

多工况分析下汽车驱动桥壳轻量化设计

周威宏

上海理工大学机械工程学院, 上海

收稿日期: 2023年12月18日; 录用日期: 2024年1月20日; 发布日期: 2024年1月29日

摘要

为了解决在汽车驱动桥壳的设计过程中满足刚度和强度要求的情况下, 出现质量冗余的问题。通过静态特性分析确定了驱动桥壳最大载荷下的工况, 采用拉丁超立方体抽样法抽取样本点进行试验设计, 根据试验设计结果构建响应面并得到目标函数的Kriging代理模型。在满足各项静态性能指标的条件下, 以桥壳的质量最小为优化目标, 采用多目标优化算法对该代理模型进行寻优。优化后驱动桥壳质量减小了11.1%, 并且各项静态性能指标依然符合设计要求。

关键词

驱动桥壳, 轻量化设计, 有限元法, 代理模型, 多目标优化

Lightweight Design of Automotive Drive Axle Housing under Multiple Operating Conditions Analysis

Weihong Zhou

School of Mechanical Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai

Received: Dec. 18th, 2023; accepted: Jan. 20th, 2024; published: Jan. 29th, 2024

Abstract

In order to solve the problem of mass redundancy in the design process of the automotive drive axle housing while meeting the requirements of stiffness and strength. The working condition under the maximum load of the drive axle housing was determined through static and dynamic characteristics analysis. The Latin hypercube sampling method was used to select sample points for the design of experiments. According to the results of the design of experiments, the response surface was constructed and the Kriging surrogate model of the objective function was obtained. Under the condition of satisfying various static and dynamic performance indexes, the multi-objective optimization

algorithm is used to optimize the surrogate model with the minimum quality of the axle housing as the optimization objective. After optimization, the mass of the drive axle housing has been reduced by 11.1%, and all static and dynamic performance indicators still meet the design requirements.

Keywords

Drive Axle Housing, Lightweight Design, Finite Element Method, Surrogate Model, Multi Objective Optimization

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

由于驱动桥壳是汽车上较为重要的承载部件之一，许多设计者通常在设计的过程中会用质量冗余来保证其性能。然而，驱动桥壳的质量在汽车的比重较大，所以实现驱动桥壳的轻量化设计对减少汽车的用材消耗具有重要的意义[1] [2]。

国内外学者对汽车驱动桥壳的轻量化设计有一定的研究。丁文敏[3]对汽车驱动桥壳进行了静力学强度和模态性能分析，并直接采用改变驱动桥壳结构法对驱动桥壳进行优化，提高了其整体性能；吕国坤等[4]对某款乘用车的驱动桥壳进行了静力学分析以及静力学下的疲劳分析，并采用直接添加结构法和响应面法进行优化，最终提高了其静态性能并实现了轻量化；刘为等[5]对某驱动桥壳在最大垂向力工况下进行了静力学分析以及疲劳寿命计算，并进行了模态分析，最后采用多目标驱动的优化方法对驱动桥壳进行了轻量化优化，并取得了一定的优化效果；俞云云等[6]对某重型自卸车驱动桥壳进行了基于有限元的静态研究，并基于响应面优化法使用多目标驱动的方法对其进行了多目标优化，在一定程度上实现了轻量化。以上分析都对驱动桥壳做了一定的分析及优化，但是对于驱动桥壳多工况下综合分析，以及动态特性方面的研究不够深入。

本文通过建立汽车的驱动桥壳的三维模型，对其进行 4 种常见的工况下的静动态特性分析。基于分析结果，选取设计变量并确定优化目标，进行灵敏度分析，建立响应面并得到 Kriging 代理模型，采用多目标遗传算法对该模型进行寻优，最终实现在依然满足静动态性能的条件下，实现驱动桥壳的轻量化设计。

2. 驱动桥壳模型参数

Table 1. Main parameters of the drive axle housing

表 1. 驱动桥壳主要参数

参数	数值
桥壳额定载重/kg	802
最大扭矩/N·m	586
桥壳质量/kg	20.5
后轮距/mm	1202
板簧距/mm	670
后轮滚动半径/mm	317
桥壳厚度/mm	5

本文采用 SolidWorks 三维建模软件对驱动桥壳的三维模型进行建模。其主要参数如表 1 所示。

3. 驱动桥壳常见的工况分析

根据车桥设计规范[7]，本文将驱动桥壳视为承受车架、车身、悬架等部件的支撑横梁，并探求在特定位置下的最大等效应力和总变形。目前对驱动桥壳的设计和强度校核通常分为 4 种常见的工况，其分别为：最大垂向力工况，最大牵引力工况，紧急制动工况以及最大横向力工况。

1) 最大垂向力工况

汽车满载并静止在地面上时，若单个后轮受到地面的反作用力为 G_h ，后轮重为 g_l ，则后车桥板簧受到的垂向力为 $F = G_h - g_l$ ，其受力情况如图 1(a)所示，此时左右板簧座间的垂向弯矩 M 为：

$$M = \left(\frac{G_h}{2} - g_l \right) \times \left(\frac{B-S}{2} \right) \quad (1)$$

其中： B 为驱动轮的轮距， S 为左右板簧座受载处的中心距离。

2) 最大牵引力工况

在该工况下，驱动桥壳的受力情况如图 1(b)所示。此时，汽车在全力加速，驱动桥壳不但要受到垂向力，而且左右后车轮还受到来自地面向前的切向牵引力，并且此时的牵引力为最大，左右板簧的垂向弯矩为：

$$M = \left(\frac{G_h k_1}{2} - g_l \right) \times \left(\frac{B-S}{2} \right) \quad (2)$$

其中： k_1 为汽车全力加速时，驱动桥壳的质量转移系数，其取值范围一般取 1.1~1.4；其余参数同式(1)。

除此之外，单个驱动轮产生的最大切向反作用力 $P_{\max 1}$ 为：

$$P_{\max 1} = \varphi \frac{Z_1}{2} \quad (3)$$

其中： φ 为轮胎对地面的附着系数，通常取 0.6~0.9。 Z_1 为汽车全力加速时，单个后车轮受到地面的垂向反作用力，其计算公式为：

$$Z_1 = k_1 \frac{G_h}{2} \quad (4)$$

3) 紧急制动工况

如图 1(c)所示，当汽车处于紧急制动时，驱动桥壳不仅要受到垂向力的作用，而且地面会给左右车轮施加切向力，并把切向力传给驱动桥壳。当汽车处于紧急制动状态时，一般是直线行驶，不考虑汽车受到的横向力。并且此时两个后桥车轮在地面上受到的垂向力相等。表示为 Z_2 ，其计算公式为：

