

精密测试

微小球面粗糙度的准确测量及不确定度分析

秦静, 张道勇, 李玲莉

(航天科工集团 061基地航天控制技术有限公司, 贵阳 550009)

[摘要] 本文针对微小球面粗糙度准确测量难题, 分析探讨测针结构及运动方式对测量的影响, 提出准确测量方案, 并进行验证测试及不确定度分析。

[关键词] 粗糙度; 球面; 测针

[中图分类号] TG84

[文献标识码] B

[文章编号] 1003-5451(2011)03-0023-05

Accurate Measurement and Uncertainty Analysis on Microsphere Roughness

QIN Jing ZHANG Dao-yong LI Ling-li

(Aerospace control Technology Ltd, Com of 061 Base of CASIC Guiyang 550009)

[Abstract] Aiming at the problem about the accurate measurement of microsphere the probe structure and its motion mode as well as the affect on measurement were analyzed and discussed. The accurate measurement scheme was put forward to make verification test and uncertainty analysis.

[Keywords] roughness sphere probe

1 概述

表面粗糙度是表征零件表面质量的一个重要参数, 对于需要减小摩擦力的配合运动部件, 表面粗糙度是其工作的关键参数, 在很大程度上决定了产品的性能。如在某型号陀螺仪的关键运动副中, 采用球头轴尖和宝石轴承的支撑形式, 该轴尖零件球头部分精度要求很高, 与宝石轴承的配合间隙保证在 0.012~0.014 mm 之间, 图 2 所示 20° 范围粗糙度 $R_a 0.012$ 是该零件的关键参数 (如图 1、图 2 示)。

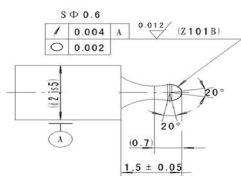
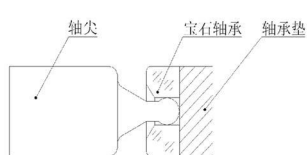


图 1 某陀螺仪支撑示意图

图 2 轴尖零件图

粗糙度测量一般采用目测对比法和粗糙度仪检测法, 对于高精度粗糙度采用目测对比法无法准确判断, 而对于微小球面的粗糙度测量采用粗糙度仪进行准确测量也是一个难题, 国内同类厂家均未找到有效的测量方法仍采用目测对比法进行检查, 我们通过长期摸索, 利用高精度粗糙度仪, 选用合适的检测方法并进行了不确定度分析, 实现了微小球面高精度粗糙度的准确测量。

2 微小球面测量难点分析

测量 $S\Phi 0.6$ 球面 $R_a 0.012$, 按照标准取样长度 $l = 0.08$, 标准评定长度为 5 个取样长度即测量长度为 7 个取样长度。被测球面半球弧长 $l = \pi \times r = 0.942\text{mm}$, 半球弧长满足标准评定所需的测量长度。测针在球面的极限位置接触测量, 测针受力易侧滑, 测量 5 个取样长度测量数据不值探讨, 几乎无可信度。

XR20测量仪,仪器 X轴主轴输出坐标值分度为 1mm,测针针尖半径为 $2\mu\text{m}$ 。测量时,在测量起点测针与球面的相对位置只能凭目视调整,且测针与球面接触受力前后,测针与球面的相对位置还有明显变化。

测量微小球面的难点之一:测量球面直径小,按标准评定长度基本无法测量;之二:测量起点难以调整控制。最终归结点是测量采集点的有效性判断控制。

如测试评定取 2个取样长度(在测量起点和终点均有一个取样长度的测量长度不参与评定)既能使球面要求的 20° 范围受控,也可提高测量可靠性。选用德国 Mahr生产的 XR20触针式粗糙度测量仪,让熟练使用该仪器的测量人员进行测量,测量数据见表 1。

表 1 $S\Phi 0.6$ 球面的粗糙度测试

评定 取样 个数 N=2	重复次数					测量 人员
	1	2	3	4	5	
	0.1310	0.0776	0.0391	0.0258	0.0192	A
	0.1530	0.0369	0.0217	0.0175	0.0102	B
	0.1001	0.0900	0.0346	0.0264	0.0089	C

由表 1测试数据可见,即使同一测量人员使用同样的设备同样的测量方法,其测量数据均有很大的变化。检查测量球面范围的外观,并未发现上有差异,其测试数据不稳定,不是测量球面粗糙度不均匀,而是测量采集点控制不当引起。

