

潜油螺杆泵减速器行星架的结构参数优化

付平,王晨旭,张明赛,殷硕,栾光旭
(青岛科技大学 机电工程学院,山东 青岛 266061)

摘要:行星架在传动系统中承担输出转矩,是采油系统重要零部件之一。使用 ANSYS Workbench 对一种潜油螺杆泵减速器行星架进行有限元分析,得到行星架整体变形和等效应力分布规律。通过灵敏度和响应面分析,研究行星架壁板厚度及内外径对最大整体变形、最大等效应力和质量的影响,以此为基础对行星架壁板结构参数进行多目标优化设计。实验结果证明:优化后最大整体变形减小 6.91%,几何质量未增大。

关键词:潜油螺杆泵;行星架;有限元分析;优化设计

中图分类号:TH132.425 **文献标志码:**B **文章编号:**1671-5276(2023)04-0073-03

Structural Parameter Optimization of Planet Carrier in Submersible Progressive Cavity Pump Reducer

FU Ping, WANG Chenxu, ZHANG Mingsai, YIN Shuo, LUAN Guangxu
(School of Mechanical and Electrical Engineering, Qingdao University of Science and Technology, Qingdao 266061, China)

Abstract: Planet carrier, bearing output torque in drive system, is one of the important spare parts in oil production system. The finite element analysis of a planet carrier in submersible progressive cavity pump reducer is conducted by using ANSYS Workbench to obtain the distribution of total deformation and equivalent stress about the planet carrier. The effect of the thickness, internal and external diameter about the planet carrier wall plate on the maximum total deformation, maximum equivalent stress and mass is studied through sensitivity and response surface analysis, based on which, the multi-objective optimization design of the structural parameters about the planet carrier wall plate is carried out. Experiment results show that the optimized maximum total deformation decreases 6.91% without any increase of geometric quality.

Keywords: submersible progressive cavity pump; planet carrier; finite element analysis; optimization design

0 引言

行星架在传动系统中承担输出转矩,是保证潜油螺杆泵减速器以及整个采油系统正常工作的重要零部件之一。随着石油开采的不断进行,对复杂开采环境有较强适应性的潜油螺杆泵采油系统逐渐得到应用,并拥有良好的发展前景^[1-2]。对潜油螺杆泵减速器行星架进行研究,可以优化行星架性能,对于保证潜油螺杆泵采油系统的正常工作有着重要意义。

本文研究了一种潜油螺杆泵减速器行星架,使用 ANSYS Workbench 对行星架的变形和应力分布进行了分析,并对行星架壁板结构参数进行了优化。

1 行星架有限元分析

1.1 行星架三维模型

行星架来自一种潜油螺杆泵减速器,该减速器采用 2K-H 行星传动,设有并排的双列行星轮,每列均布 4 个,

相应的行星架结构如图 1 所示。

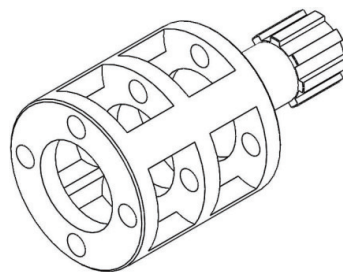


图 1 行星架结构

1.2 有限元分析前处理

在 ANSYS Workbench 中进行行星架的三维建模。直接建模能有效保证模型参数的识别,便于后续的参数优化。在建模过程中对模型进行简化以便于分析,省略倒角和圆角,花键部分以圆柱代替。

定义行星架材料参数:密度 7826 kg/m³,弹性模量 206 GPa,泊松比 0.3,屈服强度 540 MPa。

网格划分选取了自动方法,该方法优先对能够扫描的

几何体进行扫掠划分,其余几何体使用四面体划分。为保证分析效果,兼顾计算速度与精度,对网格进行尺寸控制并保证单元质量。

根据行星架的受力情况施加约束与载荷。对代替花键的外圆面施加固定约束,对行星架上的各行星轮销轴孔施加轴承载荷。根据减速器相关传动参数计算得到每根销轴所受的行星轮载荷。为简化分析,假定行星架上同一根销轴的各销轴孔将销轴的载荷均分并将载荷不均系数体现在载荷大小中。此情况下,对行星架每个销轴孔施加 880 N 的轴承载荷,方向沿转动速度方向。

1.3 求解结果分析

行星架的整体变形云图如图 2 所示,等效应力云图如图 3 所示。

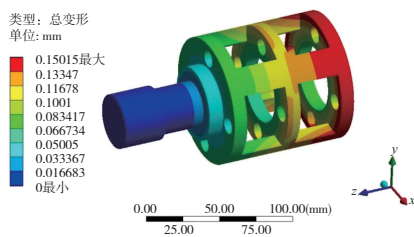


图 2 整体变形云图

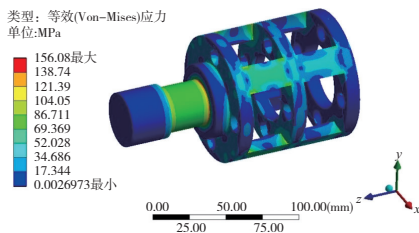


图 3 等效应力云图

整体变形云图中,行星架整体变形自左端固定约束处向右端逐渐增大,同一横截面整体变形沿径向由内到外逐渐增大,最大整体变形出现在远离输出端的壁板外圆面上,最大整体变形为 0.150 15 mm。

