DOI: 10.3901/JME.2019.01.216

一种刮削加工切削齿刃形计算与加工运动仿真方法

贾 康¹ 郑 帅² 郭俊康¹ 洪 军¹

(1. 西安交通大学现代设计及转子轴承系统教育部重点实验室 西安 710049;

2. 西安交通大学软件学院 西安 710049)

摘要: 针对非特定内外廓形的刮削加工, 基于刮削加工原理与展成运动, 提出一种基于离散廓形包络的切削齿刃形曲线通用计算方法, 适用于任意结构前刀面, 并给出切触点的求解方法与相应的空间刮削切触运动的计算仿真方法。首先剖析了刮削加工原理, 从工件、刀具和运动配置参数角度构建了刮削加工的运动学模型; 然后, 基于曲面共轭原理分析了刮削加工的正逆问题, 提出基于相对刀具运动的工件曲面与前刀面相交内包络的切削刃曲线求解方法, 给出了详细的计算流程与方法以及切削刃可行性的判定规则; 随后, 进一步提出了基于切削刃的刮削过程切触点计算方法, 并给出了时序对应的空间切触运动仿真分析方法; 最后, 分别以内外廓形的刮削加工为例, 对所提出的切削刃计算方法和加工运动仿真方法的有效性进行了验证。

关键词: 刮削; 运动学模型; 切削刃曲线; 切触线; 运动仿真

中图分类号: TH132

A Method of Cutter Profile Identification and Machining Motion Simulation for Skiving

JIA Kang¹ ZHENG Shuai² GUO Junkang¹ HONG Jun¹

(1. Key Laboratory of Education Ministry for Modern Design & Rotor-Bearing System,

Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049;

2. School of Software Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049)

Abstract: Focusing on the skiving of general internal and external profiles, a universal cutting edge calculation method, which involving the enveloping for discrete profiles, is proposed based on the working principle and the generating motion of skiving, and it suits for universal rake flank type. Meanwhile, the calculation method for contact points and corresponding spatial contact motion model are developed. Firstly, the skiving principle is analyzed, and the kinematic model is built in the terms of cutter, workpiece, and configuration parameters. Then, the forward and inverse questions of skiving are analyzed based on the conjugate theory, and the cutting edge curve identification that according to enveloping the intersection curves between rake flank and discrete workpiece surfaces is developed. Moreover, the detail schematic and calculation methods are described, and the judgment for the feasibility of the cutting edge is also given. Additionally, the ascertaining of cutting contact points by cutting edge and the approach on corresponded spatial cutting contact motions simulation are depicted. At last, examples for both external and internal skiving are given to verify the effectiveness of cutting edge identification and skiving motion simulation method.

Key words: skiving; kinematic model; cutting edge; cutting contact curve; kinematic simulation

0 前言

展成法加工是金属切削加工的一种重要方法, 尤其是齿轮的加工, 如插齿、滚齿、剃齿、车齿(刚齿)以及展成磨削等。展成法令刀具与工件在空间形

成展成运动, 从而完成刀具对工件目标廓形的切削, 其实质是刀具切削刃空间扫描曲面与工件目标廓形曲面之间的共轭关系。根据工件结构, 可以分为外廓形的和内廓形的加工。以齿轮加工为例, 内廓形的加工可以采用插齿和车齿的方法实现加工, 外廓形的加工则可以采用滚齿和车齿的方式实现。从加工实现角度考虑, 插齿法切削齿需要往复的退刀, 加工效率较低; 滚齿加工效率很高, 但是无法实现

* 国家科技重大专项(2016ZX04004-002)和中国博士后基金(2017M623158)资助项目。20180209 收到初稿, 20180605 收到修改稿

