

空载下礼帽形柔轮的变形分析与试验验证^{*}

DEFORMATION ANALYSIS AND EXPERIMENTAL VERIFICATION OF HAT-TYPE FLEXSPLINE UNDER NO LOAD

徐少岩^{**1} 李国平^{***1,2} 岑国建² 黄 炳² 罗利敏² 娄军强¹

(1. 宁波大学 浙江省零件轧制与成型技术重点实验室, 宁波 315211)

(2. 宁波中大力德智能传动股份有限公司, 宁波 315301)

XU ShaoYan¹ LI GuoPing^{1,2} CEN GuoJian² HUANG Bing² LUO LiMin² LOU JunQiang¹

(1. Zhejiang Key Laboratory of Parts Rolling Forming Technology, Ningbo University, Ningbo 315211, China)

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

摘要 柔轮作为谐波减速器的核心部件,其装配过程中的接触应力和变形分布,影响着可靠性寿命。采用礼帽形柔轮进行有限元的装配模拟过程分析,分别提取柔轮长短轴以及齿圈前后端并进行变形与应力分析。结果表明,长轴和短轴处变形与实际相符,呈现线性降低趋势;齿圈前后端变形呈周期性变化。等效应力在长轴和短轴的轴向齿宽部分呈下降趋势。齿圈前后端较大等效应力产生在长轴和短轴处,而最大等效应力出现在筒底的过渡区,为 327.91 MPa,低于材料许用强度。运用高精度三坐标测量机对柔轮装配过程变形测量,以长轴和短轴的轴向齿宽方向间隔 1 mm 作为检测点,将测量结果与仿真结果对比验证,误差结果在 5% 以内,验证了该仿真分析的适用性。为后续的谐波减速器设计提供数据支持。

关键词 谐波减速器 柔轮 有限元仿真 变形测量

中图分类号 TH132.43

Abstract As the core component of the harmonic reducer, the contact stress and deformation distribution during the assembly process of the flexispline affect the reliability life. The finite element assembly simulation process analysis was carried out by using hat-type flexispline, and the deformation and stress analysis of the long and short shafts of the flexispline and the front and rear end of the ring gear were extracted respectively. The results show that the deformation at the long axis and the short axis show a linear decrease trend in line with the actual situation, and the deformation of the front and rear end of the ring gear changes periodically. The equivalence stress shows a downward trend in the axial tooth width part of the major and minor axes. The large equivalence stress at the front and rear end of the ring gear is generated at the long and short axes, while the maximum equivalence stress appears in the transition zone at the bottom of the cylinder at 327.91 MPa, which is lower than the permissible strength of the material. The deformation measurement of the flexispline assembly process was measured by the high-precision coordinate measuring machine, the axial tooth width interval of the long axis and the short axis was 1 mm as the detection point, and the measurement results were compared with the simulation results to verify. The error results are within 5%, which verifies the applicability of the simulation analysis and provides data support for subsequent harmonic reducer designs.

Key words Harmonic reducer; Flexispline; Finite element simulation; Deformation measurement

Corresponding author: LI GuoPing, E-mail: liguoping@nbu.edu.cn, Tel/Fax: +86-574-9760230

The project supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 52375103), the Ningbo Science and Technology Innovation 2025 Major Project (No. 2019B10078, 2021Z068, 2023Z002), and the Zhejiang Natural Science Foundation Project (No. LGF21E050002).

Manuscript received 20220816, in revised form 20221013.

^{*} 20220816 收到初稿, 20221013 收到修改稿。国家自然科学基金项目 (52375103), 宁波市科技创新 2025 重大专项 (2019B10078, 2021Z068, 2023Z002), 浙江省自然科学基金项目 (LGF21E050002) 资助。

^{**} 徐少岩, 男, 1997 年生, 安徽宿州人, 汉族, 宁波大学硕士研究生, 主要研究方向为谐波减速器性能优化分析。

^{***} 李国平 (通信作者), 男, 1967 年生, 湖北武穴人, 汉族, 宁波大学教授, 主要研究方向为机械设计优化。

0 引言

随着我国人口红利优势的减弱、生产成本的上升和产业竞争力的增强,我国制造业正面临着重大调整和转型升级。工业机器人技术作为制造业的重要支撑,已经成为我国智能制造的核心。为了推动我国智能制造的发展,国家在《中国制造 2025》中提出要“突破工业机器人本体、减速器等关键零部件制造技术瓶颈”^[1-2]。随着我国工业化进程的推进,以及经济结构的优化升级,机器人行业迎来了巨大机遇与挑战,其中精密减速器技术更是重中之重^[3]。目前,国内企业在机器人精密减速器中的技术还不够成熟,对精密减速器承载能力、传动精度等问题还没有得到有效解决,而国产品牌的精密减速器市场占有率还不到 5%,且主要用于低端产品,我国机器人精密减速器市场被国外巨头占领^[4-6]。

