

文章编号:1671-1637(2013)06-0036-11

## 高速列车抗风的抽吸减载方法

郝艳红<sup>1</sup>,毛 军<sup>1</sup>,高 亮<sup>1</sup>,杨国伟<sup>2</sup>

(1. 北京交通大学 土木建筑工程学院,北京 100044; 2. 中国科学院 力学研究所,北京 100190)

**摘要:**为了提高列车在大风中运行的安全性,利用抽吸气法控制列车绕流边界层分离,以减小横风气动力。以中国CRH型高速列车为原型,在车体内设计了腔室,并通过条缝与列车表面相连,使列车表面的绕流经列车表面条缝流入腔室内,形成抽吸效应。研究表明:抽吸气腔室和条缝的设置能够在列车高速行驶时产生低于车体外部绕流的压力,有效地控制边界层的分离和减小列车的横风气动力。条缝倾角对气动减载效果有明显影响,当条缝倾角为 $30^\circ$ 时,总阻力的减载幅度可达7.21%;头车、中间车与尾车的横向力分别减载4.85%、2.71%与90.48%;头车、中间车与尾车的升力分别减载8.21%、12.56%与7.69%;头车、中间车与尾车的倾覆力矩减载幅度分别为5.29%、8.84%与57.56%。条缝倾角对不同车段气动减载率的影响不同,尾车受条缝倾角影响的程度最大。

**关键词:**高速列车;风阻;减载方法;抽吸效应;气动特性;横风

**中图分类号:**U270.11 **文献标志码:**A

### Load-shedding method based on suction effect to improve wind drag of high-speed train

XI Yan-hong<sup>1</sup>, MAO Jun<sup>1</sup>, GAO Liang<sup>1</sup>, YANG Guo-wei<sup>2</sup>

(1. School of Civil Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China;

2. Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

**Abstract:** In order to improve the safety of train in crosswind, a new method for safety control using suction effect was discussed to control the separation of airflow boundary layers and to decrease the crosswind aerodynamic force on train. Taking CRH high-speed train of China as prototype, the pumping chambers were added in train body, and the outer surface of train was connected with pumping chambers by slots. When train was running at high speed, airflow was sucked into pumping chambers through slots to form suction effect. Analysis result indicates that the installing of pumping chambers and slots can make the pressure inside train lower than its outside airflow pressure when train is running at high speed. The separation of airflow boundary layers can be effectively controlled. The crosswind aerodynamic force on train decreases. Slot inclination angle has significant effect on decreasing crosswind aerodynamic force. When inclination angle is  $30^\circ$ , the decrease of total resistance is 7.21%. The decrease of lateral force is 4.85% for the first vehicle, 2.71% for the middle vehicle, and 90.48% for the last vehicle. The decrease of lift is 8.21% for the first vehicle, 12.56% for the middle vehicle, and 7.69% for the last vehicle. The decrease of overturning moment is 5.29% for the first vehicle, 8.84% for the

收稿日期:2013-06-18

基金项目:国家自然科学基金项目(51278032);中国博士后科学基金项目(2013M530520);“十一五”国家科技支撑计划项目(2009BAG12A03C)

作者简介:郝艳红(1980-),女,河北唐山人,北京交通大学讲师,工学博士,从事高速列车空气动力学与行车安全研究。

middle vehicle, and 57.56% for the last vehicle. Slot inclination angle has different effects on the aerodynamic load-shedding rates of different vehicles. The impact of slot inclination angle on the last vehicle is greatest. 3 tabs, 14 figs, 18 refs.

**Key words:** high-speed train; wind drag; load-shedding method; suction effect; aerodynamic characteristic; crosswind

**Author resume:** XI Yan-hong (1980-), female, lecturer, PhD, +86-10-51688339, 06121404@bjtu.edu.cn.

## 0 引 言

列车高速运行所引起的空气动力学问题十分复杂和突出。特别是在大风条件下高速运行时,存在着不容忽视的安全风险,如果不能科学的防范和应对,将造成重大的经济损失和人员伤亡<sup>[1-4]</sup>。为了提高列车在大风中运行的安全性,目前常用的方法是在高速铁路沿线设置挡风风障,或是对列车进行限速。在风障方面,Wilson 等对通过多孔风障的气流进行了扰动分析,得到风障可以减小风速的结论<sup>[5]</sup>;Santiago 等通过对风障孔隙率的研究,认为当孔隙率为 0.35 时,挡风效果最好<sup>[6]</sup>;姜翠香等研究了风障高度和设置位置对车辆气动性能的影响<sup>[7]</sup>;刘风华对不同类型挡风墙的安全防护效果进行了对比分析<sup>[8]</sup>;董香婷等对列车在侧风环境下的三维绕流情况进行了数值模拟,分析了不同开窗情况对列车运行安全的影响<sup>[9]</sup>。在列车限速方面,主要研究了不同横风风速与列车最大安全运行速度之间的对应关系。任尊松等提出不同侧风风速下高速列车的最高安全运行速度<sup>[10]</sup>;郝艳红等分别对 25 个工况的车辆轨道动力学性能进行仿真计算和对比分析,结合国家标准和技术规范,给出了 CRH3 型列车在平地上运行时,横风风速与列车最大安全运行速度之间的对应关系,为横风作用下的列车运行安全控制提供参考<sup>[11]</sup>。

由以上分析可知,在高速铁路沿线设置挡风装置或是对列车进行限速,能够提高列车在大风中运行安全性。但它相当于一项铁路的辅助工程,而且并未提高列车自身的抗横风能力。在如何提高列车自身的抗风能力方面研究很少,仅见日本的葛原道久提出了可以通过控制车体绕流附面层的方法来降低横风的危害,在列车顶部设置了旋转圆柱体(圆柱体的轴线垂直于车顶),并通过数值模拟方法模拟了列车周围的流场分布和气动力变化情况,发现添加旋转圆柱体后,列车的气动力减少,同时也证实了在旋转圆柱体周围产生的涡旋对控制边界层起非常大

的作用<sup>[12]</sup>,因此,本文运用边界层控制的基本原理,探讨和分析采用抽吸原理提高列车自身抗风能力的新方法。

边界层的分离是在流体受到黏性作用而在壁面附近的流动动量变小,流动不能克服逆压梯度时发生的。若给壁面附近的流体输入一定的能量,就能减弱或抑制分离。控制措施之一是在物体表面适当设置吹吸结构,使流动的速度发生变化,以此改善尾流的涡旋特性和物体的受力状况,对物体绕流的分离进行控制。

Williams 等对表面布置吹吸孔圆柱的流动进行了试验与数值模拟,发现适当的吹吸可抑制尾涡卡门涡街的形成,甚至使其完全消失<sup>[13-14]</sup>;Ling 等计算了由多孔介质组成的方柱的绕流问题,讨论了表面吹吸对尾流涡旋脱落频率的影响<sup>[15]</sup>;凌国平等用速度-涡量法求解了具有表面吹吸圆柱的绕流问题,研究了各种吹吸位置、吹吸强度对圆柱尾流涡旋结构、阻力与升力系数的影响规律,指出在圆柱肩部的吸气和在圆柱尾部的吹气,可有效地抑制尾流涡旋结构在垂直来流方向上的非对称性,达到减小升力的目的,对在圆柱肩部吸气的情形,合理选择吸气强度,还可有效减小圆柱在来流方向上所受的阻力<sup>[16]</sup>;Muralidharan 等也利用数值模拟的方法证明了抽吸装置能够抑制涡激振动<sup>[17]</sup>。

从绕流流动的角度看,列车在大风中的运动,相当于列车静止不动,横风与列车前方来流(流速等于车速)共同绕流列车。绕流流动在列车的表面产生边界层,边界层在列车背风侧偏上位置产生分离,形成分离旋涡运动。由于边界层分离往往导致阻力和流动损失增加,因此,应设法减弱或消除边界层的分离。有效方法之一是在边界层发生分离之前抽吸边界层内被阻滞的流体。抽吸方法最早由普朗特进行试验研究和证实,在机翼设计中得到了广泛应用,因此,本文拟探讨采用抽吸原理改善列车背风侧的涡流特性,降低列车所受横向力与绕轨顶倾覆力矩等气动力的方法。

