

谐波减速器的传动效率确信可靠性建模与分析

陈文彬^{1,2}, 李晓阳^{1,2}, 童邦安^{1,2}, 李云³, 康锐^{1,2}

(1.北京航空航天大学可靠性与系统工程学院,北京 100191; 2.可靠性与环境工程技术国家级重点实验室,北京 100191; 3.北京卫星制造厂有限公司,北京 100094)

摘要:基于可靠性科学原理,在确信可靠性理论框架下,提出了谐波齿轮传动效率确信可靠性建模与分析方法。考虑谐波齿轮传动过程中的功率损耗以及影响传动效率的多种外在因素,通过计算传动效率与其阈值之间的距离,构建传动效率裕量模型。开展多源不确定性分析与量化,构建传动效率确信可靠性模型。针对传动效率模型中的未知参数,给出了基于实测数据的极大似然估计方法。通过一个 XB40-100 谐波减速器的案例验证了所提方法的实用性与可行性。结果表明,所提方法可以有效地将试验数据与理论模型结合,进而准确计算谐波减速器在给定负载、转速和温度条件下的传动效率。通过确信可靠性分析,发现适当提高负载扭矩、降低转速或者提高环境温度有助于提高传动效率裕量及其可靠性。

关键词:谐波减速器;确信可靠性;传动效率;性能裕量;不确定性

中图分类号: TB114.33; TH132.43 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004-4523(2022)01-0237-09

DOI: 10.16385/j.cnki.issn.1004-4523.2022.01.026

引言

谐波齿轮传动技术是 20 世纪 50 年代随着空间科学、航天技术的发展而产生的一种新的传动技术^[1]。它是在薄壳弹性变形的理论基础上发展起来的,主要依靠中间挠性构件的弹性变形来传递运动。谐波齿轮机构具有结构简单、体积小、重量轻、噪音低、承载能力高、传动精度和传动效率高等优点^[2-3],广泛应用于空间技术、能源、机器人等领域。随着应用领域的扩大和产品向着高质量长寿命发展的趋势,对谐波齿轮传动的可靠性提出了严格的要求。传动效率是表征谐波齿轮传动功能的重要性能指标之一^[4],因此,如何准确地计算谐波齿轮的传动效率并开展可靠性分析,具有重要的实际意义。

为了计算谐波齿轮的传动效率,很多学者开展了深入的研究。在谐波传动效率的理论建模和仿真计算上,施祖康等^[4]在实验研究的基础上,提出了一种传动效率曲线计算方法,可以计算不同载荷条件下的传动效率。陈桦等^[5]分析了多种形式的谐波齿轮传动的啮合效率和波发生器效率,并提出了系统的传动效率计算方法。Ianicic 等^[6]针对一种双波谐波减速器开展了传动效率的实验研究。杨莲花^[7]针

对一种谐波行星复合减速装置开展了传动效率试验,并与传动效率的理论计算结果进行了对比分析。李德举^[8]围绕着谐波传动的功率损耗方面进行了分析与研究,提出了一种基于有限元软件 ABAQUS 的功率损耗计算方法。肖京^[9]通过 ANSYS 软件分析并计算了谐波减速器中波发生器和轮齿啮合的摩擦损耗。这些方法从理论角度给谐波齿轮传动效率的计算提供了依据,但是目前已有的传动效率计算方法还并不完善,除考虑谐波齿轮的制造参数外,大多仅考虑不同负载条件下的传动效率计算。实际上,影响谐波齿轮传动效率的因素种类很多,为此,很多学者开展了试验研究。夏田等^[10]针对工业机器人用谐波减速器,开展了正交试验,定性地分析了润滑方式、转速和载荷对谐波减速器传动效率的影响。李波等^[11]针对空间润滑谐波减速器开展了传动性能试验,研究了在超载条件和不同温度条件下,固体润滑和脂润滑对柔轮-刚轮齿轮摩擦副的摩擦情况和对谐波减速器传动性能的影响。李波^[12]采用了交互正交试验方法,进行了谐波减速器传动性能热真空试验,研究了转速、环境温度、负载扭矩和润滑方式等因素及其耦合作用对谐波减速器传动效率的影响。Zhou 等^[13]基于谐波齿轮的传动效率试验,针对温度、真空度、转速和扭矩及其耦合对传动效率的影

响进行了方差分析。通过上述对谐波齿轮传动效率的试验研究可以发现,润滑方式、负载、转速和环境温度是影响谐波齿轮传动效率的主要敏感因素,但是目前已有的研究中大多是通过定性分析的方式探究这些敏感因素对传动效率的影响,并没有开展深入的定量研究。因此,还不能给出谐波减速器在实际工作和环境条件下的传动效率模型。

在谐波齿轮的传动过程中,往往期望其具有较高的传动效率,传动效率的下降代表着能量损耗的增多,且当传动效率低至某一范围时,会使得谐波齿轮的输出功率难以驱动后续机构的动作,使得整个传动系统发生失效,需要进行维修或更换。因此,在谐波齿轮的实际使用中,会给谐波齿轮的传动效率设定一个下限值,即阈值。谐波齿轮传动效率可靠性表征着其传动效率满足传动要求的能力,可量化为谐波齿轮传动效率高于其阈值的概率。近年来,有一些学者针对谐波齿轮机构的传动效率开展了一些试验,进行了可靠性建模与评估。李俊阳等^[14-15]针对空间润滑谐波减速器黏着磨损失效问题,建立了混合润滑状态下的黏着磨损模型,并以传动效率为性能参数开展了加速寿命试验和可靠性评估。官浩^[16]构建了谐波减速器传动效率的随机退化模型并开展了谐波减速器的加速退化试验,通过统计分析研究了空间谐波减速器的可靠性和寿命特征。目前对谐波齿轮传动效率的可靠性研究还较少,大都通过试验的方式评估谐波齿轮在某种工况条件下的可靠性和寿命指标,很少有文献从理论模型的角度出发,搭建起谐波齿轮传动效率的理论模型到可靠性模型的桥梁,并细致地考虑各种不确定性的影响,实现可靠性的量化。

