

# 机器人异形转座数控加工工艺分析

龚志坚, 林中月, 陈来三

(集美大学海洋装备与机械工程学院, 福建 厦门 361021)

**[摘要]** 针对机器人异形转座结构复杂, 难加工的技术特点, 分析机器人转座壳体结构和技术要求, 结合卧式加工中心性能指标, 提出一种机器人异形转座数控加工工艺方案; 设计专用工装夹具和非标刀具, 计算影响加工精度的平行度公差和夹紧力。精度检测的结果证明, 该工艺方案和夹具能满足机器人异形零件加工制造要求。

**[关键词]** 机器人; 异形转座; 数控加工工艺; 夹具设计

**[中图分类号]** TG 659

## Analysis and Research on CNC Processing Technology of Robot Special-Shape Rotary Bases

GONG Zhijian, LIN Zhongyue, CHEN Laisan

(School of Marine Equipment and Mechanical Engineering, Jimei University, Xiamen 361021, China)

**Abstract:** The structure of therobot special-shaped rotary bases is complex and difficult to process, which is the technical difficulty of the industry. Based on the analysis of the structure and technical requirements of the robot rotary base shell, the key munufacturing difficulties of the shell were extracted by taking the reference of the performance index of the horizontal machining center. A reasonable and effective CNC( computer numerical control) processing technology scheme of the robot special-shaped rotary bases was proposed, its special clamping devices and non-standard cutter were designed, and parallel tolerance and clamping force which affect processing accuracy were calculated. The test of the accuracy of the robot transposition shell processed by the processing scheme proves that the scheme and the designed clamping devices can meet the manufacturing requirements of this kind of special-shaped parts.

**Keywords:** robot special-shape rotary base; CNC processing technology; fixture design

## 0 引言

异形壳体零件大多为铸造件, 存在切削余量大, 制造过程中受切削力、切削热影响, 容易发生变形。设计夹具时, 存在定位基准和夹紧点不易选择等众多难题。合理规划加工工艺是提高产品质量、缩短制造周期的关键。针对壳体类零件的数控加工工艺研究有许多, 魏娟等<sup>[1]</sup>从图纸技术分析入手, 提出数控加工工艺方案并通过模拟加工进行验证, 证明了方案合理并用于实际加工; 于桂欣等<sup>[2]</sup>研究了航空液压壳体零件, 提出了采用数控编程来提高加工效率; 龙章海等<sup>[3]</sup>从影响孔系加工精度因素入手, 提出提高位置精度方法; 刘冠成等<sup>[4]</sup>针对薄壁零件提出改善装夹方式, 解决了薄壁件变形

和加工效率低的问题；谢福贵等<sup>[5]</sup>引入机器人进行多机协同的新型制造模式，解决了大型构件中变形误差和切削振动等制造难题。高翔等<sup>[6]</sup>提出增强薄壁零件工艺刚度，合理规划走刀路线、优化切削参数，解决了薄壁零件铣削工艺难题。壳体类零件结构复杂，加工制造受装备、材料、刀具等众多因素制约，方案合理选择是解决难题的关键<sup>[7-9]</sup>。

上述研究多着重于工艺规划和模拟仿真，对从毛坯开始进行方案设计和夹具设计等方面的研究相对较少。某企业的机器人转座零件加工存在毛坯余量大，零件壁厚不均匀，加工部位与零件结构有一定的干涉，从而影响刀具选择。因此本文重点阐述转座这一特定零件数控加工工艺方案的选择，据此设计专用夹具，实现转座零件的高效加工。

1 转座工件结构特点及关键技术指标

转座零件示意图如图 1 所示，（图中尺寸单位均为 mm）。其中：图 1a）为机器人壳体零件转座的 3D 模型，材料为 QT500，由上下两部分组成，上半部分为薄壁结构，连接大臂，实现机器人俯仰运动；下半部分为回转体类结构，通过旋转关节与底座相连，实现水平方向旋转运动。

