

RV 减速器参数化仿真与传动误差分析

董淑婧,吕海霆

(大连科技学院,辽宁 大连 116052)

摘 要:以某型 RV 减速器传动系统为研究对象,综合运用 ANSYS 和 RecurDyn 软件,采用参数化建模的方法建立动力学模型,对不同参数条件下的动力学模型进行运动仿真。针对渐开线中心轮、行星轮的磨损情况和渐开线花键的配合间隙变化规律、齿对摩擦润滑状态、齿对接触刚度等影响因素,对 RV 传动装置整机的传动误差影响进行仿真,获得各影响因素对传动精度的影响规律。

关键词:误差分析;三维建模;参数化仿真;动力学模型;RV 减速器

中图分类号:TP182 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5276(2023)06-0094-04

Parametric Simulation and Transmission Error Analysis of RV Reducer

DONG Shujing, LYU Haiting

(Dalian University of Science and Technology, Dalian 116052, China)

Abstract: With the transmission system of a RV reducer as the research object, integrates Creo, ANSYS and RecurDyn software systems to establish the dynamic model of the transmission system by parametric modeling method. The dynamic models under different parameters are simulated. Aimed at the wear of involute center wheel and planetary gear, the change law of fit clearance of involute spline, the friction and lubrication state of tooth pair and other influencing factors, the transmission error influence on RV transmission device is simulated, obtaining the influence law of each influencing factor on the transmission accuracy.

Keywords: error analysis; three-dimensional modeling; parametric simulation; dynamic model; RV reducer

0 引言

RV 减速器是一种拥有良好传动性能、较高回转能力和精度的新型封闭式传动装置^[1]。现代工业生产中产品精度的要求越来越高,作为工业机器人最核心的部件,RV 减速器的精度亟需提高^[2]。因此,RV 减速器的传动误差是目前研究的重点,很多学者在 RV 减速器的误差建模、仿真分析等方面进行了研究。姚云鹏等^[3]进行了谐波齿轮误差来源及频率特性分析,给出了传动误差主成分余弦表达式,并对不同成分组合下的拍频效果进行了分析。张跃明等^[4]利用作用线增量法推导了渐开线行星齿轮传动机构、平行四边形输入机构、摆线针轮传动机构和输出机构的误差传递过程,建立了机构的传动误差数学模型。佟小涛^[5]基于 Adams 建立了 RV 减速器的动态传动误差多体动力学刚柔耦合仿真模型,研究了载荷、零件弹性变形、零件制造误差、零件配合间隙对 RV 减速器动态传动误差的影响。李安民等^[6]采用全局灵敏度分析方法,发现齿侧间隙和啮合刚度是影响齿轮动态传动精度的主要因素,啮合刚度、啮合阻尼和支撑阻尼的相互耦合对齿轮动态啮合力有显著影响,齿轮传动稳定性主要取决于啮合刚度和支撑阻尼。卢琦等^[7]建立了 RV 减速器装配模型,并基于多体动力学仿真技术分析针齿中心圆直径误差与针齿槽直径误差对整机角传动误差的综合影响,结果显示尺寸误差因素组合理论上存在最优配置。麻东升等^[8]通过 SolidWorks 与 Adams 建立 RV

减速器刚柔耦合模型,通过分析不同的误差组合方式得出正等距和负移距、负等距和正移距的误差组合可以有效减少传动误差对整机传动精度的影响,并进一步发现二级传动误差是影响传动精度的主要原因。

本文在相关研究的基础上,运用动力学分析软件 RecurDyn 构建了 RV 减速器的参数化模型,并对影响减速器传动精度的参数进行参数化仿真分析,以获得影响 RV 减速器传动精度的具体影响因素,在系统层级上对 RV 减速器传动精度进行了较全面的仿真分析。

1 RV 减速器的三维建模

1.1 齿轮参数

RV 减速器关键齿轮零件的设计参数见表 1。

表 1 RV 减速器齿轮零件主要参数

参数名称	数值	参数名称	数值
渐开线齿轮模数 m_1/mm	2	内花键模数 m_2/mm	1
渐开线太阳轮齿数 z_1	12	内花键压力角 $\alpha_2/(\circ)$	30
渐开线行星轮齿数 z_2	30	摆线轮齿数 z_a	39
渐开线齿轮压力角 $\alpha_1/(\circ)$	20	针轮齿数 z_b	40
摆线针轮偏心距 a/mm	1.3	针齿中心圆半径 R_z/mm	76.5
针齿半径 r_z/mm	3		

