基于Excel实现轴承内环参数化采集点位

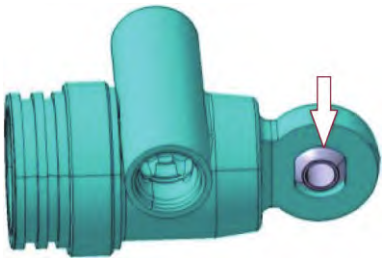
康拓，宋宝龙，沈涛，孟凡华，丁鑫
庆安集团有限公司　陕西西安　710077

摘要：针对空天作动领域轴承内环类零件采集点位工程量大的问题，通过对其零件结构、加工步骤以及采点流程进行分析，建立了所采点位的线性方程组，并通过Excel函数套用实现了参数化采集功能，达到了该类零件简单、快速且准确采集点位的目的。

关键词：轴承内环；采集点位；参数化工艺；数字化制造

1　序言

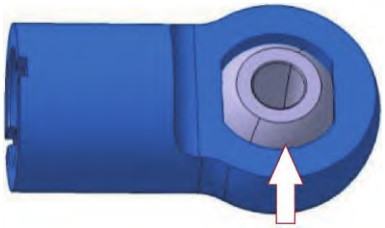
在空天作动领域，球头关节轴承的结构通常集成于液压作动筒的机械接口处，如图1所示，其主要功能是承受强烈的冲击与振动，从而帮助飞行器维持稳定和平衡。由于缺乏专业的轴承加工设备，因此一般采用基孔制的加工方式，对内圈的外球面进行修配，以确保轴承组件的配合间隙[1]。



a）壳体接头



b）筒体接头



c）活塞接头

图1　液压作动筒中的球头关节轴承结构

在精加工外球面及两端圆角时，每个内圈应根据不同的外球面直径，计算出相应的交点位置坐标（这个过程简称“采点”），以此编制精加工程序。目前主要运用CATIA、CAD等建模软件进行操作，以1∶1的精度绘制出零件的加工特征，并标注出所需的交点位置坐标（以下简称“点位”）。然而，这种几何法采点工艺过程较为复杂，耗时长且易出错。本文对这类零件的结构特征进行分析，建立相应点位的线性方程组，最终基于Excel软件的应用，实现了简单、快速且准确的采点效果。

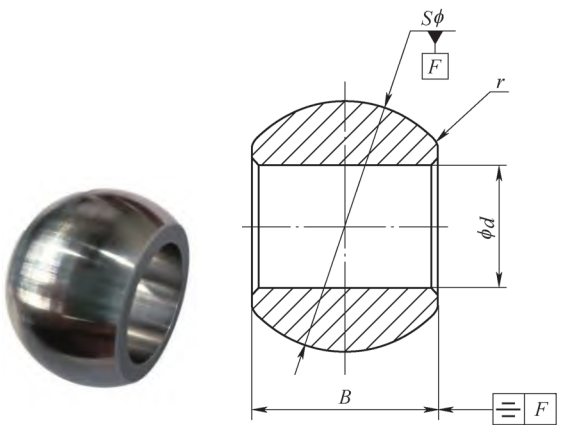
2　轴承内环加工问题分析

2.1　零件结构

轴承内环属于球头关节轴承的内圈，其外球面与外圈配合，组成球面摩擦副。轴承内环中心的销孔与连接部件的接头孔、支撑轴等组成铰链机构，这种设计使轴承在一定角度范围内可以任意旋转摆动[2]。轴承内环结构如图2所示，球形中心有1处销孔，销孔两端面各有1处倒角，外球面两端面各有1处圆角。外球面通常采用钝化、喷涂青铜及喷涂干膜等多种特殊工艺处理，以提高其抗冲击、抗腐蚀和抗磨损性能。虽然轴承内环的尺寸、材质、热处理与表面处理方式不同，但其结构特征基本相同。

