

DOI: 10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2019.06.023

# 基于云模型的多工况城市客车车架优化

付磊<sup>a</sup>,张洪信<sup>a</sup>,赵清海<sup>b</sup>

(青岛大学 a. 机电工程学院; b. 动力集成及储能系统工程技术中心, 山东 青岛 266071)

**摘要:**由于车架在汽车的行驶过程中承受多种载荷,因此在车架优化时需要考虑车辆的实际行驶工况,运用云模型与层次分析法,并结合专家对工况重要性评价指标,得到各工况最优权重系数,进行车架的多工况优化。以某城市客车车身优化为例,通过多工况优化,结果相对于各单工况结果,更接近于实际行驶情况,更具有参考价值。

**关键词:**客车;车架优化;云模型;层次分析法

**中图分类号:**U463.32; O241.82 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5276(2019)06-0090-04

## Optimization of Urban Bus Frames in Multi-Case Based on Cloud Model

FU lei<sup>a</sup>, ZHANG Hongxin<sup>a</sup>, ZHAO Qinghai<sup>b</sup>

(a. Mechanical and Electronic Engineering College, and b. Power Integration and Energy Storage System Engineering Technology Center, Qingdao University, Qingdao 266071, China)

**Abstract:** Because the frame is subjected to various load during the driving process of the car, its optimization needs to consider the actual driving conditions of the vehicle, and the combination of the cloud model and the analytic hierarchy process is used to assemble the important indexes evaluated by experts. The optimal weighting coefficient of each working condition is obtained, and the multi-condition of the frame is optimized. This paper takes the optimization of the bus body in a city as an example and through optimization of multiple working conditions, the results are closer to the actual driving situation and have more reference value than the results of each single working condition.

**Keywords:** bus; frame optimization; cloud Model; analytic hierarchy process

## 0 引言

面对当今社会能源紧缺和环境恶化的形势,在车架结构设计,为了满足各项性能,同时保证节能环保,先进的轻量化设计方法显得尤为重要。马迅<sup>[1]</sup>等通过有限元与灵敏度结合的方法对车架进行优化,提高了优化的效率与准确性,但并没有考虑到多工况的实际情况;范文杰<sup>[2]</sup>等在车架多刚度拓扑中把弯曲和扭转工况视为等同重要,分别取 0.5,这样虽考虑到了多工况但相比于实际情况有一点偏差。本文将汽车行驶各个工况通过云模型改进的层次分析法,结合专家决策意见,最终得到更接近于实际情况的各工况权重值并进行车架优化,使得优化更接近于实际车辆运行情况。

## 1 城市客车车架单工况优化

### 1.1 车架模型

本文研究的城市客车车架由 2 根纵梁和 9 根横梁构成,纵梁均采用 Q235 钢,车架包含 5 种不同的截面尺寸。

车架的三维模型如图 1 所示。



图 1 车架三维简化图

### 1.2 优化目标及约束条件

通过对车架的结构优化实现轻量化的目的。设计目标为车架的总质量,客车在多个工况下对车架钢板弹簧的约束分别为:1)满载弯曲工况:约束车架左前方钢板弹簧的 UX、UY、UZ,右前方、左右后方钢板弹簧的 UZ;2)加速工况:约束车架左前方钢板弹簧的 UX、UY、UZ,右前方、左右后方钢板弹簧的 UZ;3)制动工况:约束车架左右前方钢板弹簧的 UX、UY、UZ,左右后方的 UZ 方向的自由度;4)转弯工况:约束车架左前方钢板弹簧的 UZ,右前方钢板弹簧的 UX、UY、UZ,约束车架右后方的 UY、UZ 方向的自由度。

