

文章编号: 1001-8360(2015)02-0018-09

高速列车头型拓扑结构对气动力的作用规律研究

陈大伟¹, 姚拴宝^{1,2}, 郭迪龙², 杨国伟²

(1. 南车青岛四方机车车辆股份有限公司, 山东 青岛 266111;

2. 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: 为了得到高速列车头型关键设计部位的拓扑结构对列车气动性能的作用规律, 减少头型概念设计时的盲目性, 本文以数值模拟和正交试验设计为分析工具, 研究高速列车头型的长度、纵剖面型线、水平剖面型线、排障器外形、司机室玻璃形状和车体横截面形状对列车气动阻力和尾车气动升力的影响。将头型的 6 个设计部位均划分为 5 种不同的拓扑类型, 研究各设计部位拓扑结构的变化对列车气动性能的影响, 选取 3 个影响度最大的设计部位, 通过有交互作用的正交表分析不同部位拓扑结构的耦合作用对列车气动性能的影响。得到列车头型各主要设计部位的拓扑结构对列车气动性能的作用规律, 给出针对不同气动指标进行头型设计时的合理拓扑结构。

关键词: 气动设计; 拓扑结构; 正交设计; 高速列车

中图分类号: U260.2 文献标志码: A doi:10.3969/j.issn.1001-8360.2015.02.003

Study of Influence Laws between Topology Structure of High-speed Train Head and Aerodynamic Force

CHEN Da-wei¹, YAO Shuan-bao^{1,2}, GUO Di-long², YANG Guo-wei²

(1. CSR Qingdao Sifang Co., Ltd., Qingdao 266111, China;

2. Key Laboratory for Mechanics in Fluid Solid Coupling Systems, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract: In order to obtain the influence laws between the topology structure of key design parts of high-speed trains (HST) and the aerodynamic performance of HST and to reduce the aimlessness in the concept design of head shape, the numerical simulation method and the orthogonal experimental design are adopted to study the influence of six design parts, such as the length of streamlined part, the type of longitudinal line and horizontal line, the cowcatcher shape, the cab glass shape and the type of cross-sectional line, on the aerodynamic drag of HST and the lift force of the trailing car. In this paper, the six design parts are divided into five different topology categories, and the independent influence of topological change of every design part on the aerodynamic performance of the train is discussed. Subsequently, three design parts that have a great effect on the aerodynamic performance of HST are selected to study the dependent influence of the topology structures of different parts on the aerodynamic performance of HST with the orthogonal table that considers the interaction. As a result, the law of topological structures of major design parts of the train head shape on the aerodynamic performance of HST is derived and the reasonable topological structures are presented for head shape design in line with different aerodynamic indexes.

Key words: aerodynamic design; topology structure; orthogonal design; high-speed trains

收稿日期: 2013-10-30; 修回日期: 2014-02-27
基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973 计划)(2011CB711101)
作者简介: 郭迪龙(1974—), 男, 北京人, 高级工程师。
E-mail: jack9517@126.com

随着高速列车运行速度的提高, 空气对列车运行安全性、平稳性和节能环保性的影响越来越突出^[1]。已有研究表明^[2-7], 通过对车体外形尤其是列车头型进行优化设计可以明显减弱空气对列车的负面影响, 提

升列车运行时的气动性能。因此,头型的选取和优化是高速列车研发过程中的关键问题之一。目前,为得到满足设计要求的列车头型,最为成熟的工程设计方法是优选式设计方法,即根据已有的经验设计出若干头型,然后通过数值模拟、风洞试验和实车试验方法对各个头型的气动性能进行对比分析,从而选取气动性能较好的头型,我国自主研发的 CRH_{380A} 型高速列车便是通过这种方法设计的头型^[8]。优选式头型设计方法具有很大的盲目性,且设计周期长、成本高,为此,基于优化算法^[9-10]的头型设计方法成为头型优化设计研究的热点。然而,由于列车头型的几何外形极为复杂,且外形变化形式非常丰富,在使用优化算法进行头型设计时,受到参数化方法和设计参数维数的限制,难以在较大的设计空间内得到最优头型。通常的做法是基于某种成熟的外形开展“修型式”的优化设计研究,这在很大程度上限制了头型变化的丰富性,也难以得到一个全新的美学效果和气动性能俱佳的头型。

为了能够快速地从复杂多变的头型中选取适用于不同运行环境下的头型基本结构,许多学者对列车头型的主要设计参数(如头型细长比、截面变化率等)进行了研究,分析了设计参数对某些气动指标的影响,在一定范围内可以为头型的定型提供依据。然而,涉及头型变化丰富性的问题,即头型拓扑结构与列车气动性能作用关系的研究较少,且已有研究成果也多是得到单个拓扑结构与气动性能的作用关系,很少关心多个拓扑结构的相互作用对列车气动性能的影响。为了得到头型设计部位主要拓扑结构对列车气动性能的作用规律,减少头型概念设计时的盲目性,本文以列车头型的基本拓扑结构为研究对象,通过数值模拟和正交试验设计方法,综合考虑列车头型的长度、横截面形状、排障器外形、司机室玻璃形状、头型的纵剖面型线和水平剖面型线对明线运行时的列车气动阻力和尾车气动升力的影响,根据各设计部位对不同气动指标的作用关系,给出列车在不同运行环境下头型的合理拓扑结构。

1 数值计算方法

1.1 几何外形及运行环境

在不失一般性的条件下,本文以 CRH_{380A} 型高速列车为基本参考,为准确模拟列车周围流场,几何外形采用 3 辆编组方式:头车+中间车+尾车,头、尾车几何外形完全一致,长度为 26.5 m,中间车长度为 25 m,如图 1 所示。我国高速列车的最高运营速度为 300 km/h,此时,列车周围的空气流动已进入自模拟区,当列车运行速度更高时,其所受的气动力系数基本

