

文章编号: 1005-0523(2024)06-0106-06



某乘用车前悬下控制臂结构性能 评估与优化设计

游永忠¹, 朱海燕², 吴国栋², 杨春辉²

(1. 华东交通大学交通运输工程学院, 江西 南昌 330013; 2. 华东交通大学机电与车辆工程学院, 江西 南昌 330013)

摘要:【目的】为了评估某乘用车前悬下控制臂的结构性能是否满足设计要求。【方法】首先, 基于有限元方法建立下控制臂网格模型, 对其进行自由模态仿真, 获取其前三阶频率。然后, 建立前悬架多体动力学模型, 获得下控制臂外联点的力和扭矩, 并采用惯性释放方法对其进行强度性能仿真, 获取各个工况的应力水平。最后, 对下控制臂的厚度进行优化, 获取最优结构。【结果】下摆臂的前三阶频率均处于外部激励频率范围之外, 满足振动特性要求; 各工况的最大应力均低于材料屈服值, 满足强度属性要求; 优化后的结构性能符合设计标准, 并且其重量减轻了12.5%。【结论】研究结果能够为同类产品设计及优化提供有效的借鉴和参考, 具有重要的实际工程意义。

关键词: 下控制臂; 模态; 频率; 强度; 优化

中图分类号: U463.33

文献标志码: A

本文引用格式: 游永忠, 朱海燕, 吴国栋, 等. 某乘用车前悬下控制臂结构性能评估与优化设计[J]. 华东交通大学学报, 2024, 41(6): 106-111.

Structural Performance Evaluation and Optimization Design of a Passenger-Vehicle Front Suspension Lower Control Arm

You Yongzhong¹, Zhu Haiyan², Wu Guodong², Yang Chunhui²

(1. School of Transportation Engineering, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China; 2. School of Mechatronics and Vehicle Engineering, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China)

Abstract: 【Objective】Aiming at evaluating whether the structural performance of a passenger-vehicle front suspension lower control arm could meet the design requirements. 【Method】Firstly, the lower control arm grid model was established based on finite element technique, the modal analysis results showed that its first three modal formations were obtained. Secondly, the force and moment of the lower control arm were extracted based on front suspension dynamic model, the lower control arm was strength analyzed by adopting inertia release method, its stress were obtained. Lastly, the thickness of lower control arm was parameters optimized, so the optimal structural parameters were obtained. 【Result】Its first three modal formations were outside the external excitation frequency range, so it could meet vibration characteristics requirements. Its stress were lower than the material yield value, so it could meet the strength performance requirements. The structural performance of lower control arm could meet the design standards after optimization, its weight had been reduced by

收稿日期: 2024-04-20

基金项目: 江西省教育厅科学技术研究项目(GJJ200647)

12.5%。【**Conclusion**】The analysis method could provide effective reference and reference for the design and optimization of the similar product, it had very important practical engineering significance.

Key words: lower control arm; modal; frequency; strength; optimization

Citation format: YOU Y Z, ZHU H Y, WU G D, et al. Structural performance evaluation and optimization design of a passenger-vehicle front suspension lower control arm[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2024, 41(6): 106–111.

【**研究意义**】汽车悬架系统是车辆的重要组成部分,其保证了车辆的操作稳定性和舒适性。下控制臂是前麦弗逊悬架的导向与传力部件,通过球铰和衬套与车轮和副车架相连,在车辆行驶过程中承受来自不同方向的力和扭矩,可能引起异响和开裂,其结构性能直接影响车辆的可靠性和稳定性,与此同时结构的轻量化有助于提升整车的燃油动力性,因此下控制臂设计需要兼顾各项性能要求和轻量化要求。

【**研究进展**】谢颖等^[1]采用惯性释放方法对某下控制臂进行强度仿真,并对其进行结构优化,最终满足了强度要求。梁国栋等^[2]为了解决下摆臂开裂问题,搭建了下摆臂有限元模型和前悬架动力学模型,对其进行强度仿真和台架测试,并且进行了疲劳寿命预测,采用集成优化平台对其进行优化设计,最终得到了最优的结构参数,重量减小了6.5%。徐峰^[3]基于建立的麦弗逊悬架模型,获取了外联点的载荷,得到了其强度应力分布和模态频率,对拓扑优化结果进行重构,最终实现了轻量化。Song等^[4]分别采用响应面和克里金近似模型对某摆臂进行多目标轻量化分析,对比了两种方法的实际效果。

