

范成插齿加工参数对齿轮啮合动态特性的影响

徐文俊¹, 杨宇飞², 郑丽文¹, 林钰珍¹

1.衢州职业技术学院 机电工程学院, 浙江 衢州 324000

2.长春理工大学 机电工程学院, 吉林 长春 130000

DOI:10.61369/ETQM.2026060036

摘 要 : 基于 NX 建立齿轮型刀具范成加工虚拟样机模型, 以刀具模数 m_1 、齿数 Z_1 、压力角 α 、转速 n_1 , 齿坯模数 m_2 、齿数 Z_2 、转速 n_2 , 插齿频率 f 及变位系数 x 为变量, 仿真加工模拟得到不同插齿刀齿数、插齿频率、变位系数对应的齿轮模型, 基于 NX Motion 搭建齿轮啮合动力学模型, 分析加工参数对齿轮啮合传动性能的影响, 探究不同加工工艺下成型齿轮的啮合传动特性, 进一步阐明齿轮啮合传动机理。

关 键 词 : 范成插齿加工; 啮合传动; 动态特性

Influence of Generating Gear Shaping Parameters on Dynamic Meshing Characteristics of Gears

Xu Wenjun¹, Yang Yufei², Zheng Liwen¹, Lin Yuzhen¹

1.College of Mechanical and Electrical Engineering, Quzhou Vocational and Technical College, Quzhou, Zhejiang 324000

2.School of Mechanical and Electrical Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun, Jilin 130000

Abstract : A virtual prototype model for generating machining of gear-type cutting tools is established based on NX, with cutting tool modulus m_1 , number of teeth Z_1 , pressure angle α , rotational speed n_1 , gear blank modulus m_2 , number of teeth Z_2 , rotational speed n_2 , gear shaping frequency f , and modification coefficient x as variables. Through simulation machining, gear models corresponding to different numbers of teeth on the gear shaping cutter, gear shaping frequencies, and modification coefficients are obtained. A gear meshing dynamics model is constructed based on NX Motion to analyze the impact of machining parameters on the gear meshing transmission performance, explore the meshing transmission characteristics of formed gears under different machining processes, and further elucidate the gear meshing transmission mechanism.

Keywords : generating shaping machining; meshing transmission; dynamic characteristics

前言

齿轮作为高端装备核心传动元件, 其啮合振动、噪声与传动平稳性直接决定减速器、伺服装置整机服役性能。范成插齿是内齿圈、双联齿轮、窄齿宽高精度齿轮的主流加工工艺, 插削冲程、圆周进给、径向切深、刀具变位与切削速度等工艺参数, 会通过改变齿形误差、齿面微观形貌、齿距累积偏差形成啮合激励源, 诱发时变啮合刚度波动与传动误差突变, 恶化齿轮系统动态特性。在新能源减速器、精密伺服传动低噪声需求背景下, 厘清插齿工艺——齿面精度——啮合动力学的映射关系, 对工艺参数减振优化、高端齿轮提质降噪具备重要工程价值。

国外研究形成加工误差建模与齿轮动力学两大分支: Ding^[1]等建立了动态磨损预测模型, 揭示了磨损与动力学行为之间的相互作用; Kahraman^[2]、Yuan^[3]等将齿廓偏差、齿距误差引入多自由度非线性动力学方程, 量化制造偏差放大啮合冲击、激发共

振的作用规律, 但未建立切削工艺到齿面缺陷的耦合计算模型, 割裂加工过程与动态响应的内在关联。国内研究分为两类: 一是插齿加工精度控制方向, 汪中厚等揭示范成插齿波纹误差生成机理^[4], 王奇斌、张俊等^{[5][6]}研究了齿距偏差对直齿轮动力学特性的影响, 建立了齿轮副磨损预测模型; 二是齿轮动力学分析方向, 王延开展了正交面齿轮传动系统啮合动力学仿真^[7], 皇甫一樊^[8]、王有成^[9]分别分析齿距累积误差、微观形貌对动态载荷、传动误差的影响。