2.2　加工步骤

轴承内环的加工流程一般为粗车外形、半精车



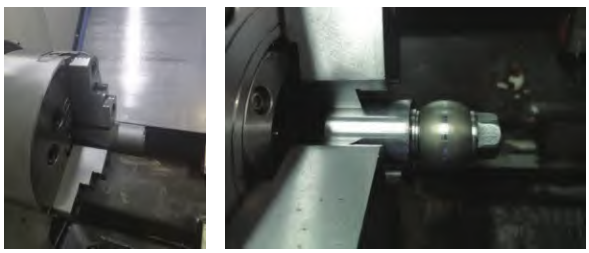
a）实物　　b）结构示意

图2　轴承内环结构

外形以及精车外形等工序，并穿插热处理、表面处理等工序，数控车削加工外形内容见表1。粗车外形时使用棒料进行加工；半精车外形是在热处理后将粗加工的外形进行再次加工，为后续精加工做准备；精车外形使用专用夹具装夹，先加工右端圆角和外球面，再加工左端圆角。在粗车外形和半精车外形时，为了简化加工内容，两端圆角按需加工，轴承内环加工如图3所示。

表1　数控车削加工外形内容

加工工序	左右端面	外球面	两端圆角
粗车外形	加工	加工	按需加工
半精车外形	不加工	加工	按需加工
精车外形	不加工	加工	加工

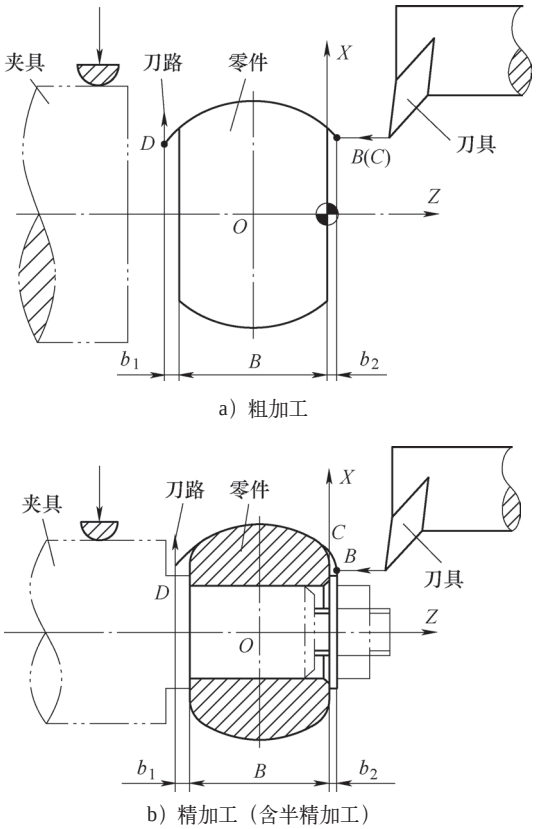


a）粗车外形　　b）精车外形（含半精车外形）

图3　轴承内环加工

加工外形时，为了减少切槽宽度，提高夹具的刚度与强度，缩短空刀槽距离，整体加工过程只使用1把右手车刀。由于右手车刀只能加工右端圆角和外球面，加工左端圆角时，需要将零件左右翻转后再加工，因此，在编制加工程序时需要3个交点的位置坐标，当两端圆角为零时，只需要2个交点的位置坐标。

加工刀路如图4所示。实际加工中，为了防止零件右端面由于对刀误差导致端面蹭伤，引起两端面相对于外球面的对称度超差，在进刀时，需将进刀点向Z轴正方向移动，b_2点变为B点，在退刀时，需将退刀点向Z轴负方向移动，b_1点变为D点。通常b_2取0.02mm，b_1取0.20～0.50mm，两端圆角的公差带一般＞0.40mm，由于b_2值相对很小，所以该系统误差可忽略不计。



a）粗加工

b）精加工（含半精加工）

图4　加工刀路示意

2.3　采点流程

每次采点需要根据外球面直径要求与进刀、退刀偏移量等参数建立三维模型，由该三维模型生成二维工程图，检查工程图尺寸是否与工序要求一致，若一致，再建立圆角起点与右端面的交点B、圆角终点与外球面的起点C以及外球面与左端面的终点D，最后标注B、C、D三点的位置坐标，几何法采点工艺流程如图5所示。数控车削加工轴承内环类零件时，每件零件至少需要精加工采点1次，粗加工与半精加工视情况而定，导致每批零件采点的工程量很大。

