

汽车变速器壳体多工况自适应性拓扑优化方法研究

褚超美¹, 周进¹, 缪国², 奚成捷¹

(1. 上海理工大学机械工程学院, 上海 200093; 2. 上海汽车变速器有限公司, 上海 201822)

摘要:为解决汽车变速器壳体多工况拓扑优化适应性问题,提出一种基于折衷规划拓扑优化理论的汽车变速器壳体多工况自适应性拓扑优化思路.以某前横置变速器壳体为研究对象,以刚度最大、柔度最小为优化目标,借助 Hyperworks 分析软件,开展变速器壳体折衷规划自适应拓扑优化设计方法研究.经有限元分析验证,运用折衷规划拓扑优化方法形成的变速器壳体结构设计模型,在一/倒档两典型工况下的目标函数都逐渐收敛于最小值,各档位柔度均达到最小,可同时满足汽车各工况下变速器壳体强度可靠性要求.应用实践表明,折衷规划拓扑优化法是一种有效解决复杂结构体多目标优化问题的可行方法.

关键词: 变速器壳体; 拓扑优化; 多工况; 折衷规划

中图分类号: U 463.2 **文献标志码:** A

Adaptive Topology Optimization of Automobile Transmission Housing Under Multiple Working Conditions

CHU Chaomei¹, ZHOU Jin¹, MIAO Guo², XI Chengjie¹

(1. School of Mechanical Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China;
2. Shanghai Automobile Gear Works, Shanghai 201822, China)

Abstract: The adaptive topology optimization based on compromise programming method was used to solve the problem of multiple working conditions of automobile gearbox housing. The front transverse transmission was taken as a research object, while the maximum stiffness or the minimum compliance was regarded as the optimization objective. The transmission housing adaptive topology optimization based on compromise programming method was implemented by using the Hyperworks analysis software. In the method, the objective function will gradually converge to the minimum compliance, which was verified by the finite element analysis under the two typical working conditions of first stage gear and reverse gear. The optimization results can meet the strength reliability requirement under all the automotive transmission working conditions. The practical applications show that the compromise programming method for topology optimization is an effective way to solve the problem of complex structure multi-objective optimization.

Keywords: gearbox housing; topology optimization; multiple working conditions; compromise programming

收稿日期: 2014-09-30

基金项目: 上海汽车工业科技发展基金资助项目(1308)

第一作者: 褚超美(1958-),女,教授.研究方向:汽车变速器设计方法研究. E-mail: ccm.126@126.com

变速器壳体作为汽车传动系统的支撑体,受到传动齿轴与外部车身传递冲击力的作用,极易因强度、刚度不足引起局部断裂失效,导致变速器功能失效^[1-2].为了保证变速器壳体工作可靠性,设计师们通常采用增加局部结构体积的方式,提高壳体受力局部的强度与刚度.而结构体积的增加,易导致材料用量及零件质量增大,引起产品成本及整车油耗上升的负面作用.优良的变速器壳体结构设计应以实现最佳几何形状前提下的结构体积最小化,即以实现系统材料利用率最大化为设计目标.

拓扑优化设计技术可根据力的传递路径,在给定设计空间内,寻找最佳材料布局方式^[3-4].近年来,运用结构拓扑优化思想与有限元模拟相结合的优化方法,实现汽车复杂零件结构轻量化设计的相关技术研究,正受到业内普遍关注^[5-8].

工程中普遍存在某结构体在不同时刻承受不同负载的状况.为了获得满足各工况使用性能的拓扑结构,对于这种处于多工况交替工作的结构体,传统的拓扑优化方法是将各个工况下的拓扑结构以线性加权的方式求解,将求解后的结果作为基本符合多工况使用要求的拓扑结构^[9-10].然而,当目标优化问题所求得的可行解所构成的集合不是凸集时,采用线性加权法得到的解将可能不是可行解,即该方法无法解决可行域不是闭合凸集的优化问题(非凸优化问题).折衷规划是一种有效解决多目标优化问题的可行方法,通过将各个工况中可行解和理想解相比较,找到最接近于理想解的可行解,将该解作为满足多目标优化问题的最优解^[11].清华大学范文杰博士曾应用该方法,尝试解决多工况下车架拓扑优化问题,获得较理想的车架拓扑优化结构^[12-13].

