



## 论 文

## 不同运行环境下高速列车外形气动优化

熊骏, 李田\*, 张继业

西南交通大学牵引动力国家重点实验室, 成都 610031

\* E-mail: litian2008@home.swjtu.edu.cn

收稿日期: 2015-10-04; 接受日期: 2015-12-17; 网络出版日期: 2016-01-27

国家自然科学基金(批准号: 51475394)、高速铁路基础研究联合基金(编号: U1234208)和牵引动力国家重点实验室自主课题(编号: 2016TPL\_T02)资助项目

**摘要** 基于多目标遗传算法 NSGA-II 和近似模型方法, 以明线列车气动阻力和侧风下头车倾覆力矩为优化目标, 对列车三维外形进行气动优化设计。建立了基于 Hicks-Henne 型函数的列车三维参数化模型, 对比分析了不同近似模型对列车气动力计算近似精度的影响。研究了列车头部纵向轮廓线、头部水平轮廓线、车身截面形状、鼻尖形状、排障器形状、头部侧翼形状、列车车身高度以及宽度等外形因素对列车在不同运行环境下气动性能的影响, 得到了影响优化目标的关键变量。优化结果表明: 优化后的列车外形向着头型更尖扁, 横断面积更小, 车身侧壁弧度增加的方向变化; 与原始模型相比较, 优化后明线列车气动阻力最大幅值减小了 17.5%, 侧风下头车侧滚力矩最大幅值减小了 22.9%。

**关键词** 高速列车, 气动, 多目标优化, 近似模型, 多路况

## 1 引言

随着高速铁路的蓬勃发展, 作为高速铁路核心的高速列车技术也取得了飞速的进步, 列车运营速度不断刷新, 与此同时, 各种列车空气动力学问题也愈加突出<sup>[1,2]</sup>。由于列车气动性能与列车外形之间密切的相关性, 高速列车的流线型设计与优化逐渐成为高速列车研究中的重要课题之一<sup>[3]</sup>。传统的列车外形设计方法大多是先依据经验拟定一系列的列车头型方案, 然后通过风洞实验或数值仿真进行比选和改进设计, 该方法一般成本高, 设计周期长, 且往往局限于单一路况条件或外形的局部优化。Kikuchi 等

人<sup>[4]</sup>利用数值计算的方法对特定的几种列车头型进行了气动性能的比选分析; Matsumura 等人<sup>[5]</sup>针对列车过隧道问题, 提供了一种能有效降低列车隧道压力波的列车头部形状; Ku 等人<sup>[6]</sup>讨论了高速列车鼻尖长度对于列车隧道压力波的影响; 张洁等人<sup>[7]</sup>对 3 种不同断面的客车车体进行了抗侧风分析, 得出了侧风下相对较优的车体形状; 孔繁冰等人<sup>[8]</sup>对 CRH380BL 高速列车的风挡、导流罩等局部区域进行了优化分析, 在一定程度上改善了列车整体气动性能; 郑循皓等人<sup>[9]</sup>针对不同列车底部造型分析了高速列车转向架区域的流场分布, 提出了列车转向架区域的气动优化建议。然而, 这些文献所采用的优化方

**引用格式:** 熊骏, 李田, 张继业. 不同运行环境下高速列车外形气动优化. 中国科学: 技术科学, 2016, 46: 313–322  
Xiong J, Li T, Zhang J Y. Shape optimization of high-speed trains under multi running conditions (in Chinese). Sci Sin Tech, 2016, 46: 313–322, doi: 10.1360/N092015-00153

法, 本质上都属于传统的优选法, 而随着列车侧风安全性问题、会车压力波问题、噪声污染问题等空气动力学问题之间的相互影响加剧, 由于难以综合考虑各种气动性能的影响, 这种方法已很难满足行业发展的需求.

近年来, 有许多学者已经开始尝试 CFD 技术与优化算法相结合的方式来进行列车外形的优化设计. Sun 等人<sup>[10]</sup>利用 SCULPTOR 软件的变网格技术, 采用遗传算法 MOGA-II 对 CRH3 型高速列车外形在小变形下对整车阻力的影响进行了分析优化, 归纳出了一些影响列车阻力性能的关键变量. Yao 等人<sup>[11,12]</sup>则通过局部型函数参数化法和自适应非劣分类遗传算法对 CRH380A 型高速列车明线行驶的升、阻力性能进行了多目标优化. 李明等人<sup>[13]</sup>采用 CATIA 软件对列车模型进行参数化, 并通过 Isight 优化软件对优化过程进行集成, 提出了一种参数化驱动的优化设计方法. 于梦阁等人<sup>[14]</sup>基于上述方法对列车侧风下的气动性能进行了优化. 优化算法的引入, 使得寻求列车气动外形最优的愿望有了实现的可能, 然而, 采用优化算法对列车气动外形进行直接的优化设计, 往往仍需要较长的设计周期来进行仿真计算. 不同的列车运行环境会引起不同的气动效应, 相应地也会对列车气动外形产生不同的需求, 这在一定程度上将导致设计时间成本的进一步增加. 如何找到一种既能很好地达成优化目标, 又能在一定程度上节省计算时间的优化设计方法, 就显得尤为重要了. Krajnović<sup>[15]</sup>讨论了近似模型对列车气动特性进行优化的方法, 并采用响应面法优化了列车的横风稳定性, 赵怀瑞<sup>[16]</sup>也采用了近似模型的方法分别讨论了隧道入口缓冲结构和列车阻力性能的优化.

本文基于遗传算法和近似模型相结合的方式, 提出了不同运行环境下列车外形的气动优化设计方法, 并以列车侧风下头车倾覆力矩和列车明线气动阻力为优化目标, 对某型城际动车组的头部流线型、车身断面、鼻尖形状、车高和车宽等气动外形因素进行了优化分析.