3　轴承内环加工方案设计

3.1　建立线性方程组

将采点过程简化为已知内环外球面直径$S\phi$、

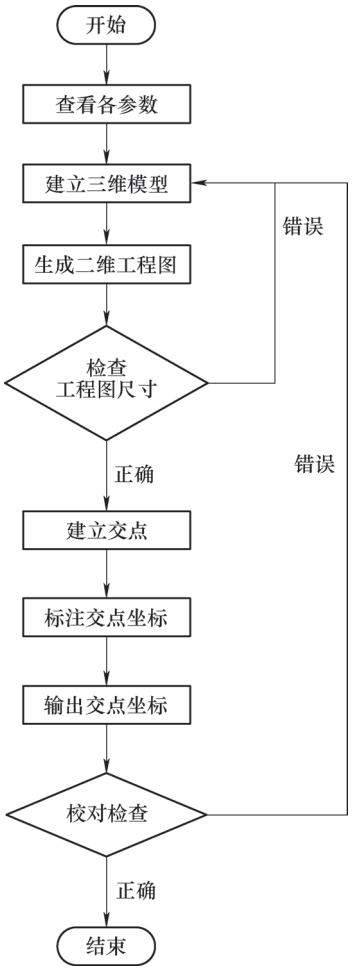
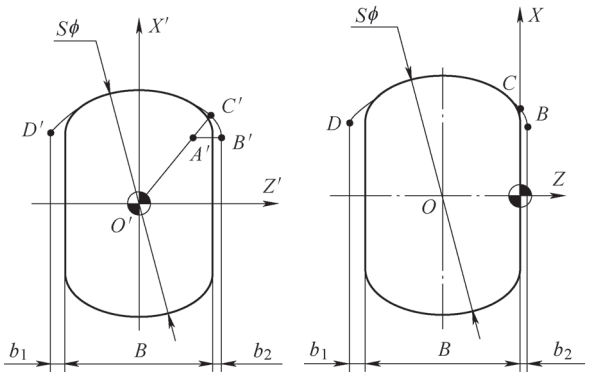


图5　几何法采点工艺流程

两端圆角r、内环壁厚B、退刀偏移量b_1及进刀偏移量b_2，求B、C、D三点在数控车床工件坐标系中的位置坐标。轴承内环数控车点位如图6所示。在外球面的球心设置$Z'O'X'$坐标系，先计算在球心坐标系（$Z'O'X'$坐标系）中各点位置坐标，再使用坐标转换，将B'、C'、D'点转化为数控车床工件坐标系（ZOX坐标系）中B、C、D三点的位置坐标。



a）$Z'O'X'$坐标系　　b）ZOX坐标系

图6　轴承内环数控车点位示意

在球心坐标系中，根据各点的几何关系，列如下方程组

$$\frac{B}{2}+b_2-Z'_{\mathrm{A}}=r \tag{1}$$

$$\sqrt{Z'^{\,2}_{\mathrm{A}}+X'^{\,2}_{\mathrm{A}}}+r=R \tag{2}$$

$$\frac{X'_{\mathrm{A}}}{Z'_{\mathrm{A}}}=\frac{X'_{\mathrm{C}}}{Z'_{\mathrm{C}}} \tag{3}$$

$$(Z'_{\mathrm{C}}-Z'_{\mathrm{A}})^2+(X'_{\mathrm{C}}-X'_{\mathrm{A}})^2=r^2 \tag{4}$$

$$-\frac{B}{2}-b_1=Z'_{\mathrm{D}} \tag{5}$$

$$Z'^{\,2}_{\mathrm{D}}+X'^{\,2}_{\mathrm{D}}=R^2 \tag{6}$$

式中，B是内环壁厚（mm）；b_2是进刀偏移量（mm）；Z'_{A}是$Z'O'X'$坐标系中A点在Z轴上的值（mm）；r是两端圆角半径（mm）；X'_{A}是$Z'O'X'$坐标系中A点在X轴上的值（mm）；Z'_{C}是$Z'O'X'$坐标系中C点在Z轴上的值（mm）；X'_{C}是$Z'O'X'$坐标系中C点在X轴上的值（mm）；b_1是退刀偏移量（mm）；Z'_{D}是$Z'O'X'$坐标系中D点在Z轴上的值（mm）；X'_{D}是$Z'O'X'$坐标系中D点在X轴上的值（mm）；R是内环外球面半径（mm）。