【**创新特色**】下控制臂载荷的提取涉及理论计算与多体动力学模型的搭建,通过求解计算和分解获取下摆臂外连点的力和扭矩。【**关键问题**】为了分析某乘用车前悬下控制臂的结构性能,首先基于有限元方法对其进行自由模态仿真,获取其低阶模态频率和振型,再对其前悬架进行动力学仿真分析,得到其极限强度的力和扭矩,以此对其进行强度仿真,再对其结构进行优化,最后达到轻量化的目的。

1 下控制臂模态性能评估

1.1 模态分析原理

下控制臂模态性能评估是指其固有模态和振型进行计算,下控制臂的运动微分方程为^[5-7]

$$M\ddot{x}(t) + C\dot{x}(t) + Kx(t) = f(t) \quad (1)$$

式中: M 、 C 和 K 为下控制臂的质量矩阵、阻尼矩阵和刚度矩阵; $x(t)$ 和 $f(t)$ 为下控制臂的位移向量和载荷向量。

通过傅里叶变换即得

$$(-\omega^2 M + \omega C + K)x(\omega) = f(\omega) \quad (2)$$

式中: ω 和 $x(\omega)$ 分别为下控制臂的固有频率及其振型。

1.2 建立有限元模型

某乘用车前悬下控制臂是铸铝件,重量为1.6 kg,其前点和后点与副车架相连,其外点与转向节相连,将下控制臂的三维模型导入Hypermesh软件^[8-10]中,首先对其进行几何清理和简化,删除对结构性能影响较小的部件和特征。由于该下控制臂外表面复杂,难以使用六面体单元建模,因此采用3 mm的CTRIA3单元对其表面进行网格划分,并且确保其最小单元大于1 mm,最大单元小于4 mm,长宽比小于4,翘曲度小于15,扭曲度小于45,然后生成四面体网格单元。下控制臂材料为A6082,其弹性模量为 7.3×10^4 MPa,泊松比为0.33,密度为 2.7×10^3 kg/m³,屈服值为300 MPa,创建各项同性的材料及其属性,并赋予下控制臂,以此建立下控制臂有限元网格模型,如图1所示。其中网格单元总共145 123个,节点总共34 318个。



图1 下控制臂有限元网格模型
Fig. 1 Finite element mesh model of the lower control arm

1.3 模态分析结果

下控制臂的模态性能是其固有特性,有限元仿真时采用自由状态,不施加边界与约束。采用Nas-tran软件^[11-13]导入下控制臂的网格模型,设定频率计算范围为1~300 Hz,基于Lanczos方法提取其固有频率及其振型。下控制臂的低阶模态对其模态性能起决定性作用,因此只提取下控制臂的前三阶模态进行评估。