## 1 抽吸减载方案设计原理

抽吸原理应用于减小高速列车横向气动力的关键是需形成负压腔室,使腔室内的压力低于外部压力,将列车表面被黏性阻滞的流体抽走。

假定大气内有一定壁厚 $\Delta$ 的管腔,速度为 $V_\infty$ 的来流绕流该管道,将形成外流和内流同时存在的情况,见图1。当来流流经管道时,如果考虑管道的壁厚,则管道外流的起始段产生流动分离,经过一段距离后重新附着于管道外壁面。随后沿流动方向的压力下降并不明显,即逆压梯度较小。如果为了减小起始段管道壁厚的影响,可以将入口管壁加工成楔形,既改善外部绕流起始段的流动,又减小管道入口的压力损失。来流速度很高时,管道外壁面附近存在湍流边界层。

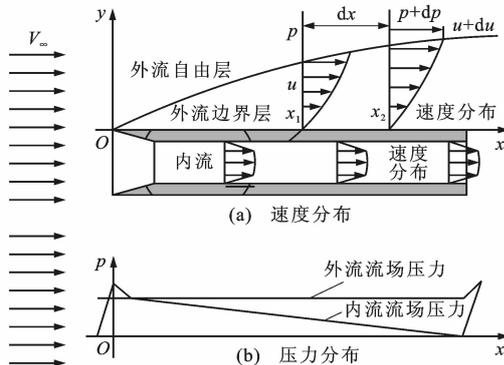


图1 气体绕流管道的内、外流的速度和压力沿程变化  
Fig.1 Changes of velocity and pressure of airflow inside and outside pipes along pipeline

### 1.1 管道外流的纵向压力梯度

管道外流在近壁区存在图1所示的边界层,边界层沿 $y$ 方向(即与壁面垂直的方向)的厚度为 $\delta$ 。根据边界层理论,边界层内的压力与边界层外缘处的压力具有相同的量级,当壁面曲率很小时,可以忽略压力沿 $y$ 方向的变化,即 $\partial p/\partial y = 0$ ,而用 $dp/dx$ 代表同一 $x$ 位置的边界层内的流体所承受的流向压力梯度。若求出 $dp/dx$ ,则可计算出管表面的纵向压力分布,并与管内压力进行对比。

边界层与自由流的交界线见图1。设流体密度和重力加速度分别为 $\rho$ 、 $g$ ,流体质点在交界线上 $x_1$ 点的速度、压力和位置高度分别为 $u$ 、 $p$ 和 $y$ ,则运动到 $x_2$ 点后的速度、压力和位置高度分别为 $u+du$ 、 $p+dp$ 和 $y+dy$ , $x_1$ 、 $x_2$ 两点的流动参数满足沿流线的伯诺里方程

$$\frac{p}{\rho g} + \frac{u^2}{2g} + y = \frac{p+dp}{\rho g} + \frac{(u+du)^2}{2g} + y+dy \quad (1)$$

对于气体,忽略高阶无穷小量,可得

$$\frac{dp}{\rho g} + \frac{udu}{g} = 0 \quad (2)$$

或

$$\frac{dp}{dx} = -\rho u \frac{du}{dx}$$

可见,管道表面的纵向压力梯度与壁面附近自由流与边界层交界线的速度 $u$ 和速度流向梯度 $du/dx$ 有关,涉及到边界层的解法。对于外形复杂的高速列车,其边界层是复杂的三维紊流边界层,虽然雷诺数很高,可作为薄边界层处理,但理论和试验研究都很少,而且边界层内流的解析求解比较困难,需进行数值求解,因此,可由边界层外的湍流核心区区的无黏自由流确定 $u$ 。本文采用了在近壁面区使用壁面函数法,在核心区流动采用湍流模型进行数值求解,从而获得 $u$ 和 $p$ 的变化规律。

### 1.2 管道内流的流向压力梯度

对于等截面的管道内流,根据伯诺里方程和连续性方程,管内过流断面的平均流速不变,但在壁面摩擦的作用下,产生沿程压力损失,即沿着流动方向,管内的压力逐步降低,从而使得管内的压力低于管外压力。压力损失为

$$\Delta p = \frac{\lambda \rho \bar{V}^2}{2d} \quad (3)$$

$$\text{或} \quad \frac{dp}{dx} = \frac{\Delta p}{l} = \frac{\lambda \rho \bar{V}^2}{2d}$$

沿程损失系数 $\lambda$ 为

$$\lambda = 0.11 \left( \frac{k}{d} + \frac{68}{Re} \right)^{0.25} \quad (4)$$

式中: $\bar{V}$ 为管内过流断面的平均流速,由于管道内流的阻力比外流的大,内流和外流的流量分配不同,内流的平均流速小于来流速度,由管道流动的数值模拟可知其约为来流速度的 $4/5$ ;  $l$ 为气体从管端开始在管内流过的距离; $k$ 为管壁当量粗糙度; $Re$ 为雷诺数; $d$ 为管内过流断面的水力直径。

本文中管道的矩形断面为 $180 \text{ mm} \times 140 \text{ mm}$ ;  $d$ 约为 $157.5 \text{ mm}$ ;  $k$ 为 $0.045 \text{ mm}$ ; 相对粗糙度 $k/d$ 为 $2.86 \times 10^{-4}$ ;  $\rho$ 为 $1.205 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ 。

假定管内平均流速为 $30 \sim 90 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,则 $Re$ 为 $2.59 \times 10^5 \sim 7.77 \times 10^5$ ,由式(4)计算得到 $\lambda$ 取值范围为 $1.528 \times 10^{-2} \sim 1.681 \times 10^{-2}$ ;根据式(3)可算出不同流速下流体沿管长方向的压力降,内流的平均速度越大,流程越远,压差就越大。

### 1.3 利用管道抽吸效应的可行性

如果管道外流壁面的压力流向梯度 $dp/dx$ 较

小,则壁面附近的压力与大气压力相差不大。此时,保持管内气体高速流动或在管内适当设置压力局部损失区使管内产生较大的负压,即管道内流的流向压力梯度  $dp/dx$  较大,就能使管外壁面的压力大于管内压力,从而在管壁上开设条缝后形成管外气体经由条缝流入管内的气流,实现抽吸效应。

对于列车绕流来说,气流流过车头肩部,在附近产生较小分离之后会重新附着于列车表面,纵向逆压梯度较小,如果在列车上有一纵向通长直管,管腔内有高速气流通过,则管内将产生低于管外压力的负压。列车高速行驶时,管腔内将有高速气流流过。若通过管路将列车外表面与管腔连通,则气流将被吸入管腔内,从管内尾端流出,该管腔即为抽气腔室。若在列车的背风侧壁上开设通长的相连的抽吸条缝,利用腔室内高速流过的流体产生负压,并远低于列车背风侧表面的压力,就能使列车表面的部分流体通过条缝被卷吸到空腔内流走。不过,开设抽吸条缝后,管腔内的压力降将减小,再加上横风对来流的影响,合成气流与管腔的纵轴有一定夹角,实际进入管腔的气流将减少,管内的断面平均流速将降低,实际的压差比式(3)的计算结果小。

从探讨减载原理的角度考虑,为了便于分析,假定空腔是沿纵向贯穿整个列车的通长管道,直接利用列车高速运行产生的列车风在管道内形成高速气流,无需使用风机。若抽吸减载原理可行,也可以使用安装在车辆内部的专用风机和管路在管腔内产生所需的高速气流,实现抽吸功能。至于由管道或条缝引起的气动噪声,可采取适当的降噪隔音措施予以控制。

可根据横风和列车风绕流列车时的流场结构来确定抽吸条缝在列车背风侧壁上的位置。由于不同列车速度和不同横风风速形成的背风侧的流场结构不同,头车、中车和尾车的背风侧的边界层分离情况也有差别,所以背风侧分离点的位置有所差别。为了验证抽吸效果,首先对无横风条件的工况进行计算,比较腔室内部与条缝外的纵向压力分布情况。

## 2 数值模拟方法

### 2.1 计算模型

根据上述分析,考虑车体的实际结构,将条缝设置在背风侧顶部气流即将出现分离的位置,条缝直接与管腔连通。条缝宽度为  $30\sim 35$  mm,与水平方向的夹角  $\varphi$  为  $10^\circ$ 、 $30^\circ$ 、 $60^\circ$ 、 $-30^\circ$ 。条缝外缘与列车表面平齐。图 2 初步给出了条缝的位置和几何尺

