



高速列车串列升力翼翼型优化设计

王瑞东 倪章松 张军 李树民 岳怀俊 余雨晨

Optimization design of tandem airfoils on high-speed train

WANG Ruidong, NI Zhangsong, ZHANG Jun, LI Shuming, YUE Huaijun, YU Yucheng

引用本文:

王瑞东, 倪章松, 张军, 等. 高速列车串列升力翼翼型优化设计[J]. 空气动力学学报, 2022, 40(2): 129–137. DOI: 10.7638/kqdlxxb-2021.0203

WANG Ruidong, NI Zhangsong, ZHANG Jun, et al. Optimization design of tandem airfoils on high-speed train[J]. *Acta Aerodynamica Sinica*, 2022, 40(2): 129–137. DOI: 10.7638/kqdlxxb-2021.0203

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7638/kqdlxxb-2021.0203>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

气动悬浮列车单向翼翼型优化与地面效应分析

Optimization and wing-in-ground analysis on Aero-train unidirectional-wing

空气动力学学报. 2017, 35(1): 123–128 <https://doi.org/10.7638/kqdlxxb-2015.0043>

高压捕获翼构型跨声速流动特性初步研究

Preliminary study on transonic flow characteristics of a high-pressure capturing wing configuration

空气动力学学报. 2020, 38(3): 441–447 <https://doi.org/10.7638/kqdlxxb-2019.0075>

城际列车底部结构优化减小气动阻力研究

Reduction of aerodynamic drag on intercity railway through car bottom structure optimization

空气动力学学报. 2018, 36(5): 763–773 <https://doi.org/10.7638/kqdlxxb-2016.0176>

高速列车隧道进口波基本特性数值研究

Numerical research on basic characteristics of tunnel entry waves induced by a high-speed train running into the tunnel

空气动力学学报. 2015, 33(5): 686–696 <https://doi.org/10.7638/kqdlxxb-2013.0082>

基于波叠加法高速列车单车通过隧道诱发压力波计算方法

Calculation method of pressure waves produced by a high-speed train through tunnel based on wave superposition

空气动力学学报. 2015, 33(3): 375–383 <https://doi.org/10.7638/kqdlxxb-2013.0052>

地址: 四川省绵阳市二环路南段8号11信箱9分箱

电话: 0816-2463375

Email: kqdlxxb@163.com

网址: <http://kqdlxxb.xml-journal.net/>



关注微信公众号
获得更多资讯信息

文章编号: 0258-1825(2022)02-0129-09

高速列车串列升力翼翼型优化设计

王瑞东, 倪章松, 张 军*, 李树民, 岳怀俊, 余雨晨

(成都流体动力创新中心, 成都 610072)

摘 要:气动升力协同高速列车是一种通过添加串列升力翼提高列车气动升力, 实现高速列车整体能耗和全寿命周期成本下降的创新型高速列车概念。由于升力翼使得列车的净重量下降, 车轮与轨道之间的作用程度减弱进而降低了摩擦阻力和车轮的磨损。为减少串列翼之间的气动干扰, 在铁路限界约束条件下, 基于数值模拟方法, 研究了不同壁面距离和攻角下的升力翼气动特性, 提出了一种较优的升力翼气动布局, 在此基础上开展翼型优化设计。研究结果表明: 后翼处在前翼的尾迹区时会存在显著的升力损失, 且气动损失随着前翼攻角的增大而增大。通过翼型优化, 可以有效改善后翼的气动特性, 相比原始翼型, 新翼型的升力系数提升了 14.06%, 升阻比提升了 10.71%。

关键词:气动升力; 高速列车; 翼型; 翼间干扰; 计算流体力学

中图分类号: V224; U271.91 文献标识码: A doi: 10.7638/kqdlxxb-2021.0203

Optimization design of tandem airfoils on high-speed train

WANG Ruidong, NI Zhangsong, ZHANG Jun*, LI Shuming, YUE Huaijun, YU Yucheng

(Chengdu Fluid Dynamics Innovation Center, Chengdu 610027, China)

Abstract: High-speed-train wing (HSTW) is a new concept for increasing the aerodynamic lift force via installing tandem airfoils on high-speed trains, which has the potential of reducing the total energy consumption and cost during the life cycle of the train. As the wing adds extra lift to the train, the net weight of the train is reduced, subsequently the friction drag and the wear of the wheel induced by the wheel-rail interaction are also reduced. In order to reduce the aerodynamic interaction between tandem wings, the aerodynamic characteristics of airfoils with different roof-to-wing distances and angles of attack are studied numerically under the constraint of the railway gauge. A prototype of the aerodynamic configuration is proposed, based on which an optimization design of the airfoil is carried out. The results show that there is a significant lift loss when the back wing is located in the wake region of the front wing, and such an aerodynamic loss increases with the increase of the angle of attack. With the optimization of the airfoil, the lift coefficient and the lift-to-drag ratio of the new airfoil are increased by 14.06% and 10.71%, respectively.

Keywords: aerodynamic lift; high-speed train; airfoil; wing-wing interaction; computational fluid dynamics

0 引 言

中国高铁已成为中国自主创新的成功范例, 从引进、消化、吸收再到自主创新, 现在已经领跑世界, “复兴号” CR400 运营速度已达 350 km/h。同时, 《交通建设强国纲要》中已指出要“合理统筹安排时速 400 公里级高速轮轨客运列车系统技术储备研

发”。随着运营时速提升, 轮轨列车的车轮磨损将加剧, 势必缩短车轮的镟修周期和使用寿命^[1]。

为了在更高速度下降低列车全寿命周期成本, 研究者们提出了带有升力翼的高速列车概念, 突破传统高速列车气动外形设计理念, 结合高速列车和飞行器各自优势, 希望通过增加列车气动升力, 实现高速列车整体节能降耗。

收稿日期: 2021-08-15; 修订日期: 2021-09-17; 录用日期: 2021-09-17; 网络出版时间: 2021-11-16

基金项目: 国家重点研发计划(2020YFA0710901)

作者简介: 王瑞东(1993-), 男, 四川西昌人, 研究实习生, 研究方向: 工业流体力学. E-mail: 739523022@qq.com

通信作者: 张军*(1983-), 副研究员, 研究方向: 空气动力学及气动声学. E-mail: zjun_nudt@sina.com

引用格式: 王瑞东, 倪章松, 张军, 等. 高速列车串列升力翼翼型优化设计[J]. 空气动力学学报, 2022, 40(2): 129-137.

