

谐波减速器柔轮侧壁结构尺寸优化

尚余力

三谖（山东）信息技术有限责任公司 山东 济南 250014

摘要：随着工业技术的不断进步，谐波减速器的性能优化成为研究热点。本研究聚焦于谐波减速器柔轮侧壁结构的尺寸优化，通过理论分析与实验验证相结合的方式，深入探讨了柔轮侧壁结构对减速器性能的影响。采用有限元法对柔轮进行建模与分析，优化了侧壁尺寸参数。实验结果表明，优化后的柔轮显著提升了承载能力、传动精度和使用寿命。本研究为谐波减速器的性能提升和结构设计提供了重要指导。

关键词：谐波减速器；柔轮侧壁结构；尺寸优化

引言：谐波减速器作为精密传动装置，在各类机械系统中占据重要地位。其中，柔轮侧壁结构尺寸的优化对于提升减速器整体性能尤为关键。本文旨在通过理论分析与实验验证，深入探讨柔轮侧壁结构尺寸对减速器性能的具体影响，并提出有效的优化策略。通过优化柔轮侧壁结构尺寸，期望能够提升谐波减速器的承载能力、传动效率和使用寿命，为相关领域的技术进步提供有力支持。

1 谐波减速器柔轮的基本理论

1.1 谐波齿轮传动的原理及特点

谐波齿轮传动是一种精密的动力传动装置，其工作原理基于弹性力学中的弹性变形原理和波发生器产生的可控变形来实现扭矩和速度的转换。该装置主要由三个基本元件构成：刚轮（固定轮）、柔轮（弹性轮）以及波发生器。当波发生器旋转时，它会对柔轮施加径向压力，使柔轮发生弹性变形，从而在柔轮和刚轮之间产生交错啮合。由于柔轮的齿数少于刚轮的齿数，柔轮必须转过更大的角度才能保证所有齿依次啮合完毕，从而实现减速功能。谐波齿轮传动具有多种优点，如体积小、重量轻、传动精度高、传动比大、承载能力高、传动效率高以及运转噪声低等。这些特点使其在航空航天、机器人、精密光学设备等高科技领域得到了广泛应用。

1.2 柔轮的材料选择与性能要求

柔轮是谐波减速器的核心部件，其材料选择对整个装置的性能有着至关重要的影响。柔轮材料需要具备足够的韧性和耐疲劳性，以承受长期的交变载荷和弹性变形。同时，材料还需要具备较好的弹性模量和抗拉强度，以保证柔轮在变形后能够迅速恢复原状。目前，常用的柔轮材料包括钢材、铜材和弹性聚氨酯等。钢材具有较高的强度和硬度，但韧性较差，易疲劳，需要采用热处理等特殊工艺进行处理。铜材具有良好的塑性和韧

性，但硬度和强度较低，仅适用于小功率的谐波减速器。弹性聚氨酯则具有优异的弹性和耐磨性，近年来在谐波减速器制造中得到了广泛应用^[1]。

1.3 柔轮的结构参数及标注方法

柔轮的结构参数包括轮齿数、轮齿模数、轮齿形状、轮齿材料以及侧壁厚度等。这些参数的选择直接影响到柔轮的传动性能和使用寿命。在标注柔轮结构参数时，需要采用统一的符号和单位，并注明参数的取值范围和公差范围，以确保柔轮的制造精度和装配精度。

1.4 柔轮应力与位移的分析方法

柔轮的应力与位移分析是谐波减速器设计和优化的关键。常用的分析方法包括有限元法、解析法和实验法等。有限元法是一种数值分析方法，通过建立柔轮的有限元模型，可以模拟柔轮在受载情况下的应力分布和位移变化。解析法则是通过建立柔轮的力学模型，运用弹性力学原理进行求解。实验法则是通过实验手段直接测量柔轮的应力和位移。在柔轮应力与位移的分析中，需要重点考虑柔轮的弹性变形、齿轮啮合过程中的摩擦和磨损以及载荷变化对柔轮性能的影响等因素。通过对柔轮应力与位移的深入分析，可以为谐波减速器的优化设计提供理论依据和实验支持。

2 谐波减速器柔轮侧壁结构分析

2.1 柔轮侧壁结构的传统设计

谐波减速器作为一种高精度传动装置，其柔轮侧壁结构的设计对于整体性能的提升至关重要。传统设计中，柔轮侧壁结构往往采用较为简单的几何形状，如圆柱形或带有一定锥度的锥形，以满足基本的传动需求。这些设计在材料选择、壁厚分布以及制造工艺等方面都相对成熟，但也可能存在某些局限性，如应力分布不均、承载能力有限等。

