

## 强侧风作用下棚车气动外形优化\*

梁习锋<sup>1</sup>,熊小慧<sup>1</sup>,易仕和<sup>2</sup>

(1. 中南大学 轨道交通安全教育部重点实验室,湖南 长沙 410075;

2. 国防科技大学 航天与材料工程学院,湖南 长沙 410073)

**摘要** :铁路通用车型中,强侧风作用下棚车的气动性能最差。利用二维定常不可压缩 N-S 方程、 $k-\epsilon$  两方程紊流模型,采用有限体积法对强侧风作用下棚车气动外形进行了优化研究。结果表明,棚车车顶形状对强侧风作用下棚车气动性能有较大影响,圆弧型车顶的  $P_{65}$  型棚车气动性优于“人”字型车顶  $P_{64}$  型棚车;棚车侧壁和车顶圆弧采用圆弧过渡比直接连接的效果好。综合考虑棚车气动性能和有效容量两方面因素,建议车顶圆弧和过渡圆弧半径分别取 2692mm 和 500mm。

**关键词** :棚车;气动外形;优化研究;数值计算

中图分类号 :U270 文献标识码 :A

## Optimization Research on Aerodynamic Figure of the Box Car under Crosswinds

LIANG Xi-feng<sup>1</sup>,XIONG Xiao-hui<sup>1</sup>,YI Shi-he<sup>2</sup>

(1. Key Laboratory of Traffic Safety on Track, Central South University, Changsha 410075, China;

2. College of Aerospace and Material Engineering, National Univ. of Defense Technology, Changsha 410073, China)

**Abstract** :Under strong crosswinds, the aerodynamic performance of box car is the worst in the universal vehicles used in the railroad. Using 2D, steady state incompressible Navier-Stokes equation and two equations  $k-\epsilon$  turbulent model for the box car under strong crosswinds, the optimization of the aerodynamic figure has been carried out by finite volume. Results obtained show that the figure of roof greatly affects the aerodynamic performance of box car. The  $P_{65}$  box car with arch roof has better aerodynamic performance than the  $P_{64}$  box car with slope roof. If the roof arc and the lateral wall could be connected by the round fillet, the aerodynamic performance would be much better. With a consideration of the two factors of aerodynamic performance and the effective volume, it is suggested that the roof arc radius should be 2692mm and the fillet arc radius be 500mm.

**Key words** :box car; aerodynamic figure; optimization research; numerical analysis

强侧风是影响列车运行安全的一个重要因素,在某些特殊的风环境,如特大桥梁、高架桥、路堤、丘陵及山区的风口地段以及导致侧向气动力与离心力叠加的曲线线路上,列车绕流流场明显改变,导致气动力显著增大,列车脱轨、翻车的可能性大大增加。由侧向风所导致的列车事故在世界各国时有发生,大风给铁路运输安全、人民生命财产造成严重威胁。我国新疆地区曾发生大风吹翻列车 13 次、总计翻车 79 辆的风环境事故<sup>[1]</sup>,发生倾覆的列车大部分为空棚车。

### 1 控制方程、计算模型、计算区域、边界条件及网格划分

#### 1.1 基本假设

(1) 列车是近地运行的庞大细长物体,因其细长,对列车横向气动性能进行研究时,转向架所占空间相对车体的总长来说比较小,可以不考虑它对车辆横向气动性能的影响,这样研究车辆在侧风作用下的气动性能时,可简化成二维问题处理,即取车辆横截面周围的流场来研究。

\* 收稿日期 2005 - 10 - 30

基金项目 铁道部科技发展计划项目(2003J019)

作者简介 梁习锋(1963—),男,教授,硕士。

(2) 严格来讲,自然环境下的侧向风对运行列车的作用是与时间有关的。但是,研究列车的侧向稳定性一般只关心列车所受最大侧向力和倾覆力矩,因此计算时按均匀来流处理<sup>[2]</sup>。