图2为下控制臂第一阶振型。由图2可知,下控制臂第一阶振型是频率为115.3 Hz的弯曲模态,前后点振幅较大,最大振幅为60.1 mm。

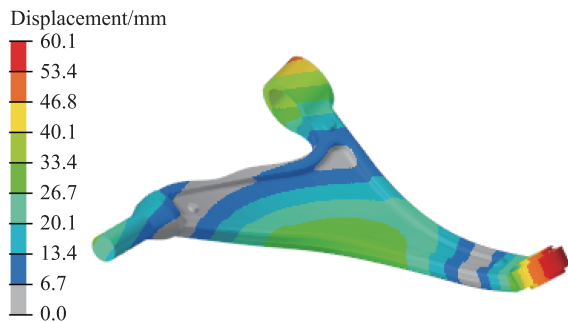


图2 下控制臂第一阶振型

Fig. 2 First order formation of the lower control arm

图3为下控制臂第二阶模态振型。由图3可知,下控制臂第二阶振型是频率为159.0 Hz的一阶扭转模态,外点振幅较大,最大变形为77.6 mm。

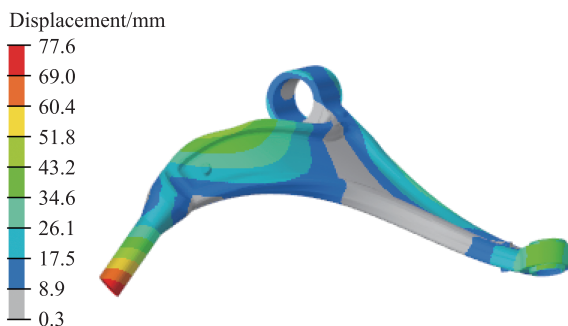


图3 下控制臂第二阶模态振型

Fig. 3 Second order modal formation of the lower control arm

图4为下控制臂第三阶模态振型。由图4可知,下控制臂第三阶振型是频率为198.7 Hz的一阶扭转模态,后点振动比较剧烈,最大振幅为59.6 mm。

该乘用车发动机怠速为800 r/min,通过换算即

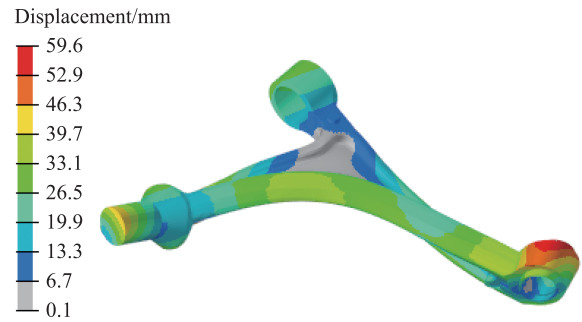


图4 下控制臂第三阶模态振型

Fig. 4 Third order modal formation of the lower control arm

得其一阶频率为26.6 Hz,轮胎声腔模态频率通常为220 Hz左右,因此下控制臂的固有频率有效避开了发动机激励频率与轮胎声腔激励频率,不会引起耦合共振,符合振动特性设计要求。

2 下控制臂强度性能评估

2.1 前悬架动力学仿真分析

车辆在行驶过程中承受纵向载荷、横向载荷和垂向载荷,因此其强度工况可以分为纵向制动、横向转弯和垂向跳动。根据整车参数计算各个工况下轮胎接地点的受力状态。采用Adams软件^[14-16]建立稳定杆、副车架和摆臂柔性体,并根据前悬架系统各个连接点的坐标信息、整车参数、性能曲线等搭建前悬架多体动力学刚柔耦合模型,如图5所示。纵向制动(1.2g)时轮胎垂向载荷为12 132.8 N,轮胎纵向载荷为12 132.8 N。横向转弯(1.2g)时轮胎垂向载荷为11 917.2 N,轮胎横向载荷为11 917.2 N。垂向跳动(3.5g)时轮胎垂向载荷为57 166.7 N。在

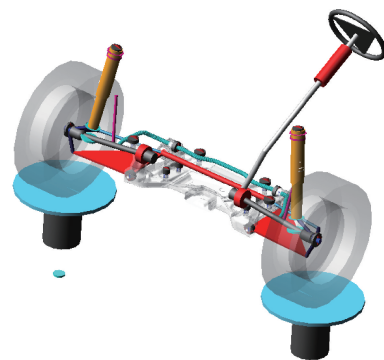


图5 前悬架动力学刚柔耦合模型

Fig. 5 Rigid-flexible coupling model of front suspension dynamics

轮胎接地点分别施加相应的载荷,以此进行动力学仿真分析,最终得到下控制臂前点、后点和外点分别在纵向制动、横向转弯和垂向跳动极限工况下的力和扭矩。

2.2 强度分析结果

基于下控制臂有限元网格模型加载提取的力和扭矩,采用惯性释放方法对其进行强度性能仿真,以此获取下控制臂在各个工况下的应力水平和分布。

图6为下控制臂纵向制动工况的应力云图。通过观察图6可知,下控制臂的最大应力为260.8 MPa,位于下控制臂外点附近,这是由于车辆在制动时整车轴荷往前端转移,导致其纵向受力比较大。

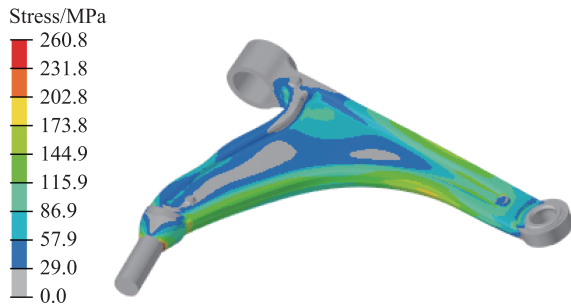


图6 下控制臂纵向制动工况的应力云图

Fig. 6 Stress nephogram of longitudinal braking condition of the lower control arm

