



周惠琴

行星齿轮传动系统均载分析

周惠琴, 李素有, 吴立言

(西北工业大学机电学院, 西安 710072)

摘要:建立了2K-H型行星齿轮传动系统的静力学计算模型,并分析了该系统的静力学均载机理。利用当量啮合误差原理,得到了当量啮合误差和载荷不均匀系数的计算公式,对比分析了各构件的制造误差和安装误差对传动系统载荷不均匀系数的影响,并从所分析的误差中得到了对系统均载性能影响最大的误差项,以便于工程实际中参考。

关键词:行星传动;当量啮合误差;载荷不均匀系数

中图分类号:TH13 文献标识码:A 文章编号:1003-8728(2008)09-1239-04

Analysis of Static Load Sharing in a Planetary Gearing

Zhou Huiqin, Li Suyou, Wu Liyan

(School of Mechatronics, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072)

Abstract: A calculative model for a single stage planetary gear (type 2K-H) is presented and the static analysis of the mechanism of load balance is performed. With the theory of equivalent of mesh error and equivalent of mesh stiffness, the formula of equivalent of mesh error and load sharing coefficient are obtained, and the load sharing coefficient of each planetary gear is calculated in consideration of the parts' manufacturing error and assembly error. The critical error is determined and it is helpful for the design of planetary gears.

Key words: planetary gear; equivalent of mesh error; load sharing coefficient

近年来,国内外对于行星传动静力学均载分析的研究比较多。日本学者日高照晃^[1]对均载机构中各种误差和载荷不均匀系数之间的关系进行了研究;Kahraman^[2]在考虑了齿轮的位置度偏差和齿形误差之后,对行星齿轮装置做了静态力学实验分析。在国内,肖铁英^[3]提出了当量啮合误差、等效啮合刚度的概念,并给出了载荷不均匀系数的计算公式和计算方法;陆俊华^[4]利用当量啮合误差的原理,并引入了当量啮合侧隙,对行星轮系载荷不均匀系数进行了计算,使所得结果更加符合工程实际;崔洪斌^[5]分析了静载条件下各制造误差和装配误差对行星轮间载荷分配的影响。

本文针对建立的2K-H型齿轮传动装置模型,利用当量啮合误差的方法,推导了在静力学条件下当量啮合误差和行星齿轮传动系统的载荷不均匀系数的

计算公式,并在此基础上分析了制造误差和装配误差对于均载机构的传动装置的载荷不均匀系数的影响。

1 系统等效计算模型

图1所示为2K-H型行星传动装置的运动简图。功率经太阳轮 s 输入,由各行星轮 p 分流后,经行星架 H 输出。图2是图1所示系统均载分析计算

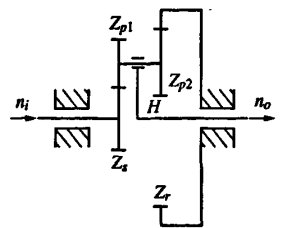


图1 2K-H型行星运动简图

模型。把系统看作是质量-弹簧体系统,以太阳轮 s 和内齿轮 r 作为基本浮动构件,以等效刚度表示啮合副、回转副以及支承处的弹性变形,假设 x, y 方向的等效刚度相同,其中: K_{sp} 为太阳轮和行星轮之间的等效啮合刚度; K_{pr} 为行星轮和内齿轮之间的等效啮合刚度; K_s, K_r 分别为太阳轮、内齿轮支承处的等效刚度。