本文孔径均为 mm，其主要的技术指标见表 1。

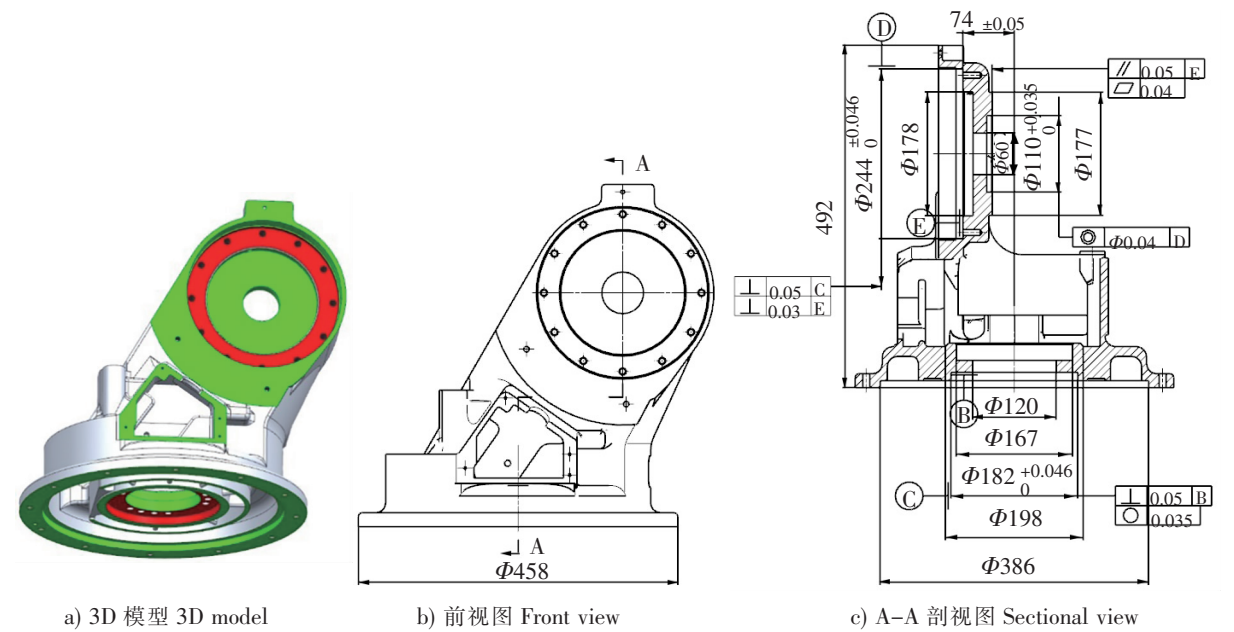


图 1 转座零件  
Fig.1 Rotary base

表 1 关键技术指标  
Tab.1 Key technical indices

加工内容 Processing content	尺寸公差 Dimension tolerance/mm	形位公差 Geometric tolerance/mm	基准 Benchmark	位置 Location
Φ182 孔 Hole	0.046	圆度 Roundness 0.035		RV 减速器安装孔 RV reducer mounting hole
Φ182 ~ Φ198 孔系 A series of holes		垂直度 Perpendicularity 0.05	Φ182 孔底面 Bottom surface of hole	驱动电机安装孔 Driving motor mounting hole

续表 1

加工内容 Processing content	尺寸公差 Dimension tolerance /mm	形位公差 Geometric tolerance/mm	基准 Benchmark	位置 Location
$\Phi 244$ 孔 Hole	0.046	圆度 Roundness 0.035		
$\Phi 244$ 孔中心线 Center line of hole		垂直度 Perpendicularity 0.05	$\Phi 182$ 孔中心线 Center line of hole	RV 减速器安装孔 RV reducer mounting hole
		垂直度 Perpendicularity 0.03	$\Phi 244$ 孔底面 Bottom surface of hole	
$\Phi 110$ 孔 Hole	0.035	同轴度 Coaxiality 0.04	$\Phi 244$ 孔中心线 Center line of hole	驱动电机安装孔 Driving motor mounting hole
$\Phi 177$ 凸台 Convex platform		平行度 Parallelism 0.05	$\Phi 244$ 孔底面 Bottom surface of hole	驱动电机安装平面 Driving motor mounting plane