WANG R D, NI Z S, ZHANG J, et al. Optimization design of tandem airfoils on high-speed train[J]. Acta Aerodynamica Sinica, 2022, 40(2): 129-137(in Chinese). doi: 10.7638/kqdlxxb-2021.0203

20世纪末,日本东北大学^[2]最早提出了“气动悬浮列车”设计概念,通过在地面附近布置地效翼,利用地面效应增升,给列车提供升力。日本东北大学石塚智之和小滨泰昭等对气动悬浮列车所用翼型进行了初步设计研究,认为其运载经济效率要高于磁浮列车和高速民航客机,并制作出了气动悬浮列车实验车型^[3-5]。江雷等提出了一种添加升力翼的概念设计方案,在车顶和车底侧面布置“仿机翼”,并指出了一些可供选择的翼型^[6-7]。赖晨光等在日本东北大学工作的基础上,进一步对气动悬浮列车开展了翼型优化与地面效应研究,并提出布置在列车两侧的环形翼气动布局^[8-10]。

上述研究表明,设计出具备良好气动特性的升力翼是升力翼列车技术的关键。围绕这一目标,研究者们提出了多种设计方案,但并未充分与我国高铁的发展实际相结合。

一方面是没有充分考虑铁路限界的影响。铁路限界标准是铁路的重要基础标准,规定了建筑物、设备与机车车辆不能逾越的轮廓尺寸线。与铁路运输、运营安全、工程建设、工务维修等关系密切^[11]。我国建成高铁总里程已突破3.5万公里,不兼容现有的铁路限界将造成巨大的基础投资浪费。因此,有必要在现有铁路限界约束下开展列车升力翼设计,确保升力翼的几何边界不与铁路建筑限界或车辆限界发生冲突。

另一方面是需要针对升力翼列车的串列翼气动布局开展翼型设计。限界约束下,单个升力翼无法提供升力翼列车所需的全部升力,需采用类似巡飞弹^[12-13]的串列翼布局设计。升力翼同时受到前翼和车体的气动干扰,如直接采用现有航空翼型^[6]或在单翼条件下开展翼型优化设计^[9],则不能准确刻画升力翼的工作环境,使得优化设计点偏离工程实际。

针对上述问题,本文结合高速列车的运行工况,基于列车限界分析^[14-15],首先开展列车升力翼概念设计研究,确定列车升力翼的基本几何尺寸。基于数值模拟方法,研究了不同垂直高度和攻角下的升力翼气动特性,提出了一种较优的升力翼气动布局。在此基础上,结合CFD数值模拟、CST翼型参数化方法和并行加点的Kriging代理模型,设计出一种在列车串列翼气动布局下具备更优气动特性的二维翼型,并分析了新翼型气动特性改善的原因。

1 概念设计

1.1 铁路限界约束分析

铁路限界是列车升力翼设计的重要约束,根据

1435 mm标准轨距铁路限界标准^[14-15](如图1所示),升力翼必须布置在铁路的建筑限界和桥隧限界之内,车辆两侧可布置升力翼的空间有限,仅有740 mm,难以提供有效的升力面积。最适合布置升力翼的空间是车体上方的一个类梯形区域(图中红色虚线框内)。横向空间为1400 mm至2000 mm,纵向空间为2500 mm左右。在展长受限的情况下,升力翼展弦比不能随意增大,这对二维翼型的气动性能提出了更高要求。

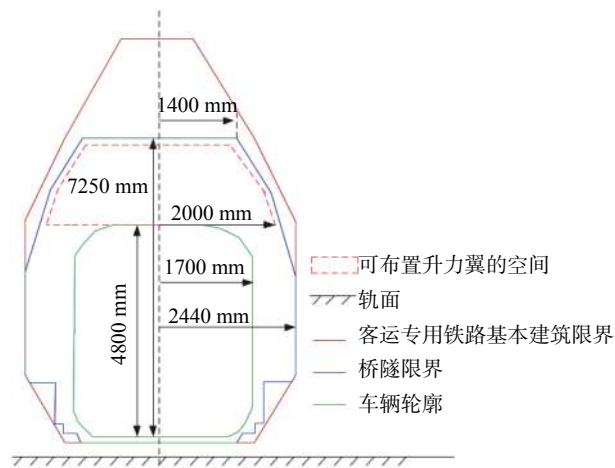


图1 标准轨距铁路限界示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the standard gauge railway boundaries

1.2 基于升力线理论的升力翼概念设计

时速400~500 km/h的高铁的行驶速度属于亚声速范畴,亚声速翼型的气动特性可通过升力线理论进行工程估算。通过估算,可以初步确定单节列车的升力翼布置个数和其他几何参数设计空间,为二维翼型优化设计提供参考。

本文选择GAW-1翼型作为升力翼优化设计的初始翼型,GAW-1为NASA Langley实验室专为低速高升力需求的通航飞机设计的自然层流翼型,相对厚度为17%,最大弯度位置为弦长的40%,在低马赫数工况下,具备较好的升力性能,在通航飞机设计获得了广泛的应用,三维气动布局形式为常用的梯形翼,其关键几何参数包括展弦比和跟梢比。

设单个三维升力翼的升力系数为 C_L 则:

$$C_L = C_{L0} + \alpha C_{La} \quad (1)$$

式中 C_{L0} 为零攻角升力,一般三维机翼的零升力攻角与二维机翼的零升力攻角相同,采用风洞试验数据^[16]。 C_{La} 为升力线斜率, α 为攻角,三维机翼的 C_{La} 可采用式(2)^[17]计算:

$$C_{La} = \frac{2\pi\lambda_{AR}}{2 + \sqrt{4 + \frac{\lambda_{AR}^2\beta^2}{\eta_e} \left(1 + \frac{\tan^2\chi_{1/2}}{\beta^2}\right)}} \quad (2)$$

其中 λ_{AR} 为展弦比; $\chi_{1/2}$ 为 1/2 弦线的后掠角, 对于亚声速机翼可取 0; η_e 为翼型效率, 一般取 0.95; $\beta = \sqrt{1 - Ma^2}$ 为压缩系数。

假设升力翼为梯形翼, 则翼面积 S 可表示为:

$$S = \frac{L^2(1 + \eta_{TR})}{4\lambda_{AR}} \quad (3)$$

其中 L 为机翼的展长, η_{TR} 为根梢比。则单节车厢多个翼提供的总升力为:

$$F_{L_all} = \frac{N\rho V^2 S C_L \eta_{cfg}}{2} \quad (4)$$

其中 N 为升力翼个数, ρ 为空气密度, V 为自由来流速度, η_{cfg} 为气动布局效率, 表征在串联翼布局中, 前后翼干扰对气动特性的影响, 根据已有串列翼气动特性研究文献^[12-13], 本研究中取 30% 进行估算。铁路限界约束下, 升力翼展长 L 取为 3 m, 图 2 展示了攻角 $0^\circ \leq \alpha \leq 15^\circ$, $0.6 \leq \eta_{TR} \leq 1.0$, $5 \leq \lambda_{AR} \leq 7$ 情况下, 串联不同个数升力翼的减重效果估算。以等效减轻车体总量(车体重量取 35 t)的 20% 至 30% 为气动需求指标, 可挑选出符合设计指标的设计空间范围(图 2 中红色