汽车多以变工况行驶,使变速器常处于多工况交替工作状态,与变速器各传动档工况所对应的壳体最优拓扑结构各有不同.为解决在多个工况下进行拓扑优化计算时,每个工况得到的壳体最优结构不相同问题,以某前横置变速器壳体为研究对象,以刚度最大,即柔度最小为优化目标,借助Hyperworks软件中的optistruct模块,开展变速器壳体折衷规划自适应拓扑优化设计方法研究.

1 多目标折衷规划拓扑优化方法

为使所设计变速器壳体能够达到最大使用负荷时的强度、刚度要求,选取承载最大的一档工况及倒档工况为主要研究工况.静态优化中,常以柔度最小作为优化目标,当工况的柔度最小时,则可将其作为该工况下的最优解.将一档和倒档两个工况下得到

的变速器壳体优化可行解进行统计分析,得到如图1中阴影部分所示的可行域不是凸集的结果.

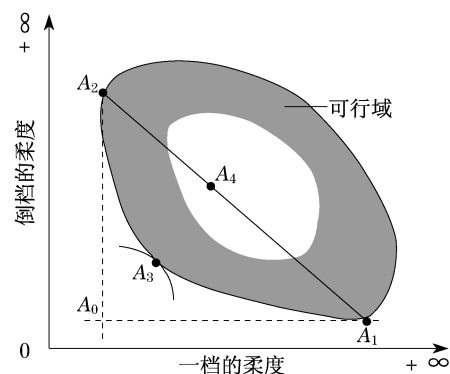


图1 汽车变速器壳体折衷规划原理

Fig.1 Compromise programming method used in automobile transmission housing optimization

图1中, A_0 是由每个工况的最小解做延长线得到的交点,该点即为理想条件下,两种工况同时达到最优的解; A_1 为倒档工况柔度最小点; A_2 为一档工况柔度最小点; A_3 为折衷规划方法得到的解; A_4 为采用线性加权得到的解;阴影部分表示可行解的解集.

在一/倒档工况下求得的最小柔度 A_1, A_2 , 即为倒档和一档在单工况优化计算时的最优解.对于同一目标变速器壳体优化时出现的这种非凸优化问题,当采用线性加权的方式求取满足两种工况的最优解时,所得到的解 A_4 便会在可行解解集以外.而采用折衷规划方法求解时,则是以理想解 A_0 为圆心做一与可行域相切的圆,该切点即为距离理想解最近的可行解(图中为 A_3 点),该解便为满足各个工况的最优解.如此便可解决用线性加权法无法解决的非凸优化问题,同时避免采用单工况计算时的局限性.

2 变速器壳体多工况折衷规划拓扑优化

2.1 壳体拓扑优化前处理

根据变速器实际安装空间的大小,建立变速器壳体初始设计空间,并进行网格划分,最终得到1 157 167个四面体单元,230 853个节点.由于壳体悬置处所受的载荷较大,会对拓扑优化的结果产生影响,所以在优化计算时,需要考虑变速器壳体上下悬置的载荷.为了更好地模拟变速器工作时的真实状况,需要将壳体离合器安装位置处与发动机相连的部分建立固定约束,并将前后壳体之间建立螺栓连接,最终得到的有限元模型如图2所示(见下页).