内廓形的加工;剃齿仅用于齿形的精修,缺乏齿形粗切削能力;相比之下,车齿具有内外廓形的加工能力,且加工效率较高。

车齿这种加工方法有很长的发展历史^[1],然而直到近些年才得到工程应用。其工作原理与滚齿相似,都属于双自由度曲面展成法,不同在于切削刃与切削的作用位置。由其基本加工原理可知,这种加工方式并不局限于齿轮加工,而是一种具有通用性的刮削加工方法,对于具有内外廓形呈中心对称且等周期性分布的零件加工具有普适性,如压缩机转子、链轮、齿轮等。为了推进该种加工方法的工程应用,切削齿的合理设计与加工过程分析成为关键。文献[2]对车齿的定义、车齿切削过程和切削图形等基本理论进行了全面的阐述,并介绍了有结构后角(类似于普通插齿刀)和无结构后角(类似于圆柱齿轮)的齿轮型车齿刀设计方法。WU等^[3]针对双曲面螺旋齿轮的插齿加工构建了加工数学模型并给出了刀具的设计方法,呈现出了车齿的雏形。KOJIMA等^[4]和 SPATH等^[5]对强力刮齿的概念、刮齿刀具、刮齿加工效率和精度进行了概述。STADFFELD^[6]通过齿轮与齿条之间的展成关系简述了车齿加工原理,并给出了切削齿的结构参数,指出了车齿的杆切削优势。李佳等^[7]介绍了刮齿加工的实现原理、切削屑形成与排除等,并分析了刮齿加工中的各种运动关系。在此基础上,剖析切削齿结构,给出了直齿刮齿刀的结构设计与计算方法^[8],并进一步基于曲面共轭原理,针对前刀面为自由曲面的情形^[9],提出了以共轭面与前刀面相交的切削刃计算方法。毛世民^[10]指出车齿齿轮齿面是车齿刀刀刃曲线与被车齿轮做双自由度的相对运动形成的,是曲线与曲面共轭问题,并给出了基于曲面双自由度共轭原理^[11]的车齿加工齿轮廓形计算方法。郭二廓等^[12-13]基于空间交错轴啮合理论,建立了内齿圆柱齿轮强力刮削加工的数学模型与啮合方程,给出了具有设计前角要求的锥齿刀刃形计算方法。TSAI^[14]首先基于齿轮齿条啮合原理给出了强力车齿加工的虚拟共轭曲面和前刀面的数学模型,由此确定出切削刃曲线。然后,构建了统一的坐标转换模型,完成了切削过程中切削刃的动态前角和后角的计算,并给出了非负后角的切削刃修正设计方法。这些研究都集中于渐开线廓形的内外圆柱齿轮刮削加工,从解析角度比较全面的包括了车齿加工原理、加工过程的啮合方程与切削刃曲线计算等。然而,刮削加工并不限于渐开线廓形齿轮的加工,为了更好的挖掘该种加工方法的潜在应用能力,必须从更加通用性的角度对于刮削加工进行研究。

本文从展成加工原理出发,首先对刮削加工原理进行了简单分析,构建出刮削加工运动学模型,然后考虑到刮削加工任务的通用性,从离散廓形包络角度出发,基于曲面共轭原理提出了一种刮削加工切削齿刃形曲线的计算方法,并给出了对应的刮削加工空间切触运动学分析。最后通过对内外廓形的刮削加工切削齿刃形曲线的计算和刮削运动的分析,表明了本文方法的有效性。

1 刮削加工原理与运动学模型

1.1 刮削加工原理

刮削加工与滚齿加工原理类似,同时又兼具插齿的工作状态,其实质是一种双自由度曲面的展成加工方法。加工过程如图1(a)所示,刀具与工件轴线之间存在安装夹角 Σ ,刮削刀具与工件分别绕各自的回转轴按照固定的速率 ω_c 和 ω_w 进行旋转形成主切削运动(类似于滚齿)。同时,遵照工件的内外廓形加工要求、刀具与工件的螺旋角配置以及安装夹角 Σ 确定刀具与工件的旋转方向,要求保证刀具轴端面的切削刃(类似于插齿)在与工件加工廓形逐渐形成“啮合”时,沿着工件轴向方向存在向前推进趋势,以实现一层工件材料的刮削。实质上,这个“啮合”过程中切削齿与工件表面的切触曲线位于工件的目标加工廓形曲面上,即为刀具与工件展成运动的作用效果,对应一个自由度的运动。与此同时,刀具进给运动 F 和附加旋转运动 ω_{cf} 的作用下,整体沿着工件目标廓形的轨迹(直线或螺旋线)在轴向推进,逐层的完成工件目标廓形对应体积材料的去除,即将切触曲线沿工件目标廓形轨迹进行扫掠,完成目标廓形对应曲面的加工,对应另一个自由度的运动。通过上述分析,可以清晰地看到刮削加工中,工件与刀具之间的主运动和刀具沿工件目标廓形的进给运动组成了双自由度的展成运动,位于刀具外端面的切削刃逐层的完成工件目标廓形曲面的加工。