基金项目:辽宁省教育厅 2019 年科学研究项目(L2019007)

第一作者简介:董淑婧(1981—),女,辽宁大连人,教授,硕士,研究方向为现代机械传动,dongshujing817@126.com。

1.2 行星架系统建模与针齿装配体

RV减速器行星架结构由左、右两部分结构通过连接螺栓联接。该型RV减速器有3组互成120°夹角布置的曲柄轴穿过左、右行星架,并通过支撑轴承支撑在轴承孔中。通过零件尺寸建模,装配得到行星架系统的装配体模型如图1(a)所示。RV减速器可以行星架作为输出结构,也可以采用针齿壳作为输出结构的方式输出运动和动力^[9]。在ANSYS软件中建立针齿壳的模型并装配相应数目的针齿,完成针齿装配体的装配和建模,如图1(b)所示。

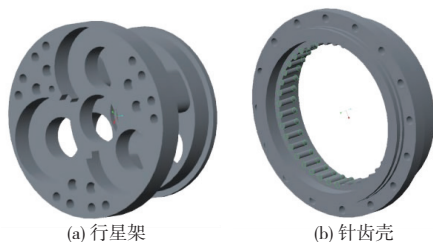


图1 RV减速器建模

1.3 摆线轮的参数化建模

摆线轮是RV减速器的重要核心构件,也是参数化建模的难点所在,根据摆线轮的轮廓方程式(1),在有限元分析软件中进行模型仿真分析^[10]。

$$\begin{cases} x = R_z [\sin\varphi - e\sin(z_b\varphi)] + r_z \cos r \\ y = R_z [\cos\varphi - e\cos(z_b\varphi)] + r_z \sin r \end{cases} \quad (1)$$

本文采用ANSYS软件自带的APDL语言建立RV减速器关键零部件摆线轮的参数化模型。可以通过输入不同的模型参数快速完成摆线轮建模和仿真分析。软件输入参数界面如表1所示。通过输入参数,建立摆线轮模型如图2所示。

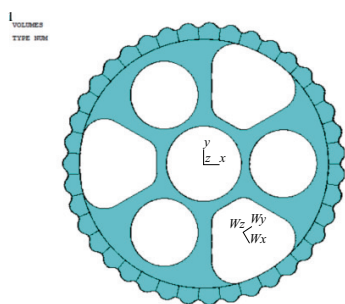


图2 摆线轮参数化模型

2 动力学仿真模型建立

2.1 渐开线行星传动系统子模型

RV减速器第一级传动装置通过输入轴带动中心轮驱动固定在曲柄轴上的渐开线行星轮进行减速。为了方便后续进行参数化的仿真分析,该级传动装置中的各渐开线行星轮均采用RecurDyn软件系统中的Gear子模块进行参数化建模,渐开线行星传动参数建模如图3所示。中心轮齿数 $z_1=12$,行星轮齿数 $z_2=30$,压力角 $\alpha=20^\circ$ 。

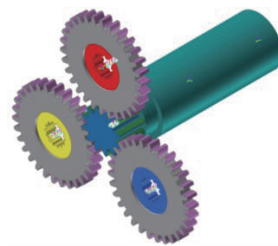


图3 渐开线行星传动参数化建模

该级行星传动的渐开线行星轮作为曲柄轴的一部分将动力和运动传递给后一级的针摆行星传动结构中,其渐开线行星轮是通过中心的花键结构与曲柄轴相连。根据模型参数建立渐开线花键参数化模型,键齿数 $z=14$,压力角为 $\alpha=30^\circ$ 。最后完成的参数化子模型如图3所示。

2.2 摆线轮子模型建模

将ANSYS软件建立的摆线轮参数化模型经过格式变换导入到RecurDyn软件系统中,并设置和建立转臂轴承模型和外花键轴模型,经虚拟装配完成摆线轮子模型系统建模,如图4(a)所示。将渐开线行星轮子模型、摆线轮子模型、针齿模型、行星架模型导入RecurDyn主模型中。在减速器的导入工作完成后,就需要开始确定输入端与输出端,并给每个零件设定接触传动关系。行星架与针齿壳通过虚拟轴承模拟主轴承进行联接。使用planar joint将40个针齿分别与针齿壳联接,完成平面转动副约束。使用geosurface contact将每个针齿的圆柱面与针齿壳的内齿槽接触面进行连接,完成曲面接触副。使用geosurface contact将每个针齿的圆柱面分别与两片行星摆线轮外接触面和针齿壳的内接触面进行连接,完成曲面接触副。建立RV减速器传动系统动力学模型,完成系统建模,如图4(b)所示。