## 2 转座加工设备选型及夹具设计

### 2.1 加工设备的选择

转座加工既有空间轴线相互垂直的孔、面加工，又有不同角度上凸台铣削和螺纹孔加工。这类异形壳体零件制造过程中，工作台需要多次回转，结合设备行程、定位精度等因素，选用数控系统为 FANUC\_0iMF 的卧式加工中心（MCH\_630），X 轴、Y 轴、Z 轴有效行程分别为 1000，850，800 mm。

设计夹具时与设备相关的参数包括：

- 1) Z 轴方向主轴端面至工作台中心距离 160 ~ 960 mm，这个参数决定了夹具在工作台的安装位置，并影响刀具长度的选择；
- 2) Y 轴方向中心线至工作台面距离 50 ~ 900 mm，这个参数决定了夹具底板与工作台最小高度；
- 3) 交换工作台时允许最大回转直径为 900 mm，这个参数决定了夹具水平方向最大尺寸。

由于零件异形，既需要在重要面上钻孔，也需在薄壁筋板上钻孔，攻螺纹。因此，本设备具有中心出水的功能，有利于加工过程中排屑，并控制热变形。

### 2.2 夹具设计

#### 2.2.1 加工工序方案选择

方案 1。 $\Phi 182$  与  $\Phi 244$  孔系轴线在空间上垂直，它们之间的公共基准是  $\Phi 458$  法兰面，因此利用卧式加工中心工作台旋转，实现一次装夹完成关键孔系和面加工，装夹示意图如图 2 所示。

方案 2。采用互为基准方式保证加工的精度，即采用两道工序、两套夹具，分别完成  $\Phi 244$  孔系和  $\Phi 182$  孔系加工。两种方案比较如表 2 所示。

方案 2 中 OP10 工序， $\Phi 485$  外圆及端面限制 5 个自由度，观察窗口限制角向自由度，其定位误

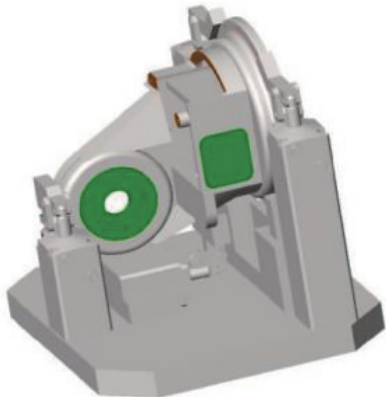


图 2 关键孔系加工夹具图  
Fig.2 Processing clamping devices  
of series key hole

差主要来源于毛坯铸造精度，结构上以自动定心液压卡盘作为主定位装置，在  $X$  轴方向上设有校正平块，用于检验角向定位精度，防止由于定位超差，特别是  $\Phi 177$  凸台和  $\Phi 244$  孔底面的平行度公差超标，而产生余量不均匀和错位，影响加工质量，甚至产生废品。

OP20 工序中，以  $\Phi 244$  孔及端面作为主定位，配合角向定位，实现工件正确装夹。但工件装夹存在头重脚轻现象，因此在  $\Phi 485$  外圆及端面处设有辅助支撑和辅助夹紧装置，确保  $\Phi 485$  外圆及端面铣削时有足够的夹紧力满足粗加工要求。

综合考虑，选择方案 2 为数控加工工艺方案。

表 2 方案比较  
Tab. 2 Scheme comparison

方案 Sscheme	定位方式 Located mode	夹紧方式 Clamping mode	存在风险因素 Existential risk factor	工作台旋转干涉 Table rotation interference
1	V 型块定心 + 角向定位 V-shaped blocklocating center + Angular positioning	V 型块夹紧 V-shaped block clamping	定位稳定性差,无有效切 削轴向力支撑 Poor positioning stability, no effective support of axial cutting force	夹具回转直径大于 900 mm,存在干 涉,需要大一号机床 The rotary diameter of the clamping de- vices is more than 900 mm,which pro- duces interference,needing a larger ma- chine tool
2	OP10 自动定心 + 角向定位 Automatic centering + Angular positioning	压板夹紧 Pressing plate clamping	计算平行度公差 Calculate parallelism	夹具回转直径小于 900 mm The rotary diameter of the clamping de- vices is less than 900 mm
	OP20 自动定心 + 角向定位 Automatic centering + Angular positioning	压板夹紧 Pressing plate clamping	校核夹紧力 Check clamping force	夹具回转直径小于 900 mm The rotary diameter of the clamping de- vices is less than 900 mm