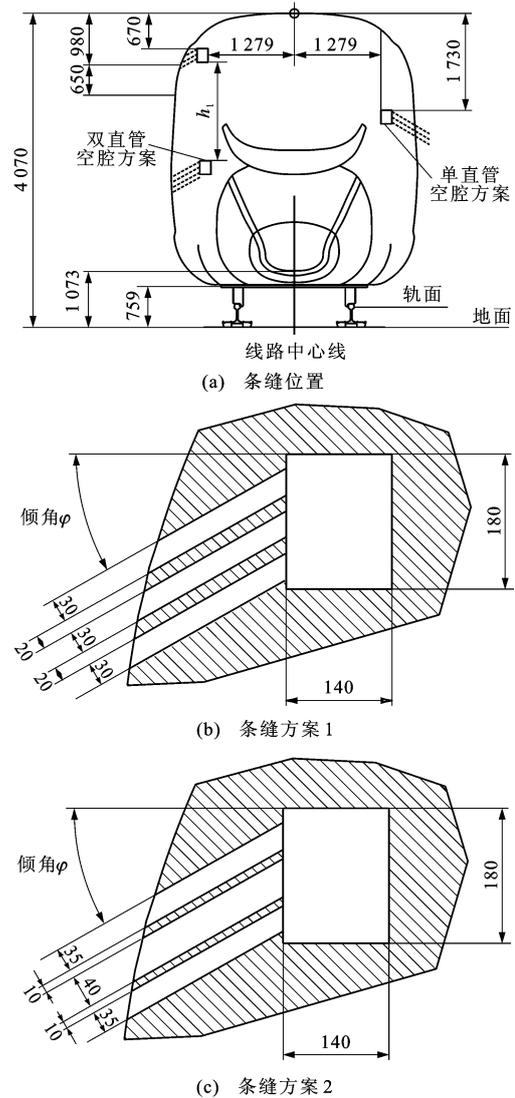


图 2 吸气条缝位置与尺寸

Fig. 2 Locations and sizes of suction slots

寸,数字单位为 mm,  $h_1$  为双腔室间距。

### 2.2 计算域与网格

采用 3 节车辆编组(头车+中间车+尾车)的 CRH 型高速列车建立几何模型,考虑受电弓和转向架等结构。计算域与网格划分见图 3。为了和近壁面区域之外的网格平滑衔接,保证网格质量,共设置 6 层边界层网格,第 1 层网格厚度为  $0.2$  mm,增长比为 2.5。采用 Trim 网格,在尾流、转向架、抽吸条缝和空腔等区域加密网格,加密区域网格的最小单元边长为  $2.5$  mm,计算区域的网格总数约为  $5.6 \times 10^7$  个。

### 2.3 边界条件

采用相对运动条件来模拟列车附近的外流场,即设定列车静止,地面移动,空气来流以与列车运行速度  $V$ 。反向等值的速度  $V_1$  绕流列车,横风以速度

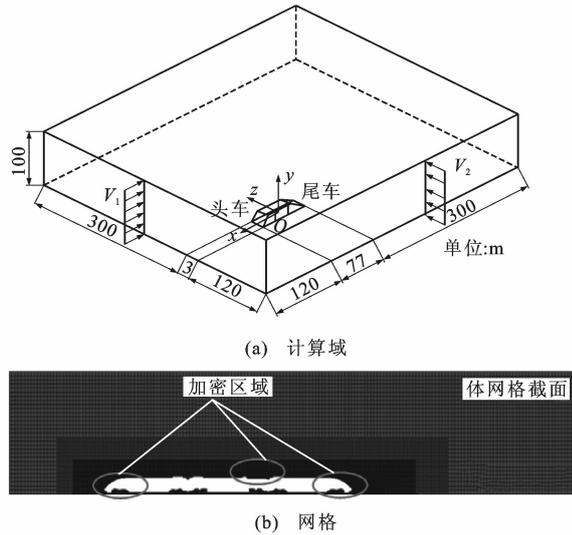


图 3 计算域与网格  
Fig. 3 Computational domains and grids

$V_w$  吹向列车, 二者的合成速度为  $V$ , 设横风风向角为  $\beta$ , 合成风偏航角为  $\theta$ , 速度三角形见图 4。图 4 中:  $F_x$  为阻力;  $F_y$  为升力;  $F_z$  为横向力;  $M_x$  为绕列车中心的倾覆力矩;  $M_r$  为绕列车轮轨接触点的倾覆力矩;  $M_y$  为侧偏力矩;  $M_z$  为俯仰力矩。

2.3.1 入口速度边界条件

包括纵向和横向 2 个速度入口条件, 见图 3(a), 进口风速为

$$V_1 = V_t + V_w \cos(\beta)$$

横向入口处的速度方向沿  $z$  轴(横向), 进口横风风速为

$$V_2 = V_w \sin(\beta)$$

2.3.2 出口边界条件

出口压力取一个标准大气压。

2.3.3 地面边界条件

列车在静止的空气中运行时, 列车与地面、空气的相对速度均为列车行驶速度。在风洞试验和模拟计算中, 通常采用均匀气流绕流列车来模拟行驶的列车相对于静止空气的运动, 显然, 这将导致附面层问题, 运动的气流在静止的地面会产生附面层。而

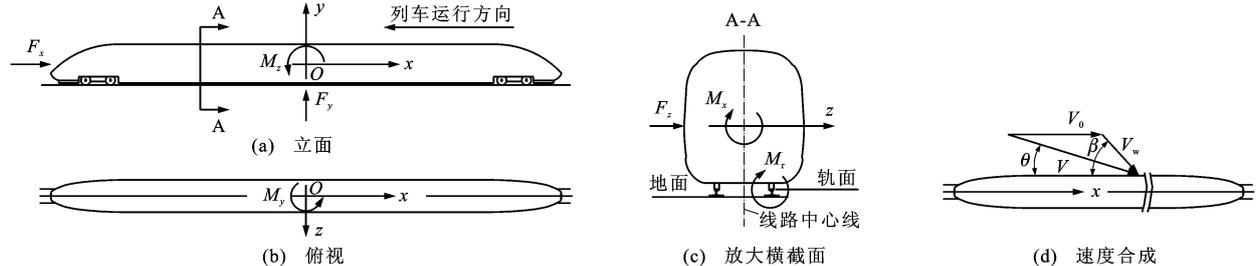


图 4 横风作用下的列车气动力与力矩  
Fig. 4 Aerodynamic forces and moments of train under crosswind condition

实际列车行驶时, 空气与地面是相对静止的, 地面附面层是不存在的, 只存在车身表面上。为消除地面附面层的影响, 采用移动地板法, 给定地面运动速度, 设定速度为与主流进口处的速度大小相等, 方向相同。

2.3.4 计算域外围边界

由于选择的流场计算区域足够大, 可认为外围边界对列车周围的流场的影响甚小。另外, 为了与相对运动的条件相对应, 计算区域的外围边界设定为无摩擦的滑移壁面。

2.4 风洞试验验证

项目组在四川绵阳空气动力研究与发展中心的  $8\text{ m} \times 6\text{ m}$  风洞中对无条缝的高速列车进行了缩尺模型试验, 本文首先对试验工况进行了数值模拟分析<sup>[18]</sup>, 按三维、黏性、可压缩流动考虑, 对来流速度为  $60\text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , 气流夹角为  $3^\circ$  和  $6^\circ$  的列车模型气动系数进行了对比分析, 结果表明头车和中间车的数值模拟与模型试验的气动力与力矩系数的误差为  $10\%$  左右, 在工程误差允许范围之内, 尾车的略大一些。由于存在以下原因可能引起误差: 列车模型与数值模拟的几何模型之间存在几何误差; 数值模拟的侧风风场设定为均匀风, 而模型试验中未完全按照均匀风速送风; 存在接触式测量误差, 由于气流速度较高, 侧偏角很小, 模型实体与数值几何模型的细小差别可能导致列车特别是尾车的横向气动力存在较大误差。数值模拟与模型试验的结果之间存在合理误差, 数值模拟方法对分析气动性能是适用的。

