

文章编号:1001-4888(2020)04-0659-10

高速列车转向架舱风洞试验研究^{*}

张业, 尚克明, 杜健, 齐凯文, 田洪雷, 林鹏

(中车青岛四方机车车辆股份有限公司 技术中心, 山东青岛 266111)

摘要: 针对高速列车转向架舱的几何外形特点,提取 5 个设计变量,设计了 6 种方案,对 1:8 比例 3 编组带路基、轨道及转向架舱的高速列车模型进行了 0° 及 -19.8° 侧偏角风洞试验研究,分析了转向架舱不同设计变量对应的高速列车气动阻力特性,得到了各设计参数的减阻效果。研究表明:转向架舱内顶面采用曲面过渡,前后壁面采用倾斜壁,裙板采用全包裙板,减小内壁纵向长度等措施,可以减小列车的气动阻力。通过不同设计变量对列车气动阻力的影响度分析,表明 0° 及 -19.8° 侧偏角 2 种情况下内顶面倒角及内壁纵向长度均对列车气动阻力有重要影响,上述研究结果对列车局部减阻及外形优化具有参考意义。

关键词: 高速列车; 风洞试验; 转向架舱; 气动减阻; 空气动力学

中图分类号: U266.2

文献标识码: A

DOI: 10.7520/1001-4888-18-249

0 引言

近些年,随着列车运行速度的提高及高速铁路运营里程的增加,高速列车的空气动力学问题如气动阻力、气动噪声、隧道压力波等受到越来越多的关注^[1-3]。气动阻力与列车运行速度的平方成正比,当列车运行速度提高时,气动阻力迅速增大。时速为 350km/h 的高速动车组,气动阻力占列车运行总阻力的 90% 以上,而气动阻力的增大将增加列车的能耗,影响列车节能减排的能力^[4-6]。现有的研究表明,列车的头尾车、转向架区域、车体连接处、受电弓系统等在列车的气动阻力中占有较大比重^[7,8]。8 编组高速列车在 350km/h 的运行速度下,转向架区域所受气动阻力可占总气动阻力的 27.4%^[9]。为了减小列车的气动阻力,国内外诸多学者从理论分析、数值计算及试验分析等方面进行了大量的研究。姚拴宝等^[10,11]针对头尾车的流线型进行了优化设计,通过合理设计头尾车的形状,减小了列车气动阻力。张建辉等^[12]在风洞试验中验证了加装导流罩及合理安装风挡等措施对受电弓区域减阻的作用。杨加寿等^[13]通过数值计算研究了车厢间风挡形式对列车气动阻力的影响。张业等^[14]详细分析了风挡缝隙宽度大小对列车气动阻力、升力及风挡内部流动特性的影响规律。李明等^[15]利用随行波微细结构在列车流线型等部位进行了表面减阻试验研究。杜健等^[16]以鲨鱼体表为仿生对象,开展了仿生非光滑沟槽降低湍流与车体壁面的摩擦阻力的数值计算研究。黄志祥等^[17]系统研究了加装空调导流罩、半封闭与全封闭风挡、转向架舱区域安装裙板等不同措施对列车气动阻力的影响。于庆斌^[18]通过测力、测压、丝线流态研究了受电弓在升弓、降弓状态下的气动特性。余以正等^[19]采用 CFD 及风洞试验的方法研究了不同排障器导流罩对高速列车阻力及升力的影响。

已有的研究大多针对列车的头尾车、受电弓系统、风挡等区域进行减阻研究,面向转向架舱减阻的研究尤其是试验研究相对较少,且少量已有的研究只关注裙板部分的减阻作用。转向架舱作为车底的重要部件,具有保护转向架及轮对、减小气流对轮对的直接冲击等作用,其外形的设计将影响转向架区

^{*} 收稿日期: 2018-11-12; 修回日期: 2019-06-09

通讯作者: 张业(1988—),男,博士,工程师。主要研究领域:气动外形参数化及优化设计。Email: lixuezhangye@126.com

域的气流状态,进而影响列车的气动阻力。本文在上述研究工作的基础上,以在中国空气动力研究与发展中心 $8\text{m} \times 6\text{m}$ 风洞开展的高速列车转向架舱试验研究为基础,总结和分析了转向架舱内壁面纵向长度、前后壁面形式、内顶面过渡形式、底部扰流板、裙板封闭程度等不同因素对列车气动减阻能力的影响,为高速列车减小空气阻力和局部外形优化提供了参考。

1 研究对象及设计参数

高速列车底部存在牵引电机、冷凝风机等电气设备以及转向架、轮对等走行部件,出于保护车下设备及改善列车空气动力学性能的考虑,动车组车下设备均配有设备舱,转向架区域设置有转向架舱,其包覆于转向架上方,每组转向架对应一组转向架舱,以 3 编组的动车组为例,转向架舱的位置及数量如图 1 所示。

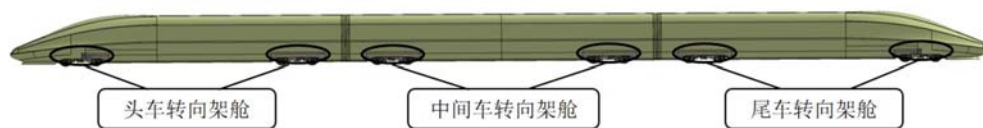


图 1 带有转向架舱的 3 编组列车示意图

Fig. 1 A 3-car train model with bogie cabins

转向架舱的基本形貌为向下开口的箱体结构,主要由裙板、端板以及顶盖板组成,如图 2(a)所示。转向架舱的长度、宽度、深度 3 个基本尺寸中,受到转向架和车体的外形及功能限制,宽度、深度 2 个尺寸不适于作为设计参数进行改动,长度尺寸在不影响转向架基本功能的前提下,可设计不同的尺寸进行研究,即图 2(b)中尺寸 L ;转向架舱的前后内壁面可采用倾斜壁和直壁面 2 种形式,即壁面与水平方向夹角 A 可为直角或钝角;底部边缘图示 B 位置可加装扰流板对底部气流进行扰动;根据已有的研究,安装裙板可以改善列车的局部气动性能,裙板根据安装尺寸的不同又可分为半封闭和全封闭裙板;内部前后壁面与顶面过渡位置,即 D 位置处可采用曲面过渡与平面 2 种形式。