1.2 刮削加工运动学模型

为了构建通用的刮削加工运动学模型,首先需要分别对刀具结构、工件结构以及刮削加工运动配置进行参数化建模,然后对刮削加工的内在运动关系进行分析与构建。

1.2.1 刀具结构参数

如图1a所示,刮削刀具的切削齿绕刀具回转轴线均匀分布,切削刃位于刀具的外端面。刀具的主要结构参数包括:切削齿齿数 Z_c ;与工件形成展成运动“啮合点”对应的半径 R_c ;半径 R_c 对应的切削齿螺旋角 β_c 。

图 1 刮削加工运动学模型

此外,切削齿前刀面具有多种结构形式,如平面、锥面、球面等,为实现前刀面的统一建模,不再引入前角、刃倾角等参数,而直接以前刀面上一点 P 和前刀面方程 S_R 进行定义,其中定义 P 点为刀具回转轴与前刀面的交点。

1.2.2 工件结构参数

工件的目标加工廓形绕工件回转轴线均匀分布,主要结构参数包括:目标加工廓形数量 Z_w ;与刀具展成运动对应的“啮合点”半径 R_w ;目标加工廓形特征在 R_w 上的螺旋角 β_w ;工件的轴向厚度 B_w 等。

1.2.3 刮削加工运动学模型

刮削加工的运动学模型如图 1b 所示,为实现该模型的精确分析与内在运动关系构建,定义如下 4 个坐标系,分别为工件静坐标系 $O_w X_w Y_w Z_w$,工件动坐标系 $O'_w X'_w Y'_w Z'_w$,刀具静坐标系 $O_c X_c Y_c Z_c$,和刀具动坐标系 $O'_c X'_c Y'_c Z'_c$ 。其中,工件静坐标系 $O_w X_w Y_w Z_w$ 的原点 O_w 位于工件回转轴线上, Z_w 轴与工件回转轴线重合, X_w 和 Y_w 由右手准则确定;工件动坐标系 $O'_w X'_w Y'_w Z'_w$ 与工件固联,在初始位置与工件静坐标系重合,相对工件静坐标系的 Z_w 轴转过 φ_w ;刀具静坐标系 $O_c X_c Y_c Z_c$ 的原点 O_c 位于刀具回转轴上, Z_c 轴与刀具回转轴线重合, X_c 轴与工件静坐标系 X_w 轴重合, Y_c 由右手准则确定;刀具动坐标系 $O'_c X'_c Y'_c Z'_c$ 在初始位置与刀具静坐标系重合并于刀具固联,相对刀具静坐标系的 Z_c 轴转过 φ_w 。

要正确地实现刮削加工,首先必须准确的配置刀具与工件之间的空间位置,通过如下三个结构参数保证。

(1) 刀具安装角 Σ 。定义为 Z_w 轴与 Z_c 轴之间的夹角,规定绕 X_w 轴顺时针方向为正,反之为负。由于非零安装角 Σ 使能刀具与工件“啮合”运动的切削作用,因此为了确保刀具切削齿与工件目标加工廓形之间无干涉、顺畅的加工完成,安装角 Σ 确定如下

$$\Sigma = j_w \beta_w - j_c \beta_c \quad (1)$$

式中, j_w 表示工件目标加工廓形的旋向,右旋 $j_w=1$,左旋 $j_w=-1$; j_c 表示刀具切削齿的旋向,右旋 $j_c=1$,左旋 $j_c=-1$ 。

(2) 刀具回转轴与工件回转轴之间的安装中心距 d 。定义为 O_w 与 O_c 之间的距离,计算如下式所示

$$d = R_w + k_{io} R_c \quad (2)$$

式中, k_{io} 表示工件廓形加工类型,内廓型 $k_{io}=-1$,外廓型 $k_{io}=1$ 。

(3) 刀具的轴向安装偏心距 E_c 。定义为刀具前刀面 P 点与刀具坐标系原点 O_c 之间的距离,沿 X_c 轴正方向为正。

其次,在正确的空间位置配置基础上,必须正确的设置刀具与工件之间主切削运动和进给运动的参数才能够实现目标加工廓形的精确刮削加工。

(1) 刮削加工的主切削运动为刀具与工件按照传动比 i ,分别以角速度 ω_c 和 ω_w 形成的展成运动,即有 $\omega_c = i \omega_w$ 。传动比 i 确定如下

$$i = -k_{io} Z_w / Z_c \quad (3)$$

式中, k_{io} 表示工件廓形加工类型,内廓型 $k_{io}=-1$,外廓型 $k_{io}=1$ 。需要注意,刀具的旋转角速度 ω_c 的正负与刀具安装角 Σ 的正负保持一致,沿 Z_c 轴方向

