

DOI: 10.20098/j.cnki.1001-5132.2022.1009

谐波减速器中波发生器不同安装深度下柔轮变形与应力研究

杨蒙恩¹, 黄 炳², 罗利敏², 陈特欢¹, 李国平¹, 娄军强^{1*}

(1. 宁波大学 浙江省零件轧制成型技术研究重点实验室, 浙江 宁波 315211;

2. 宁波中大力德智能传动股份有限公司, 浙江 宁波 315301)

摘要: 柔轮作为谐波减速器中的核心部件, 其性能直接决定着整个减速器整机的传动性能。因此为了探究波发生器不同安装深度对其性能影响的基本规律, 从而能够更好地控制性能, 本文在建立谐波减速器三维模型基础上, 采用有限元法分析了波发生器在不同安装深度下柔轮的变形规律与应力分布。分析结果表明: 波发生器安装深度从 0.35 mm 增加到 1.15 mm 时, 柔轮最大变形量相对增加了 3.43% 左右, 最大应力相对增加了 3.80% 左右。波发生器安装深度的变化对柔轮在长轴和短轴处的变形影响较大, 并且对柔轮长轴处、短轴处、齿圈前端和筒底过渡区的应力影响较大, 而其他位置影响较小。该结果也为其他相关研究提供了有益参考。

关键词: 谐波减速器; 柔轮; 变形规律; 应力分布; 仿真分析

中图分类号: TH132.46

文献标志码: A

文章编号: 1001-5132 (2023) 04-0001-06

精密减速器在通用机械中发挥着不可或缺的作用, 但是由于技术、生产、管理等原因, 大部分国内企业生产的减速器在质量和使用寿命等方面并不理想, 所以目前大部分国内市场被国外产品所占据。谐波减速器是精密减速器中最重要的一种, 它不仅用于轻型工业机器人, 还广泛地应用于机械臂, 因此谐波减速器的精度和性能直接影响到整个机器人的传动精度和性能^[1-2]。目前国内相关领域的专家已开始对谐波减速器进行了多方面研究, 也取得了一定成果, 但在整体性能、传动精度、使用寿命、新产品开发等方面, 与其他机器人先进企业相比还有较大差距。因此, 谐波减速器的研究和技术突破, 不仅有助于工业机器人的发展, 而且对中国制造 2025 的发展也具有重要意义^[3]。

谐波减速器具有结构简单、重量轻、传动比大、承载能力强、传动精度高、传动效率高等特点^[2], 成为了精密传动中的重要组成部分, 并且由于其独特的优点, 已经被广泛应用于各个领域。预计在不久的将来, 谐波齿轮传动将在传动机构市场中占

据重要地位, 它可通过节约制造材料、降低电能需求、缩小机器人结构尺寸、提高企业工作效率等方式在智能制造业中体现其积极的应用价值^[2]。

目前国内外学者已对谐波减速器柔轮的变形和应力进行了研究。余飞鹏等^[4]采用 ANSYS Workbench 软件分别对谐波减速器柔轮空载及负载状态下柔轮壁厚对其应力及变形影响情况进行仿真分析, 探求了柔轮壁厚对其性能影响的基本规律。Baris 等^[5]通过多边形内角的谐波振荡, 给出了柔性齿轮的变形规律。马亮等^[6]通过 ANSYS Workbench 软件对比分析了柔轮在空载和负载情况下, 柔轮轮齿上最大等效应力和薄壁圆筒最大等效应力随柔轮结构参数的变化规律。

本文以上述研究为基础, 利用仿真分析方法, 进一步对柔轮在波发生器不同安装深度下的变形规律与应力分布开展研究。

1 谐波减速器的组成及传动原理

谐波减速器由柔轮、波发生器和刚轮组成^[7-8],

收稿日期: 2022-10-17.

