

标准环规的高效检定方法及误差分析

陈淑芳^{1,2}, 侯红玲¹

¹陕西理工大学; ²中航飞机股份有限公司长沙起落架分公司

摘要: 针对标准量具尺寸、形状精度高、检定周期短、检测操作繁复等要求,提出了一种采用三坐标测量机进行精确、高效检测的新方法。选用 $\Phi 39.5015$ 标准环规作为检测对象,设计了标准环规精准装夹定位、测量策略,分析优化了计算方法,编制了自动测量程序。测量结果与传统的常规测量方法对比发现:新方法的测量结果更精确,检测效率更高,有效解决了工程实践中由于检测效率低下而影响产品交付的难题,取得了良好效果。

关键词: 标准环规;检测精确度;三坐标测量机;误差分析

中图分类号: TG815;TH124

文献标志码: A

DOI:10.3969/j.issn.1000-7008.2019.09.027

High Efficiency Verification Method and Error Analysis of Standard Ring Gauge

Chen Shufang, Hou Honglin

Abstract: Aiming at the high accuracy in size and shape, short verification period and complicated operation situation of standard gages, a new accurate and efficient method of detection with CMM is proposed. The standard ring gauge of $\Phi 39.5015$ is selected as the testing object. The precise clamping positioning and measuring strategy of standard ring gauge are designed, the calculation method is optimized, and the automatic measuring program is compiled. Compared with the conventional measurement methods, the new results measured by new method with CMM is more accurate and detection efficiency increased by 40.63%. The problem of low detection efficiency affecting product delivery in engineering practice is solved by this method, and achieves good results.

Keywords: standard ring gauge; detection accuracy; coordinate measuring machine (CMM); error analysis

1 引言

随着航空工业的发展和国际军事竞争形势的日益严峻,军用飞机的精准和精密制造越发关键,起落架在飞机的整体制造中占据着重要地位。对起落架零部件的精确检验,确保整机装配质量,是起落架制造中的关键环节^[1-4]。

标准环规作为一种校对孔类量具的标准,在起落架零部件的质量检验中,承载标准量值准确传递,保证计量器具可溯源性的作用,是产品符合性判定和验证的基础,为确保产品质量,标准环规必须进行周期检定和校准。目前,标准环规检测方法一般分为接触式和非接触式两种。非接触式测量方法一般为内径测长仪法,检测效率高,检测精度低下;接触式测量方法分为万能投影测长仪法和三坐标测量机法。万能投影测长仪测量范围狭窄,只适合小尺寸环规测量,并且找正、读数繁复,效率低下^[5,6];三坐标测量机法检测范围广,操作省时省力,但检测精确度一直受到质疑。本文从设备科学选型、环规精准装夹定位、测量策略和计算方法分析优化等方面,提出一种更精确的标准环规三

坐标检测法^[7-11]。

中航飞机起落架公司承担国内各型飞机起落架生产,零部件种类多,交付节点急促。在生产实际中,标准环规主要用于内径表、内径千分尺或相应精度的气动塞规及电子塞规的校准,如图1所示,使用非常频繁,检定周期短。由于检测技术的短板,公司标准量具一直委托外单位利用光学投影法进行检定,手动操作繁复,检定效率低,对军机的交付节点造成影响。因此,提高标准量具的检测效率和检测精度同样尤为重要。本文利用该公司现有的 PMM-C 三坐标测量机,专配 SWIFT 柔性装夹定位夹具,自带 QUINDOS6.0 测量软件,选用生产实际中频繁使用的高等级、检定周期短的标准环规进行试验,编制自动化测量程序,实现标准环规的高效检测。

