

文章编号:1674-8190(2014)02-206-06

智能扫描仪 I-Scan 校准方法研究

丁建萍, 张俊

(中航工业西安飞机工业(集团)有限责任公司 计量处, 西安 710089)

摘要: 在激光跟踪仪发展的基础上, 发展了可扩展激光跟踪仪功能的设备——智能扫描仪 I-Scan, 而对于它的校准问题, 尚无相关国家标准或企业标准可以依据。通过智能扫描仪 I-Scan 对标准平面块规和标准球规进行扫描, 并将扫描结果与高精度测量机测量结果进行比对, 满足智能扫描仪扫描精度和定位精度的要求; 对智能扫描仪 I-Scan 的测量不确定度进行分析, 解决了智能扫描仪的校准及评定。研究结果对智能扫描仪的校准及评定具有一定的参考价值。

关键词: 激光跟踪仪; 智能扫描仪 I-Scan; 校准; 不确定度

中图分类号: V262.4

文献标识码: A

Research on Intelligent Scanner I-Scan Calibration Method

Ding Jianping, Zhang Jun

(Measurement Department, AVIC Xi'an Aircraft Industry(Group) Company, Ltd., Xi'an 710089, China)

Abstract: Based on laser tracker development, a scalable laser tracker device(intelligent scanner I-Scan) is developed. But for its calibration, neither related national standards nor enterprise standards can be based on. Comparing the results of scanning plane gauge block of standards and standards ball rules by I-Scan with the measurements by using the high precision coordinate measuring instrument, it shows that the I-Scan can meet the requirements of intelligent scanner accuracy and positioning accuracy. Finally, the uncertainty of I-Scan measurements is analyzed, and the problem of intelligent scanner calibration and evaluation is solved. The research results are of a certain reference value for the I-scan calibration and evaluation.

Key words: laser tracker; intelligent scanner I-Scan; calibration; uncertainty

0 引言

随着工业技术的迅速发展, 对大型零件的加工精度、测量精度、工装和型架数字化装配提出更高要求。特别是飞机、船舶等体积大、曲面复杂物体的外形测量和零部件高精度装配, 单独采用激光跟踪仪已无法满足目前测量和装配的要求。在激光跟踪仪发展的基础上, 发展了一种可扩展激光跟踪仪功能的设备——智能扫描仪 I-Scan。

I-Scan 是激光跟踪仪突破性的附件之一, 扩展了激光跟踪仪系统的功能, 具有手持便携、非接触

集合测量、精度高、稳定性好、可适用于各种工作环境等优点。对于 I-Scan 的校准评定, 尚无相关国家标准或企业标准可以依据。目前, 国外只在制造出厂时通过标准球体进行扫描仪的标定; 国内扫描仪校准评定的方法主要是通过双频激光干涉仪建立标准长度, 扫描仪扫描标准长度, 并与激光干涉仪建立的标准长度进行比较, 得到测长误差^[1]。

本文通过比对的方法, 总结出扫描仪的扫描精度和定位误差的校准评定方法, 为智能扫描仪 I-Scan 的校准、验收提供了相关依据。

1 智能扫描仪 I-Scan 的工作原理

智能扫描仪工作时, 必须与 API 激光跟踪仪配套使用。正常联机工作时, 激光跟踪仪发射的激光束经过智能扫描仪头部反射镜反射回激光跟踪

仪,通过干涉测量方法实时得到智能扫描仪在激光跟踪仪坐标系中的位置以及姿态;建立好仪器坐标系,扫描仪扫描过程中,其内部 CCD 识别扫描仪激光源照射到被测物体表面的激光线;然后通过内部的数字转换模块将其数字化产生数据点,随着扫描仪的移动,实现对整个被测面的数字化,并将数据信息通过电缆传回扫描仪控制器;最后通过 Ployworks 软件进行数据分析。API 智能扫描仪 I-Scan 如图 1 所示。