等效应力云图中,行星架输出轴段为应力较大区域,最大等效应力出现在输出轴段与过渡轴段的交界处,最大等效应力 156.08 MPa。此次分析没有涉及降低应力集中的相关结构对最大等效应力的影响,在实际中输出轴段与过渡轴段的交界处设有阶梯轴和过渡圆角等降低应力集中的结构。

2 行星架壁板结构参数优化

2.1 行星架壁板参数设计

在行星架设计中,结构参数按照设计方式主要可以分为 3 类:一是需要由公式计算确定或从标准中进行选取的参数,这类参数的值较明确,数值自主变化范围小;二是与其他零部件的结构有配合关系或较紧密适应关系的参数,这类参数的值由其他零部件决定,数值自主变化范围小;

三是由设计者自主确定的参数,这类参数值的确定依靠设计经验或可参考的经验公式,有一定的自主变化范围,同时对结构的性能有一定影响,属于较适宜进行优化的参数。

对于常见双壁整体式行星架壁板厚度的选取目前已有较成熟的经验,一般可参考经验公式,靠近输出端壁板厚度 $c_1 = (0.25 \sim 0.3)a$, 远离输出端壁板厚度 $c_2 = (0.2 \sim 0.25)a$, 其中 a 为行星轮轴线与行星架轴线的距离。但对于三壁整体式行星架壁板厚度的选取目前还没有较成熟的经验,因此主要选取了行星架各壁板厚度作为设计变量进行参数优化,壁板从靠近输出端起依次编号为 1、2、3,同时还选取了行星架壁板内径和外径作为设计变量一并进行分析。表 1 列出了选取的设计变量并确定了数值的变化范围。

表 1 行星架设计变量 单位:mm

设计变量	下限值	上限值
壁板 1 厚度	7	12
壁板 2 厚度	7	12
壁板 3 厚度	7	12
壁板内径	45	49
壁板外径	87	91

行星架的变形会导致行星轮轴的偏斜,对行星轮间的载荷分配和传动装置的承载能力有一定影响^[3-4]。为保证正常工作,行星架需具有一定的强度和刚度,同时质量尽可能小,因此选取了行星架最大整体变形、最大等效应力和几何质量作为输出结果。

2.2 灵敏度分析

灵敏度分析可以显示设计变量与输出结果之间的相关性,能够体现出各设计变量对于输出结果影响程度的大小。优化过程中参数符号与各设计变量和输出结果的对应关系见表 2,分析得到的设计变量与输出结果的相关性如图 4 所示。

表 2 参数对应表

符号	参数
P1	壁板 1 厚度/mm
P2	壁板 2 厚度/mm
P3	壁板 3 厚度/mm
P4	壁板内径/mm
P5	壁板外径/mm
P6	最大整体变形/mm
P7	最大等效应力/MPa
P8	几何质量/kg

	P1	P2	P3	P4	P5
P6	-0.167 01	-0.324 49	-0.127 42	0.021 99	-0.351 03
P7	-0.077 48	-0.033 59	-0.014 74	0.012 06	-0.183 56
P8	0.216 31	0.216 31	0.216 31	-0.074 41	0.276 66

图 4 相关性

2.3 响应面分析

响应面法是一种综合试验设计和数学建模的优化方法,通过局部试验点回归拟合全局范围内设计变量与输出结果之间的函数关系,具有试验次数少、精度高、预测性能好等特点^[5-6]。响应面分析能够得到设计变量与输出结果的变化关系,并可基于代理模型直接取得某组设计变量所对应的输出结果,便于优化。

为进一步分析行星架 P_1 、 P_2 、 P_3 及 P_4 、 P_5 与 P_6 、 P_7 和 P_8 之间的关系,拟合了各输出结果关于各设计变量的响应面,如图 5 所示的 P_6 关于 P_1 、 P_2 的响应面就是其中之一。

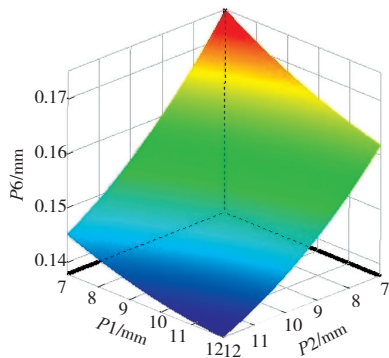


图 5 最大整体变形 P_6 响应面 (P_1 、 P_2)

