

人体骨骼模型五轴数控加工工艺

张江华，姜毅，胡青，蒋云清，胡珊

南昌工学院 江西南昌 330108

摘要：以人体骨骼的个性化建模与加工为研究对象，基于其形状复杂和不规则性的加工难点，分析关键区域的加工工艺，制定整体加工方案。利用PowerMILL软件进行编程，对形状不规则、曲面分布无规律和侧面扭曲程度较大的骨骼曲面，编制加工刀具路径，通过Vericut仿真软件验证后，应用五轴联动数控加工中心完成人体骨骼模型的加工，提高了产品的加工效率与加工质量。

关键词：人体骨骼模型；五轴数控加工；加工策略；工艺设计；刀具路径；仿真模拟



高级技工 张江华

1 序言

人体骨骼模型加工的质量将直接影响到医学治疗的效果。目前，国内3D打印技术较为成熟，但是由于受材料、加工成本的影响，尚未进行全面普及，因此人体骨骼模型的三维建模和制造加工是急需解决的问题。本研究采用CT（计算机断层扫描）获得的人体骨骼图像，通过UG软件完成对人体骨骼模型的建模。人体骨骼模型如图1所示，结合PowerMILL软件编制出加工刀具路径（见图2），并进行后置处理，生成数控机床能够识别的NC代码，然后基于Vericut仿真软件，模拟刀路轨迹的正确性，对NC代码进行验证，最后采用i5系统AC摇篮式五轴联动加工中心完成人体骨骼模型的加工。

采用这种加工方法，不仅大大缩短了加工时间，提高了生产效率与工件质量，而且降低了医疗成本。



图1 人体骨骼模型

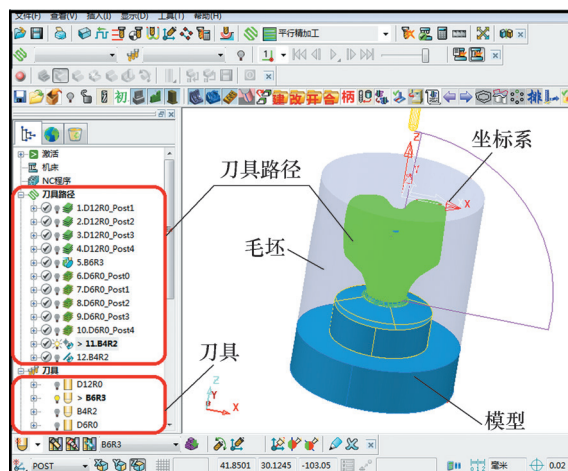


图2 PowerMILL软件编制的加工刀具路径

2 工艺方案

人体骨骼模型通过UG三维逆向生成，产品的最大外形尺寸为 $\phi 78\text{mm} \times 80\text{mm}$ （不含底座），

模型中曲面和圆弧过渡较多。试验选用毛坯型材为 $\phi 80\text{mm}$ 尼龙棒，选用型号为i5M8.4的五轴数控机床，最高转速12000r/min、稳定精度可达0.005mm，满足产品质量要求。

人体骨骼模型加工工艺卡及PowerMILL加工参

数设置见表1。人体骨骼模型的加工工艺策略分为：模型区域清除（三轴定轴毛坯加工）、旋转精加工（四轴基座精加工）、模型残留区域清除（3+2轴半精加工）、点投影精加工和直线投影精加工（五轴联动精加工）。

表1 人体骨骼模型加工工艺卡及PowerMILL加工参数设置

序号	加工策略	刀具	进给量/(mm/r)	余量/mm	行距/mm	公差/mm	转速/(r/min)	进给速度/(mm/min)	刀位点	坐标系	加工区域	加工方法
1	模型区域清除	D12R0	3.0	0.2	8.0	0.1	2000	1800	中心	Post1	第一侧面	三轴粗加工
2	模型区域清除	D12R0	3.0	0.2	8.0	0.1	2000	1800	中心	Post2	第二侧面	三轴粗加工
3	模型区域清除	D12R0	3.0	0.2	8.0	0.1	2000	1800	中心	Post3	第三侧面	三轴粗加工
4	模型区域清除	D12R0	3.0	0.2	8.0	0.1	2000	1800	中心	Post4	第四侧面	三轴粗加工
5	旋转精加工	B6R3	—	0	—	0.04	6000	1200	刀尖	Post0	基座	四轴精加工
6	模型残留区域清除	D6R0	0.5	0.1	4.0	0.06	4500	1500	中心	Post0	顶部	3+2轴半精加工
7	模型残留区域清除	D6R0	0.5	0.1	4.0	0.06	4500	1500	中心	Post1	第一侧面	3+2轴半精加工
8	模型残留区域清除	D6R0	0.5	0.1	4.0	0.06	4500	1500	中心	Post2	第二侧面	3+2轴半精加工
9	模型残留区域清除	D6R0	0.5	0.1	4.0	0.06	4500	1500	中心	Post3	第三侧面	3+2轴半精加工
10	模型残留区域清除	D6R0	0.5	0.1	4.0	0.06	4500	1500	中心	Post4	第四侧面	3+2轴半精加工
11	点投影精加工	B4R2	—	0	—	0.02	8000	1200	刀尖	Post0	整体加工	五轴联动精加工
12	直线投影精加工	B4R2	—	0	—	0.02	8000	1200	刀尖	Post0	整体加工	五轴联动精加工

