

激光跟踪仪在大尺寸结构件形位公差测量中的应用

唐小聪 丁建一 覃宇峰
南京市计量监督检测院
DOI: 10.12238/ems.v6i11.10034

[摘 要] 大尺寸结构件的质量控制离不开准确的形位公差测量。采用激光跟踪仪对某型号大尺寸机械零部件进行测量，通过采集坐标点并对数据进行计算处理，评价指定平面的平行度。以坐标点为基础，进行了测量不确定度分析，结果表明，通过激光跟踪仪测量大尺寸结构件平行度的扩展不确定度优于 0.01mm。
[关键词] 大尺寸结构件；坐标；平行度；激光跟踪

Application of the Laser tracker in the Shape and Position Tolerance Measurement
of the Large-size Structural Parts
Tang Xiaocong, Ding Jianyi, Qin Yufeng
Nanjing Institute of Measurement and Testing Technology

[Abstract] The quality control of the large size structural parts is inseparable from the accurate measurement of the shape and position tolerance. A large mechanical part of a model was measured by a laser tracker, and the parallelism of the specified plane was evaluated by collecting coordinate points and calculating the data. Based on the coordinate points, the measurement uncertainty was analyzed. The results show that the extended uncertainty of the parallelism of large structural parts measured by the laser tracker was better than 0.01mm.
[Keywords] large-size structural parts; coordinate; parallelism; laser tracking

引言

大尺寸结构件的质量控制离不开准确的测量，特别是对其形位公差的准确测量^[1-3]。以飞机零部件、大型风电齿轮箱等为代表的大尺寸结构件，其外形尺寸大、易变形、不易搬运，对其关键尺寸特别是形位公差进行快速、高精度的测量是保证其制造精度的必然要求^[4]。

随着测量技术的快速发展，以坐标测量技术为代表的数字化测量方法已经成为现场大尺寸结构件测量的重要技术手段。激光跟踪仪以其测量范围大、测量效率高、可实现动态测量等优点，已经成为了目前高端装备制造业中广泛使用的工业型坐标测量设备，可应用于工业机器人检测^[5]、大型机床调试^[6]、工程测量^[7-10]等领域。

本文基于坐标测量技术，针对某型号大型风电齿轮箱使用的大尺寸机械零部件的平行度测量要求，利用激光跟踪仪配合靶球为主要计量仪器开展试验，通过采集坐标点并进行相应的拟合计算，对其平行度进行测量，并进行测量不确定度分析。

1 试验方法

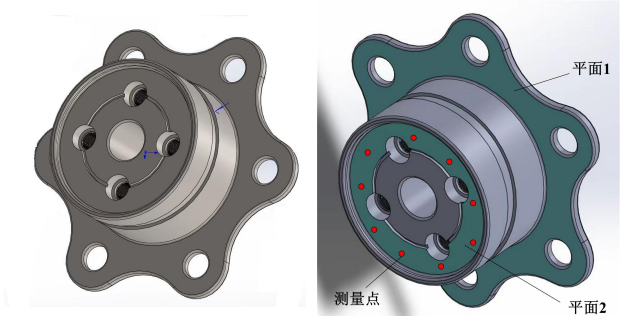


图 1 产品三维造型图 图 2 测量示意图
图 1 为某型号大型风电齿轮箱使用的大尺寸机械零部件

三维造型图，需要测量上下两平面间的平行度。试验时，将被测机械零部件可靠安放至合适位置，并对待测量表面进行去油清洗等处理。恒温 8 小时之后，利用激光跟踪仪在平面 1 上采集 9 个坐标点并进行平面拟合，以平面 1 作为基准面，在平面 2 上使用跟踪仪采集大致均匀分布的 9 个坐标点，分别计算各坐标点到平面 1 的距离，以最大距离和最小距离的差值作为该机械零部件平行度值。按照上述方法重复测量 6 次，以 6 次测量结果的平均值作为最终平行度的测量结果。测量示意图如图 2 所示。试验时，环境温度控制在(20±2)℃，相对湿度不超过 65%。