宁波大学学报(理工版)网址: <http://journalg.nbu.edu.cn/>

基金项目: 宁波市“科技创新 2025”重大专项(2021Z068, 2019B10078, 2018B10005)。

第一作者: 杨蒙恩(1993-), 男, 河南周口人, 在读硕士研究生, 主要研究方向: 谐波减速器性能分析。E-mail: 13137095512@163.com

*通信作者: 娄军强(1986-), 男, 河南开封人, 副教授, 主要研究方向: 谐波减速器性能分析。E-mail: loujunqiang@nbu.edu.cn

而柔轮一般有杯型和礼帽形. 随着行业的发展以及对谐波减速器负载要求的提升, 礼帽形柔轮在负载增加情况下所受应力增幅远远低于杯型柔轮的增幅, 对柔轮寿命和稳定性有着至关重要的影响^[9]. 本文研究的柔轮为礼帽形, 波发生器由柔性轴承和凸轮组成, 刚轮则由内齿圈和圆环组成^[2]. 谐波减速器具体组成结构如图 1 所示.

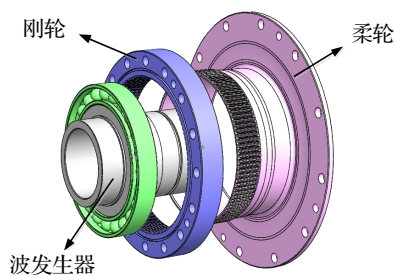


图 1 谐波减速器组成

谐波减速器工作原理与普通齿轮传动存在本质区别: 谐波减速器是利用波发生器强制柔轮发生弹性变形, 并与刚轮啮合, 以实现力和运动传递的新型传动装置, 其工作原理如图 2 所示^[10-12].

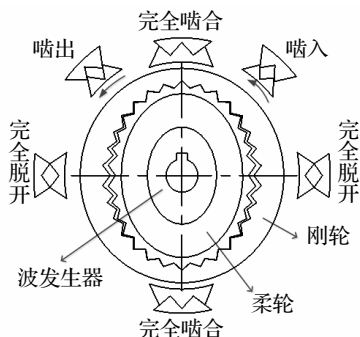
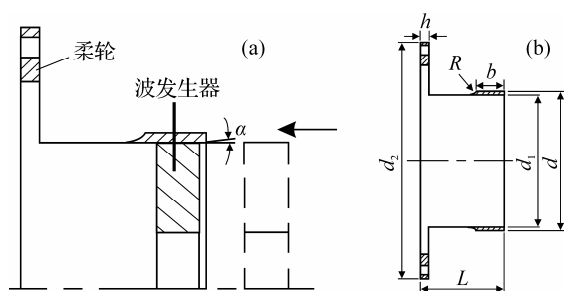


图 2 谐波减速器工作原理图

当谐波减速器完成装配后, 首先波发生器迫使柔轮发生变形, 使柔轮在长轴处与刚轮完全啮合, 在短轴处与刚轮完全脱离; 当刚轮固定后, 波发生器沿图 2 中箭头方向连续转动时, 柔轮将发生周期性的弹性变形, 使得柔轮轮齿与刚轮持续啮合, 并使柔轮相对于刚轮沿波发生器相反方向转动, 从而使刚轮减速, 最终达到减速的目的^[8,13].

如图 3 所示, 当波发生器装入柔轮时, 由于波发生器由凸轮和柔性轴承组成, 凸轮的装入首先会使柔性轴承产生弹性变形, 而柔性轴承变形会使柔轮产生弹性变形, 造成柔轮在长轴处产生开口向上的变形, 使短轴处产生开口向下的变形.



α : 柔轮杯口变形角度; h : 柔轮帽檐厚度; R : 柔轮齿根处的圆角半径; b : 柔轮齿的轴向长度; L : 柔轮轴向总长度; d : 柔轮分度圆直径; d_1 : 柔轮中空内径; d_2 : 柔轮帽檐直径.

图 3 谐波减速器装配过程及尺寸

2 波发生器不同安装深度下柔轮变形规律与应力分布

2.1 波发生器——柔轮模型的建立

2.1.1 有限元模型创建

本文研究的谐波减速器机型为 ZSHF-25-80K-2UH, 其柔轮外观为礼帽形, 并根据柔轮结构参数和尺寸建立简化礼帽形柔轮三维模型(图 4)^[14].

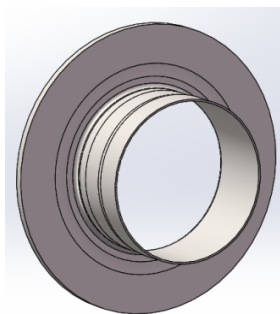


图 4 柔轮结构模型图

2.1.2 材料定义与接触设置

谐波减速器各零件材料属性见表 1.