虚线之间)。

对于串联翼个数为 4 的情况下, 能够达到等效减轻车体重量 20%~30% 的只有两个工况点, 同时符合条件的最小攻角为 12° , 即只能在较大的攻角下才能实现减重目标; 当串联个数为 5 时, 存在多组符合条件的组合, 同时最小攻角为 9° , 设计空间更大。

可以发现, 在不同串联翼个数下, 展弦比越小、根梢比越接近 1, 其减重效果越好。原因在于在限界约束下, 增加展弦比、减小跟梢比带来的效率提升比不上翼面积减少带来的负面影响。综上所述, 本研究选择串联个数为 5, 攻角为 $9^\circ \sim 14^\circ$, 展弦比为 5 的工况点作为升力翼的优化设计空间。

2 翼间干扰数值仿真研究

2.1 仿真模型

基于翼型的二维翼间干扰数值仿真研究模型如图 3 所示。计算域高 20 m, 车顶前缘与入口边界距离 $L_1 = 25$ m, 后缘与出口边界距离 $L_2 = 50$ m, 升力翼下方带部分车顶曲线, 取三编组车长 $L_3 = 75$ m。两个升力翼布置在中车上方, 间距 $L_4 = 5$ m(按每节车布置 5 个升力翼计算)。前翼 A 攻角为 α_1 , 壁面距离为 H_1 , 后翼 B 攻角为 α_2 , 壁面距离为 H_2 。根据概念设计取前后翼弦长 $c = 600$ mm(展弦比为 5)。

计算域采用结构化网格进行离散, 在机翼附近采用 O 型网格加密。仿真采用基于雷诺时均 N-S 方程的 CFD 求解器, 湍流模型为 Realizable $k-\varepsilon$ 湍流模型和增强壁面函数, 离散格式选择二阶迎风, 压力速度耦合方法选择 Simple, 在车顶和翼型壁面进行了边界层网格加密, 第一层网格高度为 0.1 mm, 使壁面 y^+ 值符合湍流模型要求。

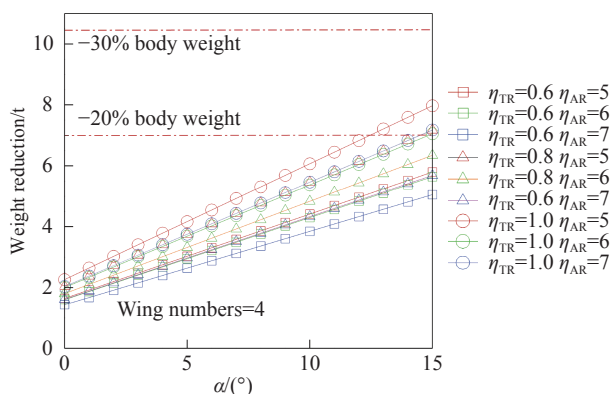
入口速度设为 450 km/h, 马赫数 $Ma = 0.36$, 基于翼型弦长的马赫数为 5.1×10^6 , 出口为压力出口, 上边界为对称边界条件。

2.2 仿真精度验证

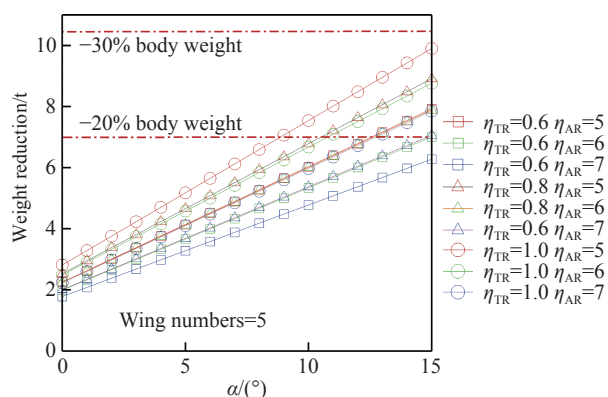
由于公开文献尚未有相关车-翼模型试验数据发表, 本研究采用自由来流的工况进行湍流模型和壁面函数验证。图 4 展示了模型验证算例的网格剖分, 图 5 展示了攻角从 0° 到 18° 情况下仿真得到的升力系数与 NASA 风洞试验结果^[16] 在相同雷诺数、马赫数下的对比, 可以发现升力曲线线性段的斜率符合较好, 在失速角度误差有所增大, 但最大的相对误差不大于 5%, 说明仿真模型精度可信。

2.3 不同气动布局气动特性分析

为探究前后翼间干扰的定性规律, 寻找较优的气



(a) 4个翼串联时, 不同根梢比和展弦比下单节车等效减重效果



(b) 5个翼串联时, 不同根梢比和展弦比下单节车等效减重效果

图 2 不同个数升力翼减重效果估算

Fig. 2 Estimation of the weight reduction effect using different numbers of lift wings