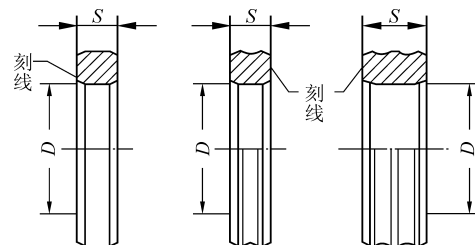


图1 生产实际中使用的标准环规

2 检测过程分析

(1) 检测要求

标准环规用于起落架中关键、重要液压附件测量中内径千分表、内径千分尺的校准。根据国家检定规程 JJG894-96 的要求,选取标准环规的检测项目为:直径尺寸 $D = \Phi 39.5015\text{mm} \pm 0.008\text{mm}$;圆度公差 $\pm 0.007\text{mm}$,母线的直线度公差 $\pm 0.0007\text{mm}$ ^[1]。

(2) 检测设备

选用海克斯康 Leitz PMM-C 固定桥式和 GLOBAL ZOO3L 移动桥式两种测量机,对测量机本身的定位精度和测量精度进行科学对比分析,如表 1 所示。

表 1 测量机精度占公差比率表

序号	待测要素	测量机 1		测量机 2	
		测量机误差 (mm)	占公差比率	测量机误差 (mm)	占公差比率
1	直径	0.00067	1 : 24	0.0031	1 : 5.2
2	圆度	0.00062	1 : 23	0.0032	1 : 4.4
3	母线直线度	0.00062	1 : 23	0.00032	1 : 4.4

通过表 1 的对比,遵循计量器具的选择原则:经济性和 1/3 ~ 1/10 原则以及被测标准环规的等级,选用 Litze PMM-C 系列的三坐标测量机作为后续试验的测量设备,其测量范围 1200mm × 1000mm × 700mm,如图 2 所示。

(3) 检测工装与测针

三坐标测量机采用接触式测量,在采测数据时会产生一定的触测力,因此,必须保证零件固定不动。为减小定位误差,选用测量机专配的 SWIFT 柔性装夹工装,一是利用其表面均布的横纵坐标螺纹孔,能在第一件环规装夹时记录正确的坐标值,对后续零件在坐标平面的装夹做到正确定位;二是螺栓表面用磁铁吸固,不用反复拆装,可直接用于后续零件。从两方面减少批量测量时重复性定位误差,方便省时。

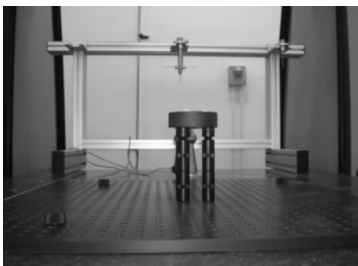


图 2 环规的测量定位

试验时,根据环规的重量和直径选用合适螺栓,连接工装坐标平面螺纹孔,记录连接点横纵坐标值;

环规底平面用磁铁吸固于螺栓上表面,限制各个方向自由度。环规在三坐标测量机中的装夹和定位如图 2 所示。

测针配制和选用遵循“在测触范围内,长度越短越好,直径越小越好,数量越少越好”的原则。测杆过长、直径过小会产生如图 3 所示的干涉,测量失效;频繁更换测针会产生累积定位误差。基于标准环规被测要素的特点,试验使用 Leitz 公司的 TRAX 单一测头,测杆长度为 20mm,测球直径为 2mm。

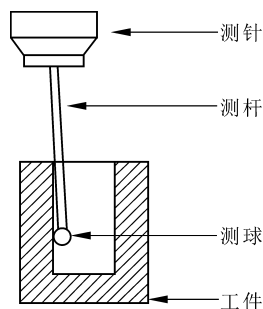


图 3 测针与工件之间的干涉

3 编制测量程序

3.1 校验测头

测头校验分为参考测头校验和非参考测头的校验,以清楚探知当前环境下测头的位置和有效半径。参考测头的校验非常重要,非参考测头以它为参考。为减少探测误差(即余弦误差),正确进行测头半径补偿^[12],选用 A0 B0 号参考测针为整个测量过程测针;为减少人为更换测头带来的测头校准误差,编制了测量机快速自动抓取、存放探头更换架和校验工位上各种角度测头的程序^[13],有效提高校验效率。

测头校验时,在参数设置界面中设置好相关参数后,在标准球的中心大约 2mm 的位置用 CLP 键设置一个安全位置,然后在标准球的正上方采集一点,最后用 END 键开始执行自动校验程序。自动抓取校验工位 001 上探针如图 4 所示。

