

8-5-2020

3-Dimensional Kinematics Simulation of Gear Hobbing

Rongchuang Zhang

School of Mechanical Engineering and Automation, Northeastern University, Shenyang 110819, China;

Wang Jun

School of Mechanical Engineering and Automation, Northeastern University, Shenyang 110819, China;

Wang Bo

School of Mechanical Engineering and Automation, Northeastern University, Shenyang 110819, China;

Wanshan Wang

School of Mechanical Engineering and Automation, Northeastern University, Shenyang 110819, China;

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the Artificial Intelligence and Robotics Commons, Computer Engineering Commons, Numerical Analysis and Scientific Computing Commons, Operations Research, Systems Engineering and Industrial Engineering Commons, and the Systems Science Commons

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

3-Dimensional Kinematics Simulation of Gear Hobbing

Abstract

Abstract: *To save inevitable modeling insufficiencies owing to the simplified modeling strategie, 3-dimensional kinematics simulation of gear hobbing based on solid modeling was developed.* On the basis of the kinematic relationship and positional relationships between the hob cutter and work piece, the vector model of the gear hobbing motion based time-driven was put forward. Based on UG Secondary Development, geometrical model of hob tooth rake face and curvilinear model of hob tooth path were developed, and the swept geometric entity of the hob tooth was developed through the use of the combination of these two models. The intersection of every swept geometric entity and instantly formed working gear gap could be calculated by means of Boolean operation, by which the undeformed chip and gear gap profile could be obtained. The confirmation of the validity and accuracy of the proposed method was accomplished by comparison between the produced gear gap profile and theoretical ones.

Keywords

gear hobbing simulation, solid modeling, undeformed chip, vector model

Recommended Citation

Zhang Rongchuang, Wang Jun, Wang Bo, Wang Wanshan. 3-Dimensional Kinematics Simulation of Gear Hobbing[J]. Journal of System Simulation, 2015, 27(11): 2729-2734.

滚齿加工运动三维仿真

张荣闯, 王军, 王博, 王宛山

(东北大学机械工程与自动化学院, 沈阳 110819)

摘要: 针对滚齿加工仿真中由于模型简化而带来的仿真精度问题, 提出了基于实体造型的滚齿加工运动三维仿真方法; 通过对滚刀与工件之间的运动关系、位置关系分析, 建立了基于时间驱动的滚齿加工运动矢量模型。基于 UG (Unigraphics NX) 二次开发平台, 分别构建了滚刀刀齿前刀面几何模型与刀齿空间运动轨迹曲线几何模型, 并将二者进行联立构造出滚刀刀齿空间三维扫掠几何实体。将每个工作刀齿所形成的刀齿扫掠几何实体与瞬时齿槽几何实体进行布尔减运算, 得到各刀齿在其展成位置切削去除的未变形几何切屑实体与最终仿真齿廓几何模型。齿轮端面仿真齿廓与理论渐开线齿廓比较, 验证了所提出方法的有效性与精确性。

关键词: 滚齿加工仿真; 实体造型; 未变形切屑; 矢量模型

中图分类号: TH164 文献标识码: A 文章编号: 1004-731X (2015) 11-2729-06

3-Dimensional Kinematics Simulation of Gear Hobbing

Zhang Rongchuang, Wang Jun, Wang Bo, Wang Wanshan

(School of Mechanical Engineering and Automation, Northeastern University, Shenyang 110819, China)

Abstract: To save inevitable modeling insufficiencies owing to the simplified modeling strategies, 3-dimensional kinematics simulation of gear hobbing based on solid modeling was developed. On the basis of the kinematic relationship and positional relationships between the hob cutter and work piece, the vector model of the gear hobbing motion based time-driven was put forward. Based on UG Secondary Development, geometrical model of hob tooth rake face and curvilinear model of hob tooth path were developed, and the swept geometric entity of the hob tooth was developed through the use of the combination of these two models. The intersection of every swept geometric entity and instantly formed working gear gap could be calculated by means of Boolean operation, by which the undeformed chip and gear gap profile could be obtained. The confirmation of the validity and accuracy of the proposed method was accomplished by comparison between the produced gear gap profile and theoretical ones.