为此,基于可靠性科学原理,在确信可靠性理论的框架下,本文对谐波齿轮传动效率的可靠性开展研究,提出了谐波减速器传动效率的确信可靠性建模与分析方法。首先,考虑谐波减速器传动过程中的能量损耗以及影响传动效率的多种外在因素的作用机理,构建谐波齿轮传动效率的理论计算模型,并从性能裕量的角度,引入传动效率的阈值,构建谐波齿轮传动效率裕量模型。然后,针对裕量模型开展不确定性分析与量化,构建谐波齿轮传动效率确信可靠性模型。接着,给出了基于谐波齿轮传动效率实测数据的传动效率模型中未知参数的极大似然估计,实现理论模型与试验数据相结合。最后,本文针对一个XB40-100谐波减速器开展案例研究。该方法有助于计算谐波减速器在不同的工况和环境条件下的传动效率及其可靠度,并通过对影响可靠度的敏感因素进行分析,实现对谐波减速器的设计和实际应用提供指导。

1 谐波减速器传动效率可靠性建模

1.1 谐波减速器

谐波减速器的构成主要包括三大零部件:刚轮、柔轮和波发生器。谐波减速器的结构如图1所示。刚轮是一个刚性环状内齿轮;柔轮是一个薄壁圆柱外齿轮,它和刚轮模数相同,但齿数一般比刚轮少两个;波发生器是一个安装在椭圆凸轮上的薄壁滚子轴承,外圆是椭圆形并随着内圆旋转,通过滚子作用产生旋转变形,其最大直径比柔轮内圆的直径略大。谐波减速器工作时,由于波发生器的作用,柔轮产生变形,导致其长轴两端的齿恰好与刚轮的齿完全啮合,短轴处的齿则与刚轮的齿完全脱开。对于那些位于波发生器长轴和短轴之间的齿,则处于某些啮入某些啮出的过渡状态。随着波发生器的连续转动,柔轮产生连续的弹性变形,使得柔轮与刚轮之间的齿不断地重复“啮入-啮合-啮出-脱开”这一过程,以此来传递啮合运动,如图2所示。本文考虑刚轮固定,波发生器主动,柔轮从动的谐波减速器。

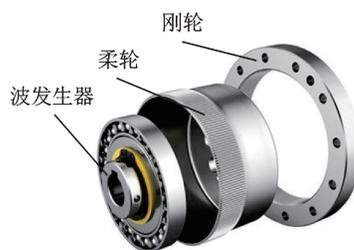


图1 谐波减速器结构

Fig. 1 Structure of a harmonic drive

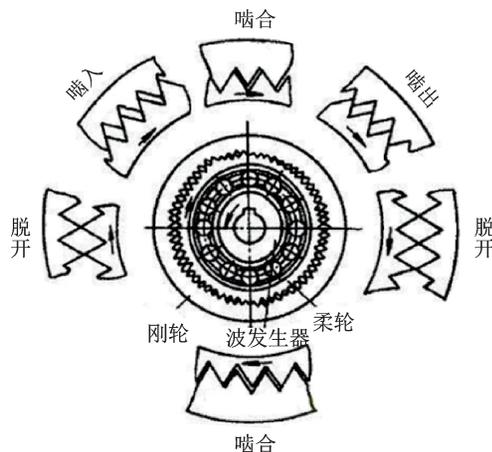


图2 谐波减速器工作原理

Fig. 2 Operational principle of a harmonic drive

1.2 传动效率性能裕量建模

传动效率表征着机构的机械能有效利用的程度,谐波齿轮传动效率常用下式进行计算:

$$\eta = \frac{T_{\text{out}}}{iT_{\text{in}}} \quad (1)$$

式中 i 为传动比; T_{out} 为谐波减速器的输出轴扭矩; T_{in} 为谐波减速器的输入轴扭矩。

但是,在用公式(1)进行计算时,需要同时测量输入轴扭矩和输出轴扭矩,这使得公式(1)在实际应用时存在困难。

在谐波减速器动作过程中,输入的机械能除转化为有用功外,还存在各种能量损耗,主要包括:啮合摩擦损耗 W_e 、由于啮合力在谐波轴承中引起的摩擦损耗 W_b 和薄壁零件初变形所需径向力在谐波轴承中所引起的摩擦损耗 W_f 等^[17],如图 3 所示。

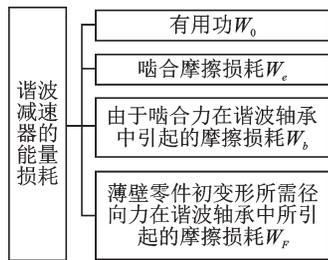


图 3 谐波减速器的能量损耗

Fig. 3 Energy loss of a harmonic drive

考虑谐波减速器的能量损耗,其传动效率可计算为:

$$\eta = \frac{W_0}{W_0 + W_e + W_b + W_f} \quad (2)$$

王洪星^[17]考虑谐波减速器的结构和动作原理,给出了谐波减速器动作过程中的有用功和上述三种能量损耗的理论计算方法,并针对刚轮固定,波发生器主动,柔轮从动的谐波减速器,对公式(2)进行了化简,得到:

$$\eta = \frac{1 - X}{1 + i \left(X + \mu d \frac{F}{M} \right)} \quad (3)$$

其中,

$$X = \frac{fh}{R \cos^2 \alpha (1 - f \tan \alpha)} + \frac{\mu d (\tan \alpha + f)}{2R(1 - f \tan \alpha)} \quad (4)$$

