

行星齿轮减速器均载性能动态的优化设计

Optimization design on dynamic load sharing property of planetary gear reducer

王娟 李同杰 姚智华 易克传

WANG Juan LI Tong-jie YAO Zhi-hua YI Ke-chuan

(安徽科技学院机械工程学院, 安徽 滁州 233100)

(College of Mechanical Engineering, Anhui Science & Technology University, Chuzhou, Anhui 233100, China)

摘要:基于遗传算法搜索技术以及行星齿轮传动系统的弯扭耦合振动模型,完成某 2K-H 型行星齿轮减速器动态均载性能的优化设计。通过行星齿轮传动系统动力学响应的数值计算,确定对减速器均载性能影响较为显著的几个设计参数,结合工程中方便修改实现的原则,从中选择内、外啮合副的齿侧间隙作为优化设计变量。根据工程中齿侧间隙的许可取值范围,确定设计变量的搜索区间。经过遗传算法的搜索,最终获得一组内、外啮合副的最优齿侧间隙组合,数值试验验证在该组参数组合下行星齿轮减速器的均载性能有了明显改善。

关键词:行星齿轮;减速器;均载性能;动力学优化;遗传算法

Abstract: Dynamic load sharing property optimization of a 2K-H planetary gear reducer is carried out based on genetic algorithm and the bending torsional coupling model of the planetary gear train. Some design parameters which have significant influence on the load sharing property of the reducer are chosen by using the method of numerical calculation about the dynamic response. According to principle that parameter is easy to modify in actually engineering project, clearance of the external and internal gear pairs are selected as design variables from the above chosen parameters. According to the clearance region of a gear pair in actually engineering project, the scope of design parameters is fixed. A global optimum clearance of the external and internal gear pairs are gotten by using genetic algorithm, and numerical test proved that the load sharing property of the planetary gear reducer improve significantly after optimization.

Keywords: planetary gear; reducer; load sharing property; dynamic optimization; genetic algorithm

基金项目:安徽省教育厅自然科学重点项目(编号:KJ2015A179)

作者简介:王娟,女,安徽科技学院讲师,硕士。

通讯作者:李同杰(1980—),男,安徽科技学院副教授,博士。

E-mail: litongjie2000@163.com

收稿日期:2015-11-27

行星轮系功率分流的传动特点(即载荷由几个行星轮共同分担)决定了行星齿轮减速器具有承载能力高、结构紧凑的优点^[1]。然而由于不可避免的制造误差、安装误差、构件的弹性变形等因素,行星齿轮减速器中各行星轮所承担的载荷大小并不均匀,于是就产生了行星轮系传动中的均载问题^[2-3]。行星齿轮减速器被广泛应用于食品机械中^[4],其均载性能问题将会导致减速器中某些行星轮由于偏载严重而超载,最终会使整个机械的使用寿命以及运行品质受到影响。

国内外众多专家学者^[4-6]对行星齿轮减速器的均载性能开展过研究,但多以行星齿轮传动系统设计参数对其均载性能影响规律的研究等动力学正问题为主。涉及到行星齿轮减速器均载性能优化的动力学反问题研究的文献尚不多见,仅有以轴承支撑刚度为优化设计变量对行星齿轮的均载性能进行的优化设计^[7],但是考虑到轴承支撑刚度修改的困难性,这种优化策略在实际的工程应用中很难实现。出于上述研究需要以及行星轮系均载性能优化问题的特点,本设计将用遗传算法并采用工程中容易修改的系统参数为设计变量对行星齿轮减速器的均载性能开展动态优化设计。

1 动力学模型

经典的行星齿轮传动系统的弯扭耦合振动模型见图 1^[8-9]。图 1 中,定参考系 xy 固定于基础上,动参考系 HV 固定于行星架上。太阳轮存在横向以及转动 3 个振动自由度(θ_s, H_s, V_s),每个行星轮均存在 1 个转动自由度 θ_{pi} ,行星架也存在一个转动自由度 θ_c 。按矩形波时变的内外齿轮副的啮合刚度分别以 k_{rpi} 、 k_{spi} 表示,内外啮合副的齿侧间隙以 b_r 、 b_s 表示。