3 抽吸减载方案在高速列车上的适用性

图 5 给出了列车速度为  $300\text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$  无横风时抽吸管腔内部和条缝外的压力, 沿着列车的长度方向, 管腔内与条缝外的压力变化趋势是一致的。对于头车和中间车, 管腔内的压力与条缝外的压力比较接近, 最大相差  $70.5\text{ Pa}$ 。在大多数情况下, 管腔内的压力低于条缝外的压力, 因而能形成从车外经

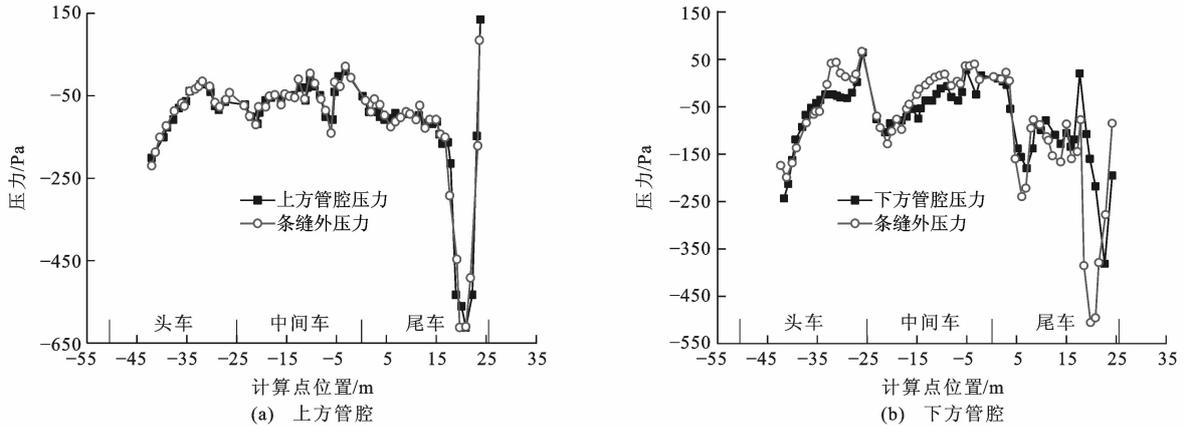


图 5 无风时管腔内的压力与条缝外的压力

Fig. 5 Pressures of internal chambers and external slots without crosswind

条缝向管腔内流动的气流。但也有管腔内压力高于条缝外的情况,多出现在尾车上,而且下方管腔的更明显一些。这是因为尾车附近流动分离比较强烈,负压区域较宽,负压值较大的缘故。此外,头车、中间车的下方管腔的外部压力比较明显地高于管腔内的压力,有利于抽吸效应的形成。

图 6、7 分别是中间车和尾车上典型截面的压力分布和速度矢量分布(截面位置见图 8)。图 6 表明对于中间车,在无横风条件下,条缝开口处对列车表面的压力分布有一定影响,车体表面外部压力比管腔内的压力高,且与上、下腔室的压差不同,分别约为 20、50 Pa。列车顶部到侧面过渡位置的部分气流在正压的作用下流入上条缝进入上管腔,条缝内气流速度约为  $5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,同时,列车侧面下方的部分气流也在正压的作用下流入下条缝进入下方管

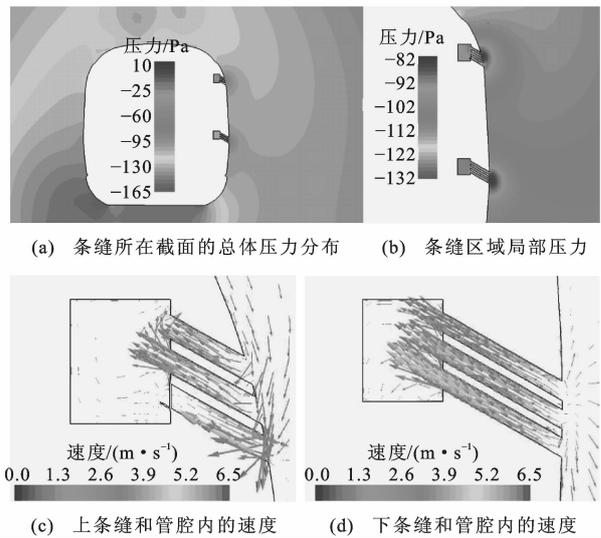


图 7 尾车上  $S_{12}$  截面的压力和速度分布

Fig. 7 Pressure and velocity distributions of section  $S_{12}$  of last vehicle

腔。与上条缝的相比,下条缝附近的列车表面内外压差较大,气体更容易进入抽吸腔室,条缝里的进气速度约为  $7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

对于尾车,与中间车相似,条缝附近的列车表面压力大于管道腔室内的压力,气流能顺利地进入管腔。如图 7 所示,上、下条缝内的平均气流速度分别约为  $3.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,下条缝的内外压差大于上条缝内外压差。

图 9 是列车速度为  $300 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ ,横风风速为  $20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,风向角为  $90^\circ$ 时,沿列车纵向的多个横截面的流线图, $L$  为横截面到车头鼻锥的距离, $D$  为列车的水力直径,取值为  $3.25 \text{ m}$ 。由图 9 可知,背风侧分离涡的起始位置一般位于背风侧的顶面到侧面的转角过渡处,重新附着后又开始分离的位置在背风侧的下方。

