

基于近似模型的城市客车车架轻量化设计研究

王正超¹,赵东伟²,尹怀仙²

(1. 青岛财经职业学院 计算机系,山东 青岛 266100; 2. 青岛大学 机电工程学院,山东 青岛 266071)

摘 要:传统新能源客车车架的设计过于保守,为减轻车架结构自重,减少制造成本,提出一种基于近似模型的城市客车车架轻量化设计方法。以某城市客车车架为研究对象,构建有限元模型,利用 ANSYS 有限元软件对车架最危险的扭转工况进行有限元分析。根据车架有限元分析结果,利用 Isight 软件构建车架的 Kriging 近似模型,对车架的主要承载梁进行尺寸优化设计。优化结果表明,在保证汽车各方面的性能要求下,优化后的车架总质量减轻了 14.2%,强度有所提高。

关键词:车架;有限元;近似模型;轻量化

中图分类号:U469.72;U463.1 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5276(2020)05-0169-03

Research on Integrated Lightweight Design of New Energy Bus Frame

WANG Zhengchao¹, ZHAO Dongwei², YIN Huaixian²

(1. Department of Computer, Qingdao Finance and Economics College, Qingdao 266100, China;

2. School of Mechanical and Electrical Engineering, Qingdao University, Qingdao 266071, China)

Abstract: The design of the traditional frame of new energy bus is too conservative. To reduce the weight of the frame structure and the manufacturing cost, a method for lightweight design of the city bus frame based on the approximate model is proposed. This paper takes the passenger car frame made in China as research object, constructs its finite element model, and uses the ANSYS finite element software to carry out the finite element analysis in the conditions of most dangerous torsion of the frame. According to the finite element analysis results of the frame, the Kriging approximation model of the frame is constructed by Isight software, and the main load beam of the frame is optimized. The optimization results show that on the premise of ensuring the performance of the vehicle, the optimized frame mass is reduced by 14.2% and its strength is improved.

Keywords: frame; finite element; approximate model; lightweight

0 引言

为了应对石油资源枯竭和环境污染的双重压力,国内外各大车企的研发部门、高校以及汽车研究所等大力发展新能源汽车技术^[1]。车架作为新能源汽车的核心零部件之一,它承载连接着汽车的各个零部件。试验表明,汽车的车身质量每减少 10%,能量消耗就随之减少 6%~8%^[2],而汽车的续航能力、转向灵活性等也会有所提高。因此,在满足客车车架有足够强度的前提下对城市客车车架进行轻量化设计是十分必要的^[3-4]。

以国内某款城市客车车架为研究对象,利用 ANSYS 对 CATIA 软件设计的车架模型在最危险的扭转工况下进行有限元静态分析。在保证客车各方面的性能要求下,基于 Isight 软件建立 Kriging 近似模型^[5],以车架的最小质量为优化目标,以车架的最大应力小于屈服极限为约束条件,主要承载梁为设计变量,引入粒子群优化算法对车架进行优化设计,从而达到减轻质量和提高乘坐舒适性的目的,对生产制造汽车车架具有指导意义。

1 客车车架有限元介绍

1.1 有限元模型的建立

城市客车车架材料采用 Q345 钢,屈服极限 $\sigma = 345$ MPa,弹性模量为 210 GPa,密度为 $7\ 850\text{ kg/m}^3$,泊松比为 0.3。根据城市客车骨架的二维图样,利用 CATIA 软件构建含原车架的整车骨架的几何模型并以 IGES 文件储存,导入到 ANSYS 有限元分析软件中,选择四面体网格单元,基本单元尺寸为 5 mm^[6]。划分网格后的车架网格单元单元数为 255 727,节点数为 257 049。车架有限元模型如图 1 所示。

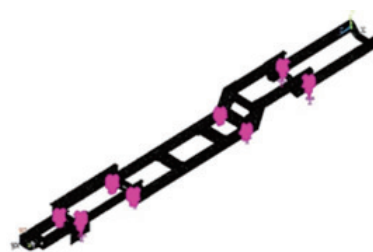


图 1 客车车架有限元模型

基金项目:国家重点研发计划(2015BAG12B01);山东省科技发展计划项目(2014GGX103044)

