

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2020.04.018

波形套轴向受压仿真与参数优化研究^{*}

徐行胜,周旭^{*},伍英

(湖北汽车工业学院机械工程学院,湖北十堰442002)

摘要:针对波形套在轴向受压过程中,最佳轴向变形工作段轴向位移长度的优化问题,对波形套进行了轴向受压的有限元仿真研究,并对波形套的轴向力随压缩量的变化曲线进行了分析。根据波形套的几何参数,建立了正交试验组,并用Abaqus进行了数值模拟仿真;以正交试验的数据为基础,构造了波形套在受压过程中0.98倍~1倍的最大轴向力对应的最佳轴向变形工作段轴向位移长度的二阶响应面模型,并利用遗传算法对最佳轴向变形工作段轴向位移长度的二阶响应面模型进行了优化。研究表明:优化后的最佳轴向变形工作段轴向位移长度的响应结果与有限元计算结果相对误差为0.31%,说明响应面法可近似代替有限元法分析;通过这一方法,可在实际工程中为波形套驱动桥主动锥齿轮轴承预紧的设计提供依据。

关键词:波形套;有限元;正交试验;二阶响应面;遗传算法

中图分类号:TH132.421;U463.218

文献标识码:A

文章编号:1001-4551(2020)04-0434-04

Simulation and parameter optimization of corrugated sleeve under axial compression

XU Xing-sheng, ZHOU Xu, WU Ying

(School of Mechanical Engineering, Hubei University of Automotive Technology, Shiyan 442002, China)

Abstract: Aiming at the problem of optimization of the optimal axial displacement length of the working section of the corrugated sleeve under axial compression, the finite element simulation was carried out, and the curve of the axial force varying with the compression was analyzed. According to the geometric parameters of the corrugated sleeve, the orthogonal experimental group was established and simulated by Abaqus. Based on the orthogonal test data, a second-order response surface model of the optimal axial displacement length of the working section corresponding to the maximum axial force of 0.98 to 1 times of the corrugated sleeve in the compression process was constructed, and the genetic algorithm was used to optimize the model. The results show that the relative error between the optimized response and the finite element results is 0.31%, which indicates that the response surface method can approximately replace the finite element analysis. This method provides a basis for the preloading design of drive axle active bevel gear bearings in practical engineering.

Key words: corrugated sleeve; finite element; orthogonal test; second-order response surface; genetic algorithm

0 引言

波形套是汽车驱动桥主动锥齿轮总成上的重要零件,由于中间波形区的特殊结构,它可将驱动桥主动锥齿轮轴承预紧力调至最佳状态,并且可以防止预紧力过大,提高传动效率和装配效率,降低主减速器总成噪

音,提高轴承使用寿命。波形套中间波形区可使波形套在一定轴向变形内轴向力的大小基本保持不变,因此,波形套被广泛应用于轴承的预紧^[1-2]。

当前,已有多位学者对波形套进行了不同领域的研究。文献[3]对驱动桥主动锥齿轮轴承的预紧参数进行了计算和分析,对波形套达到屈服极限时所需压

收稿日期:2019-07-10

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51675167)

作者简介:徐行胜(1996-),男,湖北咸宁人,硕士研究生,主要从事机械设计及汽车零部件技术方面的研究。E-mail:1643841346@qq.com

通信联系人:周旭,男,博士,教授,硕士生导师。E-mail:792425318@qq.com

力进行了分析研究;文献[4]分析了主动锥齿轮总成装配力,但仅对波形套进行了定性分析;文献[5]利用有限元分析软件 Abaqus 分析了考虑塑性加工和不考虑塑性加工的波形套压力与应变的关系,得出了考虑塑性加工的波形套与试验更接近的结果;文献[6]利用有限元方法对主减总成进行了分析,对波形套的载荷和回弹量进行了设计,并评估了波形套对轴承的支持刚度;文献[7]用有限元仿真分析法对波形套进行了数值模拟,揭示了塑性加工对波形套的轴向受压过程轴向力的影响;文献[8-11]对波形套的复合缩径-胀形变形进行了试验研究,对波形套进行了成形特点分析和应力场求解,初步研究了波形套结构参数对轴向力的影响;文献[12-13]用数值模拟的方法分析了带有锥面的波形套几何参数对波形套轴向受压过程中轴向力的影响,并利用第二代非劣遗传算法,对隔套的轴向性能进行了多目标优化。

但目前对于常见的中间为3段圆弧波形套的优化设计未见相关文献报道。对此,本文将利用有限元法对应用广泛的常见波形套进行仿真^[14-15],并建立正交试验组,构造波形套在受压过程中从0.98倍~1倍的最大轴向力对应的工作段长度的二阶响应面模型,并利用遗传算法进行优化,使最佳工作段长度最大。