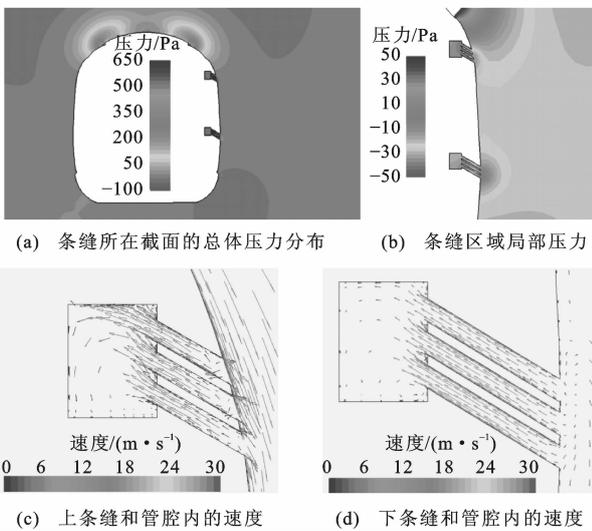


图 6 中间车  $S_9$  截面的压力和速度分布

Fig. 6 Pressure and velocity distributions of section  $S_9$  of middle vehicle

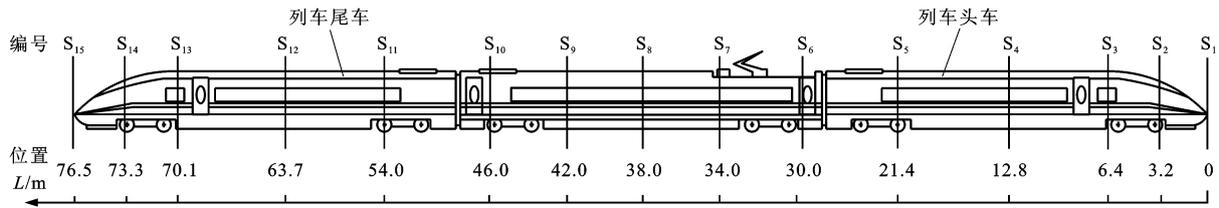


图8 列车纵向横截面位置

Fig. 8 Positions of sections along train

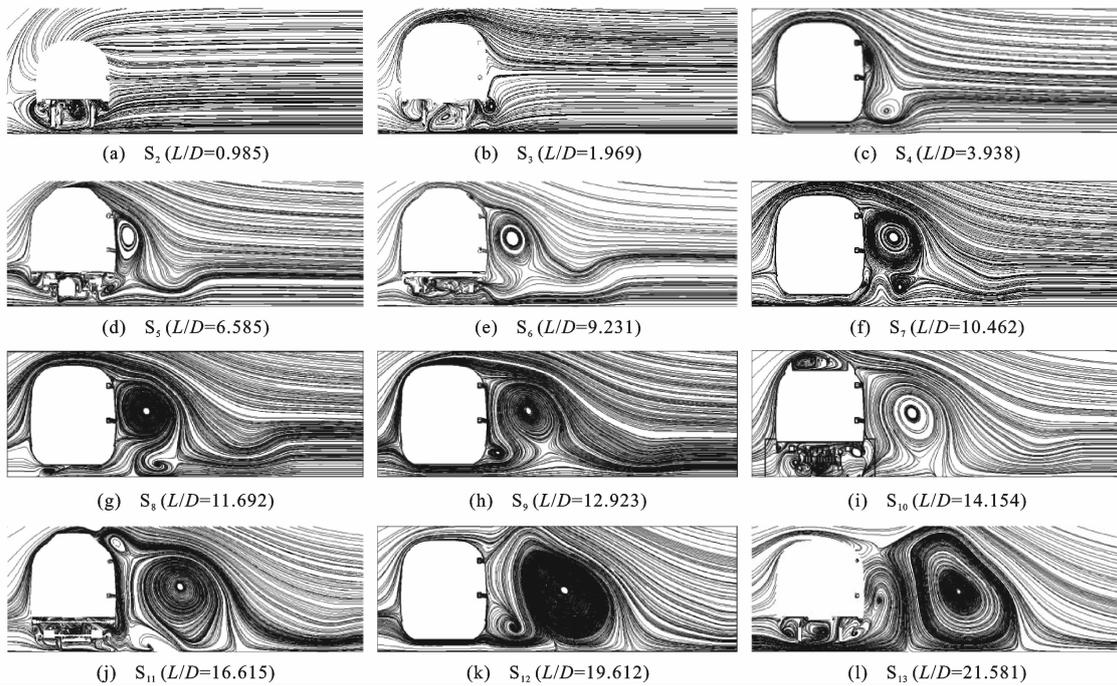


图9 带抽吸装置的截面流场

Fig. 9 Flow fields of sections with suction device

### 4 抽吸减载条缝的优化

由于分离流动的复杂性,虽然根据图9可以初步给出条缝的若干位置和几何尺寸,但条缝的优化位置和几何尺寸还需要通过数值模拟对比多个减载方案来确定。表1列出了条缝倾角的4个方案,方案D<sub>1</sub>未设置条缝,用于与设置条缝的各个方案进行比较,是基准方案,条缝具体设置方法见图2。优化中以列车速度为300 km·h<sup>-1</sup>,横风风速为20 m·s<sup>-1</sup>,风向角为90°为典型工况,双腔室间距h<sub>1</sub>为1.075 m。

表1 倾角选择方案

Tab. 1 Selection projects of inclination angle

方案编号	$\varphi/(^{\circ})$	说明
D <sub>1</sub>		无条缝
D <sub>2</sub>	30	条缝方案1
D <sub>3</sub>	10	条缝方案1
D <sub>4</sub>	60	条缝方案1
D <sub>5</sub>	-30	条缝方案1

#### 4.1 条缝倾角的确定

表2给出了条缝倾角方案D<sub>1</sub>~D<sub>5</sub>的计算结果,通过阻力、横向力、升力和以车轮与轨顶接触线为转轴的倾覆力矩来判定减载效果的优劣,横风速度为20 m·s<sup>-1</sup>。由表2可知,方案D<sub>2</sub>~D<sub>5</sub>的列车总阻力均比未设置条缝的方案D<sub>1</sub>的要小,减载幅度可达7.21%。在横向力中,D<sub>2</sub>方案的头车减载幅度为4.85%,中间车减载幅度的最大值为2.71,最小的是D<sub>3</sub>方案的减载幅度,为-24.38%,即横向力增大,D<sub>2</sub>方案的尾车减载幅度可达90.48%。在升力中,D<sub>3</sub>方案的头车和中间车的减载幅度最大,分别为13.15%和45.62%,D<sub>2</sub>方案的头车和中间车的减载幅度分别为8.21%和12.56%,尾车的减载幅度以D<sub>5</sub>方案的为最大,达到17.93%,D<sub>2</sub>方案的尾车减载幅度为7.69%。在倾覆力矩中,D<sub>2</sub>方案的头车和中间车的减载幅度最大,分别为5.29%和8.84%,而D<sub>3</sub>方案的分别为4.95%和0.86%;D<sub>3</sub>方案的尾车减载幅度最大,为73.08%。

表 2 气动力比较  
Tab. 2 Comparison of aerodynamic forces

气动荷载	作用部位	方案 D <sub>1</sub>	方案 D <sub>2</sub>	方案 D <sub>3</sub>	方案 D <sub>4</sub>	方案 D <sub>5</sub>
阻力/N	头车	9 201.1	8 855.9	8 983.7	9 080.8	9 368.9
	中间车	13 906.5	12 895.6	13 008.2	13 283.0	13 307.8
	尾车	13 310.2	12 040.1	11 873.2	12 225.1	12 275.4
	列车	36 417.8	33 791.7	33 865.2	34 589.0	34 952.0
横向力/N	头车	40 474.0	38 510.3	39 324.7	39 680.4	39 658.2
	中间车	17 865.4	17 381.7	22 220.4	17 803.7	17 817.0
	尾车	3 481.2	331.3	-2 223.2	867.1	1 327.7
升力/N	头车	21 391.1	19 635.5	18 535.4	20 081.1	18 752.7
	中间车	32 495.1	28 414.3	17 736.4	27 872.4	27 592.3
	尾车	10 783.7	9 954.5	14 992.2	9 547.3	8 849.9
倾覆力矩/ (N·m)	头车	81 273.8	76 973.3	77 247.7	78 626.2	78 326.6
	中间车	59 153.8	53 927.1	58 645.2	54 369.5	54 302.6
	尾车	11 597.9	4 922.3	3 121.7	5 321.1	5 805.4
侧偏力矩/ (N·m)	头车	229 915.6	228 722.8	230 150.9	236 068.8	229 371.5
	中间车	-16 020.4	-11 639.2	-12 857.4	-14 731.1	-11 174.4
	尾车	155 434.7	165 483.1	153 064.0	166 005.8	164 441.3
俯仰力矩/ (N·m)	头车	137 227.2	123 280.7	124 543.8	128 455.8	124 809.7
	中间车	-40 166.5	-37 407.4	-115 694.0	-41 719.7	-37 718.3
	尾车	-9 529.0	-25 134.5	-52 202.9	-24 343.3	-22 992.6

而 D<sub>2</sub> 方案的次之,为 57.56%。

对于列车的气动安全性而言,最重要的气动力是横向力、升力和倾覆力矩,因此,方案 D<sub>2</sub> 的总体效果最好,条缝的倾角确定为 30°。此外,由表 2 可知,尾车的气动力改变最大,头车、中间车及尾车的倾覆力矩减载幅度依次增大。原因是横风和列车风形成的来流沿列车纵向产生流动分离的程度逐步加大,条缝抽吸改善流动分离的效果越来越显著。

#### 4.2 条缝几何定位与抽吸减载的效果分析

条缝几何定位方案优化中条缝倾角设为 30°,列车速度为 300 km·h<sup>-1</sup>,风向角为 90°,具体方案见表 3,其中 E<sub>3</sub> 为单腔室,距车顶 1.73 m。背风侧有双腔室和单腔室 2 个方案。双腔室的 2 个管腔分别位于列车的侧面车窗上方和车内地面的上方(图 2)。管腔的间距有 1.075、1.175、1.275 m 三个尺寸方案。条缝宽度有 2 个方案:进气条缝宽度均为 30 mm(条缝设计方案 1);进气条缝宽度为 35、40 mm(条缝设计方案 2)。

#### 4.3 抽吸条件下的流场结构

在列车侧壁设置抽吸条缝后,列车背风侧的分离涡流动结构发生了一定的变化。条缝的几何位置不同,流场结构也不同,从而在减载效果上产生差异。

表 3 几何位置选择方案

Tab. 3 Selection projects of geometric positions

方案编号	双腔室间距/m	横风风速/ (m·s <sup>-1</sup> )	说明
E <sub>1</sub>	1.275	20	条缝方案 1
E <sub>2</sub>	1.175	20	条缝方案 1
E <sub>3</sub>		20	条缝方案 1
E <sub>4</sub>	1.075	20	条缝方案 2
F <sub>1</sub>		25	无条缝
F <sub>2</sub>	1.075	25	条缝方案 1
G <sub>1</sub>		30	无条缝
G <sub>2</sub>	1.075	30	条缝方案 1