$$Z_2 = k_2 \frac{G_h}{2} \quad (5)$$

其中： k_2 为汽车制动时的质量转移系数，通常取 0.7~1.0。

若用 $P_{\max 2}$ 表示紧急制动时单个后轮所受的切向力，则其计算公式为：

$$P_{\max 2} = \varphi \frac{Z_2}{2} \quad (6)$$

此外，汽车在紧急制动时，驱动桥壳主体凸缘连接处还受到制动器传输的制动力矩的作用，表示为 T_z ，其计算公式为：

$$T_z = \frac{G_h}{2} k_2 \phi R_r \quad (7)$$

其中： R_r 为车轮的滚动半径。

4) 最大横向力工况

如图 1(d)所示，汽车在紧急快速转弯时，在其质心处会产生顺着转弯半径向外的离心力，同时路面会对轮胎产生顺着转弯半径向内的力。当离心力大于轮胎与路面的附着力时，车轮会发生横向滑移，这时作用在车轮上的横向力最大。此时后车轴左车轮受到的垂向反力和横向力分别为：

$$Z_L = \left(\frac{1}{2} - \frac{h_m \phi_1}{B} \right) G_h \quad (8)$$

$$Y_L = Z_L \phi_1 \quad (9)$$

其中： Z_L 为后车轴左侧车轮受到来自路面的垂向反力， Y_L 为后车轴左侧车轮受到来自路面的侧向反力， h_m 为满载时汽车的质心高度， ϕ_1 为汽车侧滑时后轴左右车轮对路面的附着系数，通常取 0.9~1.3。 B 为后轮轮距。

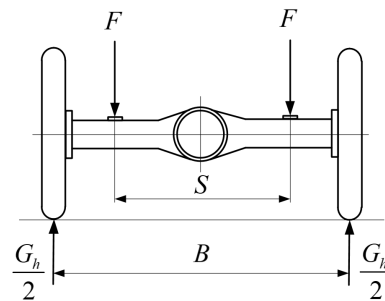
而后车轴右车轮受到的垂向反力和横向力分别为：

$$Z_R = \left(\frac{1}{2} + \frac{h_m \phi_1}{B} \right) G_h \quad (10)$$

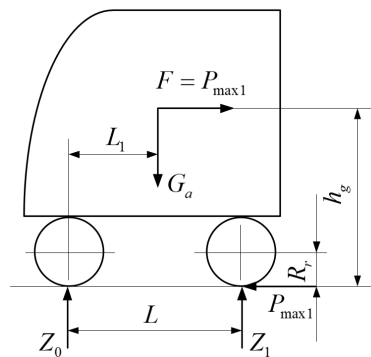
$$Y_R = Z_R \phi_1 \quad (11)$$

其中： Z_R 为后车轴右侧车轮受到来自路面的垂直向上的反力， Y_R 为后车轴右侧车轮受到来自路面的侧向反力。

通过使用式(8) (10)可以计算出驱动桥壳所受的最大横向力，再用所得的结果通过式(9) (11)可以求出左右驱动轮所受的地面侧向反力。



(a) 最大垂向力工况



(b) 最大牵引力工况

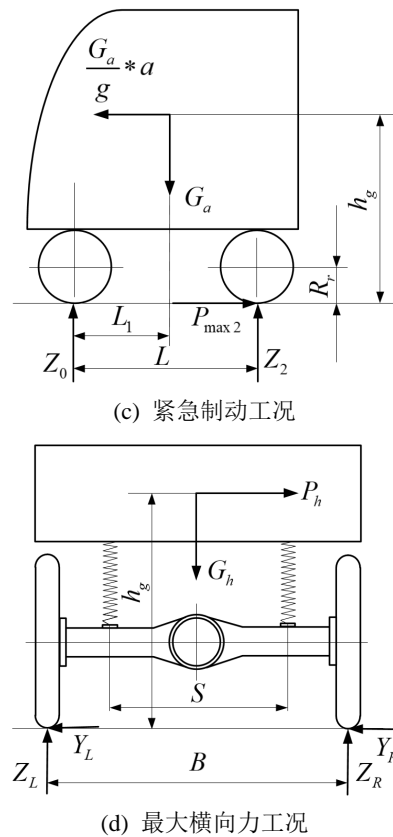


Figure 1. Load condition diagram of the drive axle housing

图 1. 驱动桥壳受载工况图

汽车在路面行驶时，针对以上的几种常见的工况，驱动桥壳的所承受的载荷通常等效为汽车满载时的 2.5 倍[7]。根据以上驱动桥壳受力分析，得出其约束和加载情况如表 2 所示。

Table 2. Constraints and loads of the drive axle housing under four working conditions

表 2. 4 种工况下驱动桥壳的约束和载荷

工况	约束	加载
最大垂向力	桥壳两端轮毂固定	左右板簧座施加垂向力 $F_{v1} = 18,863 \text{ N}$
最大牵引力	桥壳两端轮毂固定	左右板簧座施加垂向力 $F_{v2} = 12,957 \text{ N}$ 及纵向力 $F_{p1} = 12,952 \text{ N}$
紧急制动	桥壳两端轮毂固定	左右板簧座施加垂向力 $F_{v3} = 11,521 \text{ N}$ 及纵向力 $F_{p2} = 9550 \text{ N}$ ； 在桥壳两边凸缘施力矩 $M_1 = 7869 \text{ N}\cdot\text{m}$
最大横向力	右轮毂固定，左轮毂无约束	左板簧座施加纵向力 $F_{p3} = 16,785 \text{ N}$ 、垂向力 $F_{v4} = 16,785 \text{ N}$ ， 右板簧座施加纵向力 $F_{p4} = 2211 \text{ N}$ 、横向力 $F_{b1} = 16,785 \text{ N}$