2. 2. 2 定位元件和夹具底板的设计

OP10 中  $\Phi 458$  圆柱面为毛坯面，定心卡盘延长爪采用了滑轨结构，延长爪与定心拉杆活动联接，夹爪与工件接触部分进行局部高频淬火热处理，保证定位可靠。

OP20 定位孔为已加工面，定心夹爪为软爪，增大了整体接触面，避免破坏定位面和定位精度。

定位支撑面固定在夹具底板上，夹具底板采用 45 钢调质处理，支撑板采用 T8 淬火工具钢，并进行磨削处理以保证等高。底板采用上下两层处理，降低夹具制造难度，两层高度尺寸应大于主轴中心线与工作台最小距离，防止加工时造成刀具  $Y$  轴向行程不够。

转座零件尺寸大，质量大，吊装时不易保证平衡，因此，在夹具设计时增加导向定位柱，缩短安装工件时长。工件最大外形尺寸为 458 mm × 492 mm，夹具外形尺寸大于工作台尺寸，因此，设计夹具时应对称布置，并在夹具上设有对刀块，便于工件坐标系设定。

按照上述定位和夹紧要求，设计相应的夹具，简图如图 3、图 4 所示。

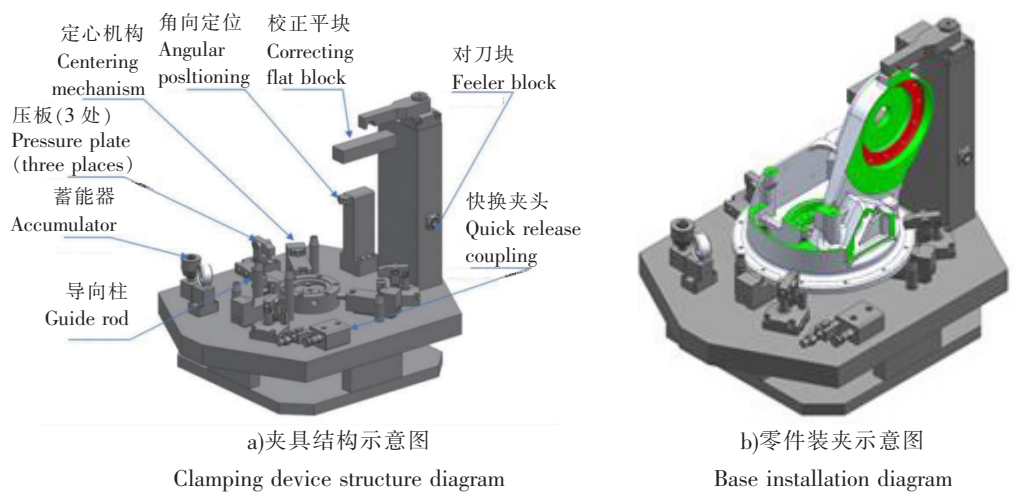


图 3 OP10 夹具图

Fig.3 The diagram OP10 clamping devices

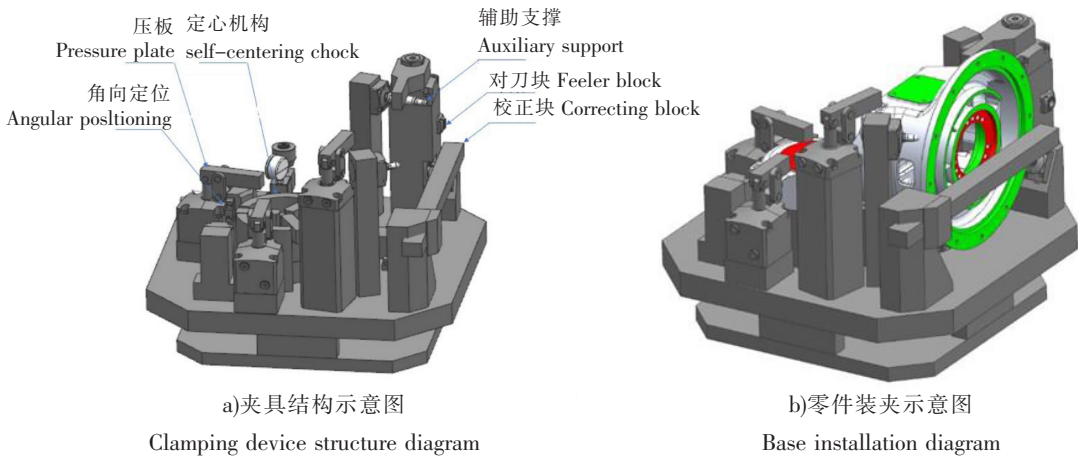


图 4 OP20 夹具图

Fig.4 The diagram OP20 clamping devices

2.3 平行度和夹紧力校核

2.3.1 平行度公差理论计算

OP10 中  $\Phi 244$  底面和  $\Phi 177$  凸台面分别位于同轴向两个平行平面上, 即加工后的  $\Phi 177$  凸台面必须位于相距  $0.05\text{ mm}$  的两个理想平面之间, 且理想平面平行于  $\Phi 244$  孔的底面, 与  $\Phi 244$  基准面的位置关系如图 5 所示。其中:  $\Delta Z$  为两者平行度误差, 其计算式为

$$\Delta Z = \Phi D \times \sin\alpha。$$
 (1)