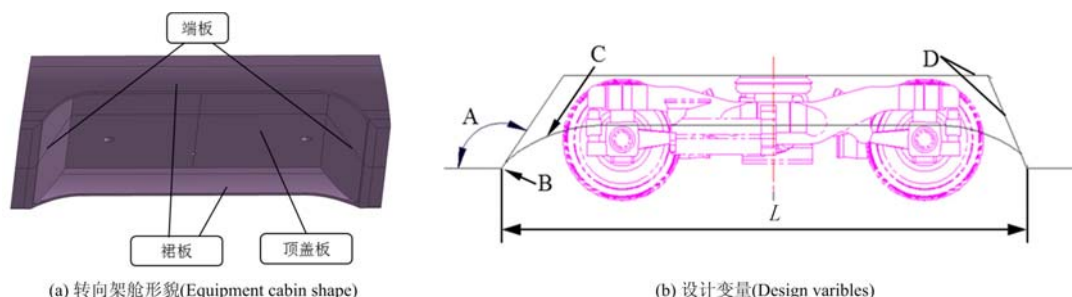


图 2 转向架舱形貌特征及主要设计变量

Fig. 2 Equipment cabin shape and design variables

为充分研究转向架舱不同形貌特征对列车气动性能的影响,本文提取转向架舱内壁纵向长度 L 、前后壁面斜/直形式 A、扰流板安装状态 B、裙板封闭程度 C、内顶面过渡形式 D 等 5 个设计变量,总共设计了 6 种方案以研究各个变量的影响规律。设计变量及不同方案的对应关系如表 1 所示。

表 1 设计变量及研究方案

Tab. 1 Design variables and research programme

	L/mm	壁面形式 A	扰流板 B	裙板封闭程度 C	内顶面过渡 D
方案一	4192	125°	无	半封闭	光滑曲面
方案二	4192	125°	无	半封闭	平面
方案三	4192	90°	无	半封闭	光滑曲面
方案四	4192	125°	有	半封闭	光滑曲面
方案五	4192	125°	无	全封闭	光滑曲面
方案六	4660	125°	无	半封闭	光滑曲面

与表1中对应的转向架舱外形如图3所示,其中,方案一、方案二内顶面过渡状态不同,方案一为曲面过渡,方案二为平面,其余设计变量相同;方案一、方案三前后壁形式不同,方案一为倾斜壁,方案三为直壁,其余设计变量相同;方案四在方案一的基础上加装了倾斜扰流板,扰流板与水平方向夹角 15° ,其余设计变量相同;方案一、方案五裙板封闭程度不同,方案一半封闭,方案五全封闭,其余设计变量相同;方案一、方案六为内壁纵向长度不同,其余设计变量完全相同。即方案一为对照组,不同方案与方案一相互对比以研究设计变量的影响规律。

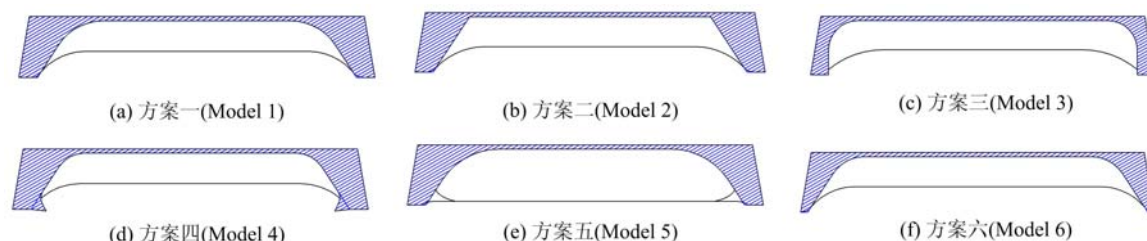


图3 不同设计变量对应的转向架舱外形

Fig. 3 Cabin shapes corresponding to different design variables

2 试验设备与模型

2.1 风洞

本文研究内容所需试验在中国空气动力研究与发展中心 $8\text{m}\times 6\text{m}$ 风洞第二试验段进行。 $8\text{m}\times 6\text{m}$ 风洞是闭口串联双试验段的大型低速风洞,第二试验段宽 8m 、高 6m 、长 15m ,列车模型试验常用风速 $20\text{m/s}\sim 70\text{m/s}$ 。

为匹配列车试验,试验段安装了新型列车试验地板。地板装置由4块地板拼接而成,地板上表面距风洞下洞壁 1.06m 。地板中间为直径 7m 、可旋转 360° 的转盘,转盘中心距地板前缘 7.83m ,距后缘 7.33m 。为了减小气流干扰带来的影响,地板前、后缘外形设计为流线型;每块地板后缘下表面装有扰流片,在地板之间的缝隙附近形成涡流低压区,可以吸引地板上表面气流,从而降低地板附面层厚度。安装列车试验地板后,试验段有效尺寸为长 15.16m 、宽 8m 、高 4.94m 、有效截面积 39.20m^2 。

2.2 天平及采集系统

试验采用3台列车模型试验专用天平(六分量盒式应变天平),分别对动车组模型的头车、中间车和尾车同时进行气动力和力矩的测量,测力天平位于模型内腔。由PXI系统采集试验模型各节车的测力试验数据,利用工控机系统进行角度和速压的控制,数据采集采用PXI总线,最高采样频率为 100kHz ,采集系统仪器的转换精度为 0.01% 。