根据刚体平面运动微分方程,可得出上述动力学模型的运动微分方程见式(1)。

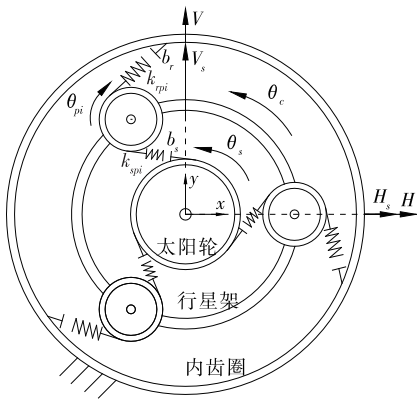


图1 行星齿轮传动系统的弯扭耦合动力学模型
Figure 1 Bending-torsional coupling dynamical model of planetary gear train

力角 $\alpha = 20^\circ$, 太阳轮齿数 $z_s = 26$, 行星轮齿数 $z_{pi} = 39$, 内齿圈齿数 $z_r = 106$, 行星轮个数 $N = 3$, 质量 $M_s = 0.386 \text{ kg}$, 当量质量 $m_s = 0.246 \text{ kg}$, $m_c = 1.153 \text{ kg}$, $m_p = 0.690 \text{ kg}$, $k_s = 3 \times 10^6 \text{ N/m}$ 。

2 动力学优化过程

行星齿轮减速器均载性能之优劣可用均载系数 Ω 来考评, 所以在进行均载优化设计时可以用它来作为目标函数。 Ω 是一个与行星轮系振动响应位移有关的函数, 其值越接近 1 表示均载性能越好^[10]。由于目前尚无法获得行星齿轮传动系统的振动响应位移, 在优化过程中的每一次优化迭代都必须对系统动力学方程(1)进行数值求解。所以行星齿轮减速器均载性能的优化设计本质是一个非线性的动态优化设计问题。考虑到非线性优化问题的全局最优性、鲁棒性和并行运算性等方面问题, 本节将采用遗传算法对行星齿轮减速器的均载性能进行动力学优化。

2.1 目标函数的确定

选择能够反映系统均载性能好坏的行星齿轮减速器均载系数 Ω 作为目标函数^[10], 其定义:

某一瞬时(τ 时刻)内外啮合副第 i 路行星轮的动载系数 $\Omega_{spi}(\tau)$ 、 $\Omega_{rpi}(\tau)$ 定义如式(3)所示, 它刻画了某一瞬时时减速器的均载情况。

$$\begin{cases} \Omega_{spi}(\tau) = N \times P_{spi}(\tau) / \sum_{i=1}^N P_{spi}(\tau) \\ \Omega_{rpi}(\tau) = N \times P_{rpi}(\tau) / \sum_{i=1}^N P_{rpi}(\tau) \end{cases} \quad (3)$$

该瞬时内外啮合副的动态均载系数定义为式(4):

$$\begin{cases} \Omega_s(\tau) = N \times \max[\Omega_{spi}(\tau)] / \sum_{i=1}^N \Omega_{spi}(\tau) \\ \Omega_r(\tau) = N \times \max[\Omega_{rpi}(\tau)] / \sum_{i=1}^N \Omega_{rpi}(\tau) \end{cases} \quad (4)$$

在一个稳态运行过程中, 内外啮合副的均载系数 Ω_r 与 Ω_s 定义为动态均载系数 $\Omega_r(t)$ 与 $\Omega_s(t)$ 在一个系统周期 T 内波动的最大值:

$$\begin{cases} \Omega_s = \max[\Omega_s(\tau)] \\ \Omega_r = \max[\Omega_r(\tau)] \end{cases}, \tau \in [0 \sim T] \quad (5)$$

式(5)中, 系统周期 T 为行星齿轮系统的一个振动周期。显然, 内外啮合副的均载系数是大于 1 的某个正数, 其值越接近 1 说明行星齿轮减速器的均载性能越好。