精密减速器在通用机械中发挥着不可或缺的作用。而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,还广泛应用于机械臂。因此,谐波减速器的精度和性能直接影响整个机器人的性能^[7-8]。目前国内相关领域的专家已经开始对谐波减速器进行多方面的研究,并取得了一定的成果,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,不但有助于工业机器人的发展,而且对中国制造 2025 的发展具有重要意义^[9]。

谐波减速器与其他减速器相比,具有结构简单、质量轻、传动比大、承载能力强、传动精度高、传动效率高等特点^[10],成为了精密传动中的重要组成部分,由于独特的优点,被广泛应用于各个领域。同时,随着航天飞行器、各种机器人和通信电子设备的飞速发展,对谐波减速器的传动精度、承载能力、微型化等方面也提出了更高的要求。目前国内外对谐波齿轮传动已经有较多研究报道,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,将通过节约制造材料、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,在智能制造业中具有积极的应用价值^[11-13]。

因此,通过改善谐波减速器的加工工艺、改进柔轮的结构设计、提高润滑性能、减少各部件的摩擦和磨损、改善柔性轴承的工作状态,来提高谐波减速器的运行可靠性、传动精度、回转精度和使用寿命,成为研究的主要内容。

1 谐波减速器的组成及传动原理

谐波减速器主要由柔轮、波发生器和刚轮组成^[14-15]。柔轮一般有杯形和礼帽形。随着行业的发

展、谐波减速器负载要求的提升,礼帽形柔轮在负载增加的情况下所受应力的增幅远远低于杯形柔轮的增幅,这对柔轮的寿命和稳定性有着至关重要的影响。因此,本文研究的柔轮是礼帽形;波发生器由柔性轴承和凸轮组成,刚轮由内齿圈和圆环组成。谐波减速器组成如图 1 所示。

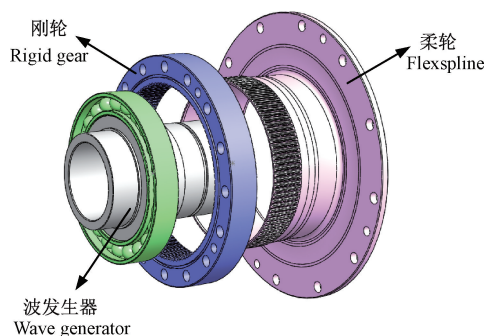


图 1 谐波减速器组成

Fig. 1 Composition of the harmonic reducer

谐波减速器的工作原理与普通齿轮传动存在本质区别:谐波减速器是一种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^[16]。图 2(a)中柔轮受波发生器作用拉伸为椭圆形,此时柔轮在长轴部位上与刚轮齿槽互相啮合,而柔轮在短轴部位上与刚轮齿槽完全分离。图 2(b)中刚轮作为固定端,波发生器顺时针方向旋转 90°,柔轮会随之发生弹性变形,并与刚轮轮齿发生啮合传动。图 2(c)中刚轮作为固定端,波发生器顺时针方向转动 180°后,柔轮会逆时针转动 1 个齿槽的角度。图 2(d)中刚轮作为固定端,波发生器顺时针方向旋转 360°后,由于柔轮的齿槽数量比刚轮少 2 个,因此柔轮会逆时针方向转动 2 个齿槽的角度,在一般情况下,会将此动作作为输出进行利用。

2 空载下柔轮的变形与应力分析

2.1 波发生器-柔轮简化模型的建立

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,图 3 为柔轮结构简图;由于试验测试模型为光筒柔轮,为保证仿真模型与试验测试模型一致,所以根据柔轮的结构参数和尺寸,建立了无齿光筒礼帽形柔轮三维模型。

2)材料定义与接触设置。谐波减速器各零件材料属性如表 1 所示。

如图 4 所示,柔轮装配体接触对共有 4 对:①凸轮和柔性轴承内圈摩擦接触,凸轮为目标面,柔性轴承内圈为接触面,摩擦因数为 0.15,关闭修剪接触,采用增强拉格朗日法,关闭小滑动,法向刚度因子为 1,进行时步自动平分;②柔性轴承内圈和滚珠表面设置为

