

工业旋转椭球体外形质量检测方法

李建松¹ 冯文灏¹ 李欣¹

(1 武汉大学遥感信息工程学院, 武汉市珞喻路 129 号, 430079)

摘要:介绍了基于电子全站仪和 PC 计算机及有关数据处理软件, 进行工业旋转椭球体外形加工质量检测的原理和方法, 讨论了检测应提供的检测内容和指标计算方法, 特别提出了适应于作为外形检测指标的法向距概念, 对检测结果进行了分析。实践证明, 检测方法适用于缺乏纹理的较难用近景摄影测量方法处理的大型工艺工业部件质量检测。

关键词:工业测量; 外形质量检测; 旋转椭球体

中图法分类号: P234. 1; TB2

在大型工业部件的加工工艺中, 某一整体设计的部件因加工条件的限制, 经常分成几个部分分别加工, 之后再连接成整体部件。每一部分的加工质量直接影响到整体连接质量, 特别是结合部位的形状。对各部分进行外形加工质量检测, 并进行计算机模拟组装, 及时对加工工件进行质量监督和指导, 在现代工业应用中具有实际的技术意义。国内在开展大型工业工艺物体检测方面的研究和应用相对比较落后, 特别是亚 mm 级的精度检测方面更是如此。在检测手段上目前还主要停留在使用机械量测工具水平上。本文介绍的基于全站仪与计算机联机作业的检测方法, 取得了良好效果。它所涉及的大型工业部件为一扁旋转椭球体, 其旋转椭圆的长半轴为 5 750mm, 短半轴为 1 127.5mm, 旋转轴为短轴。加工时, 椭球体按 120° 等分为 3 等份, 并切除了正三角部分(虚线部分), 如图 1 所示。检测内容包括外形工艺水平、椭球体的实际长轴、短轴, 切口部分的弦椭圆的长、短轴等几何参数。为防止组装后出现“梅花瓣”形状, 组装公差要求不大于 1.5mm, 对椭球模具检测精度要求高于 1mm。这就要求检测方法应能提供高于 1mm 的精度检测水平。

1 基本原理和方法

检测的基本原理是将待检测目标任意放置于

高精度工业控制网中^[1, 2] (为了稳定性原因, 切口向下), 在其上布置足够数量和密度的标志点, 精确测定其三维坐标。利用这些测量标志点坐标, 按照旋转椭球方程, 拟合目标所在的椭球面, 那么, 就可求得实际椭球参数和切口弦椭圆参数。外形检测则依据数据点内插得到的数字表面模型(digital surface model, DSM)的三维图形及等值线图, 用于视觉观察判断或产生断面数据, 其外形工艺指标则通过数据点到设计椭球体表面在法向量方向的法向距反映出来。

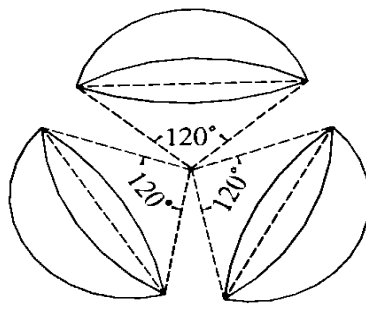


图 1 三等分并切去正三角部分的扁旋转椭球体

Fig. 1 Oblate Ellipsoid of Rotation of Cut in Equilateral Triangle

1.1 目标标志点量测

目标标志点是按照一定原则和疏密程度合理布设在目标表面的特征点和碎部点, 是拟合椭球和进行 DSM 内插的基本数据点。将被测目标置于如图 2 所示的 4 个测墩的高精度工业控制网