图7为下控制臂横向转弯工况的应力云图。通过图7可以看出,下控制臂的最大应力为237.8 MPa,位于下控制臂后点区域,这是由于车辆在横向转弯时整车轴荷往左侧偏移,导致其产生局部应力集中。

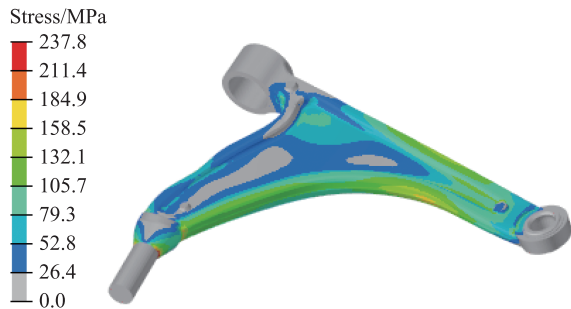


图7 下控制臂横向转弯工况的应力云图

Fig. 7 Stress nephogram of lateral turning condition of the lower control arm

图8为下控制臂垂向跳动工况应力云图。通过观察图8可知,下控制臂的最大应力为221.2 MPa,位于下控制臂的内侧上端,这是由于车辆在垂向跳动时作用力垂直向下,导致其内侧发生应力集中现象。

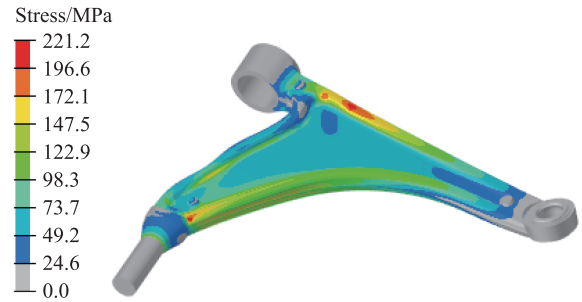


图8 下控制臂垂向跳动工况的应力云图

Fig. 8 Stress nephogram of vertical jumping condition of the lower control arm

综上所述,下控制臂在3种极限工况下的最大应力均小于材料屈服值,满足强度性能要求,符合工程设计标准。

3 优化设计

3.1 优化分析方法

通过下控制臂的模态性能和强度性能分析可知,其结构特性还有一定的冗余,可以进行适当的减重,以下控制臂的整体厚度值(初始值为8.0 mm)作为设计变量,将下摆臂的重量最轻作为目标函数,将其强度最大应力小于300 MPa和第一阶模态大于110 Hz作为约束条件。第二代非劣排序遗传算法探索性强,计算效率高,能够快速获取最优解。因此基于Isight软件并且调用第二代非劣排序遗传算法^[17-18]对下控制臂的厚度值进行自动迭代寻优,最终得到下控制臂的整体厚度最优为7.2 mm。

3.2 优化分析结果

图9为优化之后下控制臂第一阶振型。由图9可知,优化之后下控制臂第一阶模态频率为110.5 Hz,符合动态性能要求,其振型同样表征为弯曲,后点振幅较大,最大变形为54.1 mm。与此同时,优化之后下控制臂第二、三阶模态频率分别为149.5 Hz和184.6 Hz。