收稿日期:2007-09-11

作者简介:周惠琴(1982-),硕士,研究方向为机械设计及理论, zhou@163.com

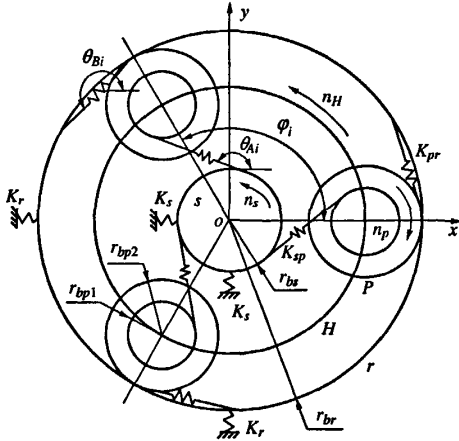


图2 系统的均载效果计算模型

2 当量啮合误差

所谓当量啮合误差,就是为了便于分析计算制造误差和装配误差对行星齿轮间载荷分配的影响,把各种误差投影到啮合线之后所得到的当量误差。

当量啮合误差造成的当量啮合侧隙主要由累积啮合误差和啮合侧隙改变量两部分组成。其中,累积啮合误差是由制造和装配误差引起的,啮合侧隙改变量是由基本构件浮动引起的。

影响系统载荷分配的因素主要包括:各行星轮的制造误差和装配误差。其中,以E、A分别表示制造误差和装配误差,以ε表示齿厚误差,以β、γ表示各误差的方向角,用下标s、pi、c、r分别表示太阳

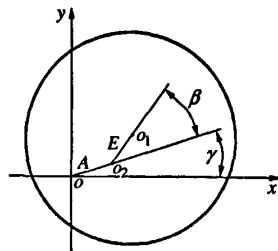


图3 各种误差示意图

轮、行星轮、行星架以及内齿轮。各构件的制造误差以及装配误差示意图如图3所示。其中:O为构件的理想安装位置(即在该位置上安装时无安装误差),O1为构件理想制造中心,O2为构件在轮系中的实际安装位置中心。

设行星轮1的初始位置相对于x轴正向的夹角为φ1,且当量啮合误差离开啮合线的方向为正。以α表示齿轮传动啮合角;φi表示第i个行星轮相对于行星轮1的位置角,φi=2π(i-1)/n。则在静力学条件下,各种误差导致的当量啮合误差分别表示如下:

由太阳轮制造偏心误差Es引起的当量啮合误差为eEs

$$e_{Es} = E_s \sin(\beta_s + \alpha - \varphi_i)$$

由太阳轮装配误差As引起的当量啮合误差为eAs

$$e_{As} = A_s \sin(\gamma_s + \alpha - \varphi_i)$$

由太阳轮基节误差Ebs引起的当量啮合误差为ebs

$$e_{bs} = E_{bs}$$

由内齿轮制造偏心误差Er引起的当量啮合误差为eEr

$$e_{Er} = E_r \sin(\beta_r - \alpha - \varphi_i)$$

由内齿轮装配误差Ar引起的当量啮合误差为eAr

$$e_{Ar} = A_r \sin(\gamma_r - \alpha - \varphi_i)$$

由内齿轮基节误差Ebr引起的当量啮合误差为ebr

$$e_{br} = E_{br}$$

由行星架制造偏心误差EH引起的当量啮合误差为eEH1(外啮合)和eEH2(内啮合)

$$e_{EH1} = -E_H \sin(\beta_H + \alpha - \varphi_i)$$

$$e_{EH2} = -E_H \sin(\beta_H - \alpha - \varphi_i)$$

由行星架安装误差AH引起的当量啮合误差为eAH1(外啮合)和eAH2(内啮合)

$$e_{AH1} = -A_H \sin(\gamma_H + \alpha - \varphi_i)$$

$$e_{AH2} = -A_H \sin(\gamma_H - \alpha - \varphi_i)$$

由第i个行星轮的制造偏心误差Epi引起的当量啮合误差为eEpi1(外啮合)和eEpi2(内啮合)

$$e_{Epi1} = -E_{pi} \sin(\beta_{pi} + \alpha - \varphi_i)$$

$$e_{Epi2} = -E_{pi} \sin(\beta_{pi} - \alpha - \varphi_i)$$

由第i个行星轮的装配误差Api引起的当量啮合误差为eApi1(外啮合)和eApi2(内啮合)

$$e_{Api1} = -A_{pi} \sin(\gamma_{pi} + \alpha - \varphi_i)$$

$$e_{Api2} = -A_{pi} \sin(\gamma_{pi} - \alpha - \varphi_i)$$

由第i个行星轮的基节误差Ebp引起的当量啮合误差为ebp1(外啮合)和ebp2(内啮合)

$$e_{bp1} = E_{bp}, e_{bp2} = E_{bp}$$

将上述各项当量啮合误差叠加,得到两条啮合线上的累积啮合误差

$$e_{pi} = e_{Es} + e_{As} + e_{bs} + e_{Epi1} + e_{Api1} + e_{bp1} + e_{EH1} + e_{AH1}$$

$$e_{pi} = e_{Er} + e_{Ar} + e_{br} + e_{Epi2} + e_{Api2} + e_{bp2} + e_{EH2} + e_{AH2}$$