Keywords: gear hobbing simulation; solid modeling; undeformed chip; vector model

引言

滚齿加工具有生产效率高、通用性好的技术特点, 是国内外应用最广泛的齿轮加工工艺。与传统

的铣削、车削等加工方式相比, 其复杂刀具几何、运动关系以及变化的切屑流动特性使其具有多切削刃、非自由切削和断续重载切削等特点^[1-2]。

研究者已经通过计算机辅助设计来实现未变形切屑的提取、滚削力与刀具磨损特性的预测。Antoniadis^[3-4]等人建立了基于有限元仿真技术的滚刀磨损预测模型, 同时借助 FRSFEM 仿真软件分析了加工工艺参数对刀具寿命的影响。Bouzakis^[5],



收稿日期: 2014-06-09 修回日期: 2014-08-27;
基金项目: 国家 863 高技术研究发展计划(2012AA041303);
作者简介: 张荣闯(1984-), 男, 辽宁辽阳, 博士生, 研究方向为数字化设计与制造; 王军(1956-), 男, 辽宁丹东, 博士, 教授、博导, 研究方向为先进制造技术。

<http://www.china-simulation.com>

• 2729 •

Gutmann P^[6]和 Abood A M^[7]通过几何分析方法,建立了瞬时滚削力预测模型; Lars Vedmar^[8-9]等人通过数值计算实现了齿廓粗糙度、未变形切屑参数化建模。上述研究中所开发出的程序几乎都采用了模型简化策略,即将三维空间下的滚齿加工问题简化为二维平面问题,致使预测出物理量与实际值存在一定差距。Dimitriou^[10-11]等人利用 CAD 实体造型软件开发滚齿加工仿真系统 HOB3D, 实现了未变形切屑提取与动态滚削力预测; 然而在阐述该系统的相关文献中,并没有对滚刀刀齿运动轨迹精确建模方法等关键问题进行详细阐述。蒲太平^[12]、汪中厚^[13]等人以 CATIAV5 为建模平台对滚齿加工过程进行仿真,其仿真目的仅限于齿轮齿廓三维几何建模。

综上,本文提出了一种基于实体造型的滚齿加工运动三维仿真方法;其主要特点是充分利用几何实体精确建模功能,通过实体之间的布尔运算来实现滚齿加工材料去除仿真;仿真结果不仅输出齿轮齿廓几何模型,同时也实现了未变形切屑精确三维

几何建模,为滚齿加工动态切削力等加工机理研究提供前期条件。

1 基于实体造型的滚齿加工运动三维仿真流程

图 1 所示为基于实体造型的滚齿加工运动三维仿真流程。当输入加工参数之后,仿真系统将自动创建工件几何实体,求解滚刀刀齿前刀面数学模型并对其进行空间几何建模。同时,程序也将求解出滚刀工作刀齿数目。依据滚刀和工件之间的运动关系、位置关系确定每个工作刀齿在切削过程中所走过的刀齿运动轨迹并对其进行空间曲线精确建模。刀齿前刀面几何模型与刀齿运动轨迹曲线联合生成滚刀刀齿扫掠体,刀齿扫掠体与瞬时齿槽几何实体之间的布尔运算形成未变形切屑以及新的瞬时齿槽。仿真结束后将输出各个刀齿在展成切削过程中去除的未变形切屑以及最终齿轮齿廓几何模型。