为了综合衡量行星齿轮减速器内外啮合副的均载性能, 优化设计的目标函数取为内外啮合副均载系数的加权平均, 即系统均载系数:

$$\Omega = 0.5 \times \Omega_s + 0.5 \times \Omega_r \quad (6)$$

2.2 设计变量的选择

行星齿轮减速器的设计参数众多, 能够入选为优化设计变量者必须具备两个特质: ① 行星齿轮减速器的均载性能要对参数的变化足够敏感, 亦即随着参数的变化均载性能能够显著发生变化; ② 设计参数在工程上要易于修改实现。

通过数值方法求解方程(1), 再结合式(2)~(6)即可以

$$\begin{cases} m_s \ddot{x}_s + \sum_{i=1}^N P_{spi} = T_D / r_{ts} \\ M_s H_s + \sum_{i=1}^N P_{spi} \sin[\alpha - \varphi_i] + k_s H_s = 0 \\ M_s \ddot{V}_s + \sum_{i=1}^N P_{spi} \cos[\alpha - \varphi_i] + k_s V_s = 0 \\ m_p \ddot{x}_{pi} - P_{spi} + P_{rpi} = 0 \\ m_c \ddot{x}_c - \sum_{i=1}^N (P_{spi} + P_{rpi}) = -T_L / r_c \end{cases} \quad (1)$$

式中:

- M_s ——太阳轮质量, kg;
- m_s ——太阳轮扭转当量质量, kg;
- m_p ——行星轮扭转当量质量, kg;
- m_c ——行星轮扭转当量质量, kg;
- x_s —— θ_s 在啮合线上产生的线位移, m;
- x_{pi} —— θ_{pi} 在啮合线上的线位移, m;
- x_c —— θ_c 在啮合线上的线位移, m;
- k_s ——太阳轮轴承支撑刚度, N/m;
- α ——齿轮压力角, ($^\circ$);
- φ_i ——第 i 个行星轮的位置角, ($^\circ$);
- N ——行星轮个数;
- T_D ——太阳轮输入扭矩, N·m;
- T_L ——行星架输出扭矩, N·m;
- P_{spi} ——第 i 路外啮合齿轮副的动载荷, N;
- P_{rpi} ——第 i 路内啮合齿轮副的动载荷, N。

上述参数的具体表达式文献[8—9]中已有详细说明, 在此不再赘述。由于存在齿侧间隙以及时变啮合刚度等因素, 方程(1)是一个非光滑、时变系数的强非线性方程组, 按目前数学手段只能获得其数值解。正常啮合状态下的 τ 时刻的动载荷 P_{spi} 、 P_{rpi} 为方程(1)解位移(x_s , H_s , V_s , x_{pi} , x_c)的函数:

$$\begin{cases} P_{spi} = k_{spi}(\tau) [x_s - x_{pi} - x_c + H_s \sin(\alpha - \varphi_i) + V_s \cos(\alpha - \varphi_i)] \\ P_{rpi} = k_{rpi}(\tau) (x_{pi} - x_c) \end{cases} \quad (2)$$

行星齿轮减速器的基本参数为: 模数 $m = 1.75 \text{ mm}$, 压

获得行星齿轮减速器各设计参数对减速器均载性能影响显著与否方面的信息。图 2~5 分别是齿侧间隙取不同值时行星齿轮减速器内外啮合副的动态均载系数波动情况。仿真时,内外啮合副齿侧间隙取为同一值 b 。

