拍照扫描测量技术在检测弱刚性半框工件弧长中的应用

郭国，解松，喻秀
天津轻工职业技术学院机械工程学院　天津　300350

摘要：基于大直径、弱刚性半框工件，针对其内弧长度难以准确测量的问题，引入拍照扫描测量技术，应用DPA+拍照扫描的方法获得半框内弧的工程模型，通过处理和计算获得工件内弧的长度。经过多次测量试验，评价测量不确定度。试验结果证明，该方法准确有效，为工程测量人员检测大直径、弱刚性框环弧长提供了有利依据。

关键词：弱刚性；弧长；拍照扫描测量；不确定度

1　序言

某特殊用途的大直径、弱刚性框环由两个半框拼接而成，设计人员对框环的周长要求较高，在加工过程中需要严格控制单个半框的内圆弧长，以保证拼接后所得整框的内圆周长，半框工件实物如图1所示。因半框内圆弧长对框环的精度要求较高，设计人员要求半框的弧长公差为±0.3mm。



图1　半框工件

该半框的内型面是理论半径为2504mm的圆柱面，工件尺寸较大，且厚度较薄，是一种大直径、弱刚性的工件。该半框由滚弯加工而成，由于滚弯加工过程会使工件产生拉伸变形，所以为了得到弧

5　结束语

本文以封闭区域铣削过程中常出现的“顶刀”事故为出发点，对比研究了数控铣削加工中斜线下刀和螺旋下刀两种下刀策略的算法。基于加工工况及基础参数（刀具直径D_c、刀片宽度w、盲区高度h、刀片侧刃有效切深L_a及安全系数γ）建立了相关数学模型，同时运用Python语言下的PyQt5工具包编制了实用软件，用来计算相关下刀参数值（最长切削距离S、最大下切角θ、螺旋线直径D_1及螺距P等）。经过多台计算机反复测试，该软件操作方便、运行稳定，免去了编写数控代码时繁琐的计算过程，在保证安全的前提下大大提高了加工效率。目前，该软件已在我公司内部员工中运行使用，并逐渐推广。

参考文献：

[1] 成建峰，赵猛，等．i5智能加工中心加工工艺与编程[M]．北京：机械工业出版社，2018．
[2] 曾林林，周利平，张敬志．新型双刃可转位球头立铣刀设计及其加工仿真研究[J]．机床与液压，2016，44（17）：71-75．
[3] 王苏东．斜线下刀与螺旋下刀的参数分析[J]．广西轻工业，2007（11）：42-43，39．
[4] 魏茂珍，周墩明．螺旋下刀在数控铣床中的应用[J]．金属加工（冷加工），2012（24）：46-47．
[5] 王维波，栗宝鹃，张晓东．Python Qt GUI与数据可视化编程[M]．北京：人民邮电出版社，2019．

MW 20210505

长合格的产品，需要在滚弯加工后，测量其内弧长，根据测量结果去掉多余长度，然后进行检验，得到最终的产品。因此，产品滚弯后的准确测量，是保证产品精度的关键。

半框截面相关尺寸如图2所示。半框为细长结构，其截面为L形，宽度为46mm，高度为75mm，最大厚度不足8mm，刚性较弱。将半框自由状态平放于平台上，其圆度较差，无法采用常用的三坐标测量机拟合圆，通过半径和圆心角推算的方法测量其弧长。目前，该生产环节采用传统的对比样板的方法进行测量，会存在较大测量误差，无法为生产提供准确有效的数据，导致产品超差严重，影响后续的使用功能。

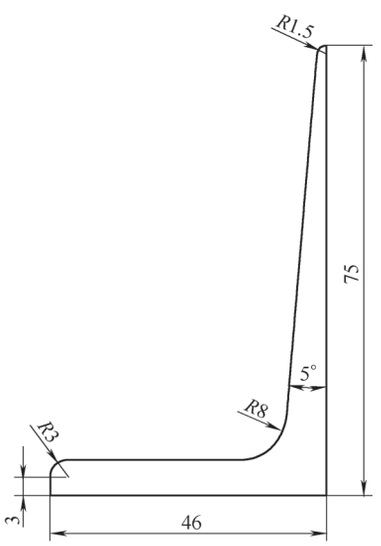


图2　半框截面尺寸

针对上述问题，我们通过探索与试验，应用DPA+拍照式三维扫描测量技术，实现了大直径、弱刚性半框弧长的测量。并经过重复测量试验，评定测量不确定度，验证了测量方法的准确性和有效性。

2　内圆弧长检测方法

目前，行业内测量大直径内圆弧长的方法主要有3种：样板辅助测量法、三坐标拟合圆法以及三坐标扫描测量法。现对这3种方法逐一进行介绍。

2.1　样板辅助测量法

样板辅助测量法是一种较为传统的弧长检测方法，这种测量方法在定性的检验中应用较多。其测量原理是将样板和产品置于平台上，将样板的外弧面与产品的内弧面进行贴合，产品与样板的首端对齐，采用辅助夹具夹紧，使用游标卡尺或者样板自带的刻度测量二者尾端的长度差。根据样板的长度和二者的长度差，换算得到半框的内弧长。这种测量方法原理简单、操作方便，但是在实际使用过程中，检测精度不高。测量过程主要包含了以下检测误差：样板自身弧长存在误差；半框与工件首端存在对齐误差；二者贴合不紧引入的误差；尾端的测量误差。目前，采用这种测量方法的半框，在后续使用环节中，产品的精度难以满足使用功能，返修率较高。

2.2　三坐标拟合圆法

目前，行业内多使用三坐标测量机检测弧长，使用的测量方法为拟合圆法。其原理为：将弧形工件平置于平台上并进行装夹定位；通过使用三坐标测量机在内弧面上均布采集数据点，将数据通过算法进行拟合圆，得到内弧圆心位置和半径值；通过探测工件首尾两端的端面，获取工件的圆心角；利用测量得到的半径值和圆心角计算弧长。这种测量方法对于圆度较好的工件，检测精度较高，且原理简单、操作方便，在行业中应用较广。因本文所研究的半框工件刚性较弱，圆度误差较大，采用拟合得到圆的半径推算弧长存在较大的偏差，所以该测量方法无法应用于大直径、弱刚性半框弧长的检测。

2.3　三坐标扫描测量法

三坐标扫描测量法是一种特殊的测量方法，测量原理为：扫描前设置扫描路径（圆）和扫描点间隔（μm级），使用接触式扫描测针高密度自动扫描工件的内弧面，扫描完成后利用扫描获得的总点数和扫描间隔计算半框弧长。这种测量方法精度较高，可以满足常规产品的测量需求。但是半框圆度较差，在扫描半框的过程中，三坐标测量机因实际扫描路径与理论设置的扫描路径偏差太大，频繁报错，无法完成对工件的扫描。因而，该测量方法也无法应用于大直径、弱刚性半框弧长的检测。

3　试验过程

本文通过探索，尝试使用DPA测量技术与拍照扫描技术相结合的方法测量半框内弧长，并进行了重复测量试验。

3.1 测量原理

拍照式三维扫描仪是将光源投影到被测量物体的表面上，利用光学拍照定位技术和光栅原理，获得工件表面的点云数据。在测量时，光栅投影特定编码的结构光到被测物体上，光栅条纹受到物体表面形状的调制，其相位关系会发生变化，然后经过数字图像处理，并对图像进行相位计算，利用三角形测量原理和匹配技术，算出视区内像素点的坐标，形成一批点云数据。拍照扫描之前，需要在工件表面粘贴指定规格的标记点，辅助软件将多批点云数据进行拼接，最终形成完整的点云模型。

本文所使用的三维扫描仪为高精度白光拍照式三维扫描仪，其精度参数为0.02mm/500mm。半框理论半径为2504mm，计算理论弧长为7866.55mm。若直接采用拍照测量机进行测量，则理论上整体累计误差到达0.31mm，检测误差较大。

针对上述问题，采用DPA测量技术与拍照扫描技术相结合的方法。DPA测量技术是一种高精度的数码摄影测量技术，利用工业级数码相机实现对空间点的高精度定位，DPA测量系统的精度为（23+7L）μm（L为产品长度，单位为m）。

DPA测量技术与拍照扫描技术相结合，即先利用高精度的DPA测量系统对半框（标记点）进行整体高精度定位，获取标记点模型。然后使用拍照测量机进行扫描，获取半框的细节数据。这种测量方法理论上可以将测量累计误差控制在0.08mm以内，检测精度有了大幅提升。

3.2 获得半框标记点模型

为了确保测量的准确性，需要对测量环境进行控制。在整个测量过程中，测量条件均满足：测量室内气温18～22℃，湿度45%～55%，且现场无振动、无强光干扰。

测量之前，先进行准备工作。首先将半框置于高精度的平台上，确保半框内弧面与底面垂直。在被测框环上粘贴标记点，控制相邻两标记点的间距在100mm以内。然后在工件周围布置编码点和比例尺，要求编码点的间隔在500mm以内，两个比例尺应避免平行放置，如图3所示。其中，标记点是内圆为3mm的标准件，用于标记和定位；编码点用于辅助点位；比例尺是两条标准长度的杆，用于尺寸的校准。



图3 准备工作

准备工作完成后，利用DPA相机进行拍照，获取标记点、编码点和比例尺照片信息，将照片导入OPTOCAT测量软件中，通过处理，去掉编码点和无效杂点，形成标记点模型，如图4所示。标记点模型是由标记点构成的数据点组合，用于拍照测量机测量过程中相邻两幅画面的拼接。