## 2 设计方法与流程

### 2.1 多目标优化基本概念

首先介绍多目标优化问题中涉及的一些基本定义<sup>[17,18]</sup>.

#### (1) 定义 1 多目标优化问题的数学模型

多目标优化问题又称为多标准优化问题、多性能优化问题或者多矢量优化问题. 一般说来, 一个具有若干决策变量和若干目标函数的多目标优化问题可以表述为

$$\begin{aligned} \min \quad & f_m(\mathbf{x}), \quad m = 1, 2, \dots, M, \\ \text{s.t.} \quad & g_j(\mathbf{x}) \leq 0, \quad j = 1, 2, \dots, J, \\ & h_k(\mathbf{x}) = 0, \quad k = 1, 2, \dots, K, \\ & x_i^L \leq x_i \leq x_i^U, \quad i = 1, 2, \dots, N, \end{aligned} \quad (1)$$

式中,  $x_i$  表示第  $i$  个设计变量;  $N$  表示设计变量的总数;  $x_i^L$  表示第  $i$  个设计变量取值的下限;  $x_i^U$  表示第  $i$  个设计变量取值的上限;  $P_0$  表示第  $m$  个子目标函数;  $M$  为子目标函数的总数;  $g_j(\mathbf{x})$  表示第  $j$  个不等式约束条件;  $J$  表示不等式约束的总数;  $h_k(\mathbf{x})$  表示第  $k$  个等式约束条件;  $K$  表示等式约束的总数.

#### (2) 定义 2 Pareto 占优

对于向量  $\mathbf{u} = (u_1, u_2, \dots, u_n)$  和  $\mathbf{v} = (v_1, v_2, \dots, v_m)$ , 如果有下列条件成立:

$$\begin{aligned} u_i &\leq v_i, \forall i \in \{1, 2, \dots, m\}, \\ u_i &< v_i, \exists i \in \{1, 2, \dots, m\}, \end{aligned} \quad (2)$$

则称向量  $\mathbf{u}$  对向量  $\mathbf{v}$  Pareto 占优, 表示为  $\mathbf{u} \prec \mathbf{v}$ .

#### (3) 定义 3 Pareto 最优解集和 Pareto 前沿

对于给定的多目标优化问题, Pareto 最优解集  $P$  定义为

$$P = \left\{ \mathbf{x} \in X \mid \text{不存在 } \mathbf{x}' \in X, F(\mathbf{x}') \prec F(\mathbf{x}) \right\}. \quad (3)$$

目标函数集合  $F(P) = \{u = F(\mathbf{x}) \mid \mathbf{x} \in P\}$  称为 Pareto 前沿.

由于在多目标优化问题中, 各优化目标之间往往存在不可兼容性, 也即是说难以出现各优化目标同时达到最优解的情况, 故而多目标优化问题实际就是解决如何在各优化目标间相互协调, 最后尽可能达到相对最优的问题.

## 2.2 优化算法

目前, 多目标优化问题的解决方法主要分为归一化方法和非归一化方法, 加权法即是归一化方法的代表算法之一, 即把多个目标通过加权的方式转化成单一目标, 并通过成熟的单目标优化算法来逼近最优解. 这种方法对 Pareto 前沿的形状很敏感, 往往

往不能处理 Pareto 前沿的凹部。而非归一化方法的代表方法则是多目标遗传算法, 是采用 Pareto 机制直接处理多个目标的优化技术, 这种技术能够使所有解集的前沿与 Pareto 前沿尽量接近, 并尽量均匀覆盖 Pareto 前沿。本文采用多目标遗传算法 NSGA-II 进行多目标优化问题的求解。NSGA-II 采用带有精英策略的非劣排序, 使用简单的拥挤算子, 不需要定义任何的参数来保持种群多样性。在进化过程中, 首先对种群  $P$  进行遗传操作, 得到种群  $Q$ ; 然后将两种群合并后, 进行非劣排序和拥挤距离排序, 形成新的种群  $P$ , 反复进行直到结束。NSGA-II 的具体过程描述如下<sup>[17]</sup>:

- (1) 随机产生初始种群  $P_t$ , 然后对种群进行非劣排序, 每个个体被赋予秩; 再对初始种群执行二元锦标赛选择、交叉和变异, 得到新的种群  $Q_t$ , 令  $t=0$ 。
- (2) 形成新的群体  $P_t = P_t \cup Q_t$ , 对种群  $P_t$  进行非劣排序, 得到非劣前端  $F_1, F_2, \dots$
- (3) 对所有的  $F_i$  按拥挤比较操作  $\prec_n$  进行排序, 并选择其中最好的  $N$  个个体形成种群  $P_{t+1}$ 。
- (4) 对种群  $P_{t+1}$  执行复制、交叉和变异, 形成种群  $Q_{t+1}$ 。
- (5) 如果终止条件成立, 则结束; 否则,  $t=t+1$ , 继续进行第二步。

### 2.3 不同运行环境下列车气动外形优化流程

高速列车气动外形的多目标优化设计主要涉及以下 3 个方面: 列车气动外形的三维参数化, 列车空气动力学的仿真计算以及多目标寻优计算。若考虑不同运行环境下列车外形的气动优化设计, 列车空气动力学仿真过程的计算量将大大增加。为此, 本文引入近似模型的概念, 通过生成近似模型来替代空气动力学仿真计算的过程, 达到缩短设计周期的目的。仿真过程中的建模、网格划分、流场计算等步骤均通过优化软件 Isight 调用 CATIA, ICEM 和 Fluent 等软件来实现<sup>[13]</sup>。不同运行环境下列车外形气动优化设计流程如图 1 所示。