(3) 侧向风速一般小于 70 m/s,马赫数小于 0.3,流动可按不可压缩处理。

## 1.2 控制方程

FLUENT 6.0 是一个具有强大功能的流场数值计算软件,采用目前应用最广又较成熟的有限体积法对方程求解;采用非结构网格生成技术对计算区域进行离散,并可生成混合格网,其自适应功能非常强,能对网格进行细分或粗化。由于采用了多种求解方法和多重网格加速收敛技术,因而 FLUENT 能达到最佳的收敛速度和求解精度。FLUENT 6.0 提供了多种湍流模型,选取工程上应用较广的  $k-\epsilon$  双方程模型。控制方程组由连续性方程、动量方程( $x$ 、 $y$  两个方向)、湍流模型方程( $k$ 、 $\epsilon$  两个方程)共 5 个方程组成。具体形式见文献[3]。

## 1.3 计算模型与计算区域

选取了铁路上通用的  $P_{64}$ 型棚车和新型  $P_{65}$ 型棚车作为初始计算模型,模型具体尺寸见图 1 和图 2 (两图单位均为 mm)。选取的计算区域尺寸为  $100\text{m} \times 100\text{m}$ ,模型的阻塞比为 3.8%,车体距地面高度为 740mm。具体的尺寸见图 3,其中  $L_1$  为 40m, $L_2$  为 60m, $H$  为 100m。

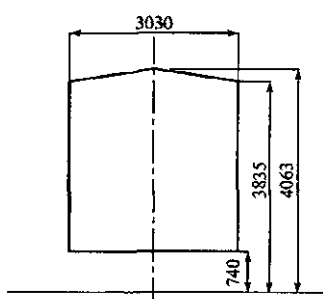


图 1  $P_{64}$ 型棚车车体横截面图  
Fig.1 Section outline of  $P_{64}$

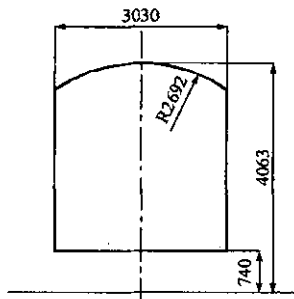


图 2  $P_{65}$ 型棚车车体横截面图  
Fig.2 Section outline of  $P_{65}$

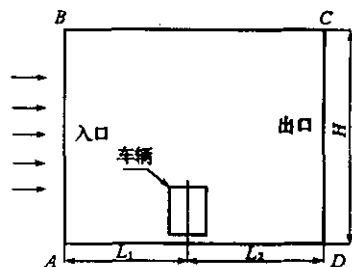


图 3 计算模型图  
Fig.3 Calculation mode

## 1.4 边界条件

计算所取的横风等级为 8 级风,风速为  $20.7\text{m/s}$ 。入口截面  $AB$  按均匀来流给定  $x$  方向速度分布 ( $V_x = 20.7\text{m/s}$ ), $y$  方向速度分量为零。出口截面  $CD$  静压为零。计算区域边界  $BC$ 、 $AD$ 、车体均为无滑移壁面边界条件。

## 1.5 计算网格

FLUENT 软件采用非结构网格生成功能生成三角形物面网格,同时,为了考虑壁面边界层的影响,在靠近车体的表面增加了边界层,并对车体横截面附近的网格进行了加密处理,使车体附近网格离散均匀合理。数值计算的面单元约为 36 万,结点数约为 22 万。图 4 和图 5 分别是棚车车体表面附近局部网格图和附近区域网格图。

## 2 计算结果与分析

### 2.1 计算结果

横风作用下车体受到的气动力主要有侧向力( $F_x$ )、升力( $F_y$ )和倾覆力矩  $M$ ,其中侧滚力矩取车体合力对下游一侧轨顶之矩,它是侧向力力矩与升力力矩之和,见图 6 的  $A$  点, $OA$  之间的距离为轨距的一半。表 1 分别列出了侧向力和升力产生的力矩及其作用点距坐标原点  $O$  的位置。

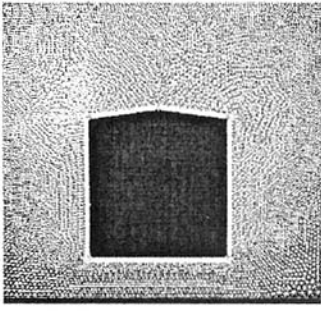


图4 棚车车体表面局部网格图  
Fig.4 Computational grid

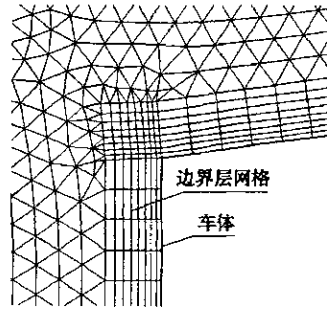


图5 棚车附近区域网格图  
Fig.5 Grid near the vehicle

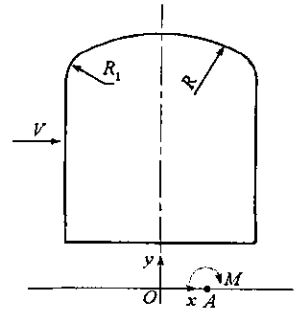


图6 倾覆力矩示意图  
Fig.6 Definition of overturn moment

表1 两种不同车顶棚车的气动力

Tab.1 Calculation result of aerodynamic force on two kinds of vehicle

| 车型           | 单位车长气动力         |                         |                 |                |                         |                |                         |
|--------------|-----------------|-------------------------|-----------------|----------------|-------------------------|----------------|-------------------------|
|              | 侧向力<br>$F_y(N)$ | 侧向力矩<br>( $N \cdot m$ ) | 侧向力作用<br>点高度(m) | 升力<br>$F_z(N)$ | 升力力矩<br>( $N \cdot m$ ) | 升力作用点<br>位置(m) | 倾覆力矩<br>( $N \cdot m$ ) |
| $P_{64}$ 型棚车 | 1239            | -2511                   | 2.02            | 586            | -539                    | -0.20          | -3050                   |
| $P_{65}$ 型棚车 | 907             | -1594                   | 1.76            | 283            | -302                    | -0.35          | -1896                   |

由表1可知,  $P_{65}$ 型棚车受到的侧向力、升力和倾覆力矩都比  $P_{64}$ 型棚车要小, 其中倾覆力矩减小了37.8%。故采用圆弧型车顶棚车的气动性能要好于采用“人”字型车顶棚车。

2.2 压力云图、流线图及车体表面压力分布

图7、图8分别为  $P_{64}$ 型和  $P_{65}$ 型棚车的压力分布云图和流线图, 图9、图10分别给出了两种棚车沿车体迎风面和背风面、车体底部和顶部的压力分布展开图。分析图7~图10可以得到:

(1)棚车车体侧墙迎风一侧为正压, 背风一侧为负压(见图7); 两车型车体侧墙迎风面正压分布规律基本一致(见图9), 沿车体高度方向, 车体侧墙表面压力基本相同。 $P_{65}$ 型棚车为圆形车顶, 空气流过车顶时流动比较顺畅, 流速加快, 压力减小(此处负压较大), 受此影响背风面一对旋涡中的上位涡离车体背风面较远, 与  $P_{64}$ 型棚车背风面两涡相比, 见图8), 因此,  $P_{64}$ 型棚车车体背风面压力分布较为均匀, 而  $P_{65}$ 型棚车车体背风面下部负压大于上部(见图9), 这样, 沿车体高度方向  $P_{64}$ 型棚车受到的侧向力相差不多, 而  $P_{65}$ 型棚车下部受到的侧向力大于上部, 即总的侧向力作用点高度  $P_{65}$ 型棚车小于  $P_{64}$ 型棚车(见表1)此时,  $P_{65}$ 型棚车受到的倾覆力矩比  $P_{64}$ 型棚车小37%。