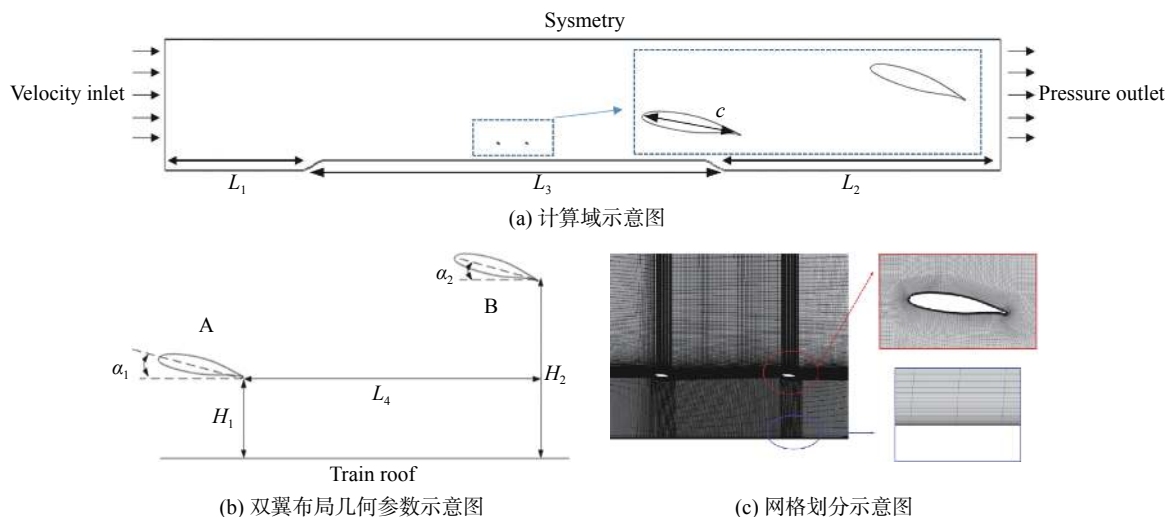


图 3 翼间干扰数值仿真模型

Fig. 3 Numerical simulation model for the double wing interaction

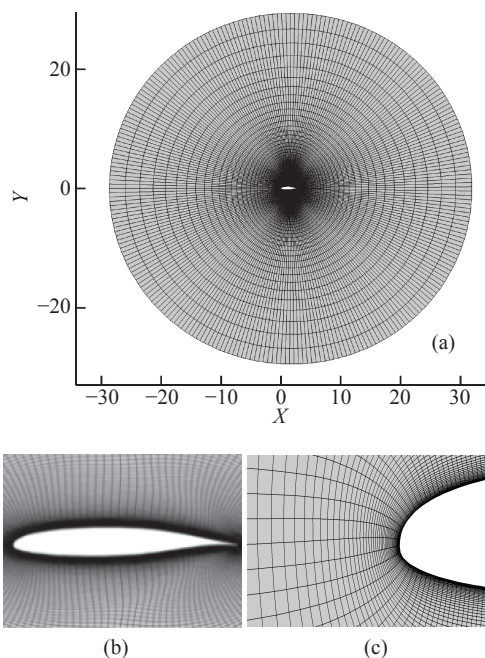


图 4 湍流模型验证网格示意图

Fig. 4 Schematic diagram of the grid used for turbulence model verification

动布局形式。本研究对壁面距离在 0.5 m、1 m、1.5 m、2 m、2.5 m 下,攻角在 6°、8°、10°、12°、14° 下的前后翼组合工况进行了仿真分析,具体工况如表 1 所示。其中,Case1 表示前翼 A 比后翼 B 高时的工况集合,Case2 表示前翼 A 比后翼 B 低时的工况集合。图 6 展示了前翼比后翼高时,翼 A 和翼 B 的升力系数变化曲线,此时前翼 A 的壁面距离和攻角固定。可以发现,在翼间距 5 m 的情况下,无论后翼 B 的攻角和壁面距离如何变化,对前翼的气动特性都没有影响。

对于翼 B,在 $0.5 \text{ m} \leq H_2 \leq 2.0 \text{ m}$ 时,随着壁面距离的增加,升力系数不断增大,说明此时车顶对机翼的壁面效应为负效应,距离车顶越近,机翼的升力损失

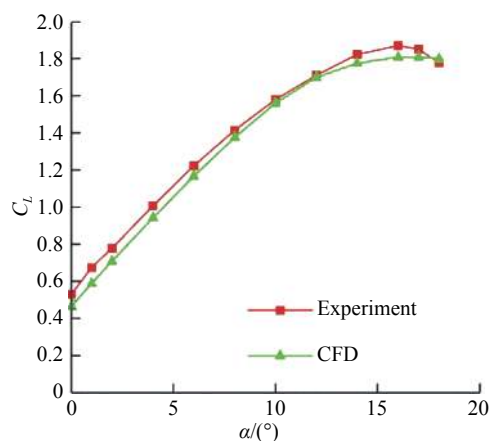


图 5 数值仿真模型精度验证

Fig. 5 Accuracy verification of the numerical simulation model

表 1 仿真工况表

Table 1 Parameters of the simulation conditions

Case	H_1/m	H_2/m	$\alpha_1/(\circ)$	$\alpha_2/(\circ)$
Case1	2.5	0.5~2.5	12	6~14
Case2	0.5~2.5	2.5	6~14	12

越显著;当 H_2 增加到 2.5 m 时,后翼 B 的升力系数突然下降,分析其速度云图发现(如图 7 所示),此时后翼直接受到前翼尾迹的影响,因此在布置机翼时,应尽量使得后翼脱离前翼的尾迹影响区域。

图 8 展示了后翼比前翼高时,翼 A 和翼 B 的升力系数变化曲线,此时前翼 B 的壁面距离和攻角固定。

对于翼 A,类似于 Case1,当在 $0.5 \text{ m} \leq H_1 \leq 2.0 \text{ m}$ 时,后翼 A 的攻角和壁面距离变化对后翼 B 的气动特性影响很微弱。当 $H_1 = 2.5 \text{ m}$ 时,由于尾迹效应,后翼 B 的气动性能发生了明显的下降,并且随前翼 A 攻角的增加,气动损失也随之加剧,这是因为随着

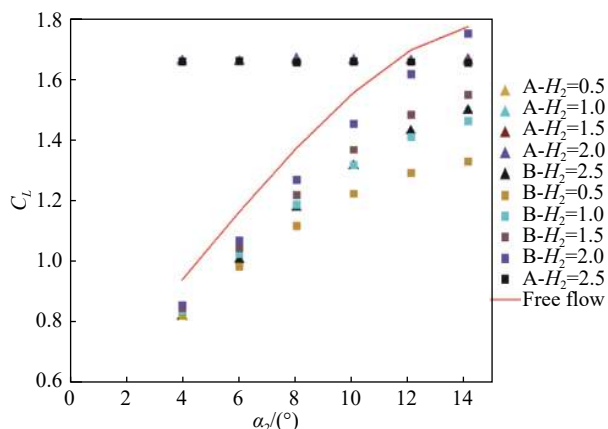


图6 前翼比后翼高时升力特性变化曲线

Fig. 6 Lift characteristic curve for wing A higher than wing B

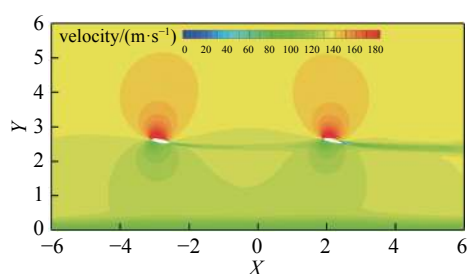
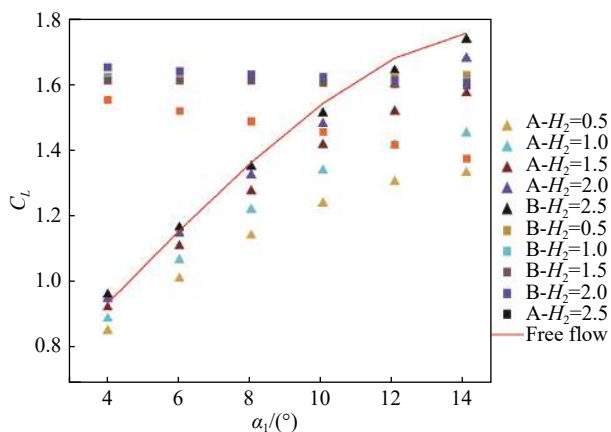
图7 Case1 中 $H_2 = 2.5$ 时速度云图Fig. 7 Velocity contour for Case1 at $H_2 = 2.5$ m

