

(12) 按照专利合作条约所公布的国际申请

(19) 世界知识产权组织
国际局



(10) 国际公布号

WO 2020/125040 A1

(43) 国际公布日

2020 年 6 月 25 日 (25.06.2020)

- (51) 国际专利分类号:
G05B 19/19 (2006.01) B23C 3/00 (2006.01)
- (21) 国际申请号: PCT/CN2019/101266
- (22) 国际申请日: 2019 年 8 月 19 日 (19.08.2019)
- (25) 申请语言: 中文
- (26) 公布语言: 中文
- (30) 优先权:
201811538557.5 2018 年 12 月 17 日 (17.12.2018) CN
- (71) 申请人: 大连理工大学 (DALIAN UNIVERSITY OF TECHNOLOGY) [CN/CN]; 中国辽宁省大连市凌工路 2 号大连理工大学, Liaoning 116024 (CN)。
- (72) 发明人: 马建伟 (MA, Jianwei); 中国辽宁省大连市凌工路 2 号大连理工大学, Liaoning 116024 (CN)。

贾振元 (JIA, Zhenyuan); 中国辽宁省大连市凌工路 2 号大连理工大学, Liaoning 116024 (CN)。
鲁晓 (LU, Xiao); 中国辽宁省大连市凌工路 2 号大连理工大学, Liaoning 116024 (CN)。
姜文文 (JIANG, Wenwen); 中国辽宁省大连市凌工路 2 号大连理工大学, Liaoning 116024 (CN)。
赵孝轩 (ZHAO, Xiaoxuan); 中国辽宁省大连市凌工路 2 号大连理工大学, Liaoning 116024 (CN)。
刘巍 (LIU, Wei); 中国辽宁省大连市凌工路 2 号大连理工大学, Liaoning 116024 (CN)。
司立坤 (SI, Likun); 中国辽宁省大连市凌工路 2 号大连理工大学, Liaoning 116024 (CN)。

(81) 指定国 (除另有指明, 要求每一种可提供的国家保护): AE, AG, AL, AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BN, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DJ, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB,

(54) Title: METHOD FOR DESIGNING TOPOLOGICAL SHAPE OF CURVED SURFACE PARTITION MACHINING TRAJECTORY ON BASIS OF VECTOR FIELD

(54) 发明名称: 基于矢量场的曲面分区加工轨迹拓扑形状设计方法

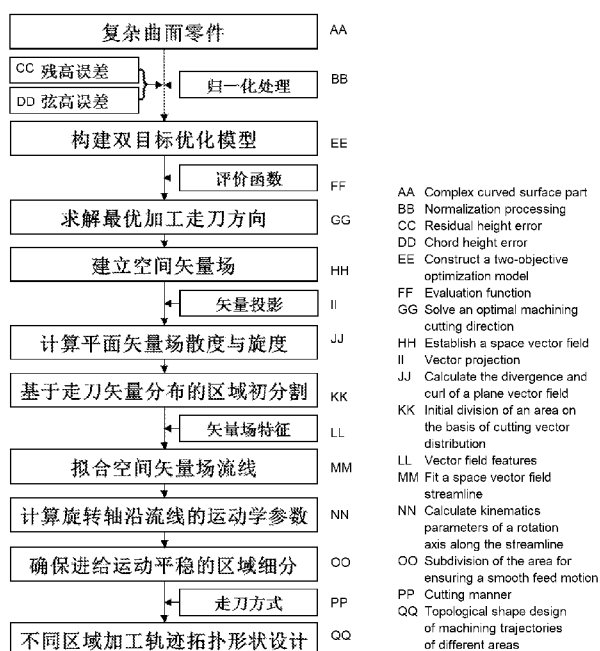


图 1

(57) Abstract: Provided is a method for designing a topological shape of a curved surface partition machining trajectory on the basis of a vector field. The method comprises: establishing function relationships between a chord height/residual height error and normal curvature of a cutting direction respectively, constructing a two-objective optimization model by means of normalization, and solving an optimal cutting direction of each point by means of an evaluation function to establish a space vector field; calculating the divergence

GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IR, IS, JO, JP, KE, KG, KH, KN, KP, KR, KW, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LU, LY, MA, MD, ME, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PA, PE, PG, PH, PL, PT, QA, RO, RS, RU, RW, SA, SC, SD, SE, SG, SK, SL, SM, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, ZA, ZM, ZW。

(84) 指定国(除另有指明, 要求每一种可提供的地区保护): ARIPO (BW, GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ, NA, RW, SD, SL, ST, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), 欧亚 (AM, AZ, BY, KG, KZ, RU, TJ, TM), 欧洲 (AL, AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, MK, MT, NL, NO, PL, PT, RO, RS, SE, SI, SK, SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, KM, ML, MR, NE, SN, TD, TG)。

本国际公布:

— 包括国际检索报告(条约第21条(3))。

and curl of a plane vector field after projection, and according to whether the divergence and curl are zero, implementing an initial division of a machining area; analyzing different vector field features, fitting a space vector field streamline, calculating kinematics parameters of the feed motion of a rotation axis of a machine tool along the streamline, and completing the subdivision of the machining area according to whether the kinematics parameters are mutated; and achieving the topological shape design of machining trajectories of different machining areas of a curved surface in conjunction with the cutting manner. The described method is suitable for complex curved surface partition machining, which may reduce machining errors and improve the stability of the feed motion.

(57) 摘要: 提供了一种基于矢量场的曲面分区加工轨迹拓扑形状设计方法。该方法分别建立弦高/残高误差与走刀方向法曲率的函数关系, 经归一化构建双目标优化模型, 通过评价函数求解各点最优走刀方向, 建立空间矢量场; 计算投影后平面矢量场散度与旋度, 根据其是否为零实现加工区域初分割; 分析不同矢量场特征, 拟合空间矢量场流线, 计算机床旋转轴沿流线进给运动的运动学参数, 根据其是否突变完成加工区域细分; 结合走刀方式实现曲面不同加工区域加工轨迹拓扑形状设计。该方法适用于复杂曲面分区加工, 可减小加工误差, 提高进给运动平稳性。

基于矢量场的曲面分区加工轨迹拓扑形状设计方法

技术领域

本发明属于复杂曲面零件高精高效铣削加工技术领域，涉及一种基于矢量场的曲面分区加工轨迹拓扑形状设计方法。

背景技术

当前，航空航天、能源动力、汽车船舶等领域的发展对复杂曲面零件的加工精度提出了极高的要求，传统采用统一工艺全域加工的方法适用度降低，易导致误差分布不均及局部超差，难以适用于复杂曲面零件高精度加工。为满足此类零件的加工要求，常采用分区加工方法，将复杂曲面划分成多个加工区域，对不同加工区域分别进行适宜的加工轨迹及加工工艺规划。传统分区方法多围绕曲面曲率、法向量等制定分区准则，其分区结果对于避免加工干涉与提高加工效率等方面具有一定的指导意义。然而，现有分区准则仅针对曲面几何特征，缺乏对加工走刀方式与加工过程中进给运动平稳性的综合考虑，且加工区域分割与轨迹规划相互独立，不同加工区域的加工轨迹拓扑形状设计缺乏理论依据，易诱发局部误差超差及显著切削振动，严重制约曲面加工质量的全面提高。由此，迫切需要研究一种基于矢量场的曲面分区加工轨迹拓扑形状设计方法，以满足复杂曲面零件分区加工的高精度加工要求。

郝小忠等人的专利“考虑误差区域性分布的数控加工刀轨分区映射方法”，公开号CN107145126A。该专利根据工件理论面生成理论刀轨，将工件实际面与理论面对比得到误差分布规律，根据误差分布规律对实际面进行区域划分，针对不同误差类型的区域选择相应的刀轨映射方法将理论刀轨映射到工件实际面上完成刀轨映射过程。然而，该方法的分区结果易受测量误差的影响，且分区过程中实际面与理论面的对比方法缺乏理论支撑，因此该分区方法具有较大局限性。Tuong 等人的文献“A practical approach for partitioning free-form surfaces”，International Journal of Computer Integrated Manufacturing, 2010, 23(11), 992-1001，提出了一种基于曲面曲率的复杂曲面分区方法。该方法通过计算曲面各点的高斯曲率和平均曲率，将加工区域划分为凹区、凸区及鞍区，并对不同区域规划不同加工工艺，实现了加工效率的大幅度提高。然而，该方法未考虑加工过程中进给运动平稳性，加工轨迹拓扑形状设计缺乏理论依据，具有一定的局限性。

发明内容

本发明针对现有技术缺陷，提出一种基于矢量场的曲面分区加工轨迹拓扑形状设计方法。针对复杂曲面分区加工过程中，加工区域分割与轨迹规划缺乏对走刀方式与进给运动平稳性综合考虑，造成的局部误差超差及显著切削振动等问题，通过建立弦高误差与残高误差协同约束的走刀矢量场，实现基于走刀矢量分布的加工区域初分割及确保进给运动平稳的加工区

域细分, 根据分区结果, 最终完成复杂曲面零件分区加工轨迹拓扑形状设计。由此有效提高了曲面分区加工的加工精度及进给运动的平稳性, 为复杂曲面高精高效加工提供技术支撑。

本发明的技术方案是一种基于矢量场的曲面分区加工轨迹拓扑形状设计方法, 其特征在于, 该方法分别建立弦高/残高误差与走刀方向法曲率的函数关系, 即弦高误差与残高误差协同约束的走刀矢量场, 经归一化构建两类误差的双目标优化模型, 通过构造评价函数求解各点最优走刀方向, 建立空间矢量场; 计算投影后平面矢量场散度与旋度, 根据其是否为零对矢量场分类, 实现加工区域初分割; 分析不同矢量场特征, 拟合空间矢量场流线, 计算机床旋转轴沿流线进给运动的运动学参数, 根据其是否突变完成加工区域细分; 结合走刀方式, 实现曲面不同加工区域加工轨迹拓扑形状设计; 方法的具体步骤如下:

步骤 1, 建立弦高误差与残高误差协同约束的走刀矢量场

取空间直角坐标系 $O-xyz$ 中的曲面加工区域为 $S(u, v) = (x(u, v), y(u, v), z(u, v))$, 其中 u 和 v 为曲面参数; 在行距 d 与步长 f 确定时, 曲面加工轨迹上任意一点处弦高误差 e 计算为:

$$e = \begin{cases} 0 & , k_f = 0 \\ \frac{1}{|k_f|} - \sqrt{\frac{1}{k_f^2} - \frac{f^2}{4}} & , k_f \neq 0 \end{cases} \quad (1)$$

其中, k_f 为走刀方向法曲率。

取变量 e^* 计算为:

$$e^* = k_f^2 \quad (2)$$

分别求解弦高误差 e 与变量 e^* 的单调性知, 两者呈正相关关系, 为降低后续计算难度, 使用变量 e^* 表示弦高误差。

残高误差 h 计算为:

$$h = -\frac{d^2}{8}k_d + \frac{d^2}{8r} \quad (3)$$

其中, k_d 为行距方向法曲率, r 为刀具有效半径。

由微分几何知, 行距方向与走刀方向互相垂直, 满足式(4):

$$k_d + k_f = 2H \quad (4)$$

其中, H 为平均曲率, 对于曲面任意一点, H 为定值。

联立式(3)-(4), 残高误差表示为:

$$h = \frac{d^2}{8} k_f + \frac{d^2 - 2Hrd^2}{8r} \quad (5)$$

由式(2)与式(5)知, 步长及行距确定时, 弦高误差与残高误差仅由走刀方向法曲率决定。为求解各点最优走刀方向, 以两类误差为目标函数构造双目标优化模型。

对两类误差归一化处理为:

$$\begin{cases} e_n = \frac{e^* - e_{\min}^*}{e_{\max}^* - e_{\min}^*} \\ h_n = \frac{h - h_{\min}}{h_{\max} - h_{\min}} \end{cases} \quad (6)$$

其中, e_n 和 h_n 分别表示归一化的弦高误差和残高误差, $e_{\min}^*$ 和 $e_{\max}^*$ 表示弦高误差的最小值和最大值, $h_{\min}$ 和 $h_{\max}$ 表示残高误差的最小值和最大值, 其求解如下:

以 k_1 和 k_2 表示曲面主曲率($k_1 > k_2$), 其计算为:

$$\begin{cases} k_1 = H + \sqrt{H^2 - K} \\ k_2 = H - \sqrt{H^2 - K} \end{cases} \quad (7)$$

其中, K 为高斯曲率, 对于曲面任意一点, K 为定值。

由式(2)与式(5)得, 残高误差的最值为:

$$\begin{cases} h_{\max} = \frac{d^2}{8} k_1 + \frac{d^2 - 2Hrd^2}{8r} \\ h_{\min} = \frac{d^2}{8} k_2 + \frac{d^2 - 2Hrd^2}{8r} \end{cases} \quad (8)$$

弦高误差的最大值为:

$$e_{\max}^* = \begin{cases} k_1^2, & k_2 \geq 0 \\ k_1^2, & -k_1 \leq k_2 < 0 \\ k_2^2, & 0 \leq k_1 < -k_2 \\ k_2^2, & k_1 < 0 \end{cases} \quad (9)$$

弦高误差的最小值为:

$$e_{\min}^* = \begin{cases} k_2^2 & , k_2 \geq 0 \\ 0 & , -k_1 \leq k_2 < 0 \\ 0 & , 0 \leq k_1 < -k_2 \\ k_1^2 & , k_1 < 0 \end{cases} \quad (10)$$

根据式(6)-(10)得, 归一化的残高误差 h_n 为:

$$h_n = \frac{1}{k_1 - k_2} k_f - \frac{k_2}{k_1 - k_2} \quad (11)$$

归一化的弦高误差 e_n 为:

$$e_n = \begin{cases} \frac{1}{k_1^2 - k_2^2} k_f^2 - \frac{k_2^2}{k_1^2 - k_2^2} & , k_2 \geq 0 \\ \frac{1}{k_1^2} k_f^2 & , -k_1 \leq k_2 < 0 \\ \frac{1}{k_2^2} k_f^2 & , 0 \leq k_1 < -k_2 \\ \frac{1}{k_2^2 - k_1^2} k_f^2 - \frac{k_1^2}{k_2^2 - k_1^2} & , k_1 < 0 \end{cases} \quad (12)$$

为方便描述, 后文出现的弦高误差与残高误差均为归一化的弦高误差与残高误差, 以两类误差为目标函数建立双目标优化模型为:

$$\begin{aligned} V - \min (e_n, h_n) \\ s.t. \quad k_2 \leq k_f \leq k_1 \end{aligned} \quad (13)$$

式中, $V - \min$ 表示向量极小化, 即向量目标中的 e_n 和 h_n 两个子目标函数都尽可能小;

运用线性加权法构造评价函数 Q 为:

$$\begin{aligned} \min Q = \alpha_1 e_n + \alpha_2 h_n \\ s.t. \quad k_2 \leq k_f \leq k_1 \end{aligned} \quad (14)$$

其中, α_1 和 α_2 分别为弦高误差和残高误差在评价函数中所占权重, 其计算如下:

$$\begin{cases} \alpha_1 = \frac{h_{n1} - h_{n\min}}{(e_{n1} - e_{n\min}) + (h_{n1} - h_{n\min})} \\ \alpha_2 = \frac{e_{n1} - e_{n\min}}{(e_{n1} - e_{n\min}) + (h_{n1} - h_{n\min})} \end{cases} \quad (15)$$

其中, h_{n1} 为弦高误差取最小值时对应的残高误差, e_{n1} 为残高误差取最小值时对应的弦高误差, $h_{n\min}$ 为残高误差最小值, $e_{n\min}$ 为弦高误差最小值。

根据主曲率取值范围, 计算双目标优化模型最优解如下:

(1) 当 $k_2 \geq 0$ 时, 取 $k_f = k_2$, e_n 和 h_n 均取得最小值, 因而, $k_f = k_2$ 为双目标优化模型最优解, 由欧拉定理知:

$$k_f = k_1 \cos^2 \theta + k_2 \sin^2 \theta \quad (16)$$

其中, θ 为走刀方向与 k_1 对应主方向的夹角, 此时, $\theta = \frac{\pi}{2}$ 。

(2) 当 $-k_1 \leq k_2 < 0$ 时, 评价函数 Q 为:

$$Q = \frac{1}{k_1^2 + k_2^2 - k_1 k_2} (k_f^2 - k_2 k_f + k_2^2) \quad (17)$$

取 $k_f = \frac{k_2}{2}$, Q 取得最小值, 因而, $k_f = \frac{k_2}{2}$ 为双目标优化模型最优解, 此时,

$$\theta = \arcsin \sqrt{\frac{k_2 - 2k_1}{2k_2 - 2k_1}}。$$

(3) 当 $0 \leq k_1 < -k_2$ 时, 评价函数 Q 为:

$$Q = \frac{1}{k_1 - 2k_2} \left(-\frac{1}{k_2} k_f^2 + k_f - k_2 \right) \quad (18)$$

取 $k_f = \frac{k_2}{2}$, Q 取得最小值, 因而, $k_f = \frac{k_2}{2}$ 为双目标优化模型最优解, 此时,

$$\theta = \arcsin \sqrt{\frac{k_2 - 2k_1}{2k_2 - 2k_1}}。$$

(4) 当 $k_1 < 0$ 时, 评价函数 Q 为:

$$Q = \frac{1}{2(k_2 - k_1)} \left(\frac{1}{k_2 + k_1} k_f^2 - k_f + k_2 - \frac{k_1^2}{k_2 + k_1} \right) \quad (19)$$

取 $k_f = \frac{k_1 + k_2}{2}$, Q 取得最小值, 因而, $k_f = \frac{k_1 + k_2}{2}$ 为双目标优化模型最优解, 此时,

$$\theta = \frac{\pi}{4}。$$

以 $(du:dv)$ 表示曲面任意切方向,沿该方向的曲面第一基本形式 I 和第二基本形式 II 分别为:

$$\begin{cases} I = Edu^2 + 2Fdudv + Gdv^2 \\ II = Ldu^2 + 2Mdudv + Ndv^2 \end{cases} \quad (20)$$

其中, E 、 F 、 G 为曲面第一类基本量, L 、 M 、 N 为曲面第二类基本量,表达如下:

$$\begin{cases} E = \mathbf{S}_u^2 \\ F = \mathbf{S}_u \cdot \mathbf{S}_v \\ G = \mathbf{S}_v^2 \\ L = \mathbf{S}_{uu} \cdot \mathbf{n} \\ M = \mathbf{S}_{uv} \cdot \mathbf{n} \\ N = \mathbf{S}_{vv} \cdot \mathbf{n} \end{cases} \quad (21)$$

其中, $\mathbf{S}_u$ 、 $\mathbf{S}_v$ 为曲面 $\mathbf{S}(u,v)$ 的一阶偏导数, $\mathbf{S}_{uu}$ 、 $\mathbf{S}_{uv}$ 、 $\mathbf{S}_{vv}$ 为曲面 $\mathbf{S}(u,v)$ 的二阶偏导数, $\mathbf{n}$ 为曲面 $\mathbf{S}(u,v)$ 的法向量。

以 $(du^1:dv^1)$ 表示主曲率 k_1 对应主方向,其计算为:

$$\frac{du^1}{dv^1} = \frac{k_1 F - M}{L - k_1 E} \quad (22)$$

以 $(du^*:dv^*)$ 表示最优走刀方向,其计算为:

$$\frac{du^*}{dv^*} = \frac{-b + \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a} \quad (23)$$

其中, a 、 b 、 c 分别表示为:

$$\begin{cases} a = (F^2 - EG \cos^2 \theta) \left(\frac{dv^1}{du^1} \right)^2 + 2EF \sin^2 \theta \left(\frac{dv^1}{du^1} \right) + E^2 \sin^2 \theta \\ b = 2FG \sin^2 \theta \left(\frac{dv^1}{du^1} \right)^2 + 2(EG + F^2 \sin^2 \theta - F^2 \cos^2 \theta) \left(\frac{dv^1}{du^1} \right) + 2EF \sin^2 \theta \\ c = G^2 \sin^2 \theta \left(\frac{dv^1}{du^1} \right)^2 + 2FG \sin^2 \theta \left(\frac{dv^1}{du^1} \right) + (F^2 - EG \cos^2 \theta) \end{cases} \quad (24)$$

联立式(22)-(24),求解获得曲面各点最优走刀方向,沿此方向建立单位走刀矢量,从而形成弦高误差与残高误差协同约束的走刀矢量场。

步骤 2, 基于走刀矢量分布的加工区域初分割

经步骤 1 获得的空间走刀矢量场在空间直角坐标系 $O-xyz$ 中可表示为 $\mathbf{F}(\gamma)=(g_1(x,y,z),g_2(x,y,z),g_3(x,y,z))$, 其中 γ 为曲面各点沿最优走刀方向的单位走刀矢量。将该矢量场向 xOy 平面投影, 沿各点投影后的走刀方向建立单位走刀矢量 γ^* , 获得平面矢量场 $\mathbf{A}(\gamma^*)=(f_1(x,y),f_2(x,y))$ 。在复杂曲面生成的走刀矢量场中, 走刀矢量分布呈现区域性。针对具有区域性走刀矢量分布的矢量场, 开展基于走刀矢量分布的加工区域初分割。

根据矢量场的散度和旋度, 可以确定该矢量场内的走刀矢量分布。在平面矢量场 $\mathbf{A}(\gamma^*)=(f_1(x,y),f_2(x,y))$ 中任意一点的散度 $\text{div}\mathbf{A}(\gamma^*)$ 计算为:

$$\text{div}\mathbf{A}(\gamma^*)=\nabla\cdot\mathbf{A}(\gamma^*)=\frac{\partial f_1(x,y)}{\partial x}+\frac{\partial f_2(x,y)}{\partial y} \quad (25)$$

式中, ∇ 为哈密顿算子。

任意一点的旋度 $\text{rot}\mathbf{A}(\gamma^*)$ 计算为:

$$\text{rot}\mathbf{A}(\gamma^*)=\nabla\times\mathbf{A}(\gamma^*)=(\frac{\partial f_2(x,y)}{\partial x}-\frac{\partial f_1(x,y)}{\partial y})\mathbf{k} \quad (26)$$

式中, $\mathbf{k}$ 为沿空间直角坐标系 z 轴正向的单位矢量。

计算曲面各点散度和旋度, 根据散度和旋度是否为零, 将平面矢量场分为以下四类:

(1) 无散无旋场

此类平面矢量场散度与旋度均为零, 各点走刀矢量分布呈现平行状态。

(2) 无散有旋场

此类平面矢量场散度为零, 旋度不为零, 各点走刀矢量分布呈现涡旋状态。

(3) 有散无旋场

此类平面矢量场散度不为零, 旋度为零, 各点走刀矢量分布呈现辐射状态。

(4) 有散有旋场

此类平面矢量场散度与旋度均不为零, 各点走刀矢量分布呈现无规则状态。

通过对平面矢量场各点散度与旋度求解, 确定不同加工区域对应矢量场类型, 将平面矢量场中散度或旋度突变点映射到曲面上, 拟合曲线作为不同加工区域的边界, 完成基于走刀矢量分布的加工区域初分割。

步骤 3, 确保进给运动平稳的加工区域细分

结合步骤 2 的加工区域初分割结果, 对不同加工区域的空间矢量场进行流线拟合, 根据

机床旋转轴沿矢量场流线进给运动的运动学参数，开展确保进给运动平稳的加工区域细分。

以 AC 双转台型五轴数控机床为例，其旋转工作台 A 的转轴与机床坐标系的 X 轴平行，旋转工作台 C 的转轴与机床坐标系的 Z 轴平行。取加工区域空间矢量场的流线为 $\mathbf{r}(\xi)$ ，其中， ξ 为流线方程的弧长参数。以曲面上流线处的法向量 $\mathbf{n}(\xi) = (n_x(\xi), n_y(\xi), n_z(\xi))$ 作为机床旋转轴沿流线进给运动的刀轴矢量，计算为：

$$\mathbf{n}(\xi) = \frac{\mathbf{S}_u(u(\xi), v(\xi)) \times \mathbf{S}_v(u(\xi), v(\xi))}{\|\mathbf{S}_u(u(\xi), v(\xi)) \times \mathbf{S}_v(u(\xi), v(\xi))\|} \quad (27)$$

其中， $\mathbf{S}_u(u(\xi), v(\xi))$ 、 $\mathbf{S}_v(u(\xi), v(\xi))$ 为曲面 $\mathbf{S}(u, v)$ 在流线处的一阶偏导数。

根据流线上各点刀轴矢量，求解机床 A、C 轴转角 $\beta_A(\xi)$ 、 $\beta_C(\xi)$ 分别为：

$$\begin{cases} \beta_A(\xi) = \arctan\left(\frac{\sqrt{n_x(\xi)^2 + n_y(\xi)^2}}{n_z(\xi)}\right) \\ \beta_C(\xi) = \arctan\left(\frac{n_x(\xi)}{n_y(\xi)}\right) \end{cases} \quad (28)$$

结合式(27)-(28)，计算机床 A、C 轴沿矢量场流线进给运动的角速度 $\omega_A(\xi)$ 和 $\omega_C(\xi)$ 分别为：

$$\begin{cases} \omega_A(\xi) = \frac{d\beta_A(\xi)}{dt} = \frac{d\xi}{dt} \cdot \frac{d\beta_A(\xi)}{d\xi} = v \cdot \frac{d\beta_A(\xi)}{d\xi} \\ \omega_C(\xi) = \frac{d\beta_C(\xi)}{dt} = \frac{d\xi}{dt} \cdot \frac{d\beta_C(\xi)}{d\xi} = v \cdot \frac{d\beta_C(\xi)}{d\xi} \end{cases} \quad (29)$$

其中， t 表示加工时间， v 表示设定的进给速度。

计算机床 A、C 轴沿矢量场流线进给运动的角加速度 $\alpha_A(\xi)$ 和 $\alpha_C(\xi)$ 分别为：

$$\begin{cases} \alpha_A(\xi) = \frac{d\omega_A(\xi)}{dt} = v^2 \cdot \frac{d^2\beta_A(\xi)}{d\xi^2} \\ \alpha_C(\xi) = \frac{d\omega_C(\xi)}{dt} = v^2 \cdot \frac{d^2\beta_C(\xi)}{d\xi^2} \end{cases} \quad (30)$$

由此可得到机床旋转轴沿矢量场流线进给运动的角速度 $\omega(\xi)$ 与角加速度 $\alpha(\xi)$ 的值为：

$$\begin{cases} |\omega(\xi)| = \sqrt{\omega_A(\xi)^2 + \omega_C(\xi)^2} \\ |\alpha(\xi)| = \sqrt{\alpha_A(\xi)^2 + \alpha_C(\xi)^2} \end{cases} \quad (31)$$

为避免机床旋转轴沿流线进给运动时出现明显切削振动，各加工区域内角速度和角加速度需满足：

$$\begin{cases} \left| \frac{d\omega(\xi)}{d\xi} \right| \leq \frac{\sigma}{s} \int_0^s \left| \frac{d\omega(\xi)}{d\xi} \right| d\xi \\ \left| \frac{d\alpha(\xi)}{d\xi} \right| \leq \frac{\sigma}{s} \int_0^s \left| \frac{d\alpha(\xi)}{d\xi} \right| d\xi \end{cases} \quad (32)$$

其中， σ 表示设定的平稳系数， σ 越小则进给运动越平稳，其取值范围一般为 1-5， s 表示流线总弧长。

根据式(32)对进给运动是否平稳进行判断，以不满足该式的点作为旋转轴角速度或角加速度突变点，在加工区域初分割的基础上，求解得到各加工区域突变点并拟合曲线作为新增分区边界，完成确保进给运动平稳的加工区域细分。

步骤 4，曲面不同加工区域加工轨迹拓扑形状设计

通过步骤 2 与步骤 3 将复杂曲面分割为走刀矢量分布规则且沿矢量场流线进给运动平稳的不同加工区域，结合走刀方式，对各加工区域进行适宜的加工轨迹拓扑形状设计。

常用走刀方式主要有行切走刀与环切走刀两种，针对不同加工区域对应的平面矢量场类型，分别在不同加工区域对应的平面上设计二维加工轨迹拓扑形状如下：

(1) 无散无旋场

此类平面矢量场各点走刀矢量分布呈现平行状态，因此采用行切走刀加工。以各点走刀矢量为加工轨迹切向进行流线拟合，生成平行状的二维加工轨迹。

(2) 无散有旋场

此类平面矢量场各点走刀矢量分布呈现涡旋状态，当区域边界曲线与矢量场流线平行时，则流线为完整涡旋线，采用环切走刀加工；当区域边界曲线与矢量场流线不平行时，则流线为局部涡旋线，采用行切走刀加工。以各点走刀矢量为加工轨迹切向进行流线拟合，生成涡旋状的二维加工轨迹。

