



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 114019908 B

(45) 授权公告日 2024.04.12

(21) 申请号 202111254043.9

CN 110705064 A, 2020.01.17

(22) 申请日 2021.10.27

CN 113399751 A, 2021.09.17

(65) 同一申请的已公布的文献号

EP 0522448 A1, 1993.01.13

申请公布号 CN 114019908 A

US 2013243539 A1, 2013.09.19

US 2019285396 A1, 2019.09.19

(43) 申请公布日 2022.02.08

CN 110968042 A, 2020.04.07

(73) 专利权人 南京工业大学

CN 103273142 A, 2013.09.04

地址 210000 江苏省南京市浦珠南路30号

CN 203254017 U, 2013.10.30

(72) 发明人 洪荣晶 胡敏 李帅康 薛凤
张建坤

莫江涛; 钟家宗; 龚佳兴. 渐开线齿廓修形方法及应用. 煤矿机械. 2018, (第01期), 123-127.

柴建伯. 弧齿锥齿轮齿顶棱线方程的研究与建立. 中国科技信息. 2017, (第17期), 16, 56-58.

卞博 等. 基于锥形刀具的螺旋锥齿轮齿顶倒棱加工仿真研究. 《轻工学报》. 2021, 第36卷卷(第第1期期), 正文第102-108页.

崔雪莹. 用于齿廓弧面倒棱的挤齿刀廓形设计. 《机械制造》. 2018, 第第56卷卷(第第645期期), 正文第58-60页.

(74) 专利代理机构 北京卓岚智财知识产权代理有限公司 11624

专利代理师 蒋真

审查员 徐倩茹

(51) Int. Cl.

G05B 19/408 (2006.01)

B23F 19/10 (2006.01)

(56) 对比文件

CN 110355426 A, 2019.10.22

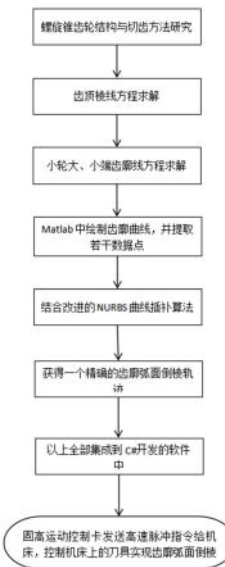
权利要求书3页 说明书7页 附图3页

(54) 发明名称

一种螺旋锥齿轮齿廓弧面倒棱控制方法

(57) 摘要

本发明提供了一种螺旋锥齿轮齿廓弧面倒棱控制方法,包括以下步骤:首先计算出螺旋锥齿路小轮大、小两端的齿廓线方程,并精确控制倒圆角刀具弧面倒棱的轨迹,再全部集成到以C#为基础开发的软件中,通过固高运动控制卡自动控制开放式数控机床进行倒棱的加工,螺旋锥齿轮大轮两端的齿廓弧面倒棱同理。本发明可真正消除齿轮的棱边的问题,最大限度减小齿轮热处理时的应力集中,以此来提升齿轮的工作效果;提供人机交互的软件,可以自动获取螺旋锥齿轮齿廓弧面倒棱的加工程序,极大的降低了加工的难度,也使得操作工更容易工作。



1. 一种螺旋锥齿轮齿廓弧面倒棱控制方法,其特征在于,包括以下步骤:

步骤1:根据螺旋锥齿轮结构与切齿方法,计算获得小轮大端和小端的齿廓曲线方程;获得小轮大端和小端的齿廓曲线方程,首先需要计算出齿轮的齿顶棱线方程,再根据螺旋锥齿轮的结构以及机床的坐标关系计算出齿轮大、小两端的齿廓曲线方程;

步骤2:仿真并提取数据点:根据步骤1获得的齿廓曲线方程在Matlab中仿真出三维曲线图,并提取若干数据点;

步骤3:结合改进的NURBS曲线插补算法:

插补过程中,给出NURBS曲线的任一节点参数 $u \in [u_i, u_{i+1}]$,将曲线表示为矩阵形式,经计算第 i 个NURBS曲线为:

$$P_i(u) = \frac{\sum_{j=i-3}^i w_j d_j N_{i,3}(u)}{\sum_{j=i-3}^i w_j N_{i,3}(u)} = \frac{[1 \quad t \quad t^2 \quad t^3] M_i \begin{bmatrix} w_{i-3} d_{i-3} \\ w_{i-2} d_{i-2} \\ w_{i-1} d_{i-1} \\ w_i d_i \end{bmatrix}}{[1 \quad t \quad t^2 \quad t^3] M_i \begin{bmatrix} w_{i-3} \\ w_{i-2} \\ w_{i-1} \\ w_i \end{bmatrix}}$$

$$= \frac{A_0 + A_1 t + A_2 t^2 + A_3 t^3}{A'_0 + A'_1 t + A'_2 t^2 + A'_3 t^3}, (0 \leq t \leq 1, i = 3, 4, \dots, n) \quad (1)$$

其中:

$$\begin{cases} A_0 = m_{11} w_{i-3} d_{i-3} + m_{12} w_{i-2} d_{i-2} + m_{13} w_{i-1} d_{i-1} + m_{14} w_i d_i \\ A_1 = m_{21} w_{i-3} d_{i-3} + m_{22} w_{i-2} d_{i-2} + m_{23} w_{i-1} d_{i-1} + m_{24} w_i d_i \\ A_2 = m_{31} w_{i-3} d_{i-3} + m_{32} w_{i-2} d_{i-2} + m_{33} w_{i-1} d_{i-1} + m_{34} w_i d_i \\ A_3 = m_{41} w_{i-3} d_{i-3} + m_{42} w_{i-2} d_{i-2} + m_{43} w_{i-1} d_{i-1} + m_{44} w_i d_i \\ A'_0 = m_{11} w_{i-3} + m_{12} w_{i-2} + m_{13} w_{i-1} + m_{14} w_i \\ A'_1 = m_{21} w_{i-3} + m_{22} w_{i-2} + m_{23} w_{i-1} + m_{24} w_i \\ A'_2 = m_{31} w_{i-3} + m_{32} w_{i-2} + m_{33} w_{i-1} + m_{34} w_i \\ A'_3 = m_{41} w_{i-3} + m_{42} w_{i-2} + m_{43} w_{i-1} + m_{44} w_i \end{cases}$$

$$M_i = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} & m_{14} \\ m_{21} & m_{22} & m_{23} & m_{24} \\ m_{31} & m_{32} & m_{33} & m_{34} \\ m_{41} & m_{42} & m_{43} & m_{44} \end{bmatrix}$$

