

(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

(43) 国际公布日
2020 年 7 月 30 日 (30.07.2020)



(10) 国际公布号
WO 2020/151683 A1

- (51) 国际专利分类号:
B23F 5/20 (2006.01) *B23F 21/12* (2006.01)
- (21) 国际申请号: PCT/CN2020/073343
- (22) 国际申请日: 2020 年 1 月 21 日 (21.01.2020)
- (25) 申请语言: 中文
- (26) 公布语言: 中文
- (30) 优先权:
201910059324.5 2019 年 1 月 22 日 (22.01.2019) CN
- (71) 申请人: 江苏大学 (JIANGSU UNIVERSITY) [CN/CN]; 中国江苏省镇江市京口区学府路 301 号, Jiangsu 212013 (CN)。
- (72) 发明人: 郭二廓 (GUO, Erkuo); 中国江苏省镇江市京口区学府路 301 号, Jiangsu 212013 (CN)。 任乃飞 (REN, Naifei); 中国江苏省镇江市京口区学府

路 301 号, Jiangsu 212013 (CN)。 周长禄 (ZHOU, Changlu); 中国江苏省镇江市京口区学府路 301 号, Jiangsu 212013 (CN)。 王杰 (WANG, Jie); 中国江苏省镇江市京口区学府路 301 号, Jiangsu 212013 (CN)。 张新洲 (ZHANG, Xinzhou); 中国江苏省镇江市京口区学府路 301 号, Jiangsu 212013 (CN)。

(74) 代理人: 北京德崇智捷知识产权代理有限公司 (JW IP LAW FIRM); 中国北京市朝阳区酒仙桥路 14 号 A5 楼 7 层 701, Beijing 100015 (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, 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,

(54) Title: INVOLUTE CYLINDRICAL GEAR ENVELOPE MILLING METHOD TAKING PRECISE CHARACTERISTICS OF TOOTH SURFACE INTO CONSIDERATION

(54) 发明名称: 一种考虑齿面精度特性的渐开线圆柱齿轮包络铣削加工方法

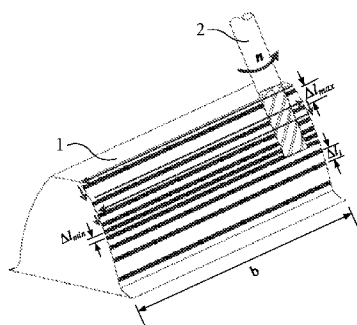


图 1

(57) Abstract: Provided is an involute cylindrical gear envelope milling method taking the precise characteristics of a tooth surface into consideration. The method comprises the following steps: S01, choosing a milling tool, and determining the diameter of the tool and the length of a cutting edge of the tool; S02, determining a dynamic eccentricity e_i of an axis of the tool relative to an axis of a gear; S03, constructing a step length formula of feeding in a tooth profile direction, constructing a curvilinear equation between an involute tooth profile extension angle and a tooth surface residual height difference, and calculating a cutter location point; and S04, planning a feeding path. According to the method, on the premise of ensuring the machining precision of a tooth surface of an involute cylindrical gear, the differential geometrical characteristics of an involute tooth surface are comprehensively taken into consideration to calculate a cutter location point and plan a tool path, such that a tool feeding trajectory is distributed as required, thereby reducing redundant feeding for the root and top of a tooth, and improving the machining efficiency of tooth envelope milling and the meshing performance of the tooth surface.

(57) 摘要: 一种考虑齿面精度特性的渐开线圆柱齿轮包络铣削加工方法, 包括以下步骤: S01: 选择铣削刀具, 确定刀具直径、刀具切削刃长度; S02: 确定刀具轴线相对于齿轮轴线的动态偏心量 e_i ; S03: 构建齿廓方向走刀步长公式, 构建渐开线齿廓展开角度与齿面残高差之间的曲线方程, 计算刀位点; S04: 规划走刀路径。该方法在保证渐开线圆柱齿轮齿面加工精度的前提下, 综合考虑渐开线齿面的微分几何特性, 计算出刀位点, 规划刀具路径, 使刀具走刀轨迹按需分配, 减小齿根和齿顶的冗余走刀, 从而提高包络铣齿的加工效率以及齿面的啮合性能。

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,
ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US,
UZ, VC, VN, WS, 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))。

一种考虑齿面精度特性的渐开线圆柱齿轮包络铣削加工方法

技术领域

本发明涉及机械加工技术领域，尤其涉及一种考虑齿面精度特性的渐开线圆柱齿轮包络铣削加工方法。

背景技术

齿轮是机械相关应用行业的关键基础零件。近年来，针对传统的滚齿、插齿、剃齿等齿轮加工方法存在的单件小批量、大模数齿轮类零件的加工周期长、专用制齿装备和专用齿轮刀具成本高的问题，出现了一种在通用多轴加工中心上采用通用刀具对圆柱齿轮进行柔性包络铣削加工的方法，可为企业的单件小批量和大模数齿轮加工提供一种低成本、高效率、短周期和快响应的柔性制齿方法。

然而，这种先进的多轴车铣复合加工技术在圆柱齿轮的加工上仍存在着加工效率不高的问题。究其原因，一是车铣复合包络铣削原理是将齿面拟合成自由曲面后再进行刀具路径规划，并未考虑到齿面的微分几何特性。尤其是针对渐开线圆柱齿轮，其齿形上每一微段的曲率半径均不相同，具有一定的特殊性。二是这种基于自由曲面的走刀路径规划方法也未考虑齿面节圆处啮合精度的需求。在渐开线圆柱齿轮副啮合过程中，主要参与啮合的区域是靠近节圆附近的齿面，在加工过程中要优先保证该区域的加工精度。现有技术中虽然有五轴车铣复合加工中心能实现对圆柱齿轮的铣削加工，但是它们所采用的铣削形式是将齿面按自由曲面处理，导致加工效率和加工精度之间相互矛盾。

因此，如果不能综合考虑到齿面的微分几何特性和齿面的精度特征要求，仅将齿面上各处的加工精度按照相同的残高差处理，必然会造成大量的冗余走刀，导致加工效率低下，或是齿面啮合区域精度不高。