(3) 有散无旋场

此类平面矢量场各点走刀矢量分布呈现辐射状态，因此采用行切走刀加工。以各点走刀矢量为加工轨迹切向进行流线拟合，生成辐射状的二维加工轨迹。

(4) 有散有旋场

此类平面矢量场各点走刀矢量分布呈现无规则状态，不宜采用行切或环切走刀加工，因此将有散有旋场转化为无散无旋场，鉴于无散无旋场走刀矢量分布呈现平行状态，故对有散有旋场走刀矢量调整如下：

取有散有旋场 $\mathbf{B}(\gamma^*)=(f_1(x,y),f_2(x,y))$ 内部 m 个走刀矢量，分别表示为 $\mathbf{B}(\gamma_i^*)=(f_1(x_i,y_i),f_2(x_i,y_i))$ ，其中 $i=1,2,\dots,m$ 。以走刀矢量平均值 $\bar{\mathbf{B}}(\gamma^*)$ 作为调整后无散无旋场对应的走刀矢量，计算为：

$$\bar{\mathbf{B}}(\gamma^*)=(\cos[\frac{1}{m}\sum_{i=1}^m \arccos f_1(x_i,y_i)], \sin[\frac{1}{m}\sum_{i=1}^m \arccos f_1(x_i,y_i)]) \quad (33)$$

以各点调整后的走刀矢量为加工轨迹切向进行流线拟合，生成平行状的二维加工轨迹。

在不同加工区域对应的平面上完成二维加工轨迹拓扑形状设计后，将二维加工轨迹映射到曲面上获得三维加工轨迹，从而实现基于矢量场的曲面分区加工轨迹拓扑形状设计。

本发明的显著效果和益处是提出了一种基于矢量场的曲面分区加工轨迹拓扑形状设计方法，该方法针对复杂曲面分区加工过程中，加工区域分割与轨迹规划缺乏对走刀方式与进给运动平稳性综合考虑造成的局部误差超差及显著切削振动等问题，通过建立弦高误差与残高误差协同约束的走刀矢量场，完成基于走刀矢量分布的加工区域初分割及确保进给运动平稳的加工区域细分，并最终实现复杂曲面零件分区加工轨迹拓扑形状设计，有效减小了曲面分区加工的加工误差，提高了进给运动的平稳性，为复杂曲面高精高效加工提供技术支撑。

附图说明

图 1—方法整体流程图；图 2—弦高误差与残高误差协同约束的走刀矢量场；图 3—经基于走刀矢量分布的加工区域初分割与确保进给运动平稳的加工区域细分后的曲面分区结果图；图 4—单一加工区域设计的加工轨迹拓扑形状；图 5—a) 表示采用传统整体加工方法的加工表面粗糙度，b) 表示采用本发明所述分区加工方法的加工表面粗糙度； Ra 表示加工表面粗糙度(μm)；图 6—三坐标测量机测量的分别采用传统整体加工方法与本发明所述分区加工方法的加工表面轮廓对比图。

具体实施方式

结合技术方案与附图详细说明本发明的具体实施方式。

复杂曲面分区加工过程中，由于加工区域分割与轨迹规划缺乏对走刀方式与进给运动平稳性的综合考虑，易诱发局部误差超差及显著切削振动，严重影响曲面加工质量。针对这一情况，为了提高曲面分区加工的加工精度及进给运动的平稳性，发明了一种基于矢量场的曲面分区加工轨迹拓扑形状设计方法，整体流程如附图 1 所示。

实施例采用 AC 双转台型五轴数控机床，以具有高陡度、频凹凸、曲率突变特征的复杂曲面为例，借助 UG 软件和 MATLAB 软件，详细说明本发明实施过程。

首先，利用 UG 软件对该复杂曲面进行建模，以局部陡度 60° 的对称回转面为主体，在

该回转面上设计两个不规则凹坑，进而建立具有高陡度、频凹凸、曲率突变特征的复杂曲面，如图 3 所示。根据式(1)-(5)建立曲面各点弦高/残高误差与走刀方向法曲率/行距方向法曲率的函数关系，经式(6)-(12)完成两类误差的归一化处理，利用 MATLAB 软件，通过式(13)-(24)构建并求解两类误差的双目标优化模型，获得各点最优走刀方向，进而建立弦高误差与残高误差协同约束的走刀矢量场参见附图 2。

其次，对该空间向量场投影获得平面向量场，通过 MATLAB 软件，由式(25)-(26)计算平面矢量场各点散度与旋度，其中散度的最大值与最小值分别为 0.2299 和 0，旋度的最大值与最小值分别为 0.1191 和 0.0045。根据各点散度和旋度是否为零对平面矢量场进行分类，以散度或旋度突变点拟合的曲线作为分区边界，完成该复杂曲面的加工区域初分割。其中，曲面凹坑部分对应有散有旋场，其余部分对应无散有旋场，

然后，利用 MATLAB 软件中 `streamslice` 函数对不同加工区域的空间矢量场进行流线拟合，通过式(27)-(31)计算机床旋转轴沿流线进给运动的角速度和角加速度，其中曲面凹坑处最大角速度为 $16.56^\circ/\text{s}$ ，最大角加速度为 $864.29^\circ/\text{s}^2$ 。根据式(32)设定平稳系数为 2，求解流线上旋转轴角速度或角加速度突变点并拟合曲线作为新增分区边界，完成该复杂曲面的加工区域细分，最终分区结果参见附图 3。

最后，结合常见的行切与环切走刀方式，对不同加工区域加工轨迹拓扑形状进行设计，该复杂曲面凹坑处为有散有旋场，根据式(33)调整各点走刀矢量，生成相应的行切加工轨迹参见附图 4，其余部分为无散有旋场，综合考虑区域边界与矢量场流线，分别生成相应的行切与环切加工轨迹，完成基于矢量场的曲面分区加工轨迹拓扑形状设计。

为验证此方法的有效性，进行传统整体加工与本发明所述分区加工对比实验。对比实验采用相同的加工工艺参数，分别为主轴转速 5000r/min，切深 0.25mm，进给速度 300mm/min，行距 0.2mm，步长 1.8mm。实验结果表明，经本发明所述分区加工得到的曲面与经传统整体加工得到的曲面相比，分区加工的加工质量有显著提升。以工件高度 40mm 处的加工区域为代表，对其表面粗糙度及轮廓度进行测量。经传统整体加工得到的曲面表面粗糙度为 $3.5668\mu\text{m}$ ，经本发明所述分区加工得到的曲面表面粗糙度为 $2.7193\mu\text{m}$ ，较整体加工降低了 23.76%，所示结果参见附图 5，其中，图 5a)表示采用传统整体加工方法的加工表面粗糙度，图 5b)表示采用本发明所述分区加工方法的加工表面粗糙度。经传统整体加工得到的曲面轮廓度为 $153.6\mu\text{m}$ ，经本发明所述分区加工得到的曲面轮廓度为 $91.84\mu\text{m}$ ，较整体加工降低了 40.21%，所示结果参见附图 6。判定结果与实验结果一致，说明利用本发明的基于矢量场的曲面分区加工轨迹拓扑形状设计方法可有效减小曲面加工的加工误差，提高复杂曲面零件的加工质量，对工程实际中的加工轨迹规划具有重要的指导作用。

权利要求书

1.一种基于矢量场的曲面分区加工轨迹拓扑形状设计方法，其特征是，该方法分别建立弦高/残高误差与走刀方向法曲率的函数关系，即弦高误差与残高误差协同约束的走刀矢量场，经归一化构建两类误差的双目标优化模型，通过构造评价函数求解各点最优走刀方向，建立空间矢量场；计算投影后平面矢量场散度与旋度，根据其是否为零对矢量场分类，实现加工区域初分割；分析不同矢量场特征，拟合空间矢量场流线，计算机床旋转轴沿流线进给运动的运动学参数，根据其是否突变完成加工区域细分；结合走刀方式，实现曲面不同加工区域加工轨迹拓扑形状设计；方法的具体步骤如下：

步骤 1，建立弦高误差与残高误差协同约束的走刀矢量场

取空间直角坐标系 $O-xyz$ 中的曲面加工区域为 $S(u,v)=(x(u,v),y(u,v),z(u,v))$ ，其中 u 和 v 为曲面参数；在行距 d 与步长 f 确定时，曲面加工轨迹上任意一点处弦高误差 e 计算为：

$$e = \begin{cases} 0 & , k_f = 0 \\ \frac{1}{|k_f|} - \sqrt{\frac{1}{k_f^2} - \frac{f^2}{4}} & , k_f \neq 0 \end{cases} \quad (1)$$

其中， k_f 为走刀方向法曲率；

取变量 e^* 计算为：

$$e^* = k_f^2 \quad (2)$$

分别求解弦高误差 e 与变量 e^* 的单调性知，两者呈正相关关系，为降低后续计算难度，使用变量 e^* 表示弦高误差；

残高误差 h 计算为：

$$h = -\frac{d^2}{8}k_d + \frac{d^2}{8r} \quad (3)$$

其中， k_d 为行距方向法曲率， r 为刀具有效半径；

由微分几何知，行距方向与走刀方向互相垂直，满足式(4)：

$$k_d + k_f = 2H \quad (4)$$

其中， H 为平均曲率，对于曲面任意一点， H 为定值；

联立式(3)-(4)，残高误差表示为：

$$h = \frac{d^2}{8} k_f + \frac{d^2 - 2Hrd^2}{8r} \quad (5)$$

由式(2)与式(5)知, 步长及行距确定时, 弦高误差与残高误差仅由走刀方向法曲率决定; 为求解各点最优走刀方向, 以两类误差为目标函数构造双目标优化模型;

对两类误差归一化处理为:

$$\begin{cases} e_n = \frac{e^* - e_{\min}^*}{e_{\max}^* - e_{\min}^*} \\ h_n = \frac{h - h_{\min}}{h_{\max} - h_{\min}} \end{cases} \quad (6)$$