公式(1)中所有系数均由初始给定的权重因子、控制顶点和节点矢量确定的,因此只需在已知当前插补点位置的情况下选取,提高插补效率;

对轨迹空间中的进给步长进行参数点密化处理,使得转化为一维参数空间的节点矢量增量 Δu_i ,由公式 $u_{i+1} = u_i + \Delta u_i$ 即可求出下一个插补点的参数坐标;

根据四阶龙格-库塔算法,计算出节点矢量增量为:

$$\Delta u_i = \frac{25}{16}u_i - \frac{55}{24}u_{i-1} + \frac{11}{12}u_{i-2} + \frac{5}{24}u_{i-3} + \frac{1}{48}u_{i-4} \quad (2)$$

将计算得出的 u_{i+1} 带入NURBS曲线插补方程(1)中,即可得到下一个插补点的位置参数:
 $p_{i+1} = p(u_{i+1})$;

NURBS曲线插补的自适应控制,通过调节插补速度来减小插补步长,从而减小弦高误差;在每一个插补周期内,弦高误差为:

$$\delta_i = \rho_i - \sqrt{\rho_i^2 - \left(\frac{v_i T}{2}\right)^2} = \rho_i \left\{ 1 - \left[1 - \frac{\left(\frac{v_i T}{2\rho_i}\right)^2}{2!} + \frac{\left(\frac{v_i T}{2\rho_i}\right)^4}{4!} - \dots \right] \right\} \approx \frac{(v_i T)^2}{8\rho_i} \quad (3)$$

其中: ρ_i :曲率半径, Δl_i :插补进给步长, $\Delta l_i = v_i T$,且 T 为插补周期, v_i 为速度, δ_i 为弦高误差;

因此可近似得出进给速度 v_i 和弦高误差 δ_i 关系:

$$v_i = \frac{2}{T} \sqrt{\rho^2 - (\rho_i - \delta_i)^2} \quad (4)$$

由机床最大弦高误差 δ_{\max} 选定一个最大允许的弦高误差值 δ_{\max_i} ;

$$\delta_{\max_i} = \min \left\{ \delta_{\max}, \frac{T^2 \sqrt{a_{\max}^2 - a_i^2}}{8} \right\} \quad (5)$$

最后得到加速度误差为:

$$V_i = \begin{cases} v_i, & \delta_i < \delta_{\max_i} \\ \frac{2}{T} \sqrt{\rho^2 - (\rho_i - \delta_{\max_i})^2}, & \delta_i \geq \delta_{\max_i} \end{cases} \quad (6)$$

根据弦高误差和加速度误差公式使得刀具倒棱是更加的平稳且精确;

最后结合获得的螺旋锥齿轮齿廓线上的数据点以及改进的NURBS曲线插补算法,使得倒圆角刀具获得一个精确的完整的齿廓弧面倒棱轨迹;

步骤4:将以上全部控制流程集成到以C#为开发基础的软件中:

在VS2015软件中打开Visual C#模板下的Windows窗体应用程序,编写控制程序,用户在登陆界面输入登录名和登录密码,进入到功能界面,功能界面中包括机床各轴状态检测、机床管理、工件管理、刀具管理、数据库管理、插补运动、NURBS曲线以及调用Matlab绘图这些功能;

步骤5:固高运控卡控制机床完成对齿轮齿廓的弧面倒棱:

操作者向计算机上的软件中,输入需要的各项参数后,调用固高运动控制卡中的动态链接库,向机床发送高速脉冲指令,以达到控制开放式数控机床完成齿轮的齿廓弧面倒棱加工;

所述步骤1中齿轮的齿顶棱线方程计算过程:先对螺旋锥齿轮齿槽中心处节锥面上的假想齿线的解析式方程进行求解,而后根据获得的假想齿线方程与齿顶棱线在当量齿轮下

的关系,推导出齿顶棱线方程;

所述步骤2中在Matlab软件里仿真出齿廓曲线的三维曲线图,并提取若干数据点步骤如下:

设置C#与Matlab的配置环境,C#调用Matlab中的Figure并嵌入到Winform窗体,根据前面计算出的齿廓曲线方程,绘制出三维图,而后提取相应的数据点到C#中的TextBox控件中,并对其进行保存至txt文件中;

所述步骤3中的倒棱刀具为倒圆角刀具:给齿廓棱边采取弧面倒棱,用圆面光滑连接齿廓棱线的两侧,可以完全消除齿轮的棱边;

所述步骤5中的机床完成对齿轮齿廓的弧面倒棱:所述螺旋锥齿轮是弧齿锥齿轮,两轮的轴线相交,且相交的角度为90度;小螺旋锥齿轮的轴线与机床的Z轴重合,机床的C轴带动齿轮做旋转运动;首先刀具在齿轮的小端处执行弧齿倒棱指令,当走完一个完整的齿廓后,刀具提起,此时机床C轴转动角度,使得待加工的齿轮旋转到下一个完整的齿廓处,刀具开始回到倒棱的起始位置,开始下一个齿廓的倒棱,这样不断重复,直到齿轮小端的轮齿完全加工结束,小螺旋锥齿轮大端的齿廓弧面倒棱以及大螺旋锥齿轮的大小端齿廓弧面倒棱均是如此。