式中 μ 为谐波轴承中的当量摩擦因数; d 为柔轮内径; F 为柔轮弹性变形力; M 为负载扭矩; f 为齿面滑动摩擦因数; h 为筒体厚度; R 为刚轮齿高一半处直径; α 为轮齿压力角。

通过公式(3)可以发现,谐波齿轮传动效率除与谐波减速器组成部件的材料、尺寸参数外,只与负载扭矩相关。负载扭矩大,传动效率高;负载扭矩小,传动效率低。实际上,影响谐波齿轮传动效率的因素有很多,比如润滑方式、转速、负载和环境温度等^[10-12],这些因素影响传动效率损失的主要机理为:

1) 谐波减速器主要有三种润滑方式:固体润滑、脂润滑和油润滑。在含有润滑的谐波减速器中,润滑剂在齿轮表面会形成一层润滑膜,该润滑膜可以吸附磨屑微粒,进而达到降低摩擦,减小摩擦损耗的目的,不同类型的润滑方式对减小摩擦损耗的程度有影响。

2) 在含有润滑的谐波减速器中,转速的增加使得润滑剂更容易被挤出,导致摩擦因数增大,摩擦损耗增大;此外,任何机械在旋转过程中,都会对周围空气进行搅动,因此都存在风阻损耗,而且风阻损耗在减速器传动总能量损耗中占有相当比例^[18]。风阻损耗同样也是通过摩擦损耗体现的,转速越大,风阻损耗越大,摩擦损耗也越大;

3) 谐波减速器负载的增加同样会增加对润滑剂的挤压,使得润滑膜变薄,进而使得摩擦因数增大。

4) 温度对于润滑剂的流动性具有很大的影响,温度升高,润滑剂变软,流动性变好,使得润滑剂的黏度降低,进而降低了摩擦因数,减小摩擦损耗。

通过上述分析可知,润滑方式、负载、转速和温度主要影响谐波减速器齿轮表面的摩擦因数。由于这些因素对摩擦因素影响的机理模型还不清晰,本文通过使用代理模型方式,将润滑方式、扭矩、转速和温度对摩擦因素的影响考虑进去。令谐波减速器的齿面滑动摩擦因数满足如下模型:

$$f(M, \omega, T) = \exp \left(a_1 + a_2 M + a_3 \omega + \frac{a_4}{T} \right) \quad (5)$$

式中 a_1 表征基础摩擦因数,其主要由润滑方式决定; a_2 , a_3 和 a_4 分别表征负载扭矩、转速和温度对摩擦因数的影响系数; ω 为转速; T 为热力学温度。

将公式(5)代入公式(3)和(4),可以得到更新后的考虑润滑方式、负载、转速和温度的谐波齿轮传动效率公式:

$$\eta = \frac{1 - X(M, \omega, T)}{1 + i \left(X(M, \omega, T) + \mu d \frac{F}{M} \right)} \quad (6)$$

其中,

$$X(M, \omega, T) = \frac{f(M, \omega, T)h}{R \cos^2 \alpha [1 - f(M, \omega, T) \tan \alpha]} + \frac{\mu d [\tan \alpha + f(M, \omega, T)]}{2R [1 - f(M, \omega, T) \tan \alpha]} \quad (7)$$

可靠性描述产品在规定条件下和规定时间内,完成规定功能的能力。康锐^[19]总结凝练了可靠性科学的基本原理,其中第一条是“裕量可靠原理”,其含义为:产品的性能裕量决定着产品的可靠程度,性能裕量等于性能参数与其阈值间的距离。在本研究中,针对谐波减速器,以其传动效率为性能参数,给

定其失效阈值为 η_{th} , 当谐波齿轮传动效率低于 η_{th} 时, 谐波减速器的输出功率较低, 不能驱动后续机构的动作, 由此导致整个包含谐波减速器的传动机构无法动作, 此时也即判定谐波减速器是失效的。因此, 谐波齿轮传动效率的性能裕量可描述为:

$$m = \eta - \eta_{th} \quad (8)$$

当性能裕量 $m > 0$ 时, 传动效率不会达到失效阈值, 谐波减速器能够驱动后续机构的动作, 可以完成规定的功能; 当 $m < 0$ 时, 传动效率已经超过失效阈值, 谐波减速器无法驱动后续机构的动作, 认为其已经失效; 当 $m = 0$ 时, 传动效率等于失效阈值, 谐波减速器处于正常工作与失效的临近状态。

1.3 不确定性分析与量化

可靠性科学原理指出产品的性能裕量是不确定的(不确定原理)^[19], 其中, 性能裕量的不确定性包含性能参数的不确定性及其阈值的不确定性。性能参数的不确定性主要来源于产品内在属性(如尺寸、材料等)和交互的外界条件(如工作应力、环境应力等)的不确定性; 阈值的不确定性主要来源于对产品功能边界的不清晰的认知。

为了量化不确定性, 一般而言, 不确定性的种类可以分为两类, 一类是随机不确定性, 另一类是认知不确定性^[20]。随机不确定性表征为现实世界固有存在的、无法被消除的随机性特征。认知不确定性表征由于人的知识不完备导致的非确定性。通过各种科学实践, 能够提高对客观世界的认知, 进而降低认知不确定性。在本文中, 仅考虑随机不确定性的存在, 并选用概率论对随机不确定性进行量化。

考虑到谐波减速器生产和制造过程中存在的不确定性以及工作应力和环境条件中的不确定性, 实际测量得到的谐波齿轮传动效率数据会呈现波动性的特点。为此, 在谐波齿轮传动效率模型(6)中引入一个不确定项 ε , 并假设 ε 是一个随机变量, 服从均值为 0, 标准差为 σ 的正态分布, 即 $\varepsilon \sim N(0, \sigma^2)$ 。那么, 考虑不确定性的谐波齿轮传动效率模型为:

$$\tilde{\eta} = \frac{1 - X(M, \omega, T)}{1 + i \left[X(M, \omega, T) + \mu d \frac{F}{M} \right]} + \varepsilon \quad (9)$$