其中, e_n 和 h_n 分别表示归一化的弦高误差和残高误差, $e_{\min}^*$ 和 $e_{\max}^*$ 表示弦高误差的最小值和最大值, $h_{\min}$ 和 $h_{\max}$ 表示残高误差的最小值和最大值, 其求解如下:

以 k_1 和 k_2 表示曲面主曲率, $k_1 > k_2$, 其计算为:

$$\begin{cases} k_1 = H + \sqrt{H^2 - K} \\ k_2 = H - \sqrt{H^2 - K} \end{cases} \quad (7)$$

其中, K 为高斯曲率, 对于曲面任意一点, K 为定值;

由式(2)与式(5)得, 残高误差的最值为:

$$\begin{cases} h_{\max} = \frac{d^2}{8} k_1 + \frac{d^2 - 2Hrd^2}{8r} \\ h_{\min} = \frac{d^2}{8} k_2 + \frac{d^2 - 2Hrd^2}{8r} \end{cases} \quad (8)$$

弦高误差的最大值为:

$$e_{\max}^* = \begin{cases} k_1^2, & k_2 \geq 0 \\ k_1^2, & -k_1 \leq k_2 < 0 \\ k_2^2, & 0 \leq k_1 < -k_2 \\ k_2^2, & k_1 < 0 \end{cases} \quad (9)$$

弦高误差的最小值为:

$$e_{\min}^* = \begin{cases} k_2^2 & , k_2 \geq 0 \\ 0 & , -k_1 \leq k_2 < 0 \\ 0 & , 0 \leq k_1 < -k_2 \\ k_1^2 & , k_1 < 0 \end{cases} \quad (10)$$

根据式(6)-(10)得, 归一化的残高误差 h_n 为:

$$h_n = \frac{1}{k_1 - k_2} k_f - \frac{k_2}{k_1 - k_2} \quad (11)$$

归一化的弦高误差 e_n 为:

$$e_n = \begin{cases} \frac{1}{k_1^2 - k_2^2} k_f^2 - \frac{k_2^2}{k_1^2 - k_2^2} & , k_2 \geq 0 \\ \frac{1}{k_1^2} k_f^2 & , -k_1 \leq k_2 < 0 \\ \frac{1}{k_2^2} k_f^2 & , 0 \leq k_1 < -k_2 \\ \frac{1}{k_2^2 - k_1^2} k_f^2 - \frac{k_1^2}{k_2^2 - k_1^2} & , k_1 < 0 \end{cases} \quad (12)$$

弦高误差与残高误差均为归一化的弦高误差与残高误差, 以两类误差为目标函数建立双目标优化模型为:

$$\begin{aligned} V - \min (e_n, h_n) \\ s.t. \quad k_2 \leq k_f \leq k_1 \end{aligned} \quad (13)$$

式中, $V - \min$ 表示向量极小化;

用线性加权法构造评价函数 Q 为:

$$\begin{aligned} \min Q = \alpha_1 e_n + \alpha_2 h_n \\ s.t. \quad k_2 \leq k_f \leq k_1 \end{aligned} \quad (14)$$

其中, α_1 和 α_2 分别为弦高误差和残高误差在评价函数中所占权重, 其计算如下:

$$\begin{cases} \alpha_1 = \frac{h_{n1} - h_{n\min}}{(e_{n1} - e_{n\min}) + (h_{n1} - h_{n\min})} \\ \alpha_2 = \frac{e_{n1} - e_{n\min}}{(e_{n1} - e_{n\min}) + (h_{n1} - h_{n\min})} \end{cases} \quad (15)$$

其中, h_{n1} 为弦高误差取最小值时对应的残高误差, e_{n1} 为残高误差取最小值时对应的弦高误差, $h_{n\min}$ 为残高误差最小值, $e_{n\min}$ 为弦高误差最小值;

根据主曲率取值范围, 计算双目标优化模型最优解如下:

(1) 当 $k_2 \geq 0$ 时, 取 $k_f = k_2$, e_n 和 h_n 均取得最小值, 因而, $k_f = k_2$ 为双目标优化模型最优解, 由欧拉定理知:

$$k_f = k_1 \cos^2 \theta + k_2 \sin^2 \theta \quad (16)$$

其中, θ 为走刀方向与 k_1 对应主方向的夹角, 此时, $\theta = \frac{\pi}{2}$;

(2) 当 $-k_1 \leq k_2 < 0$ 时, 评价函数 Q 为:

$$Q = \frac{1}{k_1^2 + k_2^2 - k_1 k_2} (k_f^2 - k_2 k_f + k_2^2) \quad (17)$$

取 $k_f = \frac{k_2}{2}$, Q 取得最小值, 因而, $k_f = \frac{k_2}{2}$ 为双目标优化模型最优解, 此时,

$$\theta = \arcsin \sqrt{\frac{k_2 - 2k_1}{2k_2 - 2k_1}};$$

(3) 当 $0 \leq k_1 < -k_2$ 时, 评价函数 Q 为:

$$Q = \frac{1}{k_1 - 2k_2} \left(-\frac{1}{k_2} k_f^2 + k_f - k_2 \right) \quad (18)$$

取 $k_f = \frac{k_2}{2}$, Q 取得最小值, 因而, $k_f = \frac{k_2}{2}$ 为双目标优化模型最优解, 此时,

$$\theta = \arcsin \sqrt{\frac{k_2 - 2k_1}{2k_2 - 2k_1}};$$

(4) 当 $k_1 < 0$ 时, 评价函数 Q 为:

$$Q = \frac{1}{2(k_2 - k_1)} \left(\frac{1}{k_2 + k_1} k_f^2 - k_f + k_2 - \frac{k_1^2}{k_2 + k_1} \right) \quad (19)$$

取 $k_f = \frac{k_1 + k_2}{2}$, Q 取得最小值, 因而, $k_f = \frac{k_1 + k_2}{2}$ 为双目标优化模型最优解, 此时,

$$\theta = \frac{\pi}{4};$$

以 $(du:dv)$ 表示曲面任意切方向,沿该方向的曲面第一基本形式 I 和第二基本形式 II 分别为:

$$\begin{cases} I = Edu^2 + 2Fdudv + Gdv^2 \\ II = Ldu^2 + 2Mdudv + Ndv^2 \end{cases} \quad (20)$$

其中, E 、 F 、 G 为曲面第一类基本量, L 、 M 、 N 为曲面第二类基本量,表达式如下:

$$\begin{cases} E = \mathbf{S}_u^2 \\ F = \mathbf{S}_u \cdot \mathbf{S}_v \\ G = \mathbf{S}_v^2 \\ L = \mathbf{S}_{uu} \cdot \mathbf{n} \\ M = \mathbf{S}_{uv} \cdot \mathbf{n} \\ N = \mathbf{S}_{vv} \cdot \mathbf{n} \end{cases} \quad (21)$$

其中, $\mathbf{S}_u$ 、 $\mathbf{S}_v$ 为曲面 $\mathbf{S}(u,v)$ 的一阶偏导数, $\mathbf{S}_{uu}$ 、 $\mathbf{S}_{uv}$ 、 $\mathbf{S}_{vv}$ 为曲面 $\mathbf{S}(u,v)$ 的二阶偏导数, $\mathbf{n}$ 为曲面 $\mathbf{S}(u,v)$ 的法向量;

以 $(du^I:dv^I)$ 表示主曲率 k_1 对应主方向,其计算为:

$$\frac{du^I}{dv^I} = \frac{k_1 F - M}{L - k_1 E} \quad (22)$$

以 $(du^*:dv^*)$ 表示最优走刀方向,其计算为:

$$\frac{du^*}{dv^*} = \frac{-b + \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a} \quad (23)$$

其中, a 、 b 、 c 分别表示为:

$$\begin{cases} a = (F^2 - EG \cos^2 \theta) \left(\frac{dv^1}{du^1} \right)^2 + 2EF \sin^2 \theta \left(\frac{dv^1}{du^1} \right) + E^2 \sin^2 \theta \\ b = 2FG \sin^2 \theta \left(\frac{dv^1}{du^1} \right)^2 + 2(EG + F^2 \sin^2 \theta - F^2 \cos^2 \theta) \left(\frac{dv^1}{du^1} \right) + 2EF \sin^2 \theta \\ c = G^2 \sin^2 \theta \left(\frac{dv^1}{du^1} \right)^2 + 2FG \sin^2 \theta \left(\frac{dv^1}{du^1} \right) + (F^2 - EG \cos^2 \theta) \end{cases} \quad (24)$$

联立式(22)-(24)，求解获得曲面各点最优走刀方向，沿此方向建立单位走刀矢量，从而形成弦高误差与残高误差协同约束的走刀矢量场；

步骤 2，基于走刀矢量分布的加工区域初分割

经步骤 1 获得的空 间 走 刀 矢 量 场 在 空 间 直 角 坐 标 系 $O-xyz$ 中 表 示 为 $\mathbf{F}(\boldsymbol{\gamma})=(g_1(x,y,z),g_2(x,y,z),g_3(x,y,z))$ ，其中 $\boldsymbol{\gamma}$ 为曲面各点沿最优走刀方向的单位走刀矢量；将该矢量场向 xOy 平面投影，沿各点投影后的走刀方向建立单位走刀矢量 $\boldsymbol{\gamma}^*$ ，获得平面矢量场 $\mathbf{A}(\boldsymbol{\gamma}^*)=(f_1(x,y),f_2(x,y))$ ；在复杂曲面生成的走刀矢量场中，走刀矢量分布呈现区域性；针对具有区域性走刀矢量分布的矢量场，开展基于走刀矢量分布的加工区域初分割；

