doi: 10.16576/j.ISSN.1007-4414.2025.05.005

多轴正交高精度旋转框架的数控加工方法分析及应用

吴　群
（航天科工惯性技术有限公司，北京　100074）

摘　要：该文针对多轴正交高精度旋转框架在装夹困难、易变形及同轴度超差等问题展开分析研究。首先分析了结构件的精度要求和加工难点，并通过设计合理的装夹方式与专用柔性组合工装，完成了球面及空间圆角的加工。其次在五轴曲面加工中，开展了加工方法与刀具轨迹分析，明确了曲面加工工艺及相关参数；然后利用 UG 软件进行了曲面补片处理，并设计了适用于内腔凹槽结构的 T 型刀；同时在粗、精加工阶段分别建立辅助毛坯模型，优化切削参数、刀具选型及走刀路径，并在生成 CAM 数控程序后开展刀轨仿真，避免加工过程中出现刀具碰撞或干涉。最后通过五轴数控实现了曲面薄壁件的高效批量加工，有效保证了短柱长距零件的同轴度，并在加工过程中实施两次热处理，从而显著提升了产品尺寸稳定性。

关键词：多轴；高精度；旋转框架；曲面；刀轨
中图分类号：TH74　　文献标识码：A　　文章编号：1007−4414(2025)05−0019−03

Numerical Control Machining Strategy of Multi-axis Orthogonal High Precision Rotating Frame

WU Qun
（*Aerospace Science and Industry Inertial Technology Co.，Ltd.，Beijing　100074，China*）

Abstract: This paper investigates the multi-axis orthogonal high-precision rotary frame，focusing on issues such as clamping difficulty，susceptibility to deformation，and excessive coaxiality errors. First，the precision requirements and machining challenges of structural components were analyzed，and by designing reasonable clamping methods and dedicated flexible fixtures，the machining of spherical and spatial fillets was accomplished. Next，in five-axis surface machining，the processing methods and toolpath strategies were analyzed to determine the surface machining process and relevant parameters. Surface patching was performed using UG software，and a T-shaped tool suitable for internal groove structures was designed. During roughing and finishing，auxiliary blank models were established to optimize cutting parameters，tool selection，and toolpath strategies. After generating the CAM CNC program，toolpath simulations were conducted to prevent collisions or interferences during machining. Finally，high-efficiency batch machining of thin-walled curved parts was achieved via five-axis CNC，ensuring the coaxiality of short-column long-distance components. Two heat treatment processes were implemented during machining，significantly enhancing the dimensional stability of the products.

Key words: multi-axis；high-precision；rotary frames；curved；tool path

0　引　言

多轴正交高精度旋转框架是航天产品中重要的惯导结构件，其具有重量轻、薄壁易变形、尺寸精度及形位精度高等特点。该类零件在加工过程中的材料去除率高，导致零件的刚度降低。因此，在铣削过程中，由于切削力、装夹和内部残余应力的影响，零件易产生变形[1−3]。同时，若定位精度不足或局部压紧力不均，会使零件相对理论位置发生偏移，从而造成特征尺寸与形位公差严重超差，难以保证加工精度与加工效率[4−5]。因此，如何结合零件特点合理设计工艺方法，以减小变形量、提升加工效率与精度，成为曲面薄壁件加工的关键难点。笔者通过对某多轴正交高精度旋转框架进行加工精度和加工难点分析，开展了加工工艺优化、工装设计和数控刀路设计，验证了提高薄壁件加工精度和加工效率的方法，对曲面薄壁件减少变形和提高同轴度有重要价值及意义。

1　曲面薄壁件工艺分析

1.1　加工难点

多轴正交高精度旋转框架外表面为球形曲面，外形尺寸为 194 mm×137 mm×112 mm。主要精度指标中，两组垂直方向孔的同轴度要求 0.005 mm，垂直度要求 0.015 mm，产品材料 2A12T4。

该零件加工过程中的主要难点有：①产品毛坯材料去除量达 90%，去除量大，常规铣床或车床对棒料毛坯的粗加工效率低、工序流转多；②铣削内曲面深腔时，常规 UG 层削轴向切削深度 2 ~ 3 mm 的分层加