式中 $\tilde{\eta}$ 表示 η 具有不确定性。 $\tilde{\eta}$ 的概率密度函数为

$$f(\tilde{\eta}) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \sigma} \exp \left[-\frac{(\tilde{\eta} - \eta)^2}{2\sigma^2} \right] \quad (10)$$

谐波齿轮传动效率的失效阈值需要基于具体的谐波齿轮的功能和性能分析, 并通过开展实验进行

确定。为了使得谐波减速器能够顺利地传递运动, 当谐波减速器的输入力矩一定时, 由公式(1)可知, 其传动效率决定着其输出力矩, 这个输出力矩又作为后一机构的输入力矩进行运动的传递。当谐波减速器的输出力矩小于后一机构的启动力矩时, 便无法传递运动, 整个传动机构也就失效了; 或者当谐波减速器的输出力矩小于某规定力矩时, 也可认为谐波减速器不能满足规定的功能。通过实验的方式可以辨识谐波减速器在上述两种情况下的输入力矩和输出力矩, 进而获得谐波齿轮传动效率的失效阈值。由于产品不可避免地存在不确定性, 同一种机构的启动力矩也并非是一个固定数值^[21-22]。另一方面, 谐波减速器的输入力矩取决于前一机构的输出力矩, 同样有不确定性。因此, 谐波齿轮传动效率的阈值也存在不确定性。假设其阈值 $\tilde{\eta}_{th}$ 是一个随机变量, 服从均值为 η_{th} , 标准差为 σ_{th} 的正态分布, 即 $\tilde{\eta}_{th} \sim N(\eta_{th}, \sigma_{th}^2)$ 。

将考虑不确定性的谐波齿轮传动效率 $\tilde{\eta}$ 及其阈值 $\tilde{\eta}_{th}$ 代入公式(8), 可得:

$$\tilde{m} = \tilde{\eta} - \tilde{\eta}_{th} \quad (11)$$

由公式(11)可知, 谐波齿轮传动效率的性能裕量 \tilde{m} 也是一个随机变量, 其概率密度函数为

$$f(\tilde{m}) = \frac{1}{\sqrt{2\pi(\sigma^2 + \sigma_{th}^2)}} \times \exp \left\{ -\frac{[\tilde{m} - (\eta - \eta_{th})]^2}{2(\sigma^2 + \sigma_{th}^2)} \right\} \quad (12)$$

1.4 确信可靠性建模

基于可靠性科学原理提出的确信可靠性理论^[19]指出, 产品可靠度可以采用概率论、不确定理论^[23]和机会理论^[24]来度量。其中, 概率论用来描述随机不确定性; 不确定理论用来描述认知不确定性; 而机会理论用来描述随机和认知的混合不确定性。对于受到随机和/或认知的混合不确定性影响的系统, 称之为不确定随机系统, 其性能参数为不确定随机变量。

定义(确信可靠度)^[19] 设系统的性能裕量 \tilde{m} 为不确定随机变量, 则确信可靠度是系统的性能裕量大于 0 的机会, 即:

$$R_B = \text{Ch} \{ \tilde{m} > 0 \} \quad (13)$$

式中 $\text{Ch}\{\cdot\}$ 为机会测度。

如果系统主要受到随机不确定性的影响, 那么

系统会退化为一个随机系统,系统的性能裕量 \tilde{m} 随之退化为一个随机变量。此时,确信可靠度在数学上退化为了概率测度下的可靠度,即经典的概率可靠度,表示的是性能裕量大于0的频率。令 $R_B^{(P)}$ 表示概率论下的确信可靠度,则:

$$R_B = R_B^{(P)} = \Pr\{\tilde{m} > 0\} \quad (14)$$

本研究仅考虑随机不确定性对谐波齿轮传动效率的影响,因此采用概率论对谐波齿轮传动效率的确信可靠度进行度量,将公式(11)代入公式(14)可得:

$$R_B = \Pr\{\tilde{m} > 0\} = 1 - \Phi\left(\frac{\eta_{th} - \eta}{\sqrt{\sigma^2 + \sigma_{th}^2}}\right) \quad (15)$$

式中 $\Phi(\cdot)$ 为标准正态分布的累积概率分布函数。

2 统计分析

假设针对某型号谐波减速器开展了传动性能试验,令 η_{ijk}^* 为负载水平 M_i ,转速水平 ω_j 和温度应力水平 T_k 下的传动效率试验数据, $i=1, 2, \dots, l; j=1, 2, \dots, m; k=1, 2, \dots, n$,其中 l 为负载水平数, m 为转速水平数, n 为温度应力水平数。在构建的考虑不确定性的谐波齿轮传动效率模型(9)中,未知参数集为 $\theta = \{a_1, a_2, a_3, a_4, \sigma\}$ 。

本文采用极大似然方法对未知参数进行估计,可以得到基于上述谐波传动效率测试数据的似然函数为:

$$L = \prod_{i=1}^l \prod_{j=1}^m \prod_{k=1}^n \frac{1}{\sqrt{2\pi} \sigma} \exp\left[-\frac{(\eta_{ijk}^* - \eta_{ijk})^2}{2\sigma^2}\right] \quad (16)$$

式中 η_{ijk} 为负载水平 M_i 、转速水平 ω_j 和温度应力水平 T_k 下的传动效率均值,将 M_i, ω_j 和 T_k 代入公式(6)计算。

公式(16)的对数极大似然形式为:

$$\ln L = -\sum_{i=1}^l \sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^n \left[\ln(\sqrt{2\pi} \sigma) + \frac{(\eta_{ijk}^* - \eta_{ijk})^2}{2\sigma^2} \right] \quad (17)$$