为了分析这种变化与抽吸作用的效果,沿列车纵向截取若干横截面对流场结构进行分析,横截面的位置见图 8,以列车速度为 300 km·h<sup>-1</sup>,横风风速为 20 m·s<sup>-1</sup>,风向角为 90°为典型工况,对有、无条缝的情况进行对比,图 10 给出了其背风侧流场结构的部分截面。

由图 10 的 S<sub>4</sub>~S<sub>7</sub> 可知,条缝抽吸方案虽然没有完全消除列车背风侧的分离涡,但使分离涡的涡核增大,涡量减少。其中,在 S<sub>7</sub> 截面上延缓了列车顶面到侧面的分离涡形成,使得分离涡附近的压力

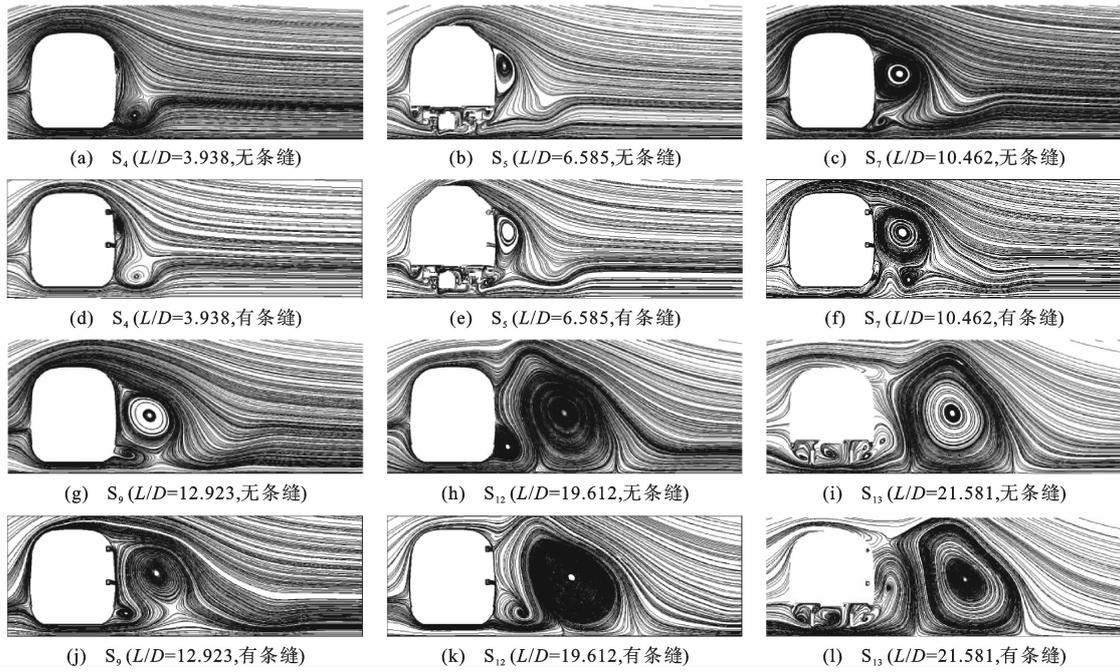


图 10 不同截面流线对比

Fig. 10 Streamline comparison of different sections

升高,部分气体被压入条缝内,流入抽吸腔室内,图 11 也说明了这一点。 $S_7$  截面处车体表面外部压力比管腔内的压力高,且与上、下腔室的压差不同,分别约为 10、50 Pa。列车顶部到侧面过渡位置的部分气流在正压的作用下流入上条缝进入上方管腔,条缝内气流速度小于  $4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。同时,列车侧面下方的部分气流也在正压的作用下流入下条缝进入下方管腔。与上条缝的相比,下条缝附近的列车表面的内外压差较大,气体更容易流入抽吸腔室,条缝里的进气速度小于  $5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

图 12 给出了抽吸管腔内部和条缝外的压力对比,沿着列车的长度方向,管腔内的压力与条缝外的压力变化趋势是一致的。在大多数情况下,管腔内的压力低于条缝外的压力,因而能形成从车外经条缝向管腔内流动的气流。对比图 12、5 可知,在无横风时的抽吸效果比有横风时显著。因为横风作用使得从列车头部进入抽吸管道腔室的气流速度减小,管内压力下降不够,与管外表面的大气压力相当甚至高于外部压力,使条缝抽吸作用不明显或受到抑制。如采用变截面管道使管道内的压力进一步降低,则会取得更好的效果。

#### 4.4 不同条缝几何位置的抽吸效果对比

对比 D 类和 E 类方案的减载效果(图 13)可知,方案  $D_2$  与方案  $E_1 \sim E_4$  相比,列车总阻力减载幅度最大,为 7.2%,方案  $E_3$  其次,减阻幅度为 7.0%; $D_2$

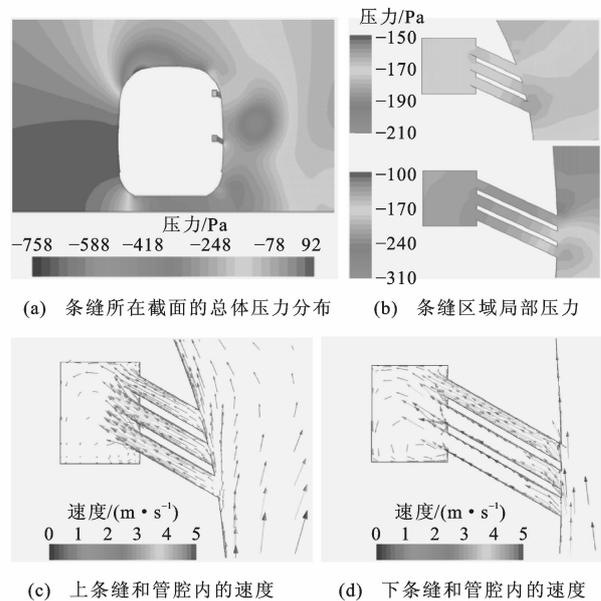


图 11 中间车上  $S_7$  截面的压力和速度分布

Fig. 11 Pressure and velocity distributions of section  $S_7$  of middle vehicle

方案的头车、中间车的横向力的减载幅度与  $E_3$  方案的相当,仅比后者大 3%,而且大于其他 E 类方案,其尾车的横向力减载幅度远大于 E 类方案中的横向力减载幅度;在 E 类方案中, $E_4$  (采用条缝尺寸方案 2)的横向力减阻幅度最大, $E_3$  的次之。在  $D_2$  方案中,头车、中间车和尾车的升力减载幅度与 E 类方案相当。在  $D_2$  方案中,头车、中间车和尾车的倾覆力矩减载幅度与  $E_3$  方案相当。在 E 类方案中,

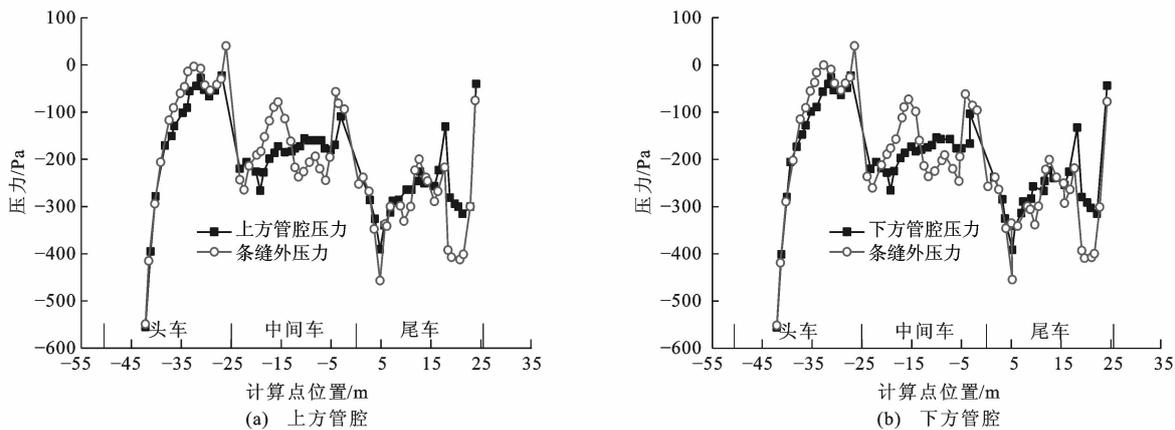


图 12 有风时管腔内的压力与条缝外的压力对比

Fig. 12 Pressure comparison of internal chambers and external slots under crosswind condition

