螺旋锥齿轮圆角表面加工研究

吴志清

（广州工程技术职业学院，广州 510075）

摘 要：目的 提高和保证螺旋锥齿轮圆角表面质量，提高加工效率。**方法** 改变以往依靠人工打磨的方式对螺旋锥齿轮圆角表面进行加工，提出应用数控五轴加工中心的方法，借助 UG 软件的 CAM 功能对螺旋锥齿轮表面进行数控加工自动编程处理，模拟加工功能来检测走刀路径是否正确，并进行表面精度检测及仿真加工无干涉、无碰撞检验，生成的 CLS 刀位文件经过专用后置处理得到 NC 程序，最后在 VERICUT 软件平台上的虚拟五轴加工中心模拟仿真加工螺旋锥齿轮圆角表面。**结果** 通过 UG 的 CAM 功能及 VERICUT 仿真加工，螺旋锥齿轮的齿廓圆角达到(0.3±0.07) mm，表面粗糙度值为 0.64 μm，整体一致性好，满足设计要求。**结论** 采用传统的五轴联动机床进行螺旋锥齿轮齿廓的倒角、倒圆加工，可获得理想的齿廓圆角尺寸，提高了螺旋锥齿轮表面精度。

关键词：螺旋锥齿轮；圆角表面；精度；仿真加工；表面粗糙度

中图分类号：TH164 **文献标识码：**A **文章编号：**1001-3660(2018)05-0302-06

DOI：10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2018.05.045

Processing of Fillet Surface on Spiral Bevel Gear

WU Zhi-qing

(Guangzhou Institute of Technology, Guangzhou 510075, China)

ABSTRACT: The work aims to improve and ensure the quality of fillet surface on spiral bevel gear so as to improve the processing efficiency. Processing of spiral bevel gear fillet surface by manual grinding was changed and method of NC five axis center processing was put forward. CAM function of UG software was used in NC processing and automatic programming of spiral bevel gear surface. Simulated processing function was used to detect whether the tool path is correct, inspect the surface precision and check whether the simulation processing is free from interference and crash. The generated CLS tool location files could simulate the processing of fillet surface on spiral bevel gear in the virtual five axis processing center on the platform of VERICUT software by obtaining NC program obtained through the special post processing, through CAM function of UG and VERICUT simulation processing, the tooth profile fillet of spiral bevel gear reached (0.3±0.07) mm, the surface roughness was 0.64 μm and the overall consistency was good in conformity with the design requirements. Ideal tooth profile fillet size and improvement of spiral bevel gear surface precision can be obtained by adopting traditional five axis machine tool to process chamfer and fillet of spiral bevel gear tooth profile.

KEY WORDS: fillet surface processing; fillet surface; precision; simulation processing; surface roughness

收稿日期：2017-11-20；修订日期：2018-02-14

Received：2017-11-20；**Revised**：2018-02-14

基金项目：广西教育厅项目（0314101401）

Fund：Guangxi Education Department Project (0314101401)

作者简介：吴志清（1967—），女，硕士，副教授，主要研究方向为数控加工技术。

Biography：WU Zhi-qing (1967—), Female, Master, Associate professor, Research focus: NC machining technology.

螺旋锥齿轮是动力机械中重要的传动部件，与直齿、斜齿类锥齿轮相比，其重合系数大、承载能力高，因此具有运行更加平稳、传动噪声更小等优点[1]，目前已被广泛应用于航空、航天、船舶、汽车等领域。纵观前人对螺旋锥齿轮的研究，主要有两个方向[2-3]——螺旋锥齿轮的齿廓工艺研究及螺旋锥齿轮齿廓倒角、倒圆工艺研究。已有的文献研究表明，针对螺旋锥齿轮齿廓工艺研究主要包括：螺旋锥齿轮毛坯的锻造工艺[4]、螺旋锥齿轮齿面整体加工工艺[5]、螺旋锥齿轮齿面优化设计[6-7]。