通过最大化对数似然函数(17),得到的最优解即为谐波齿轮传动效率(9)中未知参数的极大似然估计值 $\hat{\theta} = \{\hat{a}_1, \hat{a}_2, \hat{a}_3, \hat{a}_4, \hat{\sigma}\}$ 。

3 案例研究

3.1 谐波齿轮传动效率测试数据

某公司针对XB40-100的谐波减速器(传动比为100,润滑方式采用空间润滑油脂)开展多应力类型(负载扭矩、转速和温度应力)多应力水平的传动效率性能试验,试验设置如表1所示,试验测得的谐波减速器传动效率数据如图4所示。

表 1 传动效率试验设置

Tab. 1 Test setting of transmission efficiency testing

参数	取值
负载/(N·m)	5, 8, 10, 15
转速/(r·min ⁻¹)	100, 200, 500, 800, 1000
温度/°C	-35, -10, 20, 40, 65

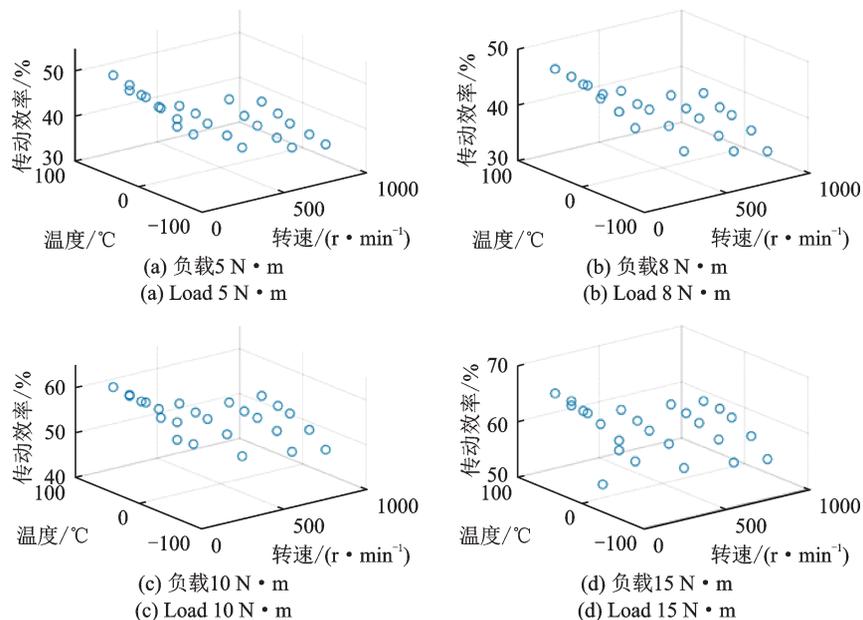


图 4 不同负载条件下的传动效率试验数据

Fig. 4 Test data from transmission efficiency testing under different loads

3.2 参数估计

基于第2节的统计分析方法,可以得到考虑不确定性的谐波齿轮传动效率模型(9)中未知参数的估计结果,如表2所示。

将参数估计结果代入到谐波齿轮传动效率模型(9)中,可得在负载扭矩为5,8,10和15 N·m的条件下谐波

齿轮传动效率及其80%置信区间,结果如图5所示。

表 2 传动效率模型中未知参数估计结果

Tab. 2 Estimation results of unknown parameters in the transmission efficiency model

a_1	a_2	a_3	a_4	σ
-2.096	0.0747	0.000473	172.513	0.0244

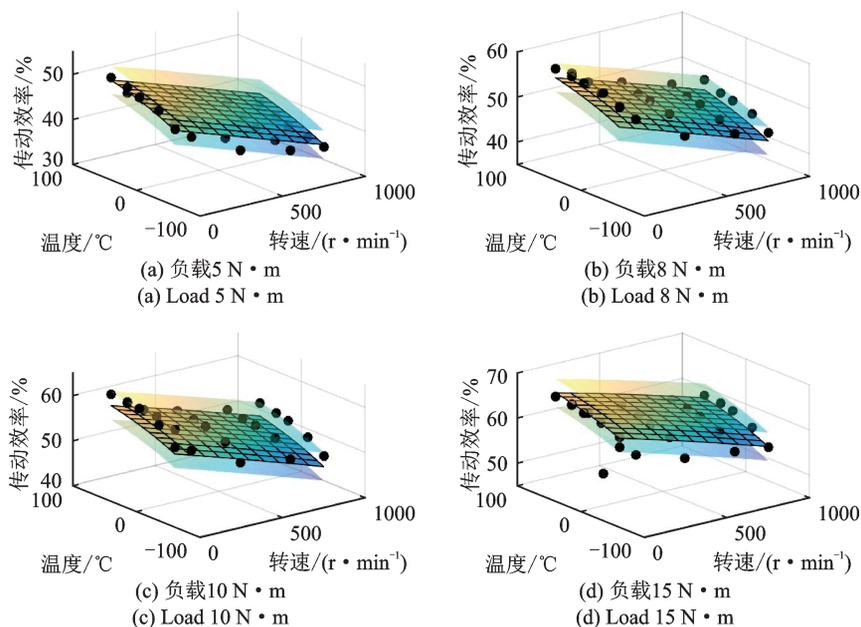


图 5 不同负载条件下的传动效率计算结果(均值及其80%置信区间,曲面)与试验数据(黑色实点)对比

Fig. 5 Comparison between transmission efficiency computation results (mean and its 80% confidence interval, surface) and testing data (black dots) under different loads

由图5可以看出,各负载条件下的谐波齿轮传动效率试验数据几乎都在所提的传动效率计算结果的80%置信区间内,且都在其均值曲面附近,均匀地分散在均值曲面两侧。结果表明,所提的谐波齿轮传动效率模型可以有效地将试验数据与理论模型结合,以弥补润滑方式、负载、转速和温度对谐波齿轮传动效率影响机理不明的问题,进而准确地计算在谐波减速器在给定润滑方式、负载、转速和温度条件下的传动效率。

