

学校编码: 10384
学号: 32020121152694

分类号 _____ 密级 _____
UDC _____

厦 门 大 学

硕 士 学 位 论 文

谐波减速器柔轮的性能研究

Behavior of a Flexspline in Harmonic Drive

刘淳剑

指导教师姓名: 陈立杰 教授

专业名称: 航空宇航制造工程

论文提交日期: 2015年5月

论文答辩时间: 2015年5月

学位授予日期: 2015年 月

答辩委员会主席: _____

评 阅 人: _____

2015年 月

厦门大学博硕士学位论文摘要库

厦门大学学位论文原创性声明

本人呈交的学位论文是本人在导师指导下，独立完成的研究成果。本人在论文写作中参考其他个人或集体已经发表的研究成果，均在文中以适当方式明确标明，并符合法律规范和《厦门大学研究生学术活动规范（试行）》。

另外，该学位论文为（）课题（组）的研究成果，获得（）课题（组）经费或实验室的资助，在（）实验室完成。（请在以上括号内填写课题或课题组负责人或实验室名称，未有此项声明内容的，可以不作特别声明。）

声明人（签名）：

年 月 日

厦门大学博硕士学位论文摘要库

厦门大学学位论文著作权使用声明

本人同意厦门大学根据《中华人民共和国学位条例暂行实施办法》等规定保留和使用此学位论文，并向主管部门或其指定机构送交学位论文（包括纸质版和电子版），允许学位论文进入厦门大学图书馆及其数据库被查阅、借阅。本人同意厦门大学将学位论文加入全国博士、硕士学位论文共建单位数据库进行检索，将学位论文的标题和摘要汇编出版，采用影印、缩印或者其它方式合理复制学位论文。

本学位论文属于：

（ ） 1.经厦门大学保密委员会审查核定的保密学位论文，
于 年 月 日解密，解密后适用上述授权。

（ ） 2.不保密，适用上述授权。

（请在以上相应括号内打“√”或填上相应内容。保密学位论文应是已经厦门大学保密委员会审定过的学位论文，未经厦门大学保密委员会审定的学位论文均为公开学位论文。此声明栏不填写的，默认为公开学位论文，均适用上述授权。）

声明人（签名）

年 月 日

厦门大学博硕士学位论文摘要库

摘 要

谐波齿轮传动是利用柔性工作构件的弹性变形波进行运动或者动力传递的一种新型传动方式，因其具有体积小、重量轻、精度高、单级传动比大、承载能力高等诸多优点，在航空航天、机器人、数控机床等领域得到了广泛的应用。柔轮作为谐波齿轮传动的关键构件很大程度上影响了谐波齿轮传动的承载能力、使用寿命等。柔轮为弹性薄壁件，在交变载荷作用下易导致齿面磨损和疲劳断裂。柔轮强度、变形与应力分析对谐波齿轮传动过程中的疲劳断裂评估及传动性能研究具有重要的意义。

本文首先根据已知参数、实际工况和谐波齿轮传动啮合参数选取原则，设计了谐波减速器柔轮、刚轮和波发生器的基本结构，并利用齿轮设计插件 GearTrax 在 SolidWorks 中进行三维实体建模。

第二，建立了谐波减速器的有限元模型，基于接触非线性有限元分析对波发生器的装配过程和谐波齿轮传动过程进行了动态仿真，得到了柔轮结构关键位置的变形与应力场。分析表明谐波齿轮传动过程中产生的较大应力是导致柔轮疲劳断裂和齿面磨损的主要原因。

第三，根据实际台架试验柔轮的磨损状态，建立了谐波齿轮传动过程中不同磨损程度的柔轮有限元模型，并研究了柔轮不同磨损量对压缩刚度和扭转刚度的影响。计算结果表明：柔轮的磨损量对扭转刚度的影响比对压缩刚度的影响更为明显，当柔轮齿圈中间齿顶厚磨损掉 $2/3$ 时，压缩刚度下降了 8.497%，而扭转刚度则下降了 44.939%。

最后，利用光学显微镜及扫描电镜对台架试验失效的柔轮进行了失效分析，说明了柔轮失效的原因，并由分析结果确定了后续理论及试验研究的主要方向。通过对摩擦磨损理论模型的分析 and 柔轮滑动接触疲劳磨损试验件形式的讨论，提出了柔轮疲劳磨损模型，给出了试验方案及待定参数获得方法，从而为柔轮疲劳磨损的预测提供了模型方法。

关键词：谐波减速器；柔轮；有限元法；刚度；强度；疲劳磨损

厦门大学博硕士学位论文摘要库

Abstract

Harmonic drive is a new driving method that utilizes the elastic deformation wave of a flexible component to realize motion or power transmission. Due to the advantages of harmonic drive, such as small volume, high precision, high single-stage transmission ratio, and high loading capacity and so on, it is widely used in many fields. As a key component in harmonic drive, flexspline significantly influences the performance of harmonic drive. Flexspline is an elastic thin-walled structure, so it tends to result in fatigue failure and wear of gear teeth while working under alternating loads. The researches on strength, deformation and stress distribution of flexspline play an essential role on the evaluation of the flexspline's fatigue failure and transmission behavior during the harmonic drive gear's dynamic working process.