图8 后翼比前翼高时升力特性变化曲线

Fig. 8 Lift characteristic curve for wing B higher than wing A

攻角的增加,前翼的迎风遮挡面积和尾迹区域都随之增加。

对于翼 A,在 $0.5 \text{ m} \leq H_1 \leq 2.5 \text{ m}$ 范围内,随着壁面距离的增加,升力系数不断增大,并且在 $H_1 = 2.5 \text{ m}$ 时与自由来流工况下的试验数据趋同,说明此时机翼已经基本脱离了壁面效应的影响范围。对比图6和图8发现,Case2中翼A的升力系数要大于相同壁面距离和攻角下的Case1中翼B升力系数,这是由于除去壁面效应外,翼B同时受到前翼下洗气流的影响,有效攻角减小,导致升力损失。

2.4 车顶边界层厚度对升力翼气动性能的影响分析

在近车顶区域,车顶边界层的发展是否会影响升力翼的性能是本文关注的一个重点。图9展示了无升力翼时车顶不同位置的名义边界层厚度变化趋势,图中 δ 代表名义边界层厚度,定义为当地速度与自由来流速度比值为 0.99 的位置, h 表示列车的特征长度——车高。图9中同时展示了潘永琛^[18]使用 IDDES 模型对 380A 车型三车编组进行模拟仿真得到的车顶边界层名义厚度。

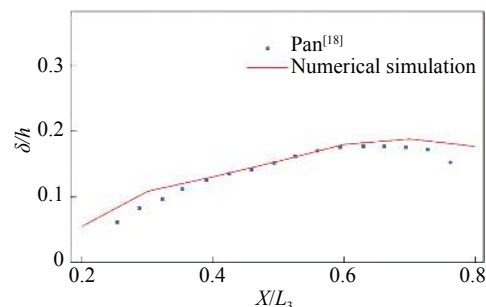


图9 无升力翼时沿车长方向的车顶边界层名义厚度

Fig. 9 Boundary layer thickness distribution on the roof of the train without the lift wing

对比发现二维简化模型和三维模型^[18]模拟沿车长方向的边界层厚度发展趋势相同,都表现为从流线型头部与车身连接处,车顶边界层厚度先以较快速度增加,发展至中后部后再缓慢增加,靠近列车尾部的区域,边界厚度有所降低,与田红旗院士在文献[19]中的结论一致。在厚度绝对值方面,由于本文研究采用二维简化模型,在头车 ($X/L_3 \leq 0.4$) 和尾车区域 ($0.6 \leq X/L_3$) 等三维流动显著的区域与实车模型存在一定差异,但在放置升力翼的中车区域 ($0.4 \leq X/L_3 \leq 0.6$),本文模拟的边界层厚度与三维模型基本一致,说明了本研究采用简化模型得到的车顶边界层厚度可以反映真实列车车顶边界层厚度。

图10展示了不同壁面距离下的前翼下方的无量纲速度云图。可以发现,当升力翼的壁面距离 $H_1 \leq 1.5 \text{ m}$ 时,升力翼下方的高压低速流体会与车顶边界层发生干涉,使得边界层厚度增厚,特别是 $H_1 = 0.5 \text{ m}$ 时,升力翼基本浸没在车顶边界层内,导致升力翼的气动性能恶化,随着壁面距离增加,升力翼与车顶边界层之间的干涉逐渐减弱。当 $H_1 = 2.0 \text{ m}$ 时,升力翼下方的高压低速流体与车顶边界基本脱离,不发生干涉,当 $H_1 = 2.5 \text{ m}$,车顶边界层的厚度约为 40 mm 左右,说明此时车顶边界层与升力翼之间的干涉较微弱。通过上述分析可知,应当尽可能高地布置升力翼 ($H_1 \geq 1.5 \text{ m}$),尽量减少升力翼受到的车顶边界层干扰。

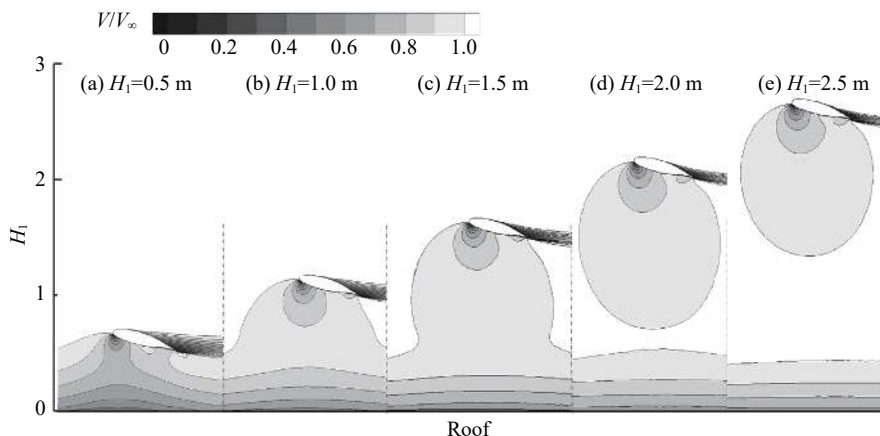


图10 不同飞高下无量纲速度云图

Fig. 10 Dimensionless velocity contours at different flight heights

2.5 设计工况点确定

图11和图12分别展示了在Case1和Case2情况下,双翼的平均升力系数,并添加了用两个对应攻角单翼实验数据合成的自由来流工况,用以表征没有壁面效应和翼间干扰的理想情况。可以发现,串联翼布

局时,整体的气动性能要低于没有气动干扰的情况,壁面效应和翼间干扰的影响使得翼型的平均升力系数最多可损失近30%,而最接近的工况点为 $H_1 = 2.5$ m, $H_2 = 2.0$ m, $\alpha_1 = 12^\circ$, $\alpha_2 = 14^\circ$,此时后翼基本脱离了壁面效应区域,同时避开了前翼的尾迹区域,可选用此工况点开展后翼的翼型优化设计。

3 考虑翼间干扰的翼型优化设计

3.1 翼型参数化方法

准确地描述翼型的几何外形是进行翼型优化设计的前提,CST方法是用型函数和类函数,表征复杂外形的一种几何参数化方法。由于其可以用较少的优化参数,获得较好的翼型逼近效果,因此在翼型优化设计过程中得到了大量的应用。CST方法对于翼型上下翼面的数学描述如式(5、6)所示:

$$y_u(x) = \sqrt{x}(1-x) \sum_{i=0}^n v_i^u [K_n^i x^i (1-x)^{n-i}] + x \xi_{TE}^u \quad (5)$$

$$y_l(x) = \sqrt{x}(1-x) \sum_{i=0}^n v_i^l [K_n^i x^i (1-x)^{n-i}] + x \xi_{TE}^l \quad (6)$$

其中, x 、 y 表示翼型的横纵坐标, $\xi_{TE} = \frac{(y_{TE}^u - y_{TE}^l)}{2}$ 表示翼型后缘的厚度, $\sum_{i=0}^n [K_n^i x^i (1-x)^{n-i}]$ 为 n 阶伯恩斯坦多项式, v_i^u 、 v_i^l 表示 n 阶伯恩斯坦多项式系数。

本文上下翼面都基于六阶伯恩斯坦多项式,共14个控制参数,控制点的分布为弦长的10%、15%、20%、70%、80%和90%,为了达到较好的拟合,在翼型前缘和尾缘曲率较高的地方上下各布置了三个控制点,在翼型中部上下各布置了一个控制点。通过控制点反解得到的14个伯恩斯坦多项式系数,即为优化的控制参数。

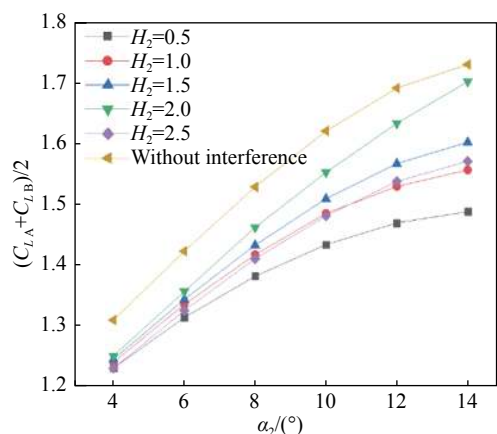


图11 前翼比后翼高时双翼平均升力系数

Fig. 11 Averaged lift coefficient of the double wings for wing A higher than wing B

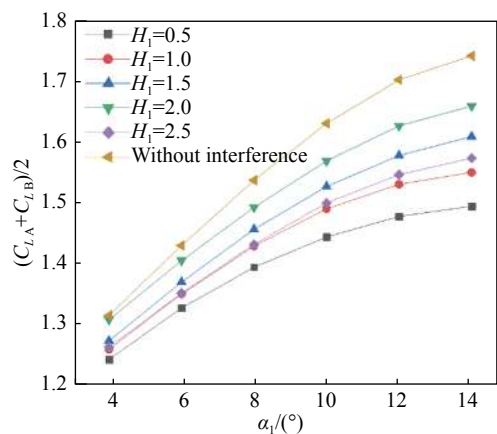


图12 后翼比前翼高时双翼平均升力系数

Fig. 12 Averaged lift coefficient of the double wings for wing B higher than wing A

对 GAW-1 翼型进行了拟合,上翼面拟合值与翼型原始点的标准差为 3.442×10^{-4} ,下翼面的拟合标准差为 9.31×10^{-4} ,上下翼面拟合误差的弦向分布如图 13(b)所示。可以看出,基于 CST 方法的翼型参数化拟合能较好地反映翼型的几何外形,拟合相对误差最大值不大于 6×10^{-3} 。

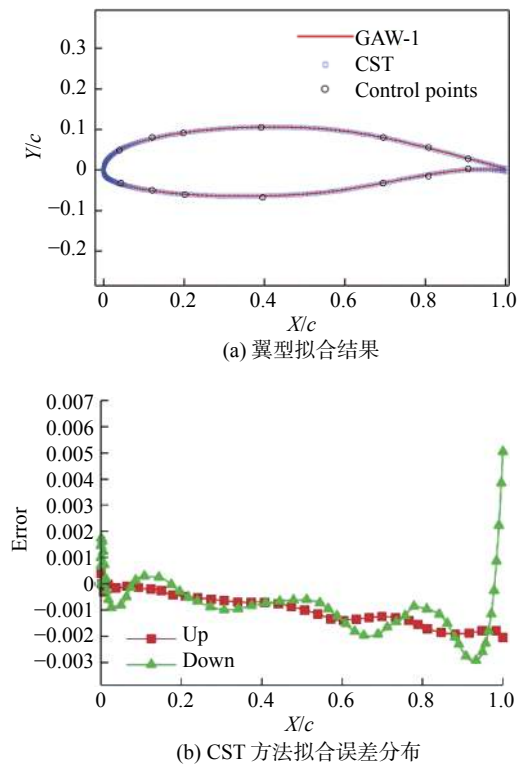


图 13 GAW-1 翼型坐标值与 CST 拟合值比较

Fig. 13 Comparison between the coordinate of GAW-1 and its CST fitting

3.2 基于 Kriging 代理模型的二维翼型优化方法

代理模型是指在构建优化模型的过程中,建立计算量小、计算精度与原数值仿真模型(如 CFD)相当的近似数学模型,例如响应面模型、径向基函数模型、Kriging 代理模型等^[20]。引入代理模型可以大幅提高优化设计效率。研究者^[21]发现将加点优化准则是影响 Kriging 代理模型的关键。为避免单一加点方法的不足,提高优化器的全局性能的优化能力和局部寻优能力,本文选择 EI、MSP、MSE 组合加点准则的并行加点方法构建 Kriging 代理模型^[21]。

在优化过程中,以 CST 函数拟合得到的 14 个控制参数为优化对象,以升力系数和升阻比最大为优化目标函数,使用拉丁超立方抽样获取 50 个初始样本点,当总样本点数达到 250 时,停止优化。