2.3 模型

列车试验模型采用图1中所示的国产某型动车组列车,动车组试验模型比例为 $1:8$,编组方式为3车编组:头车+中间车+尾车。每节车安装2个转向架舱,共计6个。模型长度为 10.03m ,宽度为 0.42m ,高度为 0.50m 。为了充分模拟真实的列车运行工况,设计加工了相应的路基模型和轨道模型,路基及轨道部分总长度约为 14m ,路基2个端部距离列车模型的头尾部约 2.0m 。为了实现动车组模型的头车、中间车和尾车的单独测力,头车、中间车和尾车之间保持约 5mm 的间隙,各节车厢转向架车轮与轨道之间也保持约 5mm 的缝隙(同时保证车轮下表面与轨道上表面等高),从而使各节车厢成为独立的测力单元。试验模型方案除转向架舱外形不同外,其余模型结构均相同。列车模型在风洞试验段的安装如图4所示。



图4 风洞试验段及列车安装示意图

Fig. 4 Wind tunnel test section and train installation

2.4 试验条件

动车组模型安装的侧偏、倾斜、俯仰误差均控制在 $5'$ 以内, 试验风速为 65m/s , 测力试验数据采集按以下方式进行: 采样前延时设定为 5s , 采样时间设定为 5s , 每个通道采样频率为 500Hz 。试验中, 以动车组模型宽度为参考长度的雷诺数约为 1.75×10^6 。试验侧偏角范围为 $-24.23^\circ \sim 24.23^\circ$ 。在 0° 侧偏角下, 风洞堵塞度小于 1% , 在 30° 侧偏角下堵塞度小于 15% 。

风洞试验模拟的主要原理为几何相似和流动相似, 主要相似准则为雷诺数 Re 相似。研究表明, 列车风洞试验的气动力存在自模拟区, 即当 Re 接近 10^6 时, 气动力的试验结果随 Re 的增加变化很小, 由于本文所进行的试验 Re 约为 1.75×10^6 , 已进入自模拟区。

2.5 数据处理

各节车厢分别由独立的测力天平测量受到的气动阻力, 全车受到的空气阻力为 3 节车阻力之和, 阻力数据转化为相关的气动阻力系数进行分析, 即

$$C_d = \frac{F_d}{0.5 \rho S V^2}$$

式中, F_d 为空气阻力; ρ 为空气密度; V 为来流速度; S 为参考面积, 此处取列车模型的横截面积 0.187m^2 ; C_d 为相应的空气阻力系数。每节车厢的测力数据按体轴系给出, 各节车体轴系坐标原点位于车厢天平校心(与几何中心重合, 各节车厢的力矩中心即其体轴系坐标原点), X 轴正向与车体纵向中心线平行并指向车头方向(气动阻力以 X 轴负向为正), Y 轴方向垂直于列车底面向上, Z 轴方向按右手定则确定。采用列车头车鼻锥位置的驻点作为特征点, 各节车厢的力矩中心坐标位置以车头驻点位置为参照。定义车头驻点为坐标原点($X=0\text{mm}$, $Y=0\text{mm}$, $Z=0\text{mm}$)。车体轴系示意图见图 5。

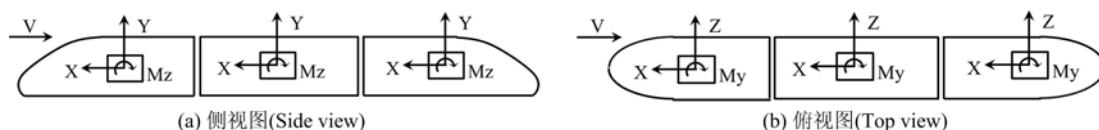


图 5 模型车体轴系示意图

Fig. 5 Coordinate system of the model

3 结果与分析

试验内容包括重复性试验、无横风试验(即侧偏角为 0°)、有横风试验(侧偏角为 -19.80°) 3 部分, 风速均为 65m/s 。

3.1 重复性试验

对动车组风洞模型在侧偏角 β 为 0° 、 -19.80° 下分别进行了 5 次测力重复性试验, 表 2 给出了头车、中间车及尾车的气动阻力系数重复性试验误差。从表中可以看出, 对于本文研究的 0° 及 -19.80° 两种侧偏角情况, 头车、中间车、尾车的测力重复性误差均小于 0.2% , 满足试验的精度要求。

3.2 无横风试验结果

试验内容分为无横风及有横风两部分, 首先在侧偏角 $\beta=0^\circ$ 即无横风条件下对各方案的气动阻力特性进行研究, 测量并统计了不同方案下各节车厢对应的气动阻力系数, 试验结果如图 6 所示。

从图 6 可以看出, 各方案均为头车、尾车阻力系数较大, 中间车较低。其中方案五的头车、尾车、中间车阻力系数均最小。以总气动阻力为评价指标, 各方案从小到大顺序为: 方案五 < 方案一 < 方案三 < 方案四 < 方案六 < 方案二, 即方案五综合性能最优。其中方案五对应的设计变量分别为较短内壁纵向长度、倾斜前后壁面、全封闭风挡、无扰流板、内顶面光滑曲面过渡。气动阻力最大的方案二对应的设计