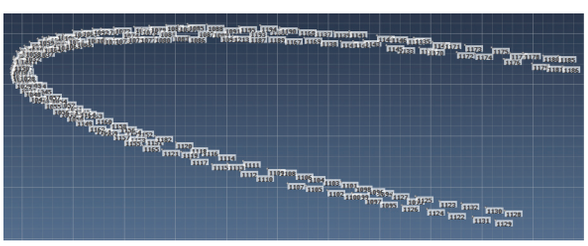


图4 标记点模型

3.3 获得半框工程模型

使用拍照测量机对半框内弧面进行逐段拍照扫描（见图5），在整个测量过程中，半框的位置不能发生移动。整个工件拍照扫描完成后，使用软件将所扫描的画面拼接合成，并对局部小范围的缺陷进行补洞、重塑、光顺等处理，最终得到半框内型面的工程模型，如图6所示。



图5 逐段拍照扫描



图6 半框内型面工程模型

3.4 获取弧长数据

将半框工程模型导入Polyworks软件中，通过提取相关数据，构建半框底面，并以底面为基准，建立单轴坐标系，圆心设置在底面上，如图7所示。

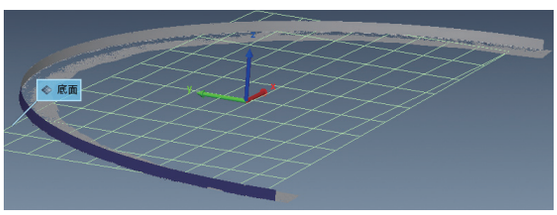


图7 建立坐标系

按照设计要求，需评价距离底面高度为10mm处的半框弧长。本文以底面为基准，创建距离底面为10mm的平行面，该平面与半框工程模型内弧面的交线即为所要的弧线，如图8所示。使用软件评价该弧的长度，即为被测内弧长。

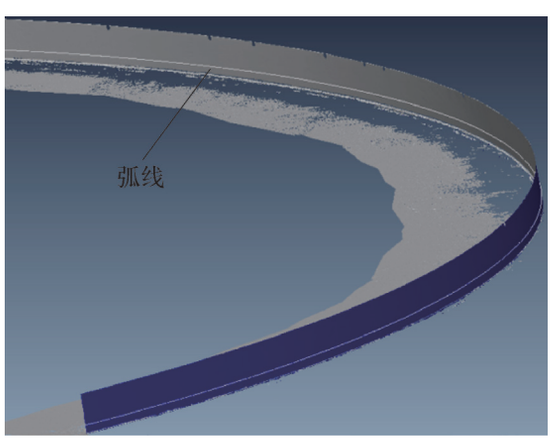


图8 提取弧线示意

4 测量不确定度分析

通过分析，该测量方法的测量不确定度的来源主要包括两个方面：测量重复性引入的测量不确定度u_1、扫描测量仪精度引入的不确定度u_2。

对于温度、湿度和振动等环境因素，因试验环境为三坐标检测室，为恒温恒湿环境，且产品置于6m×6m的三坐标配套的铸铁平台上，没有振动，所以本文对环境因素不作考虑。

（1）测量重复性引入的测量不确定度评定 使用DPA+拍照测量机对该半框工件进行了6次测量，每次测量的测量方法一致。评定对应的均值和标准差，测量结果见表1。

表1 测量结果

测量次数n/次	测量结果F_i/mm
1	7866.87
2	7867.04
3	7867.01
4	7866.94
5	7866.97
6	7866.91
均值	7866.96
标准差σ	0.063

测量不确定度$u_1=\sigma/n^{1/2}=0.063/6^{1/2}\text{mm}=0.026\text{mm}$。

（2）设备不准确引入的不确定度评定 设备的不确定度引入的标准不确定的分量按照B类方法评定。DPA+拍照测量机示值误差范围为（23+7L）μm，产品长度按照7.87m计算，按照均匀分布，则不确定度$u_2=(0.023+0.007\times7.87)/3^{1/2}\text{mm}=0.045\text{mm}$。

（3）合成不确定度评定 合成不确定度$u_c=(u_1^2+u_2^2)^{1/2}=0.052\text{mm}$。

（4）扩展不确定度评定 取置信概率P=95%，k=2。则扩展不确定度$U=ku_c=2\times0.052\text{mm}=0.104\text{mm}$。

评定结果$U=0.104\text{mm}$，小于设计要求的0.3mm，满足检测要求。

5 结束语

本文介绍了一种使用DPA+拍照扫描测量技术检测大直径、弱刚性半框内弧长的方法，并进行了6次重复测量试验。通过分析和计算，最终得到扩展不确定度为0.104mm（k=2），满足产品的测量要求，验证了该方法的有效性，为精密测量技术人员测量同类产品提供了一种有效、可靠的解决方案。

参考文献：

[1] 费业泰．误差理论与数据处理[M]．北京：机械工业出版社，2015.

[2] 潘淑清．几何精度规范学[M]．北京：北京理工大学出版社，2003.

[3] 甘霖，李晓星．激光跟踪仪现场测量精度检测[J]．北京航空航天大学学报，2009，35（5）：612-614.

MW 20210514