3 三轴定轴粗加工

三轴定轴粗加工如图3所示，采用模型区域清除的加工策略进行模型粗加工。通过固定刀轴方向和A/C轴旋转角度的方法，使五轴机床转变成传统三轴立式加工中心进行开粗，提高了加工效率。以Post2为加工坐标系并加工第二侧面毛坯时，当刀具加工至中间薄壁位置时，由于模型底部没有足够的支撑，刀具会因机床振动而出现振刀、弹刀现象，影响模型加工质量，且无法加工第三侧面和第四侧面的残余，因此改进工艺，将模型划分成4个区域进行加工。以Post1、Post2为加工坐标系加工时，应

单边限制刀具加工至模型中心上方20~30mm的距离，此时以Post2为加工坐标系加工第二侧面时，底部存在加工第一侧面预留的20~30mm的距离，以及第二侧面自身加工预留的20~30mm的距离，加工时底部有了足够厚度（约40~60mm）的支撑，刀具不会出现振刀、弹刀现象。然后以Post3、Post4作为加工坐标系加工第三侧面和第四侧面，并加工至中心线以下2~5mm，保证模型完整去除毛坯部分。加工第三侧面和第四侧面时，由于模型自身作为支撑，则不会出现振刀、弹刀现象，从而提高了人体骨骼模型的加工效率与加工质量。

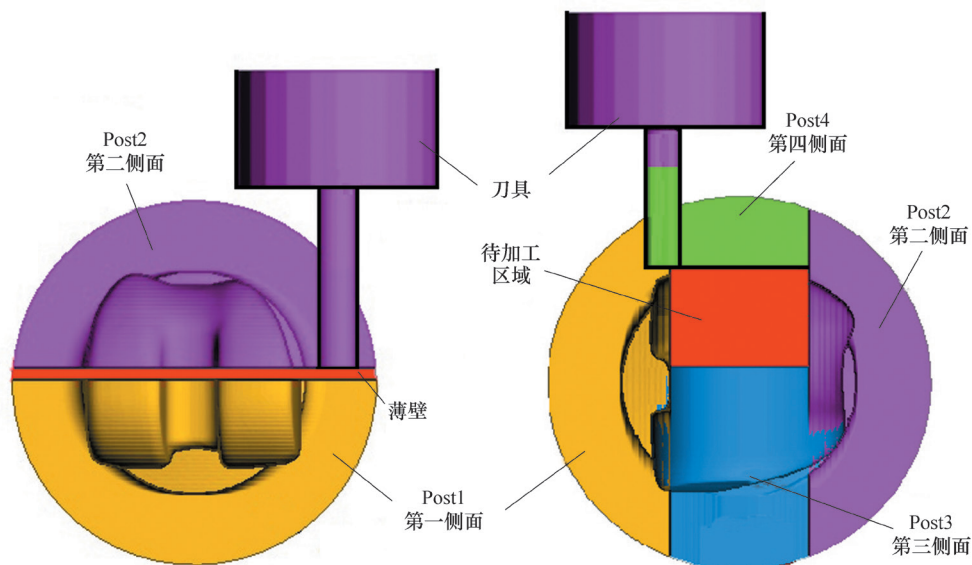


图3 三轴定轴粗加工

4 3+2轴定轴半精加工

以i5系统AC摇篮式五轴联动数控加工中心为例，3+2轴加工方式的本质是将五轴联动数控加工中心的工作台变为固定方向、固定角度，刀具轴向不再变化，对模型3D型面进行加工。3+2轴半精加工如图4所示。采用A/C两个旋转轴先将人体骨骼模型固定在一个倾斜位置（见图4a），即A/C轴工作台根据人体骨骼模型型面的需要转到 $A=45^\circ$ ， $C=DC(0^\circ)$ ，再由刀具沿X、Y和Z方向进给进行加

工。当加工完当前区域后，再根据加工需要，调整A/C轴角度继续进行其他区域的加工。

曲面的3+2轴加工如图4b所示。其中 v_f 为进给速度， α 为刀轴与切削表面法向矢量倾角。3+2轴数控加工方式是把曲面当作近似的平面进行加工，通过将刀具轴向倾斜一个角度，以避免零切削速度加工，从而获得理想的加工效果。通过机床A/C轴回转台定义空间中的旋转工作平面，在此工作平面可以进行2D或3D加工编程操作，合理设置其他参数，