收稿日期：2024−10−21
作者简介：吴　群（1982−），女，山东淄博人，工程师，硕士研究生，研究方向：机械加工工艺、质量检测。

工方式效率低、刀具磨损大；③零件薄壁的刚度弱，在加工过程中容易产生震颤，进而引起零件加工质量的不稳定；④零件基准孔精度要求高，现有零件结构特点不易装夹；⑤加工过程中常规 UG 层削去除量大，零件薄壁装夹易变形；⑥零件属于短柱长距零件，公共轴的同轴度要求 0.005 mm，精度高，加工难度大。

1.2　加工工装

该零件所有内腔及外曲面均需要加工，壁厚较薄，若使用传统虎钳装夹，会导致外形直壁面受力大而变形，无法保证产品精度。该零件首批生产时按照传统虎钳装夹侧壁，加工后内腔呈张开状态，变形量达 0.5 mm，基准孔的同轴度在 0.05 mm 左右，不满足设计要求。为减少变形，需考虑设计辅助工艺台。

粗加工棒料阶段，先按照棒料毛坯粗加工模型图（见图 1）加工工艺凸台，尺寸为 150 mm×150 mm，厚度为 16 mm，上下面中心处设通孔，以安装螺栓夹紧用。以该工艺凸台为底面和侧面定位基准进行装夹，完成半精加工模型图（见图 2）加工。

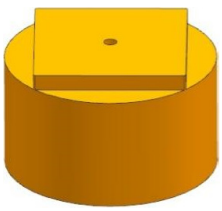


图 1　棒料毛坯粗加工模型图

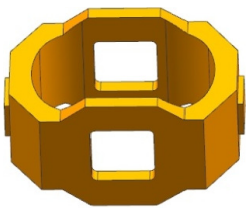


图 2　半精加工模型图

半精加工模型的工艺凸台设计需考虑四个大孔的尺寸、零件结构的对称性，也要考虑粗精加工便于装夹，同时还要考虑加工完成后工艺凸台的去除。小孔两侧设计工艺凸台，其厚度设计为 5 mm，保证连接刚度。凸台的外形尺寸需保证加工余量 1 mm；大孔两侧设计为方孔，尺寸需保证加工余量 1 mm。

工艺凸台可完成粗加工阶段所有内腔的半精加工与精加工。为此，设计了以上下台阶面为定位基准的半精加工专用柔性组合工装定位件（见图 3），并根据工装零件装夹图（见图 4）完成组合装夹。该工装由安装在机床工作台上的固定件与定位件组成：固定件提高安全避让高度，定位件安装于其上。加工时，首先依据数控程序调整零件台阶面坐标系，并将零件安装在定位件上以限制三个自由度；随后通过调整双头螺栓位置限制两个自由度；最后利用圆弧面定位点与内腔接触限制剩余自由度，实现完全定位。支撑压紧元件及带肩螺母确保零件可靠压紧。该工序完成后进行第二次热时效处理，以减少变形并释放残余应力。随后对上下台阶面研磨，再次采用柔性组合工装装夹，方式与前述相同，确保零件完全定位。最后完成基准孔的二次镗孔精加工，有效保证零件同轴度。

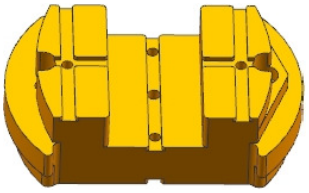


图 3　专用柔性组合工装定位件图

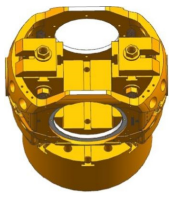


图 4　专用柔性组合工装零件装夹图

加工过程中，需根据产品外形进行干涉面、检查体的设置和刀路避让策略。

1.3　工艺分析

零件材料为 2A12 挤压板，加工过程中分粗、半精和精加工。粗加工阶段材料去除量大，需进行热处理后安排正负温时效处理，半精加工后再安排时效。主要加工路线为：下棒料、粗铣（毛坯工艺台）、热处理、半精内腔、半精上下台阶面、半精外形（去除工艺台）、热处理、精加工镗孔、表面处理。

1.4　走刀路径及刀具设计选择

在数控加工中，刀具刀位点相对于工件的运动轨迹称为走刀路径，即刀具从对刀点开始运动起，直至加工程序结束所经过的路径，包括切削加工的路径及刀具切入、切出等非切削空行程。确定走刀路线的总原则为：①应能保证零件的加工精度和表面粗糙度要求；②尽量缩短走刀路线，减少刀具空行程时间[6−7]；③从弱刚性区开始加工，利用未加工部分支撑以减小变形；④路径应具对称性，以便控制和修正变形。

