 11 (3): 245~248
- [9] Hong M S, Wei Y L, Li Z J, et al. On mapping matrixes and weight function in high-precision EST of flatness by optical probe [A]. Proceedings of SPIE [C]. Beijing, 2000, 4222: 8~15
- [10] Hideo Kato. In situ measuring system of circularity using an industrial robot and a piezo-actuator [J]. Bull JSPE, 1991, 25 (2): 130~135
- [11] Ogura I, Okazaki Y. Precision measurement for axial and angular motion errors of turning spindle by using multipoint method [J]. Journal of JSPE, 2001, 67 (7): 1120~1124
- [12] IDEMA. Asynchronous spindle error measurement [S]. IDEMA Standards, 1991, T17-91
- [13] Harrison J C, Taike F E. Non repeatable runout of cantilever and doubly supported 5-1/4" disc drive spindles [J]. Precision Engineering, 1991, 13 (1): 33~40

(下转第 89 页)

## A Multi-wavelength Star Optical Network Reusing All Channel Wavelengths Three Times and Its Features

Gan Chaoqin

(*Department of Electronic Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China*)

[**Abstract**] In this paper, a novel multi-wavelength star optical network reusing all channel wavelengths three times is proposed by the method of “(Distributed Architecture) + (Return Link) + (Wavelength Group)”. In this scheme, by interconnecting four conventional star couplers and reusing all channel wavelengths three times, both the maximum number of supportable nodes and the maximum throughput of the network are all up to four times as many as that of conventional WDM star network. Utilizing bidirectional transmissions in a single fiber, half fibers can be saved under the same number of supportable nodes. Making use of the distributed architecture, the anti-destructibility of network is drastically raised. All these advantages of the network efficiently overcome the disadvantages of conventional WDM star network.

[**Key words**] wavelength division multiplexing; wavelength reuse; tunable wavelength router for multi-wavelength selection; distributed architecture; return link; wavelength group

(上接第 51 页)

[14] 李自军, 洪迈生, 魏元雷, 等. 基于主轴回转运动误差在线检测的二次相移三点法 [J]. 光学精密工程, 2001, 9 (4): 319~323

[15] 李自军, 洪迈生, 苏恒, 等. 基于二次相移数据重组的直行运动误差在线检测分离技术 [J]. 应用基础与工程科学学报, 2001, 9 (4): 360~365

## Virtual-position Reading Method—a Novel Method for Error Motion and Form Error Separation

Hong Maisheng<sup>1</sup>, Li Zijun<sup>1</sup>, Su Heng<sup>1</sup>, Ye Feifan<sup>2</sup>

(1. *School of Mechanical Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030, China*;

2. *School of Engineering, Ningbo University, Ningbo, Zhejiang 315211, China*)

[**Abstract**] On the basis of signal re-organization, a novel method named virtual-position reading method is proposed in this paper. By means of this method, form error or error motion can be respectively separated according to practical needs, and the separating sequence of form error or error motion can also be optional. Furthermore, in the proposed method, it is not necessary to change the conventional measuring and separating system of form error or the normal procedures of separating operation. It is proved that the new method is flexible and convenient in use.

[**Key words**] virtual-position reading; signal re-organization; form error; error motion; error separation techniques