侧隙改变量Δu和Δri与浮动构件中心位移的大小有关。设太阳轮中心在x,y方向的位移量为xs与ys,内齿轮中心的浮动位移量为xr与yr,第i个行星轮相对于太阳轮的方位角(见图2)θAi = π/2 - α + φi,内齿轮相对于第i个行星轮的方位角(见图2)

$\theta_{Bi} = \frac{\pi}{2} + \alpha + \varphi_i$, 则

$$\Delta_{si} = x_i \cos \theta_{Ai} + y_i \sin \theta_{Ai} \Delta_{ri} = x_i \cos \theta_{Bi} + y_i \sin \theta_{Bi}$$

则太阳轮与第 i 个行星轮的综合啮合误差

$$\Delta_{spi} = e_{spi} + \Delta_{si}$$

第 i 个行星轮与内齿轮的综合啮合误差

$$\Delta_{pir} = e_{pir} + \Delta_{ri}$$

3 载荷不均匀系数的计算

载荷不均匀系数指中心轮与受载最大的行星轮啮合时的法向载荷,与载荷分配均匀时中心轮与行星轮啮合时的法向载荷之比。

在太阳轮 s 上加以传动转矩 T , 则在这一加载过程中, 会有一个行星轮首先进入啮合状态, 而其他 $(n-1)$ 个行星轮与传动齿轮之间存在啮合侧隙。随着输入转矩 T 的加大, 各啮合侧隙逐渐减小直至所有行星轮均进入啮合状态。设在齿面载荷的作用下, 由于轮齿的弹性变形所引起的太阳轮和第 i 个行星轮的自转角分别为 θ_s 和 θ_{pi} ($i=1, 2, \dots, n$), 由以上分析可得

太阳轮和第 i 个行星轮间的齿面载荷 F_{spi}

$$F_{spi} = K_{sp} (r_{bs} \theta_s + r_{bpi} \theta_{pi} + \Delta_{spi})$$

第 i 个行星轮和内齿轮间的齿面载荷 F_{pir}

$$F_{pir} = K_{pr} (-r_{bpi} \theta_{pi} + \Delta_{pir})$$

太阳轮静力平衡方程

$$T - r_{bs} \sum_{i=1}^n F_{spi} = 0$$

行星轮静力平衡方程

$$F_{spi} r_{bpi} - F_{pir} r_{bp2} = 0$$

由太阳轮和内齿轮浮动引起的静力平衡方程

$$\sum_{i=1}^n F_{spi} \cos \theta_{Ai} + K_s x_s = 0$$

$$\sum_{i=1}^n F_{spi} \sin \theta_{Ai} + K_s y_s = 0$$

$$\sum_{i=1}^n F_{pir} \cos \theta_{Bi} + K_r x_r = 0$$

$$\sum_{i=1}^n F_{pir} \sin \theta_{Bi} + K_r y_r = 0$$

将上述方程联立, 组成 $(3n+5)$ 元一次方程组, 解得各行星轮啮合时的法向载荷。载荷分配均匀时中心轮与行星轮啮合时的法向载荷 $F_n = T / (nr_{bs})$, 则可得第 i 个行星轮的载荷不均匀系数 $K_{pi} = \frac{F_{spi}}{F_n} =$