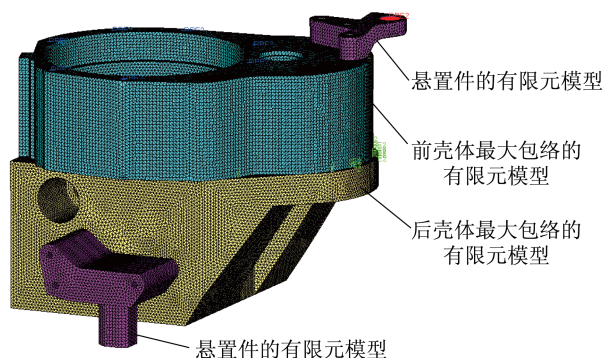


图 2 变速器壳体有限元模型

Fig.2 Transmission housing's finite element model

2.2 壳体单工况拓扑优化方法

在静态条件下,需要使所设计的变速器壳体具有足够的刚度,即刚度最大化.在 optistruct 分析软件中,通过柔度最小化来体现这一设计目标.在各档载荷以及约束下,以体积比上限 0.15 作为约束函数,柔度最小为目标函数,建立拓扑优化模型,对变速器壳体分别进行一档和倒档工况下的拓扑优化.单工况下的拓扑优化模型为

$$\min C(x) = U^T K U = \sum_{i=1}^n (x_i)^p u_i^T k_0 u_i$$

$$\text{s. t.} \begin{cases} \sum_{i=1}^n x_i v_i \leq \alpha V_0 \\ K U = F \\ 0 < x_{\min} \leq x_i \leq 1 \\ i = 1, 2, \dots, n \end{cases}$$

式中: $C(x)$ 为结构的整体柔度; U 为位移矩阵; K 为优化前的结构总刚度矩阵; x_i 为变密度法计算时单元 i 的密度; p 为惩罚因子; u_i 为单元 i 的列向量位移矩阵; k_0 为结构初始单元的刚度矩阵; v_i 为第 i 个单元的体积; α 为体积比; V_0 为结构初始设计空间的体积; F 为力的列向量.

分别对一档和倒档进行单个工况下壳体拓扑优化计算.由图 3 所示的拓扑优化结果可见,在一档和倒档两种不同工况下,计算得到的拓扑优化结果有所不同,即出现加强筋方向不尽相同的情况(以前壳体为例,图中黑线标示处).这种同一位置加强筋方向不同的结果,将会为后期的建模带来困扰.

2.3 壳体多工况折衷规划拓扑优化方法

为使设计的壳体有足够的强度和刚度,以载荷最大的一档和倒档两种典型工况作为主要研究工况,运用折衷规划的方法解决壳体的多目标优化问题.一档和倒档工况时,在不同方向上壳体承受的载荷有别,对应的最优拓扑优化结果也不相同,常用 CAE (computer aided engineering) 分析的 Hyperworks

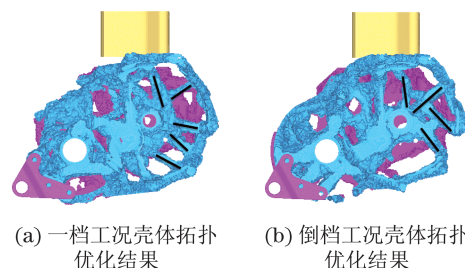


图 3 单工况下壳体拓扑优化结果(加强筋方向)

Fig.3 Gearbox's topology result under the single working condition (stiffener scheme)

软件中的 optistruct 拓扑优化模块求解.在求解多工况拓扑优化时,采用的是线性加权平均的方法,将多工况问题转化为单一工况求解,但是该方法无法解决非凸优化问题.为了使多工况下计算得到的优化结果更加准确,将折衷规划的方法应用到多工况的变速器壳体拓扑优化计算中.以体积比为约束,并将原有目标函数按照折衷规划的方式进行重构,使多工况多目标优化问题转化为单目标优化问题,最终得到的拓扑优化模型为

$$\min C(x) = \left\{ \sum_{k=1}^m \omega_k^q \left[\frac{C_k(x) - C_{k,\min}}{C_{k,\max} - C_{k,\min}} \right]^q \right\}^{\frac{1}{q}}$$

$$\text{s. t.} \begin{cases} \sum_{i=1}^n x_i v_i \leq \alpha V_0 \\ 0 < x_{\min} \leq x_i \leq 1 \\ i = 1, 2, \dots, n \end{cases}$$

式中: $C_{k,\max}$ 和 $C_{k,\min}$ 为第 k 个工况下,目标函数柔度的最大值和最小值; ω_k 为在第 k 个工况在所有计算工况中所占权重的大小; q 为目标函数计算的惩罚系数.