表 2 重复性试验误差

Tab. 2 Repeatability error

$\beta/^\circ$	-19.80	0.00
头车	0.0007	0.0012
中间车	0.0011	0.0005
尾车	0.0017	0.0010

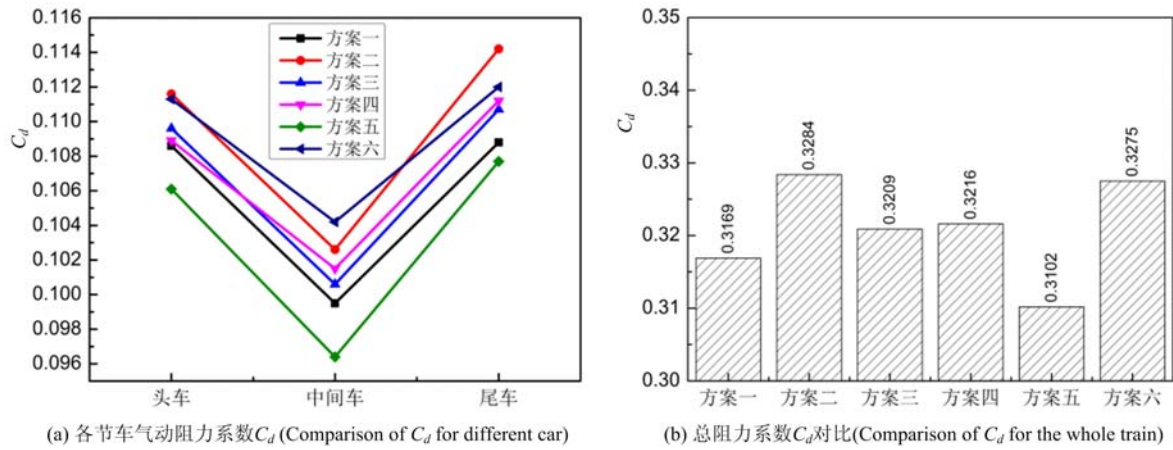


图6 无横风气动阻力系数对比

Fig. 6 Comparison of C_d without cross wind

变量分别为较短内壁纵向长度、倾斜前后壁面、半封闭风挡、无扰流板、内顶面平面过渡。可以看出, 2个最大最小气动阻力模型方案中有3个设计变量取值相同。造成这种现象的原因, 一方面可能是由于取值不同的2个变量内顶面过渡形式及裙板封闭程度在无横风气动阻力中占有重要影响, 另外一方面可能的原因因为其余相同的3个变量存在互相耦合影响, 以致突出了上面2个变量的作用。因此, 为研究单个设计变量改变带来的影响, 需要逐一分析不同方案与对照组即方案一的对比情况。

图7给出了内顶面平面过渡(方案二)与曲面过渡(方案一)2种工况的对比。内舱前后壁与顶面采用平面过渡时, 与曲面过渡方案相比, 头车阻力增加2.76%, 中间车阻力增加3.12%, 尾车阻力增加4.96%; 结合图6(b)可知总阻力增加3.63%。当前后壁面与顶面为相交的平面设计时, 流进转向架舱内部的气流在拐角处容易产生涡旋, 增加内部的杂乱紊流, 因此增大了局部的气动阻力。采用曲面过渡形式时, 在拐角等位置附近的空气流动更加平顺, 因此曲面过渡有利于列车的气动减阻。

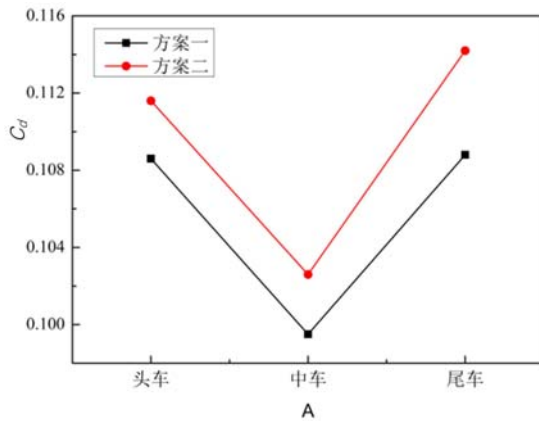


图7 内顶面曲/平面过渡气动阻力系数对比

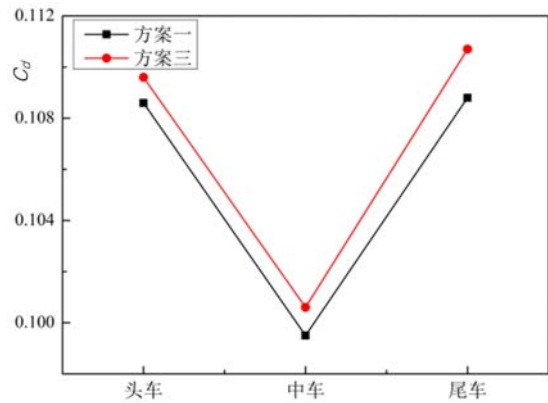
Fig. 7 Comparison of C_d between curved inner top surface and flat surface

图8 不同前后壁形式对应的气动阻力系数

Fig. 8 Comparison of C_d in different front and back wall forms

图8给出了转向架舱前后内壁为倾斜壁(方案一)与直壁(方案三)2种情况下的阻力对比。前后壁面改为直壁后, 各节车阻力略有增大: 头车增加0.92%, 中间车增加1.11%, 尾车增加1.75%, 总阻力增加1.26%。从阻力结果来看, 各节车阻力均有增加但尾车比头车与中车的阻力增幅更明显。这是由于改为直壁后, 转向架舱内腔空间增大, 流入内部的气流增加, 气流的扰动范围和程度增大。同时, 由于尾车处于尾迹区, 气流更加紊乱因而内舱空间增大, 尾车的阻力增加也更加明显。

图9给出了安装扰流板(方案四)后对列车气动阻力的影响, 带有倾斜扰流板的转向架舱气动阻力略有增大, 其中, 头车气动阻力增大0.27%, 中间车增大2.01%, 尾车增大2.21%, 总气动阻力增大

1.48%。根据已有的研究,倾斜角度为 0° 的扰流板可以一定程度上减小列车的气动阻力^[20],其机理为限制了流入转向架舱内部的气流。本文设计的扰流板与水平方向存在夹角,增大了转向架舱的迎风面积,同时在扰流板的边缘容易形成气流的分离,因此阻力比未安装扰流板增大。这说明扰流板的夹角是一个重要的设计参数,特定的夹角情况下才能够有利于转向架舱的减阻。

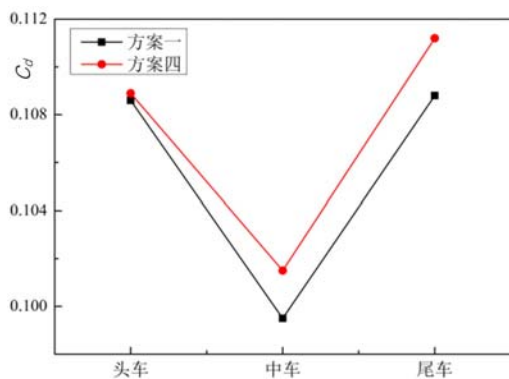


图 9 扰流板对列车气动减阻的影响

Fig. 9 Comparison of C_d in different spoiler installation

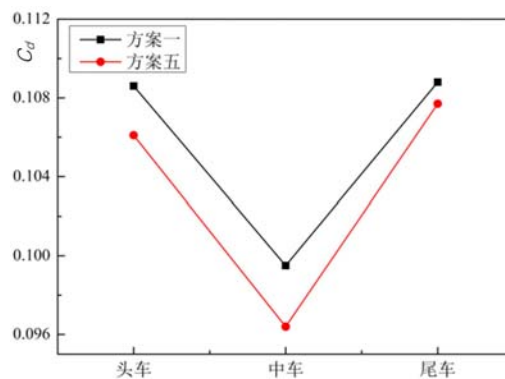


图 10 裙板长度对列车气动减阻的影响

Fig. 10 Comparison of C_d in different cabin skirt length

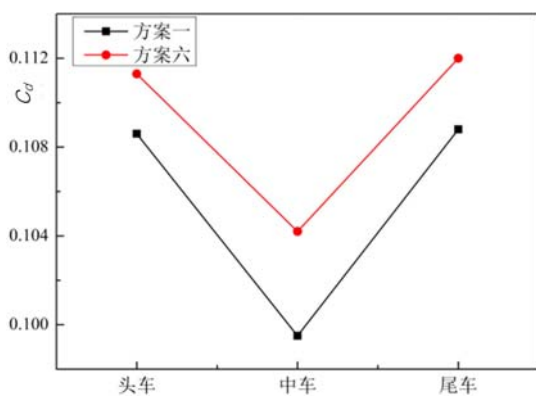


图 11 不同内壁纵向长度下各方案气动阻力对比

Fig. 11 Comparison of C_d in different inner wall longitudinal length

图 10 给出了裙板封闭程度对列车气动阻力的影响,方案一为半封闭裙板,方案五为全封闭裙板。裙板封闭面积增加,各节车气动阻力均有减小,其中,头车气动阻力减小 2.30%,中间车减小 3.12%,尾车减小 1.01%,总气动阻力减小 2.11%。裙板全封闭时,转向架外露的部分减少,舱内的紊流减弱,阻力下降。

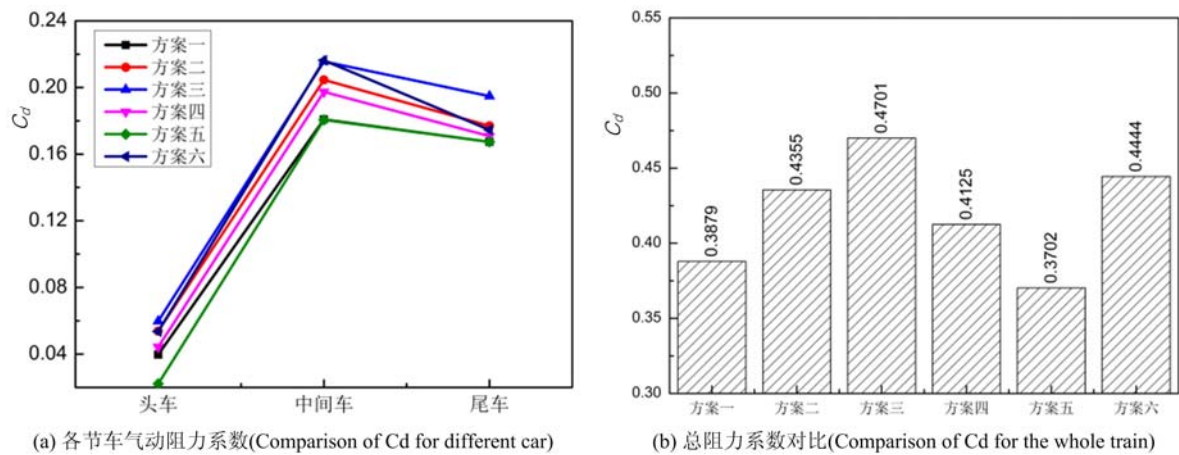
从图 11 中可以看出,转向架舱内壁纵向长度增大,列车的各节车厢气动阻力均有不同幅度增加;方案六内壁纵向长度比方案一增加 468 mm,相应的头、中、尾 3 节车气动阻力分别比方案一增加 2.49%、4.72%、2.94%,总气动阻力方案六比方案一增大 3.34%。可以看出,增大转向架舱的

内壁长度,对各节车的阻力变化影响规律是一致的,纵向长度增加,气流对转向架的直接作用增强,且转向架尾端与转向架舱后壁面之间的紊流增加,两者综合作用导致列车收到的气动阻力增加。

3.3 有横风试验结果

为研究在横风条件下,不同转向架舱设计变量对列车气动阻力的影响,在试验风速 65m/s,侧偏角为 -19.8° 的条件下,对方案一至方案六进行了气动阻力测量,列车模型及试验方法等保持与 0° 侧偏角试验相同。图 12 给出了试验测得的不同方案各节车厢对应的气动阻力系数对比。