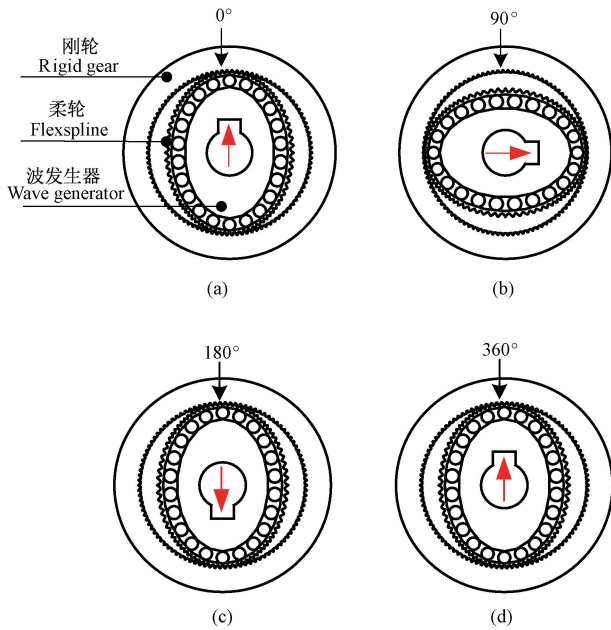


图 2 谐波减速器传动原理

Fig. 2 Transmission principle of the harmonic reducer

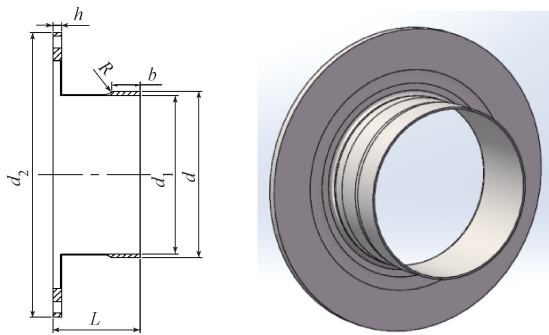


图 3 柔轮结构简图及模型图

Fig. 3 Structural diagram and model diagram of the flexspline

绑定接触;③滚珠表面和柔性轴承外圈设置为摩擦接触,其余参数设置如上;④柔性轴承外圈和柔轮内表面为摩擦接触,其余参数设置如上。

表 1 谐波减速器零件材料属性

Tab. 1 Material properties of harmonic reducer parts

	材料 Material	密度 Density/ (kg/m ³)	弹性模量 Elastic modulus/MPa	泊松比 Poisson's ratio
柔轮 Flexspline	SNCM439	7 850	2.08×10^5	0.3
柔性轴承 Flexible bearing	GCr15	7 830	2.19×10^5	0.3
凸轮 Cam	45	7 850	2.00×10^5	0.3

3)在网格划分时,将柔轮、柔性轴承内外圈和凸轮采用四面体网格,滚珠为 1 mm,其余部分参数为 2 mm。对柔性轴承内外圈圆弧面局部细化,参数为 1 mm,光筒柔轮的有效齿面参数为 0.4 mm。得到图 5

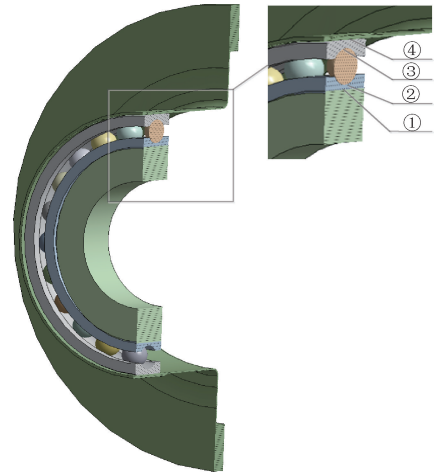


图 4 4 组接触对

Fig. 4 Four contact pairs

所示网格,总体网格数量为 114 236。

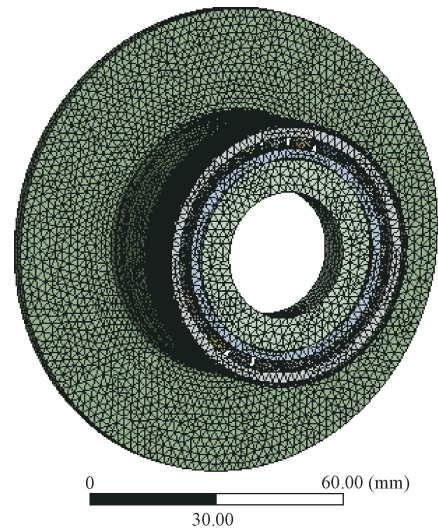


图 5 柔轮装配网格划分图

Fig. 5 Assembly grid diagram of the flexspline

4)边界条件与求解器设置。本文研究的是光筒柔轮在波发生器的作用下发生的变形,不考虑刚轮、柔轮的负载转矩。柔轮帽檐端面与波发生器的凸轮设置为圆柱形约束,保留切向自由度,其余自由度均设置为固定。柔性轴承内外圈端面添加位移约束,限制其轴向位移。装配完成后,柔轮的长轴和短轴处的位移均在 0.52 mm 左右,因此要打开大变形选项来避免非线性条件的增长;为保证求解的收敛,需打开弱弹簧选项^[17]。