4. 驱动桥壳有限元分析

4.1. 驱动桥壳静力学分析

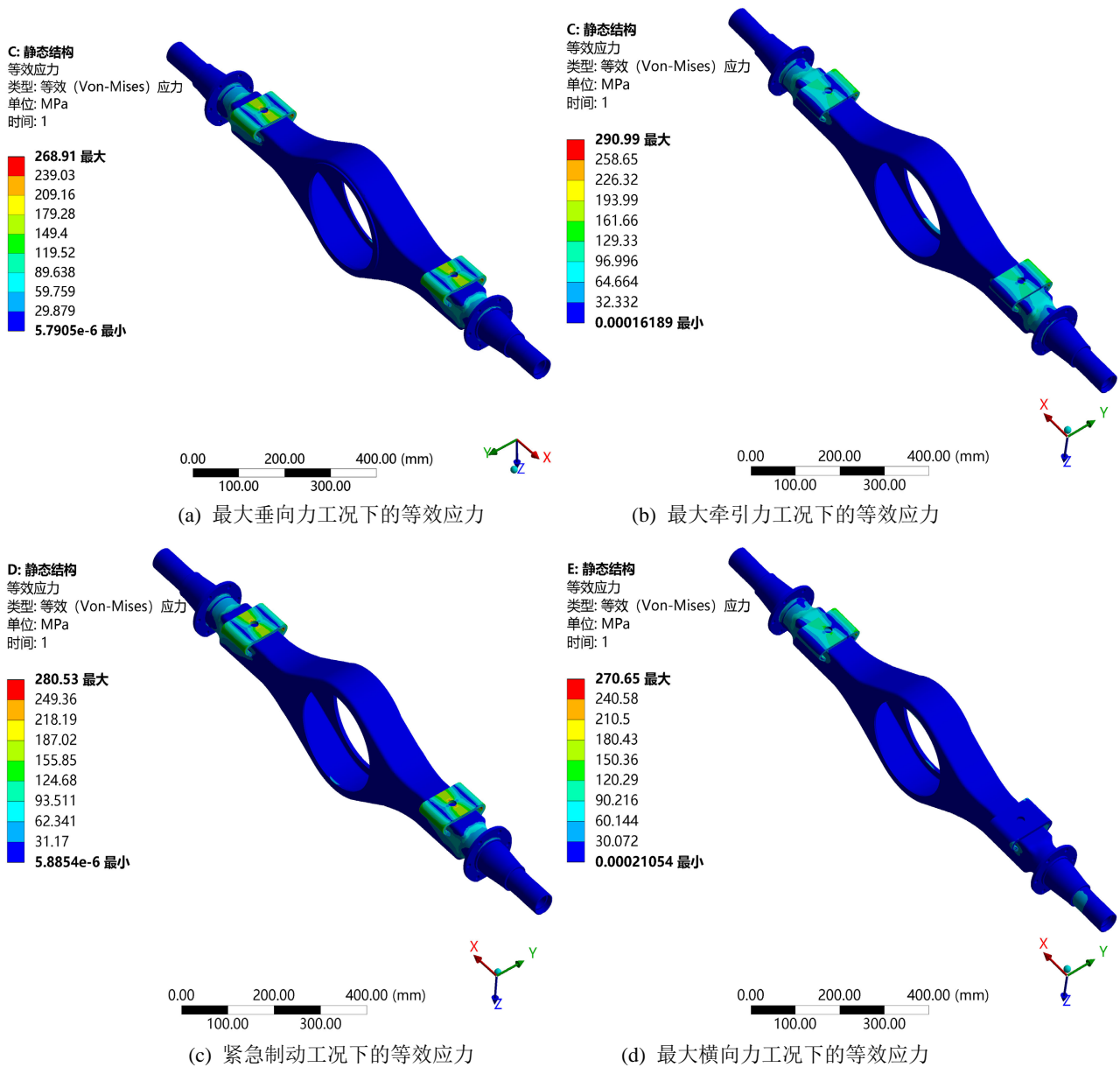
本文设计的驱动桥壳材料为 16 Mn 和 40 Cr 合金钢，具有强度高、寿命长、比较经济等优点，其材料参数如表 3 所示。

Table 3. Material properties
表 3. 材料属性

部件	材料	密度/ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	弹性模量/GPa	泊松比	屈服强度/MPa
桥壳	16 Mn	7840	208	0.31	345
轴头	40 Cr	7850	210	0.3	650

本文使用 Solid186 三维四面体结构的单元划分网格[8]。最终得到网格模型的单元节点数为 297,993，网格数量为 188,383。

完成材料定义和网格划分后，根据表 2 对驱动桥壳进行 4 种不同工况下的约束和加载。提交求解计算后，得到驱动桥壳 4 种工况下的总变形和等效应力云图，如图 2 所示。



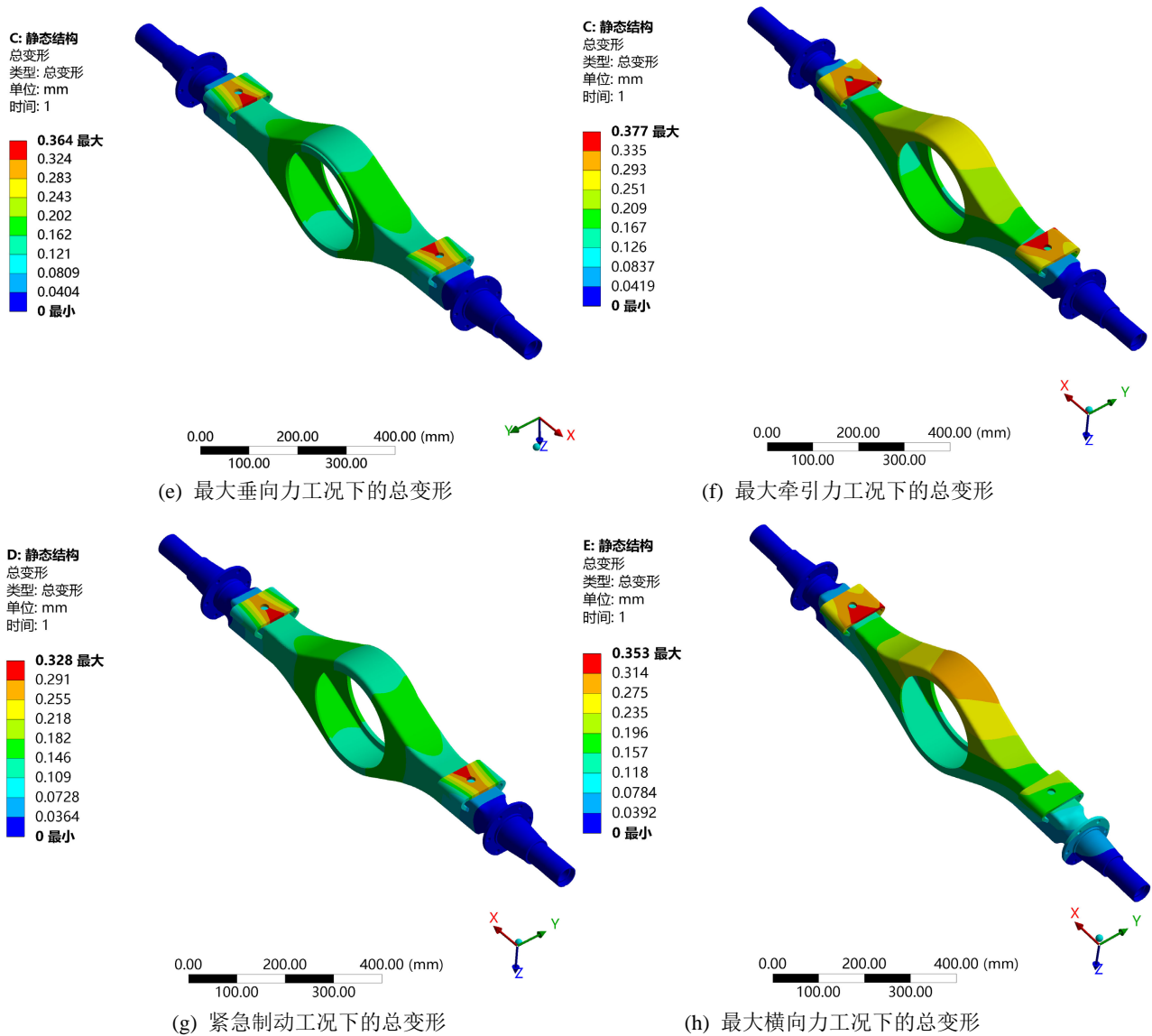


Figure 2. Statics analysis results of drive axle housing under four working conditions