发明内容

针对现有技术中存在不足，本发明提供了一种考虑齿面精度特性的渐开线圆柱齿轮包络铣削加工方法，用于提高在通用加工中心上采用通用刀具铣削渐开线圆柱齿轮的加工效率和齿面啮合性能。

本发明是通过以下技术手段实现上述技术目的的。

一种考虑齿面精度特性的渐开线圆柱齿轮包络铣削加工方法，包括：

S01：根据待加工齿轮工件参数，选择刀具，确定刀具直径和刀具切削刃长度；

S02: 采用偏心铣削方式进行加工, 确定刀具轴线相对于齿轮轴线的动态偏心量 e_i ;

S03: 根据齿轮的齿面主要啮合区域的精度要求, 通过构建齿廓方向走刀步长公式, 求解走刀步长沿齿廓方向的最大间距 Δl_{max} 、两个刀位点的相邻步长间距 Δl_i 以及齿面上各刀位点对应的渐开线展开角度 u_i , 构建渐开线齿廓展开角度与齿面残高差之间的曲线方程 $\Delta t_i = f(\Delta u_i)$, 最终确定加工刀位点;

S04: 根据刀位点规划走刀路径。

优选地, 所述步骤 S01 中, 对于中小模数渐开线圆柱齿轮选用立铣刀或棒铣刀, 对于大模数渐开线圆柱齿轮选用圆锥盘形铣刀或棒铣刀。

优选地, 所述步骤 S01 中, 刀具直径 $D_t \geq \phi 10\text{mm}$, 刀刃长度 $L_t \geq 20\text{mm}$ 。

优选地, 所述偏心量 e_i 的计算公式为:

$$e_i = r_b \sin(\sigma_0 + u_i + \varphi_i) - r_b u_i \cos(\sigma_0 + u_i + \varphi_i) + \frac{D_t}{2} \quad \text{式(1)}$$

式中, r_b 为齿轮基圆半径; σ_0 为基圆齿槽半角; u_i 为齿面上各刀位点对应的渐开线展开角度; φ_i 为与齿轮固连的回转工作台转动角度, 且 $\varphi_i = \sigma_0 + u_i$; D_t 为刀具直径。

优选地, 所述 S03 步骤具体为:

S03.1 将刀具沿齿轮齿廓方向的刀位点等分成 n 等份, 齿面上各刀位点按照抛物线方程分布, 设走刀步长沿齿廓方向的最大间距为 Δl_{max} , 最小间距为 $\Delta l_{min} = \Delta l_{max}/5$, 两个刀位点的相邻步长间距为 Δl_i , 刀具沿齿廓方向的走刀步长满足下式:

$$\Delta l_i = \frac{9}{5} \cdot \frac{\Delta l_{max}}{n^2} \left(i - \frac{n}{2} \right)^2 + \frac{\Delta l_{max}}{5}, \quad i \in [0, n] \quad \text{式(2)}$$

S03.2 根据给定的齿轮工件, 得到齿面渐开线沿径向高度为 H , 由公式 (3) 可以求解出走刀步长沿齿廓方向的最大间距 Δl_{max} :

$$H - \sum_{i=0}^n \left[\frac{9}{5} \cdot \frac{\Delta l_{max}}{n^2} \left(i - \frac{n}{2} \right)^2 + \frac{\Delta l_{max}}{5} \right] = 0 \quad \text{式(3)}$$

S03.3 将 S03.2 步骤中求解得到 Δl_{max} 代入公式 (2) 中, 遍历走刀数目 $i \in [0, n]$, 依次得到齿面上各刀位点对应的步长间距为 Δl_i ;

S03.4 已知 Δl_{max} 和当前走刀数目 i , 由公式 (4), 得到抛物线方程上每一个刀位点 (x_p, y_p) 对应的齿面上渐开线展开角度 u_i :

$$\begin{cases} r_f + \sum_{i=0}^n \left[\frac{9}{5} \cdot \frac{\Delta l_{\max}}{n^2} \left(i - \frac{n}{2} \right)^2 + \frac{\Delta l_{\max}}{5} \right] - \sqrt{x_p^2 + y_p^2} = 0 \\ x_p = r_b \cos(\sigma_0 + u_i) + r_b u_i \sin(\sigma_0 + u_i) \\ y_p = r_b \sin(\sigma_0 + u_i) - r_b u_i \cos(\sigma_0 + u_i) \end{cases} \quad \text{式(4)}$$

式中, r_f 为齿根圆半径; r_b 为基圆半径; σ_0 为基圆齿槽半角;

S03.5 假设渐开线上两个相邻的刀位点 A 和 B 的坐标分别为 (x_A, y_A) 和 (x_B, y_B) , A 和 B 相交于 C 点, 则 C 点为相邻刀位点之间的最大残高差, 假设 C 点坐标为 (x_C, y_C) , 假设渐开线上两个相邻的刀位点 A 和 B 的斜率分别为 k_A 和 k_B , 由 A、B、C 三点的几何关系可得到下式:

$$\begin{cases} x_c = \frac{y_B - y_A + k_A x_A - k_B x_B}{k_A - k_B} \\ y_c = k_A (x_c - x_A) + y_A \end{cases} \quad \text{式(5)}$$

由渐开渐的特性可知, 渐开线上两个相邻的刀位点 A 和 B 的斜率 k_A 和 k_B 分别为:

$$\begin{cases} k_A = \tan(\sigma_0 + u_A) \\ k_B = \tan(\sigma_0 + u_B) \end{cases} \quad \text{式(6)}$$

式中, u_A 和 u_B 分别为两个相邻的刀位点 A 和 B 的渐开线展开角度;

且两个相邻的刀位点 A 和 B 的渐开线方程分别为:

$$\begin{cases} x_A = r_b \cos(\sigma_0 + u_A) + r_b u_A \sin(\sigma_0 + u_A) \\ y_A = r_b \sin(\sigma_0 + u_A) - r_b u_A \cos(\sigma_0 + u_A) \end{cases} \quad \text{式(7)}$$

$$\begin{cases} x_B = r_b \cos(\sigma_0 + u_B) + r_b u_B \sin(\sigma_0 + u_B) \\ y_B = r_b \sin(\sigma_0 + u_B) - r_b u_B \cos(\sigma_0 + u_B) \end{cases} \quad \text{式(8)}$$