在同等的约束条件下,首先计算变速器壳体单工况下目标函数柔度最小值和最大值;将每个工况下计算得到的目标函数的极值输入到折衷规划数学模型中;根据汽车运行中一档和倒档使用的频率,分别选取两个工况的权值系数(文中取一档权值系数为 0.6,倒档权值系数为 0.4).

通过 Hyperworks 中的函数自定义功能,将折衷规划方程在该软件的优化模块中进行编写,并将其设置为响应(responses),然后再把该响应作为新的目标函数.以体积比为约束,单元的密度为设计变量,设置与轴向平行的拔模方向,以此建立多目标刚度最大化,即以柔度最小化为目标的拓扑优化模型.

为使得到的拓扑优化结果更加精确,需要对优化参数进行设置.在优化过程中,优化结果经常会产生材料布局方式为网状的情况(棋盘现象),因而需要将棋盘现象控制参数(CHECKER)设为 1,对棋盘效应进行控制.同时,由于采用变密度法进行拓扑优

化计算时,会产生密度介于0和1之间的中间密度单元,通过设置惩罚系数(DISCRETE)为2,对其进行控制,使优化结果中单元密度尽量趋近0或者1.为了使迭代结果尽可能充分,将相邻迭代步之间的容差设为0.001.

2.4 目标样机壳体多工况折衷规划拓扑优化

运用壳体多工况折衷规划拓扑优化方法,进行目标样机壳体优化分析,得到如图4所示的目标样机前壳体拓扑优化结构模型.模型显示了静态多工况下壳体初始设计空间里材料的布局状况,其中,黑色线条标示的是能同时满足一档和倒档两种工况可靠性的加强筋方位.

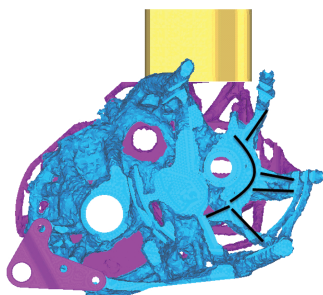


图4 前壳体拓扑优化结构模型

Fig.4 Topology optimization structure model of front gearbox housing

为了验证优化计算后得到的解是可行解,需要判断各工况的柔度以及约束函数是否收敛.图5为目标样机壳体在折衷规划拓扑优化模型迭代过程中,各个工况的目标函数(即柔度)随迭代次数的变化曲线,图6为体积比随迭代次数的变化曲线.

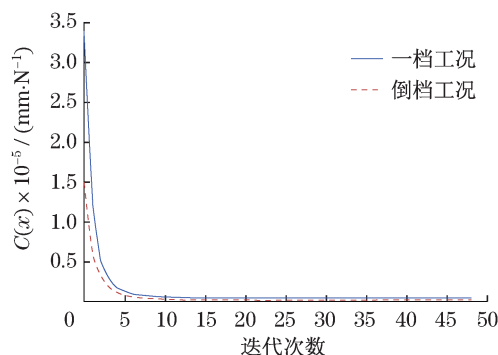


图5 各工况柔度随迭代次数变化曲线

Fig.5 Curve of compliance change along with the iteration times under different working conditions

由图5中各档位柔度的迭代变化曲线可见,一/倒档两工况下目标函数都逐渐收敛于最小值,各档位柔度都达到最小.由图6的体积比响应的迭代收敛曲线可见,迭代25步之后,体积比在0.15左右波动,曲线基本保持平稳,迭代收敛.