### 3 城际动车组三维参数化模型及优化变量

目前, 国内外高速列车的头部外形均采用基于半个自由落体液滴形状的流线型, 这种流线型的头

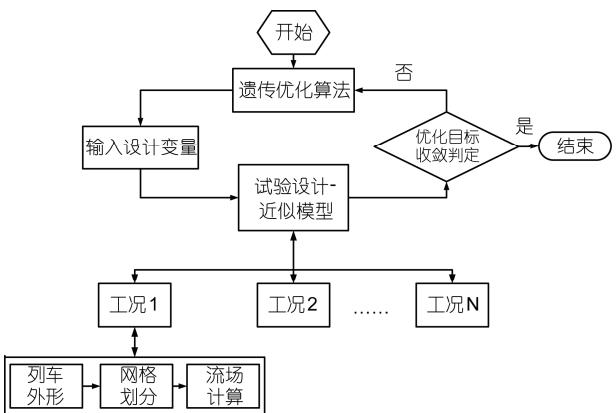


图 1 优化设计流程

部在满足外观需求的同时, 也应满足列车运行的空气动力学性能。所以, 构成列车流线型头部外形的一般都是较为复杂的空间三维自由曲面<sup>[19]</sup>。考虑到列车外形的对称性, 根据某城际动车组外形, 通过 4 条主控制线和 5 条辅助控制线建立了列车 1/2 头部模型, 另一半头型通过对称得到, 完整列车头型及控制线如图 2 所示。其中 C1, C2, C3 和 C4 作为主控制线, 分别对应列车头部纵向轮廓线的上半段、列车头部纵向轮廓线的下半段、车体横向剖面线和水平轮廓线, AC1, AC2, AC3 和 AC4 分别对应鼻尖形状辅助线和水平辅助线, AC5 为侧翼轮廓辅助线。在这些控制线上布置控制点共计 106 个, 并将坐标参数导入 Matlab 自编程序中, 由程序驱动列车模型的生成和变形。

在列车的外形优化设计中, 列车外形控制线选择合适的形状表达式是进行优化的关键之一。列车外形控制线的表达式一般可以采用多项式或解析函

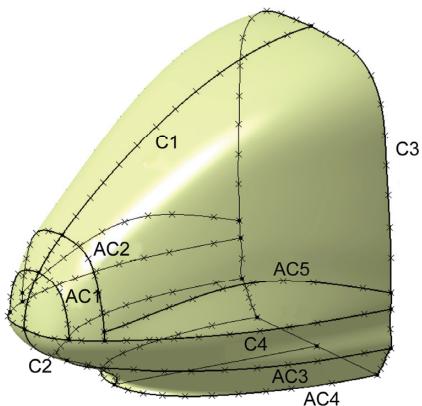


图 2 (网络版彩图)列车头部模型及控制线

数线性叠加的方式来描述, 但由于多项式表达方式对于控制线局部微调的效果一般, 为使列车表面光滑, 且易于变形, 采用解析函数线性叠加的方式来描述控制线形状。控制线上点的坐标可表示为原始坐标和扰动值的线性叠加<sup>[20]</sup>:

$$y_{\text{new}}(x) = y_{\text{old}}(x) + \sum_{i=1}^N w_i f_i(x), \quad (4)$$

式中,  $y_{\text{old}}(x)$  和  $y_{\text{new}}(x)$  分别为扰动前后的坐标值;  $x$  为参考变量;  $w_i$  为变形系数。同时引入 Hicks-Henne 函数<sup>[20]</sup>来表示扰动值  $f_i(x)$ , 形式如下:

$$f_i(x, m, n) = \sin^n(\pi x^{\ln(0.5)/(\ln(m))}). \quad (5)$$

对于控制线表达式(4), 只需改变变形系数  $w_i$  即可得到一系列光滑曲线。下面分别介绍各主要控制线的变形方程。

控制线 C1 的变形方程为

$$\begin{aligned} Z1_{\text{new}}(i) &= Z1_{\text{old}}(i) + a1 \times s \times \sin\left(\pi \times \left(\frac{i}{n}\right)^{0.25}\right)^3 \\ &\quad + a2 \times s \times \sin\left(\pi \times \left(\frac{i}{n}\right)^{0.75}\right), \end{aligned} \quad (6)$$

式中,  $Z1_{\text{old}}(i)$  和  $Z1_{\text{new}}(i)$  为控制线 C1 上控制点变形前后的 Z 向坐标值;  $a1$  为控制列车鼻尖纵向形状的控制变量; 当  $a1$  逐渐增大, 鼻尖逐渐隆起;  $a2$  为控制列车头部纵向轮廓线凹凸性的控制变量, 当  $a2 > 0$  时, 轮廓线向外凸, 当  $a2 < 0$  时, 轮廓线内凹;  $n$  为控制线上点的个数;  $s$  为变形放大系数, 取值 100。

控制线 C2 的变形方程为

$$X2_{\text{new}}(i) = X2_{\text{old}}(i) + a3 \times s \times \sin\left(\pi \times \left(\frac{i}{n}\right)^{0.65}\right)^2, \quad (7)$$

式中,  $X2_{\text{old}}(i)$  和  $X2_{\text{new}}(i)$  为控制线 C2 上控制点变形前后 X 向坐标值;  $a3$  为控制列车纵向轮廓线下部的控制变量; 当  $a3$  数值逐渐增大, 列车底部排障器弧度由小变大;  $n$  为控制线上点的个数;  $s$  为变形放大系数, 取值 50。

控制线 C3 的变形方程为

$$Y3_{\text{new}}(i) = Y3_{\text{old}}(i) + a4 \times s \times \sin\left(\pi \times \left(\frac{i}{n}\right)^{0.6}\right)^2, \quad (8)$$

式中,  $Y3_{\text{old}}(i)$  和  $Y3_{\text{new}}(i)$  为控制线 C3 上控制点变形

前后 Y 向坐标值;  $a4$  为控制列车车身横向剖面线形状的控制变量; 当  $a4$  数值逐渐增大, 列车横向剖面线弧度也逐渐增大;  $n$  为控制线上点的个数;  $s$  为变形放大系数, 取值 25。

控制线 C4 的变形方程为

$$Y4_{\text{new}}(i) = Y4_{\text{old}}(i) + a5 \times s \times \sin\left(\pi \times \left(\frac{i}{n}\right)^{0.4}\right)^2, \quad (9)$$

式中,  $Y4_{\text{old}}(i)$  和  $Y4_{\text{new}}(i)$  为控制线 C4 上控制点变形前后 Y 向坐标值;  $a5$  为控制列车水平剖面线的控制变量; 当  $a5$  由小到大, 列车头型由尖变钝;  $n$  为控制线上点的个数;  $s$  为变形放大系数, 取值 50。

两个辅助变形系数  $b1$  和  $b2$  分别控制鼻尖横向形状和列车头部侧翼形状, 其控制变形方程与上述方程类似, 不再详述。由于列车车高和车宽对列车的侧风性能也会产生一定的影响, 因此设置了两个缩放系数: 车高缩放系数  $h$  和车宽缩放系数  $w$ 。控制变量及取值范围如表 1 所示。

## 4 空气动力学数值仿真模型

### 4.1 控制方程

对于明线或侧风下运行的列车, 由于列车运行速度的马赫数小于 0.3, 故可以忽略空气密度变化对流场产生的影响。数值仿真模型采用不可压缩定常流, 湍流模型采用标准  $k-\varepsilon$  湍流模型。流体控制方程如下<sup>[21]</sup>:

连续性方程

$$\frac{\partial u_j}{\partial x_j} = 0; \quad (10)$$

动量守恒方程

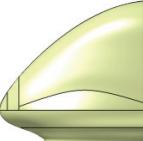
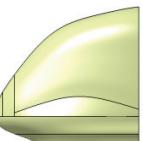
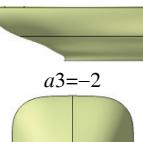
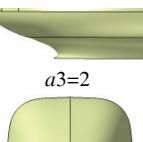
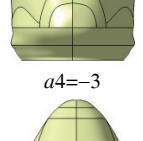
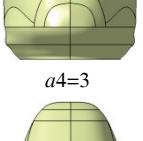
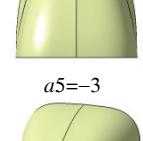
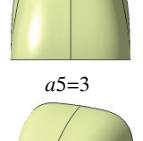
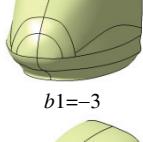
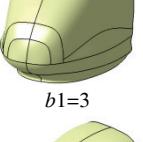
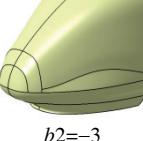
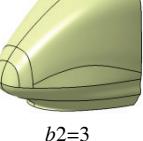
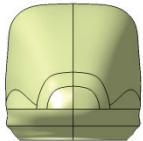
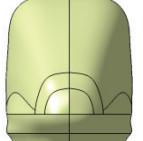
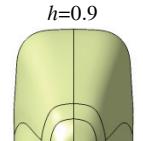
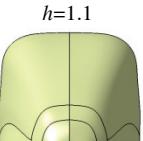
$$\rho \frac{\partial u_i}{\partial t} + \rho \frac{\partial(u_j u_i)}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j}; \quad (11)$$

能量守恒方程

$$\rho \frac{\partial e}{\partial t} + \rho \frac{\partial(u_j h)}{\partial x_j} = \text{div}(k \text{grad} T) + \frac{\partial(u_i \tau_{ij})}{\partial x_j}, \quad (12)$$

式中,  $u_j$  表示流体速度分量;  $p$  表示流体压力;  $\tau_{ij}$  表示黏性应力张量;  $\mu$  表示运动黏性系数;  $T$  表示温度;  $k$  表示热传导系数。

表 1 (网络版彩图) 列车外形优化控制变量及含义

参数	对应控制线	变量含义	外形变化(范围)	
$a_1$	C1	$a_1 < 0$ 鼻尖变扁 $a_1 > 0$ 鼻尖隆起		
			$a_1 = -3$	$a_1 = 3$
$a_2$	C1	$a_2 < 0$ 上部纵向轮廓线内凹 $a_2 > 0$ 上部纵向轮廓线外凸		
			$a_2 = -3$	$a_2 = 3$
$a_3$	C2	$a_3 < 0$ 排障器弧度减小 $a_3 > 0$ 排障器弧度增大		
			$a_3 = -2$	$a_3 = 2$
$a_4$	C3	$a_4 < 0$ 车体侧壁弧度减小 $a_4 > 0$ 车体侧壁弧度增大		
			$a_4 = -3$	$a_4 = 3$
$a_5$	C4, AC3, AC4	$a_5 < 0$ 车头变尖 $a_5 > 0$ 车头变钝		
			$a_5 = -3$	$a_5 = 3$
$b_1$	AC1, AC2	$b_1 < 0$ 鼻尖变窄 $b_1 > 0$ 鼻尖变宽		
			$b_1 = -3$	$b_1 = 3$
$b_2$	AC5	$b_2 < 0$ 侧翼变窄 $b_2 > 0$ 侧翼变宽		
			$b_2 = -3$	$b_2 = 3$
$h$	车高	$h < 1$ 车高降低 $h > 1$ 车高升高		
			$h = 0.9$	$h = 1.1$
$w$	车宽	$w < 1$ 车宽变小 $w > 1$ 车宽变大		
			$w = 0.9$	$w = 1.1$

## 4.2 列车基本气动性能计算模型

列车模型采用图 2 中建立的城际动车组三维参数化模型，并采用头车、中间车、尾车三车编组方式。列车基本气动性能计算模型的计算区域如图 3 所示，计算区域的入口设置为速度入口边界条件，出口设置为压力出口，计算域的顶部和远离车身的侧面设置为对称边界条件，列车表面和地面均设置为无滑移速度的固定壁面边界条件。网格划分采用非结构化网格，同时为保证计算网格的独立性，在列车表面设置不同尺寸的网格，研究最终网格数量对列车气动阻力计算结果的影响。当列车表面网格最大尺寸设置为 120 mm 时，网格总数约为 600 万，该网格既能保证准确捕捉到列车头部的变形，又不致使计算时间过长。

## 4.3 列车侧风气动性能计算模型

由于列车在桥梁上通过风场时，所受到的气动力和气动力矩最大，最容易发生安全事故。故选取列车在桥梁上运行时的侧风气动性能进行分析。计算区域长 400 m，宽 150 m，高 60 m，列车中心线距侧风入口 50 m，桥梁距地面高度 10 m。计算区域的入口设置为速度入口，出口设置为压力出口，计算区域的顶部设置为对称边界条件，列车表面和地面均设置为无滑移速度的固定壁面边界条件。桥梁模型及列车气动力矩简化中心如图 4 所示。经过网格独立性

检验，列车表面网格最大尺寸宜设置为 120 mm，网格总数约 700 万。

由于在自然大气边界层中，风速是随距离地面的高度而发生变化的，随着桥梁高度的增加，列车周围的风速也会增大。为建立更接近于实际风场的计算模型，计算时考虑风速随高度的变化，并采用指数分布的方式描述计算区域的入口风速<sup>[22]</sup>：

$$\frac{w_{yd}}{w_{yds}} = \left( \frac{y_d}{y_{ds}} \right)^\alpha, \quad (13)$$

式中， $w_{yd}$  代表距离地面高  $y_d$  处的风速； $w_{yds}$  则代表距离地面参考高度  $y_{ds}$  处的风速， $y_{ds}$  取值 10 m，故  $w_{yds}$  表示气象风速  $w_{10}$ ； $\alpha$  为风速轮廓指数，取值 0.16。

## 5 近似模型的比较

近似模型一般采用以下表达式来描述输入变量和输出响应之间的关系<sup>[14]</sup>：

$$y(x) = \tilde{y}(x) + \varepsilon, \quad (14)$$

式中， $y(x)$  为响应实际值，是未知函数； $\tilde{y}$  为响应近似值，是一个已知多项式； $\varepsilon$  为近似值与实际值之间的随机误差，通常服从标准正态分布。近似模型的精度主要分为两个部分：拟合精度和预测精度。预测精度是指近似模型预测值与实际值之间误差的大小，一般采用平均相对误差和最大相对误差来衡量。而拟合精度则一般指拟合公式与样本点的吻合程度，一般用全相关系数  $R^2$  来衡量， $R^2$  值越接近 1，则拟合精度越高。

工程中常用的几种近似模型包括：响应面模型、克里格模型和径向基神经网络模型。

响应面模型，是一种采用多项式函数来拟合设计空间的近似模型，表达式如下<sup>[23]</sup>：

$$f(X) = \beta_0 + \sum_{i=1}^m \beta_i \cdot x_i + \sum_{i=1}^m \sum_{j>i}^m \beta_{ij} \cdot x_i \cdot x_j + \dots, \quad (15)$$

式中， $x$  为自变量； $\beta$  为未知参数； $m$  为输入变量的个数。该模型的最少样本数取决于模型的阶数以及输入变量的个数。

克里格方法又称为空间局部插值法，是以变异函数理论和结构分析为基础，在有限区域内对区域化变量进行无偏最优估计的一种方法。

设  $x_0$  为未观测的需要估值的点， $x_1, x_2, \dots,$

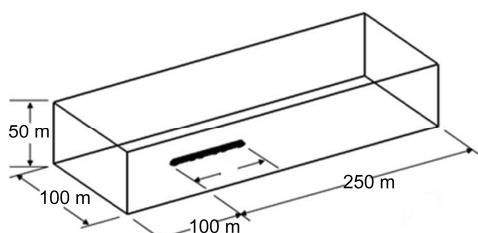


图 3 列车基本气动性能计算模型的计算区域

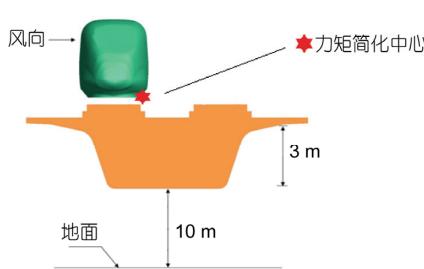


图 4 (网络版彩图)桥梁侧风模型

$x_N$  为其周围的观测点, 观测值的响应为  $y(x_1)$ ,  $y(x_2)$ , ...,  $y(x_N)$ . 若未测点的估值记为  $\tilde{y}(x_0)$ , 它可以由相邻观测点的已知观测值加权取和求得<sup>[23]</sup>:

$$\tilde{y}(x_0) = \sum_{i=1}^N \lambda_i \cdot y(x_i). \quad (16)$$

径向基神经网络作为神经网络模型中较为常见的一种模型, 是一种高效的前馈式三层网络模型, 在复杂函数的逼近上具有良好的效果, 且对于试验点的需求较少, 训练简单. 该网络一般分为输入层、中间层和输出层, 输入层用以接受输入信号, 输出层用以输出信号, 中间层与输入和输出没有直接的关系. 径向基神经网络以待测点和样本点的 Euclid 范数为自变量, 以径向函数为基函数, 利用线性叠加法构造神经网络模型.

若输入层具有  $N$  个单元, 输入信号  $\mathbf{x}$  通过输入层进入径向基神经网络; 中间层包含  $P$  个单元, 第  $p$  单元的输入可以表示为  $h_p = \|\mathbf{x} - \mathbf{c}_p\|$ ; 输出层包含 1 个单元, 则径向基神经网络模型的输入由下式给出<sup>[23]</sup>:

$$g(\mathbf{x}) = \sum_{p=1}^P \lambda_p \phi_p(\mathbf{x}) + \theta = \sum_{p=1}^P \lambda_p \phi(\|\mathbf{x} - \mathbf{c}_p\|) + \theta, \quad (17)$$

式中,  $\mathbf{c}_p \subset R^N$  表示基函数的中心;  $\lambda$  表示权系数;  $\phi$  表示非线性基函数;  $\theta$  表示阈值.

输入层到中间层为固定的非线性变换, 通过非线性变换将输入信号映射到一个新的空间, 这种映射关系依赖于径向基函数的中心点. 中间层到输出层为线性变换, 输出层则在新的线性空间中进行线性加权组合.

为了选择适合列车气动外形优化设计的近似模型, 下面对比上述 3 种近似模型对列车气动性能仿真计算的拟合精度和预测精度. 构建近似模型的样本

点由最优拉丁超立方试验设计表 1 中提到的 9 个优化控制变量的取值空间内采样得到, 为保证足够的采样空间覆盖率, 选取样本点共计 110 个, 并通过随机生成的 10 个额外试验设计点对近似模型的预测精度进行分析. 表 2 给出了各近似模型对列车气动力计算的近似精度. 从表中可以看出: 响应面模型对列车气动阻力的近似效果最好, 神经网络模型对各项气动力的综合近似效果更好. 因此, 下文采用神经网络模型对列车气动仿真过程进行替代.

## 6 计算结果及分析

计算的工况为列车速度 160 km/h 且侧风风速 20 m/s. 采用神经网络模型对列车气动仿真过程进行替代. 优化设计变量即为表 1 中提到的 9 个外形控制变量, 优化目标选取列车明线行驶时的气动阻力和列车在桥梁上通过风场时的头车倾覆力矩. NSGA-II 算法的随机初始采样点设为 20 个, 并进行 50 代遗传计算, 在完成 1000 次迭代设计后, 列车气动外形的优化设计完毕. 图 5 给出了优化过程中部分优化设计变量及优化目标的变化历程. 图中红色星形标志即为优化过程中得到的 Pareto 最优解对应的优化设计变量值及优化目标值. 从图中可以看出: 优化变量及优化目标都呈现收敛的趋势, 两优化目标在经过优化后, 也取得了较好的效果. 同时, 由于优化过程中采用近似模型对仿真过程进行了替代, 整个优化设计所消耗的时间大大减少, 除去建立近似模型所用的时间后, 优化计算耗时在 1 min 以内.

图 6 给出了各优化设计变量与优化目标间的相关性. 当纵坐标值大于 0 时, 输入参数与输出参数的相关性呈正相关; 当纵坐标值小于 0 时, 输入参数与

表 2 各模型精度

优化目标	精度	响应面模型	克里格模型	神经网络模型
阻力	平均相对误差(%)	1	4	1.8
	最大相对误差(%)	2.3	6.5	4.7
	全相关系数	0.99	0.98	0.99
侧力	平均相对误差(%)	5.9	9	5.5
	最大相对误差(%)	14.6	16	9
	全相关系数	0.94	0.93	0.95
升力	平均相对误差(%)	6.5	5.3	5
	最大相对误差(%)	16.2	15.6	12.4
	全相关系数	0.94	0.95	0.95

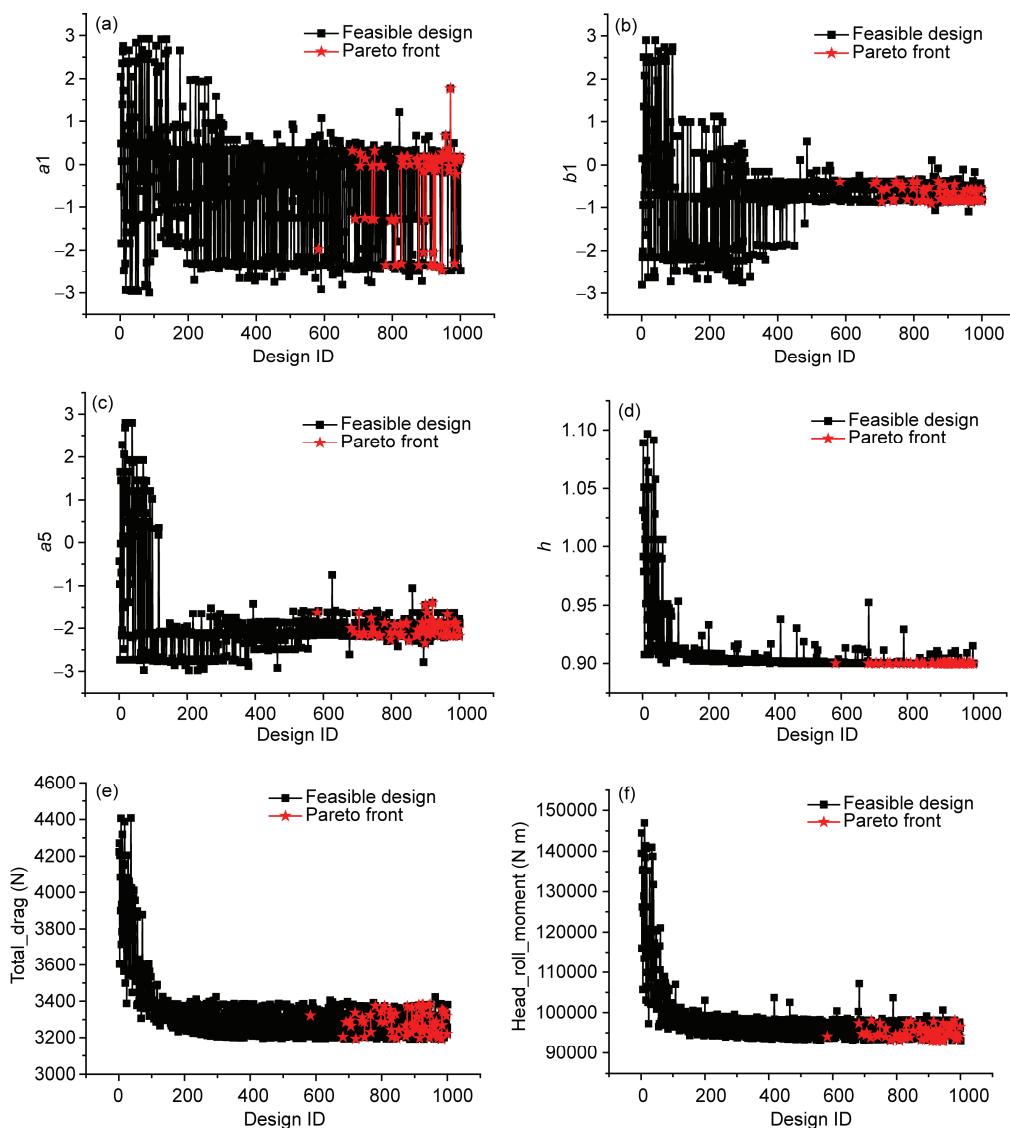


图 5 优化设计变量及优化目标的变化曲线(彩图)

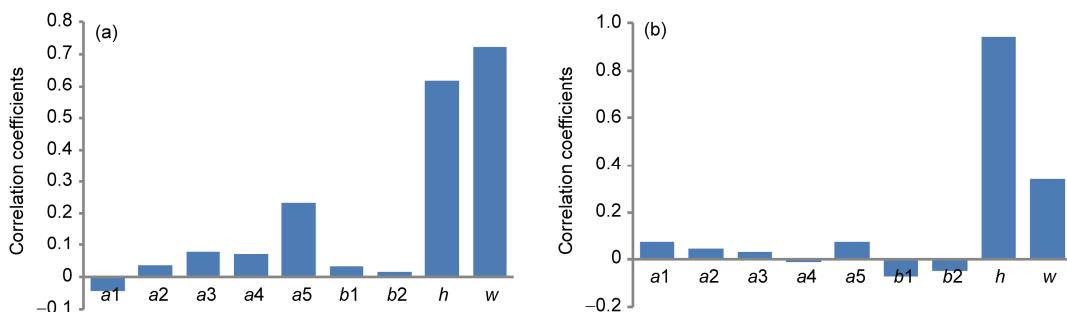
(a)  $a_1$ ; (b)  $b_1$ ; (c)  $a_5$ ; (d)  $h$ ; (e) 明线行驶整车阻力; (f) 侧风下行驶头车倾覆力矩

图 6 优化设计变量与优化目标的相关性

(a) 明线行驶整车阻力; (b) 侧风下行驶头车倾覆力矩

输出参数的相关性呈负相关。从图中可以看出, 大部分优化设计变量与优化目标之间均呈正相关, 即当优化设计变量的数值减小, 列车的明线行驶整车阻力以及侧风下行驶头车倾覆力矩也会减小。同时注意到, 控制鼻尖形状的两个控制变量  $a_1$  和  $b_1$ , 控制车体横向剖面形状的控制变量  $a_4$  以及控制列车侧翼形状的控制变量  $b_2$  与两优化目标呈负相关, 为协调优化目标之间的关系, 这些优化变量在优化过程中均呈现一定程度的振荡。对于两个优化目标而言, 列车的车高和车宽对其产生的影响在所有优化变量中是最大的, 水平轮廓线形状次之。经过优化后, 列车外形向着头型更尖扁, 横断面积更小, 车体侧壁弧度增加的方向变化。

图 7 为两个优化目标在像空间中的收敛情况。曲线为最优集解, 即 Pareto 前沿, 五角星为优化前列车模型相对应的气动性能。相对于优化前的原始列车模型, 优化后列车的各项气动性能都到了明显的提升, 其中, 列车明线行驶整车阻力最大减小了 17.5%, 列车侧风下行驶头车侧滚力矩最大减小了 22.9%。

## 7 结论

列车外形的优化设计因其优化因素的多面性与彼此可能的矛盾性, 使得优化过程必然是多学科多

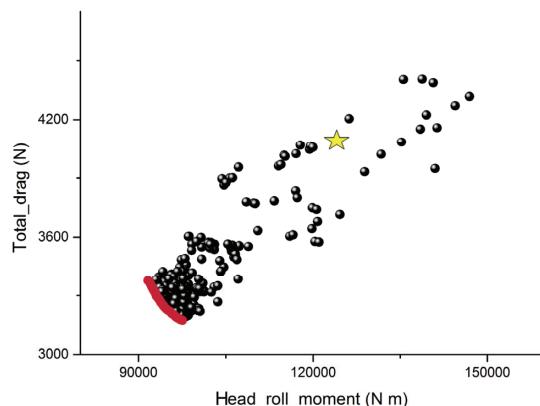


图 7 (网络版彩图)列车气动外形优化的 Pareto 前沿

目标的综合研究。考虑到传统优选方法难以使列车外形的设计达到最优以及直接优化方法对计算资源占用较多的缺点, 本文采用近似模型的方法对列车空气动力学仿真过程进行替代, 并以列车在不同路况下的气动性能为优化目标, 利用具有全局搜索能力的多目标遗传算法 NSGA-II 对列车的气动外形展开了优化设计。

优化结果表明, 采用近似模型的优化设计方法在保证计算精度的前提下可以有效缩短计算时间; 优化后的列车外形向着头型更尖扁, 横断面积更小, 车体侧壁弧度增加的方向变化; 与原始模型相比较, 优化后列车的明线行驶整车阻力最大减小了 17.5%, 列车侧风下行驶头车侧滚力矩最大减小了 22.9%。

## 参考文献

- 1 Schetz J A. Aerodynamics of high-speed trains. *Ann Rev Fluid Mech*, 2001, 33: 371–414
- 2 Raghunathan R S, Kim H D, Setoguchi T. Aerodynamics of high-speed railway train. *Prog Aerosp Sci*, 2002, 38: 469–514
- 3 刘加利, 李明高, 张继业, 等. 高速列车流线型头部多目标气动优化设计. *中国科学: 技术科学*, 2013, 43: 689–698
- 4 Kikuchi K, Tanaka Y, Iida M. Countermeasures for reducing pressure variation due to train passage in open sections. *Q Rep RTRI*, 2001, 42: 77–82
- 5 Matsumura T, Nakatani K, Fukuda T, et al. Effective nose shape for reducing tunnel sonic boom. *Q Rep RTRI*, 1997, 38: 206–211
- 6 Ku Y C, Rho J H, Yun S H, et al. Optimal cross-sectional area distribution of a high-speed train nose to minimize the tunnel micro-pressure wave. *Struct Multidisc Optim*, 2010, 42: 965–976
- 7 张洁, 梁习锋, 刘堂红, 等. 强侧风作用下客车车体气动外形优化. *中南大学学报(自然科学版)*, 2011, 42: 3578–3584
- 8 孔繁冰, 李明, 韩璐, 等. CRH380BL 高速动车组气动外形优化设计. *铁道机车车辆*, 2012, 32: 9–12
- 9 郑循皓, 张继业, 张卫华. 高速列车转向架空气阻力的数值模拟. *交通运输工程学报*, 2011, 11: 45–51
- 10 Sun Z X, Song J J, An Y R. Optimization of the head shape of the CRH3 high speed train. *Sci China Tech Sci*, 2010, 53: 3356–3364
- 11 Yao S B, Guo D L, Yang W. Three-dimensional aerodynamic optimization design of high-speed train nose based on GA-GRNN. *Sci China Tech Sci*, 2012, 55: 3118–3130
- 12 Yao S B, Guo D L, Sun Z X, et al. Multi-objective optimization of the streamlined head of high-speed trains based on the Krigingmodel. *Sci*

- China Tech Sci, 2012, 55: 3495–3509
- 13 李明, 李明高, 李国清, 等. 参数化驱动的高速列车头型气动外形优化设计. 铁道学报, 2013, 35: 14–20
  - 14 于梦阁, 张继业, 张卫华. 横风下高速列车流线型头型多目标气动优化设计. 机械工程学报, 2014, 50: 122–129
  - 15 Krajnović S. Shape optimization of high-speed trains for improved aerodynamic performance. P I Mech Eng F-J Rai, 2009, 223: 439–452
  - 16 赵怀瑞. 高速列车外形多学科设计优化关键技术研究. 博士学位论文. 北京: 北京交通大学, 2012
  - 17 Deb K. Multi-objective genetic algorithms: Problem difficulties and construction of test problems. Evol Comput, 1999, 7: 205–230
  - 18 Aguilar M J F, Rodrigues H, Pina H. Multi-objective optimization of structures topology by genetic algorithms. Adv Eng Softw, 2005, 36: 21–28
  - 19 田红旗, 梁习峰, 许平. 气动力性能研究及外形、结构设计方法. 中国铁道科学, 2002, 23: 138–141
  - 20 Hicks R M, Henne P A. Wing design by numerical optimization. J Aircraft, 1978, 15: 407–412
  - 21 林建忠, 阮晓东, 陈邦国, 等. 流体力学. 北京: 清华大学出版社, 2005
  - 22 于梦阁, 张继业, 张卫华. 桥梁上高速列车的强横风运行安全性. 机械工程学报, 2012, 48: 104–111
  - 23 赖宇阳, 姜欣, 方立桥, 等. Isight 参数优化理论与实例讲解. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2012

## Shape optimization of high-speed trains under multi running conditions

XIONG Jun, LI Tian & ZHANG JiYe

State Key Laboratory of Traction Power, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China

A 3D aerodynamic shape optimization of high-speed trains was carried out based on the multi-objective genetic algorithm NSGA-II and approximate model method. The total aerodynamic drag force in open field and the overturning moment of the head car under crosswind were set to be optimization objectives. The three-dimensional parametric model of the high-speed trains was established by the Hicks-Henne shape function. The effects of various approximate models on aerodynamic forces were analyzed and compared. Besides, the influence on aerodynamic performances of high-speed trains under multi running conditions of shape factors was analyzed. The shape factors included the head vertical contour line, the head horizontal contour line, the cross section shape of train body, the nose shape, the cowcatcher shape, the side wing shape, the height and the width of the train body. The most important optimization variables were obtained. The optimization results show that there is a tendency of the optimized train shape where the head becomes more sharp and oblate, the cross sectional area becomes smaller and the radian of the train's body side wall increases. Comparing with aerodynamic performances of the train's original shape, the maximum reduction of the aerodynamic drag force of the optimized train in open field is 17.5%, and the maximum reduction of the overturning moment the head car under crosswind is 22.9%.

**high-speed trains, aerodynamics, multi-objective optimization, approximate model, multi running condition**

doi: 10.1360/N092015-00153