不变,因此,本文给定的列车运行速度为 300 km/h。

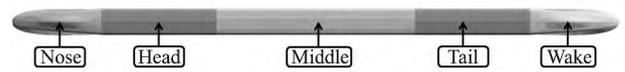


图 1 几何外形

1.2 明线运行计算方法及验证

本文采用商业软件 STAR-CCM+ 进行列车明线运行时的流场计算。控制方程为三维定常可压缩雷诺平均 N-S 方程,采用基于格心格式有限体积法求解,空间离散格式采用 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,在壁面处使用标准壁面函数。

外场计算区域如图 2 所示。无横风时,来流速度与列车运行速度相等,为 83.333 m/s。远场压力取为一个大气压,温度为 $T=288$ 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。

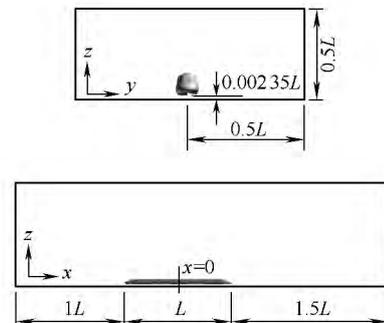


图 2 计算区域

本文使用 Trimmer 网格离散空间区域,在物面附近布置边界层网格,总网格数约为 1 000 万,通过风洞试验结果验证网格布置的合理性及数值计算方法的正确性。风洞试验模型为 1:8 三辆编组模型,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,总网格数约为 2 170 万。以车体高度为特征长度,来流雷诺数约为 180 万。表 1 给出 CFD 计算结果与风洞试验数据,可以看出,各节车气动力系数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。由于本文主要关心头型拓扑结构对气动力系数的影响,因此,后文提到的力系数均表示气动力系数。

表 1 数值计算结果与风洞试验结果
(以风洞试验整车气动阻力系数为基准单位化处理)

	Total-Cd	Head-Cd	Middle-Cd	Tail-Cd	Tail-Cl
Exp	1.000	0.383	0.252	0.365	0.144
CFD	0.951	0.362	0.242	0.347	0.132
Error	4.90%	5.48%	3.97%	4.93%	8.33%

2 基本拓扑结构

高速列车头型由复杂的自由曲面组成,当头型的拓扑结构发生变化时,曲面形状会相应发生很大的变化。为描述列车头型的几何外形,通过有限的设计参数控制头型曲面形状的变化,本文引入了 RHO 等^[11]提出的 VMF 参数化方法,由于排障器的曲面外形变化很大,为描述这种曲面,本文使用了 NURBS 方法。通过 24 个参数控制列车头型主要设计部位的拓扑形状,并进一步将这些拓扑形状进行归类,把头型长度、排障器外形、司机室玻璃形状、头型的纵剖面型线分别归纳为 5 种类型,如图 3 所示。由于这种参数化方法可以适用于任意的横截面形状,因此,本文在保证横截面积不变的情况下,给定 5 种类型的横截面形状,分别为 CRH380A 型截面、长形直壁截面、长形鼓壁截面、扁形鼓壁截面和长形凹形截面。其中,长形截面的高度一致,均为 3.5 m,扁形截面的高度为 3.2 m,如图 3 所示。

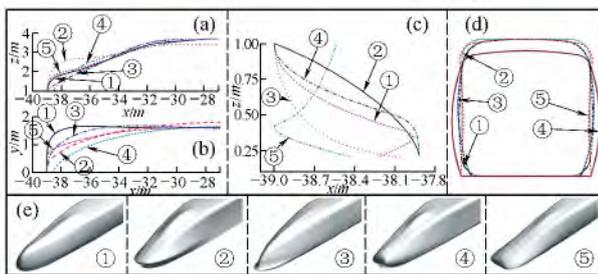


图 3 高速列车头型的基本拓扑结构

目前,国内外已经投入运营的高速列车中,头型最长的为日本 E5 系新干线列车,流线型部分长度为 15 m,CRH380A 型高速列车的头型长度为 12 m,CRH2 型高速列车的头型长度约为 9 m,ICE3 的头型长度约为 7 m,地铁头型的长度约为 3 m。因此,本文给定的 5 个列车头型长度等级分别为 3 m、6 m、9 m、12 m 和 15 m,其余 5 个部位拓扑结构的基本形状如图 3 所示。其中,图 3(a)和图 3(b)分别为头型纵剖面型线和水平剖面型线外形,图 3(c)为排障器纵剖面外形,图 3(d)为横截面外形,图 3(e)为司机室玻璃形状。

对于头型的纵剖面型线,本文给定的 5 种拓扑结

构结合司机室玻璃的高度可以构造单拱形、双拱形、梭形和椭球形等型线外形。对于横剖面型线,给定的 5 种拓扑结构可以构造锥形至钝头体等不同曲率的几何形状。列车底部的排障器主要用来清除路轨上的障碍物,防止杂物进入列车底部。为充分发挥排障器的作用,通常情况下排障器的外形设计为图 3(c)中的第一种拓扑结构形式,为拓宽排障器的设计思路,本文选用了 3 种能够发挥排障器作用的拓扑结构,另外选用了两种不同的排障器拓扑结构,为图 3(c)中的第三和第五种拓扑结构。图 3(e)给出的 5 种头型分别使用了 5 种不同的司机室玻璃外形,本文主要考虑司机室玻璃的高度、长度以及玻璃曲面与头型几何的过渡对列车气动性能的影响,其中第三种拓扑结构将司机室玻璃与车体外形设计的完全一致,即直接通过改变车体外形来控制司机室视角,而不需要对司机室玻璃进行单独设计。