1 波形套的结构参数

波形套的结构有多种形式,根据实际工程中的应用,本文对常见的波形套作优化研究,利用 Abaqus 软件对其进行轴向压缩的有限元数值模拟仿真。

波形套的结构如图1所示。

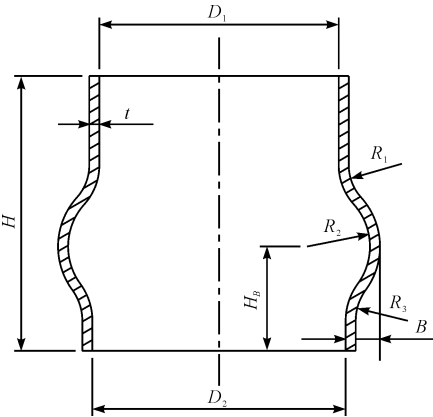


图1 波形套的结构

t —壁厚; R_1 —上端过渡圆弧半径; R_2 —中间凸起波形圆弧半径; R_3 —下端过渡圆弧半径; B —中间凸起波形径向高度; D_1 —小端直径; D_2 —大端直径; H —轴向总高度; H_B —中间波形区轴向高度

图1的波形套结构中,上、下两端为直壁部分,中部为波形区,由3段圆弧组成;中间凸起部分圆弧与上、下两直壁分别通过一段圆弧过渡。

2 波形套有限元仿真分析

2.1 波形套仿真参数

波形套的材料为20号优质碳素结构钢,它具有良好的塑性性能,作为有限元仿真的材料属性输入;弹性模量 $E = 196.5 \text{ GPa}$,泊松比为 $\mu = 0.29$ 。

20钢真实应力应变如表1所示。

表1 20钢真实应力应变

应力 /MPa	应变	应力 /MPa	应变	应力 /MPa	应变
0.0	0.000	385.8	0.057	503.1	0.168
240.6	0.001	395.8	0.062	506.0	0.173
240.6	0.006	404.9	0.067	508.8	0.178
240.6	0.011	413.2	0.072	511.5	0.183
240.6	0.016	421.0	0.077	514.2	0.188
278.6	0.021	428.0	0.082	516.7	0.193
300.1	0.027	434.6	0.087	519.2	0.198
318.4	0.032	440.8	0.092	521.5	0.203
334.8	0.037	446.6	0.097	523.8	0.208
349.6	0.042	452.1	0.102	525.8	0.213
362.9	0.047	457.2	0.107	527.8	0.218
374.9	0.052	462.0	0.112	529.3	0.223

波形套的几何参数为:

$D_1 = 69 \text{ mm}, D_2 = 73 \text{ mm}, H = 79 \text{ mm}, H_B = 30 \text{ mm}, t = 3 \text{ mm}, R_1 = 12 \text{ mm}, R_2 = 18 \text{ mm}, R_3 = 12 \text{ mm}, B = 6 \text{ mm}。$