将公式 (6) (7) (8) 代入公式 (5) 中可以得到 C 点坐标 (x_C, y_C) ,

计算 C 点的残高差:

$$\Delta t_c = \sqrt{x_c^2 + y_c^2} - r_b \left[\left| \operatorname{atan} \left(\frac{y_c}{x_c} \right) \right| + \operatorname{atan} \left(\frac{\sqrt{x_c^2 + y_c^2 - r_b^2}}{r_b} \right) - \sigma_0 \right] \quad \text{式(9)}$$

根据公式 (9), 可以依次得到相邻刀位点之间的齿面残高差 Δt_i , 由已知的渐开线齿廓展开角度 Δu_i , 构建出渐开线齿廓展开角度 Δu_i 与齿面残高差 Δt_i 之间的曲线方程为:

$$\Delta t_i = f(\Delta u_i) \quad \text{式(10)}$$

S03.6 根据渐开线齿廓展开角度 Δu_i 与齿面残高差 Δt_i 之间的曲线方程, 确定加工刀

位点。

优选地，所述步骤 S03.6 中确定加工刀位点的具体方法为：使刀路轨迹从齿面节圆至上下两端齿廓分别呈现由密到疏的分布，即使靠近节圆附近的主要啮合区域的齿面残高差 Δt_i 最小，距离节圆较远的次要啮合区域的齿面残高差 Δt_i 逐渐增大，且靠近齿根和齿顶部分的非啮合区域齿面残高差 Δt_i 最大。

优选地，所述 S04 步骤具体为：

刀具从齿顶部分的一侧端面开始，首先沿着齿向方向走第一刀，完成对整个齿宽 b 的铣削；

沿着渐开线齿廓向齿槽方向进给 Δu_i 的长度；

再沿着齿向方向走第 2 刀；

依此类推，直至完成对齿个齿面的包络铣削。

本发明的有益效果：

1) 当采用通用刀具在多轴加工中心上加工渐开线圆柱齿轮时，本发明在保证渐开线圆柱齿轮齿面加工精度的前提下，综合考虑渐开线齿面的微分几何特性，计算出刀位点，并规划刀具路径，使刀具走刀轨迹按需分配，减小齿根和齿顶的冗余走刀，从而提高包络铣齿的加工效率。

2) 本发明在保证渐开线圆柱齿轮齿面加工效率的前提下，考虑渐开线齿面的精度特性，使刀路轨迹从齿面节圆至两端齿廓分别呈现由密到疏的分布，满足齿面中间精度高、两端精度低的加工需求，从而提高齿面的啮合性能。

附图说明

图 1 为根据本发明实施例考虑齿面精度特性的渐开线齿面走刀步长及走刀路径规划图。

图 2 为典型四轴加工中心的各运动轴示意图。

图 3 为在四轴加工中心上采用平头立铣刀包络铣削渐开线齿轮示意图。

图 4 为根据本发明实施例渐开线齿廓展开角度 Δu_i 与齿面残高差 Δt_i 之间的关系曲线。

图 5 为根据本发明实施例渐开线齿面的刀具包络刀位点，其中 (a) 图对应为考虑齿面精度特性的精加工方法，(b) 图对应为传统的基于等残高差法的精加工方法。

图 6 为根据本发明实施例渐开线齿面的径向长度与残高差之间关系，其中 (a) 图对应为考虑齿面精度特性的精加工方法，(b) 图对应为传统的基于等残高差法的精加工方法。

1. 齿轮工件；2. 立铣刀。

具体实施方式

下面结合附图以及具体实施例对本发明作进一步的说明，但本发明的保护范围并不限于此。

本发明以某传动机构采用的渐开线圆柱齿轮件为例详细说明本发明的一种考虑齿面精度特性的渐开线圆柱齿轮包络铣削加工方法，齿轮类型为直齿，齿数 $z=44$ ，模数 $m_n=20\text{mm}$ ，分度圆压力角 $\alpha_n=20^\circ$ ，变位系数 $x_n=0$ ，齿宽 $b=160\text{mm}$ ，精度要求为 ISO1328-2:1997 的 6 级，其中，节圆处精度要求达到 ISO 3 级。对于该齿轮，当加工精度为 ISO 6 级时，齿廓总偏差为 $27.42\mu\text{m}$ ；当加工精度为 ISO 3 级时，齿廓总偏差为 $9.69\mu\text{m}$ 。已有的加工设备为一台四轴车铣复合加工中心，如图 2 所示，三个直线轴分别为 X 轴、Y 轴、Z 轴，一个回转轴为 C 轴，工件安装在 C 轴工作台上，刀具安装在主轴 SP 上，且 Z 轴和 C 轴能实现两轴联动。

根据本发明实施例的一种考虑齿面精度特性的渐开线圆柱齿轮包络铣削加工方法，具体包括以下步骤：

S01：选择刀具

对渐开线圆柱齿轮的铣削加工宜选用平头立铣刀 2，其刀具参数如下，

平头立铣刀 2 的刀具直径 D_t ：根据齿轮工件 1 的参数，计算出最小的齿槽宽度为 21.9mm ，为了保证刀具切削时具有足够的线速度，刀具直径 D_t 选取 $\phi 18\text{mm}$ ；

平头立铣刀 2 的刀具切削刃长度 L_t ：根据齿轮工件 1 的参数，刀刃长度 L_t 选取 38mm ；

S02：确定刀具偏心量

当加工设备为一台四轴车铣复合加工中心，需要采用偏心铣削方式进行加工，如图 2，此时，计算立铣刀 2 的刀具的动态偏心量 e_i ：

$$e_i = r_b \sin(\sigma_0 + u_i + \varphi_i) - r_b u_i \cos(\sigma_0 + u_i + \varphi_i) + \frac{D_t}{2} \quad \text{式(1)}$$

式中， r_b 为齿轮基圆半径； σ_0 为基圆齿槽半角； u_i 为渐开线展开角度； φ_i 为与齿轮固连的回转工作台的转动角度，即 C 轴转动角度，且 $\varphi_i = \sigma_0 + u_i$ ； D_t 为立铣刀 2 的直径。