式中: 凸台直径  $\Phi D = 177\text{ mm}$ ;  $\alpha$  为工作台回转定位精度,  $\alpha = 0.005^\circ$ 。

由式 (1) 可知  $0.015\text{ mm} < 0.05\text{ mm}$ , 理论上旋转工作台铣削  $\Phi 177$  凸台面能保证平行度要求, 同理也能保证  $\Phi 244$  孔与  $\Phi 110$  孔的同轴度要求。

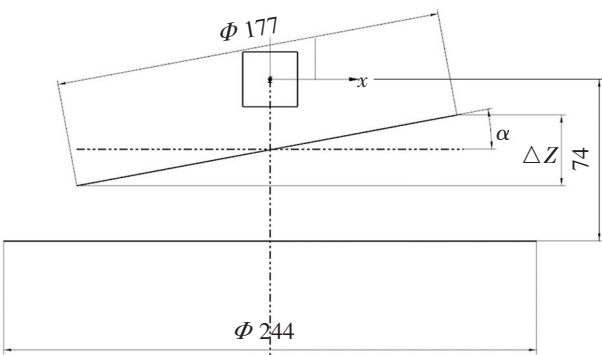


图 5 工作台旋转  $180^\circ$  时  $\Phi 177$  凸台与  $\Phi 244$  位置关系

Fig.5 Positing relationship between convex platform  $\Phi 177$  and  $\Phi 244$  when the worktable rotates  $180^\circ$



2.3.2 夹紧力校核

夹紧装置在夹具中起着重要作用，其产生的夹紧力确保了铣削过程中不会因为切削力的作用而破坏工件定位。OP20 工序主要加工  $\Phi 458$  端面和相应孔系，由于工件本身头重脚轻，铣削平面时，在铣刀的铣削切向力和工件的重力作用下，YOZ 平面的工件有绕支撑点 O 翻转的趋势，需要通过夹紧装置产生夹紧力克服。铣削平面是一个动态过程，精确计算夹紧力很困难，但可以通过最恶劣工况进行理论计算，作为夹紧装置设计的依据，确保其可靠性和安全性。工件受力示意图如图 6 所示。其中： $F_1$ 、 $F_2$ 、 $F_3$  为液压压板产生的夹紧力，分布在  $\Phi 177$  凸台外围对称位置上， $F_1 = F_2 = F_3$ ； $F_q$  为铣削平面产生的切向力； $F_4$  为工件的重力； $L_1$ 、 $L_2$ 、 $L_3$  分别为力的作用点到翻转中心 O 的距离。根据力矩平衡定理，可得夹紧力计算公式：

$$(F_1 + F_2) L_2 = K F_q L_1 + F_4 L_3。$$

(2)