现有研究多数成果单独开展插齿工艺仿真或齿轮动力学计算, 缺少一体化耦合分析; 仅单一讨论进给、切深等参数的精度影响, 未定量表征多参数耦合下齿面三维形貌对振动幅值、噪声频谱、动载系数的作用规律; 难以直接指导低振动齿轮批量插削工艺参数匹配。本文以直齿圆柱齿轮范成插削过程为对象, 搭建“插齿工艺参数——虚拟仿真加工——啮合动态特性”联合仿真平台, 系统分析关键插齿参数对齿轮啮合动态性能的影响。

基金项目: 浙江省教育厅一般科研项目(Y202353634)。

作者简介: 徐文俊(1981—), 男, 浙江衢州江山人, 硕士研究生, 主要研究方向: 机械设计 CAD/CAE。

一、模型建立

(一) 加工模型建立

在 NX 建立齿轮型刀具范成加工数字化虚拟仿真实验平台, 通过人机界面参数对话框输入参数, 可实时更新得到加工所需模型, 如图 1 所示。

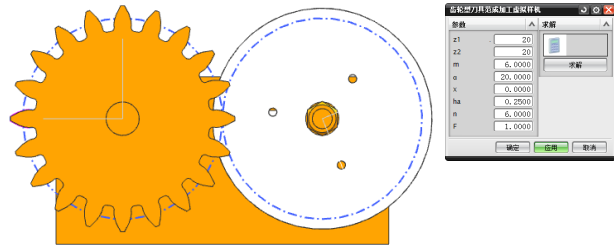


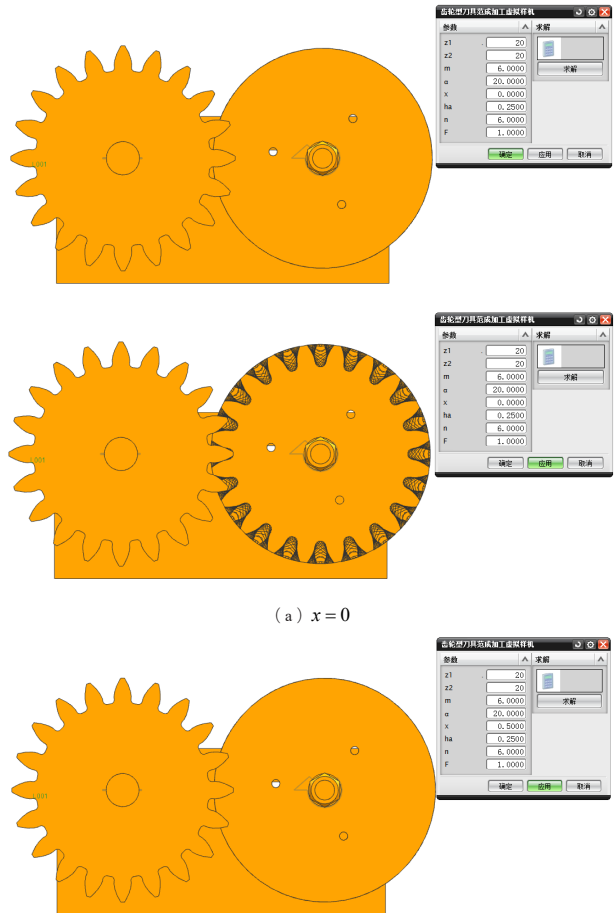
图 1 齿轮型刀具范成加工数字化虚拟仿真实验平台

设置范成插齿加工工艺参数, 变位系数分别为 0、0.5、1.0, 其他加工参数都相同, 如表 1 所示。

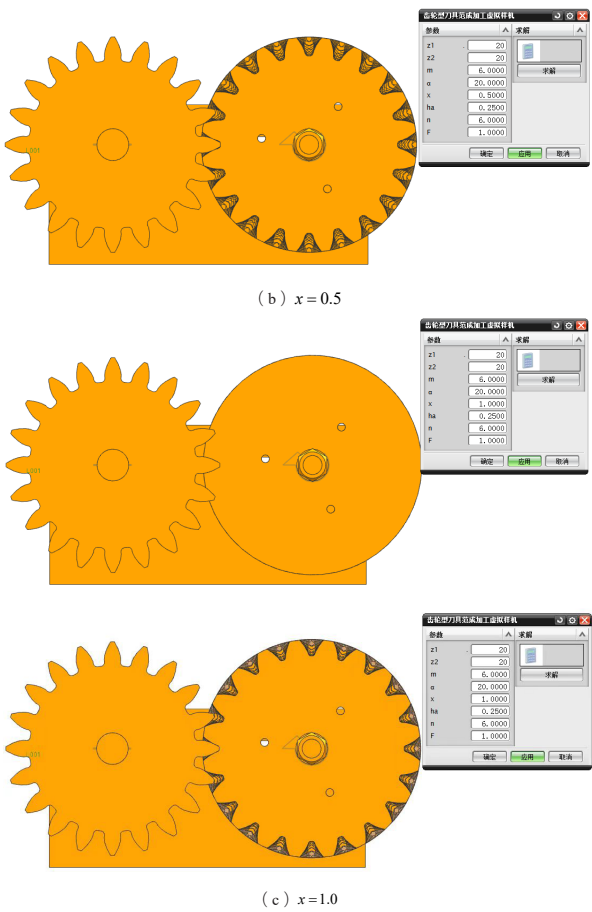