表 1 谐波减速器零件材料属性

零件	材料	密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	弹性模量/MPa	泊松比
柔轮	SNM439	7.85	2.08	0.3
柔性轴承	GCr15	7.83	2.19	0.3
凸轮	45	7.85	2.00	0.3

有限元软件具有自动定义接触对的功能, 但不能准确识别结构间的干涉问题, 因此需要手动删除自定义的接触对, 并手动添加新的接触对. 如图 5 所示, 柔轮装配体接触对共有 4 对, 接下来分别对其进行定义. 凸轮和柔性轴承内圈间的接触类型设置为摩擦接触, 两者之间紧密接触, 基本不

会发生相对滑动, 接触类型选择摩擦接触, 凸轮为目标面, 柔性轴承内圈为接触面, 摩擦系数设置为 0.15; 修剪接触可以自动减少接触单元数量而加快计算速度, 但是会损失精度, 因此需关闭修剪接触。公式法选择广义拉格朗日法, 小滑动选择关闭, 检查方法选择在高斯点上, 法向刚度选择打开, 系数为 1, 更新刚度设置为每次迭代, 时步控制设置为自动平分^[15]。将柔性轴承内圈和滚珠间的接触类型设置为绑定接触, 计算方法选择自动控制。滚珠和柔性轴承外圈间的接触类型设置为摩擦接触, 其余设置如上。柔性轴承外圈和柔轮的接触类型设置为摩擦接触, 其余设置如上。

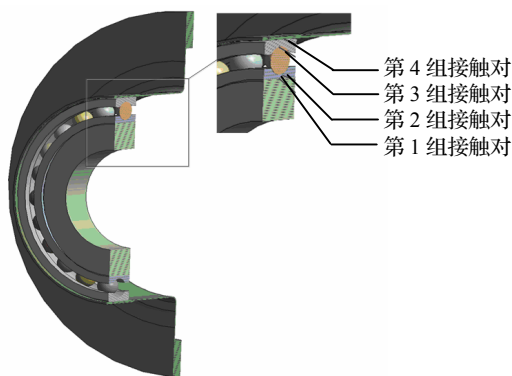


图5 4组接触对

2.1.3 网格划分

结构分析网格方面, 通常对主要分析的区域进行细化处理, 使结果更加准确。结构网格通常采用四面体网格, 我们将柔轮、柔性轴承内外圈和凸轮采用四面体网格, 并调整它们体网格的大小, 参数设置为 2 mm, 滚珠设置为 1 mm, 与滚珠接触的柔性轴承内圈和外圈的圆弧面进行网格加密, 参数设置为 1 mm, 光筒柔轮的有效齿面参数设置为 0.4 mm。网格参数设置结束后, 进行网格划分, 得到 221 414 节点和 114 236 单元。

2.1.4 边界条件与求解器设置

在不考虑刚轮情况下, 主要研究光筒柔轮在波发生器不同安装深度下的变形与应力分布。在有限元分析中, 谐波减速器模型的约束设置如下: 柔轮帽檐端面设置为圆柱形约束, 保留切向自由度, 其余自由度均设置为固定; 波发生器凸轮采用圆柱形约束, 保留切向自由度, 其余自由度均设置为固定; 波发生器的柔性轴承内外圈端面添加位

移约束, 限制其轴向位移, 并将其余自由度设置为自由; 打开大变形选项以避免非线性条件增长, 并为保证求解的收敛, 需打开弱弹簧选项。

通过改变波发生器装入柔轮的深度, 建立不同安装深度的谐波减速器模型, 分析波发生器不同安装深度(离杯口 0.35、0.55、0.75、0.95、1.15 mm)对柔轮变形和应力分布的影响^[16]。

2.2 波发生器不同安装深度下柔轮的变形规律

波发生器不同安装深度下, 柔轮变形规律的分析结果如图 6 所示。根据有限元分析结果可得, 柔轮最大变形发生在长轴处, 短轴处也出现了明显变形, 而其他位置变形不大, 且柔轮的变形呈对称分布^[17]。