由走刀路径及切削顺序对产品变形的影响[8−9]可知，粗加工时先用 UG 型腔铣削加工外腔，完成外侧对称切削；然后对中间型腔分上下两次翻面加工。

半精加工时，先完成内腔加工。内腔有一处凹槽需特制 T 型刀，内腔凹槽及 T 型刀设计如图 5 所示。刀杆长度、刀直径需根据凹槽最深处距侧壁面最长距离 AB 的长度选择。先绘制草图，*AB* 长度为 10.45 mm，根据干涉面最短距离确定刀杆与 T 型刀直径差值，再加上刀杆直径，其最小直径为 20.9 mm+刀杆直径。考虑残余切削量大小及刀杆安全干涉距离，最终选择 T 型刀直径 32 mm，刀杆直径 10 mm。

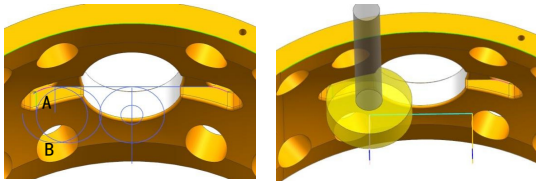


图 5　内腔凹槽及 T 型刀设计

2　UG 五轴数控编程

2.1　建立辅助模型和检查体

曲面零件模型上特征元素多，若直接使用模型的曲面加工，容易导致刀路混乱、抬刀多、效率低甚至撞

刀、加工不完整等问题。首先建立框架的半精加工模型图（见图 2），完成工件毛坯及辅助工艺台的加工。其次建立半精加工模型及检查体（见图 6），完成球形外曲面的加工。内腔曲面及剩余外腔曲面综合使用删除边、N 边曲面、网格曲面、修补开工等命令完成，确保加工面的完整性。所有建立的辅助模型使用图层命令，分别进行存放。

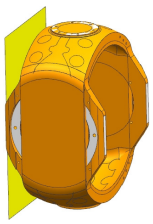


图 6 半精加工模型及检查体

2.2 生成 CAM 程序

零件框架的半精加工模型图（见图 2）的加工时间长，材料去除量大，按照常规层切方式刀具磨损大，加工效率低。该零件宜使用更高效的摆线铣策略。摆线是圆弧线的一种，它以固定的圆弧半径连续地作圆周运动，而圆心沿着固定的运行轨迹以预定的速度 v 移动。摆线铣示意图如图 7 所示，两次沿回转中心之间的移动距离 c 被称为步距。通常步距为刀具直径的 5% ~ 15% 之间。

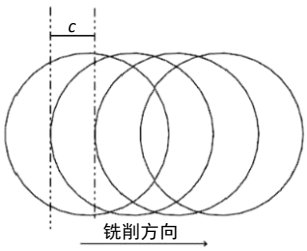


图 7 摆线铣示意图

摆线铣削是一种互补型加工策略，其特点是在预定路径上进行重复的圆周运动[10−11]，每一圈仅去除部分材料，避免刀具满刃切削。由于啮合量减少，刀具弯曲变形被最小化，能充分利用整个刀刃进行切削。同时，切屑较薄，易于排出。该方法适用于：①狭窄空间且轴向切削深度较大的区域铣削；②适用于薄壁零件的高效铣削；③难加工材料的切削，如高温合金、钛合金和耐热不锈钢；④余量变化较大的区域铣削。

传统铣削与摆线铣削（见图 8）刀具负载不同。摆线铣切削过程中刀具负载不会突变，径向切削深度较小，切削合力也较小。较低切削温度及小径向切深带来的低切削力，使摆线铣可采用比传统加工 2 ~ 3 倍的进给速度，从而提高加工效率。

另外，弱刚性构件在加工时因其刚性差，在切削力、切削热、切削颤振等因素的影响下易发生加工变形，导致加工精度不易控制[12]。切削参数中切削深度 a_p 对变形影响最大。综上，该零件的具体操作方法如下：以 ϕ10 mm 立铣刀刀具刃长 22 mm 为例，切削层参数中切削深度 a_p=22 mm，切削步距 a_e=0.9 mm，首层切削时可调整侧面余量−0.02 mm，主轴转速 n=13 000 转/min，进给速度 F=2 000 mm/min，计算每齿进给量 f_z 小于 0.1 mm/齿为宜，摆线向前，步长为刀具半径的 10% 以内。粗加工零件分上下面翻面且分两次完成深腔加工，每次深腔按照 22 mm 并进行三次层切。摆线、跟随部件、跟随周边切削策略下的步距（刀具直径百分比）、切削层深度、加工时间分别为 9%、22 mm、7 min；60%、2 mm、15 min；60%、2 mm、15 min。