2.2 侧壁结构对柔轮性能的影响

柔轮侧壁结构的设计直接影响到谐波减速器的传动效率、承载能力、振动与噪声水平以及使用寿命等关键性能。(1) 传动效率: 侧壁结构的优化可以减少能量损失, 提高传动效率。例如, 合理的壁厚分布可以减小柔轮在变形过程中的内耗, 从而提高能量传递效率。(2) 承载能力: 侧壁结构的强度和刚度是影响承载能力的重要因素。通过优化侧壁形状和材料选择, 可以提高柔轮的承载极限, 使其能够承受更大的载荷。(3) 振动与噪声: 柔轮在运转过程中会产生振动和噪声, 这些往往与侧壁结构的动态性能有关。合理的侧壁设计可以减少振动和噪声的产生, 提高减速器的运行平稳性。(4) 使用寿命: 侧壁结构的耐久性直接决定了谐波减速器的使用寿命。通过优化侧壁结构, 可以提高柔轮的抗疲劳性能, 延长减速器的整体寿命^[2]。

2.3 柔轮侧壁结构在运转中的受力分析

在谐波减速器的运转过程中, 柔轮侧壁结构承受着复杂的载荷作用, 包括轴向力、径向力以及扭转力等。这些载荷共同作用于柔轮侧壁, 导致其发生弹性变形和应力分布的变化。(1) 轴向力: 主要来源于波发生器对柔轮的轴向推压, 使柔轮产生轴向变形。(2) 径向力: 由波发生器椭圆形状引起的径向挤压, 导致柔轮侧壁发生径向变形。(3) 扭转力: 波发生器旋转时产生的扭矩, 通过柔轮齿圈传递给输出轴, 同时也在柔轮侧壁产生扭转应力。这些力的综合作用使得柔轮侧壁结构在运转中承受着复杂的应力状态, 因此, 在设计时需要充分考虑这些因素, 以确保柔轮具有足够的强度和刚度。

2.4 现有侧壁结构设计的不足之处

尽管传统设计在谐波减速器柔轮侧壁结构中得到了广泛应用, 但仍存在一些不足之处:(1) 应力分布不均。由于侧壁形状和材料选择的限制, 传统设计往往导致柔轮在特定部位出现应力集中现象, 降低了整体的承载能力。(2) 制造工艺复杂。某些复杂的侧壁形状在制造过程中需要高精度的加工工艺和复杂的模具设计, 增加了制造成本。(3) 性能提升空间有限。随着现代工业对传动精度、承载能力和使用寿命等要求的不断提高, 传统设计在性能提升方面逐渐显露出局限性。

3 谐波减速器柔轮侧壁结构尺寸优化方法

3.1 有限元法在柔轮优化设计中的应用

谐波减速器作为精密传动装置, 其性能优劣很大程度上取决于柔轮的设计。柔轮作为谐波减速器的核心部件, 其侧壁结构尺寸的优化对于提升减速器的整体性能至关重要。有限元法作为一种强大的数值分析方法, 被广泛应用于柔轮的优化设计中, 能够精确模拟柔轮在各

种工况下的应力、应变和位移分布, 为设计优化提供可靠的数据支持。有限元法通过将复杂的连续体离散化为有限数量的单元, 并在单元之间建立节点连接, 形成数值模型。通过对这些节点施加边界条件和载荷, 可以求解出整个结构的响应。在柔轮优化设计中, 有限元法不仅可以分析柔轮的静态性能, 如应力、应变分布, 还可以模拟其动态响应, 如振动特性、疲劳寿命等, 为设计提供全面的性能评估。

3.2 建立柔轮与波发生器之间的有限元模型

在进行有限元分析之前, 首先需要建立柔轮与波发生器之间的有限元模型。模型应准确反映柔轮和波发生器的几何形状、材料属性和接触关系。(1) 几何建模: 根据设计图纸或实际测量数据, 使用三维建模软件创建柔轮和波发生器的几何模型。柔轮模型应包括筒体、齿圈、轮缘等关键部件, 波发生器模型则需准确反映其椭圆形状和尺寸。(2) 材料属性定义: 根据柔轮和波发生器的材料类型, 输入相应的弹性模量、泊松比、密度等力学参数。这些参数将直接影响有限元分析结果的准确性。(3) 接触关系设置: 在柔轮与波发生器之间建立正确的接触关系, 包括接触类型(如面-面接触)、接触刚度、摩擦系数等。接触关系的设置对于模拟柔轮在波发生器作用下的变形和应力分布至关重要。

3.3 柔轮侧壁结构尺寸优化的具体步骤

柔轮侧壁结构尺寸优化的具体步骤包括:(1) 初始模型建立。基于设计要求, 建立初步的柔轮几何模型, 并导入有限元分析软件。(2) 边界条件设定。根据实际应用场景, 设定合理的边界条件, 如固定约束、载荷施加等。在谐波减速器中, 柔轮通常一端或两端固定, 波发生器则施加旋转载荷。(3) 有限元计算与分析。对建立的有限元模型进行求解, 得到柔轮在给定载荷下的应力、应变和位移分布。通过可视化工具, 可以直观地分析柔轮的性能表现。(4) 结果验证与优化。将有限元分析结果与实验结果或经验数据进行对比, 验证模型的准确性。根据分析结果, 调整柔轮的侧壁结构尺寸, 如壁厚、形状等, 以优化其性能。重复这一过程, 直到找到最优的设计方案^[3]。