表 1 范成插齿加工参数插齿刀参数

参数组别	z_1	z_2	m	a	x	h_a	n	f
1					0			
2	20	20	6	20	0.5	0.25	6	1
3					1.0			

利用齿轮范成加工虚拟仿真实验平台, 仿真加工得到相同插齿刀齿数、齿坯齿数、模数、插齿频率, 不同变位系数加工出的齿轮模型, 如图 2 所示。



(a) $x=0$



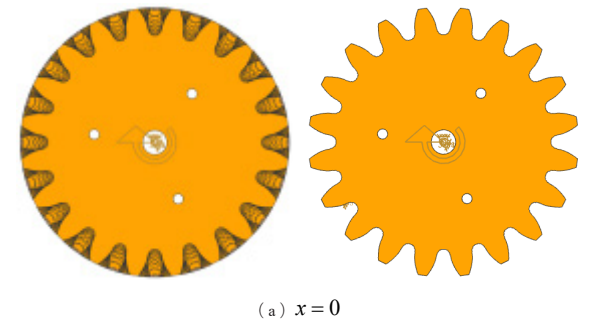
(c) $x=1.0$

图 2 齿轮型刀具范成加工模型及其对应加工出的模型

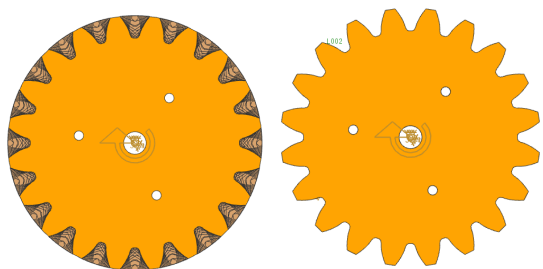
基于齿轮范成加工虚拟仿真实验平台, 在统一插齿刀齿数、齿坯齿数、模数与插齿加工频率的仿真工况下, 仅改变齿轮变位系数开展多组对比范成加工仿真, 得到不同变位系数对应的齿轮成型模型。图 2 (a)、(b)、(c) 分别对应变位系数 $x=0$ 、 $x=0.5$ 、 $x=1.0$ 三组仿真工况, 每组均同步呈现加工毛坯与范成成型后的齿轮实体。由仿真模型可见, 随变位系数增大, 加工成型齿轮的齿廓形态发生规律性变化, 直观复现变位系数对齿轮范成加工齿形成型效果的影响规律, 为变位齿轮齿廓成型机理分析提供可视化依据。