图 2. 驱动桥壳在 4 种工况下的静力学分析结果

由以上分析, 得出 4 种工况下的驱动桥壳的静力学分析结果如表 4 所示。

Table 4. Statics analysis results under 4 working conditions

表 4. 4 种工况下静力学分析结果

工况	最大等效应力/MPa	最大总变形/mm
最大垂向力	268.91	0.364
最大牵引力	290.99	0.377
紧急制动	280.53	0.328
最大侧向力	270.65	0.353

从表 4 可以知, 驱动桥壳的最大等效应力出现在最大牵引力工况下, 其位置发生在板簧座与桥壳连

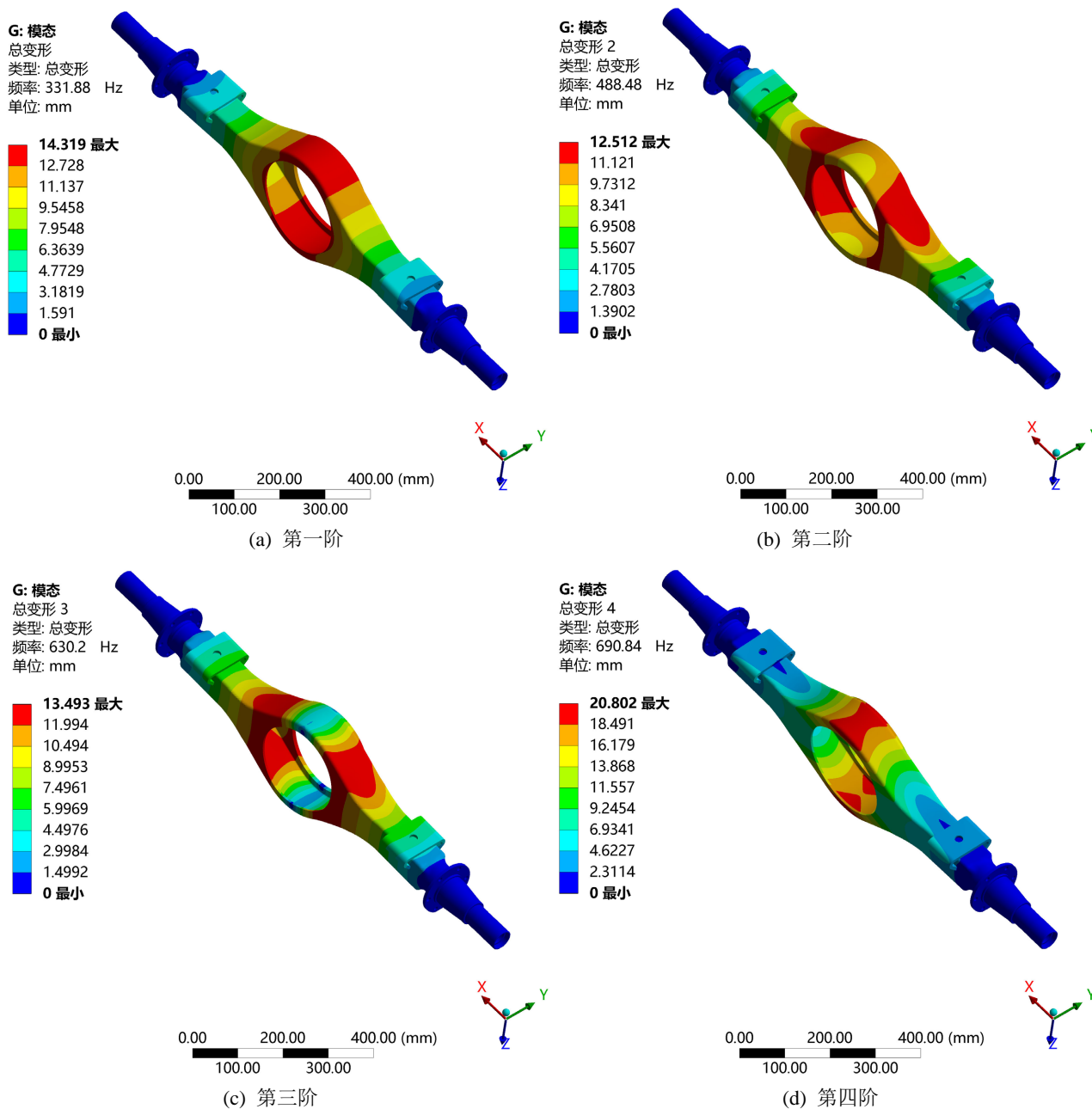
接处过度半径内侧，其值为 290.99 MPa，小于桥壳材料的屈服强度 345 MPa，满足强度要求；驱动桥壳的最大总变形出现在最大牵引力工况，其值为 0.377 mm，其中最大每米轮距变形量为 $0.377 \text{ mm}/1.202 \text{ m} = 0.313 \text{ mm/m}$ ，符合《汽车驱动桥台架试验评价指标》(QC/T534-1999)要求小于 1.5 mm/m 的标准[9]。