第一作者简介:王正超(1982—),男,山东胶州人,讲师,硕士,研究方向为机械 CAD/CAM。

1.2 载荷及约束处理

客车车架在扭转工况下所受的载荷主要有:车架自重以及乘员、座椅和其他附属部件,可简化为前、中、后段总成的质量,可视为均布载荷(112 000 N)。车架的前段总成(5 096 N)、中段总成(31 213 N)、后段总成(15 288 N)、电池包(3 000 N)、动力总成(9 212 N)、天然气载荷(3 130 N)等可视为集中力,作用在客车车架相应的支撑点上。

客车车架在扭转工况下所受的约束为:释放车架右后钢板弹簧的所有自由度;约束左后钢板弹簧 UY 、 UZ 方向的自由度;约束左前钢板弹簧的所有自由度;约束右前钢板弹簧 UX 、 UZ 方向的自由度^[7]。

通过前面三维软件建模、网格划分载荷及约束布置完成了有限元模型,对扭转工况进行了有限分析。其最大应力情况如图 2 所示。

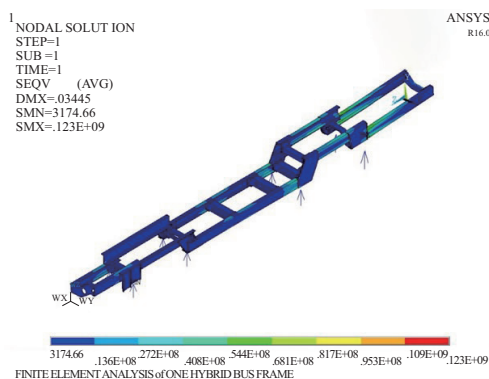


图 2 扭转工况下车架应力云图

由图 2 可知扭转工况下最大应力为 123 MPa,位于后轮架与后端电池包连接位置,安全系数为 2.8。车架的强度满足设计要求,但由于除最大应力外其他部分的应力值基本都在 100 MPa 以下,因此材料性能未能充分发挥,还有很大的提升空间。

2 Kriging 近似模型与优化

由于车架的强度性能未能完全发挥车架材料 Q345 的性能,因此在保证满足强度等性能的要求下,通过软件 Isight 软件引入粒子群寻优算法^[8],增强全局寻优能力,确定最完善的车架模型。目标是最大程度地优化及轻量化,降低车架质量,以节省原材料的消耗,降低产品开发成本和增强汽车的行驶动力性、经济性,以提高市场的竞争力。

2.1 Kriging 近似模型的构建

Kriging 法是基于变异函数理论和结构分析,在规定的区域内对区域化变量取值,并进行无偏、最优估计的一种空间局部内插的方法^[9]。基本表达式为:

$$\hat{y}(x) = p(x) + z(x) \quad (1)$$

式中: $p(x)$ 为最基本的多项式; $z(x)$ 为均值为 0 的随机项,通常取高斯函数作为相关函数。

为实现车架轻量化必须要保证车架强度满足设计要求,

因此以车架所受最大应力和总质量为响应量,选取车架中 9 个板料的厚度为设计变量,如图 3 所示。按照工程常用钢板厚度将 $X_1 \sim X_9$ 的取值范围设定为 $[2 \text{ mm} \sim 20 \text{ mm}]$ 。