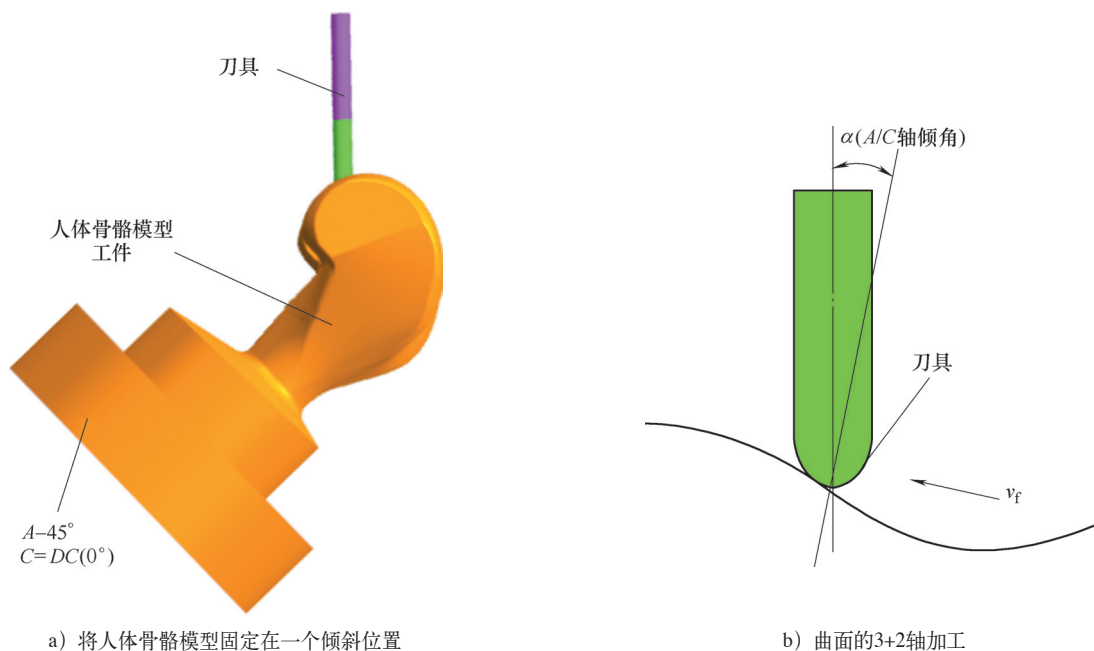


图4 3+2轴半精加工

生成模型半精加工的刀具路径轨迹。

5 五轴联动精加工

人体骨骼模型形状不规则，曲面分布无规律，侧面扭曲程度较大，顶部骨骼存在倒扣区域，如果采用传统的三轴机床进行加工，则需要多套专用工装夹具，并重复进行拆卸、装夹和定位，无法保证加工质量，且加工效率低。i5系统AC摇篮式五轴联动数控加工中心各轴运动方向如图5所示，采用五轴联动进行加工，模型装夹一次即可完成所有工序的加工，减少了拆卸、装夹、定位次数及配套的工装夹具，提高了加工效率与加工质量。PowerMILL提供了5种投影精加工策略，分别是：点投影精加工、直线投影精加工、平面投影精加工、投影曲线精加工和曲面投影精加工。根据人体骨骼模型的结构特点，分别采用点投影精加工和直线投影精加工。

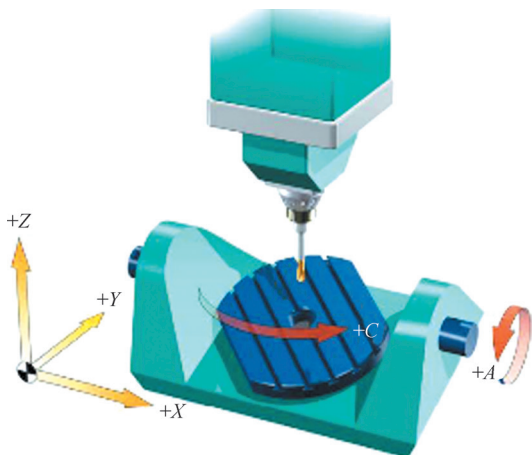


图5 i5系统AC摇篮式五轴联动数控加工中心各轴运动方向

6 程序的生成

五轴机床的坐标系与三轴机床的坐标系有所不同。五轴机床中X、Y轴的原点是回转盘C轴的圆心点，Z轴的原点是旋转A轴与回转盘C轴的轴线交点。后处理时NC参数选择如图6所示。在NC参数选