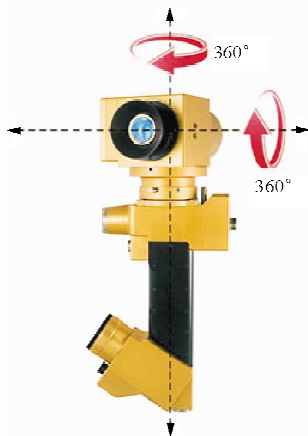


图 1 API 智能扫描仪 I-Scan

Fig.1 API intelligent scanner I-Scan

2 智能扫描仪 I-Scan 校准方法

智能扫描仪校准时,配套使用校准合格的 T3 激光跟踪仪(T3 激光跟踪仪校准符合国家检定规程 JJF1242-2010 及企业标准 Q/4AF17.1-2010)。通过智能扫描仪 I-Scan 对标准平面块规和标准球规进行扫描,将扫描结果与高精度测量机测量结果进行对比,并对扫描仪测量不确定度进行分析,给出扫描仪的测量不确定度,从而总结出合理有效的校准方法,具体工作流程如图 2 所示。

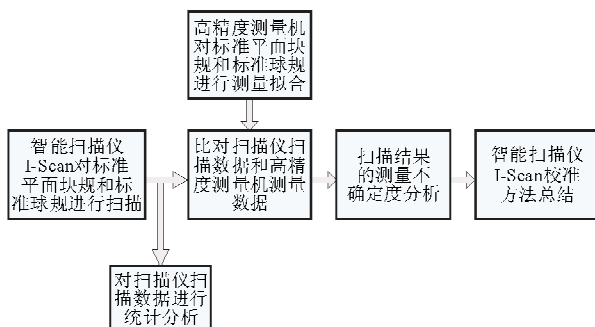


图 2 智能扫描仪 I-Scan 校准方法研究框图

Fig.2 Calibration method flow chart of intelligent scanner I-Scan

2.1 智能扫描仪系统

2.1.1 智能扫描仪扫描标准平面块规

智能扫描仪扫描标准平面块规系统如图 3 所示,其原理是通过智能扫描仪 I-Scan 中的 CCD 识别激光源照射到被测物体表面的激光线,然后通过内部的数字转换模块将其数字化产生数据点,随着扫描仪的移动,实现对整个被测面的数字化,进而得到被测面的数据信息。通过扫描标准平面块规的平面度,并与标准平面块规的标准值比对,可以确定仪器的扫描精度。

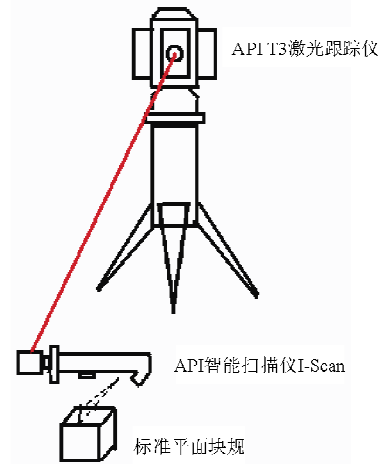


图 3 智能扫描仪扫描标准平面块规

Fig.3 Intelligent scanner to scan standard flat gauge

2.1.2 智能扫描仪扫描标准球规

智能扫描仪扫描标准球规系统如图 4 所示。

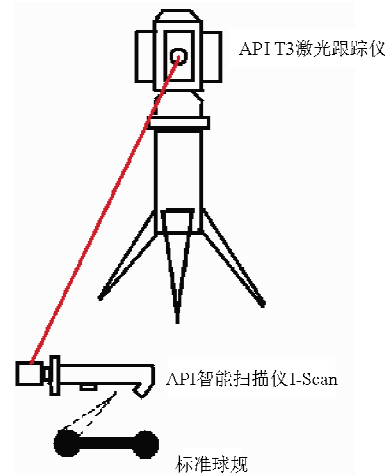


图 4 智能扫描仪扫描标准球规

Fig.4 Intelligent scanner to scan standard ball gauge

智能扫描仪 I-Scan 是激光跟踪仪的一个特殊附件,内部有矢量转换模块,其精度会影响测头的定位精度。通过对标准球规的扫描,将扫描点在 Ployworks 软件中拟合球,得到标准球规的球心距,与球心距的标准值比对,可以确定扫描仪的定位误差。