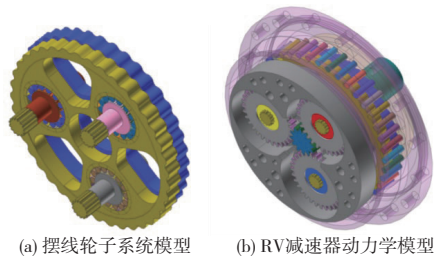


图4 RV减速器参数化模型

3 传动误差仿真分析

3.1 仿真模型验证

在输入轴转动副上输入转速 $n_1=1\,800\text{ r/min}$ 的驱动,模拟减速器启停工作过程。按照式(2)进行驱动端的转速输入。输入轴启动和停止的0.03 s时间内转速缓慢增大到额定转速和逐渐减小到停止。该传动装置的总传动比 $i=101$,根据传动比关系,输入轴和输出轴转速如图5所示,根据传动关系,计算实际传动比平均值 $i_1=100.593$,算得传动比误差 $T_{e,i}=0.05\%$ 。所建模型满足建模要求,验证了模型的正确性。其模型计算结果曲线如图5所示。

$$T_e = \delta_2 - \frac{\delta_1}{i} \quad (2)$$

式中: δ_2 为输出轴转角,"; δ_1 为输入轴转角,"。

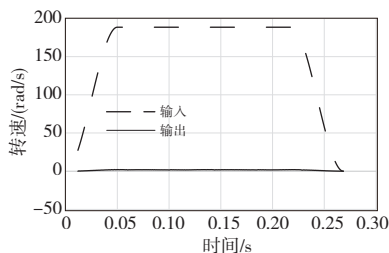


图5 输入、输出轴转速对比

3.2 仿真模型传动误差分析

根据仿真模型计算数据,由式(2)计算RV减速器虚拟仿真模型在传动过程中的传动误差 T_e 。

根据仿真计算结果在一个转动周期内,输出轴平均转角误差为 $42.6''$,模型仿真获得了较高的传动精度。

3.3 不同参数条件下的传动误差分析

RV传动装置中的运动部件在装配过程中要保留一定的润滑间隙,同时在工作过程中不可避免地会产生一定的工作磨损,各运动部件间的润滑状态影响减速器在工作过程中的运动精度。因此本文采用参数化的模型来模拟不同影响因素对运动精度的影响,主要考虑渐开线齿轮磨损、行星轮磨损、渐开线花键安装配合间隙等的影响;同时考虑不同的润滑条件下对运动精度的影响,包括摆线轮与针轮间和渐开线中心轮和行星轮间的摩擦状态等因素。

通过采用RV减速器中不同渐开线中心轮的齿厚反映在一定磨损量条件下不同的参数化模型,在RecurDyn软件系统中进行变参数仿真并输出仿真结果。将齿轮分度圆齿厚磨损量设置为齿轮齿厚的4%,计算磨损量的范围为 $0 \sim 0.14 \text{ mm}$ 。经仿真计算和数据分析,当模拟磨损量在 $0 \sim 0.06 \text{ mm}$ 范围内时,RV减速器传动精度变化均在合理的精度范围内,为较理想的工作状态。当磨损量在 $0.06 \sim 0.14 \text{ mm}$ 之间变化时,传动精度呈指数规律恶化,传动误差最大值约为 $352''$,无法满足精密传动要求,其具体变化规律如图6所示。

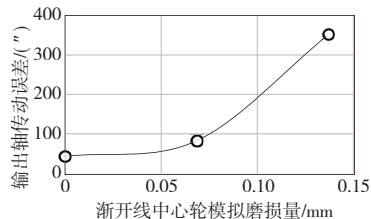


图6 中心轮磨损量与传动误差关系曲线

通过模拟RV减速器中的渐开线行星轮齿厚在一定磨损量条件下的参数化模型,考虑该型RV减速器有3组行星轮共同和中心轮啮合,所以其模拟磨损量取中心轮的1/3进行参数化模拟。在RecurDyn软件系统中进行变参