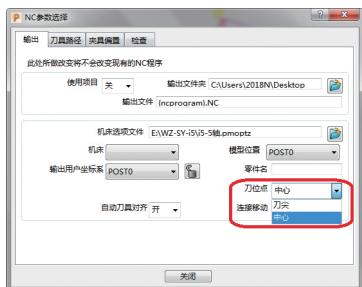


图6 后处理时NC参数选择

择时，要保证人体骨骼模型位置坐标系与输出用户坐标系保持一致，并使编程时的加工坐标与工件装夹时的坐标系保持一致。在输出刀具刀位点时，加工刀具为立铣刀时要选择刀具中心作为刀位点，加工刀具为球头刀时要选择刀具刀尖作为刀位点，输出文件类型可以设置为.NC或.TXT格式。

7 Vericut仿真及数控加工

采用与i5系统AC摇篮式五轴联动数控加工中心相匹配的后处理，经后处理器生成机床可识别的NC代码，为了确保NC代码的可行性和正确性，需要通过Vericut仿真软件进行模拟仿真，仿真验证无干涉、过切及欠切等现象。图7为人体骨骼模型仿真后的光亮阴影图像，验证无误后，通过DNC (Distributed Numerical Control) 直接数字控制传输到数控机床进行人体骨骼模型加工。加工后的人体骨骼模型产品实物(毛坯材料为尼龙棒)如图8所示。



图7 人体骨骼模型仿真后的光亮阴影图像



a) 正视



b) 侧视

图8 加工后的人体骨骼模型产品实物

8 结束语

本项目依托南昌工学院校级课题(项目编号: NGKJ-20-10)和江西省教育厅科学技术研究项目(项目编号: GJJ202503)进行研究。根据现代智能制造加工的特点，以人体骨骼模型五轴联动数控

加工为研究对象，通过UG逆向生成三维模型，采用PowerMILL进行五轴加工刀具路径的编写，生成加工刀具轨迹。经过i5系统专用五轴后处理器生成NC代码文件，通过Vericut仿真验证后，应用i5系统AC摇篮式五轴联动数控加工中心完成了人体骨骼模型的加工。

研究采用三轴定轴粗加工的方式对人体骨骼模型四面进行开粗，提高了产品在加工时的刚度，减少了因振动而引起的弹刀现象；3+2轴定轴半精加工切除了三轴定轴粗加工无法加工的倒扣区域，减少了产品的残余加工量，为后续五轴精加工提供了较少且均匀的残余余量，保证了刀具精加工时受力均匀，从而提高了加工效率与加工质量，同时也为其他类似产品的加工提供了借鉴。

参考文献：

- [1] 斯琴. 基于Pro/E系统的个性化人体骨骼的三维建模及其数控加工的研究[D]. 大连：大连理工大学，2004.
- [2] 王峰. 五轴加工奇异性问题的研究[D]. 北京：中国科学院大学，2013.
- [3] 成善胜. 边看边学PowerMILL2012数控多轴加工实例精粹[M]. 北京：化学工业出版社，2016.
- [4] 阮景奎. 汽车覆盖件模具高速切削加工过程的数值模拟与关键工艺技术研究[D]. 杭州：浙江大学，2007.
- [5] 王文凯，黄杰. 基于PowerMILL的复杂曲面五轴数控加工[J]. 南京工业职业技术学院学报，2015，15（3）：9-13.
- [6] 王彦涛，杨保，柏长友. 三轴数控镗铣床加工大型带空间角度零件时的坐标转换与实现[J]. 新技术新工艺，2017（3）：35-38.

MW 20210903

专家点评



本例中，人体骨骼模型的不规则曲面和圆弧过渡较多，三维建模和制造加工都比较复杂。作者结合现代智能制造的特点；个体化建模先通过UG软件生成三维模型，再采用PowerMILL软件生成加工路径，最后利用Vericut软件进行仿真验证。数控加工先用三轴机床对模型四面进行开粗，再用3+2轴机床进行半精加工，最后应用五轴联动加工中心完成模型的精加工，提高了加工效率与产品质量。

文章的理论性和实践性都比较强，内容丰富，层次清晰。根据人体骨骼模型的结构特点，详细阐述了自己的目标和方法，工艺设计从三维建模到五轴加工都介绍得比较具体，为相似产品的制造工艺提供了思路。

《金属加工（冷加工）》“机床/附件/工装”栏目征稿

《金属加工（冷加工）》杂志设有多个常规栏目，现“机床/附件/工装”栏目面向广大制造业的业内人士征集稿件，欢迎各位踊跃投稿。

征稿内容：机床/加工中心的整体设计及制造；关键附件的设计制造，如电主轴、大型轴承、大重型滚动功能部件；冷加工中使用的工装/夹具的设计制造。

要求：技术实用、先进，能推动加工制造自动化、高效化、精密化等。

具体投稿规范请扫码查看。



投稿规范