3 拓扑结构对列车气动性能的作用规律

3.1 正交设计

如果全部考虑 6 个设计部位所有水平的组合情况,需要计算的流场次数为 15625,显然难以实现。为得到不同设计部位的拓扑结构对列车气动性能的影响规律,本文引入了正交试验设计方法^[12]。对于正交表的设计,以头型的 6 个主要设计部位为试验因素,每个试验因素有 5 个水平,图 3 中每种拓扑结构的类型编号为对应的水平编号,头型长度的水平编号从 1 到 5 分别对应 3 m、6 m、9 m、12 m 和 15 m。列车明线运行时的整车及头尾车气动阻力、尾车气动升力,横风条件下头尾车的气动侧向力和倾覆力矩为试验指标。为控制正交表的规模,不考虑各试验因素的交互作用,且不给出空列,构建 $L_{25}(5^6)$ 正交表,即共构建 25 个样本点,表头设计见表 2。表 2 中,L 表示头型长度,W1 为头型纵剖面型线曲率控制因子,W2 为头型水平剖面型线曲率控制因子,W3 为排障器外形控制因子,W4 为司机室玻璃形状控制因子,W5 为车体截面外形控制因子。

表 2 正交表的表头

列号	1	2	3	4	5	6
因素	L	W1	W2	W3	W4	W5

3.2 拓扑结构对列车气动性能的作用关系

对于不同的截面形状,车体最大横截面的面积不变,所以头型长度的变化与细长比的变化一致。图 4 中的横坐标为各设计部位拓扑结构的水平编号,与图 3 中的编号一致,纵坐标为气动力系数。图 4(a)给

出了每种拓扑结构对列车阻力系数和尾车升力系数的作用曲线,可以看出,随着头型长度的增大,整车和头、尾车阻力系数均逐渐减小,当长度由 3 m 变为 6 m 时,阻力系数下降幅度最大,而当长度增大到一定数值时,阻力系数减小的趋势逐渐变缓。相比于头车,尾车的阻力系数对头型长度的敏感度较低,当头型长度达到 9 m 时,头、尾车阻力系数的变化趋势基本一致。当头型长度小于 12 m 时,尾车升力系数随着头型长

度的增大而减小,当长度由 12 m 增大到 15 m 时,尾车升力系数有所增大。因此,设计头尾对称型高速列车头型时,如果列车运行环境主要为明线无横风环境,考虑到尾车升力和车体容积(头车流线型部分越长,车体有效容积越小)条件,头型长度并不是越长越好,对于运行速度较低(200~250 km/h)的列车,头型长度在 9 m 左右为宜,对于运行速度较高(不小于 300 km/h)的列车,头型长度在 12 m 左右为宜。

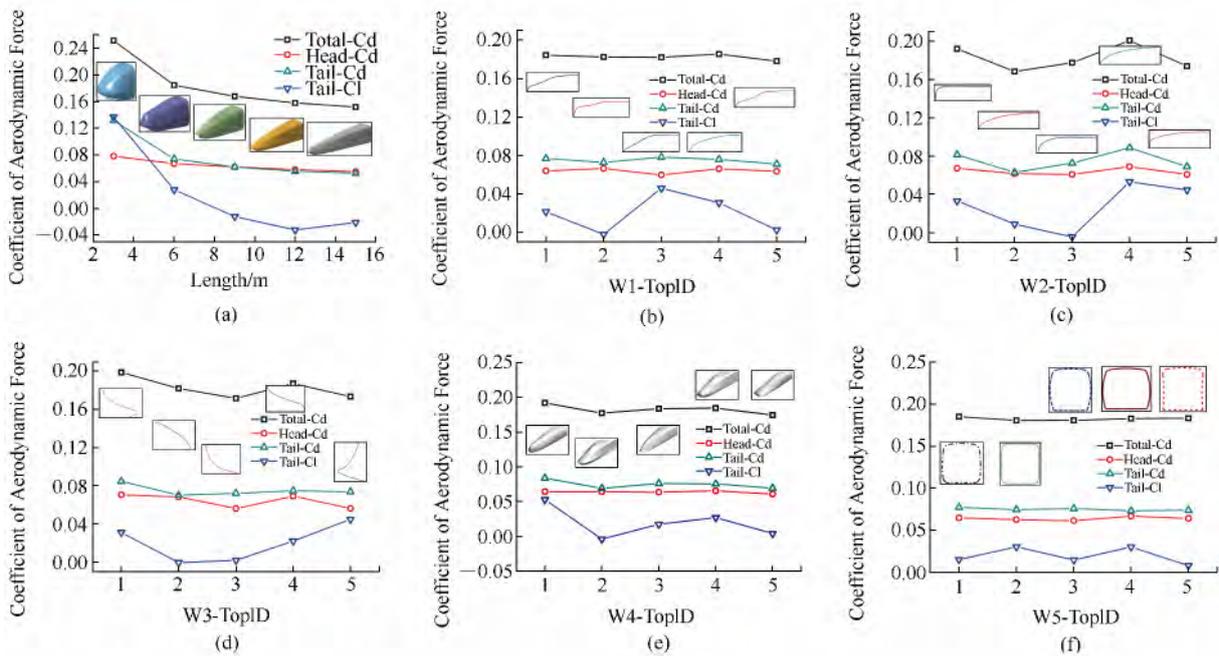


图 4 列车气动力随拓扑特征的变化曲线

从图 4(b)可以看出,头型纵剖面型线对列车阻力系数的影响较小,对尾车升力系数的影响较大。在 5 种拓扑结构中,第五种拓扑结构对应的整车和尾车阻力系数最小,且尾车升力系数的值也仅次于第二种拓扑结构,第三种拓扑结构对应的头车阻力系数最小,但对应的尾车升力系数最大,而尾车升力系数最小时对应于鼻锥尖端曲率最大的第二种拓扑结构。综合 5 种不同的头型纵剖面型线外形,以列车升阻力为设计指标,车体容积为约束条件时,应以第二种拓扑结构为宜,即鼻锥前端纵剖面外形呈现一定“钝头”型。