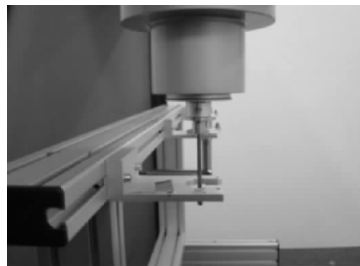


图 4 自动抓取校验工位 001 探针

3.2 建立工件坐标系

三坐标测量机自身设置有机床坐标系,为了正

确方便检测零件,减少坐标系平移和换算误差,必须建立工件坐标系。为提高检测精度,工件坐标系采用粗建和精建两步,粗建时手动采集实体特征元素,精建时先搜集理论均匀点,并再次生成找正元素,减少基准源误差;为提高检测效率,精建坐标系采用自动模式。

启动 QUINDOS6.0 测量软件,新建零件程序,启动测头数据库,调用1号参考测头,打开圆柱测量的参数设置页面,在环规内孔的两个不同截面内手动采集4个点,建立空间 Z 轴;打开平面测量设置页面,选择环规上表面并手动采集4个点作为 Z 轴原点,以此作为粗建工件坐标系,用 GENATE 生成命令,生成理论找正元素,再次精建坐标系,减少误差。

3.3 测量策略

单点触测:即触发式采点,“一碰即退”。探针与被测工件接触一次,就激活一次发讯开关,记录一个数据点。单点触测命令 MECIR 对标准环规刻线方向截面圆均匀采集4个点,进行自动测量。

连续闭环扫描:即三坐标测量机根据探头采集的零件表面点信号来控制运动。扫描过程如下:用 ME2DE 命令,定义扫描起始点、方向点和终止点;探头从起始点开始测量,按定义的扫描方向向终止点扫描;计算机实时读取线性差动传感器信号和光栅尺数据,并进行分析;控制系统根据线性差动传感器信号控制探头的运动随零件表面变化,测头补偿 RCOR2D 命令再进行高精度补偿^[13]。

对不同策略进行分析比较。如图5所示:假设曲线2测量时有三种测量方案,方案一:采样点选在 A、B、C 三点,测得的圆直径较小,即圆3;方案二:采样点选 A'、B'、C'测得的圆直径很大,即圆1;方案三:当 A'、C'这两个样本点的测量误差向外,而 B'点的误差向内,测得的圆直径更大,即圆4。因此,采样点数和采样位置将影响测量结果,采样策略将在确定中心位置上造成较大的测量误差。