其中： $K$  为安全系数。

铣削平面产生的切向力  $F_q$  主要由  $\Phi 458$  端面铣削条件计算得到。用  $\Phi 63$  齿数为 6 的方肩铣刀，切深  $a_p = 1\text{ mm}$ ，切宽  $a_e = 36\text{ mm}$ ，切削速度  $V = 160\text{ m/min}$ ， $f_z = 0.12\text{ mm/r}$ ，依据加工材料和铣削条件查得单位切削力  $p = 3330\text{ MPa}$ ，因此，可求得铣削平面产生的切削力为：

$$F_q = p[a_e a_p f_z Z / (\pi D)] = 436\text{ N}。$$

式 (2) 中的安全系数  $K$  反映加工性质，工艺系统工作状况，综合考虑，选择  $K = 2$ ； $F_4 = 550\text{ N}$ ； $L_1 = 89.5\text{ mm}$ ； $L_2 = 135\text{ mm}$ ； $L_3 = 17.7\text{ mm}$ 。带入公式 (2) 求得  $F_1 = F_2 = F_3 = 325\text{ N}$ 。

因此，液压夹紧力必须大于 325 N 才能达到加工要求，综合考虑选择液压系统工作压力为 4 MPa，并且在  $\Phi 458$  圆柱面处设置辅助支撑和辅助夹紧，用以改善切削环境，有利于保证平面度和垂直度的技术要求。

3 关键工序刀具选型

转座零件上  $\Phi 167$  孔和  $\Phi 198$  圆台需要通过  $\Phi 120$  孔进行反镗和反铣加工。为保证顺利铣削，需要设计一把非标的三面刃铣刀，铣刀设计依据见表 3，结构如图 7 所示（图中尺寸单位为 mm）。

表 3 非标三面刃铣刀设计依据

Tab. 3    Design basis of non-standard three-edge milling cutter

mm

项目 Project	影响因素 Influence factor	尺寸选择 Size selection
刃径 Blade diameter	$\Phi 120$ 孔通过能力 Passing capacity of $\Phi 120$ hole	$\Phi 116$
刀柄直径 Cutter handle diameter	需要反镗加工 $\Phi 167$ 孔和 $\Phi 198$ 凸台面, 设计时主要考虑干涉 It needs to reverse boring with diameter of $\Phi 167$ hole and $\Phi 198$ surface of convex platform and considerate the interference	$\Phi 60$ 、 $\Phi 35$ 、 $\Phi 80$ 三段式的台阶轴。 Three-stage step shaft of $\Phi 60$ 、 $\Phi 35$ 、 $\Phi 80$
	刀柄嵌入硬质合金棒, 提高切削刚性 Cutter handle embedded tungsten carbide rod to improve the cutting rigidity	$\Phi 25$ 硬质合金棒 $\Phi 25$ tungsten carbide rod

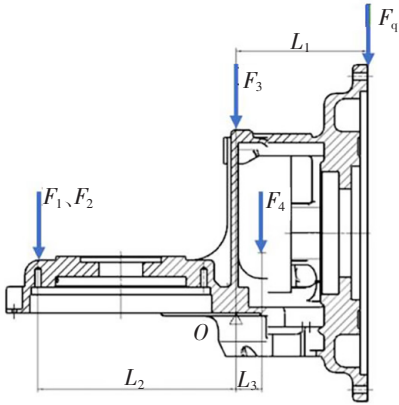


图 6 工件受力简图

Fig.6 Schematic diagram of workpiece stress

4 夹具校正及加工结果分析

夹具固定在机床工作台后, 需要通过百分表校正基准边, 并往复移动工作台, 确保百分表偏摆值在 0.01 mm 以内。夹具校正完成后, 进行工件安装精度检查, 也是使用百分表接触工件关键部位, 夹具执行夹紧、放松动作, 同时将工件偏离, 观察百分表指针变化, 判断夹具定位精度是否在合理范围内。