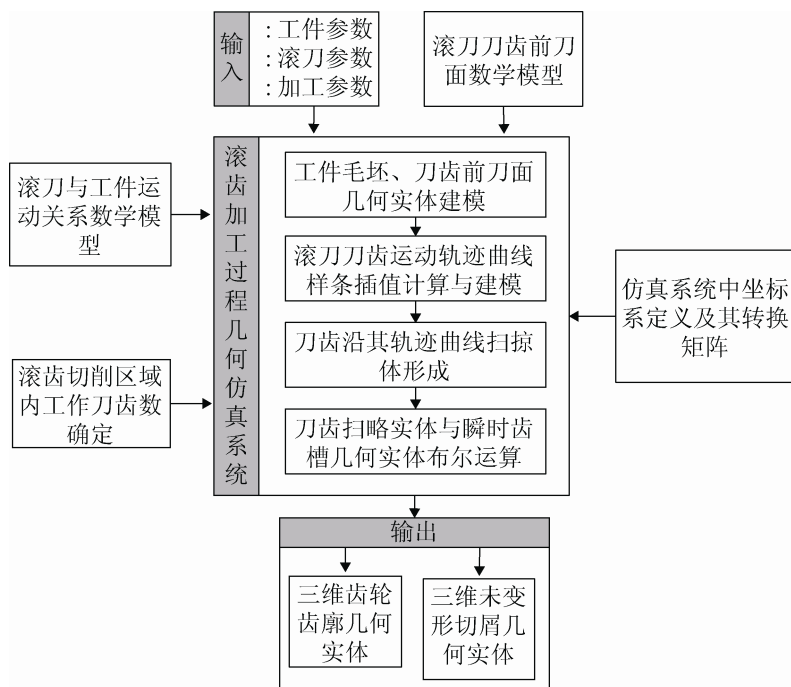


图 1 基于实体造型的滚齿加工运动三维仿真流程

2 滚齿加工运动矢量建模

采用六轴全数控滚齿机加工直齿轮为例进行研究; 以时间 t 为驱动变量描述加工过程中位置关系和运动关系。如图 2 所示为六轴全数控滚齿机示意简图, 其中数控轴分别为: 径向进给轴 (Y 轴); 轴向进给轴 (Z 轴); 切向运动轴 (X 轴); 工作台回转轴 (C 轴); 滚刀主轴回转轴 (B 轴); 刀架转角回转轴 (A 轴)。图 3 为描述滚齿加工运动过程的基本矢量模型。坐标系 $S_h(X_h, Y_h, Z_h)$ 和 $S_p(X_p, Y_p, Z_p)$ 分别与滚刀和工件固定连接; 坐标系 $S_f(X_f, Y_f, Z_f)$ 与机床床身固定连接, 定义为坐标系系统中的绝对坐标系; 坐标系 $S_r(X_r, Y_r, Z_r)$ 为参考坐标系。表 1 为直齿轮滚齿加工工艺参数表。

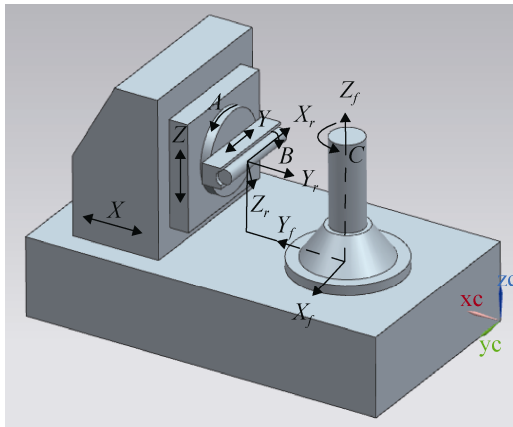


图 2 六轴全数控滚齿机示意简图

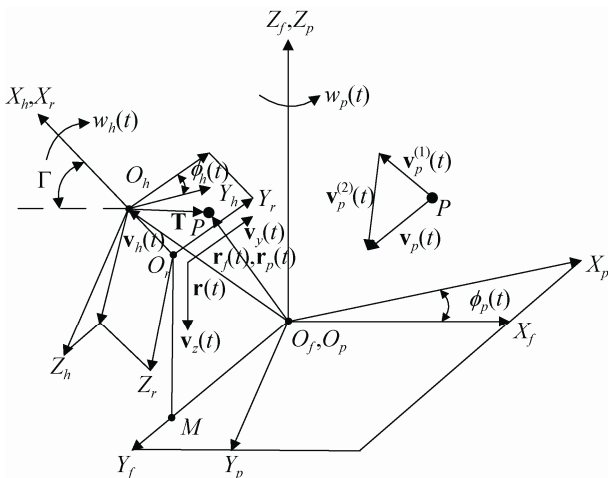


图 3 滚齿加工运动基本矢量模型

表 1 直齿轮滚齿加工工艺参数

参数类别	参数名称	符号
工件参数	齿数	Z_p
	模数	m_n
	压力角	α_c
	外径	d_h
滚刀参数	顶刃圆角	r_t
	头数	Z_w
	容屑槽数	G_n
	导程角	γ_0
加工参数	切削深度	h_c
	进给量	f_a
	顺铣/逆铣	$-/+$

滚刀与工件之间主要包括 3 个不同的运动, 滚刀旋转运动 $w_h(t)$ 、轴向进给运动 $\pm f_a$ 、工件旋转运动 $w_p(t)$ 。动态变量 $l_y(t)$, $l_z(t)$, $l_h(t)$, $\phi_h(t)$, $\phi_p(t)$ 描述 t 时刻加工系统瞬时位置。

$l_y(t) = |\overline{O_f M}|$, 表示滚刀与工件的径向进给方向中心; $v_y(t) = 0$ 时, $l_y(t) = l_{y0} = r_h + r_p - h_c$, r_h , r_p 分别为滚刀与工件的半径。