S03：计算刀位点

根据齿轮的齿面主要啮合区域的精度要求，通过构建齿廓方向走刀步长公式，求解走刀步长沿齿廓方向的最大间距 $\Delta l_{\max}$ ，求解两个刀位点的相邻步长间距 Δl_i ，求解齿面上各刀位点对应的渐开线展开角度 u_i ，构建渐开线齿廓展开角度与齿面残高差之间的曲线

方程 $\Delta t_i = f(\Delta u_i)$ ，最终确定加工刀位点。所述 S03 步骤具体为：

S03.1 构建齿廓方向走刀步长公式

将立铣刀 2 沿齿轮齿廓方向的刀位点等分成 $n=20$ 等份，齿面上各刀位点按照抛物线方程分布，假设走刀步长沿齿廓方向的最大间距为 $\Delta l_{\max}$ ，最小间距为 $\Delta l_{\min} = \Delta l_{\max}/5$ ，两个刀位点的相邻步长间距为 Δl_i ，如图 1 所示，此时，刀具沿齿廓方向的走刀步长满足公式 (2)：

$$\Delta l_i = \frac{9}{5} \cdot \frac{\Delta l_{\max}}{n^2} \left(i - \frac{n}{2} \right)^2 + \frac{\Delta l_{\max}}{5}, \quad i \in [0, n] \quad \text{式(2)}$$

S03.2 求解走刀步长沿齿廓方向的最大间距为 $\Delta l_{\max}$

对于给定的齿轮工件 1，可知齿面渐开线沿径向高度为 $H=45\text{mm}$ ，由公式 (3) 可以求解出走刀步长沿齿廓方向的最大间距 $\Delta l_{\max}=6.415\text{mm}$ 。

$$H - \sum_{i=0}^n \left[\frac{9}{5} \cdot \frac{\Delta l_{\max}}{n^2} \left(i - \frac{n}{2} \right)^2 + \frac{\Delta l_{\max}}{5} \right] = 0 \quad \text{式(3)}$$

S03.3 求解齿轮的齿面上各刀位点对应的步长间距为 Δl_i

将 S03.2 步骤中求解得到 $\Delta l_{\max}$ 代入公式 (2) 中，遍历走刀数目 $i \in [0, 20]$ ，依次得到齿面上各点的步长间距为 Δl_i 。

S03.4 求解齿面上各刀位点对应的渐开线展开角度 u_i

已知 $\Delta l_{\max}=6.415\text{mm}$ 和当前总的走刀数目 $n=20$ ，由公式 (4)，得到抛物线方程上每一个刀位点 (x_p, y_p) 对应的齿面上渐开线展开角度 u_i ：

$$\begin{cases} r_f + \sum_{i=0}^n \left[\frac{9}{5} \cdot \frac{\Delta l_{\max}}{n^2} \left(i - \frac{n}{2} \right)^2 + \frac{\Delta l_{\max}}{5} \right] - \sqrt{x_p^2 + y_p^2} = 0 \\ x_p = r_b \cos(\sigma_0 + u_i) + r_b u_i \sin(\sigma_0 + u_i) \\ y_p = r_b \sin(\sigma_0 + u_i) - r_b u_i \cos(\sigma_0 + u_i) \end{cases} \quad \text{式(4)}$$

式中，齿根圆半径 $r_f=415\text{mm}$ ；基圆半径为 $r_b=413.645\text{mm}$ ；基圆齿槽半角为 $\sigma_0=1.192^\circ$ 。

S03.5 构建渐开线齿廓展开角度 Δu_i 与齿面残高差 Δt_i 之间的曲线方程

假设渐开线上两个相邻的刀位点 A 和 B 的坐标分别为 (x_A, y_A) 和 (x_B, y_B) ，A 和 B 相交于 C 点，则 C 点为相邻刀位点之间的最大残高差，假设 C 点坐标为 (x_C, y_C) ，假设渐开线上两个相邻的刀位点 A 和 B 的斜率分别为 k_A 和 k_B ，由 A、B、C 三点的几何关系可得到方程组 (5)：

$$\begin{cases} x_c = \frac{y_B - y_A + k_A x_A - k_B x_B}{k_A - k_B} \\ y_c = k_A(x_c - x_A) + y_A \end{cases} \quad \text{式(5)}$$

由渐开线的特性可知，渐开线上两个相邻的刀位点 A 和 B 的斜率 k_A 和 k_B 分别为：

$$\begin{cases} k_A = \tan(\sigma_0 + u_A) \\ k_B = \tan(\sigma_0 + u_B) \end{cases} \quad \text{式(6)}$$

式中， u_A 和 u_B 分别为两个相邻的刀位点 A 和 B 的渐开线展开角度，可以由公式（4）得到。

且两个相邻的刀位点 A 和 B 的渐开线方程分别为：

$$\begin{cases} x_A = r_b \cos(\sigma_0 + u_A) + r_b u_A \sin(\sigma_0 + u_A) \\ y_A = r_b \sin(\sigma_0 + u_A) - r_b u_A \cos(\sigma_0 + u_A) \end{cases} \quad \text{式(7)}$$

$$\begin{cases} x_B = r_b \cos(\sigma_0 + u_B) + r_b u_B \sin(\sigma_0 + u_B) \\ y_B = r_b \sin(\sigma_0 + u_B) - r_b u_B \cos(\sigma_0 + u_B) \end{cases} \quad \text{式(8)}$$

将公式（6）（7）（8）代入公式（5）中可以得到 C 点坐标 (x_C, y_C) 。

计算 C 点的残高差：

$$\Delta t_c = \sqrt{x_c^2 + y_c^2 - r_b^2} - r_b \left[\left| \operatorname{atan} \left(\frac{y_c}{x_c} \right) \right| + \operatorname{atan} \left(\frac{\sqrt{x_c^2 + y_c^2 - r_b^2}}{r_b} \right) - \sigma_0 \right] \quad \text{式(9)}$$