图10为优化之后下控制臂纵向制动工况的应力云图。通过观察图10可知,优化之后,下控制臂

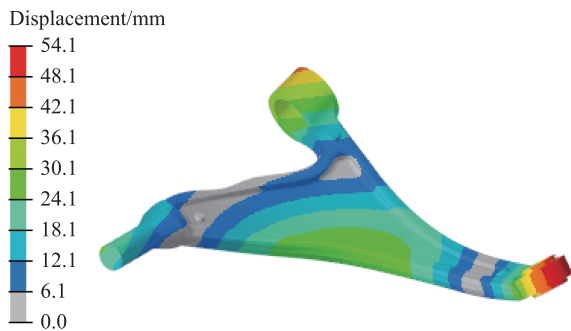


图9 优化后下控制臂第一阶振型

Fig. 9 First order formation of the lower control arm after optimization

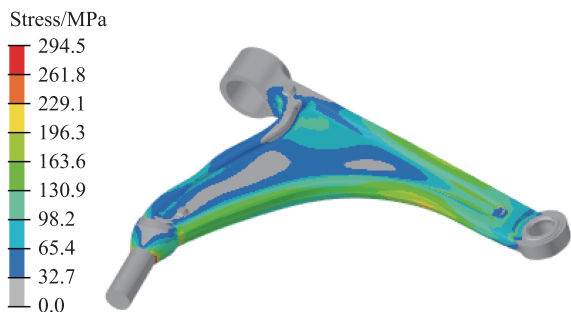


图10 优化后下控制臂纵向制动工况的应力云图

Fig. 10 Stress nephogram of lateral turning condition of the lower control arm after optimization

的最大应力达到了 294.5 MPa, 低于材料屈服值, 符合强度特性要求。表 1 为优化前后参数对比, 由表 1 可知, 下控制臂的重量降低至 1.4 kg, 达到了 12.5% 的轻量化, 优化效果比较明显。优化之后下控制臂的前三阶模态频率有所降低, 强度应力有所增大, 但仍然能够满足设计要求。

表 1 优化前后参数对比

Tab.1 Comparison of parameters before and after optimization

Parameters	Before optimization	After optimization
Thickness/mm	8.0	7.2
first order Frequency/Hz	115.3	110.5
Maximum stress/MPa	260.8	294.5

4 结论

1) 采用有限元方法并且基于 Hypermesh 软件建立下控制臂网格模型, 采用 Nastran 软件对其进行自由模态仿真, 其前三阶固有频率分别为 115.3,

159.0 Hz 和 198.7 Hz, 符合振动特性要求。

2) 基于前悬架多体动力学模型提取下摆臂外联点的力和扭矩, 对其进行极限强度性能仿真, 得到其在纵向制动、横向转弯和垂向跳动工况时的最大应力分别为 260.8, 237.8 MPa 和 221.2 MPa, 均小于材料屈服值, 满足强度设计要求。

3) 采用第二代非劣排序遗传算法对下控制臂的厚度值进行迭代优化, 最终得到下控制臂的整体厚度最优为 7.2 mm。并且下控制臂的重量减轻 12.5%, 在兼顾满足结构性能的前提下达到了轻量化的目的。

参考文献:

- [1] 谢颖, 廉俊盛, 陈雷. 汽车后悬架下控制臂的有限元分析与优化[J]. 内燃机与配件, 2020(3): 31-33.
XIE Y, LIAN J S, CHEN L. Finite element analysis and optimization of the lower control arm of automotive rear suspension[J]. Internal Combustion Engine & Parts, 2020(3): 31-33.
- [2] 梁国栋, 程乐. 某前悬架下摆臂疲劳失效分析与优化[J]. 机械设计与制造, 2022(3): 292-295.
LIANG G D, CHENG L. Fatigue failure analysis and optimization of a front suspension lower arm[J]. Machinery Design & Manufacture, 2020(3): 292-295.
- [3] 徐峰. 麦弗逊悬架下摆臂拓扑优化设计[J]. 内燃机与配件, 2023(24): 59-61.
XU F. Topological optimization design of mcpherson suspension hem arm[J]. Internal Combustion Engine & Parts, 2023(24): 59-61.
- [4] SONG X G, JUNG J H, SON H J, et al. Metamodel-based optimization of a control arm considering strength and durability performance[J]. Computers & Mathematics with Applications, 2010, 60(4): 976-980.
- [5] 邹喜红, 苟林林, 傅雷, 等. 全域车悬架下控制臂有限元分析及轻量化设计[J]. 公路交通科技, 2023, 40(12): 227-235.
ZOU X H, GOU L L, FU L, et al. Finite element analysis and lightweight design for lower suspension control arm of all-terrain vehicle[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2023, 40(12): 227-235.
- [6] 胡军, 朱文丰, 许凯乐, 等. 基于模态分析的机床部件夹层结构阻尼参数的特性研究[J]. 机械强度, 2020, 42(3): 580-584.