由于螺旋锥齿轮齿廓的圆角对螺旋锥齿轮的传动性能指标非常重要[8]，它可解决齿轮沿齿长方向的尖角，改善齿轮换挡力，降低齿轮传动产生的噪声和冲击力，由此可保证齿轮在换挡时操作平顺、齿啮合平稳，减少齿廓面应力集中，从而有效提高齿轮的使用寿命。现有的文献中针对螺旋锥齿轮齿廓倒角、倒圆工艺研究成果主要有：意大利及德国的齿轮企业通过采用专用的挤棱机，以挤棱工艺对热处理前的螺旋锥齿轮进行齿廓倒角、倒圆。Ribbeck 等[4,9]提出在圆盘刀库上安装多把刀具，通过铣刀盘连续分度，利用铣刀盘和螺旋锥齿轮的相对旋转运动，对螺旋锥齿轮齿廓的每个齿顶线进行倒角、倒圆。徐彦伟等[10]通过使用锥形砂轮作为螺旋锥齿轮的倒角、倒圆工具，对淬硬后的锥齿轮进行倒角、倒圆加工，该方法由于锥形砂轮尺寸的限制，仅能用于锥齿轮副中的大齿轮加工。林汉元等[11]提出了一种曲线锥齿轮齿顶线倒角的新方法，并设计了相应的倒角机床，但该设计还没应用到实际生产中。何培兴等人[12]采用专门设计的滚齿刀只磨削齿轮凹凸两齿廓面的方法，解决了卧式车床上的直齿轮齿向倒角、倒圆，但该方法不适于曲线结构的螺旋锥齿轮，仅能解决直齿轮齿廓倒角、倒圆。李必文等[13]采用数控线切割，根据螺旋锥齿轮齿廓面母线设计倒角刀具切削刃，解决了齿顶线的倒角、倒圆。刘景成[14]为螺旋锥齿轮齿廓倒角、倒圆设计了一平面五杆机构，利用轨迹相切的原理，在空间铰链机构上加载一浮动磨头，利用磨头来完成对螺旋锥齿轮齿顶线磨棱的加工。牛占文[15]通过空间几何建模方法，通过确定刀具几何参数与刀具姿态的关系来设计倒角刀具。

上述文献的研究表明，现有的螺旋锥齿轮齿廓圆角加工方法虽然有很多，但国外一般采用专业的倒角机床，价格昂贵。众多国内螺旋锥齿轮齿廓圆角的加工方法虽然能解决部分技术问题，但存在加工产品范围小、产品尺寸受限制、不能对整个齿轮齿廓面一次进行倒角、倒圆等缺点。由于现有技术及资金等问题，国内众多的机械传动企业在加工螺旋锥齿轮圆角表面时，齿端部位还是依靠人工打磨的方式进行，导致零件表面的一致性差，效率低，工作强度大。

本文针对现有螺旋锥齿轮齿廓圆角加工技术存在的精度低、效率低、一致性差等技术瓶颈问题，提出了一种基于传统五轴数控加工中心的螺旋锥齿轮圆角表面加工方法，借助 UG 软件对螺旋锥齿轮圆角表面进行自动编程，通过 UG 模拟加工功能来检测走刀路径是否正确，并进行精度检测及仿真加工无干涉、无碰撞检测，然后生成 CLS 刀位文件，经过专用后置处理后得到 NC 程序，最后在 VERICUT 五轴加工中心进行模拟仿真加工[7-8]。

1　螺旋锥齿轮 UG 自动编程

UG 软件具有功能强大的 CAD 及 CAM 模块，可完成对复杂零件从建模到制造的一体化任务。在 CAM 模块中，多种多样的加工类型可以满足不同零件结构、不同表面形状及不同精度要求的加工需求。使用 UG 软件 CAM 模块自动编程，是使用用户设计好的三维模型进行交互式编程的过程，用户只需要根据工艺卡的工艺流程，依次在软件操作界面设置切削刀具、切削区域、切削方法、切削模式、修剪边界及切削三要素等参数。前置处理后，UG 的 CAM 模块中的路径规划功能会根据设置的相关参数自动生成粗精加工的刀具轨迹。