一种螺旋锥齿轮齿廓弧面倒棱控制方法

技术领域

[0001] 本发明涉及齿轮加工技术领域,特别是涉及一种螺旋锥齿轮齿廓弧面倒棱控制方法。

背景技术

[0002] 现代技术的快速发展,使得螺旋锥齿轮广泛应用于各个领域,但是由于切齿时会在轮齿的棱边处留下残刺,在搬运或者装配中产生磕碰及拉毛等,使得螺旋锥齿轮产生一定的缺陷,比如会产生啮合噪声、降低齿轮传动的精度、缩短齿轮使用的寿命等。目前对螺旋锥齿轮齿廓弧面倒棱技术很少、编程过程复杂、易出错并且技术人员操作存在一定的难度,传统的齿轮倒棱工艺是将棱边加工成 45° 左右的斜面,但同时也会产生新的较小棱边,始终无法完全消除棱边处产生的应力集中问题,在高速重载的高可靠性传动要求场合中,有弧面倒棱的要求,弧面倒棱是用圆面或其他二次曲面光滑连接啮合面、上下齿面与齿顶圆面,从而完全消除齿轮的棱边。螺旋锥齿轮的倒棱技术目前还不是很成熟,且倒棱的程序编写比较复杂,对操作人员的要求比较高,因此亟需开发一种自动编程的软件,技术人员只需要进行简单的操作,便可以对螺旋锥齿轮进行倒棱加工。

发明内容

[0003] 本发明的目的在于提供一种螺旋锥齿轮齿廓弧面倒棱控制方法,以解决上述背景技术中提出的问题。

[0004] 该方法结合齿廓倒棱的实时性以及加工过程方便简单等特点,选择改进的NURBS曲线插补算法和GTS-VB系列的固高运动控制卡。基于开放式的数控系统平台,操作人员通过对计算机上以C#为基础开发的软件进行操作,包括计算出螺旋锥齿轮小轮大小两端齿廓曲线方程、仿真出刀具的倒棱加工轨迹等,最后输入机床、工件以及刀具等参数,调用固高运动控制卡中的动态链接库,向机床发送高速脉冲指令,驱动机床上的倒圆角刀具完成对小轮齿廓大小两端的弧面倒棱,螺旋锥齿轮大轮的大小两端齿廓弧面倒棱同理。

[0005] 为实现上述目的,本发明采用了如下技术方案:

[0006] 一种螺旋锥齿轮齿廓弧面倒棱控制方法,其特征在于,包括以下步骤:

[0007] 步骤1:根据螺旋锥齿轮结构与切齿方法,计算获得小轮大端和小端的齿廓曲线方程:获得小轮大端和小端的齿廓曲线方程,首先需要计算出齿轮的齿顶棱线方程,再根据螺旋锥齿轮的结构以及机床的坐标关系计算出齿轮大、小两端的齿廓曲线方程;

[0008] 步骤2:仿真并提取数据点:根据步骤1获得的齿廓曲线方程在Matlab中仿真出三维曲线图,并提取若干数据点;

[0009] 步骤3:结合改进的NURBS曲线插补算法:

[0010] 插补过程中,给出NURBS曲线的任一节点参数 $u \in [u_i, u_{i+1}]$,将曲线表示为矩阵形式,经计算第i个NURBS曲线为:

$$\begin{aligned}
 [0011] \quad P_i(u) &= \frac{\sum_{j=i-3}^i w_j d_j N_{i,3}(u)}{\sum_{j=i-3}^i w_j N_{i,3}(u)} = \frac{[1 \quad t \quad t^2 \quad t^3] M_i \begin{bmatrix} w_{i-3} d_{i-3} \\ w_{i-2} d_{i-2} \\ w_{i-1} d_{i-1} \\ w_i d_i \end{bmatrix}}{[1 \quad t \quad t^2 \quad t^3] M_i \begin{bmatrix} w_{i-3} \\ w_{i-2} \\ w_{i-1} \\ w_i \end{bmatrix}} \\
 &= \frac{A_0 + A_1 t + A_2 t^2 + A_3 t^3}{A'_0 + A'_1 t + A'_2 t^2 + A'_3 t^3}, (0 \leq t \leq 1, i = 3, 4, \dots, n) \quad (1)
 \end{aligned}$$

[0012] 其中:

$$[0013] \quad \begin{cases} A_0 = m_{11} w_{i-3} d_{i-3} + m_{12} w_{i-2} d_{i-2} + m_{13} w_{i-1} d_{i-1} + m_{14} w_i d_i \\ A_1 = m_{21} w_{i-3} d_{i-3} + m_{22} w_{i-2} d_{i-2} + m_{23} w_{i-1} d_{i-1} + m_{24} w_i d_i \\ A_2 = m_{31} w_{i-3} d_{i-3} + m_{32} w_{i-2} d_{i-2} + m_{33} w_{i-1} d_{i-1} + m_{34} w_i d_i \\ A_3 = m_{41} w_{i-3} d_{i-3} + m_{42} w_{i-2} d_{i-2} + m_{43} w_{i-1} d_{i-1} + m_{44} w_i d_i \\ A'_0 = m_{11} w_{i-3} + m_{12} w_{i-2} + m_{13} w_{i-1} + m_{14} w_i \\ A'_1 = m_{21} w_{i-3} + m_{22} w_{i-2} + m_{23} w_{i-1} + m_{24} w_i \\ A'_2 = m_{31} w_{i-3} + m_{32} w_{i-2} + m_{33} w_{i-1} + m_{34} w_i \\ A'_3 = m_{41} w_{i-3} + m_{42} w_{i-2} + m_{43} w_{i-1} + m_{44} w_i \end{cases}$$

$$[0014] \quad M_i = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} & m_{14} \\ m_{21} & m_{22} & m_{23} & m_{24} \\ m_{31} & m_{32} & m_{33} & m_{34} \\ m_{41} & m_{42} & m_{43} & m_{44} \end{bmatrix}$$