2.2 柔轮的变形和应力分析

装配谐波减速器时,由于凸轮长轴大于柔性轴承内圈,柔性轴承产生的变形与凸轮的形状相似,而柔性轴承的变形也会导致柔轮发生变形,且变形的形状与凸轮形状类似,因此波发生器与柔轮装配完成后,柔轮发生了弹性变形。将处理好的有限元模型进行仿真分析,获得柔轮变形和应力的分析结果。

2.2.1 空载下柔轮变形分析

图 6 为空载下柔轮的变形云图。图 6(a) 中, 柔轮在长轴和短轴处有较大的位移变化, 这是由于波发生器的长轴直径大于柔轮内孔直径迫使柔轮发生变形而造成的位移变化, 其最大的整体位移变形为 0.615 72 mm。图 6(b) 和图 6(c) 分别为柔轮在 X 方向和 Y 方向的位移云图。由图 6(b) 可以看出, X 方向出现了较大位移, 其最大位移变形为 0.184 3 mm, 在 X 负方向; 由图 6(c) 可以看出, 在 Y 负方向出现了较大位移, 其最大位移变形为 0.598 66 mm。柔轮在波发生器作用下的整体位移是 X 方向位移和 Y 方向位移的矢量叠加。为了更加直观地观察柔轮的变形分布规律, 在柔轮上建立了 4 条路径。其路径位置处于长轴处、短轴处、齿圈前端、齿圈后端。

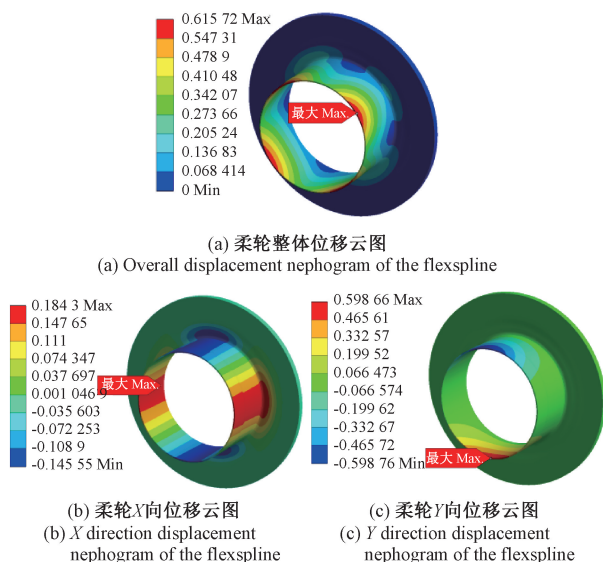


图 6 空载状态下柔轮变形云图

Fig. 6 Deformation nephogram of the flexspline under no-load state

图 7(a)~图 7(d) 为建立的路径图, 从定义好的 4 条路径中提取结果数据, 然后进行处理, 最后将处理后的数据绘制成曲线图, 如图 7(e)、图 7(f) 所示。图 7(a)、图 7(b)、图 7(e) 中, 柔轮在长轴和短轴处的位移变化由齿圈前端沿齿根线逐渐减小, 且柔轮在长轴处的位移略大于短轴处的位移, 出现这一变化规律与理论分析基本一致。图 7(c)、图 7(d)、图 7(f) 表明, 柔轮分别在角度为 0° 、 90° 、 180° 、 270° 、 360° 时的位移变化最大, 在角度为 45° 、 135° 、 225° 、 315° 时的位移变化最小, 且柔轮在齿圈前端和齿圈后端的变形曲线与余弦曲线类似, 且呈对称分布, 与波发生器发生的波形类似, 说明柔轮与柔性轴承外圈接触符合实际情况。柔轮在齿圈前端的位移变化大于齿圈后端, 且最大变化发生在长轴和短轴处。

2.2.2 空载下柔轮应力分析

图 8 为空载状态下柔轮应力云图。由图 8 可以看

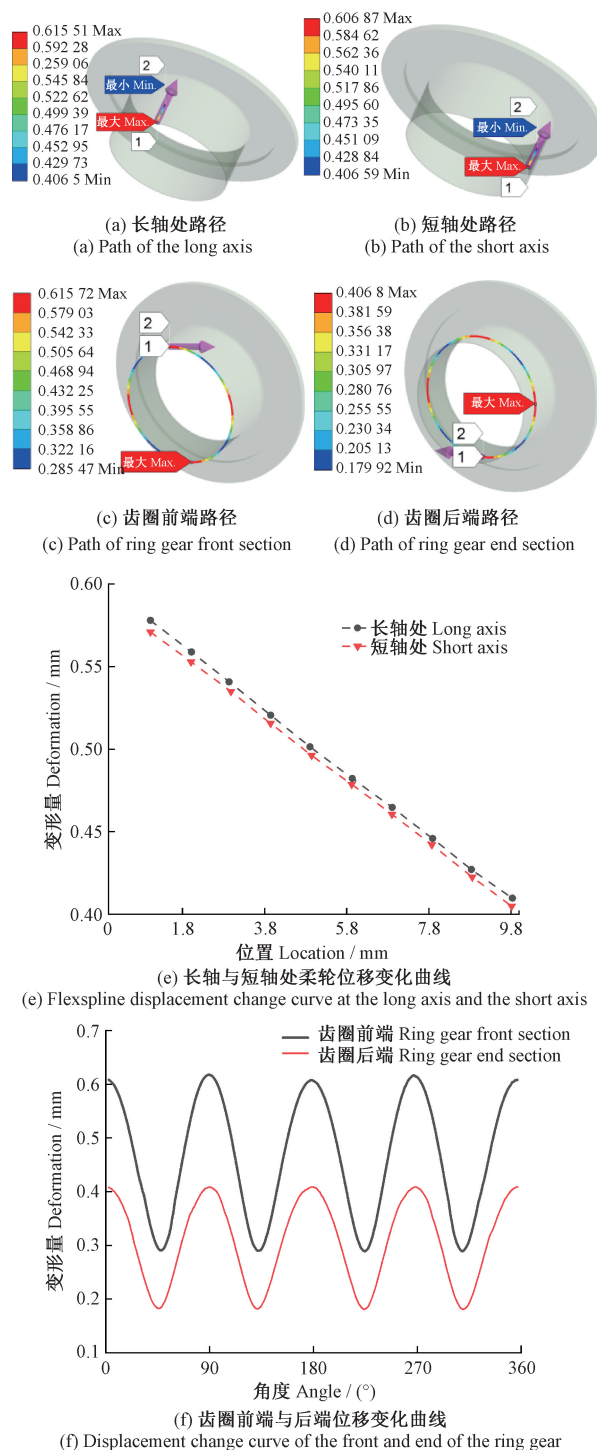


图 7 柔轮路径及位移变化曲线图

Fig. 7 Flexspline path and displacement curve diagram

出, 柔轮的最大等效应力集中在筒底的过渡区, 为相对非关键处。与长轴和短轴相对应, 最大应力为 327.91 MPa, 由于其材料的最大强度极限为 1 100 MPa, 在许用强度范围内。而作为关键部分的简化齿圈则承受着与刚轮进行啮合传动的接触面, 其齿圈的大小占整体筒体部分的小部分; 在柔轮内壁前端、柔轮帽檐内端和柔轮有效齿宽上出现了应力集中现象。为了更直观地观察柔轮的应力分布规律, 建立了上述 4 条路径并提取了结果数据。