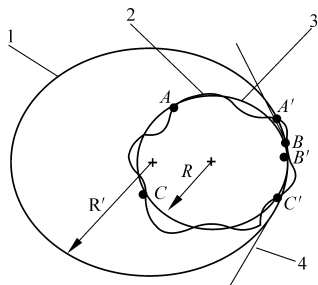


图5 采样点对圆参数测量结果的影响

考虑到综合误差的叠加与抵消,在实际测量中,

采取单点触测方式测量标准环规直径尺寸,连续扫描方式测量标准环规的形状误差,即圆度和直线度^[14,15],测量过程的截图见图6-图8。

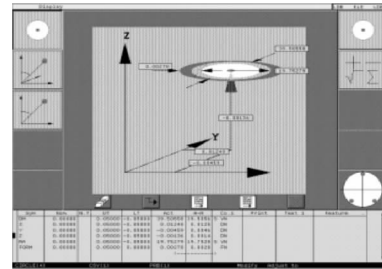


图6 环规的单点测试界面

MEASURING POINTS (ACTUAL POINTS)									
X-COORD	Y-COORD	Z-COORD	NX	NY	NZ	DEVIATION	NO.		
13.20679	-2.77908	0.00129	0.979	-0.208	0.001	-0.00013	374		
13.24729	-2.57039	0.00118	0.982	-0.190	0.001	-0.00063	375		
13.28782	-2.35709	0.00105	0.985	-0.175	0.000	-0.00098	376		
13.32827	-2.15045	0.00104	0.987	-0.159	0.000	-0.00014	377		
13.35455	-1.94028	0.00112	0.990	-0.144	0.000	-0.00059	378		
13.38573	-1.72945	0.00099	0.992	-0.128	0.000	-0.00063	379		
13.40904	-1.51909	0.00158	0.994	-0.113	0.000	-0.00063	380		
13.43129	-1.30981	0.00106	0.995	-0.097	0.000	-0.00079	381		
13.45025	-1.09441	0.00143	0.997	-0.081	0.000	-0.00010	382		
13.46561	-0.87987	0.00109	0.998	-0.065	0.001	-0.00047	383		
13.47833	-0.66541	0.00089	0.999	-0.049	0.001	-0.00064	384		
13.48792	-0.45728	0.00140	0.999	-0.034	0.001	-0.00060	385		
0.00000	0.00000	0.00000	0.999	0.000	0.000	0.00000	0		

图7 环规连续扫描测试实测点

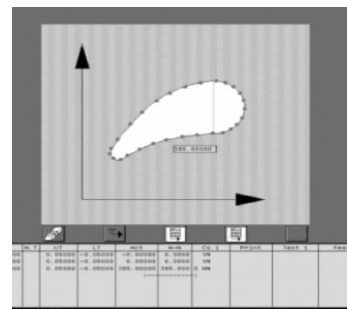


图8 环规连续扫描测试修正点

3.4 计算方法

圆的计算方式一般分为:最佳拟合圆(最小二乘圆):当实际轮廓上各点到某一圆的距离的平方和最小时,该圆即为最小二乘圆;最大内接圆:内接于实际轮廓且半径最大的圆;最小外切圆:包容实际轮廓且半径最小的圆。

由于标准环规直径一般为刻线方向或某几个特定方向的直径,因此,在精建空间坐标系后,自动生成环规中截面圆上均匀分布的四点,这四点都位于环规坐标系的 X 轴或 Y 轴上;收集并测量圆上的第一理论点和第三理论点,计算这两点间的距离即为环规刻线方向直径。

再次通过测量标准环规(见图9)或量块来进行修正,以减少误差。测得标准环规直径 D_1 ,被测环规直径 D_2 。标准环规已知直径 D_s ,则经过修正的被测环规直径 $D = D_2 - D_1 + D_s$ 。

测得量块长度为 L_1 ,量块的实际长度为 L_s ,则

经过修正的直径 $D = D_2 + L_1 - L_s$

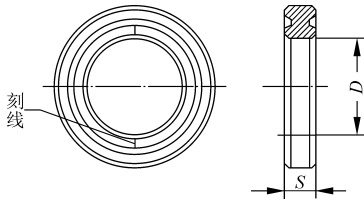


图9 标准环规

编制测量程序, (部分命令) 所得测量结果见表2。

```

AUTZER
START(WKP = HUANGUI, SER = 1, PMA = PMM -
C700, INS = CSF, RPO = Y. TOP = Y. EDT = Y)
REFPRB_P (XOF = 0, YOF = 0, ZOF = -130, DIA = 3,
PRB = PRB(1), CAL = Y, TYP = ", DEL = N, SN
USEPRB(NAM = PRB(1))
MEPLA (NAM = PLANE(1), CSY = CMMAMYMC SY,
CPY = OEFMYMPLA3, ITY = GSS, DEL = Y)
MECYL (NAM = CYLINOER(1), CSY = CMMAMYMC-
SY, CPY = OEFMYMCYL2, INO = I, ITY = CY2, DEL = N)
BLDCSY (NAM = CSY(1), TYP = CAR, SPA = CYLINO-
ER(1), SOR = +Z, XZE = CYLINOER(1), YZE = C
GENCIR
MEPLA
GENCYL
MECYL
BLDSCY
GENCIR
COLNPT
MEPNT
MEPNT
DISPNTPT
ME2DE
EDTAPT
RCOR2D
EDTAPT
.....
    
```

表2 实测结果 (mm)