根据矢量场的散度和旋度，可以确定该矢量场内的走刀矢量分布；在平面矢量场 $\mathbf{A}(\boldsymbol{\gamma}^*)=(f_1(x,y),f_2(x,y))$ 中任意一点的散度 $\text{div}\mathbf{A}(\boldsymbol{\gamma}^*)$ 计算为：

$$\text{div}\mathbf{A}(\boldsymbol{\gamma}^*)=\nabla\cdot\mathbf{A}(\boldsymbol{\gamma}^*)=\frac{\partial f_1(x,y)}{\partial x}+\frac{\partial f_2(x,y)}{\partial y} \quad (25)$$

式中， ∇ 为哈密顿算子；

任意一点的旋度 $\text{rot}\mathbf{A}(\boldsymbol{\gamma}^*)$ 计算为：

$$\text{rot}\mathbf{A}(\boldsymbol{\gamma}^*)=\nabla\times\mathbf{A}(\boldsymbol{\gamma}^*)=(\frac{\partial f_2(x,y)}{\partial x}-\frac{\partial f_1(x,y)}{\partial y})\mathbf{k} \quad (26)$$

式中， $\mathbf{k}$ 为沿空间直角坐标系 z 轴正向的单位矢量；

计算曲面各点散度和旋度，根据散度和旋度是否为零，将平面矢量场分为以下四类：

(1)无散无旋场

此类平面矢量场散度与旋度均为零，各点走刀矢量分布呈现平行状态；

(2)无散有旋场

此类平面矢量场散度为零，旋度不为零，各点走刀矢量分布呈现涡旋状态；

(3)有散无旋场

此类平面矢量场散度不为零，旋度为零，各点走刀矢量分布呈现辐射状态；

(4)有散有旋场

此类平面矢量场散度与旋度均不为零，各点走刀矢量分布呈现无规则状态；

通过对平面矢量场各点散度与旋度求解，确定不同加工区域对应矢量场类型，将平面矢量场中散度或旋度突变点映射到曲面上，拟合曲线作为不同加工区域的边界，完成基于走刀

矢量分布的加工区域初分割；

步骤 3，确保进给运动平稳的加工区域细分

结合步骤 2 的加工区域初分割结果，对不同加工区域的空间矢量场进行流线拟合，根据机床旋转轴沿矢量场流线进给运动的运动学参数，开展确保进给运动平稳的加工区域细分；

采用 AC 双转台型五轴数控机床，其旋转工作台 A 的转轴与机床坐标系的 X 轴平行，旋转工作台 C 的转轴与机床坐标系的 Z 轴平行；取加工区域空间矢量场的流线为 $\mathbf{r}(\xi)$ ，其中， ξ 为流线方程的弧长参数；以曲面上流线处的法向量 $\mathbf{n}(\xi) = (n_x(\xi), n_y(\xi), n_z(\xi))$ 作为机床旋转轴沿流线进给运动的刀轴矢量，计算为：

$$\mathbf{n}(\xi) = \frac{\mathbf{S}_u(u(\xi), v(\xi)) \times \mathbf{S}_v(u(\xi), v(\xi))}{\|\mathbf{S}_u(u(\xi), v(\xi)) \times \mathbf{S}_v(u(\xi), v(\xi))\|} \quad (27)$$

其中， $\mathbf{S}_u(u(\xi), v(\xi))$ 、 $\mathbf{S}_v(u(\xi), v(\xi))$ 为曲面 $\mathbf{S}(u, v)$ 在流线处的一阶偏导数；

根据流线上各点刀轴矢量，求解机床 A、C 轴转角 $\beta_A(\xi)$ 、 $\beta_C(\xi)$ 分别为：

$$\begin{cases} \beta_A(\xi) = \arctan\left(\frac{\sqrt{n_x(\xi)^2 + n_y(\xi)^2}}{n_z(\xi)}\right) \\ \beta_C(\xi) = \arctan\left(\frac{n_x(\xi)}{n_y(\xi)}\right) \end{cases} \quad (28)$$

结合式(27)-(28)，计算机床 A、C 轴沿矢量场流线进给运动的角速度 $\omega_A(\xi)$ 和 $\omega_C(\xi)$ 分别为：

$$\begin{cases} \omega_A(\xi) = \frac{d\beta_A(\xi)}{dt} = \frac{d\xi}{dt} \cdot \frac{d\beta_A(\xi)}{d\xi} = v \cdot \frac{d\beta_A(\xi)}{d\xi} \\ \omega_C(\xi) = \frac{d\beta_C(\xi)}{dt} = \frac{d\xi}{dt} \cdot \frac{d\beta_C(\xi)}{d\xi} = v \cdot \frac{d\beta_C(\xi)}{d\xi} \end{cases} \quad (29)$$

其中， t 表示加工时间， v 表示设定的进给速度；

计算机床 A、C 轴沿矢量场流线进给运动的角加速度 $\alpha_A(\xi)$ 和 $\alpha_C(\xi)$ 分别为：

$$\begin{cases} \alpha_A(\xi) = \frac{d\omega_A(\xi)}{dt} = v^2 \cdot \frac{d^2\beta_A(\xi)}{d\xi^2} \\ \alpha_C(\xi) = \frac{d\omega_C(\xi)}{dt} = v^2 \cdot \frac{d^2\beta_C(\xi)}{d\xi^2} \end{cases} \quad (30)$$

由此得到机床旋转轴沿矢量场流线进给运动的角速度 $\omega(\xi)$ 与角加速度 $\alpha(\xi)$ 的值为：

$$\begin{cases} |\omega(\xi)| = \sqrt{\omega_A(\xi)^2 + \omega_C(\xi)^2} \\ |\alpha(\xi)| = \sqrt{\alpha_A(\xi)^2 + \alpha_C(\xi)^2} \end{cases} \quad (31)$$

为避免机床旋转轴沿流线进给运动时出现明显切削振动，各加工区域内角速度和角加速度需满足：

$$\begin{cases} \left| \frac{d\omega(\xi)}{d\xi} \right| \leq \frac{\sigma}{s} \int_0^s \left| \frac{d\omega(\xi)}{d\xi} \right| d\xi \\ \left| \frac{d\alpha(\xi)}{d\xi} \right| \leq \frac{\sigma}{s} \int_0^s \left| \frac{d\alpha(\xi)}{d\xi} \right| d\xi \end{cases} \quad (32)$$

其中， σ 表示设定的平稳系数， σ 越小则进给运动越平稳，其取值范围一般为 1-5， s 表示流线总弧长；

根据式(32)对进给运动是否平稳进行判断，以不满足该式的点作为旋转轴角速度或角加速度突变点，在加工区域初分割的基础上，求解得到各加工区域突变点并拟合曲线作为新增分区边界，完成确保进给运动平稳的加工区域细分；

步骤 4，曲面不同加工区域加工轨迹拓扑形状设计

通过步骤 2 与步骤 3 将复杂曲面分割为走刀矢量分布规则且沿矢量场流线进给运动平稳的不同加工区域，结合走刀方式，对各加工区域进行适宜的加工轨迹拓扑形状设计；

常用走刀方式主要有行切走刀与环切走刀两种，针对不同加工区域对应的平面矢量场类型，分别在不同加工区域对应的平面上设计二维加工轨迹拓扑形状如下：

(1)无散无旋场

此类平面矢量场各点走刀矢量分布呈现平行状态，因此采用行切走刀加工；以各点走刀矢量为加工轨迹切向进行流线拟合，生成平行状的二维加工轨迹；

(2)无散有旋场

此类平面矢量场各点走刀矢量分布呈现涡旋状态，当区域边界曲线与矢量场流线平行时，则流线为完整涡旋线，采用环切走刀加工；当区域边界曲线与矢量场流线不平行时，则流线为局部涡旋线，采用行切走刀加工；以各点走刀矢量为加工轨迹切向进行流线拟合，生成涡旋状的二维加工轨迹；

(3)有散无旋场

此类平面矢量场各点走刀矢量分布呈现辐射状态，因此采用行切走刀加工；以各点走刀矢量为加工轨迹切向进行流线拟合，生成辐射状的二维加工轨迹；

(4)有散有旋场

此类平面矢量场各点走刀矢量分布呈现无规则状态，不宜采用行切或环切走刀加工，因此将有散有旋场转化为无散无旋场，鉴于无散无旋场走刀矢量分布呈现平行状态，故对有散有旋场走刀矢量调整如下：

取有散有旋场 $\mathbf{B}(\boldsymbol{\gamma}^*)=(f_1(x,y),f_2(x,y))$ 内部 m 个走刀矢量，分别表示为 $\mathbf{B}(\boldsymbol{\gamma}_i^*)=(f_1(x_i,y_i),f_2(x_i,y_i))$ ，其中 $i=1,2,\dots,m$ ；以走刀矢量平均值 $\overline{\mathbf{B}}(\boldsymbol{\gamma}^*)$ 作为调整后无散无旋场对应的走刀矢量，计算为：

$$\overline{\mathbf{B}}(\boldsymbol{\gamma}^*)=(\cos[\frac{1}{m}\sum_{i=1}^m \arccos f_1(x_i,y_i)], \sin[\frac{1}{m}\sum_{i=1}^m \arccos f_1(x_i,y_i)]) \quad (33)$$