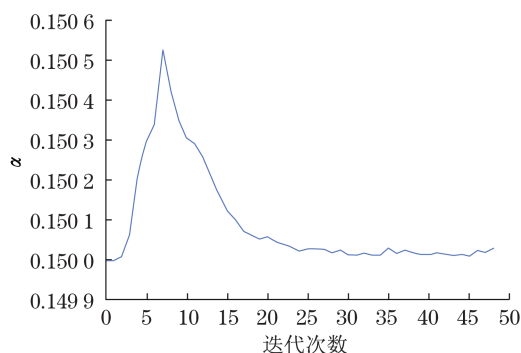


图6 体积比波动曲线

Fig.6 Curve of volume ratio change along with the iteration times

壳体多工况折衷规划拓扑优化解决了对不同工况拓扑优化时,在壳体相同位置处,得到加强筋方向不同的拓扑优化结果对最终结构选型带来的困扰.由多工况折衷规划拓扑优化法得到如图4所示的材料基本布局,便可以准确形成壳体结构设计模型.

3 壳体折衷规划拓扑优化布局可靠性分析评价

为进一步验证折衷规划拓扑优化法在变速器壳体产品设计中的实际应用价值,针对图4所示折衷规划拓扑优化后的目标壳体材料布局结构,进行可靠性评价分析.根据制造工艺对壁厚的基本要求,建立如图7和图8(见下页)所示的目标变速器壳体三维模型结构.

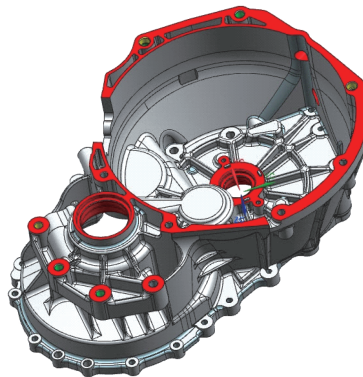


图7 变速器前壳体模型

Fig.7 Front gearbox housing model

以变速器壳体受载最大的一/倒档工况壳体应力及其轴承孔处形变(即位移)作为优化目标.运用Hyperworks软件,对根据多工况拓扑优化布局方式建立的变速器壳体三维模型进行有限元分析,得到如表1(见下页)所示的典型工况下,壳体优化前后应力应变分析结果.由分析结果可知,优化后壳体的

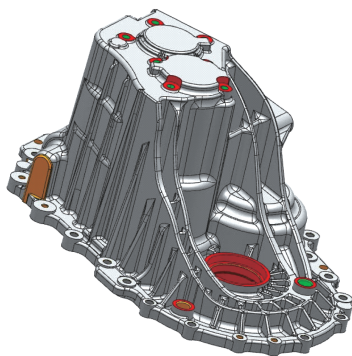


图8 变速器后壳体模型

Fig.8 Rear gearbox housing model

表1 壳体有限元静态分析结果

Tab.1 Gearbox housing's finite element result under static loads

汽车典型运行工况	评价 参考值	优化前 计算值	优化后 计算值
一档工况下壳体的应力	≤ 120 MPa	260.5 MPa	119 MPa
倒档工况下壳体的应力	≤ 120 MPa	163.6 MPa	109 MPa
一/倒档工况下 轴承孔最大位移量	≤ 0.25 mm	0.33 mm	0.25 mm

最大应力仅为优化前的 45.7%，位移为优化前的 75.7%，均达到考核标准。

图9为由壳体折衷规划拓扑优化方法得到的一档工况时轴承孔最大位移云图。通常为了提高壳体的使用性能，壳体差速器孔处位移应尽量小。由图9可见，轴承孔处最大位移量为 0.25 mm，符合设计要求，证实了采用折衷规划拓扑优化方法形成的壳体模型可满足汽车各工况行驶的可靠性要求。