结果表明,对于 P_6 , P_1 — P_3 的增大均使 P_6 减小。其中 P_2 的影响程度大于另外两壁板且差距明显,另外 P_1 、 P_3 的影响程度相近, P_1 略大于 P_3 。 P_4 的变化对 P_6 的影响很小; P_5 的增大使 P_6 减小。

对于 P_7 , P_1 — P_4 的变化对 P_7 的影响均很小, P_5 的增大使 P_7 有一定程度的减小。

对于 P_8 , P_1 — P_3 的增大均使 P_8 增大,且影响程度一致。 P_4 的增大使 P_8 略微减小; P_5 的增大使 P_8 增大。

2.4 多目标优化设计

多目标遗传算法是利用人工进化原理随机搜索设计空间,模拟遗传选择和自然淘汰的进化过程,具有良好的全局搜索能力,是解决优化问题的有效方法^[7]。基于多目标遗传算法对行星架壁板结构参数进行多目标优化设计,各设计变量在取值范围内变化,寻求相对较小的最大整体变形、最大等效应力和几何质量。数学模型如下所示。

$$\begin{aligned} \min F(X) &= [f_1(X), f_2(X), f_3(X)] \\ \text{s.t. } 7 &\leq x_1 \leq 12 \\ 7 &\leq x_2 \leq 12 \\ 7 &\leq x_3 \leq 12 \\ 45 &\leq x_4 \leq 49 \\ 87 &\leq x_5 \leq 91 \end{aligned}$$

式中 $f_1(X)$ 、 $f_2(X)$ 、 $f_3(X)$ 分别表示行星架最大整体变形、最大等效应力、几何质量。

根据前述分析,各壁板厚度及壁板内外径对出现在输出轴段与过渡轴段交界处的最大等效应力影响很小或有限。想要降低该处的等效应力,直接设计相应的结构较为

有效,例如采用过渡圆弧阶梯轴等,调整壁板结构参数作用不大。因此可以接受最大等效应力优化后变化不大的备选优化结果,不追求最大等效应力的有效降低,主要关注最大整体变形的减小,其次关注几何质量。优化结果见表 3,优化后最大整体变形减小 6.91%,几何质量未增大。

表 3 优化结果

参数	初始值	优化值	变化量/%
壁板 1 厚度	9.5 mm	8.170 6 mm	-13.99
壁板 2 厚度	9.5 mm	11.82 4 mm	24.46
壁板 3 厚度	9.5 mm	7.773 8 mm	-18.17
壁板内径	47.0 mm	48.962 mm	4.17
壁板外径	89.5 mm	90.476 mm	1.09
最大整体变形	0.150 15 mm	0.139 77 mm	-6.91
最大等效应力	156.08 MPa	157.24 MPa	0.74
几何质量	1.844 6 kg	1.843 7 kg	-0.05

3 结语

对一种潜油螺杆泵减速器行星架进行了有限元分析,并对行星架壁板结构参数进行了优化,研究结果如下。

1) 通过有限元分析得到了行星架整体变形和等效应力的分布规律。最大整体变形出现在远离输出端的壁板外圆面上,最大等效应力出现在输出轴段与过渡轴段的交界处。

2) 研究了行星架各壁板厚度及壁板内外径与最大整体变形、最大等效应力和几何质量之间的关系。在三壁整体式行星架中,对于最大整体变形,各壁板厚度的增大均使其减小,中间壁板的影响程度明显大于两侧壁板,壁板外径的增大使其减小,而壁板内径的变化对其影响很小。对于最大等效应力,各壁板厚度及壁板内径对其影响均很小,壁板外径对其影响有限。对于几何质量,变化规律符合常规经验。

3) 基于多目标遗传算法对行星架壁板结构参数进行了优化设计。优化后最大整体变形减小 6.91%,几何质量未增大。

参考文献:

- [1] 王斐. 采油技术的现状及未来展望[J]. 化学工程与装备, 2020(10): 231-232.
- [2] 杨帆. 潜油螺杆泵市场应用及发展前景[J]. 中国设备工程, 2017(16): 179-180.
- [3] 张景晖. 基于 ANSYS 双层行星架的优化设计[J]. 煤矿机械, 2015, 36(2): 173-174.
- [4] 潘金坤, 耿烽. 增速齿轮箱行星架有限元分析及结构优化[J]. 机械传动, 2015, 39(4): 129-132.
- [5] 李莉, 张赛, 何强, 等. 响应面法在试验设计与优化中的应用[J]. 实验室研究与探索, 2015, 34(8): 41-45.
- [6] 刘承杰, 李倩, 罗鹏, 等. 基于响应面法的 V 带轮多目标优化设计[J]. 应用力学学报, 2018, 35(1): 147-153, 233.
- [7] 王栋, 邹玉静, 孙宇轩, 等. 基于多目标遗传算法的爬壁小车底板优化[J]. 机械制造与自动化, 2021, 50(4): 170-173.

收稿日期: 2022-01-27