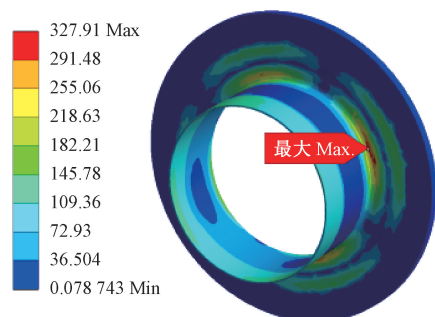


图 8 空载状态下柔轮应力云图

Fig. 8 Stress nephogram of the flexspline under no-load condition

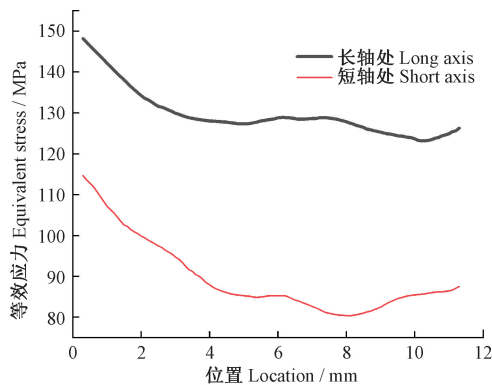
将从 4 条路径中提取的结果进行处理, 绘制成如图 9 所示的曲线图。观察图 9(a) 可知, 柔轮在长轴和短轴处的应力从柔轮齿圈前端沿齿根到齿圈后端逐渐减小, 且齿圈前端处的等效应力最大, 柔轮在长轴处的应力略大于短轴处的应力。观察图 9(b) 可知, 柔轮在齿圈前端和齿圈后端的应力变化曲线类似“W”形状, 且几乎呈对称分布, 柔轮在齿圈前端处的最大应力集中在 90° 和 270° 角度处, 且在角度为 0° 、 180° 和 360° 处也出现了较大应力, 这几处所对应的位置分别为柔轮长轴和短轴处; 柔轮在齿圈后端处的最大应力集中与齿圈前端的应力变化规律基本一致, 且齿圈前端处的等效应力大于齿圈后端处的等效应力。

2.3 柔轮的变形测量试验

2.3.1 测量试验方案的选定

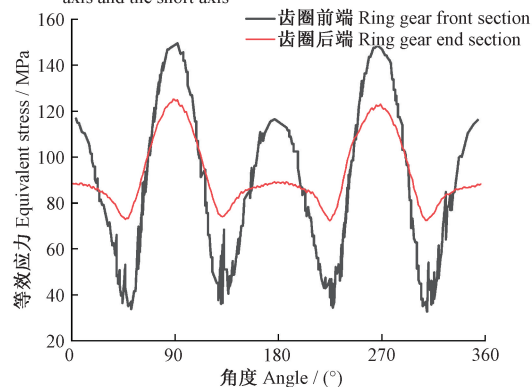
本节采用 ZEISS 高精度三坐标测量机 PRISMO ultra 测量礼帽形柔轮在波发生器作用下的径向变形。该设备是一种通用型的测量工具, 配有蔡司机器、探头和软件技术的经济型三坐标测量机, 测量误差仅为微米, 适用于研究、质量保证、测试样品的校准等高精度的任务。主要应用领域有: 中小型工件检测、塑料类零件检测、机械加工类工件检测、铸模冲压产品检测等。其主要特点有: ①极速扫描, 可极速获取精准的测量结果, 智能优化参数设定以确保测量的精准度; ②计算机辅助精度修正, 可实现对测量机动态误差的有效校准, 确保高速扫描中的测量精度; ③在线测量, 适用于贴近于生产区域的在线测量, 有效避免往返实验室的周折; ④多探头平台技术, 利用多探头平台技术可以实现一机多用; ⑤RT-AB 转台适用于测量齿轮、轴承等工件, 是三坐标测量机的最优选择。而 RT-AB 转台不仅可以支持嵌入式使用, 还采用了气浮轴承支撑的方式, 可以保证很好的测量精度, 还具有理想的径向与轴向跳动值。

利用该设备测量波发生器作用下柔轮的变形情况, 图 10 所示为柔轮装配体和试验的部分设备及仪器。



(a) 长轴与短轴处柔轮等效应力变化曲线

(a) Equivalent stress change curve of the flexspline at the long axis and the short axis



(b) 齿圈前端与后端等效应力变化曲线

(b) Equivalent stress change curve of the front and end of the ring gear

图 9 柔轮应力变化曲线图

Fig. 9 Change curve of flexspline equivalent stress

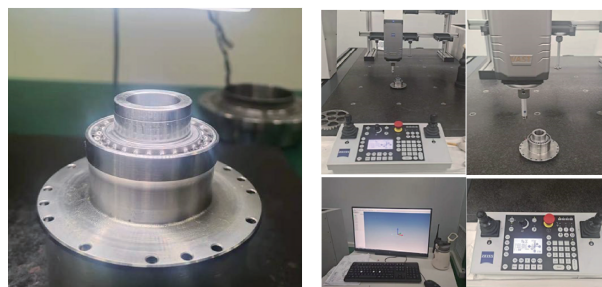


图 10 试验现场及设备情况

Fig. 10 Experimental site and equipment

2.3.2 测量试验结果与仿真结果对比分析

如表 2 所示, 当波发生器装配后, 端面离柔轮杯口距离 0.75 mm 时, 测得柔轮在长短轴处的径向变形。具体测量范围: 从去除杯口 0.8 mm 倒角开始, 有效齿宽 10.4 mm , 每隔 1 mm 检测一个截面, 最后间隔 1.4 mm 检测一个截面。

通过对表 2 中结果数据的处理, 得到了波发生器作用下柔轮在长轴和短轴处的径向变形量。然后将仿真分析得到的结果与试验检测的结果进行对比, 得到图 11 所示的曲线。