在铣削薄壁筋板时, 现刀具悬伸不宜过长, 否则会造成加工困难, 此处平面为 M4 螺栓钻孔攻牙的前道工序, 因此将其改为镗孔, 降低加工难度, 保证切削顺利进行。

加工完成后, 通过蔡司三坐标检测仪进行工件测量, 关键技术指标检测结果: 平面度为 0.015 mm; 垂直度为 0.008 mm; 平行度为 0.020 mm; 同轴度为 0.030 mm。其形位公差精度远高于设计要求, 影响电机与 RV 减速器安装垂直度精度提高 60%。

5 结论

本文以机器人转座的数控加工为研究对象, 针对异形零件的加工难点和技术要求, 制定了相应的工艺方案。设计专用夹具时充分考虑机床、刀具和夹具之间相互影响关系, 并对关键技术指标和夹具的夹紧力进行理论核算。实际加工检测结果证明了工艺的合理性和工艺系统的稳定性, 设计的工艺方案是可行的, 并为今后壳体类零件加工积累了经验。

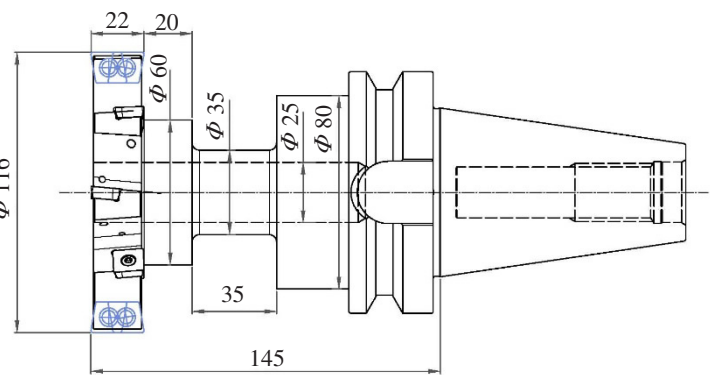


图 7 非标的三面刃铣刀及刀柄  
Fig.7 Non-standard three-edge milling cutter and its handle

[ 参考文献 ]

[1] 魏娟, 邵丁, 刘豪, 等. 大型壳体零件的数控加工工艺分析及研究 [J]. 机床与液压, 2017, 45(20): 25-29.  
[2] 于桂欣, 郭红海. 数控加工技术在航空液压壳体零件加工中的应用 [J]. 机床与液压; 2012, 40(17): 138-140.  
[3] 龙章海, 郑英, 李春华. 影响孔系加工位置精度的因素及提高精度的措施 [J]. 机床与液压, 2009, 37(4): 183-184.  
[4] 刘冠成, 李玲辉, 张海洋, 等. 异形薄壁件加工工艺优化研究 [J]. 机床与液压, 2021, 49(12): 60-63.  
[5] 谢福贵, 梅斌, 刘辛军, 等. 一种大型构件加工新模式及新装备探讨 [J]. 机械工程学报, 2020, 56(19): 70-78.  
[6] 高翔, 王勇. 薄壁零件精密数控铣削关键技术研究 [J]. 机床与液压, 2009, 37(9): 14-17.  
[7] 徐国庆, 徐飞跃, 曾超锋. 发动机油底壳数控加工工艺分析 [J]. 机械制造, 2011, 49(566): 78-81.  
[8] 刘胤, 胡小秋, 杨芸, 等. 弱刚度结构件的加工变形控制技术研究 [J]. 航天制造技术, 2009(1): 9-13.  
[9] 赵翔宇, 付丽秋, 陈建新, 等. 大型焊接壳体的数控加工 [J]. 制造技术及机床, 2013(11): 115-117.

(责任编辑 陈 敏 英文审校 郑青榕)