中, 在每个测墩上架设全站仪, 观测角直接通过数据通讯导线传入 PC 机进行前方交会处理, 实时获取测墩坐标系标志点坐标。控制网的建立方法参见文献[1]。

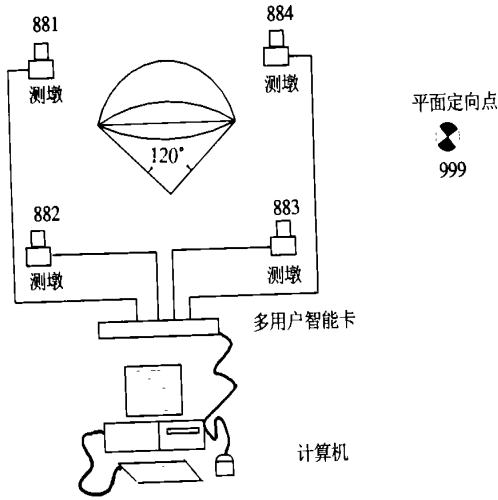


图 2 现场作业配置

Fig. 2 Configuration of Work Site

1.2 工件坐标系的确定与坐标转换

为简化计算, 需将在测墩坐标系 O_2-XYZ (高精度工业控制网所在坐标系) 任意放置的待检测工件摆到近似水平位置, 即定义一个以 O_1 为原点, 且 O_1 过 O_1A 的弦椭圆的一长轴端点, 坐标面 xO_1z 过 OO_1A 平面或 O_1AB 平面 (O 为椭球中心, O_1, A 为弦椭圆的长轴两端点, B 为旋转椭球体对称面上的任一点), 向上为 z 轴的左手笛卡尔坐标系 O_1-xyz 作为待检测工件的坐标系 (如图 3 所示)。

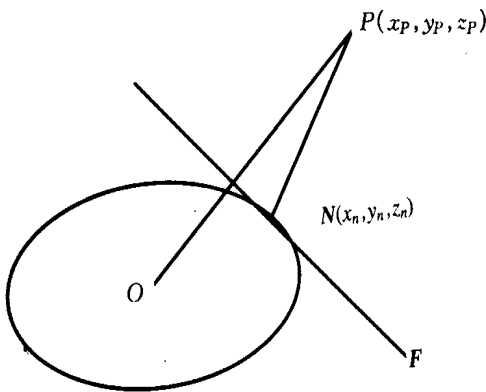


图 3 工件坐标系与测墩坐标系的位置关系

Fig. 3 Positional Relation between Industrial Part Coordinates System and Pillars Coordinates System

测得的测墩坐标系坐标经三维变换后, 由 O_2-XYZ 变换到 O_1-xyz 坐标系。三维变换的条件是分别取对应特征点坐标。

1) 取工件坐标系:

$$O_1(x_c, y_c, z_c);$$

$$A(x_d, y_c, z_c);$$

$$B(y_c,)$$

其中, x_c, y_c, z_c 为任意假定数值 (可全部取值为零); x_d 为 O_1A 的长度, 由对应的测墩坐标计算; B 点坐标只取 y_c , 而 x 和 z 的坐标值未知。

2) 取测墩坐标系:

$$O_1(X_{O_1}, Y_{O_1}, Z_{O_1});$$

$$A(X_A, Y_A, Z_A);$$

$$B(X_B, Y_B, Z_B)$$

其坐标为测墩坐标系对应点坐标。

坐标变换公式为:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta X \\ \Delta Y \\ \Delta Z \end{bmatrix} + R \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中, $\Delta X, \Delta Y, \Delta Z$ 为坐标平移量, R 为旋转矩阵。

计算时根据给定条件, 分步作绕 Z, Y, X 轴的二维平面旋转变换, 并依次计算 K, Φ, Ω 角, 再由其旋转角的正弦和余弦函数构成 R 。根据 R 对所有测墩坐标作三维变换。

1.3 旋转椭球体的最小二乘拟合

在工件坐标系, 由于工件已“摆平”, 拟合旋转椭球面的理论方程可表示为下式:

$$\frac{(x-x_0)^2}{a^2} + \frac{(y-y_0)^2}{b^2} + \frac{(z-z_0)^2}{c^2} = 1 \quad (2)$$

式中, x_0, y_0, z_0 为待定椭球中心坐标, a, b 分别为待定椭球的长轴和短轴。根据最小二乘原理, 将椭球方程线性化, 并根据 $V^T V = \min$ 的原则, 其误差方程如下:

$$v = Adx_0 + Bdy_0 + Cdz_0 + Dda + Edb - F \quad (3)$$

式中, $A = \frac{2(X-X_0)}{a^2}$; $B = \frac{2(y-y_0)}{b^2}$; $C = \frac{2(z-z_0)}{a^2}$; $D = \frac{2((X-X_0)^2 + (z-z_0)^2)}{a^2}$; $E = \frac{2(y-y_0)^2}{b^2}$; $F = \frac{(x-x_0)^2}{a^2} + \frac{(y-y_0)^2}{b^2} + \frac{(z-z_0)^2}{a^2} - 1$ 。法方程为:

$$N^T N X = N^T L \quad (4)$$

式中, N 为误差方程系数向量; L 为常数项向量; X 为未知数向量。迭代求解未知数的初始值取 $x_0 = 5750 \cos 30^\circ, y_0 = 0, z_0 = -5750 \sin 30^\circ, a = 5750, b = 1127$ 。