(二) 精确提取被加工齿轮模型

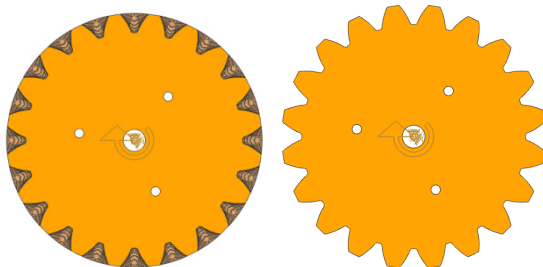
利用 NX 装配切割工具提取被加工齿轮模型, 如图 3 所示。图中三组模型分别对应变位系数 $x=0$ 、 $x=0.5$ 、 $x=1.0$ 三种加工工况, 每组左侧为插齿刀具与齿坯范成加工的复合毛坯, 右侧为经布尔切割分离后得到的完整成型齿轮。从模型对比可见, 不同变位系数下成型齿轮的齿廓厚度、齿顶与齿根几何形态存在明显差异, 该提取方法可完整保留范成运动生成的真实齿廓曲面, 为后续齿轮啮合动力学仿真、传动动态特性分析提供精准模型。



(a) $x=0$



(b) $x=0.5$



(c) $x=1.0$

图3 精确提取被加工齿轮模型

二、NX 齿轮啮合动态性能仿真分析

(一) NX 齿轮啮合3D接触理论

NX 齿轮刚体3D接触基于实体齿面几何碰撞求解啮合动力学，结合 Impact 冲击力模型、库伦摩擦及赫兹接触理论完成力学计算。

法向接触力公式：

$$F_n = \begin{cases} k\delta^e - c\delta & \delta > 0 \\ 0 & \delta < 0 \end{cases}$$

式中： k 为齿面接触刚度， δ 为齿面穿透量， e 为非线性力

指数，金属齿轮取1.1—1.3， c 为阻尼系数。

切向摩擦力遵循库伦摩擦公式：

$$F_f = \mu F_n$$

式中： μ 为齿面摩擦系数。

表2 齿轮啮合3D接触参数

刚度 (N/M)	刚度 指数	材料阻尼 (N-S/mm)	穿透深度 (mm)	回弹阻 尼因子	库伦 摩擦
100000	2	10	0.01	0.25	0.0

软件采用包围盒粗检三角面片精检算法，实时识别多齿啮合接触区域，可还原齿侧间隙冲击、交替啮合、轴向分力等真实啮合特性。区别于理想齿轮副，该方法无预设传动比，依托齿面接触传力，贴合齿轮实际啮合工况，适用于齿轮动态载荷、振动特性仿真分析。

(二) 齿轮啮合动态特性仿真分析

1. 标准齿轮啮合传动仿真分析

建立标准齿轮啮合传动模型，添加如图4所示的约束关系，齿轮间传动依靠3D接触力，采用 NX 实体齿面几何碰撞求解啮合动力学。

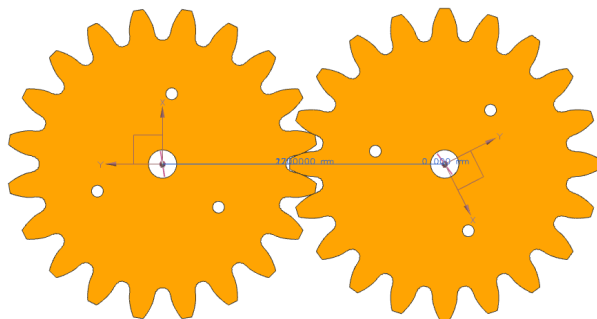


图4 标准齿轮啮合传动模型 ($x=0$)