$l_z(t) = |\overline{M O_r}|$, 表示滚刀与工件的轴向进给方向中心距; $l_z(t) = l_{z0} \pm v_z(t) \times t$; $v_y(t) = f_a$ 时, l_{z0} 表示 $t=0$ 滚刀距离工件上表面垂直高度。

$l_h(t) = |\overline{O_r O_h}|$, 表示滚刀与工件的切向进给方向中心距; $v_h(t) = 0$ 时, $l_h(t) = l_{h0}$, 表示滚刀轴向串刀位置。

Γ 为滚刀安装角: $\Gamma = |\gamma_0|$ 。

滚刀与工件的运动关系:

$$K = \frac{\phi_h(t)}{\phi_p(t)} = \frac{w_h(t)}{w_p(t)} = \frac{Z_p}{Z_w} \quad (1)$$

通过坐标转换可以获得不同坐标系之间的运动关系。转换矩阵 M_{ij} 表示从坐标系 $S_j(x_j, y_j, z_j)$ 到 $S_i(x_i, y_i, z_i)$ 的坐标转换。从图 3 中所示的运动关系可以得到坐标转换矩阵 M_{rh} , M_{fp} 以及 M_{pr} :

$$[M_{rh}] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & l_{h0} \\ 0 & \cos \phi_h(t) & -\sin \phi_h(t) & 0 \\ 0 & \sin \phi_h(t) & \cos \phi_h(t) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$[M_{fr}] = \begin{bmatrix} -\cos \Gamma & 0 & -\sin \Gamma & 0 \\ 0 & -1 & 0 & \ell_{y0} \\ \sin \Gamma & 0 & -\cos \Gamma & \ell_z(t) \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$[M_{pf}] = \begin{bmatrix} \cos \phi_p(t) & -\sin \phi_p(t) & 0 & 0 \\ \sin \phi_p(t) & \cos \phi_p(t) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

矢量 T 描述 t 时刻滚刀刀齿切削刃任意一点 P 在坐标系 $S_h(X_h, Y_h, Z_h)$ 中的位置矢量；最终描述 t 时刻刀齿切削刃任意一点 P 在工件坐标系 $S_p(x_p, y_p, z_p)$ 中的位置矢量 $r_p(t)$ ，可由矢量 T 经过矩阵转换获得：

$$r_p(t) = [M_{pf}][M_{fr}][M_{rh}]T \quad (5)$$

基于图 2 和图 3 所描述的滚刀与工件之间的运动关系， t 时刻滚刀刀齿切削刃任意一点 P 在坐标系 $S_p(x_p, y_p, z_p)$ 下的速度矢量描述为：

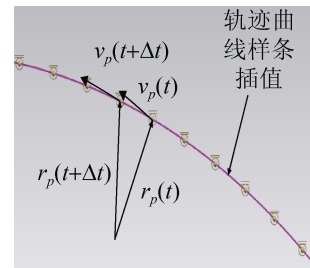
$$v_p(t) = v_p^1(t) + v_p^2(t) \quad (6)$$

其中： $v_p^1(t) = M_{pf}v_f(t)$ ， $v_p^2(t) = -w_p(t) \times r_f(t)$ 。

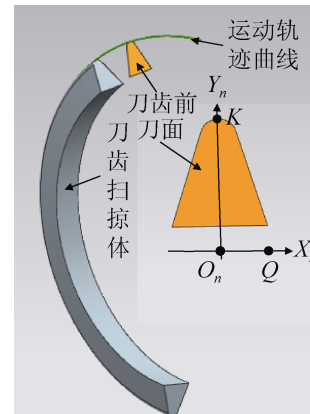
3 滚齿加工运动三维仿真过程具体实现

滚齿加工运动三维仿真主要是通过滚刀刀齿扫掠体与瞬时齿槽之间的布尔运算来实现工件材料去除过程。扫掠体是刀齿前刀面几何模型沿着刀齿运动轨迹曲线扫掠而成。本文中将刀齿顶刃中点 K 在刀齿运动过程中所形成的轨迹定义为刀齿运动轨迹。由式(5)和式(6)可以得到任意时刻 t 刀齿运动轨迹点在工件坐标系 $S_p(x_p, y_p, z_p)$ 下的位置矢量 $r_p(t)$ 以及该点速度矢量 $v_p(t)$ 。在计算机图形学中，可以通过插值点与该点一阶导矢的数值插值来构造样条曲线^[14]。同样的，本文中指定刀齿运动轨迹点空间坐标位置为插值点，该点的速度矢量为二阶导矢，通过样条曲线插值实现刀齿运动轨迹曲线建模。如图 4(a)所示为样条曲线插值后得到的刀齿运动轨迹曲线，该曲线的插值精度主要取决于轨迹点数量与插值算法计算效率。