3 影响测量准确度因素分析

3.1 测针结构对测量有效范围的影响

XR20为触针式粗糙度测量仪,测量时测针与被测表面垂直接触, X轴驱动器以一定的速度拖动传感器做直线运动,触针在被测表面的轮廓峰谷上滑行,产生上下移动,此运动经支点使磁芯同步的上下运动,从而使包围在磁芯外面的两个差动电感线圈的电感量发生变化。传感器的线圈与测量线路直接接入平行电桥,线圈电感量的变化使电桥失去平衡,于是就输出一个和触针上下的移动量成正比的信号,经电子装置将这一微弱电量的变化放大。相敏检波后,获得表示触针位移量大小和方向的信号。此后,将信号分成二路,一路加到指零表上,以表示触针的位置。另一路经器放大之后,进入积分计算器,进行积分计算即可得到表面粗糙度值。

由测量原理可知,只有测针的“尖锐”部位与工件接触,才是有效反馈被测表面计算粗糙度参数的微观峰和谷在高度或宽度方向的变化。

测针外形见图 3,测针标注型号($90^\circ, 2\mu\text{m}$)。测针的圆柱直径为 $\Phi 1$,在万能工具显微镜下放大检查测针锥体角度为 70° ,测针的外形比被测球径还大。测针针尖的尖锐处是否为目视看到的 70° 锥角形成?测针标注 90° 是指何部位?

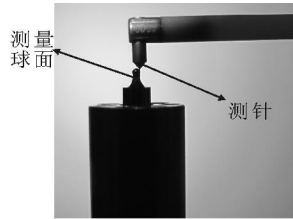


图 3 测针与工件

图 4 放大 400 的测尖

将测针的尖锐处放大 400倍检查(见图 4),测量使用的测尖与 70° 锥体为两部分实体。由此可以判定:测针测量使用测尖是 90° 锥角在尖锐处形成的曲率半径为 $2\mu\text{m}$ 的小球面。

由上述结构分析,只有曲率半径 $2\mu\text{m}$ 测尖与被测表面接触,采集点才有效。当测尖锥面与工件接触相切时,测量采集点无效且评定值不正确。因此使用标注($90^\circ, 2\mu\text{m}$)的测针,只有测量截面球顶对称的 45° 范围才能保证是测尖与球面接触,测量采集点才有效。

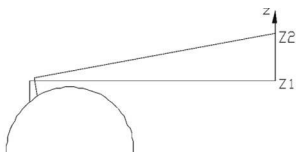
3.2 测针的运动方式对测量的影响

对于微小球面,凭目视或几倍的放大镜控制测量,是很难控制和判断采集点是否在有效范围。要控制测针采点位置正确,只有知道测针与工件接触前后的运动状态,才能采取有效措施。

使用 XR20粗糙度仪测量,测量前首先调整测针的 Z向高度,使测针与被测面距离小于 4mm,再使用电机微调功能,调整测针“自动接触”测量面进行测量。在测量过程中,目视可判别电机微调功能使测针与工件“自动接触”前后,测针与球面的相对位置有明显的偏移。由粗糙度测量原理知道,测量时测针运动绕支点转动;那么,电机微调功能使测针绕运动支点转动吗?

测针运动方式对测量平面要素并无影响,而对于微小球面,测针结构及球面小,测量弧线长度十分有限,测针的运动方式也将影响测量有效采集范围,影响测量准确。

测针与测量面接触前,测针的 Z 轴坐标位置无输出显示,无法调整控制测针高度。如果电机微调驱动



测针转动,测针会因调整的 Z 向高度不同使测针与球面的接触点位置及转角不同(见图 5)。对于测量范围有限的微小球面,就很有可能出现测针的锥面与工件接触,导致测量数据不正确。

如果电机微调是使测针沿 Z 轴平移,测量前测针 Z 坐标高度不影响测针与球面接触的位置。

3.3 对测针运动方式确认

电机微调功能的实现方式究竟如何?我们对此进行试验验证。

XR20 测量仪配有分度为 0.01 的 X、Y 二维可调千分尺。测针与测量面接触后,有接触点的 Z 坐标值输出(输出分辨率 $1\mu\text{m}$)。当调整 X、Y 千分尺改变被测球面与测针的接触点位置,Z 向高度随之变化。我们利用仪器的该项功能,保证在测量起点测针与球面有相同的相对位置,调整测针在不同高度,根据接触起点到球面最高点的 Z 向高度变化量,判断电机微调功能驱动测针的运动方式。

验证要点:

①测量仪 X 轴坐标显示分辨率为 1mm ,中间位置无法控制测针位置相同,控制测量起点测针的 X 轴位置相同,选用测量仪 X 轴的极限位置为测量起点位置。

②测针 X 轴定位后,测量球面固定于二维工作台面,利用二维工作台的 X、Y 轴千分尺调整测量球面与测针相对位置,固定在测量起点测针与球面位置,记录测量起点的千分尺之值 X_0 、 Y_0 (Y 轴之后不在调整)。

③在测量起点,使用 Z 轴电机调整测针与被测面的相对高度,用电机微调功能使测针与被测球面自动接触,记录该接触起点 Z 坐标。调整 X 轴千分尺,使用“拐点”找到球面的最高点的 Z 坐标。计算接触起点与最高点的 Z 坐标变化量。

④重复第 1 步,调整二维工作台的 X 轴到第 2 步记录 X_0 位置(使零件和测针位置相同),重复进行第 3 步,且使 Z 轴电机驱动调整测针与被测球面的相对高度与第 3 步有明显差异。再次确认接触起点与球最高点的 Z 坐标变化量。

中国知网 <https://www.cnki.net>

若该试验方法每次试验的测量起点与最高点的 Z 坐标变化量相同,电机微调使测针平移;反之测针转动。

经上述试验方法多次重复验证,被测球面与测针 X、Y 向相对位置固定,不管 Z 轴调整高度如何,测针与工件的接触起点于球面最高点的 Z 坐标值的变化量相等。由此可以判定测针电机微调是驱动测针沿 Z 轴平移,而不是像测量过程中绕支点转动。

目视判断测针接触受力前后相对位置的变化,分析认为是测量仪连接测针的测杆无严格的直线度要求,测针与工件接触后的接触力,改变了测杆的直线度形状,而测针与工件接触力恒定其接触变形量相同,测杆的直线度变化对测量接触起点无影响。

4 确定测量方案及验证测量

4.1 确定测量方案

经分析验证已知,测针与工件自动接触前的运动是沿 Z 轴的平移,测量过程中测针是转动。在测量小球面时,由于测杆长度远远大于测量过程中球面的 Z 向的高度变化量,测针转角很小,因此只要在测量起点和终点是测尖与球面接触,则测量过程中就不会出现测针锥面与球面接触。

使用 XR20 粗糙度仪配置的 90° 测针,当接触点和球中心点的连线与仪器 Z 轴夹角为 45° 时(图 6 的 A1、A2 位置),测针锥体与球面相切且正好是测尖与球面接触,即测量极限位置为图 6 中的 A1、A2。球面测量最大弧长范围为最大球径周长的四分之一,针尖超出 A1、A2 的 X 坐标位置(如图 4 中的 A3),就会出现测针锥面与工件接触。

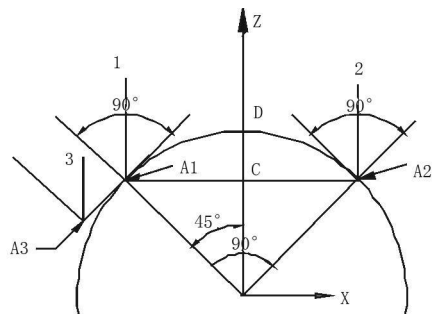


图 6 测针与球面接触位置

测量时要使测量弧长最大,需使测量截面过球心。由于测针和传感器连接其 Y 向固定不动,测针与工件

接触后显示 Z 坐标的相对变化量。使用二维工作台的 Y 轴,利用 Z 高度变化“拐点”调整工件球心的 Y 向位置,当 Z 坐标最大时测量截面过球心。

测量方案一:

如果已知被测球面的球半径 R,可计算图 6 的最高点 D 到 A1 的高度变化量 $\Delta Z = (R - \frac{\sqrt{2}}{2}R) = 0.293R$ 。

测量时,在测针与球面自动接触后,调整二维工作台的 X、Y 轴,利用“拐点”找到测针接触球面的为最高点;然后使二维工作台的 Y 轴保持不动,调整二维工作台的 X 轴,使测针与球面接触点的 Z 高度相对最高点 D 降低 ΔZ 即该接触点为测量起点位置 A1。控制好起点后,只要控制测量长度不大于 $\frac{\pi R}{2}$,既可控制测量采集点有效。

对 $\Phi 0.6$ 微小球面测量,如图 3 竖直或顺时针旋转 90° 水平放置零件。取评定长度为 2 个取样长度,其测量长度为 4 个取样长度。在最高点对称测量 2 个取样长度,控制测量起点的 Z 坐标相对最高点的变化量为 0.042; 2 个取样长度的评定角度 $\alpha = \frac{2 \times 0.08 \times 360^\circ}{2\pi R}$,即对称最高点的测量采集角度小于