根据公式（9），可以依次得到相邻刀位点之间的齿面残高差 Δt_i ，由已知的渐开线齿廓展开角度 Δu_i ，如图 4 所示，构建出渐开线齿廓展开角度 Δu_i 与齿面残高差 Δt_i 之间的曲线方程为：

$$\Delta t_i = f(\Delta u_i) \quad \text{式(10)}$$

S03.6 根据公式（10），使刀路轨迹从齿面节圆至上下两端齿廓分别呈现由密到疏的分布，即实现了靠近节圆附近的主要啮合区域的齿面残高差 Δt_i 最小，距离节圆较远的次要啮合区域的齿面残高差 Δt_i 逐渐增大，且靠近齿根和齿顶部分的非啮合区域齿面残高差 Δt_i 最大。

S04：规划走刀路径

加工过程中，刀具从齿顶部分的一侧端面开始，首先沿着齿向方向走第 1 刀，完成对整个齿宽 b 的铣削；

沿着渐开线齿廓向齿槽方向进给 Δu_i 的长度；

再沿着齿向方向走第 2 刀；

依次类推，直至完成对齿个齿面的包络铣削。

在整个铣削过程中，将加工步距与齿面精度之间按照特定的算法执行控制，即可实现对渐开线圆柱齿轮的高精度、高效率的包络铣削加工。

如图 5 所示，是渐开线齿面的刀具包络刀位点同为 20 个时，通过 CAM 软件模拟出的渐开线齿面包络刀位点。图 5(a)是采用本发明的考虑齿面精度特性的精加工方法，齿面刀位点主要集中于精度要求较高的节圆附近。图 5(b)是采用传统的基于等残高法的精加工方法，齿面刀位点沿齿根向齿顶呈由密到疏的趋势。

如图 6 所示，是渐开线齿面的径向长度与残高差之间关系。图 6(a)是采用本发明的考虑齿面精度特性的精加工方法，得到的齿面残高差沿节圆分别向齿顶和齿根两端呈增大趋势，节圆附近 ($435\text{mm} < r_v < 445\text{mm}$) 的残高差 $\Delta t < 2.5\mu\text{m}$ 。图 6(b)是采用传统的基于等残高法的精加工方法，得到的齿面残高差沿齿面分布均匀一致，即节圆处的残高差与齿顶、齿根部分的残高差 $\Delta t = 6\mu\text{m}$ ，而对于渐开线齿轮来说，齿面上靠近节圆附近才是主要啮合区域，而接近齿根和齿顶部分几乎不参与啮合，基于等残高差法的渐开线齿面精加工方法造成了在齿根和齿顶部分的大量冗余走刀，不仅降低了加工效率，而且没能考虑节圆处啮合区域的精度要求。因此，本发明提出的一种考虑齿面精度特性的渐开线圆柱齿轮包络铣削加工方法，不仅能提高齿轮的包络铣削加工效率，而且使齿面具有更好的啮合性能。

所述实施例为本发明的优选的实施方式，但本发明并不限于上述实施方式，在不背离本发明的实质内容的前提下，本领域技术人员能够做出的任何显而易见的改进、替换或变型均属于本发明的保护范围。

权利要求书

1. 一种考虑齿面精度特性的渐开线圆柱齿轮包络铣削加工方法，其特征在于，包括：

S01：根据待加工齿轮工件参数，选择刀具，确定刀具直径和刀具切削刃长度；

S02：采用偏心铣削方式进行加工，确定刀具轴线相对于齿轮轴线的动态偏心量 e_i ；

S03：根据齿轮的齿面主要啮合区域的精度要求，通过构建齿廓方向走刀步长公式，求解走刀步长沿齿廓方向的最大间距 Δl_{max} 、两个刀位点的相邻步长间距 Δl_i 以及齿面上各刀位点对应的渐开线展开角度 u_i ，构建渐开线齿廓展开角度与齿面残高差之间的曲线方程 $\Delta l_i = f(\Delta u_i)$ ，最终确定加工刀位点；

S04：根据刀位点规划走刀路径。

2. 根据权利要求 1 所述的考虑齿面精度特性的渐开线圆柱齿轮包络铣削加工方法，其特征在于，所述步骤 S01 中，对于中小模数渐开线圆柱齿轮选用立铣刀或棒铣刀，对于大模数渐开线圆柱齿轮选用圆锥盘形铣刀或棒铣刀。

3. 根据权利要求 2 所述的考虑齿面精度特性的渐开线圆柱齿轮包络铣削加工方法，其特征在于，所述步骤 S01 中，刀具直径 $D_t \geq \phi 10\text{mm}$ ，刀刃长度 $L_t \geq 20\text{mm}$ 。

4. 根据权利要求 1 所述的考虑齿面精度特性的渐开线圆柱齿轮包络铣削加工方法，其特征在于，所述偏心量 e_i 的计算公式为：

$$e_i = r_b \sin(\sigma_0 + u_i + \varphi_i) - r_b u_i \cos(\sigma_0 + u_i + \varphi_i) + \frac{D_t}{2} \quad \text{式(1)}$$

式中， r_b 为齿轮基圆半径； σ_0 为基圆齿槽半角； u_i 为齿面上各刀位点对应的渐开线展开角度； φ_i 为与齿轮固连的回转工作台转动角度，且 $\varphi_i = \sigma_0 + u_i$ ； D_t 为刀具直径。

5. 根据权利要求 1 所述的考虑齿面精度特性的渐开线圆柱齿轮包络铣削加工方法，其特征在于，所述 S03 步骤具体为：

S03.1 将刀具沿齿轮齿廓方向的刀位点等分成 n 等份，齿面上各刀位点按照抛物线方程分布，设走刀步长沿齿廓方向的最大间距为 Δl_{max} ，最小间距为 $\Delta l_{min} = \Delta l_{max}/5$ ，两个刀位点的相邻步长间距为 Δl_i ，刀具沿齿廓方向的走刀步长满足下式：

$$\Delta l_i = \frac{9}{5} \cdot \frac{\Delta l_{max}}{n^2} \left(i - \frac{n}{2} \right)^2 + \frac{\Delta l_{max}}{5}, \quad i \in [0, n] \quad \text{式(2)}$$

S03.2 根据给定的齿轮工件，得到齿面渐开线沿径向高度为 H ，由公式（3）可以求解出走刀步长沿齿廓方向的最大间距 Δl_{max} ：

$$H - \sum_{i=0}^n \left[\frac{9}{5} \cdot \frac{\Delta l_{\max}}{n^2} \left(i - \frac{n}{2} \right)^2 + \frac{\Delta l_{\max}}{5} \right] = 0 \quad \text{式(3)}$$