3.2　Excel函数套用实现采点功能

Excel电子表格具有强大的数学计算、图形显示功能[3]，且应用广泛、易于操作[4]，如图7所示。为了使数据处理更清晰明了，将Excel轴承内环点位计算表分为4个区域，即输入参数区、输出参数区、数据运算区和图示区。在数据运算区设置中间变量，用公式法求解以上方程组，并根据实际几何关系，舍去不需要的解，求解过程的函数如下。

B13=B4/2；

B14=B6/2+B8B5；

B15=SQRT((B13-B5)^2-B14^2)；

B16=B15/B14；

B17=B16^2+1；

B18=-2*(B14+B16*B15)；

B19=B14^2+B15^2-B5^2；

B20=(-B18+SQRT(B18^2-4*B17*B19))/(2*B17)；

B21=1；

B22=-2*B15；

B23=(B20-B14)^2+B15^2-B5^2；

B24=(-B22+SQRT(B22^2-4*B21*B23))/(2*B21)；

B25=-(B6/2+B7)；

B26=SQRT(B13^2-B25^2)；

B27=B6/2+B8；

B28=B15；

将求解的值转换为数控车床工件坐标系对应的位置坐标，并将内环圆角r=0时，C'点坐标（Z'_C，X'_C）无解的特殊情况纳入范畴，此时C'坐标与B'重合。设置IF函数，当内环圆角r=0时，将坐标（Z'_B，X'_B）赋值于（Z'_C，X'_C）。坐标转换的函数如下。

D12=B27-B6/2；

D13=B28；

D14=IF(B5=0,D12,B20-B6/2)；

D15=IF(B5=0,D13,B24)；

D16=B25-B6/2；

D17=B26；

在输出参数区，根据以上结果显示出3个点的位置坐标。本案例中，由于作者单位的机床显示精度为0.001mm，Excel中无直接用于四舍五入的函数，所以输出参数时，保留4位小数，最终在编程时根据机床计算精度进行数值圆整计算[5]。输出参数的函数如下。

D4="("&TRUNC(D12,4)&"，"&TRUNC(D13,4)&")"；

D5="("&TRUNC(D14,4)&"，"&TRUNC(D15,4)&")"；

D6="("&TRUNC(D16,4)&"，"&TRUNC(D17,4)&")"；

参数化采点工艺流程如图8所示，将采点工艺流程简化为：查看各参数→在输入参数区输入正确的参数→输出交点坐标→校对检查。

输入参数区　　输出参数区　　图示区

	A	B	C	D	E
1	轴承内环参数化采点表				点位分布图
2	输入参数		输出参数		
3	参数	数值	点位	数值	
4	内环直径$S\phi$/mm	25.021	B（z，x）	（0.0199，7.5074）	
5	内环圆角r/mm	0	C（z，x）	（0.0199，7.5074）	
6	内环壁厚B/mm	19.975	D（z，x）	（-20.4750，6.8209）	
7	退刀偏移量b_1/mm	0.5			
8	进刀偏移量b_2/mm	0.02			
9					
10	数据运算区				
11	球心坐标系		转换为数控车坐标系		
12	计算变量		Z_B	0.02	
13	内环半径R/mm	12.5105	X_B	7.50749985	
14	Z'_A	10.0075	Z_C	0.02	
15	X'_A	7.50749985	X_C	7.50749985	
16	斜率K	0.750187345	Z_D	-20.4750	数据运算区
17	a_1	1.562781052	X_D	6.820920319	
18	b_1	-31.27906275			
19	c_1	156.5126103			
20	Z'_C	10.0075			
21	a_1	1			
22	b_2	-15.0149997			
23	c_2	56.362554			
24	X'_C	7.50749985			
25	Z'_C	-10.4875			
26	X'_D	6.820920319			
27	Z'_B	10.0075			
28	X'_B	7.50749985			
29					

图7　Excel界面

4　应用推广

4.1　应用效果

某轴承内环精车外形尺寸如图9所示，加工内容为精车外球面及两端圆角，其中$S\phi$25mm为名义值，实际按要求值加工。需要根据外球面要求值、起刀偏移量和退刀偏移量等参数，采集圆角起点、圆角终点以及外球面终点3个点的位置坐标，原几何法采点工艺每个零件采点时间约为20min，用参数化采集工艺后，每次采点只需输入5个参数便可以计