[0015] 公式(1)中所有系数均由初始给定的权重因子、控制顶点和节点矢量确定的,因此只需在已知当前插补点位置的情况下选取,提高插补效率;

[0016] 对轨迹空间中的进给步长进行参数点密化处理,使得转化为一维参数空间的节点矢量增量 Δu_i ,由公式 $u_{i+1} = u_i + \Delta u_i$ 即可求出下一个插补点的参数坐标;

[0017] 根据四阶龙格-库塔算法,计算出节点矢量增量为:

$$[0018] \quad \Delta u_i = \frac{25}{16} u_i - \frac{55}{24} u_{i-1} + \frac{11}{12} u_{i-2} + \frac{5}{24} u_{i-3} + \frac{1}{48} u_{i-4} \quad (2)$$

[0019] 将计算得出的 u_{i+1} 带入NURBS曲线插补方程(1)中,即可得到下一个插补点的位置参数: $p_{i+1} = p(u_{i+1})$;

[0020] NURBS曲线插补的自适应控制,通过调节插补速度来减小插补步长,从而减小弦高误差;在每一个插补周期内,弦高误差为:

$$[0021] \quad \delta_i = \rho_i - \sqrt{\rho_i^2 - \left(\frac{v_i T}{2}\right)^2} = \rho_i \left\{ 1 - \left[1 - \frac{\left(\frac{v_i T}{2\rho_i}\right)^2}{2!} + \frac{\left(\frac{v_i T}{2\rho_i}\right)^4}{4!} - \dots \right] \right\} \approx \frac{(v_i T)^2}{8\rho_i} \quad (3)$$

[0022] 其中： ρ_i ：曲率半径， Δl_i ：插补进给步长， $\Delta l_i = v_i T$ ，且T为插补周期；

[0023] 因此可近似得出进给速度 v_i 和弦高误差 δ_i 关系：

$$[0024] \quad v_i = \frac{2}{T} \sqrt{\rho^2 - (\rho_i - \delta_i)^2} \quad (4)$$

[0025] 由机床最大弦高误差 δ_{\max} 选定一个最大允许的弦高误差值 δ_{\max_i} ：

$$[0026] \quad \delta_{\max_i} = \min \left\{ \delta_{\max}, \frac{T^2 \sqrt{a_{\max}^2 - a_i^2}}{8} \right\} \quad (5)$$

[0027] 最后得到加速度误差为：

$$[0028] \quad V_i = \begin{cases} v_i, & \delta_i < \delta_{\max_i} \\ \frac{2}{T} \sqrt{\rho^2 - (\rho_i - \delta_{\max_i})^2}, & \delta_i \geq \delta_{\max_i} \end{cases} \quad (6)$$

[0029] 根据弦高误差和加速度误差公式使得刀具倒棱是更加的平稳且精确；

[0030] 最后结合获得的螺旋锥齿轮齿廓线上的数据点以及改进的NURBS曲线插补算法，使得倒圆角刀具获得一个精确的完整的齿廓弧面倒棱轨迹；

[0031] 步骤4：将以上全部控制流程集成到以C#为开发基础的软件中：

[0032] 在VS2015软件中打开Visual C#模板下的Windows窗体应用程序，编写控制程序，用户在登陆界面输入登录名和登录密码，进入到功能界面，功能界面中包括机床各轴状态检测、机床管理、工件管理、刀具管理、数据库管理、插补运动、NURBS曲线以及调用Matlab绘图这些功能；

[0033] 步骤5：固高运控卡控制机床完成对齿轮齿廓的弧面倒棱：

[0034] 操作者向计算机上的软件中，输入需要的各项参数后，调用固高运动控制卡中的动态链接库，向机床发送高速脉冲指令，以达到控制开放式数控机床完成齿轮的齿廓弧面倒棱加工。

[0035] 所述步骤1中齿轮的齿顶棱线方程计算过程：

[0036] 综合分析螺旋锥齿轮的切齿原理以及实际加工过程中的工艺参数和刀具参数，得出这些参数都与螺旋锥齿轮的节锥面有关，先对螺旋锥齿轮齿槽中心处节锥面上的假想齿线的解析式方程进行求解，而后根据获得的假想齿线方程与齿顶棱线在当量齿轮下的关系，推导出齿顶棱线方程。

[0037] 所述步骤2中在Matlab软件里仿真出齿廓曲线的三维曲线图，并提取若干数据点步骤如下：

[0038] 设置C#与Matlab的配置环境，C#调用Matlab中的Figure并嵌入到Winform窗体，根据前面计算出的齿廓曲线方程，绘制出三维图，而后提取相应的数据点到C#中的TextBox控

件中,并对其进行保存至txt文件中。

[0039] 所述步骤3中的倒棱刀具为倒圆角刀具:传统的齿廓倒棱工艺是将棱边加工成 45° 左右的斜面,但同时会产生新的较小棱边,因此选择倒圆角刀具,给齿廓棱边采取弧面倒棱,用圆面光滑连接齿廓棱线的两侧,可以完全消除齿轮的棱边。