**基金项目:**国家自然科学基金项目(51575286);山东省自然科学基金项目(2014ZRB01503,ZR2016EEB20)

**作者简介:**付磊(1992—),男,山东泰安人,硕士研究生,主要研究方向为车辆新型动力传动技术。

### 1.3 单工况车架优化

对于复杂的多目标、多工况优化,设计变量的数目通常太多,计算量太大,优化需要大量的时间。对于客车的车架而言,与车架质量性能有关的尺寸结构参数有上百个,需找出对设计目标和输出响应影响较大的设计变量<sup>[3]</sup>。本文的主要设计目标是在保证车架足够的强度、刚度的条件下<sup>[4]</sup>,尽可能减轻车架的质量,实现客车的轻量化设计。综上所述,通过实验设计筛选出 15 个变量作为车架优化设计变量,如图 2,详细数据见表 1。

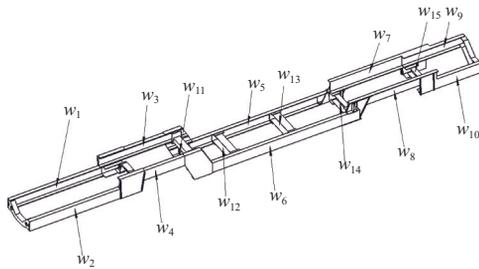


图 2 车架结构尺寸模型

表 1 车架初始设计变量及取值范围 单位:mm

变量	名称	初始值	下限值	上限值
$w_1$	第一右纵梁	9	3	20
$w_2$	第一左纵梁	9	3	20
$w_3$	第二右纵梁	13	5	20
$w_4$	第二左纵梁	13	5	20
$w_5$	第三右纵梁	7	2	20
$w_6$	第三左纵梁	7	2	20
$w_7$	第四右纵梁	7	2	20
$w_8$	第四左纵梁	7	2	20
$w_9$	第五右纵梁	7	2	20
$w_{10}$	第五左纵梁	7	2	20
$w_{11}$	第三横梁	7	2	20
$w_{12}$	第四横梁	7	2	20
$w_{13}$	第五横梁	7	2	20
$w_{14}$	第六横梁	7	2	20
$w_{15}$	第七横梁	7	2	20

把车架的主要尺寸变量为优化设计变量,将车架受到的最大应力和变形作为确定性优化的约束条件,优化目标函数为车架的总质量最小,对车架进行确定性优化设计。

$$\begin{aligned} & \text{Min} M(X) \\ \text{s.t. } & \Delta r_{\max}(X) \leq 0.06 \\ & \lambda \sigma_{\max}(X) \leq \sigma_s = 3.45 \times 10^8 \\ & X_{\min} \leq X \leq X_{\max} \end{aligned} \quad (1)$$

式中,目标函数为客车车架的总质量  $M(X)$ ,  $X$  为设计变量的可行域,  $X = [w_1, w_2, w_3, w_4, w_5, w_6, w_7, w_8, w_9, w_{10}, w_{11}, w_{12}, w_{13}, w_{14}, w_{15}]$ 。约束条件包括强度、刚度

约束,其中  $\lambda$  为强度安全系数,本文中  $\lambda = 1.38$ ;  $\sigma_{\max}$  为车架受到的最大应力,  $\sigma_s = 345 \text{ MPa}$  为材料的屈服强度;客车车架的刚度变形  $\Delta r_{\max}(X)$  最大值为  $0.06 \text{ m}$ 。

采用广义梯度下降算法,分别对客车车架的满载弯曲、加速、制动、转弯 4 种工况进行结构尺寸优化。

1) 满载弯曲工况:车架总质量的优化历程如图 3 所示。经过 135 次优化迭代,确定性优化后的车架总质量为  $829 \text{ kg}$ ,比原来的车架总质量  $989 \text{ kg}$  减轻了  $160 \text{ kg}$ ,减幅达  $16.18\%$ 。

2) 加速工况:车架总质量的优化历程如图 4 所示。经过 117 次优化迭代,确定性优化后的车架总质量为  $851 \text{ kg}$ ,比原车架总质量减轻了  $138 \text{ kg}$ ,减幅达  $13.95\%$ 。

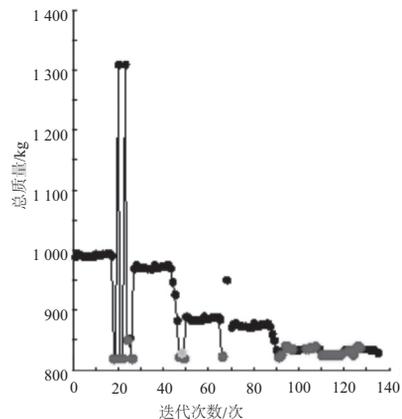


图 3 满载弯曲工况车架总质量变化

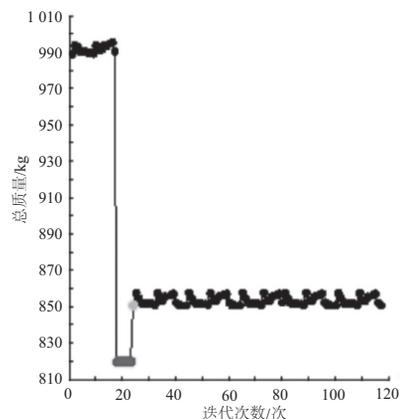


图 4 加速工况车架总质量变化

3) 制动工况:车架总质量的优化历程如图 5 所示。经过 56 次优化迭代,确定性优化后的车架总质量为  $629 \text{ kg}$ ,比原车架总质量减轻了  $364 \text{ kg}$ ,减幅达  $36.80\%$ 。

4) 转弯工况:车架总质量的优化历程如图 6 所示。经过 116 次优化迭代,确定性优化后的车架总质量为  $825 \text{ kg}$ ,比原车架总质量减轻了  $164 \text{ kg}$ ,减幅达  $16.58\%$ 。

## 2 基于云模型考虑多工况车架结构轻量化设计

云模型<sup>[5]</sup>是由李德毅院士首先提出,云是可以将某个自然语言形容的定性概念和其数值不确定的表示实现相互转换的模型。其基本概念为:设  $U$  为一个用精确数值表示

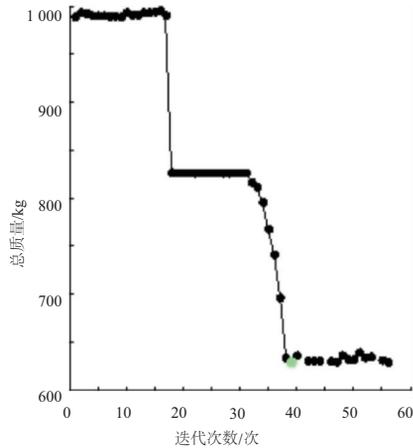


图5 制动工况车架总质量变化

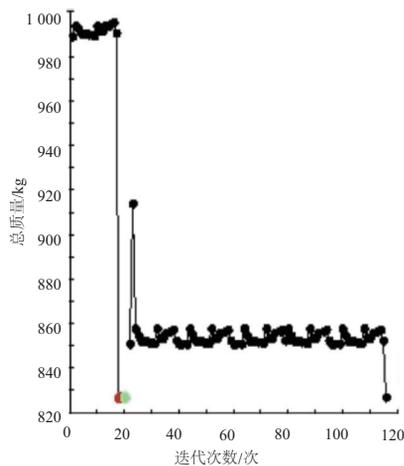


图6 转弯工况车架总质量变化

的定量论域,  $C$  是  $U$  上的定性概念, 若定量值  $x \in U$ , 且  $x$  是定性概念  $C$  的一次随机实现,  $x$  对  $C$  的确定度  $\mu: U \rightarrow [0, 1], \forall x \in U, x \rightarrow \mu(x)$ , 则  $x$  在论域  $U$  上的分布成为云, 每一个  $x$  称为一个云滴。正态云具有较为普遍的适用性<sup>[6]</sup>, 本文采用正态云。云的数字特征期望用  $Ex$ 、熵  $En$ 、超熵  $He_3$  个特征来表示, 其中期望  $Ex$  为概念论域的中心, 熵  $En$  为定性概念不确定的度量, 超熵  $He$  是熵的不确定度。

### 2.1 云模型改进层次分析法

#### 1) 构建重要性标度云模型<sup>[7]</sup>

本文利用 1~5 个标度法来构建传统层次分析法的判断矩阵, 其定义如表 2 所示。

表 2 专家评判重要性标度定义

标度	含义
1	两个要素相比, 居于同等重要
3	两个要素相比, 前者比后者稍重要
5	两个要素相比, 前者比后者明显重要
2,4	上述相邻判断的中间值
倒数	两要素相比, 后者比前者重要性标度

通过两两比较工况间的相对重要度, 进而构建判断矩

阵, 即:

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & a_{ij} & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \cdots & a_{nn} \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中:  $n$  为工况总数;  $a_{ij}$  表示第  $i$  工况对第  $j$  工况的相对重要度。

本文利用 5 个标度的云模型来表示上面的决策矩阵, 分别为  $A_0(Ex_0, En_0, He_0), A_1(Ex_1, En_1, He_1), A_2(Ex_2, En_2, He_2), A_3(Ex_3, En_3, He_3), A_4(Ex_4, En_4, He_4)$ , 其中期望  $Ex_0, Ex_1, Ex_2, Ex_3, Ex_4$  分别等于重要标度 1, 2, 3, 4, 5, 以黄金分割比例 0.618 和 0.382 设定相邻标度的比例关系, 得到  $En_0 = En_2 = En_4 = 0.437, En_1 = En_3 = 0.707, He_0 = He_2 = He_4 = 0.073, He_1 = He_3 = 0.118$ 。

#### 2) 集中专家意见得到判断矩阵

通过步骤 1) 得到重要性比较模型后, 本文采用 5 位权重相同的专家对工况的重要程度进行两两比较, 在得到比较的云模型之后, 通过生成浮动云集结的方法进行偏好集结: 在论域  $U$  中有两朵相邻的基云, 它们之间可以形成一朵浮动的云来表达中间的空白语言值, 浮动云移动的方向代表了受此方向基云的影响在逐渐增大, 受相反方向的影响在逐渐减小。若浮动云的数字特征为  $A(Ex, En, He)$ , 相邻基云为  $A_1(Ex_1, En_1, He_1), A_2(Ex_2, En_2, He_2)$ , 则:

$$Ex = \theta_1 Ex_1 + \theta_2 Ex_2 \quad (3)$$

$$En = \frac{En_1(Ex_2 - Ex) + En_2(Ex - Ex_1)}{Ex_2 - Ex_1} \quad (4)$$

$$He = \frac{He_1(Ex_2 - Ex) + He_2(Ex - Ex_1)}{Ex_2 - Ex_1} \quad (5)$$

其中  $\theta_i (i=1, 2)$  为可调节的系数, 由专家根据情况给定。

若有  $n$  朵相邻的基云  $A_1(Ex_1, En_1, He_1), A_2(Ex_2, En_2, He_2), \dots, A_n(Ex_n, En_n, He_n)$ , 浮动云为  $A(Ex, En, He)$ ,  $A$  受到上述基云的整体影响:

$$Ex = \theta_1 Ex_1 + \theta_2 Ex_2 + \dots + \theta_n Ex_n \quad (6)$$

$$En = \frac{\theta_1 En_1 Ex_1 + \theta_2 En_2 Ex_2 + \dots + \theta_n En_n Ex_n}{\theta_1 Ex_1 + \theta_2 Ex_2 + \dots + \theta_n Ex_n} \quad (7)$$

$$He = \sqrt{He_1^2 + He_2^2 + \dots + He_n^2} \quad (8)$$

其中  $\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_n$  为可调节的权重值。

通过集结所有两两要素重要性比较后得到如下判断矩阵:

$$C_{max} = \begin{bmatrix} C_{11}(Ex_{11}, En_{11}, He_{11}) & C_{12}(Ex_{12}, En_{12}, He_{12}) & \cdots & C_{1n}(Ex_{1n}, En_{1n}, He_{1n}) \\ C_{21}(Ex_{21}, En_{21}, He_{21}) & \cdots & \cdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ C_{n1}(Ex_{n1}, En_{n1}, He_{n1}) & \cdots & \cdots & C_{nn}(Ex_{nn}, En_{nn}, He_{nn}) \end{bmatrix} \quad (9)$$

然后对权重中云模型的期望值进行一致性检验:

$$\lambda_{max} \approx \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{\sum_{j=1}^n Ex_{ij} W_j}{W_i} \quad (10)$$

$$CI = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1} \quad (11)$$

通过方根法结合云模型乘法,根据式(12)-式(14)得到权重向量  $w_i^0(Ex_i^0, En_i^0, He_i^0)$ 。

$$Ex_i^0 = \frac{Ex_i}{\sum Ex_i} = \frac{\left(\prod_{j=1}^n Ex_{ij}\right)^{\frac{1}{n}}}{\sum_{i=1}^n \left(\prod_{j=1}^n Ex_{ij}\right)^{\frac{1}{n}}} \quad (12)$$

$$En_i^0 = \frac{En_i}{\sum En_i} = \frac{\left[\left(\prod_{j=1}^n Ex_{ij}\right) \sqrt{\sum_{j=1}^n \left(\frac{En_{ij}}{Ex_{ij}}\right)^2}\right]^{\frac{1}{n}}}{\sum_{i=1}^n \left[\left(\prod_{j=1}^n Ex_{ij}\right) \sqrt{\sum_{j=1}^n \left(\frac{En_{ij}}{Ex_{ij}}\right)^2}\right]^{\frac{1}{n}}} \quad (13)$$

$$He_i^0 = \frac{He_i}{\sum He_i} = \frac{\left[\left(\prod_{j=1}^n Ex_{ij}\right) \sqrt{\sum_{j=1}^n \left(\frac{He_{ij}}{Ex_{ij}}\right)^2}\right]^{\frac{1}{n}}}{\sum_{i=1}^n \left[\left(\prod_{j=1}^n Ex_{ij}\right) \sqrt{\sum_{j=1}^n \left(\frac{He_{ij}}{Ex_{ij}}\right)^2}\right]^{\frac{1}{n}}} \quad (14)$$

## 2.2 结合云模型车架多工况优化

为了全面考虑城市客车的4种工况,对车架进行多工况设计以便更接近于实际情况,对加速  $B_1$ 、满载弯曲  $B_2$ 、制动  $B_3$ 、转弯  $B_4$  4个指标采用2.1节1)的方法,3位等权重专家采用云模型对两两指标进行重要性判断,然后对群体判断进行浮动云集结,得到判断矩阵。由于篇幅限制仅以指标  $B_1$  与  $B_2$  重要性比较浮动云集结为例。群体专家给出判断( $P_i$ 表示专家): $P_1$ 为稍微重要,云模型(3,0.707,0.118); $P_2$ 为稍微重要与同等之间,云模型(2,0.437,0.073); $P_3$ 为同等,云模型(1,0,0),经过2.1节2)的方法进行集结得到重要性比较模型为(2,0.317,0.052),最终获得判断矩阵,见表3。

表3 各工况指标判断矩阵

	$B_1$	$B_2$	$B_3$	$B_4$
$B_1$	(1,0,0)	(2,0.42,0.007)	(4,0.042,0.007)	(4.67,0.015,0.002)
$B_2$	(0.5,0.317,0.052)	(1,0,0)	(2.33,0.017,0.003)	(3.67,0.015,0.002)
$B_3$	(0.25,0.256,0.043)	(0.429,0.015,0.002)	(1,0,0)	(1.67,0.518,0.086)
$B_4$	(0.214,0.403,0.058)	(0.272,0.682,0.098)	(0.6,0.0117,0.003)	(1,0,0)

对期望进行一致性检验,得到  $CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n-1} = \frac{4.022 - 4}{4-1} = 0.0075, CR = \frac{CI}{RI} = \frac{0.0075}{0.89} \approx 0.008 < 0.1$ ,所以判断矩阵满足一致性。

根据公式(12)-式(14)可以得到  $B_1, B_2, B_3, B_4$ 的权重值:

$$W = \begin{bmatrix} (0.551, 0.510, 0.431) \\ (0.319, 0.017, 0.002) \\ (0.038, 0.201, 0.200) \\ (0.092, 0.282, 0.367) \end{bmatrix}$$

将各工况优化后的尺寸统计带入公式  $X = \lambda_1 X_1 + \lambda_2 X_2 + \lambda_3 X_3 + \lambda_4 X_4$ ,可以得到多工况下各尺寸,见表4。

表4 各工况下各尺寸

设计变量	加速	满载弯曲	制动	转弯	全工况	圆整值
$x_1$	0.008 5	0.007	0.003	0.003	0.007 307	0.007
$x_2$	0.007	0.009	0.003	0.003	0.007 118	0.007
$x_3$	0.013	0.013	0.005	0.013	0.012 696	0.013
$x_4$	0.013	0.013	0.005	0.013	0.012 696	0.013
$x_5$	0.007	0.005	0.005	0.007	0.006 286	0.006
$x_6$	0.007	0.007	0.005	0.007	0.006 924	0.007
$x_7$	0.002	0.007	0.002	0.002	0.003 595	0.004
$x_8$	0.002	0.007	0.002	0.002	0.003 595	0.004
$x_9$	0.007	0.008	0.002	0.007	0.007 129	0.007
$x_{10}$	0.003 3	0.007	0.002	0.002	0.004 311	0.004
$x_{11}$	0.007	0.007	0.002	0.007	0.006 81	0.009
$x_{12}$	0.007	0.007	0.002	0.007	0.006 81	0.007
$x_{13}$	0.007	0.002	0.002	0.007	0.005 215	0.005
$x_{14}$	0.007	0.002	0.002	0.007	0.005 215	0.005
$x_{15}$	0.007	0.007	0.002	0.007	0.006 81	0.007
$x_{16}$	0.004 8	0.005	0.002	0.0032	0.004 61	0.005

经过多工况加权优化后,车架总质量为866kg,相比原车架减轻了123kg,减幅达到12.4%,减重效果明显,对比于单工况,这种多工况更接近于实际运行情况,有更好的参考意义。

## 3 结语

由于车架在汽车的行驶过程中受到多种载荷工况,在车架优化需要考虑车辆实际的行驶工况是非常有必要的。通过云模型和层次分析法相结合,可以有效降低专家评判的主观性,使得各工况的权重系数更加客观和接近实际行驶情况,对于车架优化有重要参考意义。

### 参考文献:

- [1] 马迅,过学迅,赵幼平,等.基于有限元法的结构优化与灵敏度分析[J].机械科学与技术,2002(4):558-561.
- [2] 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(6):531-533.
- [3] 张国芬,张文明,孙玉亮,等.SGA92150型半挂车车架的结构设计与强度和刚度分析[J].北京科技大学学报,2007,29(7):744-749.
- [4] 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.
- [5] 刘常显,李德毅,杜鹤,等.正态云模型的统计分析[J].信息与控制,2005(2):236-239,248.
- [6] 李德毅,刘常显.论正态云模型的普适性[J].中国工程科学,2004(8):28-34.
- [7] 王洪利,冯玉强.基于云模型标度判断矩阵的改进层次分析法[J].中国管理科学,2005(Z1):32-37.

收稿日期:2018-09-14