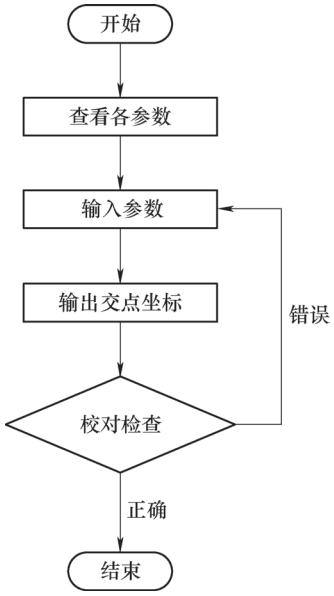


图8　参数化采点工艺流程

算出需要的位置坐标，轴承内环参数见表2，轴承内环点位分布如图10所示，每个零件采点只需要约1min，大大降低了采点工程量。

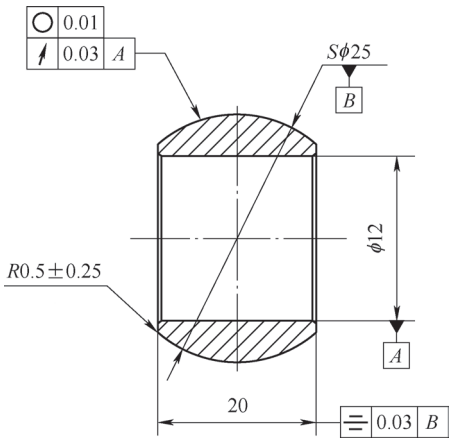


图9　某轴承内环精车外形尺寸

表2　轴承内环参数化采点

输入参数		输出参数	
参数	数值	点位	数值
内环直径$S\phi$/mm	25.021	B（z，x）	（0.0199，7.5074）
内环圆角半径r/mm	0	C（z，x）	（0.0199，7.5074）
内环壁厚B/mm	19.975	D（z，x）	（−20.4750，6.8209）
退刀偏移量b_1/mm	0.5		
进刀偏移量b_2/mm	0.02		

4.2　推广应用案例

筒体孔口圆角如图11所示，液压作动筒筒体内孔与孔口倒角相交处为防止产生尖边划伤密封

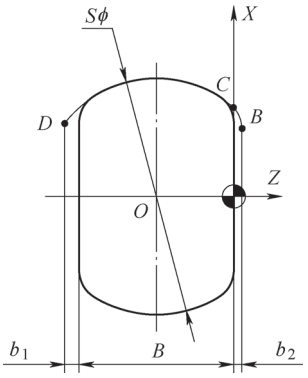
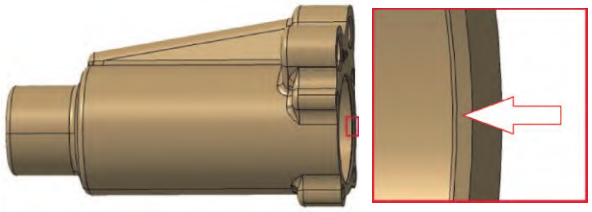


图10　轴承内环点位分布示意

胶圈，并保证其他零件顺利装配，一般有圆角过渡结构，加工这种结构时，需要根据各交点的位置坐标编制程序。原几何法采点工艺每次大约需要10min，用参数化采点工艺每次只需要约1min，采点时间大大缩短。孔口倒角、圆角参数见表3，孔口倒角、圆角采点点位分布如图12所示。



a）筒体示意　　b）圆角放大示意

图11　筒体孔口圆角

表3　孔口倒角、圆角参数

输入参数		输出参数	
参数	数值	点位	数值
内孔直径ϕD/mm	20	B（z，x）	（0.000，21.456）
倒角角度α/（°）	30	C（z，x）	（−1.834，20.120）
倒角大小b/mm	2	D（z，x）	（−2.176，10.000）
圆角R/mm	1		