S03.3 将 S03.2 步骤中求解得到的 $\Delta l_{\max}$ 代入公式 (2) 中, 遍历走刀数目 $i \in [0, n]$, 依次得到齿面上各刀位点对应的步长间距为 Δl_i ;

S03.4 已知 $\Delta l_{\max}$ 和当前走刀数目 i , 由公式 (4), 得到抛物线方程上每一个刀位点 (x_p, y_p) 对应的齿面上渐开线展开角度 u_i :

$$\begin{cases} r_f + \sum_{i=0}^n \left[\frac{9}{5} \cdot \frac{\Delta l_{\max}}{n^2} \left(i - \frac{n}{2} \right)^2 + \frac{\Delta l_{\max}}{5} \right] - \sqrt{x_p^2 + y_p^2} = 0 \\ x_p = r_b \cos(\sigma_0 + u_i) + r_b u_i \sin(\sigma_0 + u_i) \\ y_p = r_b \sin(\sigma_0 + u_i) - r_b u_i \cos(\sigma_0 + u_i) \end{cases} \quad \text{式(4)}$$

式中, r_f 为齿根圆半径; r_b 为基圆半径; σ_0 为基圆齿槽半角;

S03.5 假设渐开线上两个相邻的刀位点 A 和 B 的坐标分别为 (x_A, y_A) 和 (x_B, y_B) , A 和 B 相交于 C 点, 则 C 点为相邻刀位点之间的最大残高差, 假设 C 点坐标为 (x_C, y_C) , 假设渐开线上两个相邻的刀位点 A 和 B 的斜率分别为 k_A 和 k_B , 由 A、B、C 三点的几何关系可得到下式:

$$\begin{cases} x_c = \frac{y_B - y_A + k_A x_A - k_B x_B}{k_A - k_B} \\ y_c = k_A (x_c - x_A) + y_A \end{cases} \quad \text{式(5)}$$

由渐开渐的特性可知, 渐开线上两个相邻的刀位点 A 和 B 的斜率 k_A 和 k_B 分别为:

$$\begin{cases} k_A = \tan(\sigma_0 + u_A) \\ k_B = \tan(\sigma_0 + u_B) \end{cases} \quad \text{式(6)}$$

式中, u_A 和 u_B 分别为两个相邻的刀位点 A 和 B 的渐开线展开角度;

且两个相邻的刀位点 A 和 B 的渐开线方程分别为:

$$\begin{cases} x_A = r_b \cos(\sigma_0 + u_A) + r_b u_A \sin(\sigma_0 + u_A) \\ y_A = r_b \sin(\sigma_0 + u_A) - r_b u_A \cos(\sigma_0 + u_A) \end{cases} \quad \text{式(7)}$$

$$\begin{cases} x_B = r_b \cos(\sigma_0 + u_B) + r_b u_B \sin(\sigma_0 + u_B) \\ y_B = r_b \sin(\sigma_0 + u_B) - r_b u_B \cos(\sigma_0 + u_B) \end{cases} \quad \text{式(8)}$$

将公式 (6) (7) (8) 代入公式 (5) 中可以得到 C 点坐标 (x_C, y_C) ,

计算 C 点的残高差:

$$\Delta t_c = \sqrt{x_c^2 + y_c^2 - r_b^2} - r_b \left[\left| \operatorname{atan} \left(\frac{y_c}{x_c} \right) \right| + \operatorname{atan} \left(\frac{\sqrt{x_c^2 + y_c^2 - r_b^2}}{r_b} \right) - \sigma_0 \right] \quad \text{式(9)}$$

根据公式 (9)，可以依次得到相邻刀位点之间的齿面残高差 Δt_i ，由已知的渐开线齿廓展开角度 Δu_i ，构建出渐开线齿廓展开角度 Δu_i 与齿面残高差 Δt_i 之间的曲线方程为：

$$\Delta t_i = f(\Delta u_i) \quad \text{式(10)}$$

S03.6 根据渐开线齿廓展开角度 Δu_i 与齿面残高差 Δt_i 之间的曲线方程，确定加工刀位点。

6. 根据权利要求 5 所述的考虑齿面精度特性的渐开线圆柱齿轮包络铣削加工方法，其特征在于，所述步骤 S03.6 中确定加工刀位点的具体方法为：使刀路轨迹从齿面节圆至上下两端齿廓分别呈现由密到疏的分布，即使靠近节圆附近的主要啮合区域的齿面残高差 Δt_i 最小，距离节圆较远的次要啮合区域的齿面残高差 Δt_i 逐渐增大，且靠近齿根和齿顶部分的非啮合区域齿面残高差 Δt_i 最大。