$\frac{F_{pir} r_{bp2}}{F_n r_{bpi}}$ 。则行星传动的载荷不均匀系数 $K_p = (K_{pi})_{\max}$ 。

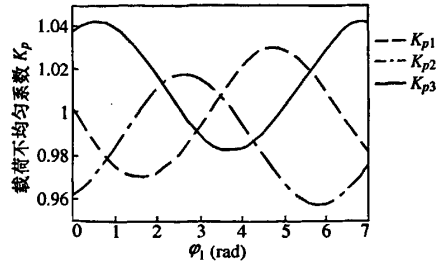


图4 误差综合作用时各行星轮的载荷不均匀系数

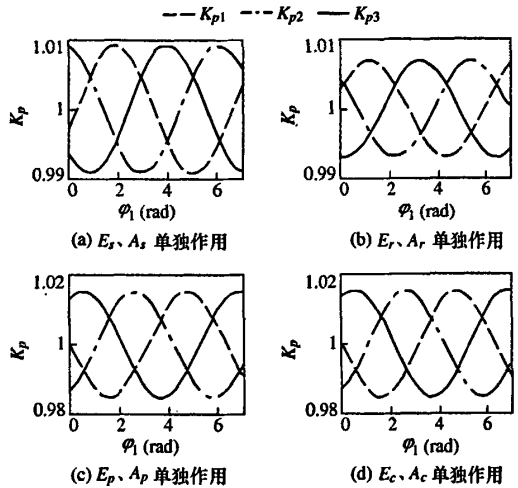


图5 主要误差单独作用时系统的载荷不均匀系数

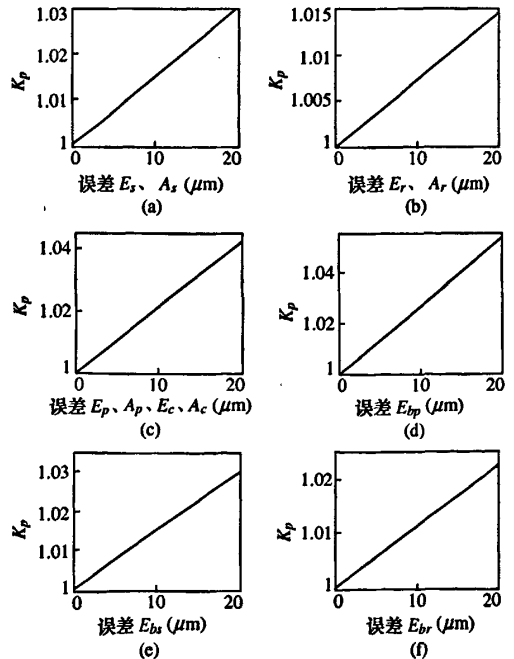


图6 主要误差单独变化时系统的载荷不均匀系数

4 主要参数对 K_p 的影响

本文对各误差取值如下: E 和 A 均取 $6 \mu\text{m}$, 角度误差取 $15'$, 齿数 $Z_1 = 20, Z_{p1} = 30, Z_{p2} = 40, Z_2 = 90$; 模数 $m = 2.5 \text{ mm}$; 行星轮个数 $n_p = 3$; 输入功率 $P = 250 \text{ kW}$; 输入轴转速 $n_s = 12000 \text{ r/min}$; 太阳轮与行星轮之间的等效啮合刚度 $K_{sp} = 9 \times 10^6 \text{ N/mm}$; 行星轮与内齿轮之间的等效啮合刚度 $K_{ip} = 9 \times 10^6 \text{ N/mm}$; 太阳轮支承刚度 $K_s = 9.42 \times 10^3 \text{ N/mm}$; 内齿轮支承刚度 $K_i = 9.42 \times 10^3 \text{ N/mm}$ 。

当行星轮 1 的初始位置相对于 x 轴正向的夹角为 φ_1 , 在 $[0, 7 \text{ rad}]$ 之间变化时, 各误差综合作用时各行星轮的载荷不均匀系数见图 4, 各行星轮的静态载荷不均匀系数见图 5, 各主要误差单独作用时各行星轮的静态载荷不均匀系数见图 6。

从结果来看, 系统的载荷不均匀系数 $K_p = 1.043$ 。由此可见, 利用当量啮合误差的方法计算的系统在静力学条件下的载荷不均匀系数 K_p 表明, 系统已经达到了很好的均载效果。

5 结论

(1) 在误差值相同的情况下, 对于所分析的各制造和装配误差, 行星轮和行星架的误差变化对行星齿轮传动系统载荷不均匀程度的影响最大, 太阳轮的影响次之, 内齿轮的影响最小。

(2) 随着误差值增大, 对于所分析的各制造误差和装配误差, 行星轮和行星架的误差变化对行星齿轮传动系统载荷不均匀程度的影响最大, 太阳轮的影响次之, 内齿轮的影响最小; 基节误差的影响程度比制造偏心误差和安装误差大。