2 试验结果

各坐标点实测结果如下表所示，按照上述试验方法计算，两平面平行度测量结果为 0.006mm。

表 1 坐标点实测结果一览表

序号	距离实测值 (mm)					
	第 1 次	第 2 次	第 3 次	第 4 次	第 5 次	第 6 次
1	166.414	166.414	166.411	166.412	166.410	166.413
2	166.416	166.415	166.412	166.413	166.408	166.415
3	166.417	166.416	166.414	166.414	166.406	166.417
4	166.416	166.416	166.414	166.413	166.410	166.414
5	166.418	166.419	166.410	166.416	166.409	166.418
6	166.414	166.420	166.412	166.416	166.408	166.413
7	166.411	166.418	166.413	166.415	166.407	166.414
8	166.413	166.415	166.412	166.416	166.404	166.415
9	166.412	166.417	166.408	166.414	166.403	166.416
最大值	166.418	166.420	166.414	166.416	166.410	166.418
最小值	166.411	166.414	166.408	166.412	166.403	166.413
平行度	0.007	0.006	0.006	0.004	0.007	0.005
平行度实测平均值		0.006mm				

3 测量不确定度分析

测量过程中相关坐标点选取规则、元素拟合计算方法依据 GB/T 1958-2017《产品几何技术规范 (GPS) 几何公差 检测与验证》进行, 下面依据 JJF 1059.1-2012《测量不确定度评定与表示》进行测量不确定度分析。

3.1 测量模型

$$Y = X_{\max} - X_{\min} \quad (1)$$

式中:

$X_{\max}$ ——最大距离值;

$X_{\min}$ ——最小距离值;

Y ——被测对象平行度值。

3.2 方差和灵敏系数

按不确定度传播定律, 输出量估计值 Y 的方差为:

$$u^2(Y) = c_1^2 u^2(X_{\max}) + c_2^2 u^2(X_{\min})$$

其中, 分量灵敏系数为

$$c_1 = 1, c_2 = 1$$

则:

$$u^2(Y) = u^2(X_{\max}) + u^2(X_{\min}) \quad (2)$$

3.3 标准不确定度来源

由于是采用逐点测量法, 直接得到坐标值, 因此每一个测量点的测量结果是独立的, 所以可以认为每一测量点到平面的距离的测量不确定度是相同的, 用 u_0 来表示不确定度值。由于默认测量点的数目和位置分配是合适的, 所以忽略采样点数目和位置引起的不确定度^[11]。因此测量点的不确定度主要由测量设备与测量环境引起, 具体包括以下:

3.3.1 激光跟踪仪的测量重复性引入的不确定度分量:

u_1 ;

3.3.2 激光跟踪仪的距离测量示值误差引入标准不确定度分量: u_2 ;

3.3.3 环境温度引入标准不确定度分量: u_3 ;

如此, 公式应为:

$$u_0^2 = u_1^2 + u_2^2 + u_3^2$$

标准不确定度一览表见表 2。

表 2 标准不确定度一览表

序号	标准不确定度		
	标准不确定度来源	符号	标准不确定度值
1	测量重复性	u_1	0.5 μm
2	仪器示值误差	u_2	0.231 μm
3	环境温度	u_3	0.332 μm

3.4 计算标准不确定度分量

3.4.1 重复性引入的不确定度分量 u_1

重复测量被测表面上某一固定点 10 次, 根据测量点的 (x, y, z) 值, 分别计算 10 次的 x 标准偏差、 y 的标准偏差和 z 的标准偏差, 取三者中较大值作为激光跟踪仪测量重复性引入的不确定分量。计算出标准偏差 $s = 3.6 \mu\text{m}$ 。由于是以 6 次测量的平均值作为结果, 则由测量重复性引入的标准不确定度:

$$u_1 = \frac{s}{\sqrt{6}} = \frac{3.6}{\sqrt{6}} \mu\text{m} = 1.5 \mu\text{m}$$