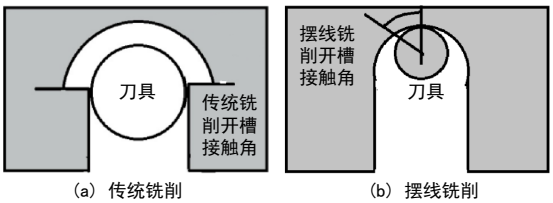


图 8 传统铣削与摆线铣削

2.3 刀轨优化

曲面件的实际加工轨迹根据零件加工部位及工装情况，完成进刀点、干涉面和检查体的设置。在零件旋转后，需对主轴及刀杆与工装安装面、铣床 A 轴工作台等进行刀轨仿真与碰撞检查。外曲面加工过程中，首先采用 ϕ16 mm 铣刀以型腔铣策略完成粗加工，随后使用 ϕ8 mm 球刀进行固定轴轮廓铣[13]，实现球面的精加工。零件的固定轴轮廓铣刀轨如图 9 所示。

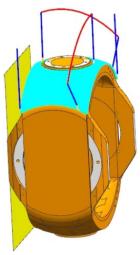


图 9 零件固定轴轮廓铣刀轨

2.4 同轴度检测

同轴度是多轴正交旋转框架的重要精度指标。为确保测量的准确性，文章使用海克斯康三坐标测量设备进行测量，其设备精度 1.5 μm。因框架两端孔距离为 194 mm，AB 基准对应圆柱长度 6 mm，属于典型短柱长距零件，因此同轴度评价使用公共轴线法。即分别建立基准 A 孔和 B 孔正截面圆的圆心连线为基准 A-B 的公共轴线，再分别在基准 A、B 上分别取两段圆柱建立轴线 A 和轴线 B，最后完成轴线 A、B 对公共轴线 A-B 的同轴度评价。优化前同轴度为 0.01 ~ 0.05，优化后为 0.002 ~ 0.005。通过对框架进行粗加工

（下转第 25 页）

槽，结构化表面性能降低。

4　结　论

通过建立结构化表面正弦滚压运动的数学模型，并使用 MATLAB 软件对该模型进行了外圆正弦运动滚压的运动仿真，分析了运动参数对表面形貌的影响规律，得出以下结论。

（1）通过正弦运动滚压方法可以实现多种形状的交叉网纹表面。

（2）当正弦运动滚压加工的振幅减小，或者振动频率增加且满足波形条件$(n+1/q)\lambda$时，结构化表面几何图案发生改变，从而形成规则的菱形格网纹表面。当轴向进给率大于 3 倍振幅时，会导致工件表面难以实现相互接触的菱形格网纹结构。

菱形格网纹表面对需要提升表面润滑性能的零部件有着良好应用前景。

参考文献：

[1] Pu X, Li G, Liu Y. Progress and Perspective of Studies on Biomimetic Shark Skin Drag Reduction[J]. ChemBioEng Reviews, 2016, 3(1): 26−40.

[2] Luo Y, Yuan L, Li J, et al. Boundary layer drag reduction research hypotheses derived from bio-inspired surface and recent advanced applications[J]. Micron, 2015(79): 59−73.

[3] Bruzzone A A G, Costa H L, Lonardo P M, et al. Advances in engineered surfaces for functional performance[J]. CIRP annals, 2008, 57(2): 750−769.

[4] Lyu Y, Liu Y, Li X, et al. A strategy on generating structured plateau surface by the sinusoidal oscillatory lapping of the grinding wheel with the phyllotactic pattern of abrasive grains[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2021(65): 435−444.

[5] Kim H C, Ko J T. Verification of simulation of surface texturing on planar surface by grinding[J]. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, 2015, 16(2): 225−231.

[6] 白利娟，张建华，陶国灿，等. 振动辅助铣削加工仿生表面研究 [J]. 中国机械工程，2016，27(9)：1229−1233+1242.