从图 12 中可以看出,有横风条件下中间车阻力系数比其他 2 节车的阻力系数大,在无横风条件下,头车迎风面积大,压差阻力大,尾车附近存在尾涡,导致头尾车阻力大于中间车,横风时,中间车迎风面积增大且在背风区发展出背风涡结构,因而阻力系数要大于其他 2 节车。另外可以看出,方案五的头车、中间车、尾车的阻力系数均最小。同样以总气动阻力为评价指标,在有横风时各方案从小到大顺序为:方案五<方案一<方案四<方案二<方案六<方案三,即方案五综合性能最优。对比无横风时的结果,可以看出 2 个明显的特点:一是各方案总阻力顺序不同,即相同设计外形在有横风干扰时其气动性能也会随之改变,主要的原因因为施加横风后,从转向架舱侧面进入列车底部的气流增加,舱内流场与无横风条件下发生改变,列车受到的气动阻力也随之改变;二是方案五仍然为阻力最小,这说明通过合理控制转向架舱的设计变量,可以得到无横风气动阻力与有横风气动阻力均较小的结果。

图12 侧偏角 $\beta = -19.8^\circ$ 时气动阻力系数对比Fig. 12 Comparison of C_d in $\beta = -19.8^\circ$ condition

为分析横风条件下, 单个设计变量改变带来的影响, 图13~图17分别给出了不同方案与方案一的对比情况。图13给出了内顶面平面过渡(方案二)与曲面过渡(方案一)2种工况的对比。带侧偏角条件下, 其中头车阻力系数增加35.52%, 中间车增加13.16%, 尾车增加5.73%。结合图12(b)可知内顶面平面过渡比曲面过渡总气动阻力增大12.27%。可以看出, 有横风时改变转向架舱内顶面的过渡形式, 气动阻力的变化趋势与无横风条件下相同, 且由于横风条件下在列车背风侧会发展出背风涡结构, 气流涡旋在背风侧逐渐脱落和分离, 造成背风侧及列车后方存在负压区, 因此列车的气动阻力等参数随局部外形的变化要更敏感。

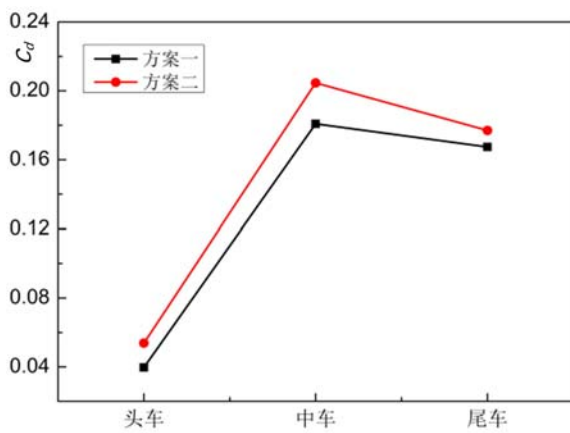


图13 横风条件下内顶面曲/平面过渡气动阻力系数对比

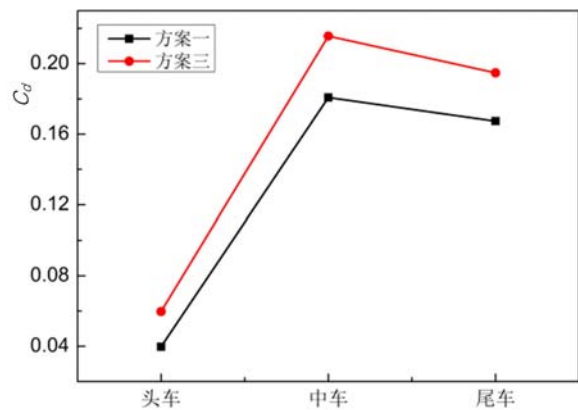
Fig. 13 Comparison of C_d between curved inner top surface and flat surface under cross wind

图14 横风条件下不同前后壁形式对应的气动阻力系数

Fig. 14 Comparison of C_d in different front and back wall forms under cross wind

图14给出了横风工况下, 转向架舱前后内壁为倾斜壁(方案一)与直壁(方案三)2种情况下的气动阻力对比。方案三比方案一头车增加50.38%, 中间车增加19.25%, 尾车增加16.37%, 总阻力增加21.19%。可以看出, 有横风时改变转向架舱前后内壁的形式, 气动阻力的变化趋势与无横风条件下相同, 即直壁时, 横风气动阻力增加。

图15给出了横风条件下, 安装扰流板(方案四)后对列车气动阻力的影响。其中, 头车气动阻力增大11.59%, 中间车增大9.18%, 尾车增大2.03%。图12(b)表明带有扰流板的转向架舱总气动阻力增大6.34%, 对比图9和图15可以看出, 有横风时转向架舱安装倾斜扰流板, 气动阻力的变化趋势与无横风条件下相同, 即安装倾斜扰流板, 横风气动阻力增加。

图16给出了横风条件下裙板封闭程度对列车气动阻力的影响, 全封闭裙板(方案五)比半封闭裙板

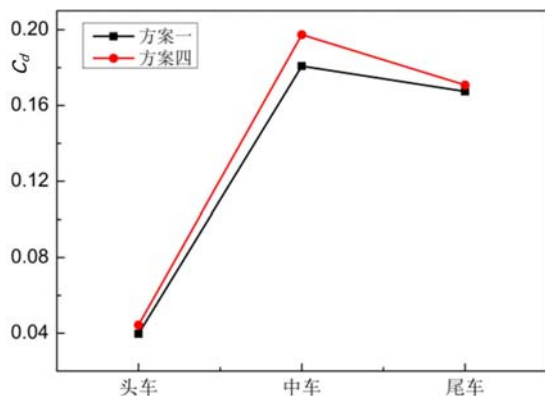


图 15 横风条件下扰流板对列车气动减阻的影响

Fig. 15 Comparison of C_d in different spoiler installation under cross wind

3.4 设计变量影响度分析

图 18 给出了转向架舱内壁纵向长度、前后壁面斜/直形式、扰流板安装状态、裙板封闭程度、内顶面过渡形式 5 个设计变量对气动阻力的影响度对比。

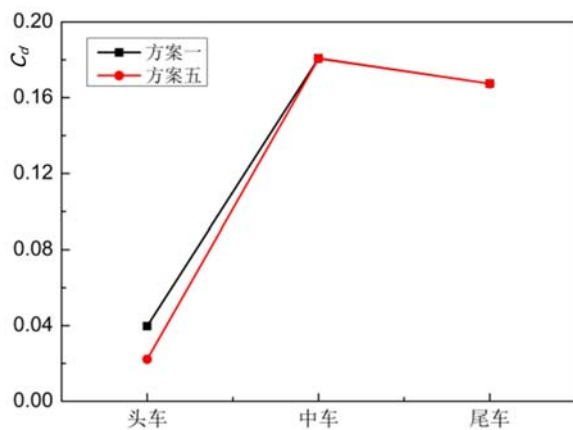


图 16 横风条件下裙板长度对列车气动减阻的影响

Fig. 16 Comparison of C_d in different cabin skirt length under cross wind

(方案一)头车气动阻力减小 44.08%,中间车减小 0.11%,尾车阻力基本不变,总气动阻力减小 4.56%。可以看出,有横风时封闭转向架舱裙板,气动阻力的变化趋势与无横风条件下相同,即全封闭裙板,横风气动阻力减小。

从图 17 中可以看出,横风条件下,转向架舱内壁纵向长度增大,列车的各节车厢气动阻力均有不同幅度增加;头、中、尾 3 节车气动阻力分别比方案一增加 35.01%、19.64%、4.24%,总气动阻力方案六比方案一增大 14.57%。有横风时增大转向架舱内壁面纵向长度,气动阻力的变化趋势与无横风条件下相同,即增加纵向长度,横风气动阻力增大。

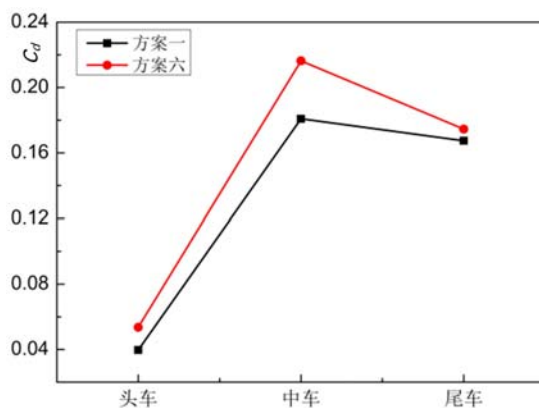
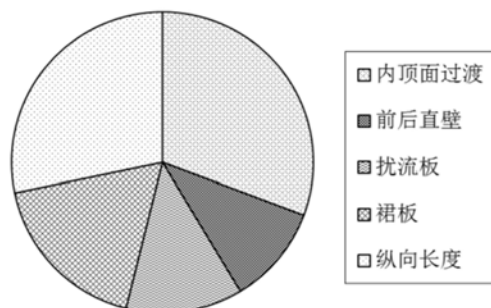
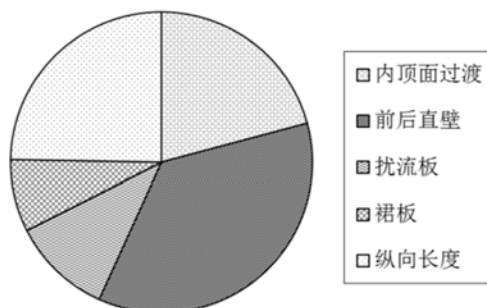


图 17 横风条件下不同内壁纵向长度下各方案气动阻力对比

Fig. 17 Comparison of C_d in different inner wall longitudinal length under cross wind



(a) 无横风(Without cross wind)



(b) 有横风(Under cross wind condition)

图 18 设计变量对气动阻力影响度对比

Fig. 18 Influence of design variables on aerodynamic drag

无横风条件下,5 个设计变量对气动阻力的影响度大小排序为:内顶面过渡形式>内壁纵向长度>裙板封闭程度>扰流板安装>前后壁形式。横风条件下,影响度大小排序为:前后壁形式>内壁纵向长

度>内顶面过渡形式>扰流板安装>裙板封闭程度。2种工况下,内顶面过渡形式及内壁纵向长度的影响度均明显大于其他设计变量,说明这2个设计参数对转向架舱的气动性能具有重要影响。

4 结论

(1) 0° 及 -19.8° 两种侧偏角条件下,不同设计方案的气动阻力规律一致,试验结果表明,转向架舱内顶面采用曲面过渡,前后壁面采用倾斜壁,裙板采用全包围裙板,减小内壁纵向长度等措施,可以减小列车的气动阻力。

(2) 0° 及 -19.8° 两种侧偏角条件下,内顶面过渡形式及内壁纵向长度的影响度均明显大于其他设计变量。

(3) 综合各种设计变量的影响,当转向架舱的外形设计采用减小内舱空间、平顺内部气流、减小转向架的裸露面积等措施,有利于优化转向架舱区域的流动状态,进而减小列车的气动阻力。

参考文献:

- [1] Raghunathan R S, Kim H D, Setoguchi T. Aerodynamic of high-speed railway train[J]. Progress in Aerospace Sciences, 2002, 38(6-7):469—514.
- [2] Schetz J A. Aerodynamic of high-speed trains[J]. Annual Review of Fluid Mechanics, 2001, 33(1):371—414.
- [3] Baker C J. The flow around high speed trains[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2010, 98:277—298.
- [4] Muñoz-Paniagua J, García J, Crespo A. Genetically aerodynamic optimization of the nose shape of a high-speed train entering a tunnel[J]. Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics, 2014, 130:48—61.
- [5] Krajnovic S. Shape optimization of high-speed trains for improved aerodynamic performance[C]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part F Journal of Rail & Rapid Transit, 2009, 223(5):439—452.
- [6] Sun Z X, Song J J, An Y R. Optimization of the head shape of the CRH3 high speed train[J]. Science China: Technological Sciences, 2010, 53(12):3356—3364.
- [7] 杨国伟,魏宇杰,赵桂林,等. 高速列车的关键力学问题[J]. 力学进展, 2015, 45(1):217—460 (YANG Guowei, WEI Yujie, ZHAO Guilin, et al. Current research progress in the mechanics of high speed rails[J]. Advances in Mechanics, 2015, 45:217—460 (in Chinese))
- [8] Orellano A, Sperling S. Aerodynamic improvements and associated energy demand reduction of trains[M]. The Aerodynamics of Heavy Vehicles II: Trucks, Buses, and Trains. Springer Berlin Heidelberg, 2009: 219—231.
- [9] 姚拴宝,郭迪龙,杨国伟,等. 高速列车气动阻力分布特性研究[J]. 铁道学报, 2012, 34(7):18—23 (YAO Shuanbao, GUO Dilong, YANG Guowei, et al. Distribution of high-speed train aerodynamic drag[J]. Journal of the China Railway Society, 2012, 34(7):18—23 (in Chinese))
- [10] YAO Shuanbao, GUO Dilong, SUN Zhenxu, et al. Multi-objective optimization of the streamlined head of high-speed trains based on the Kriging model[J]. Science China Technological Sciences, 2012, 55(12):3494—3508.
- [11] YAO Shuanbao, GUO Dilong, YANG Guowei. Three-dimensional aerodynamic optimization design of high-speed train nose based on GA-GRNN[J]. Science China Technological Sciences, 2012, 55(11):3118—3130.
- [12] 张建辉,杨炯,姚勇. 高速列车受电弓减阻的风洞试验研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2010, 7(6): 116—121 (ZHANG Jianhui, YANG Jiong, YAO Yong. Wind tunnel test investigation on pantograph drag reduction of high speed train[J]. Journal of Railway Science and Technology, 2010, 7(6): 116—121 (in Chinese))
- [13] 杨加寿,蒋崇文,高振勋,等. 车厢间风挡形式对高速列车气动性能的影响[J]. 铁道学, 2012, 34(11):30—35 (YANG Jiashou, JIANG Chongwen, GAO Zhenxun, et al. Influence of inter-car windshield schemes on aerodynamic performance of high speed trains[J]. Journal of the China Railway Society, 2012, 34(11):30—35 (in Chinese))
- [14] 张业,孙振旭,郭迪龙,等. 风挡缝宽对高速列车气动性能的影响[J]. 铁道学报, 2017, 39(3):19—24 (ZHANG Ye, SUN Zhenxu, GUO Dilong, et al. Effects of windshield slot width on aerodynamics of high-speed trains[J]. Journal of the China Railway Society, 2017, 39(3):19—24 (in Chinese))
- [15] 李明,李明高,李国清. 高速列车表面随行波微细结构减阻技术研究[J]. 铁道车辆, 2017, 55(2): 12—16 (LI

- Ming, LI Mminggao, LI Guoqing. Study on the drag reduction of high-speed train based on the traveling wave microstructure[J]. Rolling Stock, 2017, 55(2): 12–16 (in Chinese))
- [16] 杜健, 龚明, 田爱琴, 等. 基于仿生非光滑沟槽的高速列车减阻研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2014(5): 70–76 (DU Jian, GONG Ming, TIAN Aiqin, et al. Study on the drag reduction of the high-speed train based on the non-smooth riblets[J]. Journal of Railway Science and Technology, 2014(5): 70–76 (in Chinese))
- [17] 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 Zhixiang, CHEN Li, JIANG Kelin. Wind tunnel test of air-drag reduction schemes of high-speed trains [J]. Journal of the China Railway Society, 2012, 34(4): 16–21 (in Chinese))
- [18] 于庆斌. 城际动车组风洞试验研究[J]. 兰州交通大学学报, 2015, 34(4): 141–145 (YU Qingbin. The wind tunnel aerodynamic test of intercity EMU[J]. Journal of Lanzhou Jiaotong University, 2015, 34(4): 141–145 (in Chinese))
- [19] 余以正, 姜旭东, 孙健. 不同排障器导流罩对高速列车阻力及升力的影响[J]. 大连交通大学学报, 2017, 38(6): 30–34 (YU Yizheng, JIANG Xudong, SUN Jian. Drag force and lift force performance of a high speed train affected by different cowcatcher air-deflector. [J]. Journal of Dalian Jiaotong University, 2017, 38(6): 30–34 (in Chinese))
- [20] 张业. 高速列车参数化方法研究及整车气动外形优化设计[D]. 中国科学院大学, 2017 (ZHANG Ye. The study on parameterization methods of the high-speed train and optimization design for the whole train [D]. University of Chinese Academy of Sciences, 2017 (in Chinese))

Experimental study on high-speed train bogie cabins in wind tunnel

ZHANG Ye, SHANG Ke-ming, DU Jian, QI Kai-wen, TIAN Hong-lei, LIN Peng

(R&D Center, CRRC Qingdao Sifang Co., Ltd., Qingdao 266111, China)

Abstract: According to the geometrical characteristics of high-speed train bogie cabins, five design variables are extracted and six schemes are designed. The 1 : 8 scaled high-speed train model with subgrade, track and bogie cabin is tested in wind tunnel, and the side slip angles of 0° and -19.8° are used in experiments. The aerodynamic drag characteristics of high-speed train corresponding to different design variables of bogie cabins are analyzed, and the drag reduction effect of each design parameter is obtained. The results show that the aerodynamic drag of the train can be reduced when the top surface of the cabin adopts the curved transition, the front and rear walls adopt inclined walls, the skirt adopts the fully enclosed skirt plate, and the longitudinal length of the inner wall is reduced. The influence of different design variables on the aerodynamic drag is analyzed, which indicates that the inner top chamfer and the longitudinal length of the inner wall have important influences on the aerodynamic drag of the train with side slip angles of 0° and -19.8° . The results have great significance for understanding the local drag reduction and the shape optimization of the train.

Keywords: high-speed train; wind tunnel test; bogie cabin; drag reduction; aerodynamics