由以上分析知，驱动桥壳在 4 种常见的工况下满足静态性能要求。

4.2. 驱动桥壳模态分析

模态分析的目的是探索驱动桥壳的固有频率特性。本文研究的是驱动桥壳的约束模态，无载荷因素，仅设置约束条件，约束条件为固定桥壳的半轴两端[10]。

通过提交模态求解，获取驱动桥壳的前六阶的模态振型图，如图 3 所示。



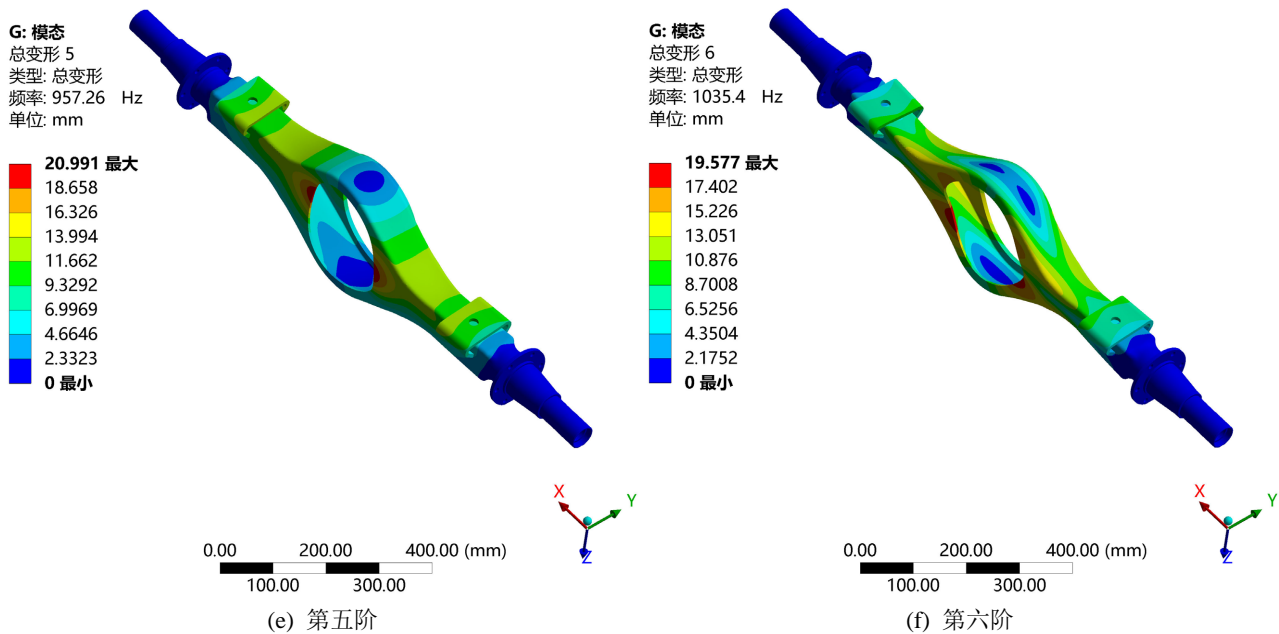


Figure 3. The first six modal shapes of the drive axle housing
图 3. 驱动桥壳前六阶模态振型

其前六阶固有频率和振动状况如表 5 所示。

Table 5. First six natural frequencies and vibration conditions

表 5. 前六阶固有频率及振动状况

阶数	固有频率/Hz	振动状况
1	331.88	在 XOY 平面振动
2	488.48	在 XOZ 平面振动
3	630.2	垂直 X 轴弯曲
4	690.84	绕 X 轴扭转
5	957.26	垂直 Z 轴弯曲
6	1035.4	垂直 Y 轴弯曲

在汽车行驶的路面状况中,由路面凹凸不平所发出的激励振动频率范围通常在 0~50 Hz 之间[10],远小于驱动桥壳的一阶固有频率 331.88 Hz,所以驱动桥壳在结构尺寸方面有很大的优化空间,以提高其静态性能。

4.3. 驱动桥壳谐响应分析

谐响应分析是分析几何结构和不同频率的简谐加载下的动力响应,载荷频率变化的范围要给定出来,其通常与模态的分析的固有频率有关[11]。

本节使用模态叠加法进行驱动桥壳的谐响应分析,研究对象为左右板簧座,选取最大牵引力工况下的载荷,以单位简谐力的形式加载于左右板簧座,选择其频率范围为模态最高阶固有频率的 1/1.5,即为 0~690 Hz。进行谐响应求解后,得到左右板簧座的 X、Y、Z 方向的位移频谱如图 4 所示。从图 4 可以看出,左右板簧座 X、Y、Z 方向的位移响应曲线分别在 487 Hz, 329 Hz, 487 Hz 处出现峰值,且都为最大

值，分别为 3.21 mm，4.49 mm，6.87 mm。

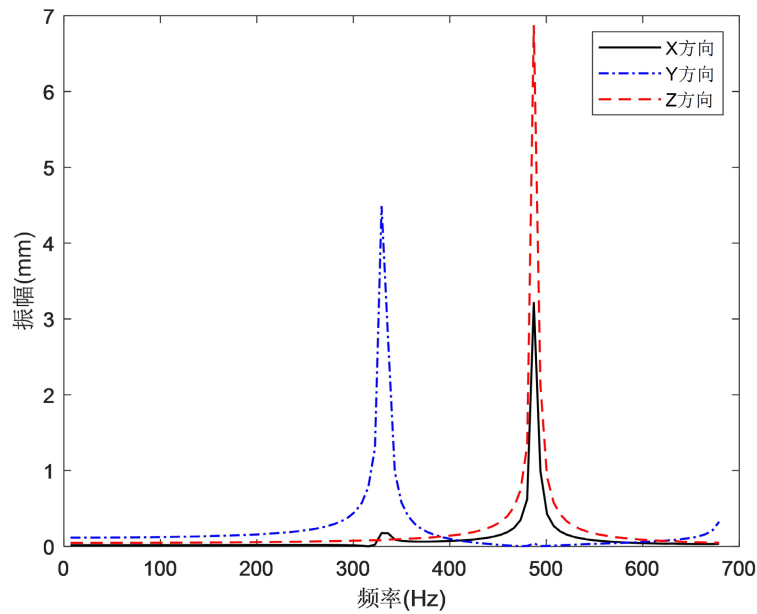


Figure 4. Displacement spectrum of left and right spring seats in three directions
图 4. 左右板簧座三个方向的位移频谱

由以上分析知，左右板簧座在 329 Hz、487 Hz 频率激励下会产生共振，因此汽车在行驶时应避免该振动频率。两个共振频率激励下左右板簧座的总变形如图 5 所示。