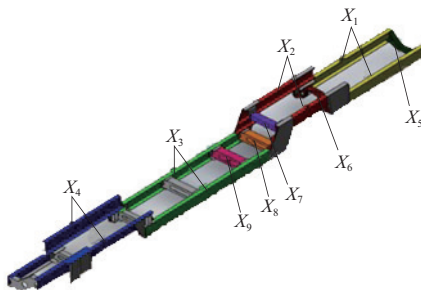


图 3 设计变量的选取

对城市客车车架有限元模型利用 Isight 的 DOE 采样功能采集 200 组样本数据如表 1 所示。

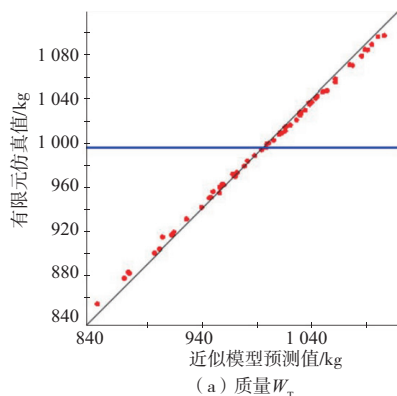
表 1 试验设计数据 单位:mm

序号	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	X_7	X_8	X_9
1	7.00	14.20	7.30	8.02	6.46	4.86	9.41	6.96	5.65
2	7.96	14.04	8.50	6.70	6.12	5.58	8.12	6.44	8.12
3	9.24	13.08	5.98	7.06	8.38	6.06	10.04	8.20	7.27
4	10.68	12.28	7.42	6.94	6.22	4.62	10.52	6.60	6.49
5	8.12	15.00	6.58	6.34	6.94	6.42	11.0	8.85	6.82
6	7.80	13.40	5.74	8.26	5.98	6.36	9.56	5.44	5.45
7	8.44	13.72	7.18	7.54	5.52	6.98	9.88	6.92	7.48
8	8.76	12.92	6.46	7.92	8.26	7.54	7.32	7.72	6.94
:	:	:	:	:	:	:	:	:	:
200	9.56	11.48	7.78	7.66	7.36	7.02	8.28	6.84	7.28

以车架各主要承载梁 $X_1 \sim X_9$ 作为优化输入变量。以车架使用性能相关的参数作为优化输出变量,输出变量包括:质量 W_T 和应力 S_{MX} 。

在试验设计的基础上采用 Kriging 近似模型作为优化模型。其中要求质量 W_T 和应力 S_{MX} 近似模型的不确定性系数 $R^2 > 0.9$,响应的拟合效果图如图 4 所示。

图 4 中对角线代表了真实的适应度,残差为 0。图中纵坐标为有限元分析得到的仿真计算值,横坐标为同一样本点通过所构建的近似模型下预测的响应值。采集的样本点落在对角线或者其附近越多,则证明响应的预测精度



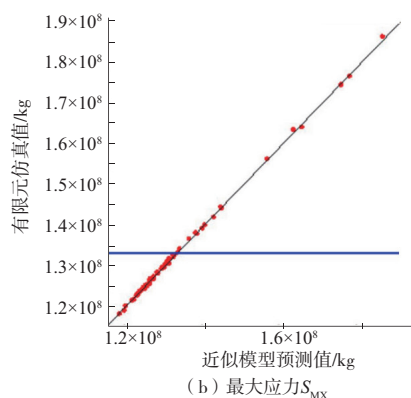


图4 响应的拟合效果图

就越好。图中水平线代表的是输入变量的平均响应值^[10]。近似模型中质量 W_T 的确定性系数 $R^2 = 0.989\ 5$; 应力 S_{MX} 的确定性系数 $R^2 = 0.999\ 38$ 。由上述可知,每一个近似模型的确定性系数 R^2 值均 >0.9 ,即建立的客车车架近似模型预测精度较好,因此客车车架的有限元模型可由该响应面近似模型所代替。

2.2 优化数学模型

以车架的最大应力和变形为约束、质量最小为目标的优化数学模型可定义为:

$$\begin{aligned} & \text{Min } M(X) \\ & \text{s.t. } \Delta r_{\max}(X) \leq 0.06 \\ & \lambda \sigma_{\max}(X) \leq \sigma_s = 3.45 \times 10^8 \\ & X_{\min} \leq X \leq X_{\max} \end{aligned} \quad (2)$$

式中: $M(X)$ 为客车车架的总质量;客车车架的刚度变形 $\Delta r_{\max}(X)$ 最大值为 0.06 m ; X 为设计变量的可行域, $X = [X_1, X_2, X_3, X_4, X_5, X_6, X_7, X_8, X_9]$, $X_{\min}$ 和 $X_{\max}$ 分别为设计变量的最小和最大极限; $\lambda = 1.5$ 为强度安全系数; $\sigma_{\max}$ 为车架受到的最大应力; $\sigma_s = 345\text{ MPa}$ 为材料的屈服强度。

经 Isight 建立 Kriging 近似模型框图,使用粒子寻优算法经过 139 次迭代后,目标函数的迭代寻优历程如图 5 所示,灰色点代表不可行解(违反设计约束的),黑色点代表可行解,空心点代表最优解。优化后车架的总质量为 848 kg ,比优化前的总质量 989 kg 减轻了 14.2% 。车架各零件厚度最优解如表 2 所示。