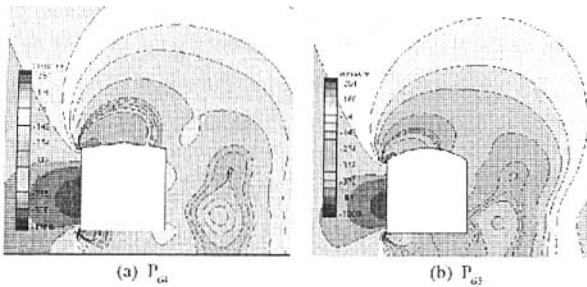


图7  $P_{64}$ 和  $P_{65}$ 型棚车车体周围压力分布云图  
Fig.7 Contours of gauge pressure of  $P_{64}$  and  $P_{65}$

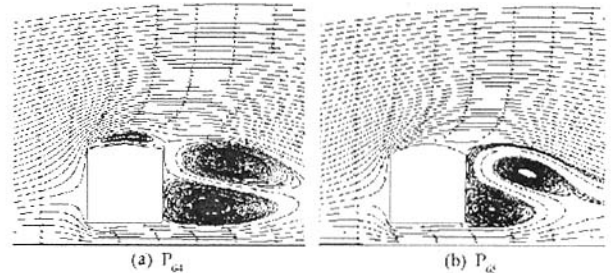


图8  $P_{64}$ 和  $P_{65}$ 型棚车车体周围流线图  
Fig.8 Streamlines of the  $P_{64}$  and  $P_{65}$

(2)气动升力是由车体底部和顶部压力差造成的, 两车型车体底部压力分布规律基本一致(见图10), 空气流入车体底部与地面之间的通道时, 在车体侧墙与底部过渡的尖角处有一小的旋涡产生(见图7), 此处负压最大, 沿车体宽度方向, 负压逐渐减小。两车型车体顶部均为负压,  $P_{65}$ 型棚车为圆形车顶, 车体侧墙与顶部过渡处负压最大, 此后负压迅速下降, 而  $P_{64}$ 型棚车为“人”字型车顶, 空气流过车顶时有

旋涡产生,负压下降较为缓慢(见图10),因此 $P_{65}$ 型棚车受到的升力比 $P_{64}$ 型棚车小52%。

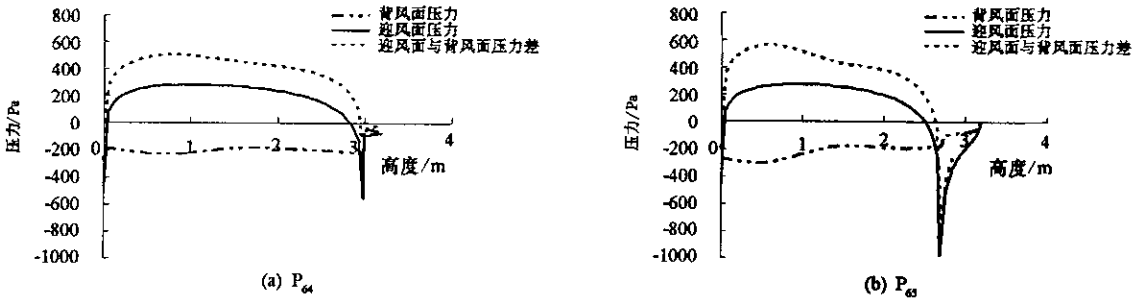


图9  $P_{64}$ 和 $P_{65}$ 型棚车车体迎风面与背风面的压力展开图  
Fig.9 Pressure along the windward and leeward of  $P_{64}$  and  $P_{65}$