与头型纵剖面型线相比,头型水平剖面型线外形的变化引起的列车升、阻力波动较大,如图 4(c)所示。鼻锥前端的水平剖面型线曲率过大(第一种拓扑结构)和过小(第四种拓扑结构)都不利于降低列车的阻力和尾车升力,而曲率变化较为平缓的第二种拓扑结构对应的整车和尾车气动阻力系数均为最小,第三种拓扑结构对应的头车阻力系数和尾车升力系数最小。第五种拓扑结构的鼻锥前端有一定的钝度,对应的列车各部分的阻力系数均较小,但尾车升力系数却比较大。

因此,当综合考虑列车气动性能时,头型的水平剖面型线应以第二种拓扑结构为宜,即型线曲率较为平缓的从鼻锥前端向后过渡发展,应尽量避免型线曲率变化过快。

从图 4(d)可以看出,排障器的前倾型拓扑结构(第一、四、五种结构)得到的列车气动性能要差于第二和第三种后倾型拓扑结构。第一种拓扑结构得到的列车阻力系数最大,第五种拓扑结构得到的列车阻力系数较小,但尾车升力系数最大,第三种拓扑结构得到的整车和头车阻力系数最小,第二种拓扑结构得到的尾车阻力和升力系数最小。因此,如果头、尾车非对称设计,应将排障器设计为不同的类型,尤其是尾车,排障器的作用可以不考虑,应尽量设计为后倾型拓扑结构。如果头、尾车对称设计,排障器设计为第二种拓扑结构为宜,既可以充分发挥排障器排除杂物的作用,列车的升、阻力也可以得到较好的控制。

图 4(e)给出了司机室玻璃外形的变化对列车升、阻力系数的影响,可以看出,第二种拓扑结构得到的尾车升力和阻力系数均最小,第五种拓扑结构得到的整

车和头车阻力系数最小,而第一种拓扑结构得到的列车升、阻力系数最大。因此,司机室玻璃应设计为长方形,即第二种拓扑结构,如果设计为“梭型”,则司机室玻璃不宜过高。

对于 5 种不同拓扑外形的横截面,如图 4(f)所示,长形直壁截面得到的整车阻力系数最小,扁形鼓壁截面得到的头车阻力系数最小,长形鼓壁截面得到的尾车阻力系数最小,长形凹壁截面得到的尾车升力系数最小。可见,对于不同的气动指标,最优的截面形状并不一致,在进行头型设计时,应根据具体的设计指标确定车体截面外形,当综合考虑几个设计指标时,应根据主次顺序选取最优截面形状。

正交设计方法可以对试验结果进行极差分析,设 R_j 为第 j 个试验因素的极差,其反映该因素水平波动时,试验指标的变动幅度, R_j 的值越大,表明 j 因素水平变化时对试验指标的影响越大。因此,可以通过极差分析确定各设计部位的拓扑结构对列车气动力的影响程度。图 5 给出了各拓扑结构的极差分析结果,可以看出,对于每个气动指标,头型长度的影响度均为最大,而其他拓扑结构的影响度差别较大。如果不考虑头型长度,对于整车和尾车阻力系数,头型水平剖面型线的影响度最大,排障器纵剖面型线的影响度次之;对于头车阻力系数,排障器外形的影响度最大,头型水平剖面型线的影响度次之;对于尾车升力系数,头型水平剖面型线的影响度与司机室玻璃形状的影响度基本一致,头型纵剖面型线的影响度大于排障器外形和横截面形状的影响度。对 6 个设计部位的影响度由大到小进行排序为:头型长度 > 头型水平剖面型线 > 排障器外形 > 司机室玻璃形状 > 头型纵剖面型线 > 横截面外形。

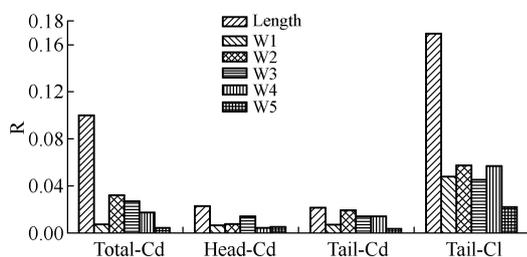


图 5 拓扑结构的极差分析图

图 6 给出各拓扑结构对不同气动指标的优水平组合外形,可以看出,各外形的差异较大。以整车阻力系数为设计指标时,横截面形状以长形直壁为宜,头型应设计为“竖铲”型,头型前端处的纵剖面型线曲率较大,横剖面型线曲率较小;以头车阻力系数为设计指标时,横截面形状以长形鼓壁为宜,头型应设计为扁宽型,且

司机室玻璃的高度应尽量降低,头型前端的纵剖面型线曲率较小,横剖面型线曲率较大;以尾车阻力系数为设计指标时,横截面形状以扁形鼓壁为宜,头型应设计为尖锥型,排障器外形以后倾弧形设计为宜;以尾车升力系数为设计指标时,横截面形状以长形凹壁为宜,头型应设计为“钝锥”形,排障器外形同样以后倾弧形设计为宜。上述分析仅是对各设计因素的最优水平进行简单组合后得到的结论,下文将分析简单组合外形是否为最优外形。