7. 根据权利要求 1 所述的考虑齿面精度特性的渐开线圆柱齿轮包络铣削加工方法，其特征在于，所述 S04 步骤具体为：

刀具从齿顶部分的一侧端面开始，首先沿着齿向方向走第一刀，完成对整个齿宽 b 的铣削；

沿着渐开线齿廓向齿槽方向进给 Δu_i 的长度；

再沿着齿向方向走第 2 刀；

依此类推，直至完成对齿个齿面的包络铣削。

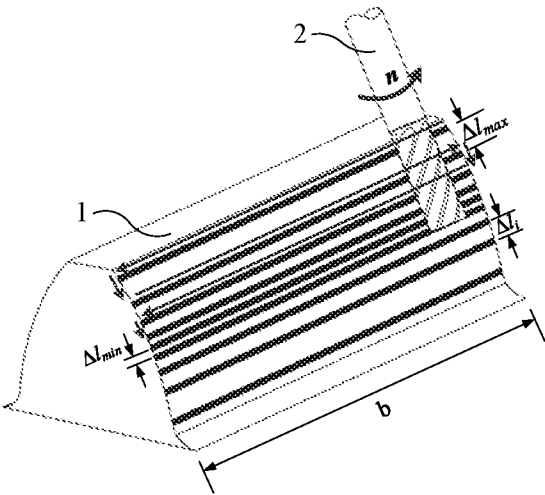


图 1

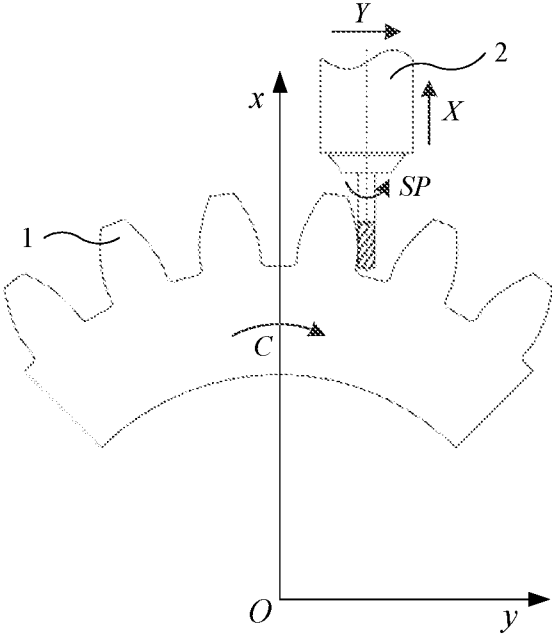


图 2

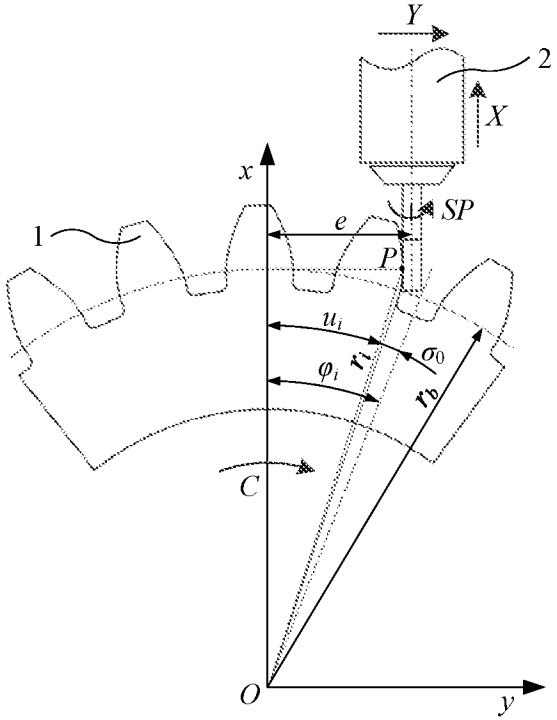


图 3

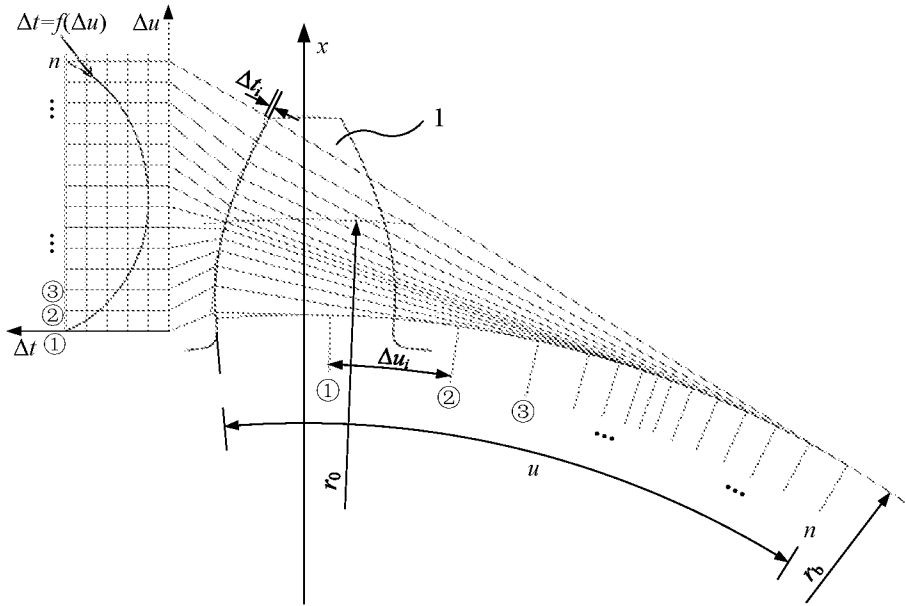
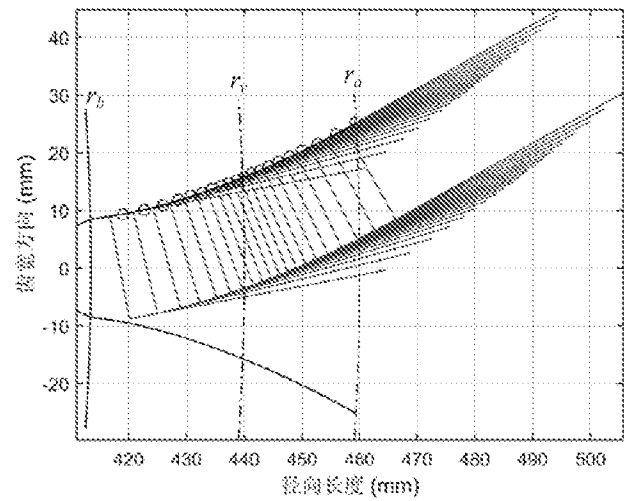
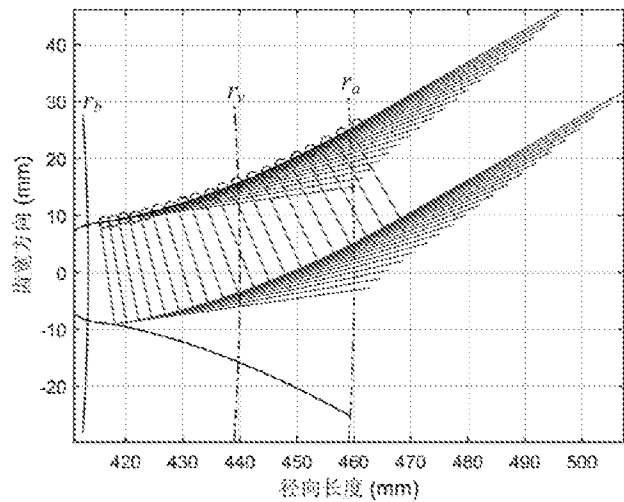