45° ,采集点在有效范围;两个取样长度的评定角度对称最高点分布,评定长度范围涵盖球对顶部 20° ,要求球面范围粗糙度控制。

测量方案二:

如果测量球的球径未知,测量时先调整二维工作台的 X、Y 轴,利用“拐点”找到最高点 D,记录 D 点二维工作台的 X、Y 坐标;然后调整接触点,记录接触点 A 相对最高点 D 的二维工作台 X 轴变化量 ΔX 和 Z 坐标变化量 ΔZ ,计算并控制 AOD 角度 $\arcsin(\frac{2\Delta X \cdot \Delta Z}{\Delta X^2 + \Delta Z^2})$ 小于 45° ,即可控制测量起点位置在有效范围。对测量终点控制不超过图 6 的极限位置点 A2 的方法,与控制测量起点 A1 相同;或者控制好测量起点角度,计算在测量长度的终点是否在控制的中心角 45° 范围。

由于二维可调轴精度低(分度 0.01),推荐用千分尺测量球径使用第一种方案较好。

4.2 验证测量

使用方案一测量图 3 放置的 $\Phi 0.6$ 微小球面顶

部,随机选取 12 个截面进行 5 次重复测量,测试数据见表 2。

表 2 $\Phi 0.6$ 微小球面 Ra 测量值 / μm

测量位置 / i	次数 / j					变化量
	1	2	3	4	5	
1	0.0102	0.0109	0.0100	0.0112	0.0096	0.0016
2	0.0084	0.0122	0.0119	0.0079	0.0111	0.0043
3	0.0102	0.0137	0.0105	0.0117	0.0121	0.0035
4	0.0098	0.0112	0.0106	0.0095	0.0092	0.002
5	0.0116	0.0126	0.0102	0.0129	0.0117	0.0027
6	0.0093	0.0092	0.0068	0.0086	0.0079	0.0025
7	0.0116	0.0116	0.0105	0.0114	0.0126	0.0021
8	0.0101	0.0120	0.0107	0.0108	0.0118	0.0019
9	0.0116	0.0105	0.0117	0.0119	0.0108	0.0014
10	0.0125	0.0117	0.0098	0.0111	0.0109	0.0027
11	0.0086	0.0097	0.0093	0.0086	0.0102	0.0016
12	0.0112	0.0125	0.0113	0.0134	0.0111	0.0023

由表 2 数据可见,同一部位重复调整测试,最大变化量仅 $0.0043 \mu m$,各部位测量值很稳定,可见该测量方法调整控制采集点有效性是正确的。

4.3 不确定度分析

粗糙度测量变动性的影响因素有:粗糙度测量标准上 R_a 值的变化、每次测量中 R_a 值的变化、仪器接触触针的测量重复性。

假定以上每一项随机效应都有未知的方差,对应地用符号 σ_R^2 、 σ_E^2 和 σ_M^2 表示。其中,下标 R 表示粗糙度测量标准参数值的变化;下标 E 表示每次测量评定结果的差异,由各种随机因素引入的不确定度分量;下标 M 表示触针式仪器测量重复性;

使用适合的方差分析方法 (ANOVA) 对表 2 的测量数据进行方差分析 (在 ISO 中详细的讨论方差分析方法计算适合)。

令 X_{ij} 表示第 j 次评定的第 i 个值。由以下各式可计算算术平均值 \bar{x}_i 、 \bar{x}_j 和 \bar{x}

$$\bar{x}_i = \frac{1}{12} \sum_{j=1}^{12} x_{ij} \quad \bar{x}_j = \frac{1}{5} \sum_{i=1}^5 x_{ij} \quad \bar{x} = \frac{1}{60} \sum_{i=1}^5 \sum_{j=1}^{12} x_{ij}$$

由以下各式可计算与这些均值相关的平方和 S_1 、 S_2 、 S_3 和 S_4

$$S_1 = 60 \bar{x}^2 \quad S_2 = 5 \sum_{i=1}^{12} (\bar{x}_i - \bar{x})^2 \quad S_3 = 12 \sum_{j=1}^5 (\bar{x}_j - \bar{x})^2$$

$$S_4 = \sum_{i=1}^{12} \sum_{j=1}^5 (x_{ij} - \bar{x}_i)^2$$

表 3 方差统计方法

变动性来源	平方和 S_i	自由度 ν_i	平方均值 $M_i = \frac{S_i}{\nu_i}$	由平方均值估计的方差
平均值	$S_1 = 0.006917$	1	$M_1 = 0.00191535$	
测量标准间的变化	$S_2 = 0.000065708$	11	$M_2 = 5.97345E-06$	$\sigma_M^2 + 5\sigma_R^2$
测量评定间的变化	$S_3 = 1.042E-05$	4	$M_3 = 2.605E-06$	$\sigma_M^2 + 12\sigma_R^2$
仪器重复性	$S_4 = 0.00011924$	48	$M_4 = 2.484E-06$	σ_M^2