(3) 随着行星轮位置的连续变化, 在各种误差的作用下, 系统的载荷不均匀系数呈现周期性变化。

[参考文献]

- [1] 日高照晃, 山本信行, 石田武. 行星齿轮装置均载机构中的各种误差和载荷分配的关系 [A]. 日本机械学会论文集 [C], 1986
- [2] Kahraman A. Static load sharing characteristics of transmission planetary gear sets: model and experiment [A]. Proceedings of Society of Automotive Engineers [C], USA, 1999
- [3] 肖铁英, 袁盛治, 陆卫杰. 行星齿轮机构均载系数的计算方法 [J]. 东北重型机械学院学报, 1994, 10(4): 290 ~ 295
- [4] 陆俊华, 李斌, 朱如鹏. 行星齿轮传动静力学均载分析 [J]. 机械科学与技术, 2005, 24(10): 702 ~ 709
- [5] 崔洪斌, 杨铁男. 静载行星轮系误差对行星轮载荷分配的影响 [J]. 河北机电学院学报, 1993, 10(4): 41 ~ 49

(上接第 1238 页)

3 结论


本文通过实验, 获得 TiNi 形状记忆合金棒材在不同加载速率下的超弹性应力-应变曲线, 并以表征合金超弹性行为的特征参数为分析对象, 得到了合金的超弹性行为特性与加载速率的相关性。随着加载速率的增加, 应力-应变曲线的加、卸载相变平台上升, 各相变应力出现不同程度的增加; 但各阶段弹性模量随加载速率变化不大; 加载相变应变及一次加、卸载循环后的残余应变均随加载速率增加而增加, 速率较小时, 增幅较大, 速率较大时, 增幅减缓; 合金加、卸载循环后的滞回耗能能力随加载速率增加, 先减小后增大。结果表明: TiNi 形状记忆合金棒材在静态和非静态条件下的室温力学性能存在一定差异, 在不同频率范围下设计和应用 TiNi 形状记忆合金棒材时, 应考虑此种差异, 正确使用。

本文的实验结果与文献 [11] 中提到的丝材相关力学行为进行定性比较发现: TiNi 形状记忆合金棒、丝材的超弹性力学行为随加载速率的变化规律存在较大差异, 应用 TiNi 形状记忆合金棒时, 不能采用丝材的力学性能参数进行相关设计与计算。

[参考文献]

- [1] Gandhi M V, Thompson B S. Smart Materials and Structures [M]. London: Chapman and Hall, 1992
- [2] 赵连城, 蔡伟, 郑玉峰. 合金的形状记忆效应与超弹性 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2002
- [3] 左晓宝, 李爱群, 倪立峰等. 超弹性形状记忆合金 (NiTi) 力学性能的试验研究 [J]. 土木工程学报, 2004, 37(12): 10 ~ 16
- [4] 巩建鸣等. 循环加载条件下 TiNi 形状记忆合金超弹性变形特性分析与模拟 [J]. 航空材料学报, 2002, 22(4): 6 ~ 12
- [5] Sakuma T, Suzuki A. Superelastic behavior under cyclic loading for coil spring of Ti-Ni shape memory alloy [J]. Materials Transactions, 2007, 48(3): 422 ~ 427
- [6] 高静等. 热处理对医用 TiNi 细丝显微组织及形状记忆效应的影响 [J]. 稀有金属材料与工程, 2005, 34(2): 299 ~ 302
- [7] Tobushi H, et al. Influence of strain rate on superelastic behavior of TiNi shape memory alloy [A]. Proc. Instn. Mech. Engrs, Part L [C], 1999
- [8] Chen W W, et al. Compressive superelastic behavior of a NiTi shape memory alloy at strain rates of $0.001 \sim 750 \text{ s}^{-1}$ [J]. International Journal of Solids and Structures, 2001, 38(50 ~ 51)
- [9] Tobushi H, et al. Deformation behavior of TiNi shape memory alloy under strain or stress controlled conditions [A]. Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng. [C], 2002, 4699: 374 ~ 385
- [10] Nakayama H, et al. Strain-rate effects on TiNi and TiNiCu shape memory alloys [A]. Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng. [C], 2005
- [11] 李尚荣, 马记, 许曼等. 低应变速率下形状记忆合金的特性实验研究 [J]. 实验力学, 2006, 21(3): 322 ~ 328