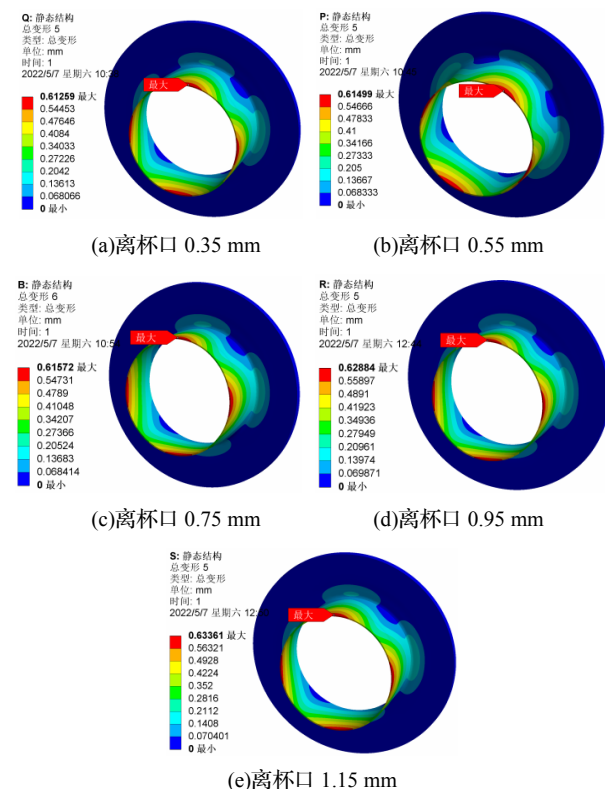


图6 波发生器不同安装深度对柔轮变形的影响云图

为了解柔轮其他位置上的变形规律, 在柔轮上建立 4 条路径, 一条在长轴处, 一条在短轴处, 一条在齿圈前端, 一条在齿圈后端; 并将所得的结果数据进行处理, 绘制成图 7 所示的曲线图。根据图 7 柔轮在不同波发生器安装深度下的变形曲线可知, 该变形规律与理论一致, 即波发生器安装深度在一定范围内, 对柔轮在长轴和短轴处的变形影响较大, 而其他位置影响较小, 故在不同波发生

器安装深度情况下,柔轮的齿形修形也不相同.因此,该因素不仅影响着柔轮的传动精度,还影响着整个谐波减速器的传动精度.

