

DOI: 10.7652/xjtuxb201508017

采用遗传算法的复合材料板簧多目标优化方法

柯俊¹, 史文库¹, 钱琛¹, 袁可², 李国民³

(1. 吉林大学汽车仿真与控制国家重点实验室, 130022, 长春; 2. 南京汽车集团有限公司, 210028, 南京;
3. 宁波华翔汽车零部件研发有限公司, 315033, 浙江宁波)

摘要: 为了使某客车复合材料板簧的性能达到最优,提出了一种针对复合材料板簧的多目标优化方法。综合应用遗传算法中的权重系数变换法和混合法,调用编写的复合材料板簧各项性能的 Matlab 计算程序,采用 Matlab 遗传算法工具箱建立了以铺层参数为设计变量,以复合材料板簧的刚度、强度和质量为子目标的多目标优化模型。优化结果表明,簧身的宽度应取最大值,从长度渐变铺层区域末端到中部凸起结构的簧身厚度应以抛物线规律增加。对优化得到的设计方案进行样件试制和台架试验。试验结果表明,优化得到的复合材料板簧质量为钢板弹簧的 40%,疲劳寿命是钢板弹簧的 3 倍,同时也满足整车对板簧刚度和强度的要求。

关键词: 客车;板簧;复合材料;遗传算法;多目标优化

中图分类号: U463.33+4.6 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2015)08-0102-07

A Multi-Objective Optimization for Composite Leaf Springs Using Genetic Algorithms

KE Jun¹, SHI Wenku¹, QIAN Chen¹, YUAN Ke², LI Guomin³

(1. State Key Laboratory of Automotive Simulation and Control, Jilin University, Changchun 130022, China;
2. Nanjing Automobile Group Co., Ltd., 210028, Nanjing 210028, China; 3. Ningbo Huaxiang Automotive Research and Development Co., Ltd., Ningbo, Zhejiang 315033, China)

Abstract: A multi-objective optimization method for the composite leaf spring of a type of buses is described to optimize the performance of the composite leaf spring. A multi-objective optimization model is established in the genetic algorithm toolbox of Matlab software by using the weighting coefficient transformation method and the hybrid method in genetic algorithms. The variables of the model are parameters of the layer scheme and the stiffness, the strength ratio and the mass of the composite leaf spring are sub-goals of the model. A Matlab program is coded to calculate the performance of the composite leaf spring. The results show that the width of the composite leaf spring should be maximized and the thickness of the composite leaf spring parabolically increases from the end of the layer region with gradient length towards the bump structure. The prototypes of the optimal design scheme are manufactured and a bench test is performed. The test results show that the mass and the fatigue life of the composite leaf spring are 40% and three times of those of the steel leaf spring, respectively. Moreover, the stiffness and the strength of the composite leaf spring also meet the requirements of this type of buses.

Keywords: bus; leaf spring; composite material; genetic algorithm; multi-objective optimization

收稿日期: 2014-12-13。 作者简介: 柯俊(1989—),男,博士生;史文库(通信作者),男,教授,博士生导师。 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51205158);中国博士后科学基金面上资助项目(2013M541294);吉林省重大科技专项基金资助项目(212E362415);吉林大学研究生创新基金资助项目(450060503159)。

网络出版时间: 2015-05-15

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20150515.1747.006.html>

近年来,随着能源短缺与环境危机的日益严重,汽车轻量化成为了必然的趋势。基于以塑代钢概念的复合材料板簧具有明显的轻量化优势,对汽车的节能减排性能和舒适性都有明显的改善作用,市场前景广阔。因此,复合材料板簧的正向设计技术已成为国内外学者竞相研究的热点领域^[1-3]。目前,国外已有学者对复合材料板簧的优化设计^[4-5]、疲劳寿命预测^[6]及接头的可靠性设计^[7]进行了深入研究,但复合材料板簧的优化设计理论还远未成熟。如何设计复合材料板簧的铺层方案,使板簧在满足刚度指标的同时,具有最高的强度和最小的质量,是当前研究的核心问题。然而,复合材料板簧是较厚的层合板结构,设计变量很多,而且复合材料本身具有各向异性,复合材料板簧的刚度、强度等性能与设计变量之间不是简单的函数关系,导致复合材料板簧的优化设计变得更加复杂。

遗传算法是模仿自然界生物进化机制发展起来的随机全局搜索和优化算法,能够可靠地求解非常复杂的问题。传统优化算法是基于单点搜索的,面对复杂问题时往往很难找到全局最优解,而遗传算法是基于并行搜索的,具有较强的全局寻优能力,而且复合材料板簧的优化变量可以很方便地编码成遗传算法求解时所需要的基因,也能够遗传算法中方便地表示可行解,因此遗传算法在复合材料板簧的多目标优化问题上具有良好的适用性。

本文以某客车的复合材料板簧为研究对象,在初步设计其结构和铺层方案的基础上,利用成熟的 Matlab 遗传算法工具箱实现了复合材料板簧的多目标优化,从而可为类似的工程问题提供参考。

1 复合材料板簧的初步设计

复合材料板簧的优化需要一个基本的框架,因此需要对复合材料板簧进行初步的设计。

(1)结构设计。对于簧身结构,相关的优化结果表明,板簧的宽度应该以双曲线形式减少,厚度从卷耳向轴座方向线性增加^[4]。然而,非等宽结构将导致玻璃纤维布裁剪过程中的巨大浪费。综合考虑轻量化效果及生产成本,将复合材料板簧的簧身结构设计成等宽的,同时厚度从卷耳向轴座方向增加,但厚度增加的规律尚需根据优化结果来确定。对于接头结构,根据相关文献^[4]的推荐,在簧身端部钻孔,并利用螺栓来连接金属接头和复合材料簧身。对于中部连接结构,在簧身的上下方设置金属夹板,改善由于 U 型螺栓的夹紧导致的应力集中。在下夹板

中设置与复合材料簧身配合的凹凸面及与板簧安装底座配合的凸起,从而保证板簧纵向载荷的可靠传递及安装时的准确定位。本文设计的复合材料板簧总成结构如图 1 所示。

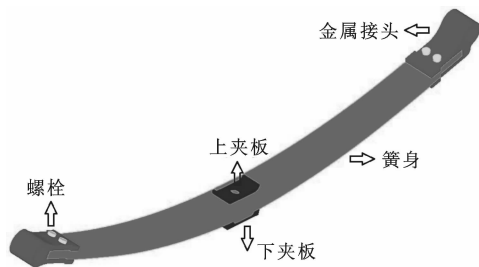


图 1 复合材料板簧的总成结构

(2)铺层设计。初步铺层方案如图 2 所示,其中区域 A 中为等长的长铺层,铺层数量为 22 层。若在该区域增减铺层,可在不影响应力分布的前提下灵敏地调节复合材料板簧的力学性能,因此,将区域 A 中的铺层数量作为优化模型中的设计变量。区域 B 中的铺层长度是渐变的,铺层数量为 21 层。该区域中的铺层长度决定了板簧厚度的变化规律,因此,也将区域 B 中各铺层的长度作为优化模型中的设计变量。区域 C 中的铺层构成了复合材料板簧的中部凸起结构,位于无效长度内;区域 D 中是若干层长铺层,其作用是抑制区域 B 及区域 C 中铺层的剥离破坏。区域 C 及区域 D 的铺层参数对复合材料板簧的力学性能影响不大,在优化模型中作为常量。

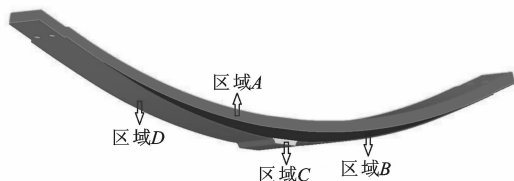


图 2 复合材料板簧的初步铺层方案

2 复合材料板簧性能计算方法简介

关于强度计算,选用比较全面和准确的蔡-吴张量准则来判断单层是否失效。为了定量地描述单层的安全裕度,引进强度比的概念,即单层在应力作用下极限应力的某一分量与其对应的施加应力分量之比,记为 R 。一定载荷下,若所有铺层的最小 $R=1$,说明复合材料板簧刚好能承受该载荷。 R 越高,则复合材料板簧的安全裕度越大,反之越小,从而实现了复合材料板簧强度的定量描述。关于刚度计算,限于篇幅,此问题将在另一篇论文中系统阐述,但相

关的 Matlab 计算程序将在本文的多目标优化算法中调用。关于质量计算,可以根据各铺层体积及复合材料的密度计算得到。根据相关研究^[8-10],铺层角度与板簧纵向呈 0° 时,玻璃纤维高强度、高模量的优势能够得到最充分的发挥,抗蠕变性能和疲劳性能最好。因此,在铺层均为 0° 的前提下,若复合材料板簧的刚度、强度均满足要求,可以认为复合材料板簧的抗蠕变性能和疲劳性能是最优的。

3 多目标优化模型的建立

复合材料板簧多目标优化的实质是在簧身的铺层角度都为 0° 的前提下,优化铺层参数,使复合材料板簧的刚度落在设计范围内的同时,强度最大,质量也最小。根据钢板弹簧的图纸,复合材料板簧的设计刚度为 110 N/mm ,考虑到工程实际,刚度满足 $K=99\sim 121 \text{ N/mm}$ 即可。为了保证优化效果,将刚度优化区间定为 $K=105\sim 115 \text{ N/mm}$ 。此外,板簧的垂向极限载荷为 18.5 kN 。若取较高的安全系数 1.6 ,可将板簧的强度目标定为可承受 30 kN 的载荷而不破坏,这个目标不一定能达到,但希望越接近越好。

对于多目标优化问题的求解,目前最常用的基于遗传算法的求解方法有权重系数变换法、并列选择法、排列选择法、共享函数法和混合法。其中,权重系数变换法可针对性地设置各子目标的权重,从而控制所有子目标的进化顺序,使种群向着所希望的方向进化,在探索问题的具体规律方面有着独特的优势,如果进化方向正确,就能高效率地找到全局最优解。然而,该方法的优化结果与权重设置有关,进化方向的偏差可能会导致全局最优解的遗漏。混合法能够在全局范围内对 Pareto 最优解进行地毯式的搜索,并提供 Pareto 最优解的分布状态和分布趋势,为全局最优解划定存在区域,防止多目标优化陷入局部最优解中。因此,本文综合应用遗传算法中的权重系数变换法和混合法来进行复合材料板簧的多目标优化。

3.1 设计变量的选定、约束条件及基因的设定

针对复合材料板簧铺层方案的特点,需要将区域 A 中的等长铺层数量及区域 B 中各铺层的长度作为设计变量。同时,虽然板簧是等宽的,但宽度值也应该作为一个设计变量来考虑。因此,设计变量为:区域 A 中的铺层数 $N, N \in [22, 26]$;区域 B 中所有 21 个铺层中各个铺层的长度为 L_i ,其中 i 为层数, $L_i \in [105, 1359] \text{ mm}$;板簧的宽度 $b, b \in [60, 70]$

mm 。为满足工程实际的需要,各设计变量均为整数。

在复合材料板簧的多目标优化问题中,本文以特定的铺层方案来对应遗传算法中的特定个体。上述一整套变量可唯一地表示铺层方案的特征并决定了铺层方案的力学性能。因此,设定基因型的串结构数据为双精度浮点数,串结构数据的长度为 26 。其中,区域 A 中等长铺层的存在性变量 4 个,区域 B 中 21 个铺层各层的长度变量 21 个,板簧宽度变量 1 个。

3.2 目标函数

3.2.1 权重系数变换法的目标函数 由于 Matlab 遗传算法工具箱对最优目标的定义为罚函数值越小越优,因此将目标函数定义为

$$F_{\text{obj}} = w_K |K - 110| + \frac{w_R}{1 + AR} + w_m \sum_{i=1}^n l_i b t \rho \quad (1)$$

式中: $|K - 110|$ 是种群个体的刚度属性,表示复合材料板簧的刚度与设计目标值 110 N/mm 之间的差距; w_K 是刚度子目标的权重; R 是种群个体的强度比,由于强度比越大为越优,因此取 R 的倒数,为了提高强度比变化时的灵敏度,在 R 前面乘以一个大于 1 的系数 A ; w_R 是强度比子目标的权重; w_m 是质量子目标的权重; n 是种群个体的铺层总层数; l_i 是种群个体每个铺层的铺层长度; b 是板簧宽度; t 是铺层的厚度; ρ 是复合材料的密度。遗传算法是通过目标函数来评价种群个体适应度的,目标函数值越小,则种群个体的适应度越强。

在复合材料板簧的多目标优化中,有 2 个重要的问题需要解答:①在刚度满足要求的前提下,复合材料板簧的强度最高是多少;若刚度满足了要求,同时强度也达到了最高值,则复合材料板簧的质量最低值是多少,此时厚度的变化规律是什么。②在强度满足要求的前提下,刚度是否能落在设计刚度内;若要达到设定的强度目标,复合材料板簧的质量最低值是多少,此时厚度的变化规律是什么。解决这 2 个问题的意义是可以探索出复合材料板簧的刚度、强度、质量之间的关系以及得到具体的铺层设计方案。

若考虑将进化的优先顺序设置为刚度、强度、质量,则权重系数设置为:

(1)当 $K \notin [105, 115] \text{ N/mm}$ 时, w_K 远大于 w_R 和 w_m 。

(2)当 $K \in [105, 115] \text{ N/mm}$ 时,若 $R < 1$, 则 w_R 远大于 w_K 和 w_m ;若 $R \geq 1$, 则 $w_R > w_K > w_m$ 。

若考虑将进化的优先顺序设置为强度、刚度、质

量,则权重系数设置为:

- (1)当 $R<1$ 时, w_R 远大于 w_K 和 w_m 。
- (2)当 $R\geq 1$ 时,若 $K\notin [105,115]$ N/mm,则 w_K 远大于 w_R 和 w_m ;若 $K\in [105,115]$ N/mm,则 $w_R>w_K>w_m$ 。

若复合材料板簧的强度和刚度不满足要求,即便质量很小也是没有意义的,因此不考虑先优化质量。

3.2.2 混合法的目标函数 建立刚度、强度、质量这 3 个子目标的目标函数,分别为

$$\left. \begin{aligned} F_{obj1} &= |K - 110| \\ F_{obj2} &= \frac{1}{1 + AR} \\ F_{obj3} &= \sum_{i=1}^n l_i b t \rho \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

各子种群分别通过这 3 个子目标函数来评价种群内个体的适应度。

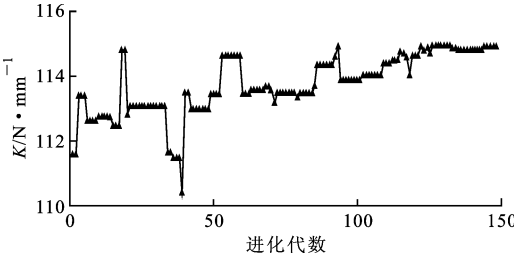
3.3 多目标优化的计算过程

3.3.1 权重系数变换法的计算过程 首先,对输入的复合材料参数、板簧几何参数等基本参数进行处理,由初始铺层编码得到遗传空间的基因型串结构数据。然后,随机产生 150 个初始串结构数据,即 150 个个体,它们组成了初始种群。调用复合材料板簧相关性能的计算程序,根据目标函数评价种群中每个个体的适应度,并对个体的适应度进行排序。将适应度最好的前 1% 个个体保留到下一代种群中,并对剩余个体的 80% 进行交叉操作,其余个体进行变异操作,以产生下一代种群的其他个体。依此类推,当进化停滞 50 代后视为进化结束。

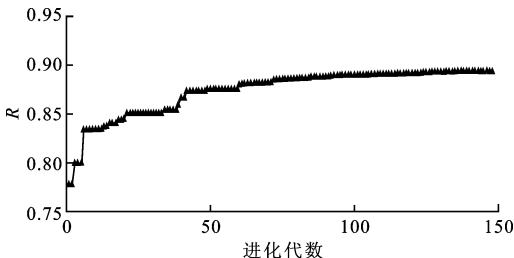
3.3.2 混合法的计算过程 与权重系数变换法不同的是,混合法要将每一代的种群均等地分成 3 个子种群,分别对应刚度子目标、强度子目标和质量子目标。在每个子种群中,分别按照对应的子目标函数进行个体的适应度评价及排序。将每个子种群中适应度最高的前 35% 个个体(即子种群的 Pareto 最优解)选出并计算它们的小生境数。个体 X 的小生境数反映了该个体与其他个体之间的相似程度。为了增加子种群个体的多样性,在每个子种群的 Pareto 最优解集合中,若某些个体之间的相似程度较高,就从这些相似个体中淘汰适应度较低的个体。将经过相似度处理后的 3 个子种群的 Pareto 最优解集合汇总在一起,直接保留到下一代种群中。然后,对 3 个子种群中的剩余个体汇总在一起进行交叉和变异操作,产生下一代种群的剩余个体。以此类推,当进化停滞 50 代后视为进化结束。

4 优化结果及分析

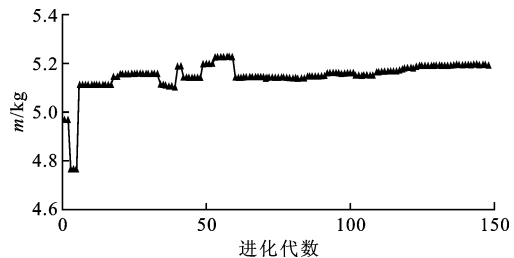
应用权重系数变换法,考虑最先使刚度或强度达到理想值,得到的优化结果分别如图 3、图 4 所示。



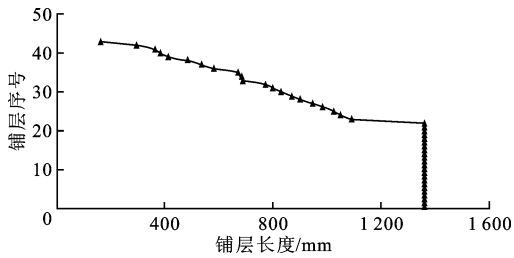
(a) 种群最优个体刚度属性的进化过程



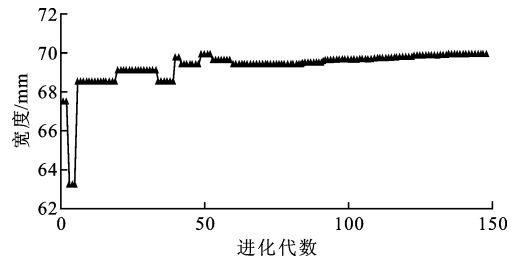
(b) 种群最优个体强度比属性的进化过程



(c) 种群最优个体质量属性的进化过程

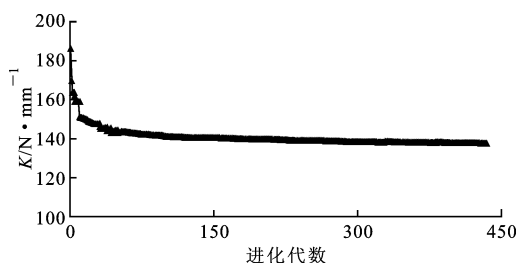


(d) 多目标优化得到的各铺层层长度

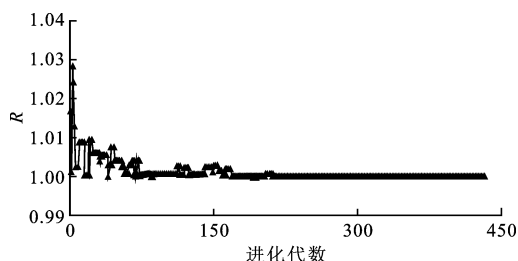


(e) 种群最优个体宽度属性的进化过程

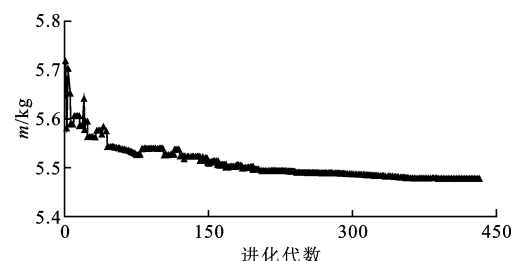
图 3 最先让刚度优化至理想值时基于权重系数变换法的优化结果



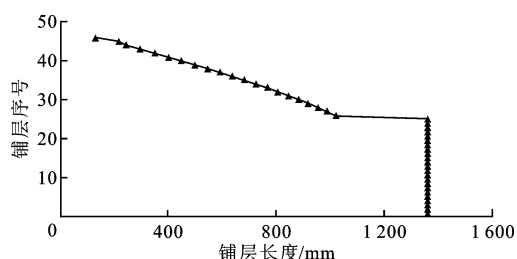
(a) 种群最优个体刚度属性的进化过程



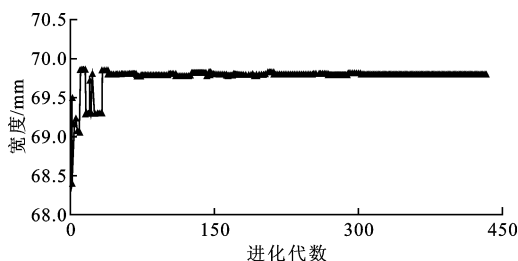
(b) 种群最优个体强度比属性的进化过程



(c) 种群最优个体质量属性的进化过程



(d) 多目标优化得到的各铺层长度



(e) 种群最优个体宽度属性的进化过程

图4 最先让强度优化至理想值时基于权重系数变换法的优化结果

下,强度比最高只能达到 0.895;综合图 4a 和图 4b,强度比下降至 1 的情况下,刚度最低为 138.5 N/mm。这说明,在刚度满足要求的前提下,强度比最多能达到 0.895,即复合材料板簧最多能承受 26 850 N 的载荷而不破坏,安全系数最高为 1.45,可以满足服役的需求。

(2)综合图 3a、图 3b 和图 3c,当刚度满足要求且强度比最大时,质量最小为 5.2 kg。综合图 4b 和图 4c,当强度比接近 1 时,质量最小为 5.5 kg。这说明,要满足刚度的要求,复合材料板簧的质量最低可优化至 5.2 kg,但要使强度比达到 1,复合材料板簧的质量至少为 5.5 kg。

(3)根据图 3d,当刚度满足要求,强度比最大且质量最小时,区域 A 中的铺层数量为 22 层,区域 B 中各铺层构成的下表面轮廓曲线与抛物线近似。根据图 4d,当强度比为 1,刚度为 138.5 N/mm 时,区域 A 中的铺层数量为 25 层,区域 B 中各铺层构成的下表面轮廓曲线与抛物线近似,且更加平滑。这说明,增大区域 A 中的铺层数量及使厚度按抛物线规律变化均对复合材料板簧的强度有利。

(4)综合图 3e 及图 4e,2 次优化中板簧的最优宽度均趋近于 70 mm,这说明增大宽度对复合材料板簧的性能有利。

应用混合法得到的优化结果如图 5 所示。图 5 中,通过混合法得到的 Pareto 最优解在刚度、强度比、质量 3 个方向上的分布范围都比较大,很好地完成了全局范围内 Pareto 最优解的寻找任务。通过混合法得到的 3 个最优的 Pareto 最优解及通过权重系数变换法得到的 2 个 Pareto 最优解的性能对比如表 1 所示。

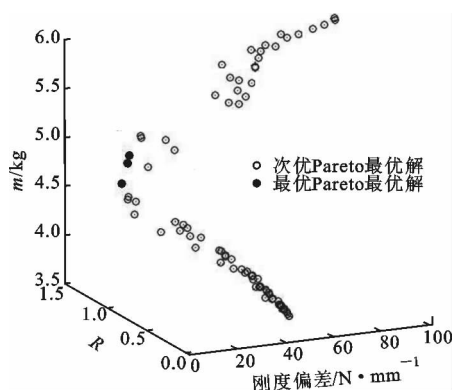


图5 通过混合法得到的 Pareto 最优解

通过图 3 和图 4 可得到以下信息:

(1)综合图 3a 和图 3b,在刚度满足要求的前提

由表 1 可知,方案 1~3 的强度比均低于由权重系数变换法得到的方案 4,这说明由混合法得到的 3

表 1 2 种方法得到的 Pareto 最优解的性能对比

方法	方案	$K/\text{N} \cdot \text{mm}^{-1}$	R	m/kg
混合法	1	110.0	0.704	4.8
	2	112.9	0.725	5.0
	3	114.6	0.749	5.1
权重系数	4	115.0	0.895	5.2
变换法	5	138.5	1.000	5.5

个方案并不是全局最优解,但它们为全局最优解的存在区域圈定了一个较小的范围,即全局最优解的性能参数应该在 3 个方案的性能参数附近。此外,5 个 Pareto 最优解在刚度、强度比、质量这 3 个指标上都随着刚度的提高呈递增趋势。其中,方案 4 的各项性能指标均与方案 1~3 接近,其刚度是 115 N/mm,正好是复合材料板簧刚度的上限,充分挖掘了刚度对强度的提升作用,强度比也达到了最高的 0.895。因此,方案 4 是复合材料板簧的全局最优解。

综上所述,复合材料板簧的最优铺层方案是:区域 A 中的铺层数量为 22 层,区域 B 的外围轮廓按抛物线规律变化,板簧宽度为 70 mm。经过多目标优化后,复合材料板簧的刚度是 115 N/mm,能承受 26 kN 左右的载荷而不破坏,质量为 5.2 kg。

5 验证试验

为了验证复合材料板簧多目标优化的优化效果,采用高压 RTM 工艺对设计方案进行样件试制,并实施台架试验。

综合考虑力学性能及生产成本,采用 E 玻璃纤维和聚氨酯作为复合材料板簧的增强材料及基体材料,采用 40Cr 钢作为复合材料板簧金属零件的制造材料。由于复合材料构件的性能具有一定的随机性,因此采用相同的模具、铺层方案和制造工艺试制了 3 个样件。样件的宽度为 70 mm(为避免簧身与车架吊耳的运动干涉,样件的末端宽度为 59 mm),总成长度为 1 415 mm(压平状态下),自由弧高为 140 mm。区域 A、B、C、D 中的铺层数量分别为 22 层、21 层、10 层及 2 层。试制的样件如图 6 所示。

台架性能试验如图 7 所示,复合材料板簧台架试验的装夹状态及试验方案均与钢板弹簧相同。3 个样件的台架性能试验结果如表 2 所示。

由表 2 可知,3 个复合材料板簧总成样件的刚度均在 118 N/mm 附近,均能承受 25 kN 的载荷而不破坏(由于具有危险性,没有继续加大载荷),簧身的质量均在 5.2 kg 附近。说明复合材料板簧的刚



图 6 复合材料板簧样件



图 7 复合材料板簧的台架试验

表 2 3 个样件的台架试验结果

样件编号	$K/\text{N} \cdot \text{mm}^{-1}$	F_{max}/kN	簧身质量/kg
1	118.13	25	5.21
2	117.78	25	5.19
3	118.06	25	5.20

度与强度均满足服役要求,且样件的刚度、强度与质量均接近多目标优化得到的最优方案。与原有钢板弹簧总成相比,复合材料板簧总成的质量降低了 60%,同时疲劳寿命提高了 3 倍,说明多目标优化得到的设计方案综合性能良好。

6 结 论

本文综合应用遗传算法中的权重系数变换法和混合法,对某客车的复合材料板簧进行了多目标优化,得到的结论如下。

(1)综合考虑成本及性能,复合材料板簧的最优形状是:簧身宽度不变,在安装条件允许的前提下,宽度值越大越好;簧身厚度应沿着从区域 B 末端到中部凸起结构这一方向不断增加,且区域 B 的下表面轮廓曲线近似为抛物线。

(2)对于复合材料板簧的多目标优化问题,遗传算法的权重系数变换法和混合法各有优缺点,综合应用这 2 种方法能够高效率地得到复合材料板簧的最优设计方案。

(3)经过多目标优化,复合材料板簧的刚度和强度均满足服役要求。与钢板弹簧总成相比,复合材

料板簧总成的质量降低了60%,疲劳寿命提高了3倍,性能优势非常显著,说明多目标优化得到的设计方案综合性能良好。

参考文献:

- [1] 吴辉,李再轲,姜其斌. 复合材料板式弹簧的研制及性能[J]. 塑料工业, 2012, 40(8): 103-106.
WU Hui, LI Zaike, JIANG Qibin. Development and characteristics of composite's leaf spring[J]. China Plastics Industry, 2012, 40(8): 103-106.
- [2] SUBRAMANIAN C, SENTHILVELAN S. Short-term flexural creep behavior and model analysis of a glass-fiber-reinforced thermoplastic composite leaf spring[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2011, 120(6): 3679-3686.
- [3] RAJENDRAN I, VIJAYARANGAN S. Design, analysis, fabrication and testing of a composite leaf spring[J]. Mechanical Engineering Division, 2002, 82(3): 180-187.
- [4] SHOKRIEH M M, REZAEI D. Analysis and optimization of a composite leaf spring[J]. Composite Structures, 2003, 60(3): 317-325.
- [5] RAJENDRAN I, VIJAYARANGAN S. Optimal de-

sign of a composite leaf spring using genetic algorithms[J]. Computers & Structures, 2001, 79(11): 1121-1129.

- [6] KUMAR M S, VIJAYARANGAN S. Analytical and experimental studies on fatigue life prediction of steel and composites multi-leaf spring for light passenger vehicles using life data analysis[J]. Materials Science, 2007, 13(2): 141-146.
- [7] SUBRAMANIAN C, SENTHILVELAN S. Joint performance of the glass fiber reinforced polypropylene leaf spring[J]. Composite Structures, 2011, 93(2): 759-766.
- [8] 王耀先. 复合材料力学与结构设计[M]. 上海: 华东理工大学出版社, 2012: 50-67.
- [9] FERREIRA J A M, COSTA J D M, REIS P N B. Static and fatigue behavior of glass-fibre-reinforced polypropylene composites[J]. Theoretical and Applied Fracture Mechanics, 1999, 31(1): 67-74.
- [10] KUEH J J, FARIS T. Finite element analysis on the static and fatigue characteristics of composite multi-leaf spring[J]. Journal of Zhejiang University: A Science, 2012, 13(3): 159-164.

(编辑 刘杨 苗凌)

(上接第74页)

- 279-310.
- [6] HUANG Shengsheng, HUANG Jie, DAI Jinqian, et al. The HiBench benchmark suite: characterization of the MapReduce-based data analysis[C]//Proceedings of the 2010 IEEE 26th International Conference on Data Engineering Workshops. Berlin, Germany: Springer, 2010: 41-51.
- [7] ZAHARIA M, KONWINSKI A, JOSEPH A D, et al. Improving MapReduce performance in heterogeneous environments[C]//Proceedings of the 8th USENIX Conference on Operating Systems Design and Implementation. Berkeley, CA, USA: USENIX, 2008: 29-42.
- [8] KWON Y C, BALAZINSKA M, HOWE B, et al. Skewtune: mitigating skew in MapReduce applications[C]//Proceedings of the 2012 ACM SIGMOD International Conference on Management of Data. New York, USA: ACM, 2012: 25-36.
- [9] RASOOLI A, DOWN D G. A hybrid scheduling approach for scalable heterogeneous Hadoop systems[C]

//Proceedings of the 2012 SC Companion on High Performance Computing, Networking, Storage and Analysis. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2012: 1284-1291.

- [10] TIAN Chao, ZHOU Haojie, HE Yongqiang, et al. A dynamic MapReduce scheduler for heterogeneous workloads[C]//Proceedings of the 2009 8th International Conference on Grid and Cloud Computing. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2009: 218-224.
- [11] LU Peng, LEE Y C, WANG Chen, et al. Workload characteristic oriented scheduler for MapReduce[C]//Proceedings of the 2012 IEEE 18th International Conference on Parallel and Distributed Systems. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2012: 156-163.
- [12] TANG Shanjiang, LEE Bu-Sung, HE Bingsheng. Dynamic slot allocation technique for MapReduce clusters[C]//Proceedings of the 2013 IEEE International Conference on Cluster Computing. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2013: 1-8.

(编辑 武红江)