表 2 柔轮长短轴处的变形
Tab.2 Deformation of the flexspline at long and short axes

序号 Order number	检测结果 Detection result	
	长轴处 Long axis/mm	短轴处 Short axis/mm
1	63.884	61.585
2	63.844	61.621
3	63.809	61.657
4	63.768	61.694
5	63.731	61.729
6	63.694	61.767
7	63.658	61.804
8	63.622	61.841
9	63.584	61.880
10	63.548	61.917
11	63.496	61.970

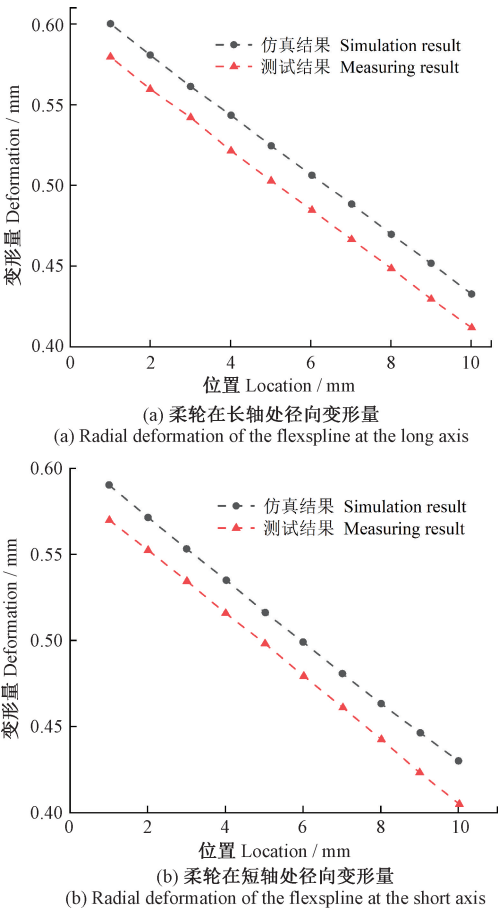


图 11 测试结果与仿真结果对比

Fig. 11 Comparison of measurement results and simulation results

由图 11 可以看出,通过试验检测出的结果小于仿真分析得到的结果,但变形角度一致,得到这一结果的主要原因是试验测试中的波发生器并未简化处理,而柔性轴承在装配时会与凸轮、柔轮之间产生间隙或柔性轴承中滚珠与内外圈的游隙,对柔轮发生的变形可以起到消减作用,而有限元仿真分析中并未考虑这些问题,因此仿真分析得到的结果略大于试验检测的结果。试验测出的柔轮在长、短轴处的变形规律与仿真

分析得到的结果基本吻合,其最大误差为 0.02 mm,通过计算得到试验与仿真结果误差小于 5%。结果表明,本文建立的有限元模型是准确的,符合工程技术要求。因此,该分析过程可以应用到整个模型的仿真分析,为后续的研究奠定了仿真技术基础。

4 结论

本文采用有限元法对礼帽型柔轮的装配过程进行了模拟分析,获取了柔轮长短轴以及齿圈前后端的变形与应力分布情况。主要结论如下:

1) 波发生器作用下,柔轮的变形主要为径向变形,最大变形出现在长轴部分,为 0.615 72 mm。整体位移是 X 方向位移和 Y 方向位移的矢量叠加,且柔轮在齿圈前端和齿圈后端的变形曲线与余弦曲线类似,呈对称分布。

2) 柔轮在长短轴处的应力从柔轮齿圈前端沿齿根到齿圈后端逐渐减小,柔轮在长轴处的应力略大于短轴处的应力。柔轮在齿圈前端和齿圈后端的应力变化曲线类似“W”形状,且几乎呈对称分布。

3) 试验测量的柔轮长短轴处变形分布呈线性递减趋势,与仿真结果对比误差在 5%以内,验证了仿真分析的准确性,为柔轮结构的优化设计提供了一定的参考。

4) 礼帽形柔轮轴向齿宽的变形测量,柔轮筒体的长度和壁厚的优化设计,为适应不同机器人关节部分的空间大小以及提高在啮合传动过程中的传动精度奠定了基础。

参考文献 (References)