本文以某直升机传动螺旋锥齿轮作为研究对象进行实验仿真研究，如图 1 所示。该齿轮要求齿顶表面粗糙度 Ra=0.8 μm，齿顶及齿端圆角 R=0.3 mm，精度为±0.1 mm。由于该锥齿轮结构复杂，为避免刀具干涉和碰撞，分为多个工序进行编制，具体使用的刀具及参数如表 1 所示。

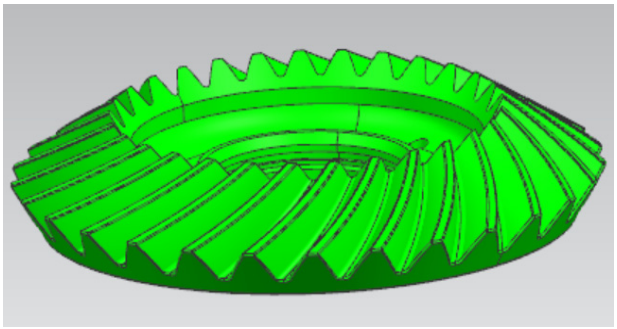


图 1　螺旋锥齿轮模型
Fig.1 Spiral bevel gear model

整个螺旋锥齿轮的加工流程为：整体轮廓粗、半精加工（齿廓）→齿顶曲面精加工→齿顶圆角精加工→齿形外圆角精加工→齿廓凹凸面精加工。详细工艺路线及铣削模式如下：

1）整体轮廓粗、半精加工采用五轴三轴联动型腔铣模式。切削区域为除螺旋锥齿轮底部平面外所有的齿形部分，采用深度优先的切削顺序，加工余量为

表 1　工艺参数
Tab.1 Process parameters

切削区域	刀具直径/mm	刀具类别/mm	圆角半径/mm	步距/mm	线速度/(m·min^{-1})
整体轮廓	20	环形刀	4	2	60
齿顶曲面	10	球头刀	5	1	70
齿轮顶部圆角	6	球头刀	3	0.2	70
齿形外圆角	4	球头刀	2	0.2	70
齿廓凹凸面	4	球头刀	2	0.2	70