以各点调整后的走刀矢量为加工轨迹切向进行流线拟合，生成平行状的二维加工轨迹；

在不同加工区域对应的平面上完成二维加工轨迹拓扑形状设计后，将二维加工轨迹映射到曲面上获得三维加工轨迹，从而实现基于矢量场的曲面分区加工轨迹拓扑形状设计。

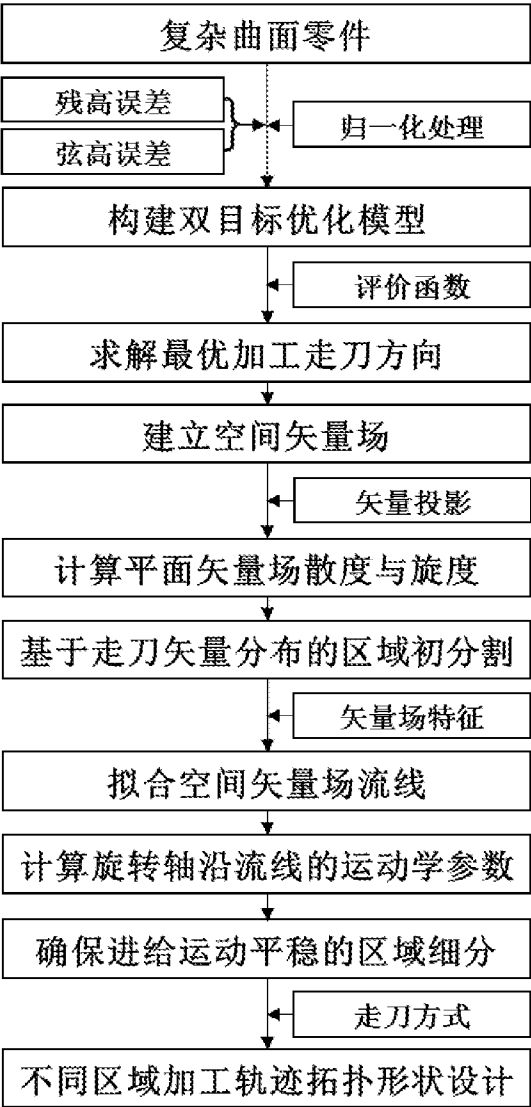


图 1

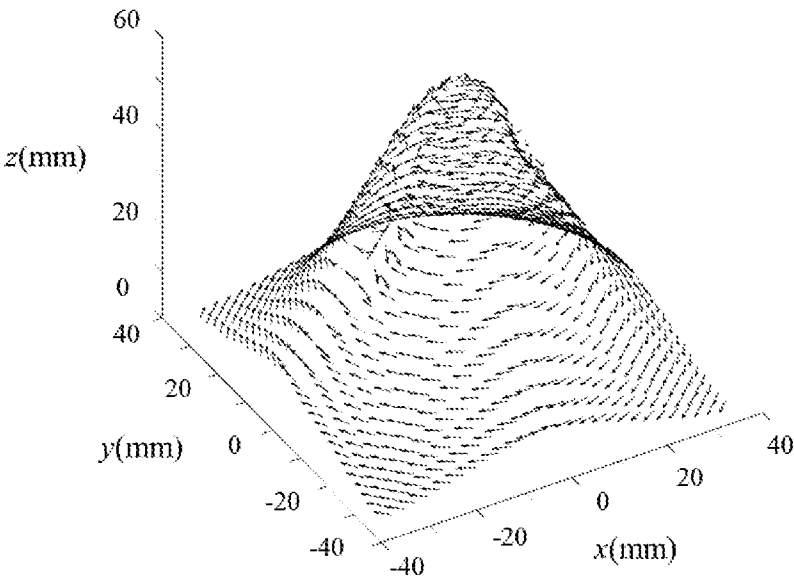


图 2

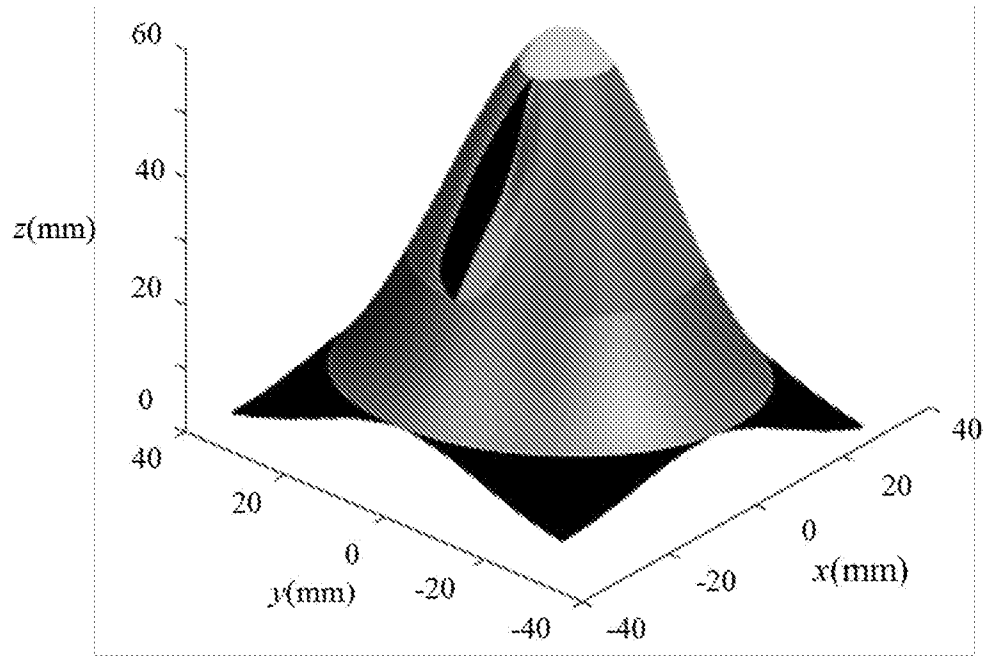


图 3

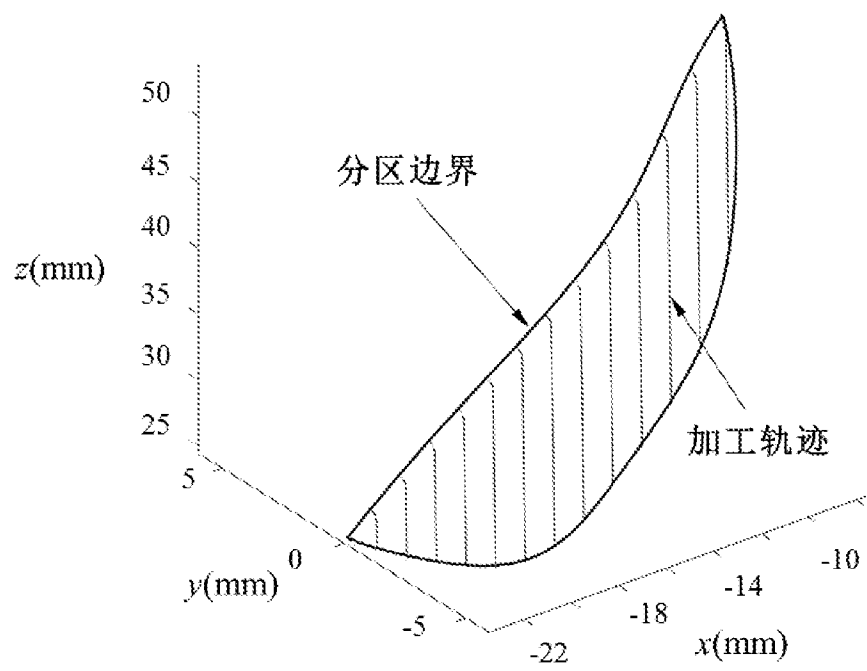


图 4

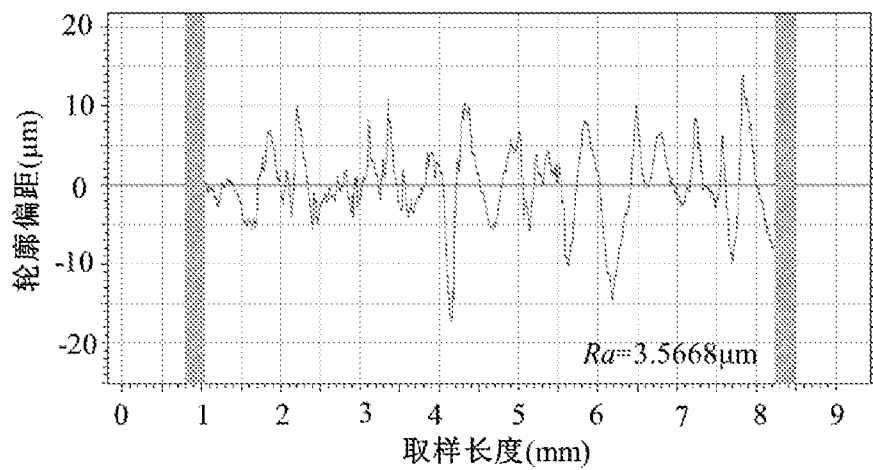


图 5a)

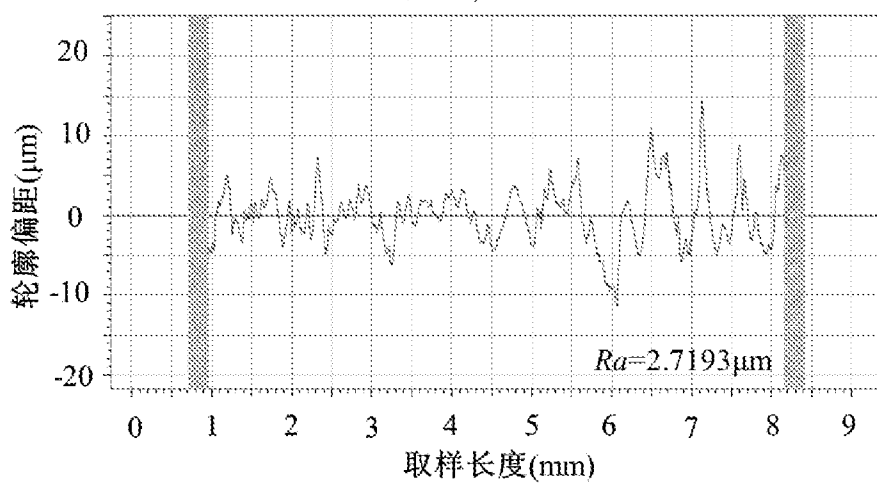


图 5b)