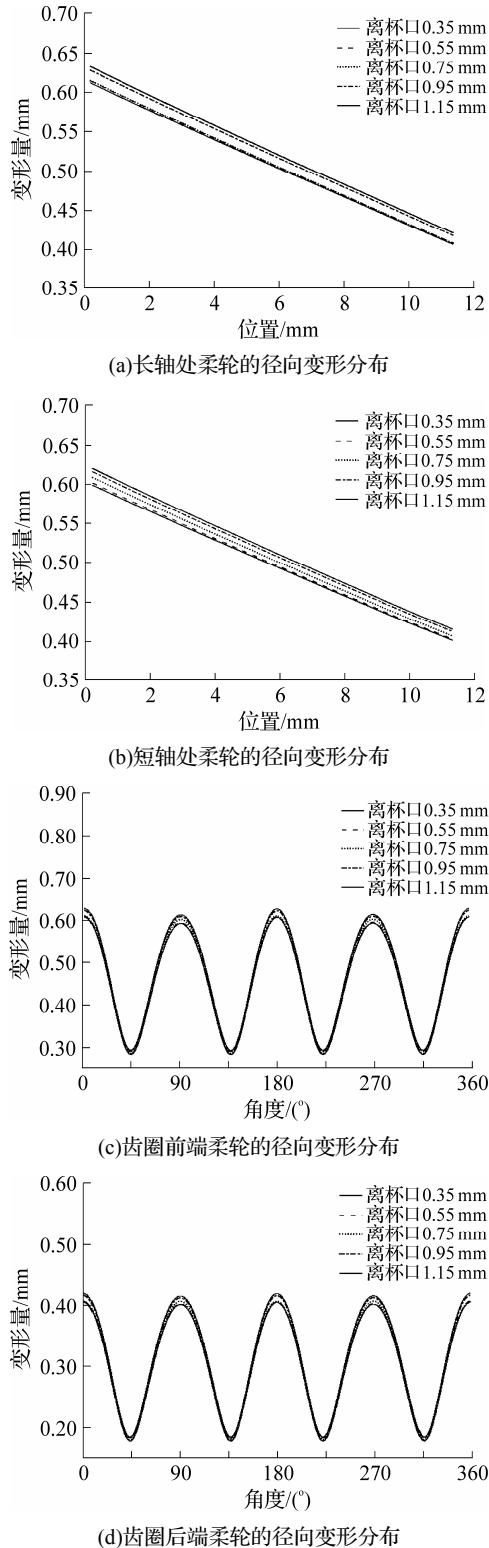


图7 柔轮变形分布图

2.3 波发生器不同安装深度下柔轮的应力分布

波发生器不同安装深度下柔轮应力分布的有限元分析结果如图8所示.根据图8可得,柔轮最大应力集中在长轴筒底过渡区,且短轴筒底过渡区也出现了较大应力,除柔轮齿圈前端内壁、有效齿宽上、柔轮帽檐上均出现了不同程度的应力集中外,其他位置基本没有应力集中情况,且柔轮的应力变化呈对称分布.

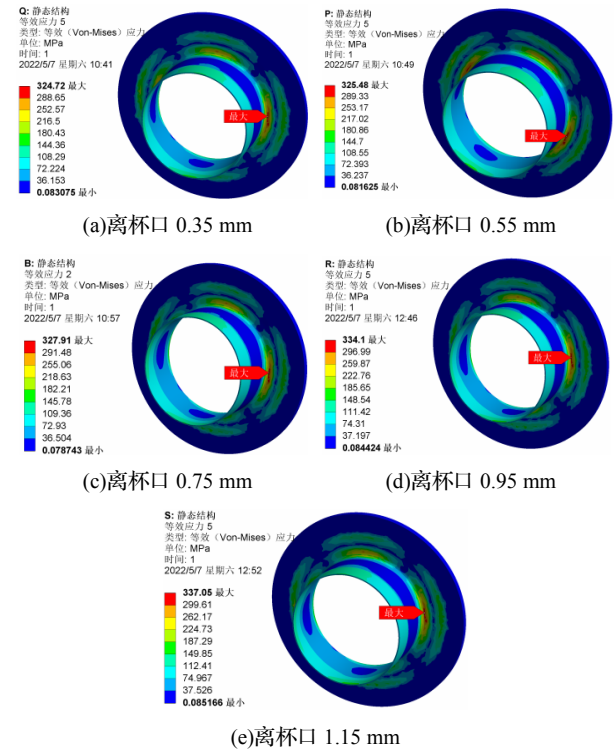


图8 波发生器不同安装深度对柔轮应力的影响云图

为更直观地观察柔轮的应力分布规律,分别提取分析结果中的最大应力值,然后通过多变量拟合得到了不同安装深度对柔轮最大应力的影响.从图9中可以直观地看到,柔轮的最大应力随着波

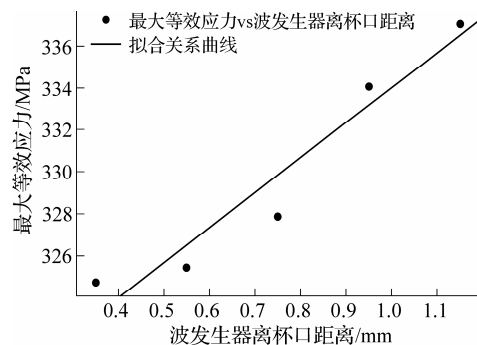
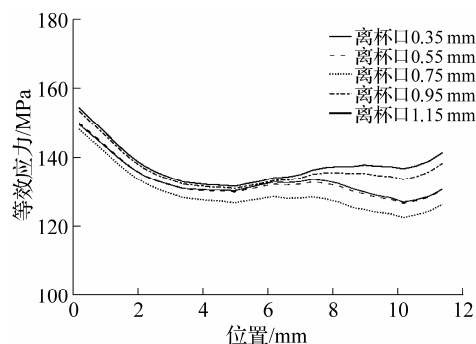


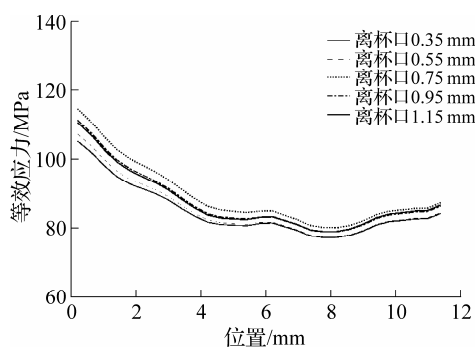
图9 波发生器不同安装深度对柔轮最大等效应力的影响

发生器安装深度的增加而增大。

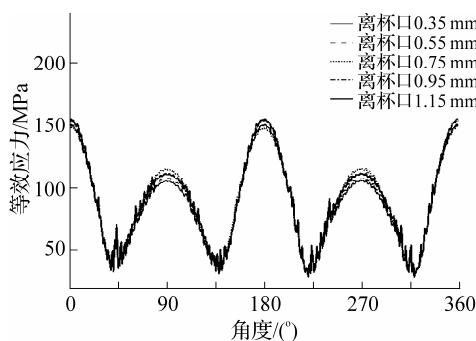
为了解柔轮其他位置上的应力变化规律,建立上文所述的4条路径,并将所得结果数据进行处理,绘制成图10所示的曲线图。从图10(a)和(b)中可以看出,柔轮在长轴和短轴处的应力沿齿根向内逐渐减小,且齿圈前端处应力最大;柔轮应力随着波发生器安装深度的增加而增大。从图10(c)和(d)中可以看出,柔轮齿圈前端和后端的应力随着柔轮角度的增大,呈先减小后增加、再减小再增大的变化趋势,且呈对称分布;随着波发生器安装深度的增加,柔轮齿圈前端和后端的应力呈现递增趋势,除长轴和短轴处柔轮应力变化较大之外,其余部位的应力均变化不大。由此结果表明,波发生



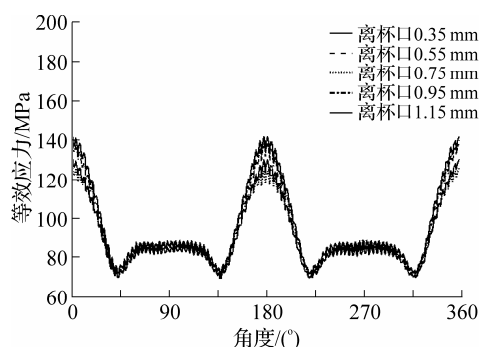
(a)长轴处柔轮的等效应力分布



(b)短轴处柔轮的等效应力分布



(c)齿圈前端柔轮的等效应力分布



(d)齿圈后端柔轮的等效应力分布

图10 柔轮应力分布图

器安装深度的变化对柔轮长轴处、短轴处、齿圈前端和筒底过渡区的应力分布较为敏感。

3 结论

对波发生器不同安装深度下礼帽形柔轮的变形规律与应力分布进行了研究,主要结果如下:

(1)柔轮最大变形量随波发生器安装深度的增加而增加;波发生器安装深度在一定范围内不断增加,柔轮变形量随之增大,且在柔轮长轴和短轴处的变形量最大,其余部位的变形量变化不大。

(2)柔轮最大应力随波发生器安装深度的增加而增大;波发生器安装深度在一定范围内不断增加,柔轮的最大应力出现明显增大现象。在柔轮长轴和短轴处,柔轮的应力沿齿根向内逐渐减小,且齿圈前端处应力最大;柔轮应力随波发生器安装深度的增加而增大。在柔轮齿圈前端和齿圈后端处,随波发生器安装深度的增加,柔轮的应力呈现递增趋势,除长轴和短轴处的柔轮应力变化较大之外,其余部位的应力均变化不大。

(3)波发生器的不同安装深度在一定范围内,对柔轮长轴和短轴处的变形影响较大,其他位置影响较小;对柔轮长轴处、短轴处、齿圈前端和筒底过渡区的应力分布较为敏感。

本文研究结果为柔轮结构设计时的优化提供了有益参考。

参考文献:

- [1] 丰飞, 王炜, 唐丽娜, 等. 空间高精度谐波减速器的应用及其发展趋势[J]. 机械传动, 2014, 38(10):98-107.
- [2] 黄兴, 何文杰, 符远翔. 工业机器人精密减速器综述