1.4 检测内容、指标与方法

检测的主要内容和指标为：①拟合椭球体的长半轴、短半轴与理论设计值的差值，反映球体大小的指标；②过 O_1A 的弦椭圆的长半轴、短半轴与理论设计值的差值，反映切口的形状和口径的指标；③数据点到理论椭球面法线方向距离（简称法向距），反映局部形状差异的工艺指标；④三维图形显示及等值线图，数据的可视化处理，直观视觉指标。

上述①、②项指标在获得拟合椭球参数后，很容易计算。椭球长、短轴直接由拟合结果求出，弦椭圆的长轴、短轴分别按下式计算：

$$\text{弦椭圆的长轴} = (\sqrt{3}/2)a \quad (5)$$

$$\text{弦椭圆的短轴} = (\sqrt{3}/2)b \quad (6)$$

为简化法向距的计算，将工件坐标系的原点由 O_1 平移到拟合椭球中心 (x_0, y_0, z_0) ，则法向距的计算如图 4 所示。由观测数据点 P 向理论椭球面作法线 PN ，得交点 N ，距离 PN 即是所求法向距。数据点 P 可能在理论椭球面的内部或外部， PN 应为小数值。 N 点坐标按下式求解非线性方程组（由理论椭球表面外的数据点的法线方程和理论旋转椭球方程组成）：

$$\left. \begin{aligned} \frac{a^2}{x_n}(x_p - x_n) &= \frac{b^2}{y_n}(y_p - y_n) = \frac{a^2}{z_n}(z_p - z_n) \\ \frac{x_n^2}{a^2} + \frac{y_n^2}{b^2} + \frac{z_n^2}{a^2} &= 1 \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

式中， a, b 分别是理论椭球长半轴、短半轴； x_p, y_p, z_p 为坐标原点平移到 O 点后的数据点坐标； x_n, y_n, z_n 为 P 点法线与椭球面的交点坐标。

观测数据的可视化处理根据线性内插的不规则三角网 DSM 内插算法及其三维显示算法实现，可提供任意断面的生成。

2 结果分析

对上述椭球某部分实际观测获得的 188 个数

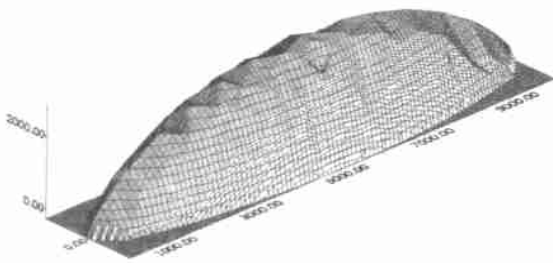


图 5 实际的三等分椭球体数字表面模型

Fig. 5 Digital Surface Model of a Part of Oblate Ellipsoid of Rotation

据点进行处理，结果见表 1、表 2，可视化图形如图 5、图 6 所示。分析可知，椭球长轴小于理论值 3.48mm，弦椭圆长轴小 3.02mm，短轴差值均在 1.2mm 之内。据统计，法向距绝对值大于 1.5mm 的数据点占 65%，均方差 2.06mm，表明实际外形与设计有明显差别，这说明该工件的检测结果为不合格产品。对数字表面模型和等值线图显示的视觉模型的直观判断结果与数据分析结果相比，结果也基本一致。

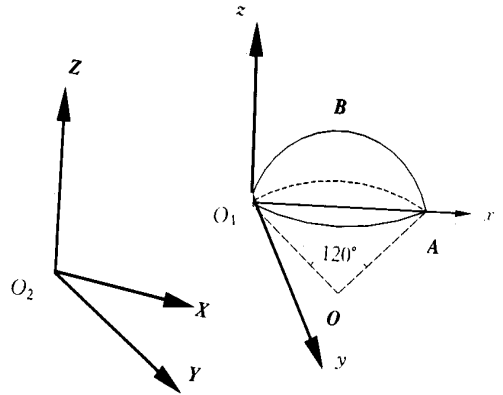


图 4 计算法向距

Fig. 4 Distance in Direction of Normal Line

表 1 旋转椭球和弦椭圆长半轴、短半轴理论值与检测值对照表/mm

Tab. 1 Comparison Between Theory Design and Fitting Oblate Ellipsoid of Rotation/mm