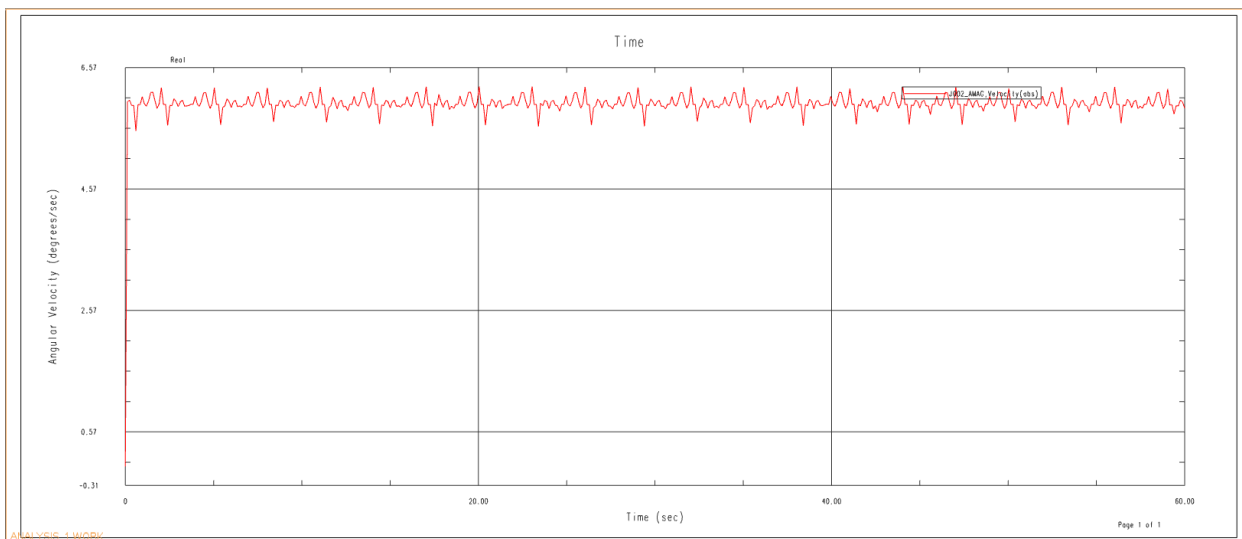


图5 标准齿轮啮合动态特性

2. 标准齿和正变位齿啮合传动仿真分析

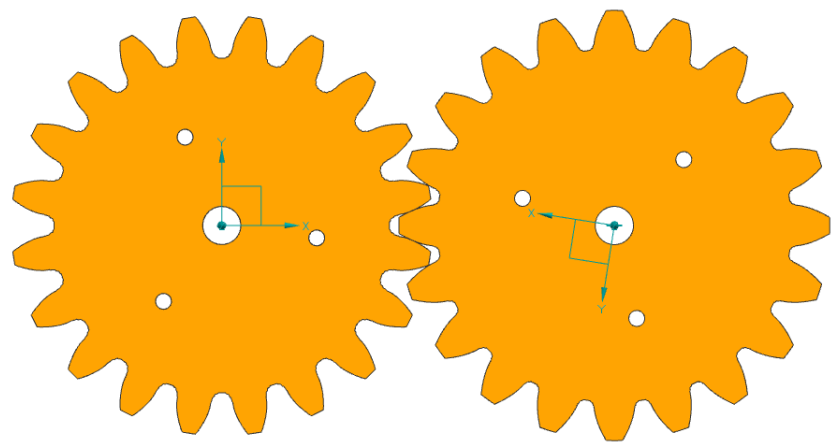


图6 标准齿轮 ($x=0$) 和正变位齿轮 ($x=0.5$) 啮合传动模型

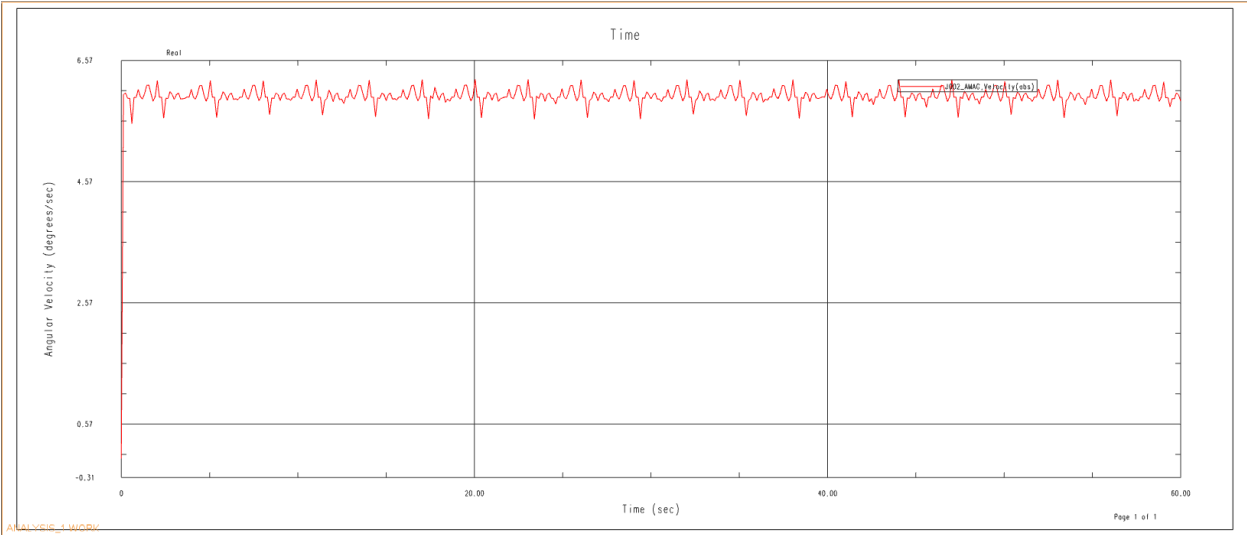


图7 标准齿轮 ($x=0$) 和正变位齿轮 ($x=0.5$) 啮合传动动态特性

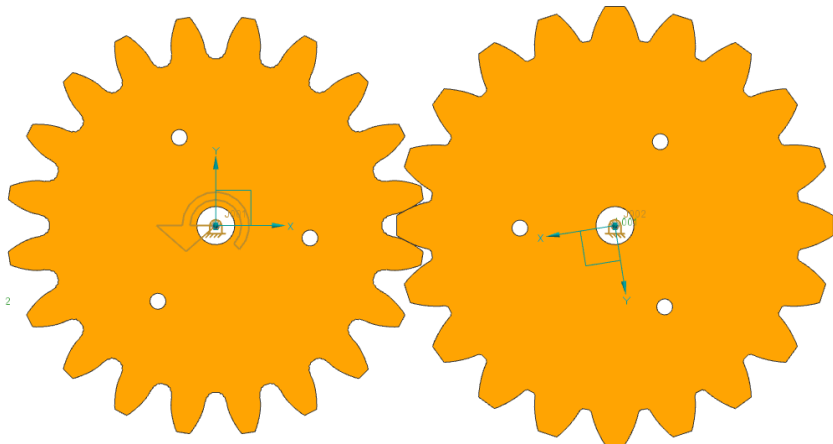


图8 标准齿轮 ($x=0$) 和正变位齿轮 ($x=1.0$) 啮合传动模型

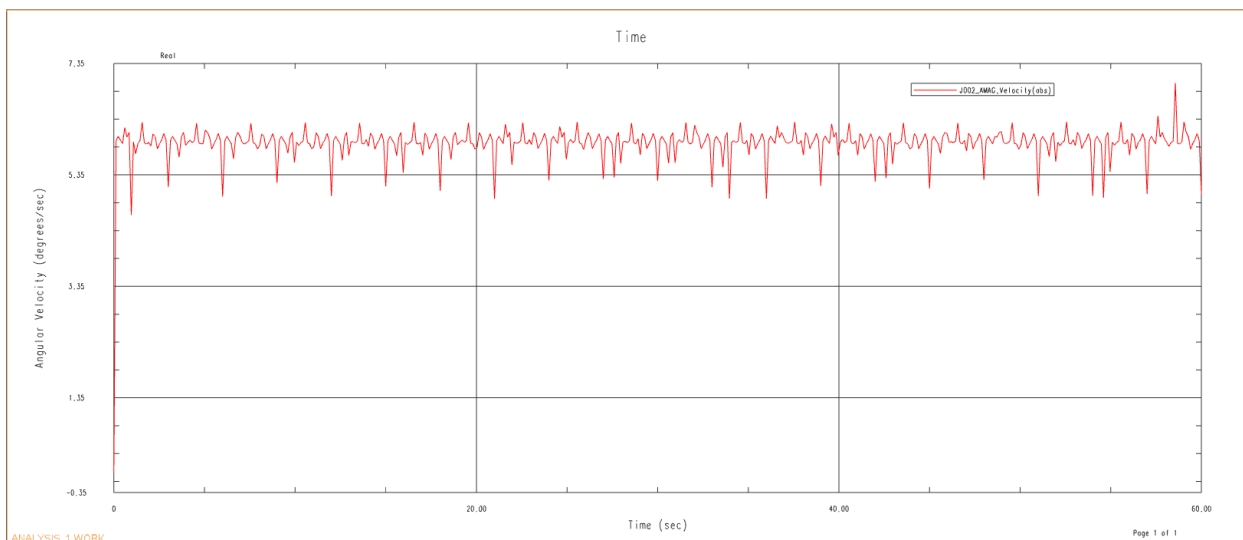


图9 标准齿轮 ($x=0$) 和正变位齿轮 ($x=1.0$) 啮合传动动态特性

3. 正变位齿啮合传动仿真分析

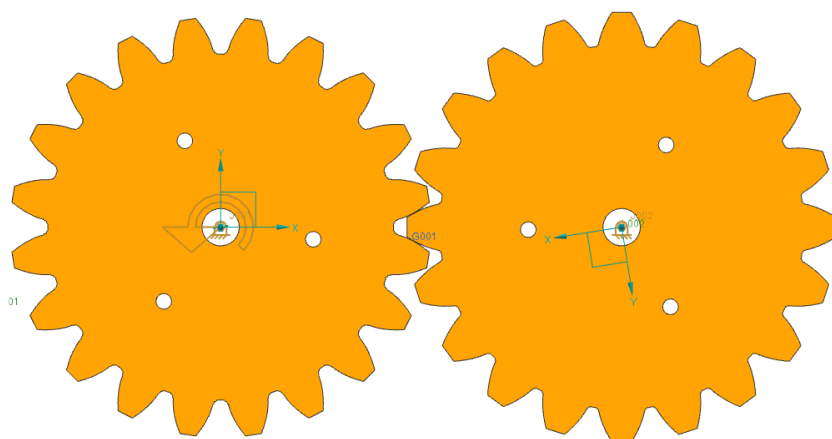