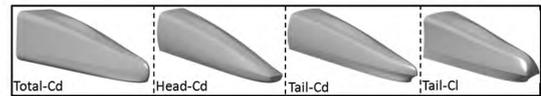


图 6 拓扑结构的优水平组合外形

图 7 给出了正交设计样本点的最优外形与各拓扑结构优水平组合外形的气动力系数,可以看出,以整车和头车阻力系数为试验指标的优水平组合外形的阻力系数均优于样本点的最优外形;以尾车阻力系数和升力系数为试验指标的优水平组合外形的阻力系数均差于样本点的最优外形,表明将每种拓扑结构的最优特征进行简单组合,得到的列车头型并不一定是最优外形,在有些情况下还不如次优特征的组合外形。当多种拓扑结构的相互影响较大时,若想从复杂多变的组合中得到最优外形,需要进一步研究各拓扑结构的相互作用对列车气动性能的影响。

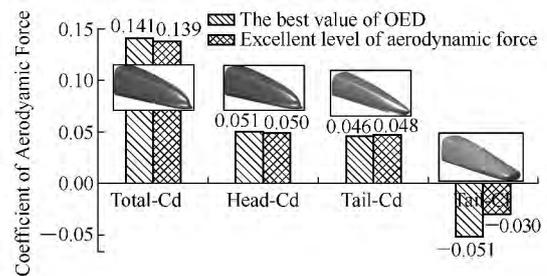


图 7 正交设计样本点的最优外形与优水平组合外形的气动力系数

4 拓扑结构对列车气动性能的耦合作用规律

4.1 交互作用正交试验表

通过上述分析可知,头型主要设计部位的相互干扰对列车气动性能的影响较大,在进行头型设计时,应充分考虑各设计部位的耦合作用对列车气动性能的影响,为此,本文以有交互作用的正交试验设计为基本手段,分析对列车气动性能影响最为明显的 3 个设计部位:头型长度、头型水平剖面型线和排障器外形的耦合作用。正交表设计为 $L_{27}(3^{13})$,即每个试验因素有 3 个

水平,其中,头型长度的 3 个水平分别为 3 m、9 m 和 15 m,水平剖面型线的 3 个水平分别对应图 3(b)中的 1、4 和 5,排障器外形的 3 个水平分别对应图 3(c)中的 1、2 和 3。试验指标为整车及头尾车阻力系数和尾

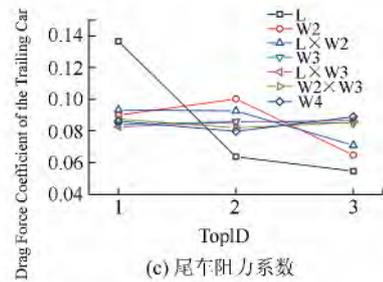
车升力系数。表头设计见表 3,只考虑 3 个主要设计部位的一级交互作用,并与横截面形状的单因素影响度进行对比。

表 3 考虑交互作用的正交表的表头

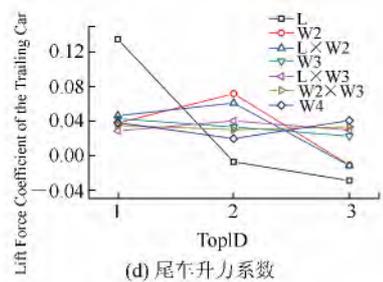
列号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
因素	L	W2	L×W2	L×W2	W3	L×W3	L×W3	W2×W3	空列	空列	W2×W3	空列	W5

4.2 气动力分析

图 8 给出了各设计因素对列车气动指标的影响曲线,可以看出,三水平影响曲线与图 4 中的五水平影响曲线基本一致。随着头型长度的增大,整车和头、尾车阻力系数以及尾车升力系数的值均越来越小,其他设计因素引起的列车气动系数值的波动明显小于头型长度引起的波动。由于没有考虑头型长度为 12 m 时的拓扑结构,尾车升力系数随头型长度的变化表现为单调关系,这也表明,当头型长度增大到一定数值时,其对尾车升力系数的影响度逐渐减弱。头型长度与水平剖面型线的交互作用 $L \times W2$ 引起的列车气动系数的波动要明显大于头型长度与排障器外形的交互作用 $L \times W3$ 和水平剖面型线与排障器外形的交互作用 $W2 \times W3$ 。 $W2 \times W3$ 对列车气动系数影响最小,尤其是对头车阻力系数的影响,可以忽略不计。总体来看,3 个设计部位的交互作用对列车气动升、阻力的影响程度与头型水平剖面型线、排障器外形和横截面形状的影响程度基本一致,在进行头型设计时,应充分考虑头型长度、头型水平剖面型线和排障器外形的交互作用,尤其是头型长度与水平剖面型线的交互作用 $L \times W2$ 。