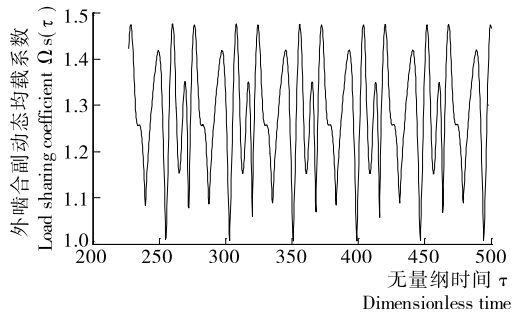


图 2 $b=5\times 10^{-5}$ m 时外齿轮副均载性能

Figure 2 Load sharing property of external gear pair when $b=5\times 10^{-5}$ m

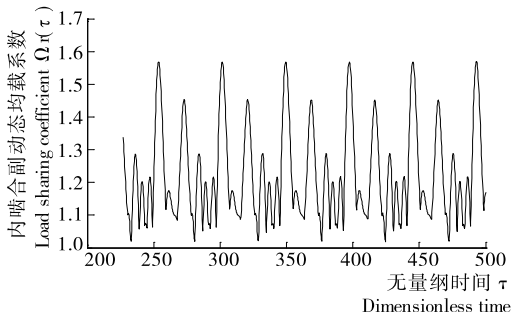


图 3 $b=5\times 10^{-5}$ m 时内齿轮副均载性能

Figure 3 Load sharing property of internal gear pair when $b=5\times 10^{-5}$ m

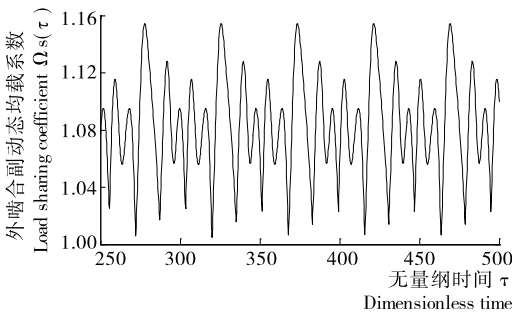


图 4 $b=3\times 10^{-4}$ m 时外齿轮副均载性能

Figure 4 Load sharing property of external gear pair when $b=3\times 10^{-4}$ m

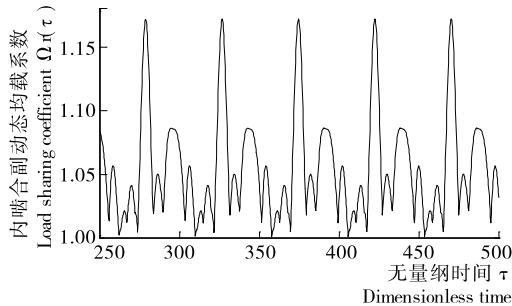


图 5 $b=3\times 10^{-4}$ m 时内齿轮副均载性能

Figure 5 Load sharing property of internal gear pair when $b=3\times 10^{-4}$ m

上述仿真结果结合式(6)可得,当间隙值取 5×10^{-5} m 时系统均载系数 Ω 达到了 1.521,而当齿侧间隙修改为 3×10^{-4} m 时系统均载系数 Ω 下降为 1.156。显然行星齿轮减速器的均载性能要对齿侧间隙值的变化非常敏感,适合选作优化的设计变量。

类似的方法,通过大量的数值试验考查其他设计参数可以发现,减速器中各齿轮的齿数、模数、太阳轮轴承的支撑刚度等参数都会对行星齿轮减速器的均载性能有显著影响。但从工程上易于修改实现的角度来说,修改齿轮的齿数、模数或者太阳轮轴承支撑刚度相当于从根本上改变了原减速器的整体设计结构,而齿侧间隙的修改则更容易实现且不会对系统其他设计参数造成显著影响。

通过上述讨论,行星齿轮减速器均载性能优化设计的变量选择为 $[x_1, x_2]=[b_s, b_r]$ 。考虑到工程中齿侧间隙的实际取值范围^[11],设计变量的搜索上下限取为 $10^{-5} \leq x_i \leq 10^{-3}, i=1,2$ 。

2.3 基于遗传算法的动力学优化

由于优化过程是为获得更小的行星齿轮减速器均载系数,所以遗传算法的适应值函数取为目标函数,即 $f=\Omega$ 。最大进化代数取 200,最好个体选择率取 0.2,杂交概率取 0.9,变异率取 0.05,采用二进制对设计变量进行编码。通过选择、杂交、变异及最优保护等算子操作,获得下一代染色体群,经过有限次迭代,即可获得最优染色体。优化过程中适应度随进化代数的变化曲线见图 6。