3.3 确信可靠性评估与分析

假设XB40-100谐波减速器的实际负载扭矩为5~15 N·m,转速为100~1000 r/min,环境温度为-35~65 °C,以及谐波齿轮传动效率失效阈值为 $N(40\%, (5\%)^2)$ 。根据公式(11),选定负载扭矩为5,8,10和15 N·m,计算不同转速和温度条件下谐波齿轮传动效率裕量及其80%置信区间,如图6所示。根据图6,可以得到以下两点结论:

1) 谐波齿轮传动效率裕量随着转速的降低而升高,随着温度的升高而升高,这与1.2节转速和温度对谐波齿轮传动效率影响的分析结果一致,即降

低转速和升高温度有助于减小摩擦损耗,进而提高了谐波齿轮传动效率,增加了传动效率裕量,提高了可靠性。

2) 随着负载扭矩的增加,谐波齿轮传动效率裕量升高,这与1.2节负载扭矩对摩擦因数的分析结果相反。原因在于,负载扭矩对谐波齿轮传动效率的影响是双面的:一方面,负载扭矩直接影响谐波减速器的输出功率,根据公式(3)可知,负载扭矩越大,传动效率越高;另一方面,根据1.2节负载扭矩对摩擦因数的影响分析,增加负载扭矩会增大摩擦损耗,进一步会降低传动效率,该分析结果与表2中的参数估计结果一致,即 $a_2=0.075>0$,摩擦因数与负载扭矩正相关。但是从谐波齿轮整体的传动角度考虑,负载扭矩提高传动效率的正向影响远大于摩擦因数对传动效率的抑制作用。故负载扭矩对传动效率的影响最终体现为:增加负载扭矩,谐波齿轮传动效率升高,其传动效率裕量也升高。

根据公式(15),可以计算得到其对应的确信可靠度,如图7所示。上述从传动效率裕量角度的分析结果与图7中的确信可靠度结果一致。确信可靠度随着负载扭矩的升高,转速的降低和温度的升高

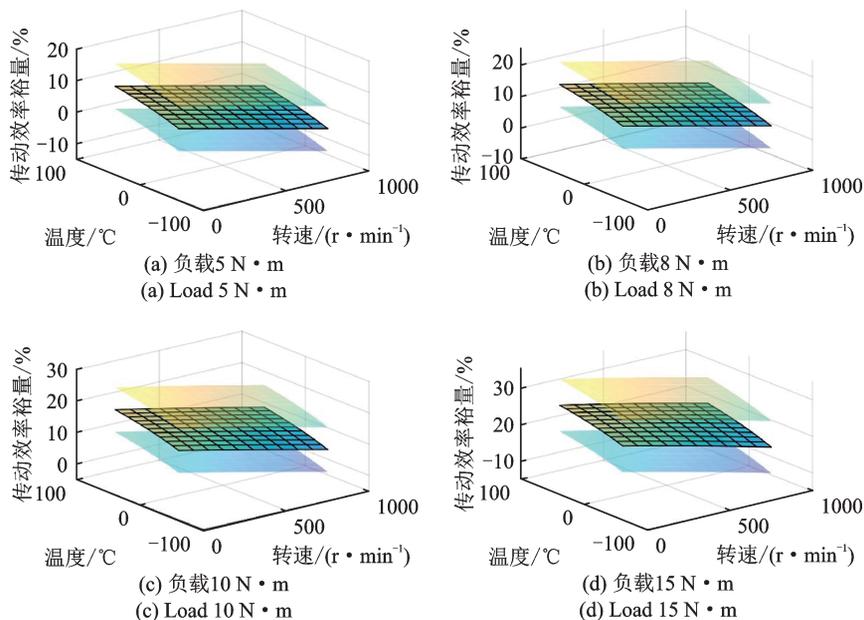


图 6 不同负载条件下的传动效率裕量及其 80% 置信区间

Fig. 6 Transmission efficiency margin and its 80% confidence interval under different loads