项目	标准值	实测值				
		1	2	3	4	平均值
直径	39.5015 ± 0.008	39.50558	39.50542	39.50544	39.50558	39.50551
圆度	±0.007	0.00278	0.00144	0.00385	0.00231	0.00259
直线度	±0.0007	0.00028	0.00043	0.00032	0.00038	0.00035

4 测量结果的分析与评价

通常用测量精确度评价测量结果的好坏, 测量精确度包括测量精密度和测量准确度。测量精密

度指在相同条件下, 对被测量零件进行多次反复测量, 反映测得值随机误差的影响程度; 测量准确度指测得值与其“真值”的接近程度, 准确度反映测得值系统误差的影响程度。

4.1 测量精密度

在相同条件下, 不同的操作者对标准环规测量过程重复6次^[16], 测量结果统计如表3所示。

表3 标准环规6次重复测量过程结果 (mm)

序号	直径	圆度	直线度
1	39.50551	0.00259	0.00035
2	39.50448	0.00258	0.00034
3	39.50550	0.00259	0.00037
4	39.50551	0.00257	0.00038
5	39.50449	0.00260	0.00039
6	39.50552	0.00261	0.00035

对于6次测量过程按照统计学方法进行处理, 以检验测量的重复性^[14-16], 数据处理步骤包括:

(1) 计算平均偏差AD值

$$AD = \frac{\sum_{i=1}^N |X_i - \bar{X}|}{N} \quad (1)$$

式中, \bar{X} 为样本的均值; N 为样本个数; X_i 为样本 ($i = 1, 2, 3, \dots$)。

(2) 计算标准偏差S值

$$S = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X})^2} \quad (2)$$

(3) 计算相对标准偏差RSD的值

$$RSD = \frac{S}{\bar{X}} \times 100\% \quad (3)$$

式中, S 为样本的标准偏差; \bar{X} 为样本的均值。

表4 测量值的统计值 (mm)

测量要素	平均值	偏差	标准偏差	相对标准偏差
直径	39.5052	4.556e-04	4.832e-04	0.000012
圆度	0.0026	1e-05	1.291e-05	0.004984
直线度	0.000363	1.667e-05	1.7951e-05	0.049405

由表4可见: 对标准环规的直径6次测量的标准偏差值为0.0004832, 相对标准偏差(RSD)值为0.000012 < 1%, 符合测量的重复性和再现性要求。

4.2 测量准确度

采用常规检测方法, 对标准环规的相同检测项目进行了测量, 测量结果如表5所示。

表5 不同测量方法检测结果 (mm)

检项目	标准值	检测方法	
		新方法	常规法
直径	39.5015 ± 0.008	39.50551	39.5443
圆度	±0.007	0.00259	0.0022
直线度	±0.0007	0.00035	0.00030

由表5可见:测量数据精确度新方法精确到万分位,常规法精确到千分位,准确度低于一个等级。

绝对误差 e^* 的值为

$$e(x^*) = x^* - x$$

$$|e(x^*)| = |x^* - x| \leq \varepsilon(x^*)$$

式中, x 为准确值, x^* 为测量值, $e(x^*)$ 简记为 e^* 。

相对误差 δ 值为

$$\delta = \Delta/L \times 100\%$$

式中, δ 为实际相对误差,一般用百分数给出; Δ 为绝对误差; L 为真值。

表6 不同检测方法测量误差

测量要素	标准值	绝对误差		相对误差	
		新方法	常规法	新方法	常规法
直径(mm)	39.5015 ± 0.008	0.00401	0.0428	0.01%	0.11%
圆度(mm)	± 0.007	0.00441	0.0048	63%	68%
直线度(mm)	± 0.0007	0.00035	0.0004	50%	57%

由表6可见:新方法绝对误差小于常规法,相对误差小于常规法,检测准确度高于常规法。

5 检测效率分析

用检测工时简单计算的效率进行对比。一件标准环规的检测时间分为:清洁、装夹、找正、读数,完成检测报告。

常规检测工时为:装夹 2min + 找正 5min + 读数 2min + 数据处理 2min + 出具检测报告 2min = 13min,全部由人工完成,不计算测量前的零件清洁。