3.3 优化结果分析

表 2 展示了自由来流下原始翼型、前翼干扰下原始翼型和优化后翼型的升力系数与升阻比对比。

可以发现,在较优布局下,后翼 B(原始翼型)仍受到前翼的气动干扰,升力系数和升阻比略有下降。经过优化,后翼 B 在较优气动布局下的升力系数由 1.709 上升到了 1.946,上升了 14.06%。升阻比由 42.27 上升到 46.82,上升了 10.71%。图 14(a)展示了优化前后的翼型几何外形,优化后的翼型外形呈现出上下表面头部外突出,中后部向内凹进的趋势,最大厚度和弯度位置前移。图 14(b)展示了优化前后翼型表面压力系数曲线的对比,可以发现优化后翼型的前缘吸力峰强度有所降低,升力增加来源于上翼面中前部 ($0.2\leq X/c\leq 0.6$) 压力系数的减少。进一步分析翼型优化前后的压力系数云图(如图 15(a)和图 15(b)所

表 2 优化前后翼型气动性能对比

Table 2 Comparison between the aerodynamic performances of the airfoil before and after optimization

工况	C_L	C_L/C_D
自由来流下原始翼型	1.774	44.77
前翼干扰下原始翼型	1.709	42.27
前翼干扰下优化翼型	1.946	46.82

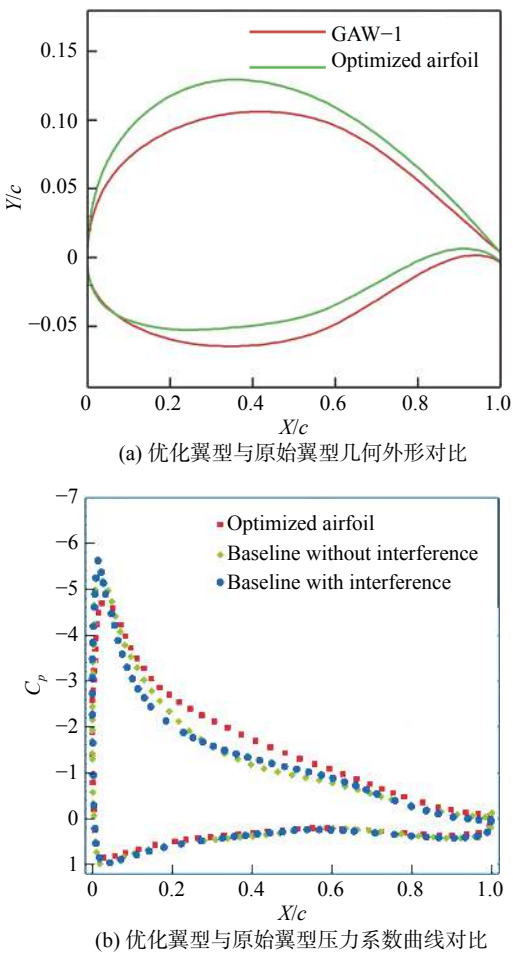
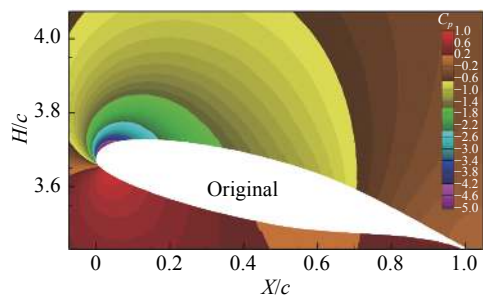


图 14 翼型优化前后结果对比

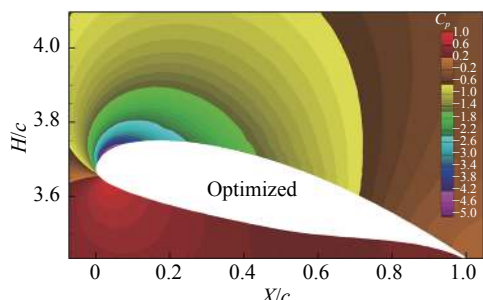
Fig. 14 Comparison of the airfoil before and after optimization

示), 压力系数小于-1.6的区域从 $X/c = 0.34$ 扩大到 $X/c = 0.42$, 优化后翼型的低压区相比原始翼型有了强化和扩大。

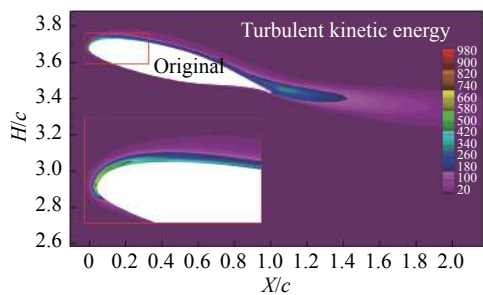
图15(c)和图15(d)展示了优化前后翼型的湍动能云图对比, 可以发现优化后翼型前缘剪切层的湍流强度有了明显的下降, 说明凸起加厚的前缘在设计点下改善了翼型前缘的流动分离, 有利于翼型吸力面低压区的发展。



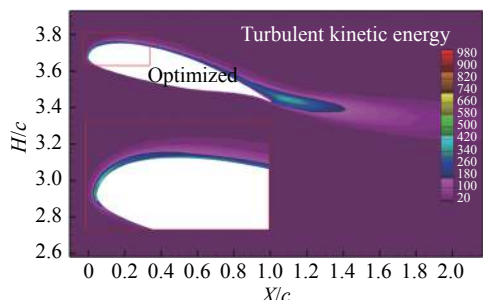
(a) 原始翼型压力系数云图



(b) 优化翼型压力系数云图



(c) 原始翼型湍动能云图



(d) 优化翼型湍动能云图

图15 优化前后翼型流场压力系数云图和湍动能云图对比

Fig. 15 Comparison of pressure coefficient contours and turbulent kinetic energy contours of the airfoil before and after optimization

4 结论

本文基于高铁限界约束下的列车串列翼概念设计, 研究了不同相对垂直高度和攻角下的升力翼气动特性, 提出了一种较优的升力翼气动布局。在此基础上, 优化设计出一种在列车串列翼气动布局下具备更优气动特性的二维翼型。通过研究, 得出以下结论:

1) 基于 CFD 分析了不同前后翼气动布局的气动特性, 发现后翼处在前翼的尾迹区域时会存在显著的气动损失, 且气动损失随着前翼攻角的增大而增大, 通过调整两翼的相对高差, 可以减小这一损失。

2) 基于 CST 翼型参数化方法和 Kriging 代理模型, 对后翼进行优化, 使得其在优化工况点下改善了前缘流动分离, 扩大了上翼面低压区, 升力系数上升了 14.06%, 升阻比上升了 10.71%。

3) 通过二维简化模型可以有效模拟高速列车车顶的边界层厚度, 当翼型浸没在车顶边界层内时, 会产生明显的气动损失, 应该使得翼型距离车顶高度尽量大于车顶边界层厚度。