[0040] 所述步骤5中的机床完成对齿轮齿廓的弧面倒棱:所述螺旋锥齿轮是弧齿锥齿轮,两轮的轴线相交,且相交的角度为 90° ;小螺旋锥齿轮的轴线与机床的Z轴重合,机床的C轴带动齿轮做旋转运动;首先刀具在齿轮的小端处执行弧齿倒棱指令,当走完一个完整的齿廓后,刀具提起一定高度,此时机床C轴转动一定的角度,使得待加工的齿轮旋转 to 下一个完整的齿廓处,刀具开始回到倒棱的起始位置,开始下一个齿廓的倒棱,这样不断重复,直到齿轮小端的轮齿完全加工结束,小螺旋锥齿轮大端的齿廓弧面倒棱以及大螺旋锥齿轮的大小端齿廓弧面倒棱均是如此。

[0041] 本发明具有以下的优点与益处:

[0042] (1) 采用倒圆角刀具可以避免一般倒棱刀具倒棱后会留下新的较小的棱边,无法真正消除齿轮的棱边的问题,最大限度减小齿轮热处理时的应力集中,以此来提升齿轮的工作效果。

[0043] (2) 采用基于四阶龙格-库塔算法的NURBS曲线插补,可以使得倒圆角刀具齿廓弧面倒棱更加精确。

[0044] (3) 提供基于C#的人机交互软件,通过输入机床型号参数、各轴的偏置参数、螺旋锥齿轮的参数以及刀具的参数,可以自动获取螺旋锥齿轮齿廓弧面倒棱的加工程序,极大的降低了加工的难度,也使得操作工更容易工作。

附图说明

[0045] 图1为本发明螺旋锥齿轮齿廓弧面倒棱控制方法的总流程图;

[0046] 图2为本发明螺旋锥齿轮齿廓弧面倒棱控制方法NURBS曲线插补流程图;

[0047] 图3为本发明螺旋锥齿轮齿廓弧面倒棱控制方法倒圆角刀具齿廓弧面倒棱图;

[0048] 图4为本发明螺旋锥齿轮齿廓弧面倒棱控制方法软件设计图。

具体实施方式

[0049] 下面将结合本发明的附图,对本发明的技术方案进行清楚、完整地描述,显然,所描述的实施例仅仅是本发明的一部分实施例,而不是全部的实施例,基于本发明中的实施例,本领域普通技术人员在没有做出创造性劳动前提下所获得的所有其他实施例,都属于本发明的保护范围。

[0050] 如图1至图4所示,本实施例计算出螺旋锥齿轮小轮大、小端的齿廓线方程,并精确控制倒圆角刀具弧面倒棱的轨迹,再全部集成到以C#为基础开发的软件中,通过固高运动控制卡自动控制开放式数控机床进行倒棱的加工,螺旋锥齿轮大轮两端的齿廓弧面倒棱同理。

[0051] 一种螺旋锥齿轮齿廓弧面倒棱控制方法,包括以下步骤:

[0052] 步骤1:根据螺旋锥齿轮结构与切齿方法,由计算获得小轮大端和小端的齿廓曲线方程:

[0053] 获得小轮大端和小端的齿廓曲线方程,首先需要计算出齿轮的齿顶棱线方程,再根据螺旋锥齿轮的结构以及机床的坐标关系计算出齿轮大、小两端的齿廓曲线方程;

[0054] 步骤2:仿真并提取数据点:

[0055] 根据步骤1获得的齿廓曲线方程在Matlab中仿真出三维曲线图,并提取若干数据点;

[0056] 步骤3:结合改进的NURBS曲线插补算法:

[0057] 插补过程中,给出NURBS曲线的任一节点参数 $u \in [u_i, u_{i+1}]$,将曲线表示为矩阵形式,经计算第 i 个NURBS曲线为:

$$\begin{aligned}
 [0058] \quad P_i(u) &= \frac{\sum_{j=i-3}^i w_j d_j N_{i,3}(u)}{\sum_{j=i-3}^i w_j N_{i,3}(u)} = \frac{[1 \quad t \quad t^2 \quad t^3] M_i \begin{bmatrix} w_{i-3} d_{i-3} \\ w_{i-2} d_{i-2} \\ w_{i-1} d_{i-1} \\ w_i d_i \end{bmatrix}}{[1 \quad t \quad t^2 \quad t^3] M_i \begin{bmatrix} w_{i-3} \\ w_{i-2} \\ w_{i-1} \\ w_i \end{bmatrix}} \\
 &= \frac{A_0 + A_1 t + A_2 t^2 + A_3 t^3}{A'_0 + A'_1 t + A'_2 t^2 + A'_3 t^3}, (0 \leq t \leq 1, i = 3, 4, \dots, n) \quad (1)
 \end{aligned}$$

[0059] 其中:

$$[0060] \quad \begin{cases} A_0 = m_{11} w_{i-3} d_{i-3} + m_{12} w_{i-2} d_{i-2} + m_{13} w_{i-1} d_{i-1} + m_{14} w_i d_i \\ A_1 = m_{21} w_{i-3} d_{i-3} + m_{22} w_{i-2} d_{i-2} + m_{23} w_{i-1} d_{i-1} + m_{24} w_i d_i \\ A_2 = m_{31} w_{i-3} d_{i-3} + m_{32} w_{i-2} d_{i-2} + m_{33} w_{i-1} d_{i-1} + m_{34} w_i d_i \\ A_3 = m_{41} w_{i-3} d_{i-3} + m_{42} w_{i-2} d_{i-2} + m_{43} w_{i-1} d_{i-1} + m_{44} w_i d_i \\ A'_0 = m_{11} w_{i-3} + m_{12} w_{i-2} + m_{13} w_{i-1} + m_{14} w_i \\ A'_1 = m_{21} w_{i-3} + m_{22} w_{i-2} + m_{23} w_{i-1} + m_{24} w_i \\ A'_2 = m_{31} w_{i-3} + m_{32} w_{i-2} + m_{33} w_{i-1} + m_{34} w_i \\ A'_3 = m_{41} w_{i-3} + m_{42} w_{i-2} + m_{43} w_{i-1} + m_{44} w_i \end{cases}$$

$$[0061] \quad M_i = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} & m_{14} \\ m_{21} & m_{22} & m_{23} & m_{24} \\ m_{31} & m_{32} & m_{33} & m_{34} \\ m_{41} & m_{42} & m_{43} & m_{44} \end{bmatrix}$$