而升高。因此,在谐波减速器的实际使用过程中,根据谐波减速器的实际使用情况,可以适当提高谐波

减速器的负载扭矩、降低其转速或者提高环境温度,这有助于提高谐波齿轮传动效率可靠性。

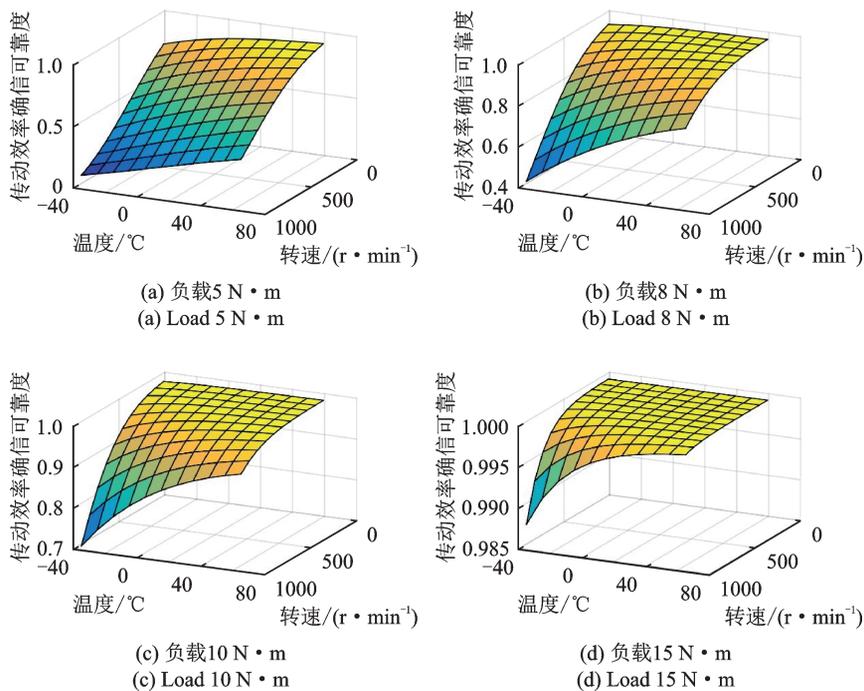


图 7 不同负载条件下的传动效率确信可靠度

Fig. 7 Belief reliability of transmission efficiency under different loads

4 结 论

本文基于可靠性科学原理和确信可靠性理论,对谐波齿轮传动效率的确信可靠性建模与分析开展研究。首先,本文考虑了谐波减速器输入功率的能量消耗,包括输出功率、啮合摩擦损耗、由于啮合力

在谐波轴承中引起的摩擦损耗和薄壁零件初变形所需径向力在谐波轴承中所引起的摩擦损耗等,以及外在影响因素对传动效率的影响,包括润滑方式、负载、转速和环境温度等,通过在谐波齿轮传动效率理论计算模型中引入代理模型的方式,构建了考虑多种外在影响因素的谐波齿轮传动效率模型。进一步考虑了传动效率与其阈值之间的距离,构建了谐波

齿轮传动效率裕量模型。然后,对裕量模型中的多源不确定性进行分析和量化,给出了谐波齿轮传动效率的确信可靠性模型。最后,基于极大似然估计方法,对模型中的未知参数进行标定。

通过一个 XB40-100 谐波减速器的案例验证了所提方法的实用性和有效性。结果表明,所提的谐波齿轮传动效率模型可以有效地将试验数据与理论模型结合,进而准确地计算谐波减速器在给定负载、转速和温度条件下的传动效率。通过谐波减速器传动效率的确信可靠性分析,发现适当提高谐波减速器的负载扭矩、降低其转速或者提高环境温度有助于提高谐波减速器传动效率裕量及其确信可靠性。

可靠性科学原理指出,产品会沿着退化时矢发生不可逆的退化(退化永恒原理)^[19],但是本文开展的谐波齿轮传动效率确信可靠性分析并没有考虑退化的影响。实际上,谐波齿轮传动效率的退化非常缓慢,但是在长期工作下,在谐波减速器的长期使用过程中,不可避免地会发生磨损,润滑环境会变得恶劣,这些都会增大谐波减速器的摩擦耗损,进而降低谐波齿轮传动效率裕量及其可靠度,因此,退化对传动效率可靠性的影响不可忽视。此外,在谐波减速器的退化过程中,仍然存在着多种多样的不确定性,如负载、转速和环境温度的不确定性等,这些都会影响谐波减速器的磨损过程,进而增大可靠性建模与分析的难度。因此,在未来谐波齿轮传动效率可靠性的研究中,需要科学合理地构建谐波齿轮传动效率的退化模型,考虑多源不确定性,进行可靠性分析与研究。

参考文献:

- [1] Musser C W. The harmonic drive: breakthrough in mechanical drive design[J]. Machine Design, 1960, 14: 89-93.
- [2] LI Xin-zi, SONG Chao-sheng, YANG Yong, et al. Optimal design of wave generator profile for harmonic gear drive using support function[J]. Mechanism and Machine Theory, 2020, 152: 103941.
- [3] LIAO Hong-bo, FAN Shi-xun, FAN Da-peng. Friction compensation of harmonic gear based on location relationship[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part I: Journal of Systems and Control Engineering, 2016, 230(8): 695-705.
- [4] 施祖康,肖诗林,迟云. 谐波齿轮传动的机械传动效率[J]. 南京理工大学学报(自然科学版), 1985(4): 107-117.
SHI Zu-kang, XIAO Shi-lin, CHI Yun. The mechanical efficiency of the harmonic drive[J]. Journal of Nanjing University of Science and Technology, 1985(4): 107-117.
- [5] 陈桦,孙波,庞静. 谐波齿轮传动的效率分析[J]. 机械科学与技术, 1995(3): 49-53.
CHEN Hua, SUN Bo, Pang Jing. Efficiency analysis for harmonic drives[J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 1995(3): 49-53.
- [6] Ianici Sava, Ianici Draghița. Constructive design and dynamic testing of the double harmonic gear transmission[J]. Analele Universitatii Eftimie Murgu Resita, 2015, 22(1): 231-238.
- [7] 杨连花. 谐波行星复合减速装置的设计研究及仿真分析[D]. 西安:长安大学, 2017.
YANG Lian-hua. Design research and simulation analysis on composite speed reducer of harmonic and planetary[D]. Xi'an: Chang'an University, 2017.
- [8] 李德举. 基于 ABAQUS 的谐波传动效率计算方法研究[D]. 大连:大连理工大学, 2013.
LI De-ju. Research on calculation methods of the efficiency of harmonic drive based on ABAQUS[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2013.
- [9] 肖京. 不同齿形谐波齿轮传动效率研究及啮合仿真[D]. 秦皇岛:燕山大学, 2016.
XIAO Jing. Research on transmission efficiency and meshing simulation of different tooth harmonic gear[D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2016.
- [10] 夏田,杨世勇,何乃如,等. 工业机器人用谐波减速器传动性能正交试验分析[J]. 科学技术与工程, 2017, 19: 138-141.
XIA Tian, YANG Shi-yong, HE Nai-ru, et al. Orthogonal experiment analysis on transmission performance of harmonic drive for industrial robots[J]. Science Technology and Engineering, 2017, 19: 138-141.
- [11] 李波,李瑞祥. 超载条件下空间润滑谐波减速器传动性能及摩擦磨损性能研究[J]. 摩擦学学报, 2011, 31(3): 216-220.
LI Bo, LI Rui-xiang. Transmission behaviors and tribological properties of the solid and grease lubricated harmonic drivers at overload condition[J]. Tribology, 2011, 31(3): 216-220.
- [12] 李波. 基于交互正交试验的空间用谐波减速器传动性能影响因素研究[J]. 航空学报, 2012, 33(2): 375-380.
LI Bo. Research of factors affecting transmission performance of harmonic drive in spacecraft based on interactive orthogonal experiment[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2012, 33(2): 375-380.
- [13] ZHOU Guang-wu, ZHANG Zhen-hua, ZHUANG Hua. Experimental study on transmission performance of harmonic drive under multifactor interaction[J]. Mechanics & Industry, 2019, 20(6): 614.
- [14] 李俊阳,王家序,范凯杰,等. 谐波减速器黏着磨损失效加速寿命模型研究[J]. 摩擦学学报, 2016, 36(3): 297-303.