2.2 波形套仿真过程及结果分析

笔者利用有限元法对波形套进行数值模拟仿真,仿真采用四节点轴对称单元模型。

波形套的有限元模型如图2所示。

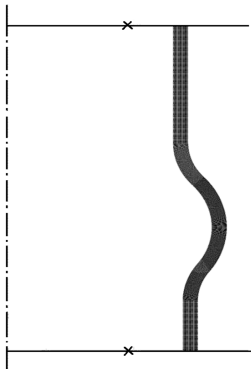


图2 波形套的有限元模型

图2的波形套有限元模型中,上、下两端为轴对称

解析刚体,使上端刚体向下压缩 5 mm;网格划分时将截面分割成若干个矩形与扇区,可使截面网格划分的比较规则;整个仿真过程中,始终打开几何非线性选项。

在有限元仿真过程中,根据所设置的分析步,Abaqus 软件可计算得到多组轴向力与压缩位移的关系点,将所得到的数据点导入到 Matlab 画图。

可得到波形套的轴向力压缩量曲线,如图 3 所示。

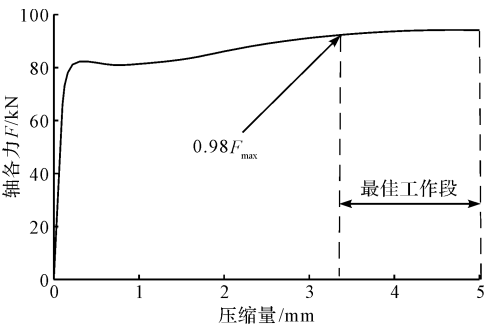


图 3 波形套的轴向力压缩量曲线

图 3 中,轴向力大小先随压缩位移的增大而增大,接着材料进入了屈服阶段;随着压缩量的增加,轴向力基本保持不变,仿真结果与材料力学中塑性材料的压缩特性曲线相一致。

在设计波形套时,应优先采用低碳钢等屈服强度合适的材料。笔者根据 Abaqus 计算所得到的轴向力与压缩量关系点,在实际工程应用中,可以取轴向力值在 $[0.98F_{\max}, F_{\max}]$ 区间为工作段,此时波形套在该区间对应的轴向位移段具有较好的工作性能。如在轴承预紧中,当波形套在工作中受到磨损后仍有一定的轴向力,以保证轴承有一定的预紧力,从而增加轴承的使用寿命。

同时,在进行优化设计时,可将该工作段对应的轴向位移长度定为优化设计目标。

3 优化设计

3.1 正交试验组的建立

正交试验设计是用于多因素试验的一种方法。利用正交试验点具有均匀整齐的特点,可从全面试验中挑选出部分具有代表性的试验点进行试验,以减小波形套的仿真次数。

波形套的设计参数有 5 个,每个参数取 4 个水平。为了保证试验的精度与充分,采用 $L_{64}(4^5)$ 正交表,任取其中 5 列作为试验设计表,一共 64 组试验。

每个水平下,各参数因子水平如表 2 所示。

表 2 各参数因子水平

水平	1	2	3	4
t/mm	2.000	2.500	3.000	3.500
R_1/mm	6.000	9.000	12.000	15.000
R_2/mm	12.000	15.000	18.000	21.000
R_3/mm	6.000	9.000	12.000	15.000
B/mm	4.000	5.000	6.000	7.000

3.2 二阶响应面模型的构造

采用响应面法来近似代替有限元法分析,则可大幅度地减少波形套有限元仿真计算的时间,减小波形套设计的周期。笔者先构造二阶响应面模型,再利用各种成熟的优化算法来优化响应,得到优化后的波形套的几何参数。

二阶响应面模型如下:

$$y(x) = \hat{y}(x) + \varepsilon \tag{1}$$

式中: x —因素向量, $x = (t, R_1, R_2, R_3, B)$; $y(x)$ —响应实际值; $\hat{y}(x)$ —响应近似值; ε —残差向量。

二阶多项式 $\hat{y}(x)$ 为:

$$\hat{y}(x) = \beta_0 + \sum_{i=1}^5 \beta_{ij} x_i x_j + \sum_{i=1}^5 \beta_{5+i} x_i^2 \tag{2}$$

二阶响应面近似函数的二阶多项式中 共有 5 个因素,至少需要 21 组样本点才能解出每个系数。正交试验得出了 64 组试验样本点,根据最小二乘法原理利用 Matlab 软件,可以拟合出 0.98 倍 ~ 1 倍的最大轴向力对应的变形工作段轴向位移长度的二阶响应面,拟合得出的近似函数的各系数的值为: $\beta_i = [-1.741\ 5, -0.031\ 2, 0.322\ 0, -0.012\ 1, -0.377\ 5]$, $\beta_{ij} = [0.000\ 6, 0.031\ 7, 0.010\ 0, -0.030\ 3, 0.000\ 9, 0.001\ 6, -0.002\ 2, -0.001\ 2, 0.002\ 5, 0.000\ 9]$, $\beta_0 = 4.082\ 2$, $\beta_{5+i} = [0.093\ 6, 0.000\ 3, -0.011\ 8, -0.000\ 5, 0.027\ 9]$ 。

拟合精度 $R^2 = 0.969\ 6$,响应与样本非常接近,能够较好地代替有限元,为波形套几何参数的优化做准备。

3.3 遗传算法

遗传算法的本质是一种建立在遗传学和自然选择原理基础上的一种自适应的全局优化和搜索方法^[16]。二阶响应面为非线性模型,利用遗传算法能够较好地求解一些非线性函数的优化问题。

笔者以波形套的最佳轴向变形工作段对应的轴向位移长度最大为优化设计目标,结构参数为设计变量。由于波形套波形区内侧受压应力,外侧受拉应力,经过多次仿真;考虑到波形套可能因塑性屈服而发生破坏,在最大轴向力的选取时,考虑到强度等要求,通过 Matlab 遗传算法工具箱,则可以快速地对目标函数进行求解。

设置波形套的设计变量取值范围,如表 3 所示。

表 3 设计变量的取值范围

变量	t/mm	R_1/mm	R_2/mm	R_3/mm	B/mm
下限	2.900	6.000	12.000	6.000	4.000
上限	3.300	15.000	21.000	15.000	7.000

