

# 基于径向基函数网格变形的高速列车头型优化<sup>1)</sup>

姚拴宝 郭迪龙<sup>2)</sup> 杨国伟

(中国科学院力学研究所流固耦合系统力学重点实验室, 北京 100190)

**摘要** 基于局部型函数三维参数化方法、改进的蚁群算法和改进的克里金 (Kriging) 代理模型, 开展了列车头型的三维气动减阻优化设计研究. 为了避免复杂几何外形大变形情况下千万量级网格的重复生成, 提高高速列车头型优化设计的效率, 引入了缩减控制点的径向基函数网格变形技术. 优化结果表明: 径向基函数网格变形技术在降低网格质量的情况下可以有效缩短网格变形的时间消耗, 能够用于复杂几何外形的气动优化设计; 在给定的设计空间内, 控制鼻锥外形的 6 个关键设计参数对列车气动阻力的影响呈单调递增关系; 优化后, 在满足约束条件的情况下, 简化外形列车的整车气动阻力减小 5.41%, 头尾车减阻效果明显, 中间车气动阻力基本不变.

**关键词** 网格变形, 蚁群算法, 气动阻力, 径向基函数, 高速列车

中图分类号: U238 文献标识码: A DOI: 10.6052/0459-1879-13-111

## 引言

高速列车贴近地面或轨道运行, 在高速运行的情况下, 其空气阻力特性变得极为复杂<sup>[1-4]</sup>, 列车的阻力特性直接关系到其提速和节能环保的能力<sup>[2]</sup>. 头部长度为 10 m 左右, 且流线型程度非常高的动车组, 时速 300 km 时空气阻力占总阻力的 75%<sup>[3-4]</sup>. 可见, 气动减阻问题非常突出, 是高速列车头型设计及优化的关键问题之一. 中国新一代高速列车头型的设计方法<sup>[2]</sup> 主要是通过风洞试验、数值模拟、动模型试验和实车试验获取设计参数与列车气动性能的规律, 进而进行相应的改进设计, 属于评估、优选式的设计方法, 投资大, 设计周期长, 且得到的头型不一定是最优头型. 为此, 许多学者将航空航天领域已经发展的较为成熟的优化思路引入到了列车头型设计研究, Cui 等<sup>[5]</sup> 提出了一种增量叠加参数化方法, 也称局部型函数参数化方法, 并用于高速列车头型的气动减阻优化设计, Yao 等<sup>[6-7]</sup> 基于该方法和替代模型技术开展了高速列车头型的单目标和多目标优化设计, 得到了不同设计条件的优化头型, Sun 等<sup>[8]</sup> 基于任意网格变形技术进行了列车头型的气动减阻优化设计, 受到网格变形量的限制, Sun 等得到头型减阻效果不是特别显著.

上述研究成果虽然对高速列车头型的工程设计

有较好的指导意义, 但优化效率仍然较低, 且需要大量的人力参与优化过程, 其中很关键的一个环节为网格生成问题. 本文引入了 Rendall 等<sup>[9]</sup> 提出的缩减控制点的径向基函数网格变形技术, 并结合局部型函数三维参数化方法、改进的蚁群算法和克里金代理模型, 开展了列车头型的三维气动减阻优化设计.

## 1 几何外形及参数化方法

本文针对 CRH380A 头型 1:1 三辆编组简化外形进行优化, 将风挡简化为完全封闭的外风挡, 封闭转向架处的凹腔, 不考虑转向架侧罩和受电弓装置对列车气动阻力的影响, 如图 1 所示.

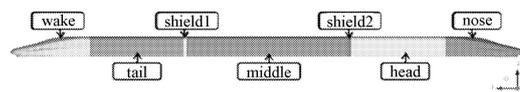


图 1 CRH380A 简化外形

Fig. 1 The simplified shape of CRH380A

几何约束条件: 流线型部分长度不变, 列车底部最大宽度及最大横截面的形状不变, 司机室视角不小于 21°, 流线型部分容积不能低于原始外形容积的 95%.

流线型部分几何外形的参数化方法使用 Cui 等<sup>[5]</sup> 提出的增量叠加参数化方法, 提取 6 个关键

2013-07-13 收到第 1 稿, 2013-08-22 收到修改稿.

1) 国家重点基础研究发展计划 (2011CB711100) 和“十一五”国家科技支撑计划 (2009BAQG12A03) 资助项目.

2) 郭迪龙, 高级工程师, 主要研究方向: 计算流体力学, 列车空气动力学, 高速列车外形优化设计. E-mail: jack9517@126.com

设计参数  $W_1, W_2, W_3, W_4, W_5, W_6$ , 分别控制鼻锥厚度、鼻锥引流、鼻锥高度、车体宽度、司机室视角和排障器外形, 文献 [6-7] 详细介绍了参数化设计的实现方法, 本文不再赘述. 为便于变形函数的设计及变形区域的划分, 将 1:1 几何外形沿列车长度方向单位化, 使流线型部分长度为 1 m, 计算流场时, 再将单位化后的外形放大到原始尺寸, 从而消除缩比外形对流场计算结果的影响. 单位化后各设计参数的取值范围为  $-10 \leq W_1 \leq 25$ ,  $-10 \leq W_2 \leq 10$ ,  $-20 \leq W_3 \leq 20$ ,  $-20 \leq W_4 \leq 20$ ,  $-15 \leq W_5 \leq 5$ ,  $-100 \leq W_6 \leq 10$ , 单位均为 mm.

## 2 计算方法精度验证

流场计算方法采用基于格心格式有限体积法求解三维定常可压缩雷诺平均 N-S 方程, 空间离散格式采用罗 (Roe) 格式, 时间离散采用 LU-SGS 离散方法, 湍流模型采用  $k-\omega$  SST 模型, 为控制物面处的边界层网格数量并保证流场计算精度, 在壁面处使用了标准壁面函数.

外场计算区域如图 2 所示. 列车运行速度为  $V = 83.333 \text{ m/s}$ , 远场压力取为  $1.01 \times 10^5 \text{ Pa}$  (1 个标准大气压), 温度为  $T = 288 \text{ K}$ , 参考面积取列车最大横截面面积. 远场边界为无反射边界条件. 流入边界、流出边界和顶部边界均为远场边界条件, 车体为无滑移固壁边界条件. 为模拟地面效应的影响, 将地面设置为移动壁面, 移动速度与来流速度相等.

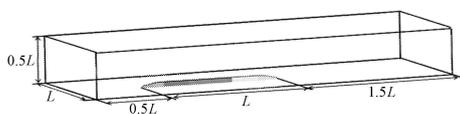


图 2 计算域示意图

Fig. 2 The computational domain

本文使用四面体网格离散空间区域, 在物面附近布置边界层网格, 总网格量约为  $9.6 \times 10^6$ . 为验证算法的正确性及网格布置的合理性, 本文将对数值计算结果与风洞试验结果进行对比分析. 风洞试验模型为 1:8 三辆编组缩比模型, 包括转向架和风挡, 考虑轨道对列车的影响. 网格布置方式与 1:1 模型相同, 远场区域与风洞的大小一致, 由于几何外形更为复杂, 在转向架和风挡区域对网格进行加密, 总网格量约为  $2.17 \times 10^7$ . 以车体高度为特征长度, 来流雷诺数约为  $1.8 \times 10^6$ . 表 1 给出了数值计算结果与风洞试验数据, 可以看出, 各节车气动力的计算误差均在可

接受的范围内, 表明本文的网格布置及计算方法合理可行.

表 1 数值计算结果与风洞试验数据对比

Table 1 The results of CFD and experiment

|       | $C_d$ | $H-C_d$ | $M-C_d$ | $T-C_d$ | $T-C_1$ |
|-------|-------|---------|---------|---------|---------|
| Exp   | 0.326 | 0.125   | 0.082   | 0.119   | 0.045   |
| CFD   | 0.315 | 0.127   | 0.077   | 0.110   | 0.044   |
| error | 3.34% | 2.08%   | 5.49%   | 7.54%   | 6.40%   |

## 3 径向基函数网格变形方法

Rendall 等 [10] 提出了一种基于径向基函数的网格变形方法, 并进一步发展了缩减控制点的径向基函数网格变形技术 [9-11]. 该方法对网格的拓扑结构没有任何限制, 仅需要变形物面网格点的信息. 林言中等 [12] 将径向基函数网格变形技术与弹簧网格变形方法进行了对比分析, 发现该方法的网格变形效率和质量都优于弹簧网格变形方法.

为得到变形物面最优控制节点, 需要设计用来计算物面插值精度的损失函数. 本文使用 Rendall 等 [9] 推荐的单位损失函数, 在节点  $i$  处的单位损失函数计算表达式为

$$E_i = \sqrt{(E_i^x)^2 + (E_i^y)^2 + (E_i^z)^2} \quad (1)$$

其中,  $E_i^x = E_i^y = E_i^z = (\mathbf{1} - \mathbf{A}_r \mathbf{M}_r^{-1} \mathbf{1})$ ,  $\mathbf{1}$  为单位矩阵,  $\mathbf{A}_r$  和  $\mathbf{M}_r$  的矩阵形式参见文献 [9].

利用单位损失函数结合优化算法得到变形物面最优控制节点后, 为保证远场边界及外形不变曲面的形状不发生变化, 需要给出一定数量的控制节点, 且将这些控制节点的坐标增量值设置为 0. 结合所有控制节点的坐标及其增量值, 通过式 (2) 可以得到位移插值系数:  $\mathbf{p} = (\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_N)^T$ .

$$\mathbf{p}_x = \mathbf{M}^{-1} \Delta \mathbf{x}_s, \quad \mathbf{p}_y = \mathbf{M}^{-1} \Delta \mathbf{y}_s, \quad \mathbf{p}_z = \mathbf{M}^{-1} \Delta \mathbf{z}_s \quad (2)$$

式中,  $\Delta \mathbf{x}_s = (\Delta x_{s_1}, \Delta x_{s_2}, \dots, \Delta x_{s_N})^T$ ,  $y$  和  $z$  方向的表达式与  $x$  方向相同.

利用式 (3) 可以插值得到空间网格所有坐标点的坐标增量, 将变形前网格节点坐标值与相应的坐标增量进行代数相加, 实现全计算域的网格变形.

$$w_x = \sum_{i=1}^N \alpha_i \phi(\| \mathbf{x} - \mathbf{x}_i \|) \quad (3)$$

径向基函数  $\phi$  的选取对插值结果有较大的影响, 对于不同的问题应区别考虑, 本文使用薄板样条函数 [10] 作为径向基函数. 从图 3 可以看出, 只在

几何变形大的区域网格变形较大,而在远离几何大变形的区域,网格基本不变。

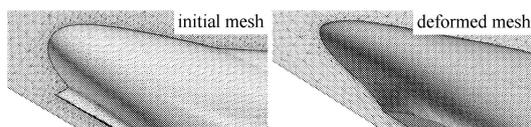


图3 变形前后的网格对比

Fig. 3 The deformation mesh

本文在鼻锥的一侧寻找网格变形的控制点集,然后将得到的控制点集对称到尾锥和车体的另一侧,进而控制整个计算域内网格的变形。为减小地面几何外形的变形误差,在地面上尤其是在鼻锥和尾锥附近布置较多的控制点,而在远场区域布置的控制点较为稀疏,如图4所示。整个变形空间共布置1395个控制点,其中头尾车流线型部分布置1144个控制点,远场区域布置251个控制点,当变形物面的变形量达到1m时,变形物面的最大插值误差约为1cm,远场区域的插值误差约为3.3cm,插值误差对流场计算结果的影响可以忽略不计。



图4 流线型部分及远场控制点分布

Fig. 4 The distribution of control points

对于网格变形的计算效率,运行环境为8核中央处理器,主频为2.53GHz,内存为36Gb,WIN7 64位系统,空间网格为四面体网格,列车及地面附近布置边界层网格,总网格量为 $9.5 \times 10^6$ ,完成一次网格变形耗时约183s,而使用ICEM CFD软件重新生成一次相同量级的网格,除去人工处理几何外形消耗的时间,仅生成网格仍需耗时约27min。可见,引入网格变形技术可以有效提高头型优化设计的效率。

## 4 优化结果与分析

### 4.1 优化算法

Karaboga等<sup>[13]</sup>提出了巡回蚁群优化(touring ant colony optimization, TACO)算法,陈焯对TACO算法进行了改进<sup>[14]</sup>,使用十进制编码替代原来的二进制编码。为避免算法的早熟现象,本文在陈焯改进的算法基础上引入了变异算子,在优化迭代过程中对蚂蚁路径进行适当变异,以提高算法的种群多样性。为更加合理地设置变异概率,本文通过自适应方法调

整变异概率的大小。变异概率的自适应变化公式参考文献[7]。

在参数化设计时无法满足体积约束条件,因此,需要在优化迭代的过程中给定适当的约束惩罚函数,本文给定的惩罚函数如下

$$\psi(\mathbf{x}) = \sum_{i=1}^l \alpha_i |\min\{0, g_i(\mathbf{x})\}|^r \quad (4)$$

式中,  $g_i(\mathbf{x}) \leq 0, i = 1, 2, \dots, l$ , 为不等式约束条件表达式。

对于最小化问题,适用度函数设计为

$$f = C_d(1 + \psi(\mathbf{x})) \quad (5)$$

式中,  $f$  为适应度值,  $C_d$  为列车的气动力系数,其表达式为

$$C_d = \frac{2F_d}{\rho V^2 S} \quad (6)$$

其中,  $F_d$  为列车受到的气动阻力,  $\rho$  为空气密度,取 $1.225 \text{ kg/m}^3$ ,  $V$  为列车运行速度,  $S$  为列车车身最大横截面积,取 $11.2 \text{ m}^2$ 。

为减少流场计算次数,本文引入了克里金代理模型,使用基于最大最小准则的拉丁超立方采样方法采样,共采集20个样本点作为初始训练样本点,将其分为4组用于基于交叉验证算法的模型训练。由于流线型部分的体积 $V$ 在优化迭代的过程中难以直接计算,因此,本文通过克里金模型得到设计参数与体积 $V$ 的关系,即需要两套预测精度满足设计要求(预测误差不大于1%)的克里金模型。

### 4.2 简化外形优化前后的气动力分析

基于克里金代理模型,使用蚁群算法在设计空间内寻找最优头型。蚁群算法的参数设置为:人工蚂蚁个数为20,寻优代数为150,局部更新系数和全局更新系数均为0.1,变异概率为0.8和0.1。

从表2可以看出,优化后,列车气动阻力明显减小,可见,头型的变化对列车的气动阻力影响很大。克里金代理模型的预测值与数值计算值一致,说明本文构建的克里金模型准确的能够映射设计参数与优化目标的非线性关系。

表2 优化前后的列车气动力

Table 2 Aerodynamic force of initial and optimal shape

|         | $C_d$ | $H-C_d$ | $M-C_d$ | $T-C_d$ | Vol   |
|---------|-------|---------|---------|---------|-------|
| initial | 0.148 | 0.058   | 0.038   | 0.052   | 0.026 |
| optimal | 0.140 | 0.053   | 0.038   | 0.049   | 0.025 |
| reduce  | 5.41% | 8.62%   | 0       | 5.77%   | 3.85% |
| Kriging | 0.140 | —       | —       | —       | 0.025 |

从图 5 可以看出, 优化后, 司机室玻璃倾角的减小导致该区域与过渡区的连接处气流加速更快, 使过渡区的低压强度略微增大, 排障器由前倾变为后倾, 气流可以更为顺利地通过该区域而流入车体底部, 很大程度上减弱了气流滞止现象, 从而使该处的高压区基本消失, 两种因素导致头车的压差阻力在一定程度上减小。

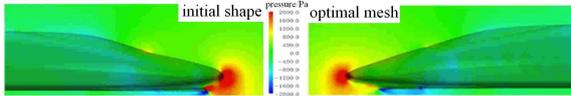


图 5 优化前后头车附近的压力分布  
Fig. 5 Pressure distribution around the nose before and after optimization

#### 4.3 真实外形优化前后的气动力分析

为研究在附属部件的影响下优化外形气动性能是否改善, 本文将对真实外形优化前后的气动力进行对比分析. 为保证计算的准确性, 使用风洞模型 (1:8 缩比模型), 计算条件及网格布置与第 2 小节的风洞试验对比分析时的一致. 优化前后的空间网格仅在变形区域发生变化, 以减小网格重构对计算误差的影响, 确保计算误差的同向性. 从表 3 可以看出, 与简化外形相比, 真实外形列车的气动阻力明显增大, 优化后, 各节车的减阻效果与简化外形有所不同, 但考虑到优化目标为整车而非单节车的气动阻力, 因此, 这种差别可以接受. 由于尾车的气动升力是列车运行安全性和乘坐舒适性的一个关键气动指标, 所以, 优化前后的尾车气动升力的变化也决定了优化外形的优劣. 从表 3 可以知道, 优化后尾车气动升力减小幅度达到了 22.73%, 表明列车气动阻力与尾车气动升力的变化具有一致性, 相比于原始外形, 优化外形的气动性能有较大的提高。

表 3 真实外形优化前后的列车气动力

Table 3 Aerodynamic force of initial and optimal real shape

|           | $C_d$ | $H-C_d$ | $M-C_d$ | $T-C_d$ | $T-C_1$ |
|-----------|-------|---------|---------|---------|---------|
| initial   | 0.315 | 0.127   | 0.077   | 0.110   | 0.044   |
| optimal   | 0.305 | 0.127   | 0.078   | 0.100   | 0.034   |
| reduction | 3.17% | 0       | -0.13%  | 9.09%   | 22.73%  |

#### 4.4 设计参数与气动阻力的非线性关系

图 6 给出了本文提取的 6 个关键设计参数对列车气动阻力的影响. 为便于比较, 本文将每个设计变量的取值范围单位化为 [0,1]. 从图 6(a) 可以看出, 列车气动阻力随着每个设计参数的增大而增大, 其中, W3 控制鼻锥高度, 对列车气动阻力的影响最

大, W4 控制鼻锥宽度, 决定着流线型部分的横截面积, 对列车气动阻力的影响也很大, W5 控制司机室视角, 由于取值范围较小, 在其取值范围内列车气动阻力的变化也最小. W1, W3 和 W6 与气动阻力呈一定的非线性关系, 而 W2, W4 和 W5 个设计参数对气动阻力的影响呈近似线性关系. 从图 6(b) 可以看出, 当同时改变这两个设计参数时, 得到的气动阻力的最大值和最小值都比单个设计参数的影响显著. 从最终的优化结果可以知道, 6 个设计参数同时相互作用对列车气动阻力的影响更大, 虽然单个设计参数与优化目标的关系比较简单, 但多个设计参数相互作用的关系复杂很多, 尤其是存在约束条件的情况下, 使用工程方法很难从这种复杂的相互作用关系中得到一组最为合理的解, 有效的手段是通过复杂的优化设计方法实现, 这也是开展高速列车头型优化设计研究的必要性。

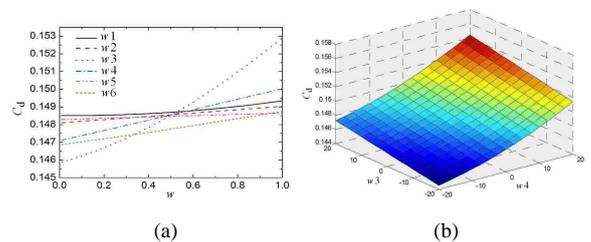


图 6 设计参数与列车气动阻力的作用关系. (a) 单个设计参数的影响; (b) 第 3, 第 4 个设计参数相互作用影响

Fig. 6 The laws between design parameters and  $C_d$ . (a) The laws between every design parameter and  $C_d$ ; (b) The laws among W3, W4 and  $C_d$

### 5 结论

本文针对 CRH380A 新型高速列车的三辆编组简化外形开展了气动减阻优化设计研究, 研究结果表明: 基于缩减控制点的径向基函数网格变形技术可以较好的应用于高速列车等复杂几何边界的空间网格变形, 为大网格量、大变形条件下的气动外形优化设计提供了良好的网格变形技术. 列车的气动阻力随着车体宽度、鼻锥高度、排障器外形等外形控制参数的增大而增大, 与各设计参数存在一定的非线性和近似线性关系, 在有非线性约束条件的情况下, 多个参数的相互作用对列车气动阻力的影响较为复杂. 优化后, 简化外形列车的气动阻力减小 5.41%, 其中头尾车分别减小 8.62% 和 5.77%, 中间车基本不变, 流线型部分的容积减小 3.85%, 满足约束条件; 真实外形列车的气动阻力减小 3.17%, 尾车气动升力减小 22.73%, 优化效果较为显著。

## 参 考 文 献

- 1 Joseph AS. Aerodynamics of High-speed Trains. *Annual Reviews Fluid Mechanics*, 2001, 33(1): 371-414
- 2 Yang GW, Guo DL, Yao SB, et al. Aerodynamic design for China new high-speed trains. *Science China Technological Sciences*, 2012, 55(7): 1923-1928
- 3 姚拴宝, 郭迪龙, 杨国伟等. 高速列车气动阻力分布特性研究. *铁道学报*, 2012, 34(7): 18-23 (Yao Shuanbao, Guo Dilong, Yang Guowei. Distribution of high-speed train aerodynamic drag. *Journal of the China Railway Society*, 2012, 34(7): 18-23 (in Chinese))
- 4 田红旗. 列车空气动力学. 北京: 中国铁道出版社, 2007: 160-161 (Tian Hongqi. *Train Aerodynamics*. Beijing: China Railway Publishing House, 2007: 160-161 (in Chinese))
- 5 Cui K, Wang XP, Hu SC, et al. Shape optimization of high-speed train with the speed of 500 kph. In: *Lecture Notes in Electrical Engineering Proceedings of the 1st International Workshop on High-Speed and Intercity Railways, Vol.2*. Tiergartenstrasse 17, Heidelberg, D-69121, Germany. Springer Verlag. 2012, Lnee 148: 187-197
- 6 Yao SB, Guo DL, Yang GW. Three-dimensional optimization design of high-speed train nose based on GA-GRNN. *Science China Technological Sciences*, 2012, 55(11): 3118-3130
- 7 Yao SB, Guo DL, Sun ZX, et al. Multi-objective optimization of the streamlined head of high-speed trains based on the Kriging model. *Science China Technological Sciences*, 2012, 55(12): 3494-3508
- 8 Sun ZX, Song JJ, An YR. Optimization of the head shape of the CRH3 high speed train. *Science China Technological Sciences*, 2010, 12: 3356-3364
- 9 Rendall TCS, Allen CB. Reduced surface point selection options for efficient mesh deformation using radial basis functions. *Journal of Computational Physics*, 2010, 229: 2810-2820
- 10 Rendall TCS, Allen CB. Unified fluid-structure interpolation and mesh motion using radial basis functions. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 2008, 75(10): 1519-1559
- 11 Rendall TCS, Allen CB. Efficient mesh motion using radial basis functions with data reduction algorithms. *Journal of Computational Physics*, 2009, 228(17): 6231-6249.
- 12 林言中, 陈兵, 徐旭. 径向基函数插值方法在动网格技术中的应用. *计算物理*, 2012, 29(2): 191-197 (Lin Yanzhong, Chen Bing, Xu Xu. Radial basis function interpolation in moving mesh technique. *Chinese Journal of Computational Physics*, 2012, 29(2): 191-197 (in Chinese))
- 13 Karaboga N, Kalinli A, Karaboga D. Designing digital IIR filters using ant colony optimization algorithm. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 2004, 17: 301-309
- 14 陈焯. 变尺度混沌蚁群优化算法. *计算机工程与应用*, 2007, 43(3): 68-70 (Chen Ye. Scale able chaotic ant colony optimization. *Computer Engineering and Applications*, 2007, 43(3): 68-70 (in Chinese))

(责任编辑: 刘希国)

## AERODYNAMIC OPTIMIZATION OF HIGH-SPEED TRAIN BASED ON RBF MESH DEFORMATION<sup>1)</sup>

Yao Shuanbao<sup>1)</sup> Guo Dilong<sup>2)</sup> Yang Guowei

(LMFS of Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

**Abstract** An aerodynamic drag reduction optimization design study of high-speed train head is carried out based on the three-dimensional parametric approach of local shape function, improved ant colony algorithm and improved Kriging surrogate model. To avoid repeated generation of ten millions of meshes in the case of large deformation with complex geometry and improve the optimization efficiency of high-speed train head, we introduce mesh deformation techniques of the reduced control points based on radial basis functions (RBF). The optimization results show that: RBF mesh deformation method could largely shorten the time-consuming of mesh deformation without reducing the quality of meshes, and can be used for aerodynamic optimization design of complex geometry. Under the design space given in this article, the six key design parameters that control the nose shape have effects on the aerodynamic drag of the train with a kind of monotonically increasing relationship. After optimization under the constraints, the total aerodynamic drag of the simplify shape is reduced by 5.68%. The aerodynamic drag of leading and trailing cars reduced a lot, while the aerodynamic drag of middle car changes little.

**Key words** mesh deformation, ant colony optimization (ACO), aerodynamic drag, RBF, high-speed trains

Received 13 July 2013, revised 22 August 2013.

1) The project was supported by the National Basic Research Program (2011CB711100) and National Key Technology R&D Program (2009BAQG12A03).

2) Guo Dilong, senior engineer, research interests: computational fluid dynamics, aerodynamics of high-speed trains and shape optimization. E-mail: jack9517@126.com