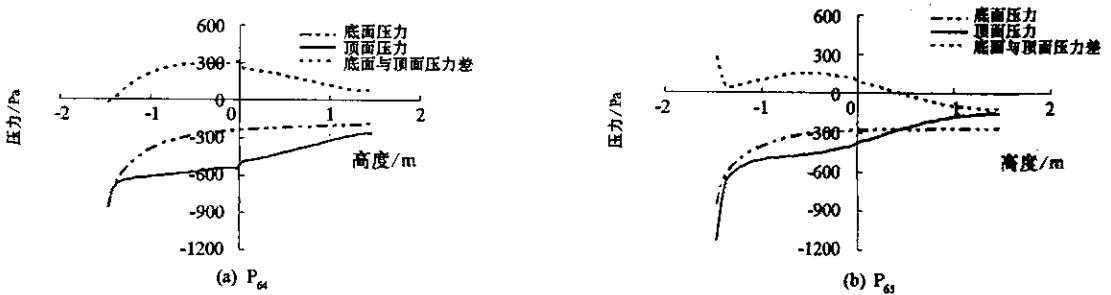


图10  $P_{64}$ 和 $P_{65}$ 型和棚车车体底面与顶面的压力展开图  
Fig.10 Pressure along the bottom and top of  $P_{64}$  and  $P_{65}$

### 3 棚车气动外形优化

#### 3.1 侧风作用下车顶圆弧半径 $R$ 对棚车气动性能的影响

上述计算结果表明棚车车顶形状对强侧风作用下棚车气动性能有较大影响, $P_{65}$ 型棚车受到的侧向力、升力、倾覆力矩明显小于 $P_{64}$ 型棚车,说明圆弧型车顶棚车的气动性能优于“人”字型车顶棚车。表2列出了车顶圆弧半径 $R$ 取不同半径值时的计算结果,为便于比较,将 $P_{64}$ 和 $P_{65}$ 型棚车计算结果也列于表2中。由表2可以看出,随着 $R$ 增大,车体受到的侧向力、升力和倾覆力矩相应增大。当 $R = 2400\text{mm}$ 时,车体受到的气动力最小,倾覆力矩较 $P_{64}$ 减小了39.6%;而当 $R$ 取值为5400mm时,车体受到的气动力与 $P_{64}$ 型棚车相差很小。 $R = 2400\text{mm}$ 时车体气动性能虽好于 $P_{65}$ 型棚车,但效果并不明显,两者仅相差1.8%。出于工装设备和棚车容量的原因, $P_{65}$ 型棚车的圆弧半径 $R = 2692\text{mm}$ 是一个相对比较理想的圆弧半径。

表2 不同车顶形状棚车气动力

Tab.2 Calculation result of aerodynamic force with different roof radiuses

| 计算工况                | 侧向力<br>(N) | 升力<br>(N) | 倾覆力矩<br>(N·m) | 倾覆力矩相对 $P_{64}$ 减少量<br>(%) |
|---------------------|------------|-----------|---------------|----------------------------|
| $P_{64}$ 型棚车        | 1239       | 586       | 3050          | 0.0                        |
| $R = 2400\text{mm}$ | 885        | 257       | 1843          | 39.6                       |
| $P_{65}$ 型棚车        | 907        | 283       | 1896          | 37.8                       |
| $R = 3000\text{mm}$ | 931        | 334       | 2046          | 32.9                       |
| $R = 3600\text{mm}$ | 978        | 389       | 2379          | 22.0                       |
| $R = 4200\text{mm}$ | 1075       | 432       | 2621          | 14.1                       |
| $R = 4800\text{mm}$ | 1119       | 488       | 2773          | 9.1                        |
| $R = 5400\text{mm}$ | 1163       | 543       | 2918          | 4.3                        |

### 3.2 车顶过渡圆弧 $R_1$ 对棚车侧风气动性能的影响

由文献 4-6 知,改变侧壁和车顶圆弧之间的过渡圆弧半径可改变车辆的侧风气动性能。为研究过渡圆弧对棚车侧风气动性能的影响,将  $P_{65}$  型棚车侧壁与车顶圆弧处直接连接改为过渡圆弧  $R_1$  光滑连接。表 3 列出了过渡圆弧半径  $R_1$  分别取不同值时的计算结果。由表 3 可以看出,随着  $R_1$  增大,车体受到的侧向力和倾覆力矩变小,升力则相反。与不采用圆弧过渡的  $P_{65}$  型棚车相比,当  $R_1 = 600\text{mm}$  时,倾覆力矩减小了 28%。当  $R_1 = 500 \sim 600\text{mm}$  时,车辆受到的倾覆力矩变化不大,但是过渡圆弧半径过大,会导致棚车的容量减小,故选定过渡圆弧半径  $R_1$  为 500mm。