高速列车升力翼工作环境与传统的航空机翼有较大差异, 必须着重考虑壁面效应和翼间干扰的影响。本研究主要从气动增升的角度开展研究, 但引入升力的同时必然也会增加高速列车的整体气动阻力和气动噪声, 如何实现增升、减阻、降噪的多目标协同优化设计, 是下一步高速列车升力翼设计研究的重点。

参考文献:

- [1] 曹巧. CRH380BL动车组踏面磨损规律研究及动力学影响分析[D]. 成都: 西南交通大学, 2015.
CAO Q. Research on tread wear law and dynamic impact analysis of CRH380BL EMU [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2015 (in Chinese).
- [2] KOHAMA Y. An application of ACV to railway transportation [C]// 25th Aircraft Symp., 1987: 128-131 (in Japanese).
- [3] TOMARU H, KOHAMA Y. Wind-tunnel investigation of aerofoil for wing in ground effect[J]. *Journal of Japan Society of Fluid Mechanics*, 1991, 10(1): 47-60.
doi: 10.11426/nagare1982.10.47
- [4] ISHIZUKA T, KOHAMA Y, KATO T, et al. Wing in ground effect characteristics of circular-arc aerofoils for aero-train[J]. *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers Series B*, 2004, 70(693): 1179-1185.
doi: 10.1299/kikaib.70.1179
- [5] ISHIZUKA T, KOHAMA Y, KATO T, et al. Experimental investigations on the ground effect characteristics of the U-shaped and V-shaped wing designs for the aero-train[J]. *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers Series B*, 2006, 72(717): 1228-1235.
doi: 10.1299/kikaib.72.1228
- [6] 江雷, 刘流, 马洋, 等. 基于高速铁路的带有仿机翼的空气动力悬浮列车: CN102897176A[P]. 2013-01-30.

- JIANG L, LIU L, MA Y, et al. High speed railway based aerodynamic aerotrain with simulated wings: CN102897176A[P]. 2013-01-30 (in Chinese).
- [7] 江雷, 查金龙, 刘流, 等. 基于高速铁路的车体底盘带有仿机翼的空气动力悬浮列车: CN102951166A[P]. 2013-03-06.
- JIANG L, ZHA J L, LIU L, et al. High-speed railway based aerodynamic aerotrain with simulated wings on chassis of aerotrain body: CN102951166A[P]. 2013-03-06 (in Chinese).
- [8] 任淳麒. 气动悬浮列车串联翼布置的空气动力学优化[D]. 重庆: 重庆理工大学, 2017.
- REN B Q. Multi-objective optimization on aerodynamic performance of aerotrain tandem wing layout[D]. Chongqing: Chongqing University of Technology, 2017 (in Chinese).
- [9] 阎志刚. 气动悬浮列车地面效应研究[D]. 重庆: 重庆理工大学, 2016.
- YAN Z G. Research on ground effect of aero-train[D]. Chongqing: Chongqing University of Technology, 2016 (in Chinese).
- [10] 赖晨光, 任淳麒, 阎志刚, 等. 气动悬浮列车单向翼翼型优化与地面效应分析[J]. *空气动力学学报*, 2017, 35(1): 123-128.
- LAI C G, REN B Q, YAN Z G, et al. Optimization and wing-in-ground analysis on Aero-train unidirectional-wing[J]. *Acta Aerodynamica Sinica*, 2017, 35(1): 123-128 (in Chinese).
doi: 10.7638/kqdlxxb-2015.0043
- [11] 田葆栓. 对铁路限界的分析与思考[J]. *铁道货运*, 2010, 28(8): 13-18.
- TIAN B S. Analysis and thoughts on railway clearance[J]. *Railway Freight Transport*, 2010, 28(8): 13-18 (in Chinese).
doi: 10.3969/j.issn.1004-2024.2010.08.005
- [12] 李广佳, 李锋, 石文. 串置翼型数值模拟及气动特性分析[J]. *飞机设计*, 2006(1): 19-24.
- LI G J, LI F, SHI W. Numerical simulation and aerodynamic characteristics analysis of tandem airfoils[J]. *Aircraft Design*, 2006(1): 19-24 (in Chinese).
- [13] 李永泽, 孙传杰, 卢永刚. 串列翼布局前后翼相对位置对气动特性影响研究[J]. *飞机设计*, 2016, 36(6): 32-36.
- LI Y Z, SUN C J, LU Y. Study on the influence of the relative position of front and rear wings of tandem wing layout on aerodynamic characteristics[J]. *Aircraft design*, 2016, 36(6): 32-36 (in Chinese).
- [14] GB 146.1-2020. 标准轨距铁路限界 第一部分: 机车限界[S].
GB 146.1-2020. Standard gauge railway boundary, First part: Locomotive limits[S].
- [15] GB 146.2-2020. 标准轨距铁路限界 第二部分: 建筑限界[S].
GB 146.2-2020. Standard gauge railway boundary, Second part: Building limits[S].
- [16] MCGHEE R J, BEASLEY W D. Low-speed aerodynamic characteristics of a 17 percent thick airfoil section designed for general aviation applications: NASA-TN-D-7428[R]. Hampton, Virginia: Langley Research Center.
- [17] GUDMUNDSSON S. General aviation aircraft design applied methods and procedures: Applied Methods and Procedures[M]. Butterworth-Heinemann, 2014.
- [18] 潘永琛. 高速列车边界层及尾流流动的数值研究[D]. 北京: 中国铁道科学研究院, 2018.
- PAN Y C. Numerical investigation on the boundary-layer and wake flows of a high-speed train[D]. Beijing: China Academy of Railway Sciences, 2018 (in Chinese).
- [19] 田红旗. 中国高速轨道交通空气动力学研究进展及发展思考[J]. *中国工程科学*, 2015, 17(4): 30-41.
- TIAN H Q. Development of research on aerodynamics of high-speed rails in China[J]. *Engineering Science*, 2015, 17(4): 30-41 (in Chinese).
doi: 10.3969/j.issn.1009-1742.2015.04.004
- [20] 许瑞飞, 宋文萍, 韩忠华. 改进Kriging模型在翼型气动优化设计中的应用研究[J]. *西北工业大学学报*, 2010, 28(4): 503-510.
- XU R F, SONG W P, HAN Z H. Application of improved kriging-model-based optimization method in airfoil aerodynamic design[J]. *Journal of Northwestern Polytechnical University*, 2010, 28(4): 503-510.(in Chinese)
- [21] 刘俊. 基于代理模型的高效气动优化设计方法及应用[D]. 西安: 西北工业大学, 2015.
- LIU J. Efficient surrogate-based optimization method and its application in aerodynamic design[D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2015 (in Chinese).

(本文责编: 徐燕 英文编审: 杨强)