2.2 智能扫描仪扫描标准平面块规数据分析

在环境温度为 $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$ 的变化范围内,采用图 3 所示的智能扫描仪系统对标准平面块规进行扫描,根据标准平面块规的扫描原理,应用 Ployworks 软件进行扫描结果的平面拟合,得到平面的平面度,从而反映扫描仪的扫描精度。Ployworks 软件平面拟合如图 5 所示,平面度拟合数据如表 1 所示。

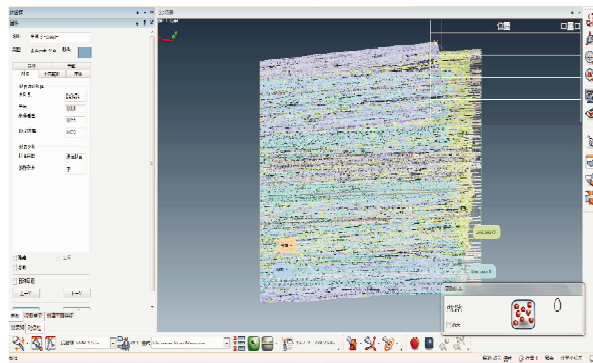


图 5 Ployworks 软件平面拟合

Fig. 5 Ployworks software plane fitting

表 1 Ployworks 软件的平面度拟合数据

Table 1 Plane fitting data by Ployworks software

测量序号	平面度/mm	测量序号	平面度/mm
1	0.060	6	0.076
2	0.069	7	0.072
3	0.055	8	0.075
4	0.069	9	0.077
5	0.071	10	0.083

平面度测量平均值:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i = 0.071 \text{ mm} \quad (1)$$

平面度测量标准偏差:

$$s_1 = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} = 8.2 \mu\text{m} \quad (2)$$

将平面度测量平均值作为扫描仪的扫描精度,即扫描精度为 0.071 mm;利用贝塞尔公式计算的实验标准差可被视为被测件贡献的标准不确定度,即 $u_1 = s_1 = 8.2 \mu\text{m}$ 。

2.3 智能扫描仪扫描标准球规数据分析

在环境温度为 $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$ 的变化范围内,采用图 4 所示的智能扫描仪系统对标准球规进行扫描,根据标准球规的扫描原理,应用 Ployworks 软件进行扫描结果的球面拟合,得到两球的球心距,从而反映扫描仪的定位精度。Ployworks 软件球面拟合如图 6 所示,球心距拟合数据如表 2 所示。

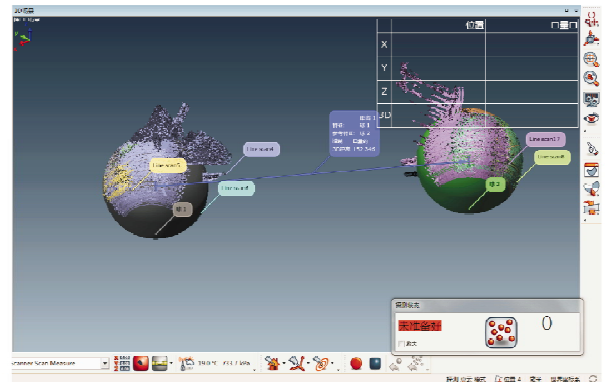


图 6 Ployworks 软件球面拟合

Fig. 6 Ployworks software sphere fitting

表 2 Ployworks 软件的球心距拟合数据

Table 2 Fitting data of the ball center distance by Ployworks software

测量序号	球心距/mm	测量序号	球心距/mm
1	152.366	6	152.357
2	152.365	7	152.382
3	152.373	8	152.360
4	152.370	9	152.368
5	152.380	10	152.373