图10 正变位齿轮 ($x=0.5$ 、 $x=1.0$) 啮合传动模型

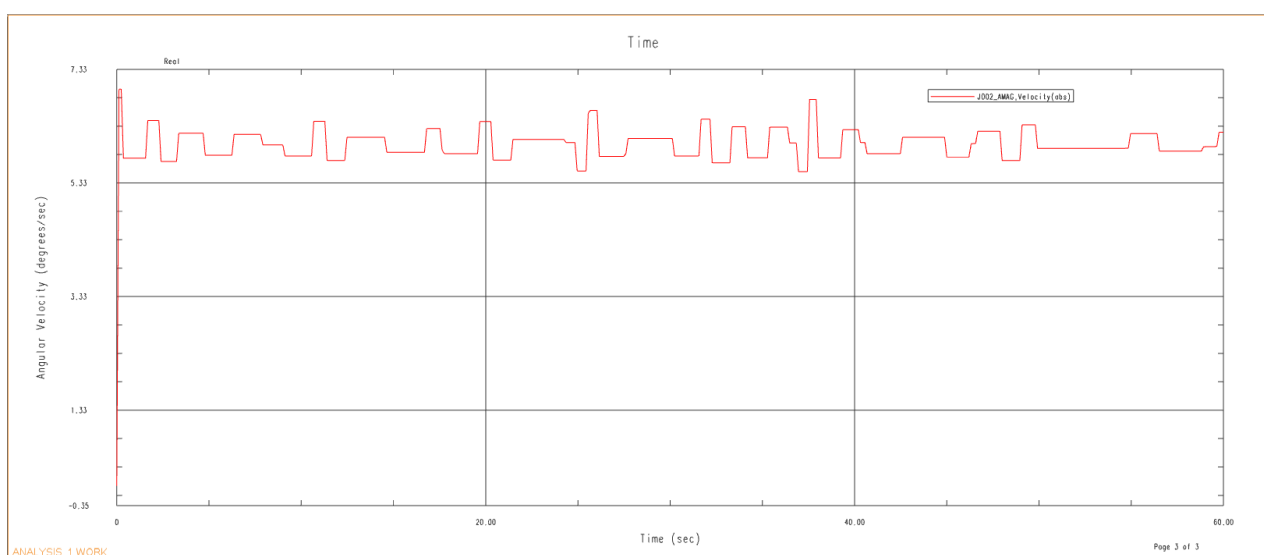


图11 正变位齿轮 ($x=0.5$ 、 $x=1.0$) 啮合传动动态特性

三、结论

(1) 建立齿轮范成加工虚拟仿真实验平台, 仿真加工得到相同插齿刀齿数、齿坯齿数、模数、插齿频率, 不同变位系数加工出的齿轮模型, 加工包络线清晰, 其疏密程度与插齿频率相关。

(2) 通过布尔运算, 精确提取应变位系数 ($x=0$ 、 $x=0.5$ 、 $x=1.0$) 三种加工工况所加工出的齿轮模型, 从模型可以看出齿型

高度变小, 齿宽变大, 齿轮抗弯强度变大。

(3) NX 齿轮啮合传动仿真分析, 标准齿轮啮合传动角速度波动较小, 传动平稳; 标准齿轮 ($x=0$) 和正变位齿轮 ($x=0.5$) 啮合传动与标准齿轮传动特性相似; 标准齿轮 ($x=0$) 和正变位齿轮 ($x=1.0$) 啮合传动角速度波动较大, 传动平稳性较差; 正变位齿轮 ($x=0.5$ 、 $x=1.0$) 啮合传动角速度波动大, 出现阶跃, 传动平稳性进一步降低。