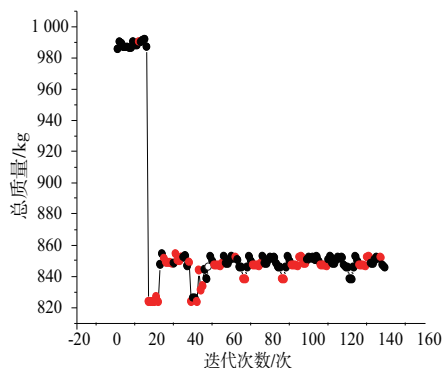


图5 目标函数迭代寻优历程

表2 优化前后各设计变量数值对比

变量	初始解/mm	最优解/mm	变化量/%
X_1	9	7.5	-16.7
X_2	13	8.0	-38.4
X_3	7	5.8	-17.1
X_4	7	8.0	+14.2
X_5	7	6.0	-14.2
X_6	6	8.6	+43.3
X_7	9	5.5	-38.9
X_8	7	5.0	-28.5
X_9	7	6.4	-8.5

确定优化方案后,将各梁的厚度再次带入有限元模型中,Q345 材料属性不变,对改进后的车架模型强度进行校核,如图 6 所示。最大弯曲应力为 187 MPa ,小于安全系数为 1.5 时的 Q345 的许用应力值 230 MPa ,满足强度要求。

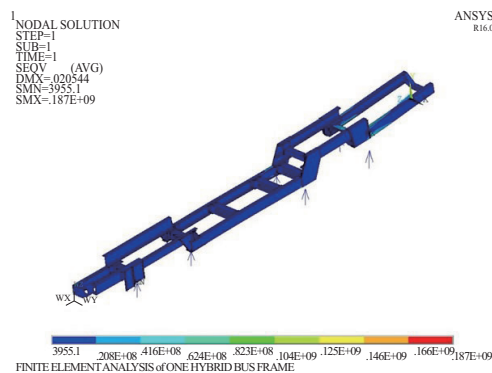


图6 优化后扭转工况应力云图

3 结语

1) 构建纯城市客车车架的有限元模型,运用 ANSYS 对车架模型进行有限元静强度分析,对纯电动汽车车架有限元分析有一定的参考意义。

2) 通过 Isight 软件建立车架优化设计 Kriging 近似模型,精度符合要求后,对此近似模型主要承载梁的厚度进行合理的优化设计。与优化前车架相比,优化后的车架虽然应力有所增大,安全系数有所减小,但是都在合理范围内。最终车架减轻 14.2% ,优化目标得以实现。

参考文献:

- [1] 姚成,朱铭.全承载式客车车身结构设计[J].客车技术与研究,2008,30(2):13-16.
- [2] 辛天佐.轻量化 LNG 罐车的强度分析与疲劳研究[D].南京:南京理工大学,2012.
- [3] 朱剑峰,林逸,史国宏.实验设计与近似模型结合下的副车架结构轻量化优化[J].汽车工程,2015,37(2):247-251.

(下转第 187 页)

其纵向控制表达式如下:

$$\delta_e = K_e \left[K_{\theta}(\theta - \theta_g) + \int K_{\dot{\theta}}(\dot{\theta} - \dot{\theta}_g) dt + K_{q1}q \right] \quad (17)$$

$$\delta_{al} = K_{al} \left[K_{\theta}(\theta - \theta_g) + \int K_{\dot{\theta}}(\dot{\theta} - \dot{\theta}_g) dt + K_{q2}q \right] \quad (18)$$

$$\delta_{ar} = K_{ar} \left[K_{\theta}(\theta - \theta_g) + \int K_{\dot{\theta}}(\dot{\theta} - \dot{\theta}_g) dt + K_{q3}q \right] \quad (19)$$

其选取原则以性能指标 D 达到最优指标为目标。由于横侧向控制优化分配设计与纵向控制原理相同,这里不再赘述。

4 飞控仿真实验

该固定翼无人机在飞行前需要通过仿真实验进行飞行质量评估,保证飞机正式飞行的品质。首先要确定控制器各个 PID 参数值,控制器中各个 PID 系数通过稳定边界法进行确定^[7-8],而气动舵面和左、右推力矢量加权系数的分配则根据上节提供的方法选取。以纵向控制为例,给定俯仰角 $\theta_g = 10^\circ$ 和 $\theta_g = 30^\circ$,分别得出无人机在无推力矢量作用和经过优化分配后推力矢量作用的仿真图如图 6、图 7 所示。