[0062] 公式(1)中所有系数均由初始给定的权重因子、控制顶点和节点矢量确定的,因此只需在已知当前插补点位置的情况下选取,提高插补效率。

[0063] 对轨迹空间中的进给步长进行参数点密化处理,使得转化为一维参数空间的节点矢量增量 Δu_i ,由公式 $u_{i+1} = u_i + \Delta u_i$ 即可求出下一个插补点的参数坐标。

[0064] 根据四阶龙格-库塔算法,计算出节点矢量增量为:

$$[0065] \quad \Delta u_i = \frac{25}{16}u_i - \frac{55}{24}u_{i-1} + \frac{11}{12}u_{i-2} + \frac{5}{24}u_{i-3} + \frac{1}{48}u_{i-4} \quad (2)$$

[0066] 将计算得出的 u_{i+1} 带入NURBS曲线插补方程(1)中,即可得到下一个插补点的位置参数: $p_{i+1}=p(u_{i+1})$

[0067] NURBS曲线插补的自适应控制,通过调节插补速度来减小插补步长,从而减小弦高误差。在每一个插补周期内,弦高误差为:

$$[0068] \quad \delta_i = \rho_i - \sqrt{\rho_i^2 - \left(\frac{v_i T}{2}\right)^2} = \rho_i \left\{ 1 - \left[1 - \frac{\left(\frac{v_i T}{2\rho_i}\right)^2}{2!} + \frac{\left(\frac{v_i T}{2\rho_i}\right)^4}{4!} - \dots \right] \right\} \approx \frac{(v_i T)^2}{8\rho_i} \quad (3)$$

[0069] 其中: ρ_i :曲率半径, Δl_i :插补进给步长, $\Delta l_i = v_i T$,且 T 为插补周期

[0070] 因此可近似得出进给速度 v_i 和弦高误差 δ_i 关系:

$$[0071] \quad v_i = \frac{2}{T} \sqrt{\rho^2 - (\rho_i - \delta_i)^2} \quad (4)$$

[0072] 由机床最大弦高误差 δ_{\max} 选定一个最大允许的弦高误差值 δ_{\max_i} :

$$[0073] \quad \delta_{\max_i} = \min \left\{ \delta_{\max}, \frac{T^2 \sqrt{a_{\max}^2 - a_i^2}}{8} \right\} \quad (5)$$

[0074] 最后得到加速度误差为:

$$[0075] \quad V_i = \begin{cases} v_i, & \delta_i < \delta_{\max_i} \\ \frac{2}{T} \sqrt{\rho^2 - (\rho_i - \delta_{\max_i})^2}, & \delta_i \geq \delta_{\max_i} \end{cases} \quad (6)$$

[0076] 根据弦高误差和加速度误差公式使得刀具倒棱是更加的平稳且精确;

[0077] 最后结合获得的螺旋锥齿轮齿廓线上的数据点以及改进的NURBS曲线插补算法,使得倒圆角刀具获得一个精确的完整的齿廓弧面倒棱轨迹。

[0078] 步骤4:将以上全部控制流程集成到以C#为开发基础的软件中:

[0079] 在VS2015软件中打开Visual C#模板下的Windows窗体应用程序,编写控制程序,用户在登陆界面输入登录名和登录密码,进入到功能界面,功能界面中包括机床各轴状态检测、机床管理、工件管理、刀具管理、数据库管理、插补运动、NURBS曲线以及调用Matlab绘图这些功能。

[0080] 步骤5:固高运控卡控制机床完成对齿轮齿廓的弧面倒棱:

[0081] 操作者向计算机上的软件中,输入需要的各项参数后,调用固高运动控制卡中的动态链接库,向机床发送高速脉冲指令,以达到控制开放式数控机床完成齿轮的齿廓弧面倒棱加工。

[0082] 所述步骤1中齿轮的齿顶棱线方程计算过程:

[0083] 综合分析螺旋锥齿轮的切齿原理以及实际加工过程中的工艺参数和刀具参数,得出这些参数都与螺旋锥齿轮的节锥面有关,先对螺旋锥齿轮齿槽中心处节锥面上的假想齿

线的解析式方程进行求解,而后根据获得的假想齿线方程与齿顶棱线在当量齿轮下的关系,推导出齿顶棱线方程。

[0084] 所述步骤2中在Matlab软件里仿真出齿廓曲线的三维曲线图,并提取若干数据点步骤如下:

[0085] 设置C#与Matlab的配置环境,C#调用Matlab中的Figure并嵌入到Winform窗体,根据前面计算出的齿廓曲线方程,绘制出三维图,而后提取相应的数据点到C#中的TextBox控件中,并对其进行保存至txt文件中。

[0086] 所述步骤3中的倒棱刀具为倒圆角刀具:

[0087] 传统的齿廓倒棱工艺是将棱边加工成 45° 左右的斜面,但同时会产生新的较小棱边,因此选择倒圆角刀具,给齿廓棱边采取弧面倒棱,用圆面光滑连接齿廓棱线的两侧,可以完全消除齿轮的棱边。

[0088] 所述步骤5中的机床完成对齿轮齿廓的弧面倒棱:

[0089] 本实施例中的螺旋锥齿轮是弧齿锥齿轮,两轮的轴线相交,且相交的角度为 90° 度。小螺旋锥齿轮的轴线与机床的Z轴重合,机床的C轴带动齿轮做旋转运动,首先刀具在齿轮的小端处执行弧齿倒棱指令,当走完一个完整的齿廓后,刀具提起一定高度,此时机床C轴转动一定的角度,使得待加工的齿轮旋转到下一个完整的齿廓处,刀具开始回到倒棱的起始位置,开始下一个齿廓的倒棱,这样不断重复,直到齿轮小端的轮齿完全加工结束,小螺旋锥齿轮大端的齿廓弧面倒棱以及大螺旋锥齿轮的大小端齿廓弧面倒棱均是如此。

[0090] 以上显示和描述了本发明的基本原理、主要特征和本发明的优点。本行业的技术人员应该了解,本发明不受上述实施例的限制,上述实施例和说明书中描述的仅为发明的优选例,并不用来限制本发明,在不脱离本发明新型精神和范围的前提下,本发明还会有各种变化和改进,这些变化和改进都落入要求保护的本发明范围内。本发明要求保护范围由所附的权利要求书及其等效物界定。

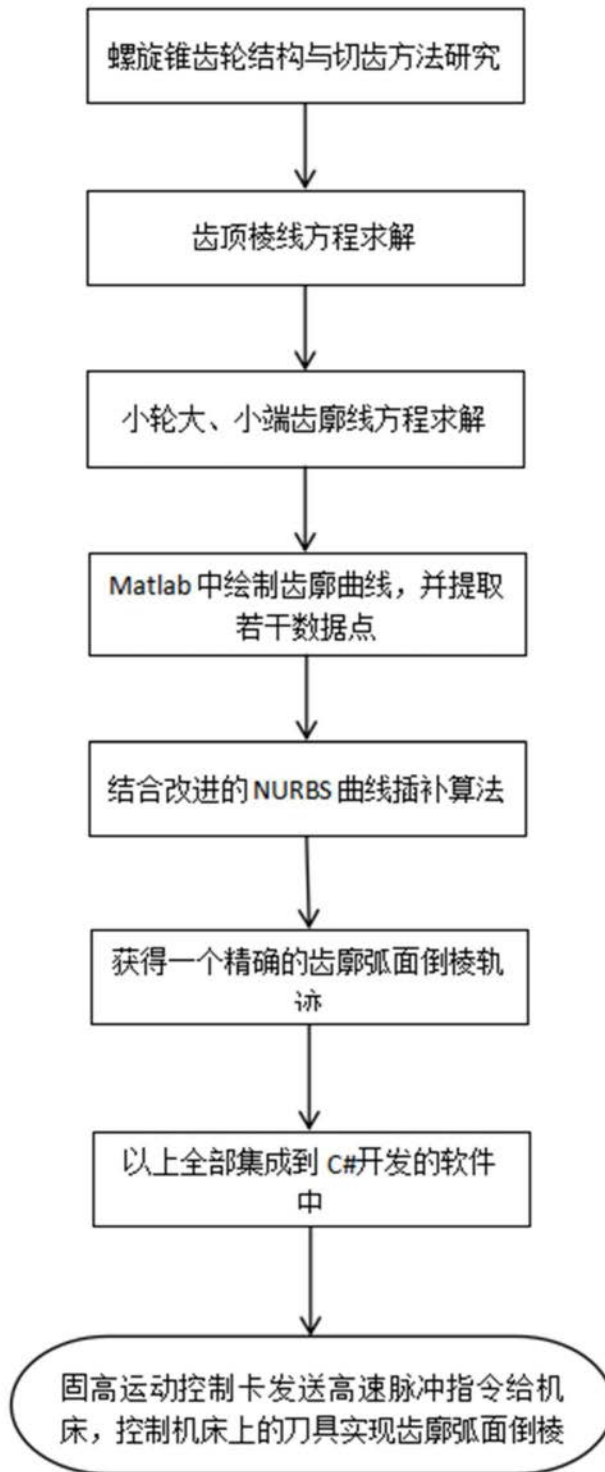


图1

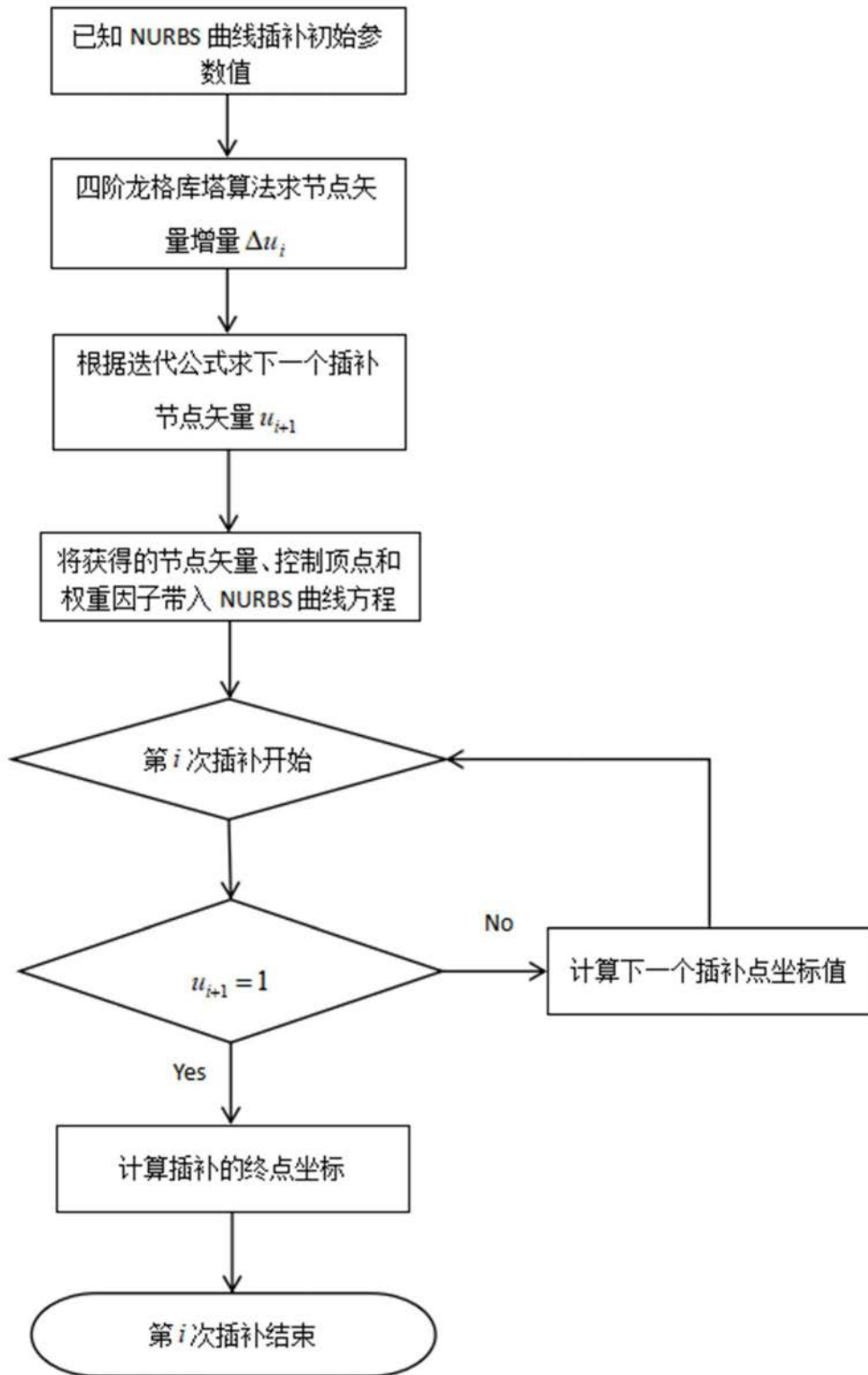


图2

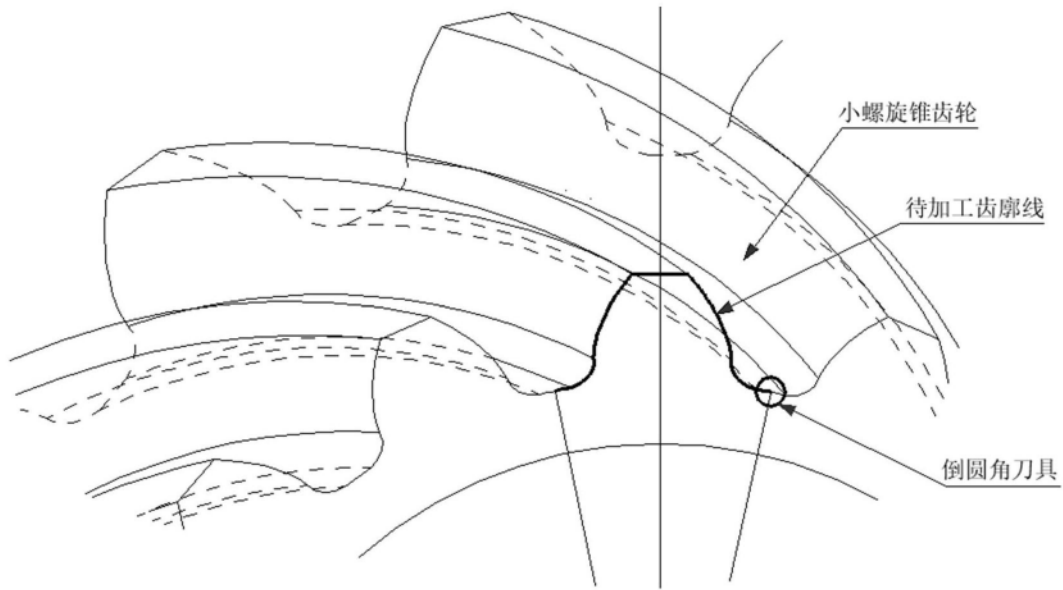


图3

Figure 4 is a screenshot of a software interface titled "数据库管理" (Database Management). The interface is divided into three main sections: "机床数据库" (Machine Database), "刀具数据库" (Tool Database), and "工件数据库" (Workpiece Database). Each section contains input fields for various parameters and a "传入数据库" (Enter to Database) button.

- 机床数据库 (Machine Database):** Fields include 机床编号 (Machine ID), 机床名称 (Machine Name), 机床类型 (Machine Type), X轴偏置 (X-axis offset), Y轴偏置 (Y-axis offset), Z轴偏置 (Z-axis offset), A轴偏置 (A-axis offset), and C轴偏置 (C-axis offset). A "传入数据库" button is located below these fields.
- 刀具数据库 (Tool Database):** Fields include 刀具编号 (Tool ID), 刀具名称 (Tool Name), 距离 (Distance), 圆弧半径 (Arc radius), 倒角类型 (Chamfer type), 角度 (Angle), 线速度 (Line speed), 刀具刃数 (Tool edge count), and 每齿进给量 (Feed per tooth). A "传入数据库" button is located below these fields.
- 工件数据库 (Workpiece Database):** Fields include 齿轮编号 (Gear ID), 齿数 (Number of teeth), 大端模数 (Large end module), 法向压力角 (Normal pressure angle), 螺旋角 (Helix angle), 齿宽 (Tooth width), 旋向 (Hand), 轴交角 (Shaft intersection angle), 节锥角 (Pitch cone angle), 齿顶高系数 (Addendum coefficient), 顶隙系数 (Clearance coefficient), 齿根圆角半径 (Root fillet radius), 刀盘名义半径 (Tool disk nominal radius), 径向变位系数 (Radial addendum coefficient), and 切向变位系数 (Tangential addendum coefficient). A "传入数据库" button is located below these fields.

图4