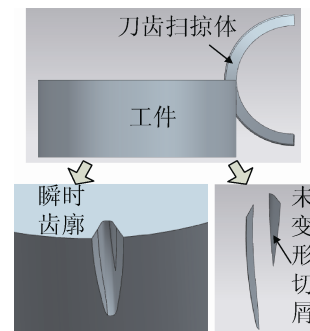
图 4(b)中，黄色模型区域为滚刀刀齿前刀面几何模型，其在时刻 t 的空间位置由刀齿前刀面上的点 K, O_n, Q 共同决定。刀齿在各个旋转位置得到的刀齿前刀面几何模型与刀齿空间走刀轨迹进行联立，通过几何实体扫掠建模得到滚刀刀齿扫掠体。将得到的扫掠体与瞬时齿槽进行布尔求差和求交运算，分别得到下一刀齿在其展成加工时瞬时齿槽和该刀齿加工过程中去除的未变形切屑几何模型，如图 4(c)所示。



(a) 刀齿运动轨迹曲线



(b) 滚刀刀齿扫掠体图



(c) 刀齿扫掠体与工件布尔运算

图 4 滚齿加工运动三维仿真具体实现过程

4 仿真实例与结果分析

仿真刀具采用标准齿轮滚刀, 以直齿轮加工为例, 其参数为: 模数 $m_n=3$, 齿数 $Z_p=36$, 压力角 $\alpha=20^\circ$, 进给量 1mm/rad , 切削深度 $h_c=\text{全齿深}$ 。

图 5 所示为加工仿真之后所形成的直齿轮齿廓, 在 UG 二次开发环境下提取出齿轮端面齿廓线数据点, 并在 matlab 软件中对其进行曲线拟合。图 6(a)为拟合后形成的仿真齿廓曲线和理论渐开线齿廓示意图。如图 6(b)所示为仿真齿廓在加工过程中不考虑任何外在误差引入、即理想加工状态下滚刀刀齿截断误差的分布曲线, 误差值在 $0.6\mu\text{--}0.8\mu$ 之间, 说明本文所采用仿真方法准确性与合理性。

表 2 所示为不同刀齿在其展成位置时所形成的未变形切屑。

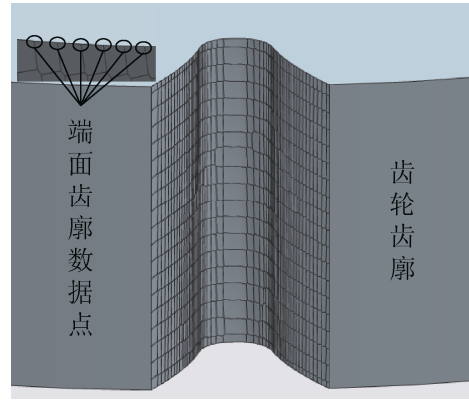
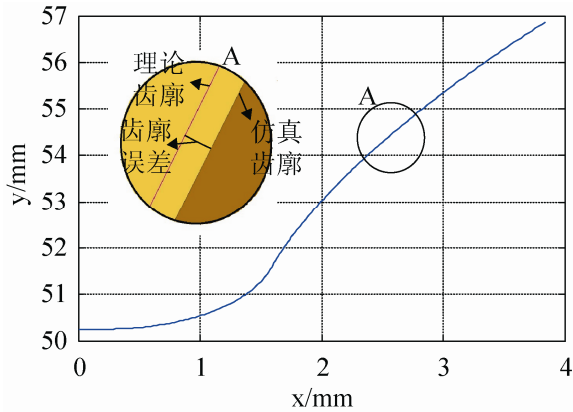
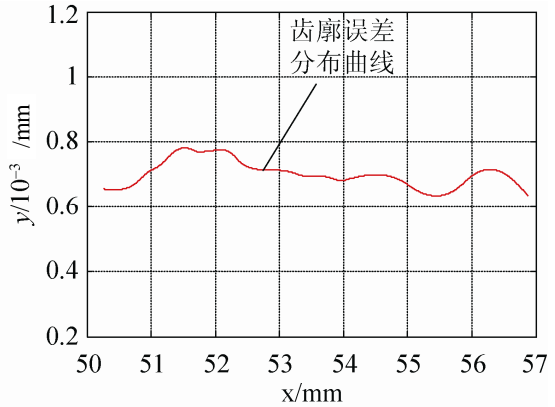