参考文献

[1] Ding H L, Kahraman A. Interactions between nonlinear spur gear dynamics and surface wear[J].Journal of Sound and Vibration, 2007, 307 (3-5): 662-679.

[2] Kahraman A, Singh R. Non-linear dynamics of a geared rotor-bearing system with multiple clearances[J].Journal of Sound and Vibration, 1991, 144 (3): 469-506.

[3] Yuan B, Chang S, Liu G, et al. Quasi-static and dynamic behaviors of helical gear system with manufacturing errors[J].Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2018, 31 (2): 106-114.

[4] 汪中厚, 何中原, 等. 直齿轮的高精度插齿仿真加工与有限元分析 [J]. 机械强度, 2021, 43(05):1221-1227. (2021).

[5] 王奇斌, 张义民. 考虑齿距偏差的直齿轮转子系统振动特性分析 [J]. 机械工程学报, 2016, 52 (13): 131-140.

[6] 张俊, 卞世元, 鲁庆, 等. 准静态工况下渐开线直齿轮齿面磨损建模与分析 [J]. 机械工程学报, 2017, 53 (5): 136-145.

[7] 王延, 田志敏, 姚志国. 正交面齿轮传动系统啮合动力学仿真 [J]. 机械传动, 2013, 37 (11): 57 - 60.

[8] 皇甫一樊, 董兴建, 等. 考虑齿距累积误差的圆柱齿轮动态磨损分析 [J]. 振动工程学报, 2023, 36(06):1706-1713.

[9] 王有成, 刘检华, 等. 考虑齿面微观形貌和热变形的齿轮动态传动误差预测及影响因素分析 [J]. 机械传动, 2025, 49 (10):10-21. (2025).