(c) 尾车阻力系数

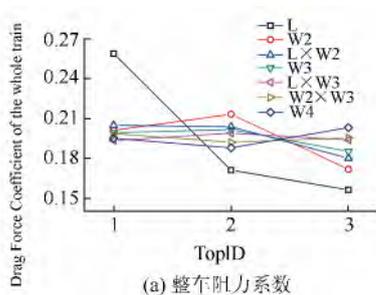


(d) 尾车升力系数

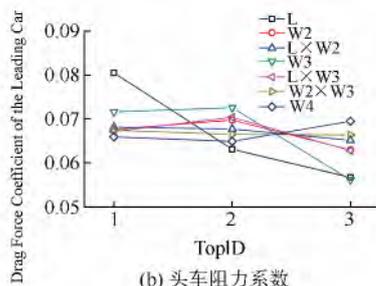
图 8 考虑交互作用时各设计因素对气动指标的影响曲线

4.3 极差分析

图 9 为考虑交互作用时各拓扑结构的极差分析图。



(a) 整车阻力系数



(b) 头车阻力系数

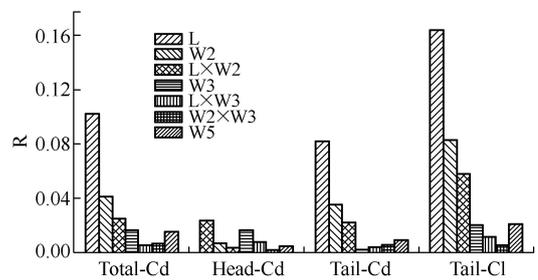


图 9 考虑交互作用时拓扑结构的极差分析图

可以看出,头型长度对列车气动系数影响最大,头型长度和水平剖面型线的交互作用 $L \times W2$ 对整车阻力系数、尾车阻力系数和尾车升力系数的影响度仅次于头型长度和水平剖面型线单独作用时的影响度。排障器外形对头车阻力系数的影响度仅次于头型长度的影响度,但是与其他拓扑结构相比,对尾车阻力系数的影响度最小。头型长度与排障器外形的交互作

用 $L \times W3$ 对头车阻力系数的影响度较大,而对整车阻力系数和尾车升力系数的影响度最小。水平剖面型线和排障器外形的交互作用 $W2 \times W3$ 对各气动指标的影响度都很小,可见,当进行头型减阻设计时,应充分考虑排障器外形与其他拓扑结构的交互作用,而针对尾车气动性能的外形设计时,可以忽略排障器与其他两个设计部位拓扑结构的交互作用。根据对所有气动指标的综合影响度由大到小排序为: $L > W2 > L \times W2 > W3 > W5 > W2 \times W3 > L \times W3$ 。由此可见,当进行头型气动性能外形设计时,应充分考虑头型长度与水平剖面型线的交互作用,而不能仅对各拓扑结构的优水平进行简单的组合。排障器外形与头型长度的交互作用及水平剖面型线和排障器外形的交互作用对列车气动性能的影响度相对较小。除头型长度外,其他设计部位对列车气动力的影响度与三参数交互作用的影响度在量级上差别不是很大,虽然 $W2 \times W3$ 和 $L \times W3$ 在数值上表现最小,但仍然需要慎重考虑它们对列车气动性能的影响。

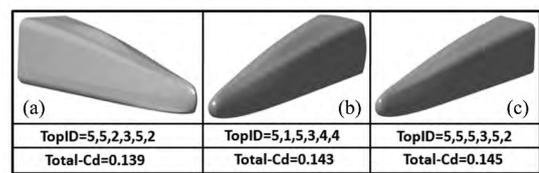
4.4 不同气动指标的合理拓扑结构

高速列车头型主要设计部位间的耦合作用对列车的气动性能影响很大,且各气动指标对应的优水平组合外形差异较大。为得到考虑交互作用时的优水平组合外形,进而确定各气动指标对应的合理拓扑结构,本文将逐一分析 3 个设计部位的交互作用对各气动指标的影响。

从图 8 可以看出,头型长度为 15 m 时,对应的列车在无横风条件下的各气动指标均为最优,且其对各气动指标的影响也远大于其他设计部位。因此,为减少交互作用的水平组合数,当考虑头型长度与水平剖面型线以及排障器外形的交互作用时,头型长度给定为 15 m,只改变另外两个设计部位的水平数,将组合数由 18 个减少到 6 个,而对最优拓扑结构的选取基本没有影响。

从图 10 可以看出,各设计部位对应的最优拓扑结构进行简单组合的外形整车阻力系数最小,而考虑交互作用时的优水平组合外形的整车阻力系数反而变大,当同时考虑单参数最优及三参数交互作用时,外形的整车阻力系数更大。对比图 10(a)和图 10(b),发现两种外形头型长度的最优值均是 15 m,排障器的拓扑结构一致,而其他 4 个部位的拓扑结构均不一致。为了控制正交表的行数,在进行三参数交互作用设计时,只选用了头型水平剖面型线的 3 种拓扑结构,没有考虑该设计部位的第二种拓扑结构,对比图 10(a)和图 10(c)可以发现,只有水平剖面的拓扑结构不一致,此时,第二种拓扑结构得到的外形整车阻力系数比第

五种拓扑结构得到的外形整车阻力系数减少了 4.14%,因此,当以整车阻力系数为设计指标时,头型水平剖面型线和排障器的拓扑结构应以图 10(a)所示为宜。对比图 10(b)和图 10(c)可以看出,对整车阻力系数影响最大的 3 个设计部位的拓扑结构一致,而头型纵剖面型线、司机室玻璃外形及横截面外形的拓扑结构不一致,而这 3 种拓扑结构不一致引起的整车阻力系数的变化仅为 1.38%。因此,当以整车阻力系数为设计指标时,应主要考虑头型长度、头型纵剖面型线及排障器外形的影响,而头型纵剖面型线、司机室玻璃外形及横截面外形的拓扑结构应主要依据列车的美学效果、车厢内部空间及加工工艺的要求进行选取。