	旋转椭球		弦椭圆	
	长半轴	短半轴	长半轴	短半轴
理论	5 750.00	1 127.50	4 979.65	976.44
拟合	5 746.52	1 128.64	4 976.63	977.43
差值	3.48	-1.14	3.02	1.01

3 结语

影响检测结果的因素主要有高精度控制网本身的精度。使用文献[1]中的建网方法，测角用的全站仪测角精度 $2''$ ，使用经检定的日内瓦尺测

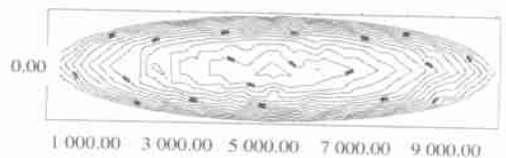


图 6 实际三等分椭球体等值线

Fig. 6 Isometric Line Graph of a Part of Oblate Ellipsoid of Rotation

表 2 部分数据点法向距/ mm

Tab. 2 Normal Distance at a Part of Data Marker Points/ mm

点号	x_p	y_p	z_p	D_x	D_y	D_z	法向距
1	5 095. 63	1 010. 41	- 280. 73	0. 00	2. 73	0. 27	2. 74
2	721. 51	503. 41	- 162. 82	0. 94	- 2. 82	- 0. 58	- 3. 02
3	1 595. 50	722. 51	- 165. 11	- 0. 84	0. 23	0. 03	0. 24
4	2 590. 33	869. 58	- 168. 87	- 0. 27	2. 45	0. 29	4. 94
5	3 585. 23	956. 40	- 168. 80	- 0. 30	4. 90	0. 53	9. 38
6	4 330. 22	988. 41	- 168. 99	- 0. 10	3. 36	0. 95	4. 26
...
183	4 773. 67	- 334. 02	2 613. 47	0. 09	2. 48	- 3. 15	- 2. 93
184	5 081. 73	- 189. 82	2 800. 13	0. 00	2. 15	- 2. 43	- 3. 25
185	5 467. 87	- 331. 12	2 614. 43	- 0. 11	2. 49	- 1. 57	- 2. 95
186	5 753. 85	- 207. 53	2 745. 44	- 0. 24	1. 97	- 2. 02	- 2. 83
187	5 999. 68	- 332. 35	2 548. 90	- 0. 30	2. 89	- 1. 79	- 3. 41
188	6 625. 53	- 950. 42	2 374. 79	- 0. 51	3. 05	- 1. 73	- 9. 54

注: 法向距均方差为 2. 06mm。

算已知边长, 经自由网平差, 获取控制点点位中误差最大为 ±0. 1mm。标志点的分布要合理, 疏密能反映椭球面的曲面变化。本例中, 标志点的测量中误差为 ±0. 2mm。这种基于电子全站仪和计算机数据处理的外形检测方法特别适应于缺乏纹理的较难用近景摄影测量方法检测的大型工业物体。

参 考 文 献

- 1 冯文灏, 高新桥, 李欣, 等. 工业测量中特高精度控制网的建立方法. 武汉测绘科技大学学报, 1999, 25

(1): 70~73

- 2 冯文灏, 李建松, 李欣, 等. 用于工业部件放样与检测的特高精度工业测量 3 维控制网的建立. 测绘学报, 2000, 29(4): 362~368
- 3 沈永欢, 梁在中, 许履瑚, 等. 实用数学手册. 北京: 科学出版社, 1997. 68~94
- 4 李德仁, 郑肇葆. 解析摄影测量. 北京: 测绘出版社, 1992. 10

作者简介: 李建松, 副教授, 博士生. 现主要从事数字近景摄影测量、地理信息系统和遥感技术应用研究.

E-mail: Ljjsong@public. wh. hb. cn

Shape Quality Inspection of Industrial Oblate Ellipsoid of Rotating Object

LI Jiansong¹ FENG Wenhao¹ LI Xin¹

(1 School of Remote Sensing and Infomation Engineering, Wuhan University, 129 Luoyu Road, Wuhan, China 430079)

Abstract: In industrial manufacture, the shape quality of every division affects that of the whole object. This paper presents a means to control the quality of every part and simulate assembly on PC computer. The principle, inspection index and contents of the means are described in detail. Especially, a concept of distance in normal on ellipsoid surface as index of shape quality inspection is presented.

Key words: industrial measurement; shape quality inspection; rotary ellipsoid object

About the author: LI Jiansong, associate professor, Ph D candidate. His major researches are remote sensing, GIS and digital close range photogrammetry.

E-mail: Ljjsong@public. wh. hb. cn