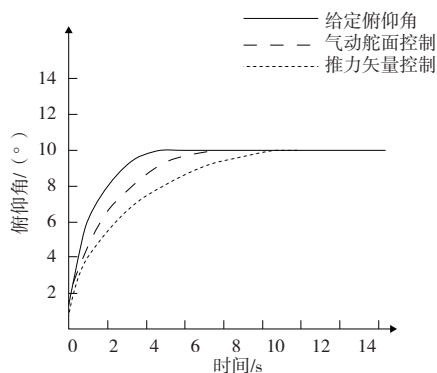


图 6 俯仰角给定为 10° 时响应

由图 6-图 7 对比可以看出:在俯仰角较小情况下,传统气动舵面控制和优化控制分配混合控制响应均无超调,但优化控制分配混合控制响应速度比传统气动舵面控制快很多,动态性能更好;在俯仰角较大情况下,传统气动舵面控制响应时间很长,且存在稳态误差;优化控制分配混合虽然存在超调量,响应速度很快,且无稳态误差。

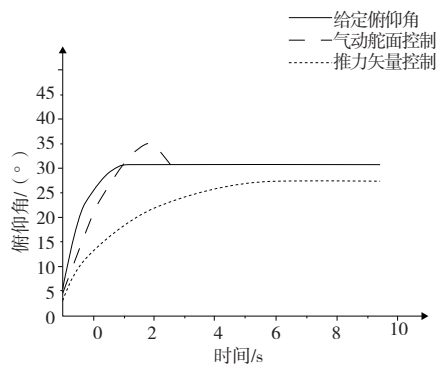


图 7 俯仰角给定为 30° 时响应

5 结语

综上所述,经优化控制分配后的推力矢量无人机与传统气动舵面控制的无人机相比,在姿态角较大和较小时均不存在稳态误差,控制精度大大提高;同时响应速度相比传统气动舵面控制更快,推力矢量无人机的动态性能和稳态性能均有所提高,具有良好的飞行品质,能更好地完成相应的飞行任务。

参考文献:

- [1] 于文妍,杨坤林. 四旋翼无人机的双闭环姿态控制系统[J]. 兰州理工大学学报,2018,44(5):96-101.
- [2] 杨大鹏. 某无人机全包线控制律设计技术研究[D]. 南京:南京航空航天大学,2012.
- [3] 姬猛. 推力不对称时机机飞行控制律重构技术研究[D]. 南京:南京航空航天大学,2011.
- [4] 陈森,薛文超,黄一. 推力矢量飞行器的自抗扰控制设计及控制分配[J]. 控制理论与应用,2018,35(11):1591-1600.
- [5] 王博航,王道波. 矢量推力固定翼无人机控制律设计[J]. 机械与电子,2019,37(4):57-61.
- [6] 肖余培. 无人机推力变向控制及试验[D]. 南京:南京航空航天大学,2017.
- [7] 陈贵银. 直流调速系统稳定边界法 PID 校正的设计与仿真[J]. 武汉船舶职业技术学院学报,2012,11(2):52-54.
- [8] 付爱彬. 稳定边界法 PID 控制器的设计[J]. 太原科技,2007(1):57-58.

收稿日期:2019-07-22

(上接第 171 页)

- [4] 李伟平,陶祺臻,张宝珍. 牵引车架结构强度优化设计与仿真[J]. 现代制造工程,2016(7):67-71.
- [5] 王强,苏小平,鲁宜文. Kriging 近似模型在副车架轻量化设计中的应用试验[J]. 轻工学报,2018,33(2):95-101.
- [6] 李霞,张三川,余红洋. 四座纯电动巡逻车车架有限元分析[J]. 机械设计,2011,28(12):54-58.
- [7] 任可美,戴作强,郑莉莉. 纯电动城市客车底盘车架有限元分析及轻量化设计[J]. 制造业自动化,2017,39(11):70-75.

- [8] 陶祺臻. 基于粒子群算法的车架结构优化及其二次开发[D]. 长沙:湖南大学,2015.
- [9] FORRESTER A I J, KEANE A J. Recent advances in surrogate-based optimization [J]. Progress in Aerospace Sciences, 2009, 45(1):50-79.
- [10] 苏占龙. 基于多目标稳健性优化方法的 SUV 车身结构轻量化设计[D]. 镇江:江苏大学,2015.

收稿日期:2019-06-21