表 3 不同过渡圆弧棚车气动力

Tab.3 Calculation result of aerodynamic force with different round fillets

| 计算工况                 | 侧向力<br>(N) | 升力<br>(N) | 倾覆力矩<br>(N·m) | 倾覆力矩相对 $P_{65}$ 减少量<br>(%) |
|----------------------|------------|-----------|---------------|----------------------------|
| $P_{65}$ 型棚车         | 907        | 283       | 1896          | 0.0                        |
| $R_1 = 300\text{mm}$ | 660        | 555       | 1527          | 19.5                       |
| $R_1 = 400\text{mm}$ | 574        | 769       | 1457          | 23.2                       |
| $R_1 = 500\text{mm}$ | 508        | 826       | 1401          | 26.1                       |
| $R_1 = 600\text{mm}$ | 467        | 987       | 1366          | 28.0                       |

### 3.3 优化结果

由上面的分析可知,在其他尺寸不变的情况下,兼顾容量及工装因素,选取车顶圆弧半径  $R = 2692\text{mm}$ ,过渡圆弧半径  $R_1 = 500\text{mm}$ ,车体优化截面尺寸如图 11 所示(图中单位为 mm)。

## 4 结论

(1) 棚车车顶形状对强侧风作用下棚车气动性能有较大影响,圆弧型车顶的  $P_{65}$  型棚车气动性能优于“人”字型车顶  $P_{64}$  型棚车,在大风比较频繁的地段应采用  $P_{65}$  型棚车。

(2) 车顶圆弧半径  $R$  增大,棚车受到的气动力也增大,故  $R$  应取较小的值,从棚车气动性能和有效容积两方面综合考虑, $P_{65}$  型棚车车顶圆弧半径  $R = 2692\text{mm}$  是一个比较理想的值。

(3) 棚车侧壁和车顶圆弧采用圆弧过渡比直接连接的效果好,过渡圆弧半径  $R_1$  增大,棚车受到的气动力减小,气动性能好。 $R_1 = 600\text{mm}$  时,倾覆力矩比  $P_{65}$  型棚车小 28%, $R_1$  取值在 500~600mm 时,倾覆力矩的变化不大。综合考虑棚车气动性能和有效容量两方面因素,建议  $R_1$  取值 500mm。

## 参考文献:

- [1] 祝志文,陈伟芳,陈政清. 横风中双层客车车辆的风载荷研究[J]. 国防科技大学学报, 2001, 23(5): 117-121.
- [2] 李人宪,翟婉明. 磁悬浮列车横风稳定性的数值分析[J]. 交通运输工程学报, 2001, 1(1): 99-101.
- [3] 吴建民. 高等空气动力学[M]. 陈则霖,吴文正,译. 北京:北京航空航天大学出版社, 1992.
- [4] 王厚雄,林荣生. 列车的横风倾覆力矩特性[J]. 空气动力学学报, 1983, 3(3): 72-77.
- [5] 种田胜二,铃木实,前田达夫. 横风に対する车辆の空气力学的特性风洞试验[J]. 日本铁道综研报告, 1999, 13(12): 47-52.
- [6] 王厚雄,尹永顺,高注. 车顶外形对车辆气动横向稳定性等气动特性的影响[J]. 空气动力学学报, 1993, 11(1): 98-101.

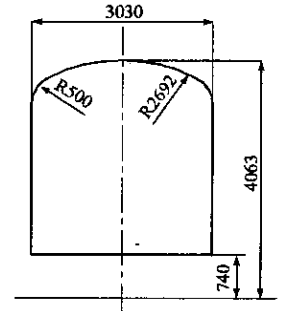


图 11 棚车优化横截面图  
Fig.11 Optimization figure of  $P_{65}$