为正,反之为负。

(2) 刮削加工的进给运动为刀具沿着工件目标加工廓形轨迹的相对运动,由轴向速度 F 和刀具附加回转角速度 ω_{cf} 组成。为维护刀具与工件的主切削展成运动, F 与 ω_{cf} 之间保证如下关系

$$\omega_{cf} = \text{sgn}(\Sigma) j_w k_{io} \left(F \frac{\sin \beta_w}{\cos \beta_c} Z_w \right) / (Z_c R_w) \quad (4)$$

其中, $\text{sgn}()$ 表示取正负。一般速度 F 沿 Z_w 轴负方向为正,相应的确定出 ω_{cf} 的方向。

根据上述的运动速度关系,可以确定出任意时刻 t , 刀具与工件的空间运动位置,即刀具动坐标系和工件动坐标系的空间位置。

2 切削齿廓形离散计算与运动分析

2.1 刮削加工正逆问题分析

从第 1.1 节所述的刮削加工原理可知,刀具切削刃在空间的运动扫掠面与工件目标加工曲面形成一对共轭曲面,刀具与工件的主运动可以看作为一对空间斜齿轮的啮合运动。基于此,由曲面的包络原理可知:对于正向的加工问题,令工件固定,刀具等效为切削刃沿自身螺旋(直线)轨迹的扫掠面,该表面相对工件的空间运动包络面(曲面在该相对

运动下的曲面族)与工件目标加工曲面共轭,为空间线接触(迹线),由每一时刻切削刃扫掠面与工件目标加工曲面之间的共轭接触点组成。该迹线在工件自实体上的作用结果即为工件目标加工廓形;对于逆向的切削齿刃形求解问题,令刀具固定,工件目标加工曲面相对刀具的空间运动包络面(工件目标加工曲面由该相对运动形成的曲面族)与刀具切削齿表面(即切削刃的空间运动扫掠面)共轭,对应的迹线位于刀具切削齿表面(即切削刃沿刀具自身空间运动扫掠面)。因此,可以通过迹线求解出切削刃的扫掠面,进一步通过其与前刀面的求交可实现切削刃曲线求解。

2.2 切削刃曲线计算

2.2.1 切削刃计算流程

上述逆问题指明了基于曲面共轭原理的刮削加工切削刃曲线的求解思路。在实际计算中,该求解思路可以进一步优化如下:首先令刀具固定,且切削齿退化为前刀面;这时,工件目标加工曲面相对刀具的空间运动包络面与切削齿前刀面共轭,对应的迹线坐落于切削齿前刀面,即为切削刃曲线。同时,为了简化工件目标加工曲面包络面的解析计算,采用密集的空间离散采样进行代替。这时,切削刃曲线的求解计算流程组织如图 2 所示。

图2 切削刃逆向计算原理与流程

2.2.2 切削刃计算数学模型

(1) 在工件坐标系中,基于工件轴截面廓形

$$S_w(u, \theta) = [x_w, y_w, z_w] = [x_0(u) \cos(\theta) - y_0(u) \sin(\theta), x_0(u) \sin(\theta) + y_0(u) \cos(\theta), \theta R_w / \tan(\beta_w)] \quad (5)$$

式中, u 和 θ 是目标加工廓形的参数。

(2) 首先采用 N_t 个时间离散的工件目标加工曲面 $S_w(u, \theta)$ 近似等效其空间运动扫掠体的表面,因此每一曲面可以看作关于时间 t 的函数 $S_w(u, \theta, t)$ 。然后,根据式(6)将这些离散曲面从工件动坐标系转换到刀具动坐标系中,以形成相对刀具的包络曲面。

$S_{w0}(u) = [x_0(u), y_0(u)]$ 定义工件目标加工曲面 $S_w(u, \theta)$ 如下

$$S^{c'}(u, \theta, t) = M_{c'}^{w'} \cdot S_w(u, \theta, t) \quad (6)$$

其中, $M_{c'}^{w'}$ 为工件动坐标系到刀具动坐标系的坐标转换矩阵,计算如下:

$$M_{c'}^{w'} = M_{c'}^c \cdot M_c^w \cdot M_w^{w'} \quad (7)$$

这里 $M_{c'}^c$ 为刀具静坐标系到刀具动坐标系的坐标

转换矩阵, M_c^w 为工件静坐标系到刀具静坐标系的坐标转换矩阵, $M_w^{w'}$ 为工件动坐标系到刀具静坐标系的坐标转换矩阵, 具体如下

$$M_{c'}^c = \begin{bmatrix} \cos(-\varphi_c - \Delta\varphi_c) & -\sin(-\varphi_c - \Delta\varphi_c) & 0 & 0 \\ \sin(-\varphi_c - \Delta\varphi_c) & \cos(-\varphi_c - \Delta\varphi_c) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \Delta Z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$M_c^{w'} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & -d \\ 0 & \cos(-\Sigma) & -\sin(-\Sigma) & 0 \\ 0 & \sin(-\Sigma) & \cos(-\Sigma) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$M_w^{w'} = \begin{bmatrix} \cos(\varphi_w) & -\sin(\varphi_w) & 0 & 0 \\ \sin(\varphi_w) & \cos(\varphi_w) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

基于刮削的运动关系, 确定出上述式中 $\varphi_w = \omega_w t$, $\varphi_c = \omega_c t$, $\Delta\varphi_c = \omega_c \Delta t$ 和 $\Delta Z = -Ft$ 。

(3) 首先由前刀面上 P 点和切削齿前刀面的类型确定出前刀面 $S_R = [x_R, y_R, z_R]$, 然后, 求解离散工件目标加工曲面 $S^c(u, \theta, t)$ 与 S_R 的交线 $C(t)$ 。考虑到计算的实现, 将工件目标加工廓形也看做一系列的离散点 $S_{w0}(u_i) = [x_0(u_i), y_0(u_i)]$, $i=1, 2, \dots, N_w$, 这时曲面 $S^c(u, \theta, t)$ 与 S_R 的交点等价于图 3 所示的一系列螺旋线 $S^c(u_i, \theta, t)$ 与 S_R 的交点。交点的求解可以等效为关于 θ 的函数:

$$g(\theta) = S^c(u_i, \theta, t) - S_R \quad (8)$$

该问题等价于搜索螺旋线 $S^c(u_i, \theta, t)$ 与曲面 S_R 距离最近的点, 可通过牛顿-拉夫逊等数值搜索方法高效完成。

图 3 工件目标加工曲面与切削齿前刀面求交原理图

(4) 通过对前刀面与离散工件目标加工曲面的交线进行包络廓形的求解, 确定出切削刃曲线。由

于交线 $C(t)$ 为一系列离散点, 因此所有交线的包络等价于全部交点集的包络。基于此, 可以采用如下的方法进行包络廓形的计算: 如图 4 所示, 在平面 $X_c O_c Y_c$ 上以刀具坐标系原点 O_c 为圆心, 在区间 $[R_f, R_a]$ 内设 N_R 个均匀的半径, 然后由这些半径对应的圆对所有的交点进行区域划分。由于加工过程中切削齿位于工件目标加工曲面空间内, 所以交点的内包络曲线为切削刃曲线。因此, 在第 i 个由半径为 $[R_i, R_i + \Delta R]$ 决定的圆环内, 所有交点中距离 X_c 轴最近的两点 M_1 和 M_2 , 为所有交线的包络线在该半径的点, 即为切削刃曲线在半径 R_i 处的点。由此, 通过识别所有 N_R 个半径对应的 M_1 和 M_2 点可以完成切削刃曲线的求解。从刮削加工的工作原理出发, 为保证工件目标加工廓形的完整加工, R_f 等于所有离散点与 O_c 之间的最小直线距离, R_a 等于 $k_{io}(disA - R_{wf})$, R_{wf} 为工件目标加工廓形 $S_{w0}(u)$ 与 O_w 之间的最小距离。

图 4 交线包络廓形(切削刃曲线)计算

2.2.3 切削刃可行性判定

前述的包络计算方法仅能从理论上确定出切削刃曲线, 但是无法保证其可行性, 如图 5 所示, 不合理的包络曲线造成的切削刃无法完整加工目标廓形。因此, 切削刃可行性的验证至关重要。

由刮削加工的双自由度曲面展成原理可知, 切削刃与工件表面的展成运动决定了切削刃与工件表面保持点接触, 所以切削刃上每一点与工件表面廓形上每一点必然存在一定的对应关系。因此, 在第 3.2.2 节的切削刃离散点计算中, 工件廓形 $S_{w0}(u)$ 每一离散点应该对应一个切削刃离散点(离散区间范围内对应), 否则会出现图 5 所示的情形, 即仅 $E_{Ls} - E_{Le}$ 和 $E_{Rs} - E_{Re}$ 段廓形得到加工, 而剩余部分廓形因与切削刃无对应关系得不到加工, 这就意味着当前切削刃曲线无效。因此, 基于该原则在切削刃离散点计算后检测与工件廓形对应的覆盖关系可以判定切削刃的有效性。