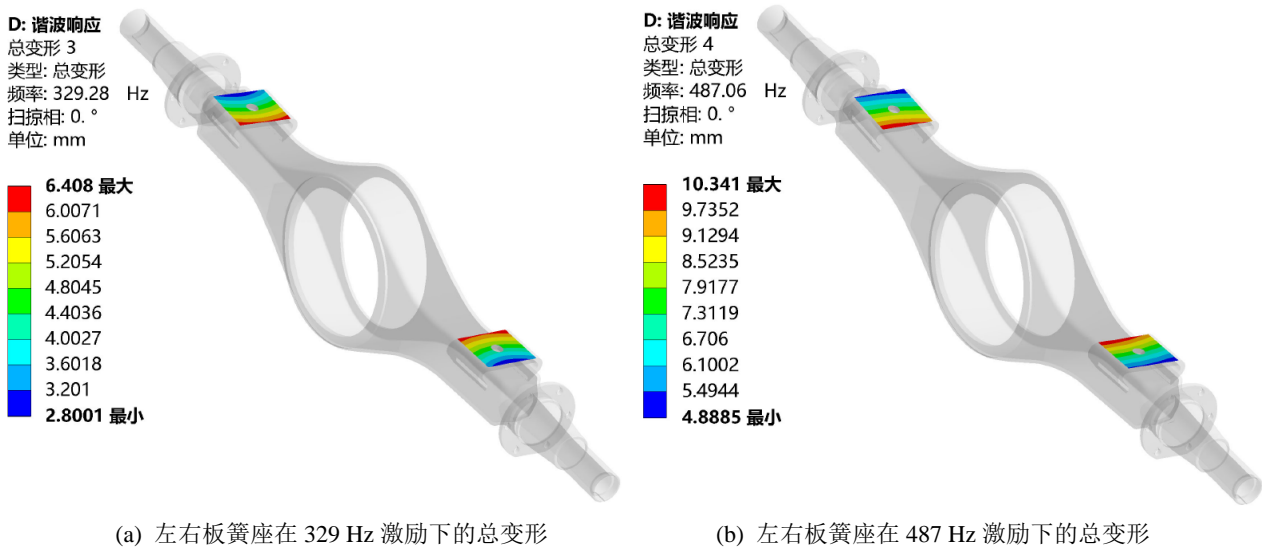


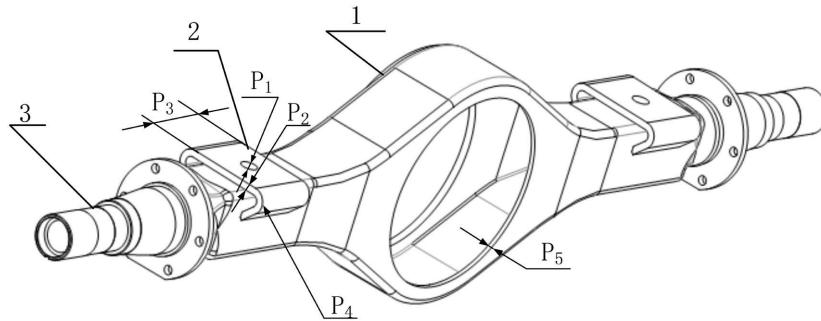
Figure 5. Total deformation of the drive axle housing under resonance frequency excitation
图 5. 驱动桥壳在共振频率激励下的总变形

5. 驱动桥壳轻量化设计

响应曲面设计法，简称响应面法(RSM)，是一种结合试验设计原理和统计学的经验模型优化方法 [12]。

5.1. 选取设计变量

驱动桥壳主要由壳体、板簧座和半轴组成，整个驱动桥壳为连续结构。考虑到设计变量的数量过多会增加计算量。所以本文选取与以上分析结果影响较大的 5 个设计变量，如图 6 所示。并根据驱动桥壳的设计标准，给出其 5 个设计变量的原始值以及取值范围如表 6 所示。



1-壳体 2-板簧座 3-半轴 P_1 -板簧座与板簧安装孔尺寸 P_2 -板簧座厚度
 P_3 -板簧座宽度 P_4 -板簧座与桥壳连接处过度半径 P_5 -桥壳厚度。