图 5 仿真齿廓



(a) 齿轮端面仿真齿廓与理论齿廓



(b) 齿廓误差分布曲线

图 6 仿真齿廓及其误差

表 2 不同展成位置未变形切屑

N	-12	-11	-10	-9	-8	-7	-6	-5	-4	-3	-2
切屑几何											
N	-1	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
切屑几何											
N	10	11	12	13	14	15	16	17	18		
切屑几何											

5 结论

针对由于模型简化而带来的仿真精度问题,提出了基于实体造型的滚齿加工运动三维仿真方法。该方法利用滚刀刀齿扫掠体与瞬时齿槽之间的布尔运算,实现了滚齿加工材料去除仿真;仿真齿轮端面齿廓与理论渐开线齿廓比较,其误差值 $<0.8\mu$,说明所提出方法具有一定的合理性与准确性。

仿真所形成的齿轮齿廓,经过曲面建模,所形成的三维齿轮几何模型可直接用于齿轮接触特性分析;所形成的未变形切屑,在其上提取出物理模型求解的几何边界条件,可以为动态滚削力、滚刀磨损等加工机理研究奠定基础。

参考文献:

- [1] Winkel O. New Developments in Gear Hobbing [J]. Gear Technology (S0743-6858), 2010(3/4): 45-52.
- [2] Bouzakis K D, Lili E, Michailidis N, *et al.* Manufacturing of cylindrical gears by generating cutting processes: A critical synthesis of analysis methods [J]. CIRP Annals-Manufacturing Technology (S0007-8506), 2008, 57(2): 676-696.
- [3] Antoniadis A, Vidakis N, Bilalis N. Fatigue fracture investigation of cemented carbide tools in gear hobbing, part 1: FEM modeling of fly hobbing and computational interpretation of experimental results [J]. Journal of manufacturing science and engineering (S1087-1357), 2002, 124(4): 784-791.
- [4] Antoniadis A, Vidakis N, Bilalis N. Fatigue fracture investigation of cemented carbide tools in gear hobbing, Part 2: The effect of cutting parameters on the level of tool stresses: A quantitative parametric analysis [J]. Journal of Manufacturing Science and Engineering (S1087-1357), 2002, 124(4): 792-798.
- [5] Bouzakis K D. Konzept und technologische Grundlagen zur automatisierten Erstellung optimaler Bearbeitungsdaten beim Wälzfräsen [M]. Düsseldorf, Deutschland: VDI-Verlag, 1981.
- [6] Gutmann P. Zerspankraftberechnung beim Walzfräsen [D]. Aachen, Deutschland: RWTH Aachen University, 1988.
- [7] Abood A M. Dynamic analysis of the cutting forces in gear hobbing [D]. Newcastle upon Tyne, UK: Newcastle University, 2003.
- [8] Vedmar L. A Parametric Analysis of the Gear Surface Roughness after Hobbing [J]. Journal of Mechanical Design (S1050-0472), 2010, 132(11): 1-8.
- [9] Vedmar L, Andersson C, Stahl J E. A parametric analysis of the undeformed chip geometry in gear hobbing [J]. Journal of manufacturing science and engineering (S1087-1357), 2009, 131(061003): 1-8.
- [10] Vasilis D, Nectarios V, Aristomenis A. Advanced computer aided design simulation of gear hobbing by means of three-dimensional kinematics modeling [J]. Transactions-American Society of Mechanical Engineers Journal of Manufacturing Science and Engineering (S1087-1357), 2007, 129(5): 911-918.
- [11] Dimitriou V, Antoniadis A. CAD-based simulation of the hobbing process for the manufacturing of spur and helical gears [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology (S0268-3768), 2009, 41(3/4): 347-357.
- [12] 蒲太平, 唐进元. 基于 CATIAV5 的圆柱齿轮虚拟加工研究 [J]. 系统仿真学报, 2008, 20(16): 4339-4343.
- [13] 汪中厚, 李刚, 张兴林, 等. 渐开线斜齿轮整体虚拟滚齿仿真及齿面精度研究 [J]. 机械传动, 2012, 36(8): 9-13.
- [14] Piegl L A, Tiller W. The NURBS book [M]. Germany: Springer, 1997.