[1] 中国软件评测中心(工业和信息化部软件与集成电路促进中心),国家机器人质量检验检测中心(北京). 中国机器人产业应用创新白皮书(2021)[J]. 机器人产业, 2021(6):59-86.
China Software Evaluation Center (Software and Integrated Circuit Promotion Center of the Ministry of Industry and Information Technology), National Robot Quality Inspection and Testing Center (Beijing). China robot industry application innovation white paper (2021) [J]. Robot Industry, 2021(6): 59-86(In Chinese).
[2] LI L. China's manufacturing locus in 2025: with a comparison of "Made-in-China 2025" and "Industry 4.0" [J]. Technological Forecasting and Social Change, 2018,135: 66-74.
[3] 中商产业研究院. 2021“双循环”中国工业机器人行业市场前景及投资研究报告[J]. 电器工业, 2021(3): 22-36.
China Business Industry Research Institute. 2021 "Dual Cycle" China industrial robot industry market prospect and investment research report [J]. China Electrical Equipment Industry, 2021 (3): 22-36(In Chinese).
[4] 向珍琳, 李 霆, 杨 林, 等. 谐波减速器研究现状及问题研究 [J]. 机械传动, 2020, 44(7): 151-162.
XIANG ZhenLin, LI Ting, YANG Lin, et al. Study on status and

- problem research of harmonic gear drive[J]. Journal of Mechanical Transmission, 2020, 44(7): 151-162(In Chinese).
- [5] 董耀忠. 工业机器人用减速器市场现状分析[J]. 科学与信息化, 2018(17): 47-49.
DONG YaoZhong. Analysis of the market status of reducer for industrial robots [J]. Science and Information Technology, 2018 (17): 47-49(In Chinese).
- [6] ZHANG Z H, WANG J X, ZHOU G W, et al. Analysis of mixed lubrication of RV reducer turning arm roller bearing[J]. Industrial Lubrication and Tribology, 2017, 70: 161-171.
- [7] 孟 光, 韩亮亮, 张崇峰. 空间机器人研究进展及技术挑战[J]. 航空学报, 2021, 42(1): 523963.
MENG Guang, HAN LiangLiang, ZHANG ChongFeng. Research progress and technical challenges of space robot [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2021, 42 (1): 523963 (In Chinese).
- [8] 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.
HUANG Xing, HE WenJie, FU YuanXiang. Summary of precision speed reducer of industrial robots [J]. Machine Tool & Hydraulics, 2015, 43(13): 1-6(In Chinese).
- [9] 邱胜峰. 基于 CAD/CAE 技术二次开发的谐波减速器柔轮疲劳寿命分析[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2020:34-36.
QIU ShengFeng. Fatigue life analysis of harmonic drive flexpline based on secondary development of CAD/CAE technology [D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science & Technology, 2020:34-36(In Chinese).
- [10] 徐少岩, 李国平, 罗利敏, 等. 谐波减速器柔轮齿形修形啮合性能分析[J]. 机械强度, 2023, 45(5): 1205-1210.
XU ShaoYan, LI GuoPing, LUO LiMin, et al. Meshing performance analysis of flexible gear tooth profile modification of harmonic reducer [J]. Journal of Mechanical Strength, 2023, 45 (5): 1205-1210 (In Chinese).
- [11] DENG X Q, WANG S S, HAMMI Y, et al. A combined experimental and computational study of lubrication mechanism of high precision reducer adopting a worm gear drive with complicated space surface contact [J]. Tribology International, 2020, 146: 106261.
- [12] XIONG Y, ZHU Y S, YAN K. Load analysis of flexible ball bearing in a harmonic reducer[J]. Journal of Mechanical Design, 2020, 142(2): 022302.
- [13] ZHU C Z, WU J, LIU J, et al. Analysis on static performance of flexible bearing in harmonic reducer[J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2019, 677(5): 052005.
- [14] 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.
MUTELLIP Ahmat, ZHANG WeiGuo, SUN GuangYao, et al. Numerical modeling and analysis of flex spline stress in harmonic gear drive system [J]. Machine Tool & Hydraulics, 2022, 50(1): 141-143(In Chinese).
- [15] ZHU C Z, WANG X J, LI Z L, et al. Research on static and dynamics mechanical characteristics of flexible bearing in harmonic reducer[J]. International Journal of Advanced Robotic Systems, 2020, 17(2): 172988142091995.
- [16] 谷明信, 赵华君, 董天平. 服务机器人技术及应用[M]. 成都: 西南交通大学出版社, 2019: 176.
GU MingXin, ZHAO HuaJun, DONG TianPing. Technology and application of service robot [M]. Chengdu: Southwest Jiaotong University Press, 2019: 176(In Chinese).
- [17] 赵知辛, 王方成, 陈 纯, 等. 环形精密谐波传动柔轮的承载特性研究[J]. 机械强度, 2015, 37(3): 472-478.
ZHAO ZhiXin, WANG FangCheng, CHEN Chun, et al. Study on load capacity characteristics of the flexible wheel in ring precision harmonic drive [J]. Journal of Mechanical Strength, 2015, 37 (3): 472-478(In Chinese).