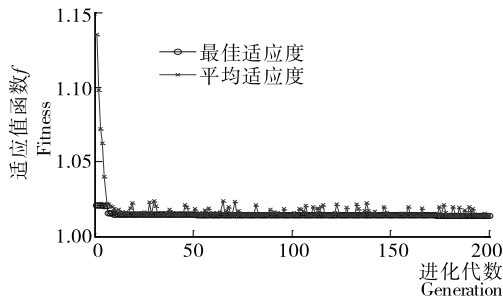


图 6 适应度随进化代数的变化曲线

Figure 6 Changing curve about fitness with generation

由图 6 可知,从第 10 代往后适应值函数变化近似为一条水平直线,即经过 10 代左右的遗传进化,基本上已经接近了最优解,说明采于遗传算法进行行星齿轮减速器均载性能的动力学优化是非常高效的。经过 200 代的遗传进化,最终获得的最优齿侧间隙值为 $b_s=8.2\times 10^{-4}$ m, $b_r=9.4\times 10^{-4}$ m,在此间隙值下行星齿轮减速器的均载系数 $\Omega=1.016$,较优化前 $b_s=b_r=3\times 10^{-4}$ m 间隙下的均载系数 $\Omega=1.156$ 有了明显提高。

图 7、8 分别是采用最优齿侧间隙仿真得到的行星齿轮减速器内外啮合副的动态均载系数。由图 7、8 可知,优化后的减速器均载性能比优化前(图 2~5)有了大幅提升。

3 结论

(1) 根据行星齿轮减速器均载性能优化设计的非线性、

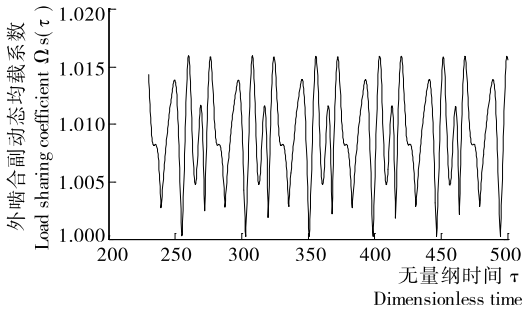


图 7 优化后系统外啮合副均载性能

Figure 7 Load sharing property of external gear pair after optimization

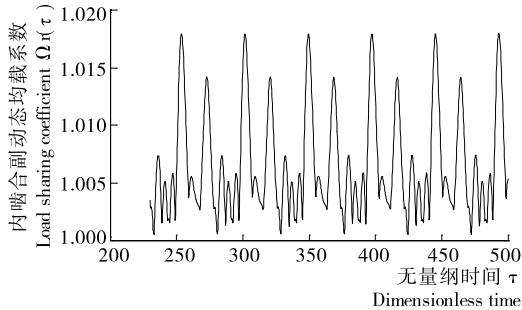


图 8 优化后系统内啮合副均载性能

Figure 8 Load sharing property of internal gear pair after optimization

动力学优化的本质,基于遗传算法搜索技术以及行星齿轮传动系统的弯扭耦合振动模型,完成了某 2K-H 型行星齿轮减速器动态均载性能的优化设计。

(2) 数值试验表明,采于遗传算法进行行星齿轮减速器均载性能的动力学优化是非常高效的,优化后的行星齿轮减

速器均载性能较优化前有了显著提高。

参考文献

[1] 张媛, 冷崇杰, 王晶. 行星齿轮减速器内齿圈模态分析[J]. 食品与机械, 2010, 26(1): 110-112.

[2] 叶福民, 朱如鹏, 鲍和云, 等. 非等模数非等压力角行星齿轮系的动力学均载特性[J]. 华南理工大学学报, 2011, 39(1): 117-123.

[3] 陆俊华, 朱如鹏, 靳广虎. 行星传动动态均载特性分析[J]. 机械工程学报, 2009, 45(5): 85-90.

[4] Kahraman A. Load sharing characteristics of planetary transmissions[J]. ASME, Mechanism and Machine Theory, 1994, 29(8): 1 151-1 165.