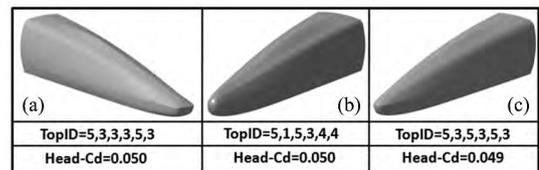


(a) 不考虑交互作用时的优水平组合外形

(b) 仅考虑三参数交互作用时的优水平组合外形

(c) 同时考虑单参数最优及三参数交互作用时的最优外形

图 10 整车阻力系数为设计指标



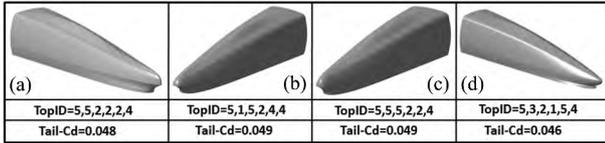
(a) 不考虑交互作用时的优水平组合外形

(b) 仅考虑三参数交互作用时的优水平组合外形

(c) 同时考虑单参数最优及三参数交互作用时的最优外形

图 11 头车阻力系数为设计指标

从图 11 可以看出,同时考虑单参数最优及三参数交互作用时的外形头车阻力系数比其他两种外形减小了 2%。对比图 11(a)和图 11(b),两种外形的头型长度和司机室玻璃的拓扑结构一致,其他设计部位的拓扑结构差异较大。图 11(a)的鼻锥为扁宽型,横截面为长形鼓壁,图 11(b)的鼻锥为锥型,横截面为扁形鼓壁,虽然两种外形的拓扑结构差别较大,但两者的头车阻力系数一致。对比图 11(a)和图 11(c),除了头型水平剖面型线,两种外形的其他设计部位的拓扑结构一致,但图 11(c)外形的头车阻力系数减小了 2%,表明纵剖面型线对头车阻力系数的影响较大。如果仅以头车阻力系数为设计指标,由于阻力系数的差别较小,图 11 给出的 3 种外形都可以作为设计参考外形,具体的选取应结合头型的美学效果、加工工艺及其他设计要求。



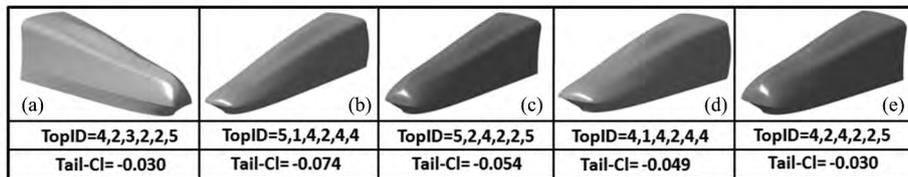
(a) 不考虑交互作用时的优水平组合外形
 (b) 仅考虑三参数交互作用时的优水平组合外形
 (c) 同时考虑单参数最优及三参数交互作用时的最优外形
 (d) 不考虑交互作用时的正交设计样本点的最优外形

图 12 尾车阻力系数为设计指标

从图 12 可以看出, 4 种外形的头型长度和横截面形状一致, 其他 4 个设计部位的拓扑结构变化较大, 进而导致 4 种外形的尾车阻力系数波动较大。对比图 12(a)、图 12(b)和图 12(c)可以发现, 3 种外形的排障器拓扑结构一致, 除头型纵剖面型线外, 图 12(a)和图 12(c)外形的其他设计部位的拓扑结构一致, 而两者的尾车气动阻力相差 2.04%, 图 12(b)和图 12(c)外形的头型长度、水平剖面型线、排障器外形和横截面形状的拓扑结构均一致, 只有头型纵剖面型线和司机室玻璃外形不同, 而两种外形的尾车阻力系数一致, 表明头型纵剖面型线和司机室玻璃外形对尾车阻力系数的影响度小于头型水平剖面型线。图 12(d)对应的外形在 4 种外形中的尾车阻力系数最小, 比图 12(b)和图 12(c)对应的外形减小了 6.12%, 与图 12(a)的外形相比, 两者的纵剖面型线、排障器外形和司机室玻璃形状的拓扑结构差别较大, 图 12(d)的尾车阻力系数减小了 4.17%, 表明这 3 个设计部位的拓扑结构对尾车阻力系数的影响度较大, 与图 5 中的极差分析结果一致。因此, 当以尾车阻力系数为设计指标时, 头型

6 个主要设计部位的交互作用应同时考虑, 而这样得到的正交表规模太大, 更为高效的方法是通过优化设计的方法寻找最优头型。通过图 12 可以得出, 扁宽型的横截面、尖锥型的鼻锥外形有利于降低尾车的阻力。

在设计三参数交互作用正交表时, 头型长度的拓扑结构仅选取了 3 m、9 m 和 15 m 3 个水平, 没有考虑 12 m 时的拓扑结构, 而从图 4(a)给出的头型长度对尾车升力系数的作用曲线可以看出, 在头型长度为 12 m 时, 尾车升力系数最小, 当头型长度增大到 15 m 时, 尾车升力系数有所增大, 因此, 应充分考虑头型长度为 12 m 时的情况。从图 13 可以看出, 5 种外形的排障器拓扑结构一致, 均为后倾凹形结构, 图 13(a)、图 13(d)和图 13(e)的头型长度为 12 m, 图 13(b)和图 13(c)的头型长度均为 15 m, 当头型长度一致、鼻锥为宽扁形拓扑结构时, 尾车升力系数更小, 而当头型长度由 15 m 减小到 12 m 时, 尾车升力系数增大, 这与图 4(a)的曲线变化形式不一致。主要原因为: 图 4(a)的曲线表示的是各个水平对应的气动力的平均值, 反映的是头型长度对列车气动力的一般作用规律, 对于某些情况, 并不能通过这条曲线反映出来, 尤其是不同设计部位间的耦合作用。因此, 图 13 的结论与图 4(a)的作用曲线并不矛盾, 且通过图 13 也可以得出, 头型长度与其他设计部位的耦合作用较强, 在进行头型设计时, 应充分考虑这种耦合作用。综合分析图 13 的 5 种外形, 可以得到结论: 当以尾车升力为设计指标时, 排障器应设计为后倾凹形, 头型长度不能太短, 以 12~15 m 为宜, 横截面外形应设计为扁形鼓壁, 且鼻锥的形状应为宽扁型。