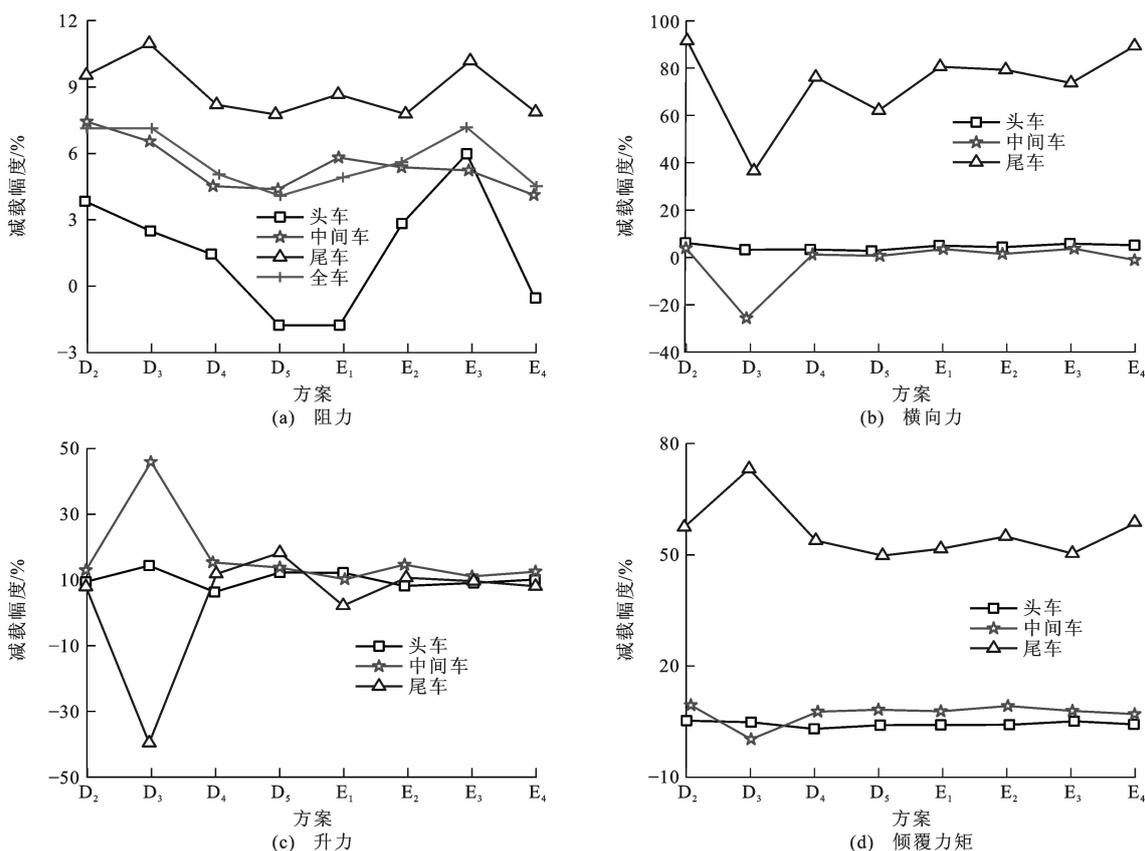


图 13 不同条缝方案的减载效果对比

Fig. 13 Comparison of load-shedding effects of different slot projects

E<sub>3</sub> 方案优于其他方案。可见,方案 D<sub>2</sub> 和方案 E<sub>3</sub> 是相对优化的方案。

图 14 为不同横风风速下无条缝和有条缝方案的气动力变化曲线,若列车以 300 km · h<sup>-1</sup> 的速度行驶,当风速为 20 m · s<sup>-1</sup> 时,条缝抽吸装置的阻力减载幅度为 6.21%;当风速为 25 m · s<sup>-1</sup> 时,条缝抽吸装置的阻力减载幅度为 6.05%;当风速为 30 m · s<sup>-1</sup> 时,条缝抽吸装置的阻力减载幅度为 6.46%。横风

风速为 30 m · s<sup>-1</sup> 时,减载效果最明显。这恰恰说明,条缝抽吸装置能够在横风风速较大的时候发挥更好的减载作用。

### 5 结 语

(1)通过设置在高速列车上的纵向抽吸气腔室和表面进气条缝,可有效地控制列车外部绕流的边界层分离流动,减小列车的横风气动力。

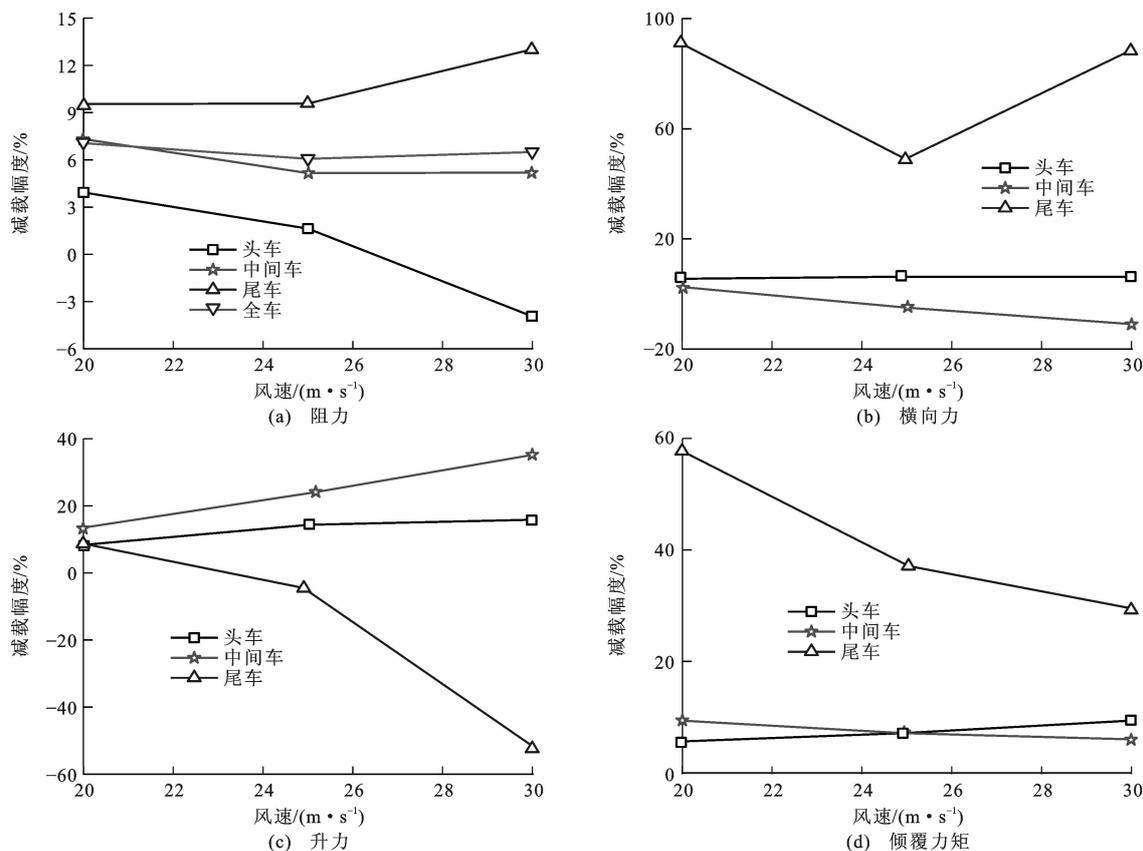


图 14 条缝方案在不同横风风速下的减载效果对比

Fig. 14 Comparison of load-shedding effects of slot projects at different crosswind speeds

(2) 列车表面条缝的倾角对列车横风气动减载效果有明显的影响。存在某一倾角,使得总体的气动减载效果和气动安全性得到优化。本文通过数值模拟,确定了条缝倾角为  $30^\circ$  时减载效果和气动安全性最优。

(3) 对于 3 节车辆编组的列车,条缝倾角对不同车辆的气动减载率的影响是不同的,尾车受条缝倾角影响最大,中间车次之,头车最小。

#### 参考文献:

#### References:

- [1] BAKER C J. The simulation of unsteady aerodynamic cross wind forces on trains[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2010, 98(2): 88-99.
- [2] CARRARINI A. Reliability based analysis of the crosswind stability of railway vehicles[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2007, 95(7): 493-509.
- [3] ANDERSSON L E, HAGGSTRÖM J, SIMA M, et al. Assessment of train-overturning risk due to strong crosswinds[J]. Proceeding of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit, 2004, 218(3): 213-223.
- [4] BOCCIOLONE M, CHELI F, CORRADI R, et al. Cross-

wind action on rail vehicles: wind tunnel experimental analyses[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2008, 96(5): 584-610.