这里仅从几何可行性上进行考虑, 并不涉及实

际加工中刀尖过窄带来的强度不足、快速磨损寿命不足等工艺因素。本文方法着眼于对判定工件目标加工曲面能否刮削加工以及刮削加工配置参数的调整提供几何角度的直接分析。

图5 刮刀可行性分析

2.3 刮削切触运动解析

在加工过程中任一时刻 t , 切削刃刮削过工件目标加工曲面 $S_w(u, \theta)$ 并与之发生切触。所有时刻的切触点构成了工件目标加工曲面的切触线, 亦切削展成运动的空间“啮合点”轨迹。基于此, 可以确定出刮削切触线及相应的刮削空间切触运动。

2.3.1 刮削切触线求解

在切削刃曲线的求解过程中可知, 切削刃上任一点 M 为 t 时刻工件目标加工曲面 $S^c(u, \theta, t)$ 上第 i 个廓形点 $S_{w0}(u_i)$ 对应的螺旋线 $S^c(u_i, \theta, t)$ 与前刀面 S_R 的交点。因此, 按照式(9), 将点 M 按照时刻 t 对应的运动参数转换到工件动坐标系中, 即可确定出切削刃相对于工件目标加工曲面的切触点 N 。如此可以确定出完整的切触线如图 6(a)所示。

$$N = \mathbf{M}_{w'}^{c'} \cdot M \quad (9)$$

式中, $\mathbf{M}_{w'}^{c'} = \mathbf{M}_c^{w'-1}$ 。

由图 6a 可以看到, 切触线完全分布于整个工件目标加工表面径向上, 且与切削齿的两侧切削刃对应。值得注意, 在任一时刻, 切削刃与刮削表面之间可能存在多个切触点, 这不同于渐开线廓形的车齿加工切削刃与渐开面之间保持单点接触。

2.3.2 刮削空间切触运动解析

为了更加清晰地分析刮削过程, 将切削刃上 M 点按照作用时刻 t 对应的运动参数, 通过式(10)转换到工件静坐标系中, 从而能够得到切削刃 M 点切触发生的空间位置 K 。

$$K = \mathbf{M}_w^{c'} \cdot M \quad (10)$$

与此同时, 针对每一离散时刻 t , 将完整的切削刃和工件目标加工曲面按照各自的运动参数统一转换到工件静坐标系中, 即可得到如图 6b 所示直观的刮削加工离散运动过程。由图中可以清晰地看到, 在切削齿进入工件目标加工曲面的某一时刻, 一侧

切削刃与工件目标加工表面切触于 K_1 和 K_2 点, 对应图 6a 中加工表面上的 N_1 和 N_2 点; 在切削齿即将离开工件目标加工曲面某一时刻, 另一侧切削刃与工件目标加工表面切触于 K_3 和 K_4 点, 对应图 6a 中加工表面上的 N_3 和 N_4 点。在完整的刮削过程中, 切削刃与工件目标加工曲面的切触点按照图 6b 中所示的轨迹在空间向下推进, 对应图 6a 中随切削刃沿轴向向下扫过, 切触点沿着切触线向下推进, 从而刮削出与切削接触线形态对应的一层材料, 实现工件的加工。

3 实例验证

为了验证本文提出离散性刮削加工切削齿廓形计算方法的有效性, 分别对一个内廓形和一个外廓形工件的刮削加工进行了所需切削刃刃形的计算, 并通过 VERICUT 软件进行了加工仿真验证。此外, 还基于本文提出的刮削运动分析思路, 对于两个加工任务进行了相应的刮削空间切触运动分析仿真。

3.1 外廓形加工

以表 1 所示的工件、刀具以及刮削加工配置参数, 进行图 7a 所示的外廓形刮削加工的相关计算。工件的具体廓形如图 7b 所示, 给定 $N_w=173$, $N_f=181$, $N_R=200$ 计算出切削刃廓形如图 7c 所示(在 M 点处不连续)。基于该计算廓形, 切削刃与工件之间的加工运动如图 7d 和 7e 所示, M 点所在切削刃从 P 点开始参与工件廓形切削, 随后切出工件廓形外部一段, 然后转入工件廓形最内位置, 逐渐切削直至 Q 点完成该侧切削刃的所有切削工作。这里 P 和 Q 对应切削刃的 M 点, 切削刃曲线的不连续造成了切削的跳转。相对应的, 另一侧切削刃从工件廓形中部开始向两侧切削, 在内侧段廓形切削完成后, 在外侧段廓形从两端向内同时切削, 整个过程大部分阶段工件表面同时存在两个切触点。