Figure 6. Design variables for the drive axle housing

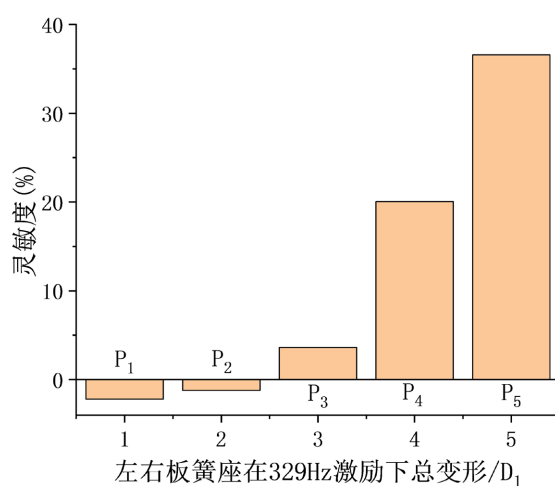
图 6. 驱动桥壳设计变量

Table 6. Original values and value ranges of design variables

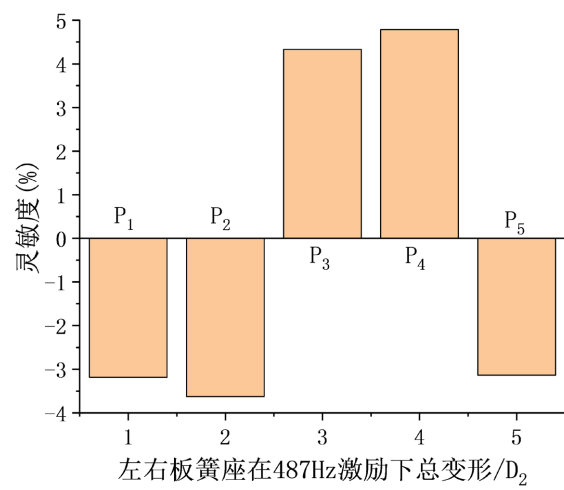
表 6. 设计变量原始值及取值范围

设计变量/mm	原始值	取值范围
P_1	19	15~23
P_2	8	7.5~9
P_3	80	70~100
P_4	15	12~18
P_5	5	3~5

5.2. 试验设计与参数灵敏度分析



(a) 左右板簧座在 329 Hz 激励下总变形灵敏度图



(b) 左右板簧座在 487 Hz 激励下总变形灵敏度图

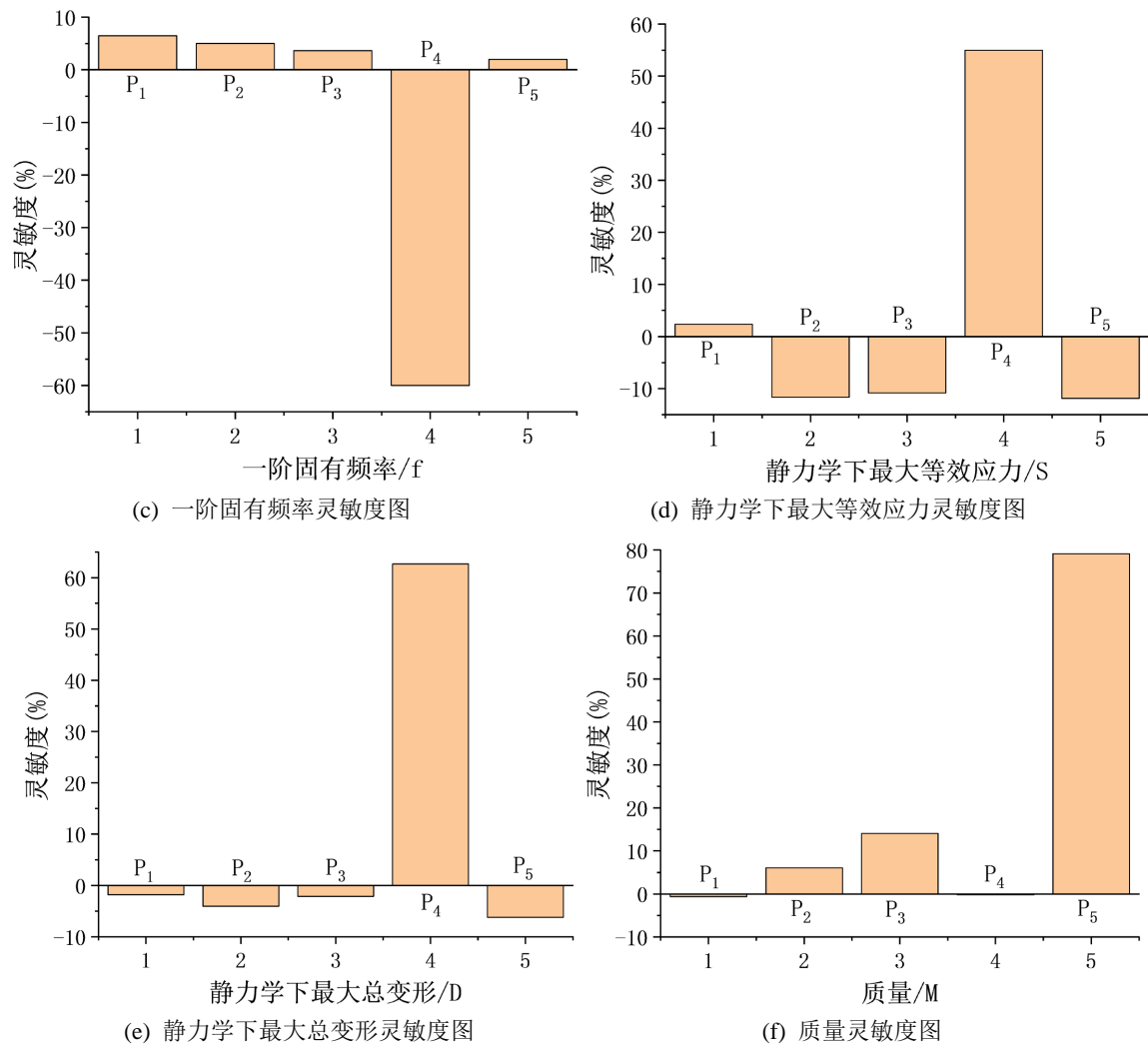


Figure 7. Sensitivity analysis
图 7. 灵敏度分析图

本文选用 ANSYS Workbench 的响应面优化模块中的拉丁超立方体抽样法对驱动桥壳设计变量进行试验设计, 抽取试验样本总数为 100 个[13]。并且选取在原始条件下, 左右板簧座分别在共振频率 329 Hz 和 487 Hz 激励下的总变形 D_1 和 D_2 、一阶固有频率 f 、静力学分析下的最大等效力 S 、总变形 D 和质量 M 为目标函数。在进行完试验设计后, 要进行参数灵敏度分析, 以去除对目标函数影响效果不明显的设计变量。灵敏度分析如图 7 所示。

从以上结果分析可知, 5 个设计变量均对 6 个目标函数有显著影响, 故这 5 个参数都要作为优化参数。其中, P_4 、 P_5 对 D_1 影响较大; P_2 、 P_5 对 D_2 影响较大; P_1 、 P_4 对 f 影响较大; P_2 、 P_4 对 S 影响较大; P_4 、 P_5 对 D 影响较大; P_3 、 P_5 对 M 影响较大。故响应面分析应该重点研究影响较大的两个设计变量对各自目标函数影响。

5.3. 响应面分析及代理模型的建立

根据以上试验结果, 生成响应面并得到 Kriging 代理模型[14]。其中输入与输出参数间的响应面关系如图 8。

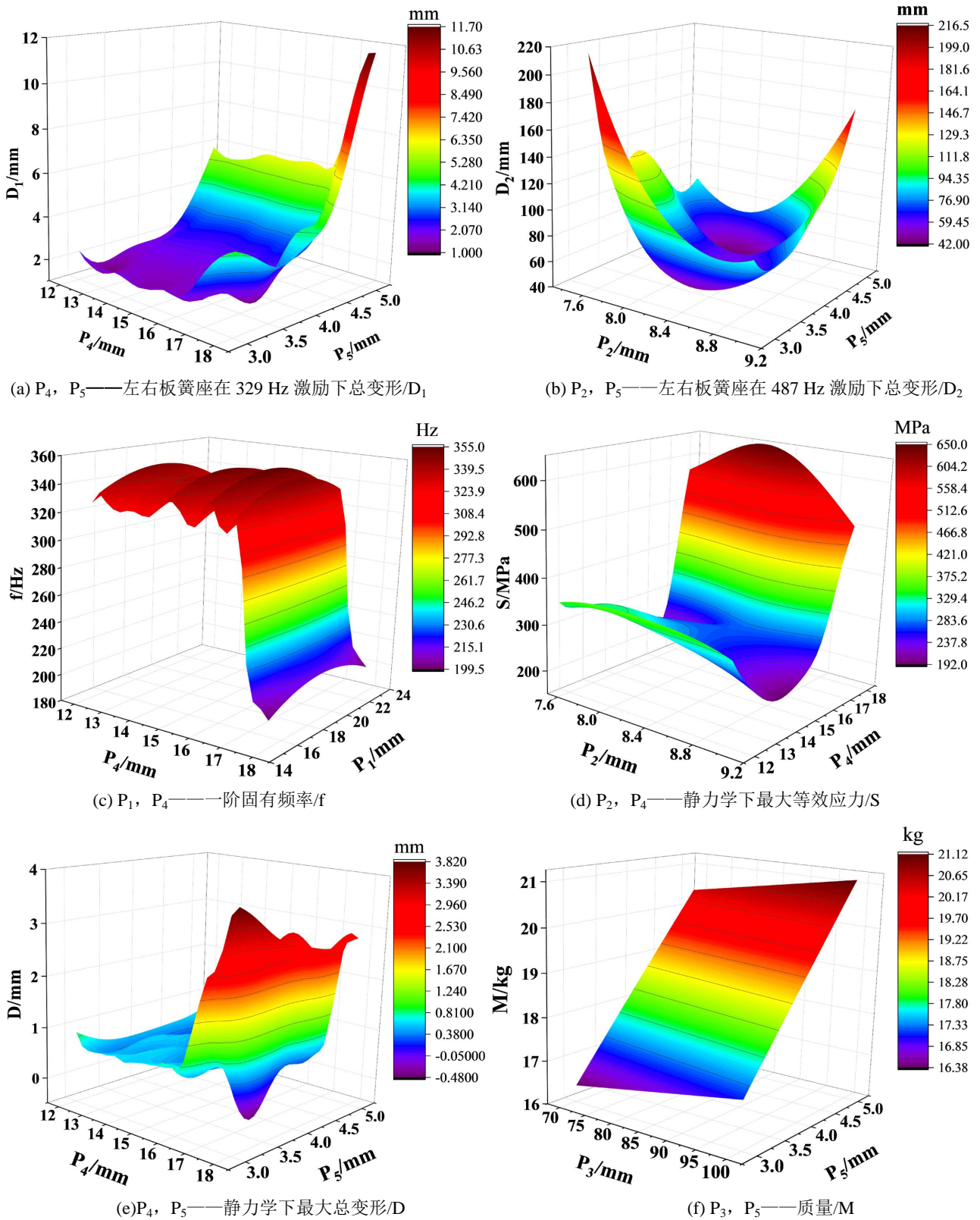


Figure 8. Response surface diagram of target variables and corresponding design variables