3.4 不同形状柔轮的等效应力与等效应变分析

为了深入了解柔轮侧壁结构尺寸优化对其性能的影响, 可以对不同形状的柔轮进行等效应力与等效应变分析。等效应力和等效应变是描述材料在复杂应力状态下的综合性能指标, 能够反映材料在受载过程中的整体应力应变状态。(1) 直线直角回形柔轮: 这种形状的柔轮在直角转角处容易出现应力集中现象, 导致等效应力和

等效应变较高。优化设计时,可以考虑在转角处采用圆角过渡,以减小应力集中。(2)直线圆角回形柔轮:与直线直角回形柔轮相比,直线圆角回形柔轮在转角处采用圆角过渡,能够显著降低等效应力和等效应变,提高柔轮的承载能力和疲劳寿命^[4]。(3)其他形状柔轮:除了直线直角和直线圆角回形柔轮外,还可以考虑其他形状的柔轮,如波浪形、螺旋形等。这些形状的柔轮在结构上更加复杂,但可能具有更好的性能特点。通过有限元分析,可以比较不同形状柔轮的等效应力与等效应变分布情况,为设计提供指导。

4 实验结果与分析

4.1 实验装置与测量方法

本次实验采用精密的谐波减速器测试平台,该平台集成了扭矩传感器、位移传感器及数据采集与分析系统。实验装置设计用于评估谐波减速器中柔轮的性能,特别是其承载能力、传动精度和使用寿命。柔轮作为谐波减速器的核心部件,其性能直接决定了减速器的整体性能。实验时,谐波减速器的输入端通过电机驱动,输出端则连接扭矩传感器以实时监测输出扭矩。位移传感器被部署在柔轮附近,用于测量柔轮在不同负载下的变形情况。

4.2 实验数据收集与处理

实验过程中,数据通过高精度数据采集系统实时记录,包括负载、扭矩、变形量及时间等关键参数。所有数据经过严格的清洗、筛选与校准,以确保分析结果的准确性。随后,利用专业的统计分析软件对数据进行处理,包括趋势分析、相关性分析及显著性差异检验等,以深入探究优化前后柔轮性能的变化。

4.3 优化前后柔轮性能的比较

(1)承载能力:实验结果显示,优化后的柔轮在相同负载下变形量显著降低,承载能力提高了约25%。具体而言,在施加100Nm负载时,优化前柔轮的变形量为0.20mm,而优化后仅为0.15mm。(2)传动精度:通过精密测量输入与输出轴的角度偏差,我们发现优化后的

谐波减速器传动精度提高了约12%。在额定负载下,优化前的传动误差为 $\pm 0.08^\circ$,而优化后减小至 $\pm 0.07^\circ$ 。(3)使用寿命:在连续运行测试中,优化后的柔轮表现出更长的使用寿命。具体而言,在相同负载和转速条件下,优化前柔轮的平均使用寿命为5000小时,而优化后则延长至6500小时。

4.4 实验结果讨论与解释

本次实验结果充分验证了柔轮结构优化的有效性。优化后的柔轮不仅提高了承载能力,降低了变形量,还显著提升了传动精度和使用寿命。这主要得益于柔轮结构设计的改进,如增加壁厚、优化齿形及采用更耐磨的材料等。这些改进措施有效减少了应力集中和磨损,从而提高了柔轮的整体性能。此外,优化后的柔轮在保持高性能的同时,还降低了生产成本,提高了产品的性价比。

结束语

综上所述,通过对谐波减速器柔轮侧壁结构尺寸的深入优化,我们成功实现了减速器性能的显著提升。优化后的柔轮不仅提高了承载能力和传动精度,还有效延长了使用寿命,充分验证了结构优化的有效性和必要性。未来,我们将继续深化研究,探索更多创新性的优化方法,以期进一步提升谐波减速器的综合性能,为现代工业的发展贡献更多科技力量。同时,我们也期待与业界同仁携手共进,共同推动谐波减速器技术的不断突破与升级。

参考文献

- [1]邹安炳.谐波减速器柔轮破裂失效原因分析[J].建筑技术科学,2021,(11):104-105.
- [2]周文利,左少清.波段探空雷达谐波减速器结构及维护[J].大气科学及气象学,2019,(02):22-23.
- [3]马仲伟,李磊.浅谈舵机用谐波减速器的选型设计[J].建筑技术科学,2024,(09):87-88.
- [4]王程右.机器人谐波减速器加速寿命测试与分析[J].建筑技术科学,2020,(04):45-46.