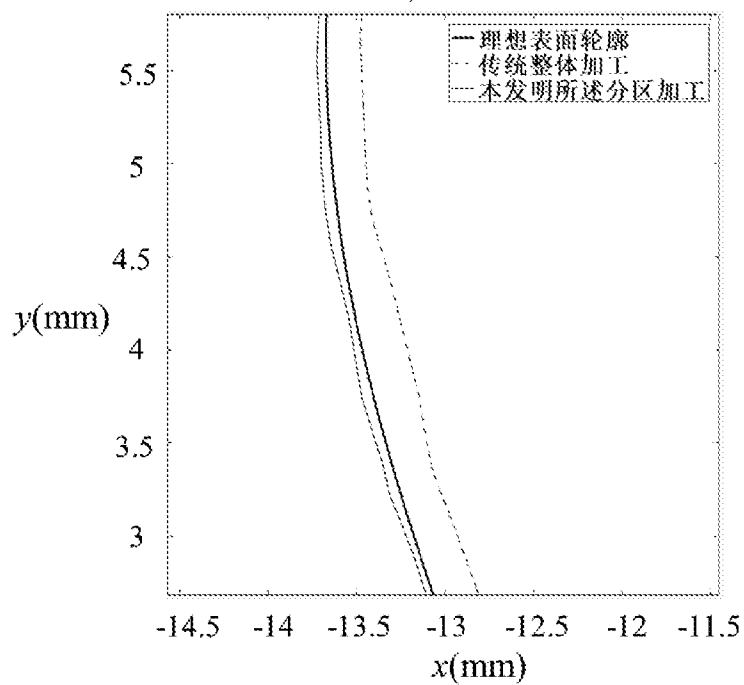


图 6

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/CN2019/101266

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

G05B 19/19(2006.01)i; B23C 3/00(2006.01)i

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)

G05B19, B23C

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)

CNABS; VEN; CNTXT: 残高误差, 残高, 曲面分区, 函数, 曲率, 矢量场, 拓扑, 走刀, 曲面, curve, track, plan, vector field, topological, height, chord, error, boundary, curved surface, kinematic, parameter, map

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
PX	CN 109358568 A (DALIAN UNIVERSITY OF TECHNOLOGY) 19 February 2019 (2019-02-19) entire document	1
A	CN 108628247 A (DALIAN UNIVERSITY OF TECHNOLOGY) 09 October 2018 (2018-10-09) description, paragraphs [0005]-[0144], and figures 1-4 and 6	1
A	CN 107562013 A (DALIAN UNIVERSITY OF TECHNOLOGY) 09 January 2018 (2018-01-09) entire document	1
A	CN 104281098 A (NANJING UNIVERSITY OF AERONAUTICS AND ASTRONAUTICS) 14 January 2015 (2015-01-14) entire document	1
A	JP 2017156867 A (IHI CORP. et al.) 07 September 2017 (2017-09-07) entire document	1
A	US 2011137463 A1 (GM GLOBAL TECHNOLOGY OPERATIONS, INC.) 09 June 2011 (2011-06-09) entire document	1



Further documents are listed in the continuation of Box C.



See patent family annex.

* Special categories of cited documents:

“A” document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance

“E” earlier application or patent but published on or after the international filing date

“L” document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)

“O” document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means

“P” document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed

“T” later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention

“X” document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone

“Y” document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art

“&” document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search

14 November 2019

Date of mailing of the international search report

28 November 2019

Name and mailing address of the ISA/CN

China National Intellectual Property Administration (ISA/
CN)
No. 6, Xitucheng Road, Jimenqiao Haidian District, Beijing
100088
China

Facsimile No. (86-10)62019451

Authorized officer

Telephone No.

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/CN2019/101266**C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT**

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	CN 106354098 A (DALIAN UNIVERSITY OF TECHNOLOGY) 25 January 2017 (2017-01-25) entire document	1
A	CN 107491034 A (HUAZHONG UNIVERSITY OF SCIENCE AND TECHNOLOGY et al.) 19 December 2017 (2017-12-19) entire document	1

INTERNATIONAL SEARCH REPORT
Information on patent family members

International application No.

PCT/CN2019/101266

Patent document cited in search report			Publication date (day/month/year)	Patent family member(s)			Publication date (day/month/year)
CN	109358568	A	19 February 2019	None			
CN	108628247	A	09 October 2018	CN	108628247	B	11 October 2019
CN	107562013	A	09 January 2018	CN	107562013	B	11 October 2019
CN	104281098	A	14 January 2015	CN	104281098	B	15 February 2017
JP	2017156867	A	07 September 2017	CA	3015878	A1	08 September 2017
				WO	2017150087	A1	08 September 2017
				CN	108701166	A	23 October 2018
				EP	3425539	A1	09 January 2019
				US	2019040553	A1	07 February 2019
US	2011137463	A1	09 June 2011	US	8515579	B2	20 August 2013
				JP	2013049134	A	14 March 2013
				DE	102010053002	A1	30 April 2014
				DE	102010053002	B4	03 June 2015
				JP	2011121169	A	23 June 2011
				JP	5785388	B2	30 September 2015
CN	106354098	A	25 January 2017	CN	106354098	B	04 September 2018
CN	107491034	A	19 December 2017	None			

国际检索报告

国际申请号

PCT/CN2019/101266

A. 主题的分类 G05B 19/19(2006.01)i; B23C 3/00(2006.01)i 按照国际专利分类(IPC)或者同时按照国家分类和IPC两种分类		
B. 检索领域 检索的最低限度文献(标明分类系统和分类号) G05B19, B23C 包含在检索领域中的除最低限度文献以外的检索文献 在国际检索时查阅的电子数据库(数据库的名称, 和使用的检索词(如使用)) CNABS;VEN;CNTXT:残高误差, 残高, 曲面分区, 函数, 曲率, 矢量场, 拓扑, 走刀, 曲面, curve, track, plan, vector field, topological, height, chord, error, boundary, curved surface, kinematic, parameter, map		
C. 相关文件		
类 型*	引用文件, 必要时, 指明相关段落	相关的权利要求
PX	CN 109358568 A (大连理工大学) 2019年 2月 19日 (2019 - 02 - 19) 全文	1
A	CN 108628247 A (大连理工大学) 2018年 10月 9日 (2018 - 10 - 09) 说明书第[0005]-[0144]段, 附图1-4, 6	1
A	CN 107562013 A (大连理工大学) 2018年 1月 9日 (2018 - 01 - 09) 全文	1
A	CN 104281098 A (南京航空航天大学) 2015年 1月 14日 (2015 - 01 - 14) 全文	1
A	JP 2017156867 A (IHI CORP等) 2017年 9月 7日 (2017 - 09 - 07) 全文	1
A	US 2011137463 A1 (GM GLOBAL TECH OPERATIONS INC) 2011年 6月 9日 (2011 - 06 - 09) 全文	1
A	CN 106354098 A (大连理工大学) 2017年 1月 25日 (2017 - 01 - 25) 全文	1
☒ 其余文件在C栏的续页中列出。 ☒ 见同族专利附件。		
* 引用文件的具体类型: “A” 认为不特别相关的表示了现有技术一般状态的文件 “E” 在国际申请日的当天或之后公布的在先申请或专利 “L” 可能对优先权要求构成怀疑的文件, 或为确定另一篇引用文件的公布日而引用的或者因其他特殊理由而引用的文件(如具体说明的) “O” 涉及口头公开、使用、展览或其他方式公开的文件 “P” 公布日先于国际申请日但迟于所要求的优先权日的文件 “T” 在申请日或优先权日之后公布, 与申请不相抵触, 但为了理解发明之理论或原理的在后文件 “X” 特别相关的文件, 单独考虑该文件, 认定要求保护的发明不是新颖的或不具有创造性 “Y” 特别相关的文件, 当该文件与另一篇或者多篇该类文件结合并且这种结合对于本领域技术人员为显而易见时, 要求保护的发明不具有创造性 “&” 同族专利的文件		
国际检索实际完成的日期		国际检索报告邮寄日期
2019年 11月 14日		2019年 11月 28日
ISA/CN的名称和邮寄地址		授权官员
中国国家知识产权局(ISA/CN) 中国北京市海淀区蓟门桥西土城路6号 100088 传真号 (86-10)62019451		许凌云 电话号码 62085775

C. 相关文件		
类 型*	引用文件，必要时，指明相关段落	相关的权利要求
A	CN 107491034 A (华中科技大学等) 2017年 12月 19日 (2017 - 12 - 19) 全文	1

国际检索报告
关于同族专利的信息

国际申请号

PCT/CN2019/101266

检索报告引用的专利文件			公布日 (年/月/日)	同族专利	公布日 (年/月/日)
CN	109358568	A	2019年 2月 19日	无	
CN	108628247	A	2018年 10月 9日	CN 108628247	B 2019年 10月 11日
CN	107562013	A	2018年 1月 9日	CN 107562013	B 2019年 10月 11日
CN	104281098	A	2015年 1月 14日	CN 104281098	B 2017年 2月 15日
JP	2017156867	A	2017年 9月 7日	CA 3015878	A1 2017年 9月 8日
				WO 2017150087	A1 2017年 9月 8日
				CN 108701166	A 2018年 10月 23日
				EP 3425539	A1 2019年 1月 9日
				US 2019040553	A1 2019年 2月 7日
US	2011137463	A1	2011年 6月 9日	US 8515579	B2 2013年 8月 20日
				JP 2013049134	A 2013年 3月 14日
				DE 102010053002	A1 2014年 4月 30日
				DE 102010053002	B4 2015年 6月 3日
				JP 2011121169	A 2011年 6月 23日
				JP 5785388	B2 2015年 9月 30日
CN	106354098	A	2017年 1月 25日	CN 106354098	B 2018年 9月 4日
CN	107491034	A	2017年 12月 19日	无	

表 PCT/ISA/210 (同族专利附件) (2015年1月)