为标明切削刃曲线的正确性, 利用 VERICUT 软件按照表 1 所示结构设定运动参数, 采用 0.036 mm/r 和 0.360 mm/r 的进给速度分别进行了刮削加工的仿真。在此基础上, 过 auto-diff 功能与标准工件模型进行了加工误差分析分别如图 9a 和图 9c。该误差分布状态表明, 随着进给速率的减小, 加工特征的表面加工误差相应缩小, 这是增加等效刀路密度、减小加工残高的直接效果; 另一方面, 图 9a 和图 9c 中工件都在加工特征的顶部呈现一条误差较大的细条带, 这是由于切削刃在此处存在不连续点, 造成切削仿真数值计算的误差。同时, 这种情形在实际加工中也需要回避, 不连续点会造成刀具

的快速磨损并引发加大的加工误差。就仿真加工误差状态而言,目标加工特征的表面欠切误差已小于

0.1 mm 并可进一步缩小,这表明了本文算法计算的切削刃曲线能高精度的加工出目标廓形。

图 6 刮削加工空间切触运动分析

图 7 外形刮削加工示例

3.2 内廓形加工

以表 1 所示的工件、刀具和刮削加工配置参数进行图 8a 所示的内廓形刮削相关参数计算与分析。工件目标加工廓形为图 8b 所示的半椭圆,给定 $N_w=73$, $N_t=91$, $N_R=200$ 计算出的切削齿廓形见图 8c。在此基础上,进行刮削运动的仿真分析,由图

8d 可见,右侧切削刃中部首先与工件表面发生切触,然后向两侧逐步形成切触;在工件右侧曲面切削完成后,左侧切削刃平顺的进入工件左侧曲面切触,从两侧向中部切触,直至切削刃中步与工件表面分离。这与图 8e 中所示的前刀面沿工件轴向刮削推进,切削刃扫掠过工件表面并依次与切触线上每

表 1 外形刮削加工参数

参数		外形加工数值	内廓形加工数值
工件	齿数 Z_w	7	20
	展成运动半径 R_w/mm	27.5	100
	螺旋角 $\beta_w/(\circ)$	23.362 8	25
	旋向	右旋	右旋
刀具	展成运动半径 R_c/mm	35.357	55
	螺旋角 $\beta_c/(\circ)$	0	15
	旋向	—	右旋
	安装中心距 d/mm	62.857 1	45
刀具	安装角 $\Sigma/(\circ)$	-23.362 8	-10
	刀具安装偏距 E_c/mm	0	0
	齿数 Z_c	9	11

一点发生成型切触保持一致。值得注意,图 8d 和 8e 中接触线最外端的不连续是由于工件廓形最外端没有进行光滑连续性处理造成的,并不影响曲面整体的刮削成型。

为表明切削刃曲线的正确性,在 VERICUT 中进行加工仿真。进给速度为 0.26 mm/r 时的加工误差分布结果如图 9d 所示,呈现出明显的加工残差分布模式,并在加工特征底部存在较大欠切,仅在特征外围存在微小过切;当进给速度减小到 0.026 mm/r 时,加工特征整体误差都 0.1 mm。由此可见该切削刃曲线能够精确的加工出目标廓形,这表明了本文切削刃曲线计算方法的正确性。

图 8 内廓形刮削加工示例

图 9 基于 VERICUT 的刮削加工仿真误差分析

4 结 论

(1) 指出刮削加工为双自由度曲面展成, 刀具与工件的固定回转为主运动完成廓形展成, 刀具的进给完成曲面的生成。由此分析了刮削加工的正逆问题, 指出工件加工表面相对刀具的空间运动扫掠面与刀具切削刃扫掠体表面共轭这一切削刃曲线计算的数学基础。

(2) 为保证切削刃曲线计算的普适性, 提出利用一系列离散曲面表达扫掠体, 给出提取任意切削齿前刀面与该离散曲面交线的内包络线的切削齿廓形计算方法, 并指明切削刃曲线上每一点都应加工廓形上一点对应的切削刃曲线有效性判定原则。

(3) 由切削刃的离散作用原理指出切削刃作用点与刮削成型的时序关系, 通过构建切削刃与工件坐标系的转换矩阵, 实现给出刮削加工的空间运动仿真与工件表面刮削接触线分析方法。此外, 分析结果指出刮削中, 一侧切削刃与加工表面之间可能存在多个接触点, 并非车齿加工特例的单一接触点。