用 S_R^2 、 S_E^2 、 S_M^2 对应表示 σ_R^2 、 σ_E^2 和 σ_M^2 的估计

$$S_R^2 = \frac{M_2 - M_4}{5} \quad S_R = 0.835 \text{mm}$$

$$S_E^2 = \frac{M_3 - M_4}{12} \quad S_E = 0.1004 \text{mm}$$

$$S_M^2 = M_4 \quad S_M = 1.576 \text{mm}$$

合成标准不确定度 $\mu_c(x_i)$:

$$\mu_c(x_i) = \sqrt{S_R^2 + S_E^2 + S_M^2} = 1.786 \text{mm} = 0.001786 \mu\text{m}$$

在合成标准不确定度 $\mu_c(x_i)$ 确定后, x_i 的扩展不确定度

U_p 是执行概率 P 包含因子的 k_p 的倍数即: $U_p = k_p \mu_c(x_i)$ 。

样件球面 20° 范围取评定长度为 2 个取样长度, 置信概率 $P = 95.45\%$ 时, 包含因子 $k_p = 2$ (一般取置信概率 $k_p = 2$), 其扩展不确定度: $U_{95.45} = 2\mu_c(x_i) = 3.572 \text{mm}$; 测量精度完全能满足测量 $R_a 0.012$ 的检测需求。

5 结论

采用第四条所述测量方案对微小球面的高精度粗糙度进行测量, 充分利用了测量设备功能, 能准确有效地控制测量过程, 并对重复测量的数据进行了不确定度分析, 能够满足该微小球面的高精度粗糙度的测量, 解决了该测量难题, 对该关键零件的重要参数进行了准确判定。

参考文献

- [1] 李岩, 华国梁. 精密测量技术 [M]. 北京: 中国计量出版社, 2001-09
- [2] JJF1105-2003. 触针式表面粗糙度测量仪标准规范
- [3] JJF1059-1999. 测量不确定评定表示

(收稿日期 2011-03-11)

(上接第 15 页)

行, 抛光头与工件表面接触状态随时间发生了改变; 磨料的流动性在抛光的不同区域以及在不同的抛光时间内不一样; 在实际抛光接触区域内球形抛光工具自转产生的线速度不完全相等; 由测量带来的误差等。

5 结论

通过上面对球形抛光工具去除函数的研究, 建立了该球形抛光工具的去函数模型, 并进行了实验验证, 得出以下结论:

- ① 球形抛光工具的去函数形状趋于高斯分布, 能较好的收敛工件面形误差, 且加工效率较高。
- ② 球形抛光工具与工件接触区域的压强中间最大, 向边缘逐渐减小, 到边缘过渡到零, 并且加工时接触区域面积较小, 即去除函数作用区域很小, 且可以运行到工件表面的任何一点, 对边缘的修正作用更好, 可避免球形抛光工具在边缘压强突变产生边缘效应以及高频分量误差。

③ $\frac{w_y}{w_z}$ 具有不同的值时, 可得到不同的去除函数形

状。当 $\frac{w_y}{w_z}$ 大于 1/10 时 (球头半径为 50mm, 实测接触区域半径为 2.5mm), 公转速度对去除函数的影响可以忽略不计, 此时球形抛光工具自转速度为主要抛光速度, 其公转的速度只是改变其加工纹路方向, 对于面形精度的提高及粗糙度的改善有一定作用。在实际加工中, 公转速度的这一作用可被工件的移动来代替。

参考文献

- [1] 范斌, 杨力, 曾志革等. 应力盘智能控制盘面面形的表征方法及检测技术的研究 [J]. 光学技术, 2005, 31(5): 751-753
- [2] 张峰, 余景池, 张学军. 磁流变抛光技术 [J]. 光学精密工程, 1999, 7(5): 1-7
- [3] Yang M Y, Lee H C. Local material removal mechanism considering curvature effect in the polishing process of the small spherical lens die [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2001, 116: 298-305
- [4] 王权徒, 刘民才, 张虹霞. 数控抛光技术中抛光盘的去除函数 [J]. 光学技术, 2000, 26(1): 32-34

(收稿日期 2011-02-26)