- LI Jun-yang, WANG Jia-xu, FAN Kai-jie, et al. Accelerated life model for harmonic drive under adhesive wear[J]. Tribology, 2016, 36(3): 297-303.
- [15] LI Jun-yang, WANG Jia-xu, ZHOU Guang-wu, et al. Accelerated life testing of harmonic driver in space lubrication[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology, 2015, 229(12): 1491-1502.
- [16] 官浩. 空间谐波减速器性能退化与寿命分析研究[D]. 重庆:重庆大学, 2014.
- GUAN Hao. Research on performance degradation and life analysis of space harmonic driver[D]. Chongqing: Chongqing University, 2014.
- [17] 王洪星. 谐波齿轮传动效率的计算方法[J]. 北京航空学院学报, 1982(3): 111-120.
- WANG Hong-xing. Efficiency equations for different types of harmonic drives[J]. Journal of Beijing Institute of Aeronautics and Astronautics, 1982(3): 111-120.
- [18] 梁作斌, 杜佳佳, 郭梅. 齿轮风阻损失仿真及其实际应用[J]. 航空动力学报, 2017, 32(6): 1419-1424.
- LIANG Zuo-bin, Du Jia-jia, Guo Mei. Simulation of gear windage losses and its application[J]. Journal of Aerospace Power, 2017, 32(6): 1419-1424.
- [19] 康锐. 确信可靠性理论与方法[M]. 北京: 国防工业出版社, 2020.
- KANG Rui. Belief Reliability Theory and Methodology [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2020.
- [20] ZHANG Qing-yuan, KANG Rui, WEN Mei-lin. Belief reliability for uncertain random systems [J]. IEEE Transactions on Fuzzy Systems, 2018, 26 (6) : 3605-3614.
- [21] 王建辉, 李良, 董红卫, 等. RV减速器性能试验研究[J]. 机械工程师, 2018, 326(8): 127-129.
- WANG Jian-hui, LI Liang, DONG Hong-wei, et al. Experimental study on performance of RV reducer[J]. Mechanical Engineering, 2018, 326(8): 127-129.
- [22] 柏德恩, 全齐全, 李贺, 等. 伺服加载的谐波减速器启动动力矩测试系统[J]. 吉林大学学报(工学版), 2017 (6): 1804-1810.
- BAI De-en, QUAN Qi-quan, LI He, et al. Starting torque test system for harmonic drive based on servo loading[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2017(6): 1804-1810.
- [23] LIU Bao-ding. Uncertainty Theory[M]. Berlin: Springer, 2010.
- [24] Liu Yu-han. Uncertain random variables: a mixture of uncertainty and randomness [J]. Soft Computing, 2013, 17(4): 625-634.

Belief reliability modeling and analysis for transmission efficiency of harmonic gear

CHEN Wen-bin^{1,2}, LI Xiao-yang^{1,2}, TONG Bang-an^{1,2}, LI Yun³, KANG Rui^{1,2}

(1.School of Reliability and Systems Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China;

2.Science and Technology on Reliability and Environmental Engineering Laboratory, Beijing 100191, China;

3.Beijing Spacecrafts, China Academy of Space Technology, Beijing 100094, China)

Abstract: Based on the principles of reliability science and the belief reliability theory, the belief reliability modeling and analysis for the transmission efficiency of the harmonic drive are proposed. Considering the power loss during the transmission of harmonic gears, the theoretical model for the transmission efficiency of harmonic gears is constructed, where the multiple external factors that affect the transmission efficiency, including lubrication methods, load torque, rotating, and environmental temperature are considered by introducing an agent model. The transmission efficiency margin model is constructed by calculating the distance between the transmission efficiency and its threshold. The uncertainty analysis and quantification are conducted and the belief reliability model for the transmission efficiency of the harmonic drive is constructed, where the probability measure is employed to describe aleatory uncertainties. The unknown parameters in the transmission efficiency model are estimated through maximum likelihood estimation method using transmission efficiency testing data to achieve the combination of the theoretical model and testing data. A case study of XB40-100 harmonic reducer is used to illustrate the practicability and efficiency of the proposed method. The results show that the proposed method can combine the testing data with the theoretical model effectively and calculate the transmission efficiency of the harmonic reducer accurately under the given lubrication method, load, rotating speed, and temperature conditions. The belief reliability analysis results reveal that it is conducive to improve the transmission efficiency margin and its belief reliability by increasing the load torque, reducing the rotating speed, or increasing the environmental temperature appropriately.

Key words: harmonic gear; belief reliability; transmission efficiency; performance margin; uncertainty

作者简介: 陈文彬(1993—),男,博士研究生。电话: 18811409540; E-mail: chenwenbin@buaa.edu.cn。

通讯作者: 李晓阳(1980—),女,研究员。电话: (010)82338651; E-mail: leexy@buaa.edu.cn。