3.4.2 激光跟踪仪距离测量误差引入的标准不确定度分量 u_2

依据溯源证书, 激光跟踪仪距离示值误差的测量不确定度 $U = (2.2 + 0.2 \times 10^{-6} L) \mu\text{m}$, 按均匀分布计算, L 按 160mm

时, 得:

$$u_2 = \frac{U}{k} = 1.2 \mu\text{m}$$

3.4.3 环境温度引入标准不确定度分量 u_3

工件测量过程中温度变化为 $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$, 服从均匀分布, 则由测量环境温度引入的不确定度为:

$$u_3 = \frac{\Delta\alpha L}{\sqrt{3}} = \frac{2 \times 11.5 \times 10^{-6} \times 160 \times 10^3}{\sqrt{3}} \mu\text{m} = 2.2 \mu\text{m}$$

由于以上各分量之间互不相关, 因此测量点的不确定度由以下公式得到:

$$u_0 = \sqrt{u_1^2 + u_2^2 + u_3^2} = 2.9 \mu\text{m}$$

3.5 合成不确定度

公式(1)中, $X_{\max}$ 、 $X_{\min}$ 均服从标准差为 2.9 μm 的正态分布, 有:

$$u_c^2 = u^2(Y) = 2u_0^2$$

$$\text{得, } u_c = 4.2 \mu\text{m}$$

3.6 扩展不确定度

$$U = k \times u_c = 2 \times 4.2 = 8.4 \mu\text{m} \approx 9 \mu\text{m}$$

4 结语

采用激光跟踪仪对某型号风电齿轮箱用的机械零部件进行平行度测量, 并以点坐标为基础, 对测量结果进行测量不确定度评价与分析。试验结果表明, 使用激光跟踪仪对大型结构件进行平行度测量, 其测量不确定度优于 0.01mm, 可以作为大尺寸结构件形位公差以及尺寸测量的重要手段。本文的研究内容对于大尺寸结构件坐标测量及其形位公差的评价具有一定的参考价值。

【参考文献】

- [1] 张威. 大型零部件的质量检测技术探究[J]. 科学技术创新, 2022, (20): 153-156.
 - [2] 李彬鹏, 茅健. 大尺寸飞机零部件检测技术研究进展[J]. 上海工程技术大学学报, 2021, 35 (04): 346-353.
 - [3] 陈晨, 王珉, 唐小聪. 大尺寸结构件变形测量方法研究与不确定度评定[J]. 计量测试与技术, 2023, 50 (06): 107-109.
 - [4] 王玉. 浅析三坐标测量形位公差(垂直度分析)[J]. 中国标准化, 2019, (20): 202-203.
 - [5] 刘福国, 高婷婷, 钱正, 叶宏武. 基于激光跟踪仪的工业机器人校准应用研究[J]. 机器人技术与应用, 2024, (04): 43-48.
 - [6] 张相鹏, 宋明山, 孙永杰, 田文杰. 基于激光跟踪仪的机床误差快速测量方法[J]. 制造技术与机床, 2024, (08): 1-10.
 - [7] 王珊, 张滋黎, 董登峰, 周维虎, 纪荣祎等. 激光跟踪仪几何结构误差标定及修正[J]. 光学精密工程, 2024, 32 (11): 1639-1652.
 - [8] 刘志伟, 马力, 康心怡. 激光跟踪仪在大型钢结构安装测量中的应用[J]. 地矿测绘, 2024, 40 (2): 38-41.
 - [9] 许志强. 激光跟踪仪在施工高程测量中的应用研究[J]. 建筑机械技术与管理, 2022 35 (06): 127-130.
 - [10] 李玉发, 徐力, 汤宝石. 激光跟踪仪在液压缸形位公差检测中的应用[J]. 液压气动与密封, 2021, (03): 88-89.
 - [11] 王东霞, 温秀兰, 乔贵方. 工件圆度误差测量不确定度评定[J]. 光学精密工程, 2018, 26 (10): 2438-2445.
- 科技项目: 国家市场监督管理总局科技计划项目 (2022 MK155)