[5] 周建星, 董海军. 基于非线性动力学的行星传动均载性能研究[J]. 机械科学与技术, 2008, 27(6): 808-811.

[6] Singh A. Application of a system level model to study the planetary load sharing behavior[J]. ASME, Journal of Mechanical Design, 2005, 127(12): 469-476.

[7] 袁茹, 王三民, 沈允文. 行星齿轮传动的功率分流动态均衡优化设计[J]. 航空动力学报, 2000, 15(4): 410-412.

[8] 李同杰, 朱如鹏, 鲍和云, 等. 行星齿轮系扭转非线性振动建模与运动分岔特性研究[J]. 机械工程学报, 2011, 47(21): 76-83.

[9] Li Tong-jie, Zhu Ru-peng, Bao He-yun. Stability of motion state and bifurcation properties of planetary gear train[J]. Journal of Central South University of Technology, 2012, 19: 1 543-1 547.

[10] 方宗德, 沈允文, 黄镇东. 2K-H 行星减速器的动态特性[J]. 西北工业大学学报, 1990, 10(4): 361-371.

[11] 成大先. 机械设计手册[M]. 5 版. 北京: 化学工业出版社, 2008: 14-120.

(上接第 43 页)

参考文献

[1] Kleoppe J W, Schipper B, Bakker P. Proposed elimination of the term endorhizosphere [J]. Phytopathology, 1992, 82: 726-727.

[2] Stierle A, Strobel G, Stierle D. Taxol and taxane production by *Taxomyces andreanae*, an endophytic fungus of pacific yew[J]. Science, 1993, 260: 214-216.

[3] Joseph B, Priya R M. Bioactive compound from endophytes and their potential in pharmaceutical effect; a review[J]. American Journal of Biochemistry and Molecular Biology, 2011, 1(3): 291-309.

[4] 卢轩, 靳元春, 冯宝民. 具有抗菌活性的植物内生微生物代谢产物研究进展[J]. 沈阳药科大学学报, 2015, 32(11): 892-899.

[5] Afra Khiralla, Ietidal Mohamed, Justinme Thomas, et al. A pilot study of antioxidant potential of endophytic fungi from Sudanese medicinal plants[J]. Asian Pacific Journal of Tropical Medicine, 2015, 8(9): 701-704.

[6] Rateb ME, Ebel R. Secondary metabolites of fungi from marine

habitats[J]. Nat Prod Rep, 2011, 28(2): 290-344.

[7] 何佳, 刘笑洁, 赵启美, 等. 植物内生真菌分离方法的研究[J]. 食品科学, 2009, 30(15): 180-183.

[8] 张玲, 张庆波, 陈玉婵, 等. 18 株南海海洋真菌的初步鉴定及其发酵产物的细胞毒活性和抗菌活性筛选[J]. 热带海洋学报, 2013, 32(3): 47-51.

[9] 马养民, 田从丽, 张弘驰. 杜仲内生真菌的分离鉴定及抗菌活性筛选[J]. 李时珍国医国药, 2011, 22(3): 552-554.

[10] Moon J K, Shibamoto T. Antioxidant assays for plant and food components[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2009, 57(5): 1 655-1 666.

[11] 高敬红, 易大为, 邹宇, 等. 一株银杏内生真菌抗菌代谢产物的分离与鉴定[J]. 中国抗生素杂志, 2015, 40(10): 728-731.

[12] 苏印泉, 朱红薇, 马希汉, 等. 杜仲内生真菌的抑菌活性筛选[J]. 西北植物学报, 2005, 25(6): 1 153- 1 157.

[13] 金莹, 孙爱东, 胡晓丹, 等. 苹果多酚的超声波提取及其抗氧化性作用研究[J]. 北京林业大学学报, 2007, 29(5): 137-141.

[14] 王淑霞, 李爱梅, 张俊杰, 等. 龙眼核多酚物质的液质联用分析及其抗氧化活性[J]. 食品科学, 2011, 32(12): 196-203.