图 8. 目标函数与对应设计变量的响应面图

5.4. 基于遗传算法的驱动桥壳优化

本文采用多目标遗传算法(NSGA-II)。

对驱动桥壳结构进行优化[15]。该优化算法的模型包括三个要素：设计变量、目标函数，以及约束条件。由于桥壳质量的降低会引起强度和刚度性能下降，所以，以桥壳质量 M 最小化为优化目标的前提下，同时要求左右板簧座分别在共振频率 329 Hz 和 487 Hz 激励下的总变形 D_1 和 D_2 最小化，一阶固有频率 f 最大化，静力学分析下的最大等效应力 S 和总变形 D 最小化，从而保证静动态性能依然满足设计要求。驱动桥壳的参数优化的数学模型为：

$$\begin{cases} \min [D_1, D_2, S, D, M]^T, \max [f]^T \\ \text{Find } X = [P_1, P_2, P_3, P_4, P_5]^T \end{cases} \quad (12)$$

约束条件为：

$$\text{s.t. } L \leq x \leq U \quad (13)$$

其中： $P_i (i=1,2,3,4,5)$ 为 5 个尺寸设计变量，其下限取值为 $L = [15, 7.5, 70, 12, 3]^T$ ；上限取值为 $U = [23, 9, 100, 18, 5]^T$ ， D_1, D_2, f, S, D, M 为 6 个目标函数。

采用多目标遗传算法对桥壳的 Kriging 代理模型进行求解寻优，求解后得到一些列 Pareto 解集，再从这些解集中选取 3 组候选方案，如表 7 所示。

Table 7. Candidate points and verification candidate points
表 7. 候选点及验证候选点

参数	候选点 1	验证候选点 1	候选点 2	验证候选点 2	候选点 3	验证候选点 3
P_1/mm	20.426	20.426	28.866	28.866	21.413	21.413
P_2/mm	8.7348	8.7348	8.879	8.879	8.3553	8.3553
P_3/mm	99.953	99.953	90.147	90.147	96.696	96.696
P_4/mm	15.085	15.085	13.589	13.589	14.617	14.617
P_5/mm	3.499	3.499	3.2885	3.2885	3.3562	3.3562
D_1/mm	1.8336	1.8688	1.6059	1.6381	1.7287	1.7267
D_2/mm	5.7138	6.1481	5.8352	6.4186	5.3022	6.4154
f/Hz	345.11	342.52	356.3	343.82	345.37	343.53
S/MPa	229.63	244.89	278.56	283.98	277.82	276.63
D/mm	0.41127	0.41718	0.40108	0.4443	0.41542	0.46465
M/kg	18.225	18.225	17.583	17.583	17.762	17.762

5.5. 优化结果圆整

由表 7 所给出的候选点，根据输出参数要求在其中进行筛选，本文筛选候选点 1 作为优化结果，并考虑到加工精度的要求，对该组设计变量进行圆整，圆整后结果如表 8 所示。

Table 8. Optimization of design variables and rounding results**表 8.** 设计变量优化并圆整后结果

设计变量/mm	优化前	优化并圆整后
P ₁	19	20.4
P ₂	8	8.7
P ₃	80	100.0
P ₄	15	15.1
P ₅	5	3.5

根据表 8 的整理后的设计变量,重新在三维模型设计软件中修改设计变量参数,再导入 ANSYS Workbench 对应的模块中进行分析,得到最终的优化结果如表 9。

Table 9. Optimization results of objective variables**表 9.** 目标函数优化结果

目标函数	优化前	最终优化后	对比
D ₁ /mm	6.408	1.8664	-70.8%
D ₂ /mm	10.341	6.2059	-40.0%
f/Hz	331.88	342.55	+3.2%
S/MPa	290.99	242.83	-16.6%
D/mm	0.377	0.41898	+11.1%
M/kg	20.5	18.22	-11.1%

由表 9 可知,对驱动桥壳进行优化后,驱动桥壳的总质量 M 从 20.5 kg 下降到 18.22 kg,减少了 11.1%,轻量化效果较为显著,并且优化后的其他各项静态性能值均符合要求。

6. 结论

针对某汽车驱动桥壳进行结构建模和多工况下的静态特性分析,并基于遗传算法对驱动桥壳进行了轻量化设计。结果如下:

1) 静力学分析结果显示,最大等效应力发生在最大牵引力工况,其位置发生在板簧座与桥壳连接处过度半径内侧,其值小于材料屈服强度,满足强度需求。

2) 模态分析和谐响应分析得出,驱动桥壳动态性能良好,不会发生低阶共振,也不会因路面激励发生共振。

3) 在强度及刚度等性能均满足的前提下,使用多目标遗传算法将桥壳质量减小了 11.1%,满足设计要求。

参考文献

- [1] 王雪梅,薛振国,刘玲玲.基于有限单元法重载汽车驱动桥壳优化设计[J].机械设计与制造,2021(1):240-244+249.
- [2] 许文超,王登峰.基于疲劳寿命的驱动桥壳可靠性与轻量化设计[J].中国公路学报,2020,33(5):178-188.
- [3] 丁文敏.汽车驱动桥壳性能仿真分析及其改进[J].机械设计与制造,2019(9):269-272.
- [4] 吕国坤,陈黎卿,王亮,等.基于遗传算法-响应曲面法的驱动桥壳轻量化设计[J].机械设计,2013,30(10):

50-55.

- [5] 刘为, 薛克敏, 李萍, 等. 汽车驱动桥壳的有限元分析和优化[J]. 汽车工程, 2012, 34(6): 523-527.
- [6] 俞云云, 崔世海, 许文超. 基于多目标优化的某驱动桥壳轻量化设计[J]. 武汉科技大学学报, 2018, 41(4): 307-311.
- [7] 刘惟信. 汽车车桥设计[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004: 339-347.
- [8] 于玉真, 李励, 李伟亮. 微型电动汽车车架多目标驱动尺寸优化研究[J]. 机械设计与制造, 2020(4): 66-70.
- [9] 邵毅明, 肖凯锴. 某重型汽车驱动桥壳结构优化设计建模[J]. 计算机仿真, 2017, 34(6): 152-155+226.
- [10] 齐东东, 孙桓五, 齐丽丽, 等. 基于 ANSYS 的载重货车驱动桥壳的结构强度与模态分析[J]. 机械传动, 2012, 36(8): 105-107+123.
- [11] 李惠林, 周兵兵, 刘倩, 等. 载重货车驱动桥壳谐响应分析[J]. 机械设计与制造, 2013(9): 101-103+106.
- [12] 万锋, 管锋, 王琼. 基于响应面法的丢手释放接头优化设计[J]. 机械强度, 2021, 43(1): 114-121.
- [13] 汤春球, 袁友利, 莫易敏, 等. 基于拉丁超立方抽样的薄壁梁抗弯性能研究[J]. 汽车技术, 2017(5): 30-35.
- [14] 胥磊, 王蓉晖, 王涛, 等. 基于 Kriging 代理模型的加筋柱壳结构优化[J]. 计算机仿真, 2021, 38(6): 51-55.
- [15] 林荣会, 周鹏. 基于稳健性择优的自卸车驱动桥壳优化[J]. 机械传动, 2021, 45(6): 65-70.