行星齿轮传动系统均载分析

作者: [周惠琴](#), [李素有](#), [吴立言](#), [Zhou Huiqin](#), [Li Suyou](#), [Wu Liyan](#)
作者单位: [西北工业大学, 机电学院, 西安, 710072](#)
刊名: [机械科学与技术](#) 
英文刊名: [MECHANICAL SCIENCE AND TECHNOLOGY FOR AEROSPACE ENGINEERING](#)
年, 卷(期): 2008, 27 (9)
被引用次数: 2次

参考文献(5条)

1. 日高照晃;山本信行;石田武 [行星齿轮装置均载机构中的各种误差和载荷分配的关系](#) 1986
2. [Kahramn A](#) [Staic load sharing characteristics of transmission planetary gear sets:model and experiment](#) 1999
3. 肖铁英;袁盛治;陆卫杰 [行星齿轮机构均载系数的计算方法](#) 1994(04)
4. 陆俊华;李斌;朱如鹏 [行星齿轮传动静力学均载分析](#)[期刊论文]-[机械科学与技术](#) 2005(10)
5. 崔洪斌;杨铁男 [静载行星轮系误差对行星轮载荷分配的影响](#) 1993(04)

本文读者也读过(10条)

1. [张涛](#). [Zhang Tao](#) [行星齿轮传动均载的研究](#)[期刊论文]-[机械科学与技术](#)2008, 27 (9)
2. [陆俊华](#). [李斌](#). [朱如鹏](#). [LU Jun-hua](#). [LI Bin](#). [ZHU Ru-peng](#) [行星齿轮传动静力学均载分析](#)[期刊论文]-[机械科学与技术](#)2005, 24(6)
3. [王宇航](#). [佟占胜](#). [吴秀英](#). [张帆](#). [李勇鹏](#). [WANG Yu-hang](#). [TONG Zhan-sheng](#). [WU Xiu-ying](#). [ZHANG Fan](#). [LI Yong-Peng](#) [行星齿轮传动的均载机构及选择](#)[期刊论文]-[重型机械](#)2010(z2)
4. [何凤梅](#) [减小行星齿轮传动载荷分配不均匀系数的几种均载装置](#)[期刊论文]-[煤矿机械](#)2002(1)
5. [尤明明](#). [吴立言](#). [何丽](#). [YOU Ming-ming](#). [WU Li-yan](#). [HE Li](#) [基于有限元法的行星传动不均载系数计算](#)[期刊论文]-[机械设计与制造](#)2009(3)
6. [徐正兴](#). [辛洪兵](#). [战晓磊](#). [XU Zheng-xing](#). [XIN Hong-bing](#). [ZHAN Xiao-lei](#) [行星齿轮传动均载问题的研究](#)[期刊论文]-[北京工商大学学报\(自然科学版\)](#) 2007, 25(6)
7. [靳艳丽](#). [刘凯](#). [马朝锋](#). [JIN Yan-li](#). [LIU Kai](#). [MA Chao-feng](#) [风力发电机增速行星传动系统均载分析](#)[期刊论文]-[重型机械](#)2007(5)
8. [张涛](#). [ZHANG Tao](#) [行星齿轮油膜均载机构动力学分析](#)[期刊论文]-[起重运输机械](#)2006(8)
9. [焦建宁](#) [行星齿轮传动的均载](#)[期刊论文]-[家用电器科技](#)2002(5)
10. [周建星](#). [董海军](#). [Zhou Jianxing](#). [Dong Haijun](#) [基于非线性动力学的行星传动均载性能研究](#)[期刊论文]-[机械科学与技术](#)2008, 27(6)

引证文献(2条)

1. [杨为](#). [孙宏](#). [黄一林](#) [装配误差对风电齿轮箱动载系数的影响规律研究](#)[期刊论文]-[机械设计与制造](#) 2012(11)
2. [杜进辅](#). [方宗德](#). [王宝宾](#). [董皓](#) [基于变形协调的行星轮系均载特性研究](#)[期刊论文]-[航空动力学报](#) 2012(5)

本文链接: http://d.g.wanfangdata.com.cn/Periodical_jkxyjs200809029.aspx