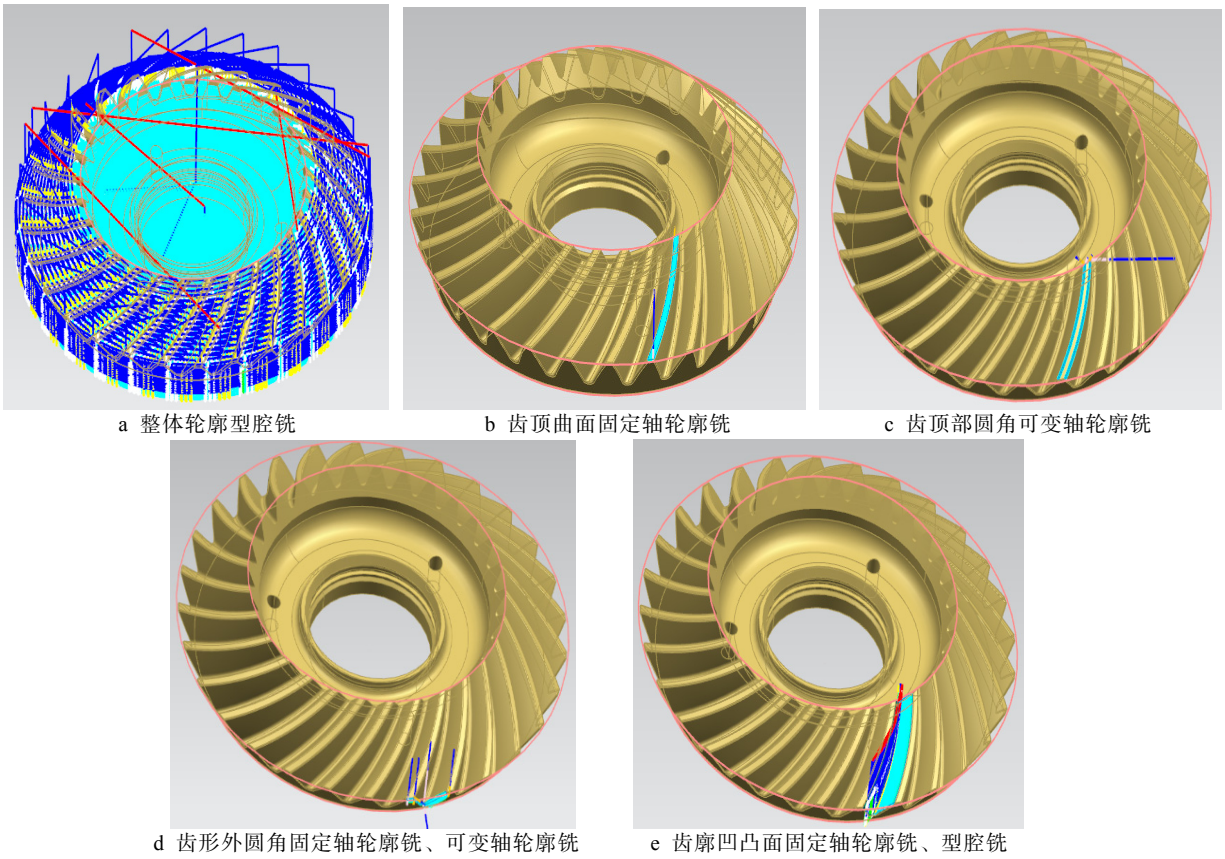
0.5 mm，切削模式选择跟随部件，如图 2a 所示。

2）齿顶曲面精加工采用五轴三轴联动固定轴轮廓铣模式。切削区域为螺旋锥齿顶曲面，采用往复切削模式，驱动方法采用曲面驱动，投影矢量朝向驱动体，如图 2b 所示。

3）齿轮顶部圆角精加工采用五轴五联动可变轴轮廓铣模式，圆角为 R=0.3。切削区域为螺旋锥齿轮顶部两曲线圆角，采用往复切削模式，驱动方法采用曲面驱动，投影矢量朝向驱动体，如图 2c 所示。

4）齿形外圆角精加工分别采用五轴三联动固定轴轮廓铣、五轴五联动可变轴轮廓铣，圆角 R=0.3。固定轴轮廓铣切削区域为螺旋锥齿轮齿廓中的顶部外侧圆角和齿廓面凹面外侧圆角，采用往复切削模式，驱动方法采用曲面驱动，投影矢量朝向驱动体。可变轴轮廓铣切削区域为螺旋锥齿轮齿廓面中凸面外侧圆角，采用往复切削模式，驱动方法采用曲面驱动，投影矢量朝向驱动体，如图 2d 所示。

5）齿廓凹凸面精加工铣采用五轴三联动固定轴轮廓铣、型腔铣。凹面切削区域为齿廓凹面，采用往复切削模式，驱动方法采用曲面驱动，投影矢量朝向驱动体。凸面切削区域为齿廓凸面，采用层优先的切削顺序及往复切削模式，如图 2e 所示。



a 整体轮廓型腔铣　b 齿顶曲面固定轴轮廓铣　c 齿顶部圆角可变轴轮廓铣

d 齿形外圆角固定轴轮廓铣、可变轴轮廓铣　e 齿廓凹凸面固定轴轮廓铣、型腔铣

图 2　螺旋锥齿轮数控加工刀轨

Fig.2 NC processing tool path of spiral bevel gear: (a) integral contour cavity milling, (b) contour milling of fixed axis on tip surface, (c) contour milling of vari able axis of fillet on tooth tip, (d) contour milling of fixed axis in profile outer fillet and variable axis, (e) contour milling and cavity milling of fixed axis in profile concave convex surface

2　仿真加工和精度检测

在 UG 交互式图形编程中，被加工工件生成的刀具路径轨迹可以通过源文件的导出功能生成刀具位置源代码（CLSF），该源代码包含了多种参数信息，其中最重要的是刀具刀心位置及刀轴矢量方向。仿真可以近似模拟工件表面余量按数控刀具轨迹数据被去除的过程，通过过切检查及残留高度检查，检验加工参数设置是否合理。

2.1　UG 仿真加工

UG 软件平台仿真可验证零件加工中，刀具与工件、刀具与机床部件、工件与机床部件在相互运动过程中是否发生干涉现象，为优化刀具路径轨迹提供可靠依据，同时也可预判 CLSF 文件后置处理出现精度降低的情况。

试件模型完成加工操作后，利用 UG 模拟加工功能来检测走刀路径是否正确、有无干涉和碰撞等问题。加工检验有两种方式：Replay 和 Dynamic。在 Replay 方式下检验刀具轨迹线是否正确，以及动态走刀是否流畅。在 Dynamic 方式下检验刀具对定义好的工件毛坯在动态加工过程中的切削是否合理，切削后零件形状是否满足设计要求。图 3 表示在模拟加工前设置碰撞检测功能。图 4 是螺旋圆锥齿轮采用 Dynamic 方式下齿形、齿廓面、圆角模拟加工后的零件形状，从图 4 可以看出，螺旋锥齿轮仿真加工结果与设计形状完全一致，证明仿真中的走刀路径与理论编程轨迹具有一致性。

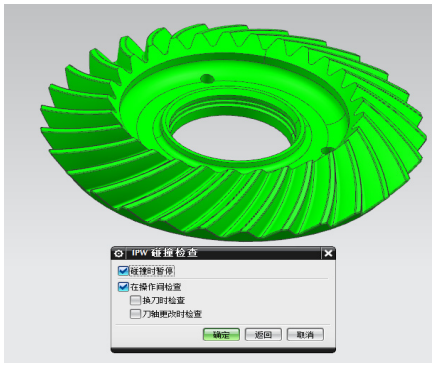


图 3　碰撞检测
Fig.3 Collision detection

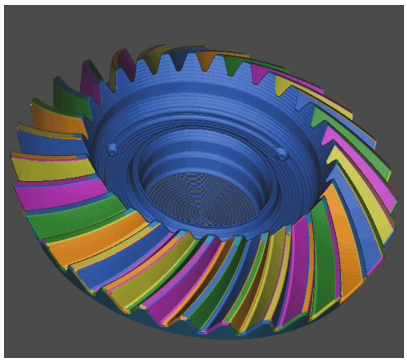
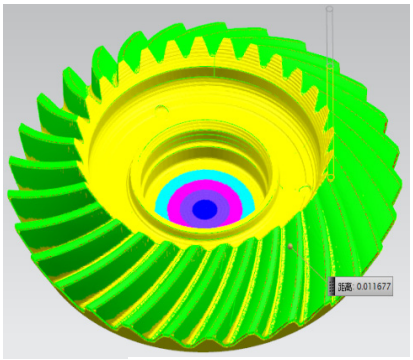


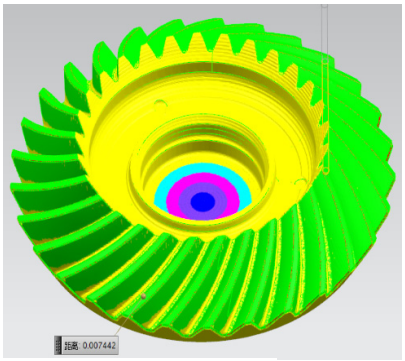
图 4　UG 模拟加工
Fig.4 UG simulation processing

2.2　齿轮成形精度检测

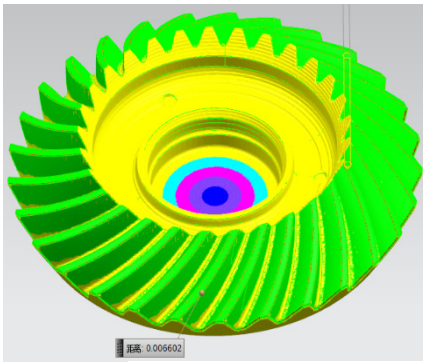
为了进一步确认该编程轨迹的可行性，在 UG 仿真中继续加载 3D 动态仿真模块对螺旋锥齿轮齿廓加工精度进行检测。检测点采用随机抽取的方式，以避免偶然误差。通过随机抽取齿廓面、齿顶面、齿轮顶部圆角、齿形外圆角点距离进行考察，检测效果图见图 5，加工余量分别为 0.011 67、0.007 442、0.006 602、−0.005 195 mm。测得仿真加工后该螺旋锥齿轮齿廓



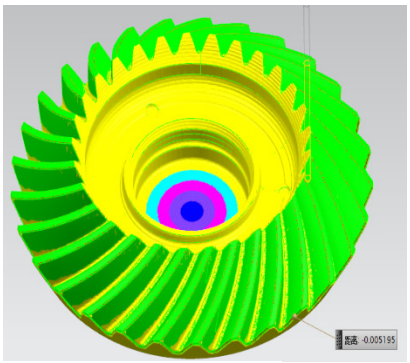
a 齿廓面点检测



b 齿顶面点检测



c 齿轮顶部圆角点检测



d 齿形外圆角点检测

图 5　检测效果图
Fig.5 Detection effect diagram: (a) tooth profile point detection, (b) tooth top point detection, (c) gear top fillet detection, (d) outer fillet detection of tooth profile

的圆角半径为(0.3±0.07) mm，表面粗糙度值为 0.64 μm，符合其模型的理论设计要求。

2.3　VERICUT 五轴加工中心仿真模拟 G 代码

UG 软件平台仿真是验证刀具路径轨迹的合理性，而 VERICU 软件是用来验证后置处理的 G 代码程序是否正确，能否用于实际切削加工。为验证提出的五轴加工螺旋锥齿轮齿廓圆角方法的有效性，本文首先在 VERICUT 软件中根据机床实际结构参数构建了 BV100 双摆台结构的五轴虚拟机床，利用自动编程生成的刀位源文件（CLSF），经专用后置处理器处理生成机床所识别的 NC 代码，并导入到 VERICU 软件中的 BV100 虚拟机床，对螺旋锥齿轮进行虚拟切割仿真加工[17]。虚拟仿真如图 6 所示。

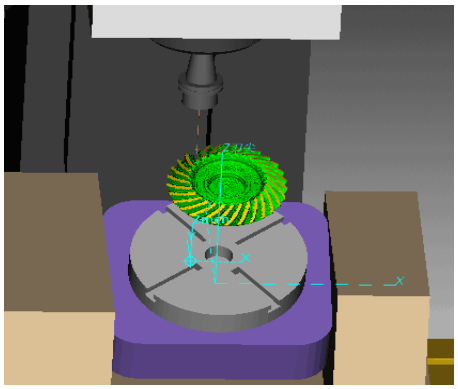


图 6　螺旋锥齿轮虚拟加工
Fig.6 Virtual processing of spiral bevel gear

由于在实际加工中只需要一组齿轮加工程序即可，其他齿轮可通过环形阵列方式，改变机床旋转轴角度来进行加工，故 VERICUT 仿真了一组齿轮数据。G 代码程序导入 VERICUT 软件中的 BV100 虚拟机床进行虚拟切割仿真加工，为详细分析仿真结果，分别给出图 7、图 8 和图 9 三个仿真结果。图 7 是仿真粗加工后螺旋锥齿轮的形状，且加工过程中无干涉碰撞等现象。对比零件设计形状，两者轮廓相符合，验证了粗加工轨迹的正确性。图 8 是螺旋锥齿轮齿顶面、齿顶部凹面圆角仿真加工的局部放大示意图，可以看出，齿顶面曲面加工后表面光滑，齿顶部凹面圆角刀具加工过渡平稳，形成的曲面光滑，且曲面轨迹跟设计轨迹一致。图 9 是齿形外圆角加工局部放大图，此圆角加工轨迹与设计轨迹一致，圆角轮廓清晰、光滑。

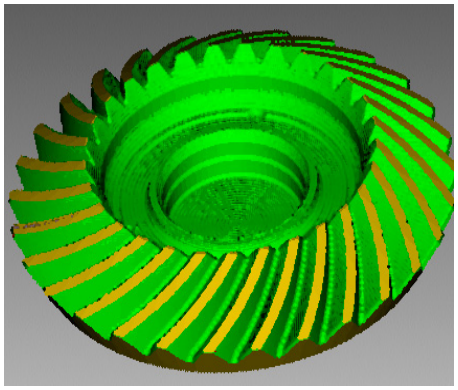


图 7　粗加工后零件图
Fig.7 Drawing of parts after rough machining

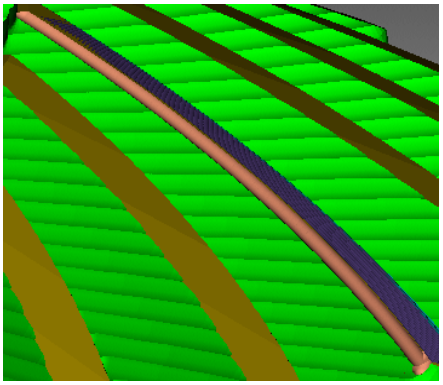


图 8　齿顶部凹面圆角加工后放大图
Fig.8 Enlarged drawing of fillet on concave of tooth top

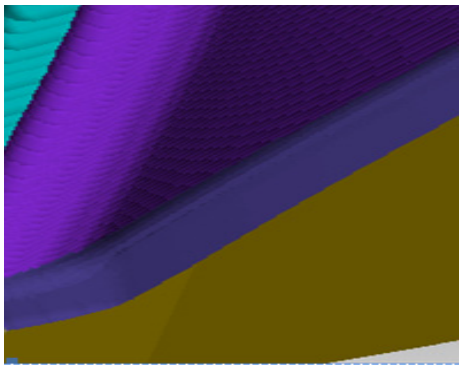


图 9　齿形外圆角加工后放大图
Fig.9 Enlarged drawing of tooth outer fillet after processing

3　讨论

通过上述仿真结果可知，螺旋锥齿轮的齿廓圆角光滑，一致性好，仿真过程无干涉和碰撞发生，圆角半径为(0.3±0.07) mm，表面粗糙度值为 0.64 μm，仿真加工达到预期要求，精度控制在设计范围内。螺旋锥齿轮的齿廓圆角大小的变化可以通过更换刀具直径来满足，解决专用刀具加工受限制的技术问题。

目前，借助五轴联动机床进行螺旋锥齿轮进行齿廓倒角、倒圆的工艺方法，虽然已经通过 BV100 五轴虚拟机床进行了仿真验证，验证结果也证明该方法可以有效地提高齿廓倒角、倒圆的精度和产品的一致性，但该方法是基于后置处理技术，进行实际应用必须选定特定的五轴机床，并且需要开发专用的后置处理软件才能进行专用数控代码的转换及使用。另外，本文的后续研究工作还需在真实机床上进行切削验证。

4　结论

1）根据 UG 软件强大的 CAM 功能，针对螺旋锥齿轮的复杂结构可一次装夹，分工序地对齿廓部位进行倒角、倒圆表面的加工。借助 VERICUT 虚拟技术可快速有效地判断走刀轨迹是否符合螺旋锥齿轮工艺设计的要求，并可检测刀具的干涉和碰撞。

2）基于数控五轴联动机床平台，可实现螺旋锥齿轮的齿廓圆角表面高精度、高效率加工，提高产品的一致性，为现有的螺旋锥齿轮倒角、倒圆加工提供技术参考，为实际加工中提高零件表面精度、降低人工劳动强度和提高工作效率提供理论借鉴。

参考文献：

[1] 林志伟. 格林森弧齿锥齿轮齿形数控加工的 UG 自动编程[J]. 闽南师范大学学报(自然科学版), 2015, 28(3): 42-46.
LIN Zhi-wei. Automatic NC Programming of Gleason Spriral Bevel Gear's Profile Processing on UG[J]. Journal of Minnan Normal University(Nat. Sci.), 2015, 28(3): 42-46.

[2] 王延忠, 周云飞, 李左章, 等. 基于通用五坐标数控机床螺旋锥齿轮 NC 加工研究[J]. 中国机械工程, 2001(8): 903-906.
WANG Yan-zhong, ZHOU Yun-fei, LI Zuo-zhang, et al. Research on NC Machining of Spiral Bevel Gear Based on Universal 5 Coordinate Numerical Control Machine Tool[J]. China Mechanical Engineering, 2001 (8): 903-906.