- [J]. 机床与液压, 2015, 43(13):1-6.
- [3] 张萍, 马青, 沈灿钢. 我国工业机器人产业发展面临的机遇与挑战[J]. 产业创新研究, 2018(8):11-13; 24.
- [4] 余飞鹏, 张立勇, 韦乐余, 等. 柔轮壁厚对其性能影响的仿真分析[J]. 机械传动, 2018, 42(7):147-150.
- [5] Baris A V, Vanag Y V. Deformation of flexible gear of harmonic drive[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2020, 1441(1):12087.
- [6] 马亮, 武兵, 沈奇, 等. 双圆弧柔轮结构参数对柔轮应力的影响分析[J]. 机械传动, 2021, 45(1):104-108.
- [7] 穆塔里夫·阿赫迈德, 张伟国, 孙光耀, 等. 谐波齿轮传动系统柔轮应力的数值建模与分析[J]. 机床与液压, 2022, 50(1):141-143.
- [8] 王玉琦, 陈晓霞, 邢静忠, 等. 变厚度齿圈柔轮空间变形规律研究[J]. 机械传动, 2021, 45(12):8-14; 21.
- [9] 杨超凡, 郭栋祥, 袁卓俊. 谐波减速器礼帽形柔轮应力应变分析与参数优化[J]. 舰船电子工程, 2021, 41(2):164-168.
- [10] 魏娟, 窦登科, 侯效东, 等. 基于 ANSYS-Workbench 的谐波减速器柔轮结构优化分析[J]. 机床与液压, 2021, 49(4):133-139.
- [11] 邓一波, 刘泓滨, 吴智恒, 等. 谐波减速器柔轮装配过程的应力研究[J]. 机床与液压, 2020, 48(4):1-4.
- [12] 余金宝, 范元勋. 谐波传动柔轮变形及共轭齿廓的研究[J]. 机械制造与自动化, 2019, 48(5):34-38; 56.
- [13] 郭政, 梅杰, 李武超, 等. 短筒谐波减速器齿廓设计及装配力学特性分析[J]. 武汉理工大学学报, 2021, 43(12):80-86.
- [14] 王亚晖, 刘积昊, 管恩广, 等. 谐波减速器疲劳失效特征分析[J]. 机床与液压, 2021, 49(23):159-164.
- [15] 路春辉, 金国光, 魏展. 基于有限元的新型高速剑杆织机箱座系统柔性动力学分析[J]. 机械强度, 2021, 43(5):1141-1148.
- [16] 王爽, 邱皓, 姜歌东. 考虑柔轮空间变形的谐波齿轮传动齿形设计方法[J]. 机械传动, 2021, 45(10):66-71; 163.
- [17] 陈晓霞, 牛洪波, 姚云鹏, 等. 渐开线谐波齿轮柔轮最高装配应力分析研究[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2020, 48(5):73-79.

Deformation and stress distribution of the flexspline under different installation depth of the wave generator in harmonic reducer

YANG Meng'en¹, HUANG Bing², LUO Limin², CHEN Tehuan¹, LI Guoping¹, LOU Junqiang^{1*}

(1.Zhejiang Provincial Key Laboratory of Part Rolling Technology, Ningbo University, Ningbo 315211, China;

2.Ningbo Zhongda Leader Intelligent Transmission Co., Ltd., Ningbo 315301, China)

Abstract: As the core component of harmonic reducer, the performance of flexspline directly determines the transmission performance of the whole reducer. In order to better control wave generator's performance, the basic law of the influence of different installation depths on its performance has to be explored. Based on the three-dimensional model of harmonic reducer, the deformation law and stress distribution of flexspline under different installation depths of wave generator are analyzed by finite element method. The results show that, when the installation depth of the wave generator is increased from 0.35 mm to 1.15 mm, the maximum deformation of the flexspline increases by about 3.43%, and the maximum stress of the flexspline increases by 3.80%. The change of the installation depth of the wave generator has a great influence on the deformation of the flexspline at the long axis and short axis. It also has great influences on the stresses at the long axis and short axis of the flexspline, at the front end of the ring gear, as well as at the transition zone at the bottom of the cylinder. Further on, it has little influence on either deformation or stress at all other positions. This study provides a valuable reference for the relevant researches.

Key words: harmonic reducer; flexspline; law of deformation; distribution of stress; simulation analysis

(责任编辑 章践立)