(4) 通过 VERICUT 进行计算切削刃曲线的加工误差分析, 结果表明进给速度越小, 刮削加工表面精度越高。同时, 该加工误差满足加工精度要求表明了本文算法切削刃曲线计算方法的正确性。

参 考 文 献

- [1] VON P. Verfahren zum Schneiden von Zahnrädern mittels eines zahnradartigen, an den Stirnflächen der Zähne mit Schneidkanten versehenen Schneidwerkzeugs : W.01.03.1910 [P]. 1910-01-03.
VON P. Method for cutting gears by means of a gear-like cutting tool provided with cutting edges at the end faces of the teeth: W.01.03.1910 [P]. 1910-01-03.
- [2] 金精. 车齿法原理与试验结果[J]. 西安交通大学学报, 1962(2): 71-99.
JIN Jing. Principle and test results of car tooth method [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 1962(2): 71-99.
- [3] WU J L, LIU C C, TSAY C B, et al. Mathematical model and surface deviation of helipoid gears cut by shaper cutters[J]. Journal of Mechanical Design, 2003, 125(2): 351-355.
- [4] KOJIMA M, NISHIJIMA K. Gear skiving of involute internal spur gear : (Part 1. On the tooth profile)[J]. Bulletin of JSME, 1974, 17(106): 511-518.
- [5] SPATH D, HUEHSAM A. Skiving for High-performance Machining of Periodic Structures[J]. CIRP Annals, 2002, 51(1): 91-94.
- [6] STADFFELD H J. Power skiving of cylindrical gears on different machine platforms[J]. Gear Technology, 2014, 31(1): 52-62.
- [7] 李佳, 陈新春, 张鸿源. 圆柱齿轮刮齿技术[J]. 机械工程学报, 2011, 47(19): 193-198.
LI Jia, CHEN Xinchun, ZHANG Hongyuan. Cylinder gear claw technology[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2011, 47(19): 193-198.
- [8] 陈新春, 李佳, 贺友平. 直齿刮齿刀结构设计与计算[J]. 天津大学学报, 2012, 45(5): 411-416.
CHEN Xinchun, LI Jia, HE Youping. Structural design and calculation of straight tooth cutter[J]. Journal of Tianjin University, 2012, 45(5): 411-416.
- [9] 李佳, 姜本超, 陈新春. 基于自由曲面的刮齿刀结构设计[J]. 机械工程学报, 2014, 50(17): 157-164.
LI Jia, ZHAI Benchao, CHEN Xinchun. Structural design of caries based on freeform surfaces[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2014, 50(17): 157-164.
- [10] 毛世民. 车齿齿形分析[J]. 机械传动, 2014, 38(10): 50-53.
MAO Shimin. Analysis of tooth profiles[J]. Mechanical Transmission, 2014, 38(10): 50-53.
- [11] 李海涛, 魏文军, 董学朱, 等. 曲线刀刃双自由度展成曲面的理论和应用[J]. 机械工程学报, 2010, 46(9): 52-58.
LI Haitao, WEI Wenjun, DONG Xuezhu, et al. Theory and application of curved blade double degree of freedom to form curved surface[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2010, 46(9): 52-58.
- [12] 郭二廓, 洪荣晶, 黄筱调, 等. 数控强力刮齿加工锥齿刀刃形计算[J]. 南京工业大学学报, 2015, 37(4): 57-62.
GUO Erkuo, HONG Rongjing, HUANG Xiaodiao, et al. Calculation of the shape of the bevel cutter for CNC strong scraping machining[J]. Journal of Nanjing University of Technology, 2015, 37(4): 57-62.
- [13] GUO E, HONG R, HUANG X, et al. Research on the design of skiving tool for machining involute gears[J]. Journal of Mechanical Science & Technology, 2014, 28(12): 5107-5115.
- [14] TSAI C Y. Mathematical model for design and analysis of power skiving tool for involute gear cutting[J]. Mechanism & Machine Theory, 2016, 101: 195-208.

作者简介: 贾康, 男, 1987 年出生, 助理研究员。主要研究方向为数字化制造, CAD/CAM。

E-mail: jiakang@xjtu.edu.cn

洪军(通信作者), 男, 1968 年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为数字化设计、制造与装配, 精密电主轴技术。

E-mail: jhong@mail.xjtu.edu.cn