(a) 不考虑交互作用时的优水平组合外形 (b) 仅考虑三参数交互作用时的优水平组合外形
 (c) 同时考虑单参数最优及三参数交互作用时的外形 (d) 考虑三参数交互作用时的优水平组合外形但头型长度为 12 m
 (e) 同时考虑单参数最优及三参数交互作用时的外形但头型长度为 12 m

图 13 尾车升力系数为设计指标

通过对各气动指标对应的合理拓扑结构的分析发现, 头型长度越长, 列车的气动性能越好, 但考虑到车体容积(主要影响司机室内设备的安装及头、尾车的载客量)、头型的美学效果以及加工工艺的可行性等约束条件, 当列车运行速度在 300 km/h 以上时, 头型长度应以 12~15 m 为宜, 而运行速度较低时, 可以适当缩

短头型长度。横截面形状以扁形鼓壁为宜, 在满足司机室视野的情况下, 司机室玻璃的高度应尽量减小, 当鼻锥前端的外形设计为尖锥型时, 有利于减小列车的阻力, 当设计为扁宽型时, 有利于减小尾车的升力。当列车运行的铁路环境较差时, 排障器应设计为后倾凹形, 以便在充分发挥排障器作用的前提下, 尽量提高列

车的气动性能,如果铁路表面基本无杂物,则可以考虑将排障器设计为后倾凸形,从而最大程度提高列车的气动性能。

5 结论

高速列车头型设计的优劣对列车气动性能的影响很大,本文采用数值模拟方法和正交试验设计,研究了头型 6 个主要设计部位的拓扑结构对列车明线运行时所受气动力的作用规律,研究结果表明:

(1) 头型长度、头型水平剖面型线和排障器外形的拓扑结构对列车气动性能的影响度较大,而头型纵剖面型线、司机室玻璃和车体横截面形状对列车气动性能的影响度相对较小,其中,头型长度对列车气动性能的影响最大,且随着头型长度的增加,列车的阻力系数逐渐减小,当头型长度达到一定值时,气动力系数的变化趋于稳定。

(2) 对各个设计部位的最优拓扑结构进行简单组合而得到的头型,其气动性能并不一定是最优的,不同设计部位间的耦合作用对列车气动性能的影响较大,在进行头型设计时应得到充分的重视。

(3) 针对不同气动力指标进行头型设计时,得到不同的列车头型。当对列车开展减阻设计时,头型长度不宜太短,鼻锥形状设计为锥型为宜,横截面形状以扁形鼓壁为宜,在满足司机室视野的情况下,司机室玻璃的高度应尽量减小,排障器外形应设计为后倾型。另外,当鼻锥设计为扁宽型时,有利于减小尾车的升力。

参考文献:

- [1] RAGHU S, RAGHUNATHAN H, KIM D, et al. Aerodynamics of High-speed Railway Train[J]. Progress in Aerospace Sciences, 2002, 38: 469-514.
- [2] 张健. 高速列车动车头形风洞试验研究[J]. 流体力学实验与测量, 1997, 6(2): 85-89.
ZHANG Jian. The Research on Nose Shapes of High Speed Train's Power Car with the Wind Tunnel Test[J]. Experiments and Measurements in Fluid Mechanics, 1997, 6(2): 85-89.
- [3] 田红旗. 列车空气动力学[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2007.
- [4] 黄志祥, 陈立, 蒋科林. 高速列车减小空气阻力措施的风洞试验研究[J]. 铁道学报, 2012, 34(4): 16-21.
HUANG Zhi-xiang, CHEN Li, JIANG Ke-lin. Wind Tunnel Test of Air-drag Reduction Schemes of High-speed Trains [J]. Journal of the China Railway Society, 2012, 34(4): 16-21.
- [5] 缪新乐, 李明, 姚勇, 等. 高速列车头车外形结构优化风洞试验研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2012, 9(2): 94-98.
MIAO Xin-le, LI Ming, YAO Yong, et al. Wind Tunnel Test Investigation on the Shape Optimization of Head Car of the High Speed Train[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2012, 9(2): 94-98.
- [6] 张在中, 周丹. 不同头部外形高速列车气动性能风洞试验研究[J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2013, 44(6): 2063-2068.
ZHANG Zai-zhong, ZHOU Dan. Wind Tunnel Experiment on Aerodynamic Characteristic of Streamline Head of High Speed Train with Different Head Shapes [J]. Journal of Central South University: Science and Technology, 2013, 44(6): 2063-2068.
- [7] 冯志鹏. 高速列车气动性能与外形设计[D]. 成都: 西南交通大学, 2011.
- [8] YANG G W, GUO D L, YAO S B, et al. Aerodynamic Design for China New High-speed Trains[J]. Science China Technological Sciences, 2012, 55(7): 1923-1928.
- [9] KRAJNOVIC S. Shape Optimization of High-speed Trains for Improved Aerodynamic Performance[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit, 2009, 223: 439-452.
- [10] Yo-Cheon Ku, Joo-Hyun Rho, Su-Hwan, et al. Optimal Cross-sectional Area Distribution of a High-speed Train Nose to Minimize the Tunnel Micro-pressure Wave[J]. Struct Multidisc Optim, 2010, 42: 965-976.
- [11] RHO J H, KU Y C, YUN S H, et al. Development of Vehicle Modeling Function for 3-Dimensional Shape Optimization[J]. Journal of Mechanical Design, 2009.
- [12] 李志西, 杜双奎. 试验优化设计与统计分析[M]. 北京: 科学出版社, 2010.

(责任编辑 聂清立)