新方法检测工时为:装夹 2min + 找正 2min + 自动程序执行 3min = 7min,人工只完成装夹 2min,即 2/7 工时,不计算测量前的零件清洁。

综上,新方法检测时间仅为常规法检测时间的 7/13,检测时间减少 46.2%,节省人力 84.6%。

6 结语

本文提出的标准量具三坐标高精度、高效率检测方法,选取标准环规的重要检测项目,测量结果最大重复性误差为:4.9405% < 5% (5% ~ 10% 为 MSA 接收标准)^[17],满足检定规程的要求;最大绝对误差为:0.00441 < 0.0428,最大相对误差为:50% < 68%,均远小于常规法检测。检测时间为 7min < 13min,人力消耗仅为 2/7。因此,该方法检测精确度高于常规法,检测效率提高 46.2%,节省人力 84.6%。

参考文献

[1] 帅心容,杨小林,郭冠华,等.飞机前起落架关键部位超

声检测技术的 CIVA 仿真[J].南昌航空大学学报(自然科学版),2016,30(1):103-108.

[2] 刘春,姜林弟,张洪瑞.飞机起落架作动筒检测试验台的设计原理[J].航空制造技术,2016(12):81-83.

[3] 吴克勤,耿荣生,谢里阳,等.某型飞机起落架收放试验过程中疲劳损伤的声发射监测[J].无损检测,2006,28(3):113-115.

[4] 陈新波,凌志浩,孙金立,等.某型飞机主起落架轮毂探伤方法[J].无损检测,2005,27(10):553-555.

[5] 刘春,姜林弟,张洪瑞.飞机起落架作动筒检测试验台的设计原理[J].航空制造技术,2016,59(12):81-83.

[6] 李静,高华钰,沈南燕,等.复杂轴类零件非圆轮廓接触式随动测量方法[J].机械工程学报,2018,54(5):38-46.

[7] 郑亦隆.一种用于内孔测量装置的测头基准长度标定方法[J].工程技术研究,2017(9):22-24.

[8] 曾燕华,傅云霞,张波,等.一种基于刀口测头的内尺寸测量方法研究[J].计测技术,2013,33(2):60-62.

[9] 黄桂平,钦桂勤.大尺寸三坐标测量方法与系统[J].宇航计测技术,2007(4):15-19.

[10] 侯宇,吕进.三坐标测量机上形状误差评定的理论方法[J].仪器仪表学报,1996(6):618-623.

[11] 王军,王小椿,姜虹,等.螺旋锥齿轮齿面的三坐标测量[J].机械工程学报,2003(6):151-154.

[12] 颜赤鹰,陈少克.三坐标测量机测头半径补偿的新方法[J].组合机床与自动化加工技术,2006(1):50-52.

[13] 陈凌云,罗敏,陈志楚.触发式测头矢量半径标定宏程序[J].制造技术与机床,2014(9):180-185.

[14] 邹刚,王亚平,李永刚.三坐标测量机测量路径自动生成研究[J].计测技术,2004,24(3):6-7.

[15] 郭旗.三坐标测量机在汽轮机叶片测量中的应用[J].数字技术与应用,2010(12):78.

[16] 贾绍华,李静静.测量系统重复性与再现性在产品质量管理中的应用[J].大连交通大学学报,2010,31(5):96-100.

[17] 宗缚鹏.测量系统分析(MSA)及其应用[J].中国计量,2005(3):72-74.

第一作者:陈淑芳,硕士研究生,工程师,陕西理工大学机械工程学院,723200 陕西省汉中市

First Author: Chen Shufang, Postgraduate, Engineer, School of Mechanical Engineering, Shaanxi University of Technology, Hanzhong, Shaanxi 723200, China

通信作者:侯红玲,硕士,副教授,陕西理工大学机械工程学院,723200 陕西省汉中市

Corresponding Author: Hou Hongling, Master, Associate Professor, School of Mechanical Engineering, Shaanxi University of Technology, Hanzhong, Shaanxi 723200, China