数仿真并输出仿真结果。磨损量的模拟范围为 $0 \sim 0.05 \text{ mm}$,经仿真计算和数据分析,当模拟磨损量在 $0 \sim 0.025 \text{ mm}$ 范围内时,RV减速器传动精度变化均在合理的精度范围内时,为较理想的工作状态;当磨损量在 $0.025 \sim 0.050 \text{ mm}$ 之间变化时,传动精度呈指数规律恶化,最大传动误差约为 $172''$,具体变化规律如图7所示。通过以上分析可以对具体RV减速器的保精度工作寿命进行预测。

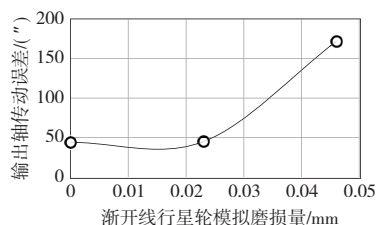


图7 行星轮磨损量与传动误差关系曲线

根据RV减速器样机生产图样要求,渐开线行星齿轮与曲柄轴采用渐开线齿形花键联接。为了便于装配内外花键间采用间隙配合联接,根据公差带范围推算渐开线花键联接的配合间隙范围为 $0.046 \sim 0.097 \text{ mm}$,数据如表2和表3所示。通过参数化模拟构建参数化动力学模型,模拟不同间隙条件下的传动误差情况,得到图8所示的传动误差变化规律。随着配合间隙的增大传动误差在该范围内基本呈线性规律增大,为了保证RV传动有较好的传动精度,配合间隙范围应控制在 $0.046 \sim 0.070 \text{ mm}$ 以内。

表2 渐开线花键公差尺寸参数表 单位:mm

设计参数	外花键齿厚	内花键齿槽
最小实际尺寸	1.525	1.591
最大实际尺寸	1.545	1.622
最大间隙	0.097	0.097
最小间隙	0.046	0.046

表3 仿真分析结果 单位:mm

最大间隙	最小间隙
0.070	0.046

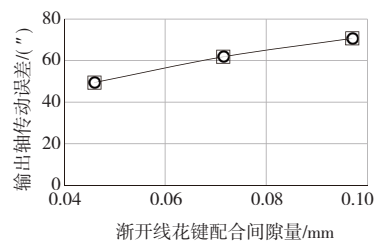


图8 渐开线花键轴配合间隙与传动误差关系曲线

齿对间的摩擦因数大小对啮合传动效果将产生一定的影响,为了模拟该影响因素对RV传动总体传动精度的影响,将齿对间的摩擦因数作为一项可变参数进行参数化仿真分析。通过仿真分析,获得了摩擦因数在 $f=0.01 \sim 0.05$ 不同摩擦状态下的减速器传动误差仿真结果,结果表明总体上摩擦因数对传动精度的影响不大,如图9所示。

同时随着摩擦因数的增大,传动误差略有减小。

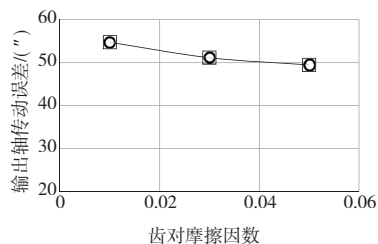


图9 齿对间摩擦因数与传动误差关系曲线

3.4 齿对间接接触力对传动误差的影响

按照STEP函数设置输入轴转速 $n_1 = 1\,800\text{ r/min}$,通过转速驱动RV减速器仿真模型运动,并输出行星架的转速 $n_2 \approx 17.81\text{ r/min}$,根据计算仿真运动的平均传动比约为 $i' = 101.07$,传动过程中输出轴的转速变化规律如图10所示。