图 4

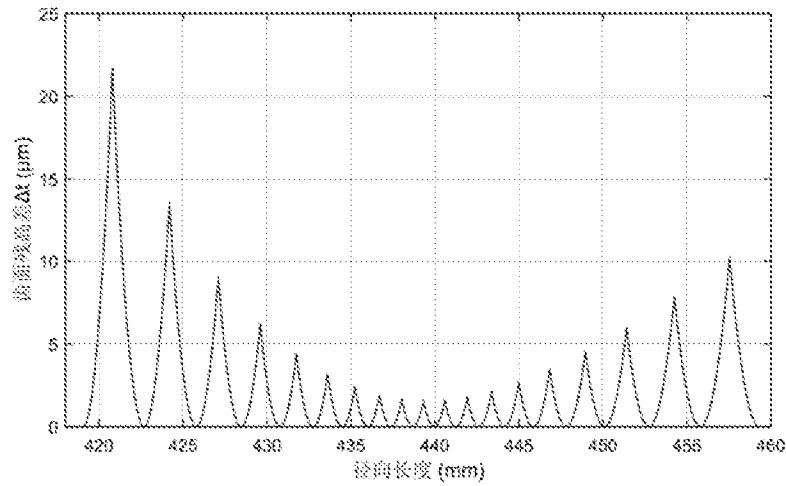


(a)

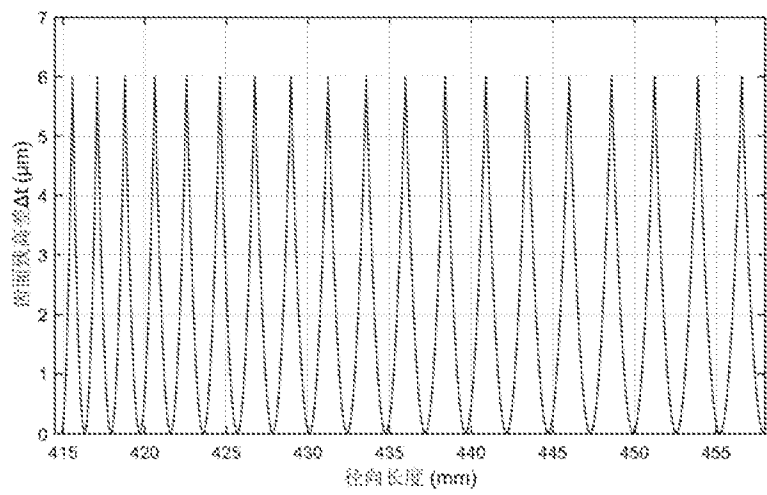


(b)

图 5



(a)



(b)

图 6

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/CN2020/073343

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

B23F 5/20(2006.01)i; B23F 21/12(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)

B23F

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)

CNKI, CNABS, VEN, DWPI: 渐开线, 铣, 偏心, involute, milling, eccentric, out-of-center, out-of-round, off-center

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
PX	CN 109663991 A (JIANGSU UNIVERSITY) 23 April 2019 (2019-04-23) claims 1-7	1-7
A	EP 3187294 A1 (BOMAR S A W UPADLOSCI UKLADOWEJ) 05 July 2017 (2017-07-05) entire document	1-7
A	CN 109128391 A (SHANGHAI ELECTRIC GROUP CO., LTD.) 04 January 2019 (2019-01-04) entire document	1-7
A	CN 106774167 A (SHAANXI UNIVERSITY OF TECHNOLOGY) 31 May 2017 (2017-05-31) description, paragraphs 0006-0073, and figures 1-7	1-7
A	CN 101069935 A (WUHAN SHIP MACHINERY CO., LTD.) 14 November 2007 (2007-11-14) entire document	1-7



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

03 April 2020

Date of mailing of the international search report

24 April 2020

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
Information on patent family members

International application No.

PCT/CN2020/073343

Patent document cited in search report			Publication date (day/month/year)	Patent family member(s)			Publication date (day/month/year)
CN	109663991	A	23 April 2019	None			
EP	3187294	A1	05 July 2017	None			
CN	109128391	A	04 January 2019	None			
CN	106774167	A	31 May 2017	CN	106774167	B	07 June 2019
CN	101069935	A	14 November 2007	CN	100488687	C	20 May 2009

国际检索报告

国际申请号

PCT/CN2020/073343

A. 主题的分类

B23F 5/20 (2006.01) i; B23F 21/12 (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)

B23F

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))

CNKI, CNABS, VEN, DWPI: 渐开线, 铣, 偏心, involute, milling, eccentric, out-of-center, out-of-round, off-center

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 109663991 A (江苏大学) 2019年 4月 23日 (2019 - 04 - 23) 权利要求1-7	1-7
A	EP 3187294 A1 (BOMAR S A W UPADLOSCI UKLADOWEJ) 2017年 7月 5日 (2017 - 07 - 05) 全文	1-7
A	CN 109128391 A (上海电气集团股份有限公司) 2019年 1月 4日 (2019 - 01 - 04) 全文	1-7
A	CN 106774167 A (陕西理工学院) 2017年 5月 31日 (2017 - 05 - 31) 说明书第0006-0073段、附图1-7	1-7
A	CN 101069935 A (武汉船用机械有限责任公司) 2007年 11月 14日 (2007 - 11 - 14) 全文	1-7

☐ 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

2020年 4月 3日

国际检索报告邮寄日期

2020年 4月 24日

ISA/CN的名称和邮寄地址

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

受权官员

孙迎椿

电话号码 86-(010)-62085459

国际检索报告
关于同族专利的信息

国际申请号

PCT/CN2020/073343

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	109663991	A	2019年 4月 23日	无	
EP	3187294	A1	2017年 7月 5日	无	
CN	109128391	A	2019年 1月 4日	无	
CN	106774167	A	2017年 5月 31日	CN 106774167	B 2019年 6月 7日
CN	101069935	A	2007年 11月 14日	CN 100488687	C 2009年 5月 20日