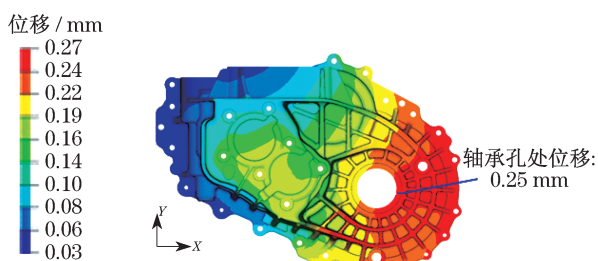


图9 目标变速器后壳体一档工况的位移云图

Fig.9 Target gearbox housing's displacement under the typical working condition of the first stage gear

4 结 论

a. 针对汽车变工况行驶的特点，提出一种基于折衷规划拓扑优化理论的汽车变速器壳体多工况自适应性拓扑优化方法。

b. 经有限元分析验证，运用折衷规划拓扑优化

方法形成的变速器壳体结构设计模型，在一/倒档两工况下的目标函数都逐渐收敛于最小值，各档位柔度都达到最小，可同时满足汽车各工况下变速器壳体强度可靠性要求。

c. 折衷规划拓扑优化方法可以避免产生由单一工况优化设计时导致的多工况兼顾应用受限问题，便于设计者在设计初期全面考虑多个工况结构特点，降低单一工况设计时的风险，提高设计结果的准确性。

d. 变速器壳体优化设计实践表明，折衷规划方法可有效地解决复杂结构体可行域不是闭合凸集的优化问题，是汽车变速器壳体多工况自适应性拓扑优化的一种有效方法。

参考文献：

- [1] 张斌,褚超美,缪国,等. 汽车变速器箱体精准性仿真优化研究[J]. 计算机仿真, 2012, 29(8): 331-335.
- [2] 康一坡,霍福祥,魏德永,等. 变速器壳体强度有限元分析与试验验证[J]. 机械设计, 2011, 28(1): 21-24.
- [3] 李民,舒歌群,卫海桥. 基于拓扑优化和形状优化的低噪声齿轮室罩盖设计[J]. 内燃机工程, 2008, 29(6): 55-59.
- [4] 罗震,陈立平,黄玉盈,等. 连续体结构的拓扑优化设计[J]. 力学进展, 2004, 34(4): 463-476.
- [5] 朱剑锋,林逸,陈潇凯,等. 汽车变速箱壳体结构拓扑优化设计[J]. 吉林大学学报(工学版), 2013, 43(3): 584-589.
- [6] 崔天福,丁晓红,候丽园. 基于密度法的传热结构拓扑优化设计[J]. 上海理工大学学报, 2014, 36(6): 548-555.
- [7] 丁晓红,林建中,王峰,等. 基于应力场的植物根系模拟及工程应用[J]. 上海理工大学学报, 2008, 30(2): 152-156.
- [8] 丁晓红,赵新芳,王海华,等. 基于子结构的构件逐步逼近拓扑优化方法研究[J]. 汽车工程, 2014, 36(5): 639-642.
- [9] 胡世军,梁东旭,张代录,等. 基于 ANSYS 的主轴箱体模态分析及拓扑优化[J]. 机械制造, 2012, 50(579): 6-9.
- [10] 闵海涛,高娟,马天飞. 汽车变速器箱体结构强度分析与优化设计[J]. 中国机械工程, 2012, 23(20): 2514-2519.
- [11] Chen T Y, Wu S C. Multiobjective optimal topology design of structures[J]. Computational Mechanics, 1998, 21(6): 483-492.
- [12] 范文杰,范子杰,桂良进,等. 多工况下客车车架结构多刚度拓扑优化设计研究[J]. 汽车工程, 2008, 30(6): 531-533.
- [13] 范文杰,范子杰,苏瑞意. 汽车车架结构多目标拓扑优化方法研究[J]. 中国机械工程, 2008, 19(12): 1505-1508.

(编辑:丁红艺)