球心距测量平均值:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i = 152.371 \text{ mm} \quad (3)$$

球心距测量标准偏差:

$$s_2 = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} = 8.0 \mu\text{m} \quad (4)$$

扫描两球球心距的平均值反映了智能扫描仪曲面扫描和长度测量的能力,综合反映出智能扫描

仪的定位误差,即定位误差为152.371 mm;利用贝塞尔公式计算的实验标准差可被视为被测件贡献的标准不确定度,即 $u_2 = s_2 = 8.0 \mu\text{m}$ 。

3 智能扫描仪 I-Scan 的测量不确定度分析

目前,常用的坐标测量仪器的不确定度评定有两种方法:①通过对标准件的测试进行评定;②通过与测量精度更高的仪器比对,将两者的测量结果进行比较,得出仪器的测量不确定度。对智能扫描仪 I-Scan 的测量不确定度分析,综合两种不确定度评定方法,采用高精度测量机得到标准平面块规平面度和标准球规直径、球心距作为理论值,并与智能扫描仪 I-Scan 扫描值进行比对,分析影响扫描仪扫描精度的各种因素的不确定度,最终得出扫描仪的测量不确定度。

3.1 高精度测量机标准值的测定

高精度测量机测量标准平面块规和标准球规时的环境参数包括:环境温度为 $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$,空间温度梯度为 $0.5^\circ\text{C}/\text{m}$,气压约为 738 kPa。测量得到标准平面块规的平面度为 0.030 mm,标准球规的球心距为 152.404 mm。

将扫描仪扫描得到的平面度和球心距的数据与高精度测量机测量数据进行比对,可以满足厂家提供的扫描仪扫描精度 $80 \mu\text{m} + 2 \text{ ppm}$ 和定位精度 $50 \mu\text{m}$ (在小于等于 10 m 的范围内,定位精度不超过 $50 \mu\text{m}$) 的要求,同时说明采用比对的方法可以实现智能扫描仪 I-Scan 的评定。

3.2 扫描仪不确定度分析

对扫描仪 A 类和 B 类不确定度进行分析,扫描仪重复性扫描的实验标准差可被视为被测件贡献的 A 类标准不确定度。B 类不确定度评定主要包含四种影响因素的不确定度^[2-10]:①扫描仪示值的标准不确定度;②高精度测量机示值误差引入的不确定度;③热膨胀系数引入的不确定度;④环境温度对测量引入的不确定度。

3.2.1 A 类不确定度评定

智能扫描仪对标准平面块规和标准球规扫描数据的标准差分别记为 s_1 和 s_2 ,可利用贝塞尔公

式(式(5))计算得到。

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \quad (5)$$

式中: x_i 为 10 次重复性测量值; \bar{x} 为 10 次重复性测量值的算术平均值; n 为测量次数。

用贝塞尔公式计算的实验标准差可被视为被测件贡献的标准不确定度,即标准不确定度 $u_1 = s_1 = 8.2 \mu\text{m}$; $u_2 = s_2 = 8.0 \mu\text{m}$ 。

3.2.2 B 类不确定度评定

(1) 扫描仪示值的标准不确定度

均方根误差值是评价曲面轮廓度的常用指标,能够定量给出实际曲面相对于理想曲面的平均偏差。

智能扫描仪 I-Scan 示值误差为

$$\delta_i = L_i - T_i \quad (6)$$

式中: L_i 为智能扫描仪扫描标准平面块规的平面度值; T_i 为高精度测量机测量的标准平面块规平面度标准值。

均方根误差值:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \delta_i^2} \quad (7)$$

按均匀分布,引入扫描精度的不确定分量:

$$u_3 = \frac{\sigma}{\sqrt{3}} = 23.9 \mu\text{m} \quad (8)$$

扫描仪定位误差的不确定度分量:

$$u_4 = \frac{\sigma}{\sqrt{3}} = 20.5 \mu\text{m} \quad (9)$$

(2) 高精度测量机示值误差引入的不确定度分量

由高精度测量机示值误差引入的误差为

$$\Delta L_1 = L_0 + \delta \cdot L \quad (10)$$

式中:定值 $L_0 = 0.6 \mu\text{m}$; δ 为高精度测量机的示值误差; L 为测量长度。

按均匀分布,引入扫描精度的不确定分量(测量长度为 0.1 m):

$$u_5 = \frac{\Delta L_1}{\sqrt{3}} = 0.5 \mu\text{m} \quad (11)$$

按均匀分布,引入扫描定位误差的不确定分量(测量长度为 0.052 m):

$$u_6 = \frac{\Delta L_1}{\sqrt{3}} = 0.4 \mu\text{m} \quad (12)$$

(3) 热膨胀系数引入的不确定度分量

经校准过的激光跟踪仪干涉仪的波长补偿误差的测量示值误差优于 $10^{-6}L$, L 为测量长度。

由热膨胀系数引入的误差为

$$\Delta L_2 = L \cdot \Delta\alpha \cdot \Delta t \quad (13)$$

式中: L 为测量长度; $\Delta\alpha$ 为热膨胀系数的变化量; Δt 为环境温度变化量。

万象距离标准器热膨胀系数 $\alpha = (11.5 \pm 1) \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$, 环境温度为 $(20 \pm 2) \text{ } ^\circ\text{C}$, 温度平均值偏离不超过 $\Delta t = 0.2 \text{ } ^\circ\text{C}$ 。

按均匀分布, 引入扫描精度的不确定分量(测量长度为 2.5 m, 激光跟踪仪干涉仪示值误差优于 $2.5 \text{ } \mu\text{m}$):

$$u_7 = \frac{\Delta L_2}{\sqrt{3}} = 0.3 \text{ } \mu\text{m} \quad (14)$$

(4) 环境温度对测量引入的不确定度分量

由环境温度引入的误差为

$$\Delta L_3 = L \cdot \alpha \cdot \Delta t \quad (15)$$

式中: L 为测量长度; α 为热膨胀系数; Δt 为环境温度变化量。

万象距离标准器热膨胀系数 $\alpha = (11.5 \pm 1) \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$, 环境温度为 $(20 \pm 2) \text{ } ^\circ\text{C}$, 温度平均值偏离不超过 $\Delta t = 0.1 \text{ } ^\circ\text{C}$ 。

按均匀分布, 引入扫描精度的不确定度分量(测量长度为 2.5 m):

$$u_8 = \frac{\Delta L_3}{\sqrt{3}} = 1.7 \text{ } \mu\text{m} \quad (16)$$

(5) 合成标准不确定度

假设以上各不确定度分量独立不相干, 则合成标准不确定度:

① 扫描精度的合成不确定度

$$u_{c1} = \sqrt{u_1^2 + u_3^2 + u_5^2 + u_7^2 + u_8^2} = 25.4 \text{ } \mu\text{m} \quad (17)$$

② 扫描定位误差的合成不确定度

$$u_{c2} = \sqrt{u_2^2 + u_4^2 + u_6^2 + u_7^2 + u_8^2} = 22.1 \text{ } \mu\text{m} \quad (18)$$

③ 扫描精度的扩展不确定度

$$U_1 = 50.8 \text{ } \mu\text{m}, k=2$$

④ 扫描定位误差的扩展不确定度

$$U_2 = 44.2 \text{ } \mu\text{m}, k=2$$

通过对智能扫描仪测量不确定度进行分析, 可

以看出影响扫描仪扫描精度的因素主要有两方面: 一是扫描仪操作人员的操作; 二是每次扫描采点的个数和扫描次数。因此, 要提高扫描仪扫描的质量可以通过对操作人员的培训、设置扫描采点个数以及增加扫描次数来改善。

4 结 论

对智能扫描仪 I-Scan 的校准评定方法进行了研究, 根据智能扫描仪的工作原理提出了扫描精度和定位误差两个评定指标, 并采用与高精度测量机测量值进行比对的方法, 完成了两项指标的评定及相应测量不确定度的分析, 满足了计量溯源的要求, 为后续相关标准或规范的制定提供了一定参考。

参考文献

- [1] API T3 激光跟踪仪使用手册[M]. 美国: 美国自动精密工程公司, 2008.
API T3 laser tracker manual[M]. USA: Automated Precision, Inc., 2008. (in Chinese)
- [2] 于成浩, 柯明, 赵振堂. 激光跟踪仪测量精度的评定[J]. 测绘工程, 2006, 15(6), 39-42.
Yu Chenghao, Ke Ming, Zhao Zhen tang. The accuracy assessment for the measurement of laser tracker[J]. Engineering of Surveying and Mapping, 2006, 15(6), 39-42. (in Chinese)
- [3] 中国计量科学研究院. JJF1242-2010 中华人民共和国国家计量技术规范[S]. 北京: 中国计量出版社, 2010.
National Institute of Metrology, China. JJF1242-2010 The People's Republic of China national standardized measurement techniques [S]. Beijing: China Metrology Press, 2010. (in Chinese)
- [4] 张曦, 陈五一. 激光跟踪仪测量曲面的测量不确定度研究[J]. 计量学报, 2006, 2(27): 107-108.
Zhang Xi, Chen Wuyi. The contour measurement uncertainty in the measurement of curve surfaces with a laser tracker[J]. Acta Metrologica Sinica, 2006, 2(27): 107-108. (in Chinese)
- [5] 郁菁菁. 激光跟踪仪现场测量的不确定度研究[D]. 上海: 上海大学, 2008.
Yu Jingjing. Research on uncertainty of laser tracker under site measurement [D]. Shanghai, Shanghai University, 2008. (in Chinese)
- [6] Measurement uncertainty analysis principles and methods [S]. NASA-HDBK-8739.19.3, National Aeronautics and Space Administration, 2010.
- [7] Performance evaluation of laser-based spherical coordinate

- measuring systems[S]. ASME B89, 4, 19, 2006.
- [8] 张春富. 激光跟踪仪现场测量不确定度的评定[J]. 计量学报, 2005, 26(1): 20-22.
Zhang Chunfu, Laser tracker field measurement uncertainty evaluation[J]. Acta Metrologica Sinica, 2005, 26(1): 20-22. (in Chinese)
- [9] 杜福洲, 王怀. 激光跟踪仪现场测点不确定度建模及试验分析[J]. 制造业自动化, 2013, 35(2): 23-26.
Du Fuzhou, Wang Huai, Modeling site measuring uncertainty of the laser tracker and experimental analysis[J]. Manufacturing Automation, 2013, 35(2): 23-26. (in Chinese)
- [10] Measuring and test equipment specifications[S]. NASA-HDBK-8739. 19. 2, National Aeronautics and Space Administration, 2010.

作者简介:

丁建萍(1971—),女,硕士,高级工程师。主要研究方向:计量测试。

张俊(1984—),男,硕士,工程师。主要研究方向:计量测试。

(编辑:马文静)

(上接第 205 页)

靠性分析[J]. 中国航空学报(英文版), 2005, 18(4): 359-365.

Wang Shaoping, Cui Mingshan, Shi Jian, et al. Performance degradation and reliability analysis for redundant actuation system[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2005, 18(4): 359-365. (in Chinese)

作者简介:

马建平(1982—),男,硕士,工程师。主要研究方向:飞机液压系统设计。

张莹(1982—),女,工程师。主要研究方向:自动控制系统设计。

金磊(1981—),女,工程师。主要研究方向:飞机液压系统设计。

张婷(1979—),女,硕士,工程师。主要研究方向:飞机液压系统设计。

张亚平(1969—),男,硕士,高级工程师。主要研究方向:飞机液压系统设计。

(编辑:马文静)