[3] 刘凯, 夏继强, 石侃. 基于 UG 的椭圆锥齿轮的仿真加工[J]. 机械传动, 2012, 36(8): 112-115.
LIU Kai, XIA Ji-qiang, SHI Kan. Simulation Processing of Elliptic Bevel Gear Based on UG[J]. Mechanical Transmission, 2012, 36(8): 112-115.

[4] ZHU C D, JIANG X, DAI T L. Research on Technology of Twin Rollers Rotary Forging of Spiral Bevel Gears[J]. Ironmaking & Steelmaking, 2015, 42(8): 1743.

[5] DENG X Z, LI G G, WEI B Y, et al. Face-milling Spiral Bevel Gear Tooth Surfaces by Application of 5-axis CNC Machine Tool[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2014, 71(5-8): 1049-1057.

[6] SIMON V V. Manufacture of Optimized Face-hobbed Spiral Bevel Gears on Computer Numerical Control Hypoid Generator[J]. Journal of Manufacturing Science & Engineering, 2014, 136(3): 031008.

[7] ALVES J T , GUINGAND M , VAUJANY J P D. Designing and Manufacturing Spiral Bevel Gears Using 5-axis Computerm Numerical Control (CNC) Milling Machines [J]. Journal of Mechanical Design, 2013, 135(2): 024502.

[8] 韩伟娜. 螺旋锥齿轮副大轮齿顶线倒角加工方法的研究[D]. 天津: 天津大学, 2007.
HAN Wei-na. Research on Machining Method of Spiral Bevel Gear's Top Gear Chamfering[D]. Tianjin: Tianjin University, 2007.

[9] RIBBECK K M, REMSCHEID D B. Device for Mounting of Deburring Blades and Bevel Gear Cutting Machine for Chamfering and/or Deburring a Bevel Gear: United States, US7431544B2[P]. 2008-10-07.

[10] 徐彦伟, 肖铁岭, 魏巍, 等, 弧齿锥齿轮大轮齿顶倒角加工模型与虚拟加工[J]. 农业机械学报, 2008, 39(9): 161-165.
XU Yan-wei, XIAO Tie-ling, WEI Wei, et al. Modeling and Virtual Machining of Spiral Bevel Gear Chamfering with Top Gear[J]. Transactions of the Chinese Association for Agricultural Machinery, 2008, 39(9): 161-165.

[11] 林汉元, 张策, 刘明涛, 等. 曲线齿锥齿轮外锥面齿顶线倒角的加工机床和加工方法：中国, 200510015148.3[P]. 2005-09-21.
LIN Han-yuan, ZHANG Ce, LIU Ming-tao, et al. Machine Tool and Processing Method for Machining Chamfering of Curve Bevel Gear Top Cone with Top Line: China, 200510015148. 3[P]. 2005-09-21.

[12] 何培兴, 王斌. 卧式车床低噪声齿轮的设计及制造技术[J]. 机械设计与制造工程, 2000, 29(2): 68-70.
HE Pei-xing, WANG Bin. Design and Manufacturing Technology of Horizontal Lathe Low Noise Gear[J]. Mechanical Design and Manufacturing Engineering, 2000, 29(2): 68-70.

[13] 李必文, 刘仁龙, 郭伟. 齿轮齿面倒角刀具几何建模与调整仿真[J]. 天津大学学报, 2006, 39(1): 58-62.
LI Bi-wen, LIU Ren-long, GUO Wei. Geometry Modeling and Adjustment Simulation of Gear Tooth Surface Chamfering Tool[J]. Journal of Tianjin University, 2006, 39 (1): 58-62.

[14] 刘景成. 螺旋锥齿轮齿顶倒角加工技术研究[D]. 淄博: 山东理工大学, 2010.
LIU Jing-cheng. Study on Machining Technique of Spiral Bevel Gear Chamfering[D]. Zibo: Shandong University of Technology, 2010.

[15] 唐清春, 刘谦, 马仲亮, 等. VERICUT 仿真软件在五轴联动加工中的应用研究[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2014(9): 131-133.
TANG Qing-chun, LIU Qian, MA Zhong-liang, et al. The Application Research of VERICUT Simulation Software in Five Axis Machining[J]. Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique, 2014(9): 131-133.