First of all, the structures of flexspline, circular spline and wave generator of a harmonic drive reducer are designed according to the given parameters, actual working conditions and meshing parameters selection principle of harmonic drive. And 3D solid models of the three main components are established by SolidWorks with the help of GearTrax.

Secondly, the finite element modeling of harmonic drive is conducted and wave generator assembling process and harmonic drive gear dynamic working process are simulated based on nonlinear finite element analysis. Thus the deformation and stress distributions of the flexspline are obtained. The simulation results show that the stress generated during the flexspline transmission is the main cause of the fatigue failure of the flexspline and the wear of the gear teeth.

Thirdly, according to the actual wear condition of a flexspline after rig test, finite element models of flexspline with various wear volume are established to study the influence of different wear on the compression stiffness and torsion stiffness of flexspline. The results indicate that wear volume has a more significant influence on

torsion stiffness than it has on compression stiffness. When the wear volume of gear teeth in the middle of the gear ring reaches to $2/3$, the compression stiffness decreases by 8.497% while the torsion stiffness decreases by 44.939%.

Finally, the failure analysis of a flexspline after rig test is conducted with optical microscope and scanning electron microscope so as to decide the focus of future theoretical and experimental researches. Through the analysis on the theoretical model of friction and wear and discussion on the fatigue wear specimen, this paper gives the fatigue wear model of the flexspline, the testing scheme, and how to get the undetermined parameters of the model by experiments. These works provide a possible method to predict the fatigue wear of the flexspline during transmission.

Key Words: Harmonic drive; Flexspline; Finite element method; Stiffness; Strength; Fatigue wear

第一章 绪论	1
1.1 谐波齿轮传动概述	1
1.1.1 谐波齿轮传动的组成.....	1
1.1.2 谐波齿轮传动的工作原理.....	3
1.2 课题的研究背景	4
1.2.1 谐波齿轮传动的发展历史.....	4
1.2.2 主要特点与应用.....	7
1.3 谐波齿轮传动的研究现状	9
1.3.1 柔轮的强度、变形与应力研究.....	9
1.3.2 40CrNiMoA 的摩擦磨损性能研究.....	11
1.4 本文主要研究内容	14
第二章 谐波减速器的结构设计	17
2.1 引言.....	17
2.2 柔轮的设计.....	17
2.3 刚轮的设计.....	18
2.4 波发生器的设计.....	20
2.5 谐波减速器的三维实体建模.....	21
2.6 本章小结.....	23
第三章 柔轮的有限元分析	25
3.1 引言.....	25
3.2 柔轮的变形与应力分析.....	25
3.2.1 有限元模型的建立.....	26
3.2.2 有限元分析及结果.....	28
3.3 柔轮的压缩刚度分析.....	33
3.4 柔轮的扭转刚度分析.....	39

3.5 本章小结	43
第四章 柔轮疲劳磨损试验研究	45
4.1 引言	45
4.2 台架试验柔轮失效分析	45
4.3 摩擦磨损的理论模型	50
4.3.1 摩擦理论	50
4.3.2 材料的磨损	54
4.3.3 磨损模型	56
4.4 试验设计	59
4.4.1 试验件形式	59
4.4.2 摩擦副接触有限元分析	61
4.4.3 试验方案及结果分析	64
4.4.3.1 试验件的制备	64
4.4.3.2 试验方案设计	66
4.4.3.3 试验结果分析	67
4.5 本章小结	71
第五章 总结与展望	73
5.1 总结	73
5.2 展望	74
参考文献	75
致 谢	79
攻读硕士学位期间发表的论文和工作情况	81

Table of Contents

Chapter 1 Introduction	1
1.1 Overview of Harmonic Drive	1
1.1.1 Basic Structure	1
1.1.2 Working Principle	3
1.2 Motivation of the Research	4
1.2.1 Development History of Harmonic Drive	4
1.2.2 Main Characteristics and Application	7
1.3 Research Status of Harmonic Drive	9
1.3.1 Research on Deformation and Stress of Flexspline	9
1.3.2 Research on Friction and Wear Properties of 40CrNiMoA	11
1.4 Main Contents	14
Chapter 2 Structural Design of Harmonic Drive	17
2.1 Introduction	17
2.2 Design of Flexspline	17
2.3 Design of Circular Spline	18
2.4 Design of Wave Generator	20
2.5 3D Solid Modeling of Harmonic Drive	21
2.6 Summary	23
Chapter 3 Finite Element Analysis of Flexspline	25
3.1 Introduction	25
3.2 Deformation and Stress Distribution	25
3.2.1 Finite Element Modeling	26
3.2.2 Results and Discussion	28
3.3 Analysis of Compression Stiffness	33
3.4 Analysis of Torsion Stiffness	39

3.5 Summary	43
Chapter 4 Fatigue Wear of Flexspline	45
4.1 Introduction	45
4.2 Failure Analysis of Flexspline	45
4.3 Theoretical Model of Friction and Wear	50
4.3.1 Friction Theory	50
4.3.2 Wear of Material	54
4.3.3 Wear Model	56
4.4 Test Design	59
4.4.1 Specimen	59
4.4.2 Contact Analysis of Friction Pair	61
4.4.3 Test Scheme and Results	64
4.4.3.1 Preparation of Specimen	64
4.4.3.2 Test Scheme	66
4.4.3.3 Results and Discussion	67
4.5 Summary	71
Chapter 5 Conclusions and Future Work	73
5.1 Conclusions	73
5.2 Future Work	74
References	75
Acknowledgements	79
Publications and Research Work	81

第一章 绪论

1.1 谐波齿轮传动概述

1.1.1 谐波齿轮传动的组成

谐波传动是随着空间技术的发展而产生的一种机械传动,它是利用柔性工作构件的弹性变形波进行运动或者动力传递的一种新型传动方式。由于柔性构件的变形波基本上是一个对称的谐波,所以称这种传动为谐波传动。其中谐波齿轮传动是谐波传动中应用最广的一种形式^[1-2]。

谐波齿轮传动主要由三个构件组成:柔轮(Flexspline)、刚轮(Circular spline)和波发生器(Wave generator),如图 1-1 所示。柔轮是谐波齿轮传动中的弹性变形构件,按结构可分为圆柱形、钟形等几种形式,其中杯形柔轮是谐波齿轮传动中最常用的一种。刚轮在结构上与一般传动的内齿轮相类似。波发生器是迫使柔轮产生连续变形波的构件,按结构可分为触头式波发生器、行星式波发生器、凸轮式波发生器、多滚轮波发生器等几种形式^[2]。



图 1-1 谐波齿轮传动的组成

一般情况下,在三个构件中必须有一个是固定的,其余两个一个为主动,另一个为从动,即构成了所谓的行星式谐波齿轮传动,这种机构在有一个输入运动

时能获得一个确定的输出运动。有时为了满足某种使用要求,也可做成三个构件均不固定的差动式谐波齿轮传动,这是可以将两个输入运动合成一个确定的输出运动,也可以将一个输入运动分解为两个不确定的输出运动。

柔轮是谐波齿轮传动中的一个关键构件,作为一个弹性变形构件,需承受反复弯曲、变形,处在变应力的工作状态,其寿命很大程度上决定了谐波齿轮传动的使用寿命。因此,柔轮的材料应该具有高的弹性、足够的冲击韧性、较高的机械强度。高性能合金结构钢是制作柔轮的首选材料,如 12Cr2Ni4A、18Cr2Ni4WA、30CrMnSiNi2A、40CrNiMoA 等^[2-3]。对于载荷较小的谐波齿轮传动,柔轮材料也可选用具有优良的机械强度、耐磨性好、摩擦系数低、耐久性好的工程塑料,如卡普隆。由于刚轮的工作状态与一般传动的齿轮相类似,所以对刚轮材料的要求与普通齿轮相同,可以采用优质碳素钢、普通结构钢,如 45 钢、40Cr、2Cr13 等^[2-3]。采用凸轮式波发生器设计的谐波齿轮传动,在凸轮与柔轮之间需装配一个可在变形状态下工作的柔性轴承。本文中的谐波减速器部分已知的相关参数如表 1-1 所示。

表 1-1 已知谐波减速器的相关参数

参数名称	数值	单位	备注
柔轮材料	40CrNiMoA		
刚轮材料	2Cr13		
凸轮材料	TC4R		
柔性轴承型号	HD-40/30-T5		ZGCr15
柔性轴承润滑形式	油脂润滑		
凸轮热处理工艺	无		
凸轮表面镀层	无		
柔轮处理工艺	HRC28-32		
柔轮表面镀层	DLC 处理	微米	厚 1.5-2
刚轮处理工艺	HRC27-30		
刚轮表面镀层	DLC 处理		
齿形参数	不详		克美公司技术秘密

Degree papers are in the “[Xiamen University Electronic Theses and Dissertations Database](#)”.

Fulltexts are available in the following ways:

1. If your library is a CALIS member libraries, please log on <http://etd.calis.edu.cn/> and submit requests online, or consult the interlibrary loan department in your library.
2. For users of non-CALIS member libraries, please mail to etd@xmu.edu.cn for delivery details.