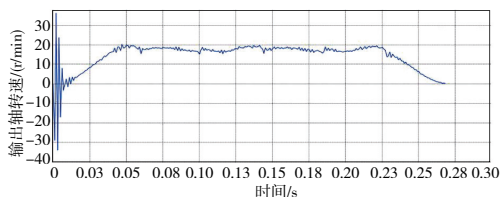


图10 RV减速器输出轴转速变化图

根据仿真分析结果,在仿真过程中摆线轮和针齿间的接触力数据如图11所示。最大载荷为135 N,啮合频率为22 Hz。

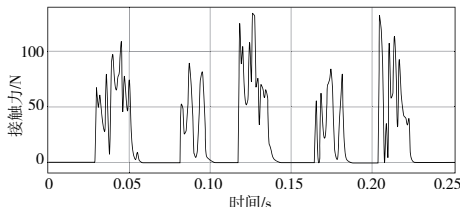


图11 针摆啮合力变化规律

齿对间接接触刚度的变化将对摆线针齿间载荷的大小和变形情况产生影响,进而对传动误差产生影响。根据仿真分析参数的变化情况设置接触刚度系数 K 在10 000~1 000 000之间变化。通过仿真分析,其对传动系统传动误差的影响规律如图12所示。由图可知,接触刚度系数 K 对齿对传动精度有一定的影响,但相对影响较小,合理设置接触刚度范围可以有效提高减速器传动精度。

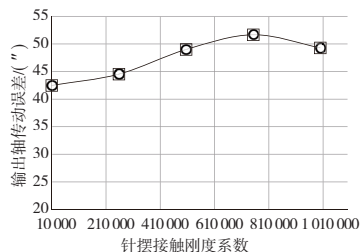


图12 针摆啮合力变化规律

4 结语

本文以某型RV减速器传动系统为研究对象,综合利用ANSYS、RecurDyn软件,采用参数化建模的方法建立了传动系统的动力学模型。对不同参数条件下的动力学模型进行了运动仿真,获得了传动误差的影响因素及变化规律,通过上述分析得到以下结论:

1)通过参数化方法建立的RV减速器模型较好地反映了实际传动装置的传动性能,在基本参数条件下获得了 42.6° 的输出轴转角传动误差,与产品样本上的传动误差范围有较好的一致性;

2)分别考虑第一级渐开线行星传动机构中中心轮和行星轮的磨损情况对传动误差的影响,建立了变参数的动力学模型并进行了仿真分析,在保证传动精度的前提下确定了合理的磨损量范围,中心轮齿厚应控制在 $0 \sim 0.06\text{ mm}$,行星轮控制在 $0 \sim 0.025\text{ mm}$;

3)分析了行星轮装配用渐开线花键不同配合间隙对传动精度的影响,确定了合理的尺寸配合关系;为保证合适的传动精度范围将配合间隙控制在 $0.046 \sim 0.07\text{ mm}$;

4)分析了摩擦因数和接触刚度对传动精度的影响情况,总体上摩擦因数和接触刚度的变化对传动精度的影响较小,固采用合理的润滑条件和零件硬度指标,可以保证RV减速器的稳定传动精度要求。

通过以上分析和仿真实验,为其他尺寸型号的RV减速器产品的定型与改进设计提供了一套高效的仿真分析解决方案。

参考文献:

- [1] 李力行,何卫东,王秀琦,等. 机器人用高精度RV传动的研究[J]. 大连铁道学院学报,1999,20(2):1-11.
- [2] 汪泉,曾利磊,秦争争. 考虑摆线轮齿廓修形的RV减速器齿轮结构多目标优化设计[J]. 机械传动,2020,44(4):54-60.
- [3] 姚云鹏,陈晓霞,邢静忠. 谐波齿轮传动误差主频重构与双向频谱分析[J]. 计算机集成制造系统,2022,28(8):2353-2364.
- [4] 张跃明,朱桂龙,纪妹婷. 工业机器人RV减速器传动机构误差分析[J]. 机械设计与制造,2022(5):261-265,269.
- [5] 佟小涛. 基于虚拟样机技术的RV减速器动态传动误差研究[D]. 杭州:浙江工业大学,2019:31-51.
- [6] 李安民,于友明,李梁,等. 齿轮传动特性影响因素的全局灵敏度分析[J]. 机械工程师,2021(10):163-167.
- [7] 卢琦,何卫东. RV减速器参数化建模及多体动力学仿真[J]. 机械传动,2021,45(9):87-91.
- [8] 麻东升,谭鹏,张彬. RV减速器传动误差特性分析与实验研究[J]. 机床与液压,2021,49(16):145-149.
- [9] 熊奉奎,张明,袁越锦,等. 转台齿轮传动系统的误差建模及其精度分配研究[J]. 机电工程,2021,38(8):952-959.
- [10] 韩林山,曹宸旭,焦文华. RV减速器摆线轮实体结构参数化设计技术研究[J]. 煤矿机械,2020,41(2):10-13.

收稿日期:2022-04-18