[7] 李　凯，付鹏飞，唐代斌，等. TC4 钛合金电子束表面造型形貌及近表面组织特征 [J]. 航空学报，2017，38(12)：329−336.

[8] Li X, Gao C, Chen R, et al. Fabrication of super hydrophilic surface on FeCrAl-WM with ridged microstructure for Joule-heating catalyst support by UV-laser microprocessing[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2024(109): 447−459.

[9] Klocke F, Feldhaus B, Mader S. Development of an incremental rolling process for the production of defined riblet surface structures [J]. Production Engineering, 2007, 1(3): 233−237.

[10] Schneider Y G. The performance characteristics of parts with regular surface roughness pattern[M]. Moscow: Mashinostroenie, 1982.

[11] Gao Z Y, Peng L F, Yi P Y, et al. Micro/Meso Roll-to-Plate (R2P) Imprinting Process to Fabricate Micro Channel/Riblet Features[J]. Applied Mechanics and Materials, 2013(271): 611−616.

[12] Xu D, Ng M K, Fan R, et al. Enhancement of adhesion strength by micro-rolling-based surface texturing[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2015, 78(9): 1427−1435.

[13] Hirt G, Thome M. Rolling of functional metallic surface structures[J]. CIRP annals, 2008, 57(1): 317−320.

[14] Koszela W, Pawlus P, Rejwer E, et al. Possibilities of oil pockets creation by the burnishing technique[J]. Archives of Civil and Mechanical Engineering, 2013, 13(4): 465−471.

（上接第 21 页）

毛坯设计、工装设计以及精加工刀路策略等的工艺优化，使产品变形得到控制，框架加工精度显著提高。

3　结　语

文章对某曲面薄壁件的技术要求难点进行了分析，针对零件变形和精度指标超差问题，优化了加工工艺，设计了合理的工艺台及其对应的专用柔性组合工装，同时设计完成了产品毛坯模型、半精加工模型以及过程辅助检查体模型。借助 UG 软件 CAM 模块的自动编程，合理设计了切削参数、走刀轨迹，并选择了合适的刀具，完成了刀轨的过切检查。优化后的加工工艺及数控加工策略，解决了曲面薄壁件的加工变形问题，实现了加工精度同轴度保持在 5 μ 内的要求，提高了生产效率。

参考文献：

[1] 于春萍. 航空薄壁构件加工变形研究 [D]. 上海：上海交通大学，2015.

[2] 秦国华，吴竹溪，张卫红. 薄壁件的装夹变形机理分析与控制技术 [J]. 机械工程学报，2007(4)：211−216+223.

[3] 马　伟. 航空铝合金薄壁件切削过程及加工变形仿真分析 [D]. 长春：吉林大学，2020.

[4] 岳彩旭，张俊涛，刘献礼，等. 薄壁件铣削过程加工变形研究进展 [J]. 航空学报，2022，43(4)：106−131.

[5] 田海东. 铝合金薄壁结构件铣削变形预测与工艺参数优化 [D]. 济南：山东大学，2020.

[6] 贺旭东，明伟伟，郭国强，等. 走刀路径对多型腔薄壁件加工变形的影响 [J]. 机械设计与制造，2019(3)：106−109.

[7] 章绍昆，毕庆贞，王宇晗. 镜像铣削加工奇异区域刀具路径优化 [J]. 航空学报，2021，42(10)：247−255.

[8] 刘献礼，刘　强，岳彩旭，等. 切削过程中的智能技术 [J]. 机械工程学报，2018，54(16)：45−61.

[9] 王聪梅. 加工大尺寸零件的表面切削顺序及走刀路径 [J]. 机械设计与制造，2013，47(11)：39−41.

[10] 姚亚超，李　洋，王元军，等. 摆线铣在大型整体框环加工中的应用 [J]. 机械工程师，2021(10)：155−157+160.

[11] 廖铃吉，任景刚，杨金锋. 摆线铣加工技术及其在航空发动机加工中的应用 [J]. 航空制造技术，2015(12)：47−50.

[12] 成海平，易守华，郑　雷，等. 切削用量对弱刚性构件加工变形的研究 [J]. 工具技术，2018，52(12)：25−28.

[13] 张永智，郭　颖，孙建邦，等. UG 固定轴曲面区域轮廓铣在高精度翼片曲面加工中的应用 [J]. 新技术新工艺，2021(9)：5−8.