- [5] WILSON J D, SWATERS G E, USTINA F. A perturbation analysis of turbulent flow through a porous barrier[J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 1990, 116(494): 989-1004.
- [6] SANTIAGO J L, MARTIN F, CUERVA A, et al. Experimental and numerical study of wind flow behind windbreaks[J]. Atmospheric Environment, 2007, 41(30): 6406-6420.
- [7] 姜翠香,梁习锋. 挡风墙高度和设置位置对车辆气动性能的影响[J]. 中国铁道科学, 2006, 27(2): 66-70. JIANG Cui-xiang, LIANG Xi-feng. Effect of the vehicle aerodynamic performance caused by the height and position of wind-break wall[J]. China Railway Science, 2006, 27(2): 66-70. (in Chinese)
- [8] 刘风华. 不同类型挡风墙对列车运行安全防护效果的影响[J]. 中南大学学报:自然科学版, 2006, 37(1): 176-182. LIU Feng-hua. Wind-proof effect of different kinds of wind-break walls on the security of trains[J]. Journal of Central South University: Science and Technology, 2006, 37(1): 176-182. (in Chinese)
- [9] 董香婷,党向鹏. 风障对侧风作用下列车行车安全影响的数值模拟研究[J]. 铁道学报, 2008, 30(5): 36-40.

(下转第 68 页)

- ISECS International Colloquium on Computing, Communication, Control, and Management. Guangzhou: IEEE, 2008: 135-139.
- [11] 高 越,高振海,李向瑜. 基于自适应 Kalman 滤波的汽车横摆角速度软测量算法[J]. 江苏大学学报:自然科学版,2005,26(1):24-27.  
GAO Yue, GAO Zhen-hai, LI Xiang-yu. Soft measurement method for vehicle yaw rate based on adaptive Kalman filter[J]. Journal of Jiangsu University: Natural Science Edition, 2005, 26(1): 24-27. (in Chinese)
- [12] KIENCKE U, DAIß A. Observation of lateral vehicle dynamics[J]. Control Engineering Practice, 1997, 5(8): 1145-1150.
- [13] EDWARDS C, HEBDEN R G, SPURGEON S K. Sliding mode observers for vehicle model detection [J]. Vehicle System Dynamics, 2005, 43(11): 823-843.
- [14] 樊 娜,赵祥模,王青龙. 船联网数据融合的信任模型[J]. 交通运输工程学报,2013,13(3):121-126.  
FAN Na, ZHAO Xiang-mo, WANG Qing-long. Trust model of data fusion for internet of ships[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2013, 13(3): 121-126. (in Chinese)
- [15] 姜桂艳,李 琦,常安德. 数据融合技术在交通事件检测中的应用综述[J]. 交通信息与安全,2011,29(3):138-144.  
JIANG Gui-yan, LI Qi, CHANG An-de. A review of application of data fusion technology in the field of traffic incident detection[J]. Journal of Transport Information and Safety, 2011, 29(3): 138-144. (in Chinese)
- [16] 陈扶崑,吴 中,田 亮. 基于多源信息融合的高速公路事件检测算法研究[J]. 交通信息与安全,2009,27(1):35-38.  
CHEN Fu-kun, WU Zhong, TIAN Liang. Freeway incident detection algorithm based on multi-source information fusion[J]. Journal of Transport Information and Safety, 2009, 27(1): 35-38. (in Chinese)
- [17] LUO R C, LIN M H, SCHERP R S. Dynamic multisensor data fusion system for intelligent robots[J]. IEEE Journal of Robotics and Automation, 1988, 4(4): 386-396.
- [18] 李战明,陈若珠,张保梅. 同类多传感器自适应加权估计的数据级融合算法研究[J]. 兰州理工大学学报,2006,32(4):78-82.  
LI Zhan-ming, CHEN Ruo-zhu, ZHANG Bao-mei. Study of adaptive weighted estimate algorithm of congeneric multi-sensor data fusion [J]. Journal of Lanzhou University of Technology, 2006, 32(4): 78-82. (in Chinese)
- [19] 胡学俊,罗中良. 基于统计理论的多传感器信息融合方法[J]. 传感器技术,2002,21(8):38-39,43.  
HU Xue-jun, LUO Zhong-liang. Method of multi-sensor information fusion based on statistics theory[J]. Journal of Transducer Technology, 2002, 21(8): 38-39, 43. (in Chinese)
- [20] 费 文. 多传感器自适应加权数据融合在测量排气温度的应用[J]. 国外电子测量技术,2007,26(12):4-6.  
FEI Wen. Multi-sensor self-adaptive weight added fusion method applied in testing exhaust temperature [J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2007, 26(12): 4-6. (in Chinese)
- ~~~~~
- (上接第 46 页)
- DONG Xiang-ting, DANG Xiang-peng. Study on influence of wind barriers on traffic safety of trains under crosswind by numerical simulation[J]. Journal of the China Railway Society, 2008, 30(5): 36-40. (in Chinese)
- [10] 任尊松,徐宇工,王璐雷,等. 强侧风对高速列车运行安全性影响研究[J]. 铁道学报,2006,28(6):46-50.  
REN Zun-song, XU Yu-gong, WANG Lu-lei, et al. Study on the running safety of high-speed trains under strong cross winds[J]. Journal of the China Railway Society, 2006, 28(6): 46-50. (in Chinese)
- [11] 郝艳红,毛 军,高 亮,等. 横风作用下高速列车安全运行速度限值的研究[J]. 铁道学报,2012,34(6):8-14.  
XI Yan-hong, MAO Jun, GAO Liang, et al. Research on the limited safe speed of a high-speed train under cross wind[J]. Journal of the China Railway Society, 2012, 34(6): 8-14. (in Chinese)
- [12] TSUTAHARA M, NAGAHISA N, TATSUMI Y, et al. Study of reduction of the fluid force due to side wind on a running train[J]. The Japan Society of Mechanical Engineers, 1999, 65: 2595-2603.
- [13] WILLIAMS D R, MANSY H, AMATO C. The response and asymmetry properties of a cylinder wake subjected to localized surface excitation[J]. Journal of Fluid Mechanics, 1992, 234: 71-96.
- [14] LIN J C, TOWFIGHI J, ROCKWELL D. Near-wake of a circular cylinder: control by steady and unsteady surface injection[J]. Journal of Fluids and Structures, 1995, 9(6): 659-669.
- [15] LING L M, RAMASWAMY B, COHEN R D, et al. Numerical analysis on strouhal frequencies in vortex shedding over square cylinders with surface suction and blowing[J]. International Journal of Numerical Methods for Heat and Fluid Flow, 1991, 3(4): 357-375.
- [16] 凌国平,方健雯. 速度-涡量法数值求解具有表面吹吸圆柱的绕流问题[J]. 应用数学和力学,2002,23(9):968-974.  
LING Guo-ping, FANG Jian-wen. Numerical study on the flow around a circular cylinder with surface suction or blowing using vorticity-velocity method[J]. Applied Mathematics and Mechanics, 2002, 23(9): 968-974. (in Chinese)
- [17] MURALIDHARAN K, MUDDADA S, PATNAIK B S V. Numerical simulation of vortex induced vibrations and its control by suction and blowing[J]. Applied Mathematical Modelling, 2013, 37(1/2): 284-307.
- [18] 毛 军,郝艳红,杨国伟. 侧风风场特征对高速列车气动性能作用的研究[J]. 铁道学报,2011,33(4):22-30.  
MAO Jun, XI Yan-hong, YANG Guo-wei. Research on influence of characteristics of cross wind field on aerodynamic performance of a high-speed train[J]. Journal of the China Railway Society, 2011, 33(4): 22-30. (in Chinese)