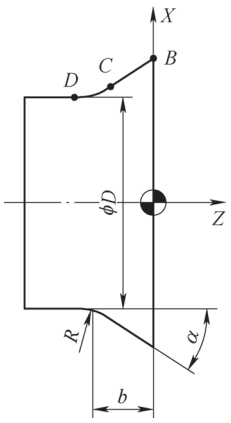


图12　孔口倒角、圆角采点点位分布示意

（下转第76页）

图12所示，优化后压装完成后接触部分圆筒状态如图13所示。

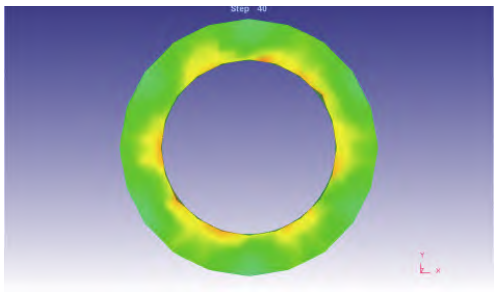


图12　优化后压装接触面材料塑性变形

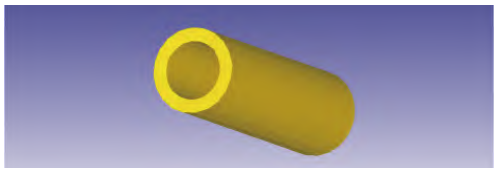


图13　优化后压装完成后接触部分圆筒状态

4　试验验证

根据上述有限元分析结果，对该零件重新制作后进行压装，压装后圆筒表面未见卷边痕迹，不锈钢圆筒试制实物如图14所示。根据上述方法对其他材质的圆筒进行压装，同样未见明显缺陷，其他材质圆筒试制实物如图15所示。

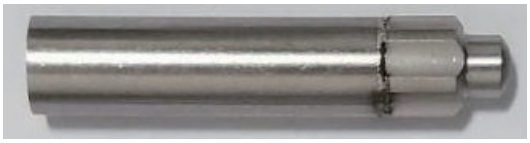


图14　不锈钢圆筒试制实物



图15　其他材质圆筒试制实物

5　结束语

综上所述，建立力学模型，利用有限元分析，得出非标零件在压装时发生塑性变形的位置，并对一些非标零件的不确定性因素进行优化，提高成品率。该方法可以指导非标零件装配工艺的选择和优化，为提高产品质量、降低生产成本提供参考依据。

参考文献：

[1] 宋刚，刘顶，杨艳芳，等. 过盈联接装配质量研究方法综述[J]. 机械设计与研究，2024，40（5）：204-210.

[2] 李宏达，贾晨，郭兰慧，等. 不锈钢薄壁复合方钢管柱轴压局部屈曲研究[J]. 建筑结构学报，2024，45（S1）：79-89.

[3] 胡欣慰. 不锈钢薄壁管自由弯曲成形中残余应力产生机理及其振动消抑研究[D]. 西安：西安工业大学，2024.

[4] 毛秋阳，张如华，虞班龙，等. 薄壁304不锈钢管管口内卷变形分析与试验研究[J]. 塑性工程学报，2023，30（8）：76-82.

[5] 李志栋，陈亮，秦楚山，等. 大规格薄壁衬筒的低应力压装工艺研究[J]. 制造技术与机床，2021（1）：82-84.

[6] 朱寒. ϕ30mm内径空心车轴轮对冷压装工艺优化及试验研究[D]. 青岛：中国石油大学（华东），2019.

MW 20250513

（上接第72页）

5　结束语

本文针对空天作动领域轴承内环类零件采点工程量大的问题，利用Excel表格的运算函数及条件格式等功能，实现了对这类零件交点位置坐标的简单、快速且准确的计算，并为后续的参数化工艺设计提供良好的案例，促进企业的数字化转型。

参考文献：

[1] 李臻. 基于Excel的水电站高边坡预应力锚索支护施工进度管理工具研究与应用[J]. 水利水电技术（中英文），2023，54（S1）：178-183.

[2] 周贺. 整体型球头关节模压成形工艺研究[D]. 秦皇岛：燕山大学，2018.

[3] 贾博，卢远梅，景雪晖，等. Excel在煤质检测数据处理中的应用[J]. 计算机与应用化学，2019，36（2）：168-173.

[4] 高鹏，李增涛，于峰丹，等. 利用Excel实现快速整理CG-5型重力仪静态试验数据和计算漂移常量DRIFT[J]. 物探与化探，2019，43（1）：209-214.

[5] 许迪，李丽珍，吴艳林，等. Excel条件语句在水质达标分析中的运用研究[J]. 环境工程，2023，41（S1）：530-531，560.

MW 20250505