- HU J, ZHU W F, XU K L, et al. Research on characteristics of damping parameters of sandwich structure of machine tool components based on modal analysis[J]. Journal of Mechanical Strength, 2020, 42(3): 580-584.
- [7] 黄海彬. 基于有限元技术的仪表板综合特性评估及结构轻量化[J]. 工程塑料应用, 2021, 49(8): 123-128.
HUANG H B. Comprehensive characteristic evaluation and structure lightweight of dashboard based on finite element technology[J]. Engineering Plastics Application, 2021, 49(8): 123-128.
- [8] 丁杰. 地铁车辆辅助变流器的噪声仿真及测试[J]. 华东交通大学学报, 2022, 39(1): 99-107.
DING J. Noise simulation and test of auxiliary converter for metro vehicle[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2022, 39(1): 99-107.
- [9] 丁杰, 蒋莉, 徐庆怡. 基于HyperMesh的动车组车体结构强度仿真[J]. 机电工程技术, 2023, 52(7): 268-271.
DING J, JIANG L, XU Q Y. Simulation of structural strength for emu body based on hypermesh[J]. Mechanical & Electrical Engineering Technology, 2023, 52(7): 268-271.
- [10] 刘琼, 杨纪远, 张磊, 等. 基于Hypermesh的空气弹簧成型鼓模态分析[J]. 福建理工大学学报, 2023, 21(6): 544-550.
LIU Q, YANG J Y, ZHANG L, et al. Modal analysis of air spring forming drum based on Hypermesh[J]. Journal of FuJian University of Technology, 2023, 21(6): 544-550.
- [11] 李翔翼. 某轻卡蓄电池支架性能分析与轻量化设计[J]. 机械工程与自动化, 2023(6): 98-100.
LI X Y. Performance analysis and lightweight design of light truck battery bracket[J]. Mechanical Engineering & Automation, 2023(6): 98-100.
- [12] 姜丽红, 吴庆捷. 某前副车架性能分析与轻量化设计[J]. 机械强度, 2020, 42(6): 1503-1508.
JIANG L H, WU Q J. Performance analysis and lightweight design of a front subframe[J]. Journal of Mechanical Strength, 2020, 42(6): 1503-1508.
- [13] 陈佳, 孙丽娟. 基于NASTRAN的某商用轻卡后车门力学性能仿真研究[J]. 汽车实用技术, 2021, 46(10): 87-88.
CHEN J, SUN L J. Simulation study on the mechanical performance of a commercial light truck rear door[J]. Automobile Applied Technology, 2021, 46(10): 87-88.
- [14] 刘克铭, 袁鑫, 戴羽森. 某SUV前副车架强度与疲劳性能仿真与试验研究[J]. 机械强度, 2023, 45(4): 838-844.
LIU K M, YUAN X, DAI R S, et al. Simulation and experimental study on strength and fatigue performance of a suv front subframe[J]. Journal of Mechanical Strength, 2023, 45(4): 838-844.
- [15] 余志武, 黎燕霞, 徐磊, 等. 曲线轨道上高速磁浮列车运动稳定性[J]. 华东交通大学学报, 2023, 40(1): 25-33.
YU Z W, LI Y X, XU L, et al. Motion stability of high-speed maglev train on curved track[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2023, 40(1): 25-33.
- [16] 黄美婷. 基于ADAMS的四轮独立驱动电动汽车悬架分析与优化[J]. 河南工程学院学报(自然科学版), 2024, 36(1): 50-54.
HUANG M T. Suspension analysis and optimization of the four-wheel independent drive electric vehicle based on ADAMS[J]. Journal of Henan University of Engineering(Natural Science Edition), 2024, 36(1): 50-54.
- [17] 石越卿, 秦睿贤, 陈秉智. 列车防撞柱结构耐撞性设计与优化[J]. 机械强度, 2022, 44(5): 1134-1140.
SHI Y Q, QIN R X, CHEN B Z. Crash-worthiness design and optimization for collision post of train[J]. Journal of Mechanical Strength, 2022, 44(5): 1134-1140.
- [18] 王康, 曹永晟, 贺启才, 等. 基于多目标优化的白车身结构轻量化设计[J]. 时代汽车, 2023(22): 151-154.
WANG K, CAO Y S, HE Q C, et al. Lightweight design of body-in-white structure based on multi-objective optimization[J]. Auto Time, 2023(22): 151-154.



通信作者:游永忠(1969—),男,讲师,研究方向为交通运输设备。E-mail:1493779073@qq.com。

(责任编辑:龚凯,李根)