4 优化结果及分析

笔者利用遗传算法对波形套结构参数进行优化,优化结果如表 4 所示。

表 4 优化结果

t/mm	R_1/mm	R_2/mm	R_3/mm	B/mm
2.900	15.000	21.000	15.000	4.000

笔者将优化后的结果代入到 Abaqus 软件进行计算,将用有限元法计算出的结果与响应面法计算出的结果进行对比。

有限元与响应面对比如表 5 所示。

表 5 有限元与响应面对比

	变形工作段长度/mm	相对误差/(%)
有限元	2.296 42	0.31
响应面	2.289 41	

从表 5 可以看出:用响应面模型近似得到的 0.98 倍~1 倍最大轴向力对应的变形工作段轴向位移长度的结果,与有限元计算得到的结果相对误差为 0.31%,说明响应面模型代替有限元模型具有较高的精度,优化求得的波形套几何参数是可靠的。

5 结束语

本研究通过 Abaqus 有限元软件,对波形套进行了轴向受压仿真研究,分析了轴向力随压缩量的曲线变化规律;利用正交试验得到了样本数据,构造了波形套在轴向受压过程中,从 0.98 倍~1 倍的最大轴向力对应的变形工作段轴向位移长度的二阶响应面模型,采用遗传算法对响应进行了优化。

研究结果表明:优化后的响应与有限元计算结果相对误差为 0.31%,响应可近似代替有限元法分析;通过这一方法,使最佳变形工作段的轴向位移长度最大,为实际工程中波形套的参数设计提供了参考。

在研究过程中,由于考虑到波形套的最大轴向力和强度等要求,所设计的变量范围较小,只以波形套的最佳轴向变形工作段轴向位移为优化目标,未将塑性应变作为优化目标。

在后续工作中,可将塑性应变一起作多目标的优

化设计。同时,随着波形套结构的多样化,对不同结构形式的波形套仍需进行研究。

参考文献(References):

[1] QI Y M, ZHU X Z, DENG S P. et al. Research on spindle bearing pre-tightening based on spacer sleeve adjustment [J]. **Applied Mechanics and Materials**, 2014 (488-489):1087-1090.

[2] 许 志,洪曦晖.可压缩隔套对主齿总成窜动的影响[J].机械工程师,2012(3):128-129.

[3] 唐自玉,邴丽荣.后桥主齿轴承预紧力的力学分析及可压缩隔套的设计[J].汽车技术,2001(10):18-20.

[4] 曹 张.汽车后桥主减速器装配过程的力学性能分析与隔套选型[D].合肥:合肥工业大学工程力学系,2006.

[5] 余显忠,黄平辉,揭 钢.弹性隔套设计与仿真分析[J].现代制造工程,2010(3):1-4.

[6] 冯 立,谢玉琳,蔡卓琳,等.有限元分析在弹性隔套设计中的应用[J].时代汽车,2018(4):89-91.

[7] LIU Y, MONKABA V D. Forming simulation and stiffness prediction of a rear axle pinion bearing collapsible spacer [C]. International Truck and Bus Meeting ang Exhibition , Chicago:SAE,2001.

[8] 王连东,刘 敏,张启中.波形套的试验研究[J].中国机械工程,2004(24):12-14.

[9] 彭加耕,王连东,梁 辰,等.波形套复合缩径-胀形变形分析及应力场求解[J].塑性工程学报,2002,9(2):72-75.

[10] 王连东,邱兰芳,刘 敏.波形套工作特性的理论与试验研究[J].机械工程学报,2005,41(11):188-192.

[11] 王连东,彭加耕,刘助柏,等.汽车波形套复合缩径-胀形变形分析与求解[J].机械工程学报,2002,38(5):149-152.

[12] 桂良进,朱升发,陈伟博,等.波形套的轴向受压分析与优化设计[J].清华大学学报:自然科学版,2019,59(3):219-227.

[13] 陈伟博.驱动桥主锥总成可压缩隔套的设计与开发[D].北京:清华大学汽车工程系,2017.

[14] 魏延刚,宋宇漠,刘彦奎.基于有限元法的推力圆锥滚子轴承动态接触分析[J].机电工程,2019,36(4):352-356.

[15] 曾祥录,韩俊峰,朱留宪,等.菌形叶根型线铣刀的三维建模及有限元分析研究[J].机电工程,2019,36(3):284-288.

[16] VERMA V K, KUMAR B. Genetic algorithm: an overview and its application [J]. **International Journal of Advanced Studies in Computer Science and Engineering**, 2014,3(2):21-27.

[编辑:周昱晨]

本文引用格式: