

基于Fluent仿真的铁路货车驼峰溜放 风阻力系数研究

杨静¹, 张红亮^{*2}, 周家杰², 段乐毅²

(1. 北京建筑大学土木与交通工程学院, 北京 100044; 2. 北京交通大学交通运输学院, 北京 100044)

摘要: 针对铁路货车车体尺寸变化及装载状态对驼峰溜放风阻力系数的影响进行研究。首先, 基于空气动力学, 建立了27 t轴重通用C80、P80及23 t轴重C70、P70等车型的Fluent仿真模型, 并以满载C65货车标定模型参数。然后, 计算风速和车速的合速度与车辆纵轴方向夹角 α 在0~80°区间内不同车型、不同装载状态货车溜放时的风阻力系数。仿真结果显示, 不同车型、不同装载状态货车的风阻力系数在夹角 α 一致的情形下较标定车型具有较大差异: P80、P70在 α 为20°时较标定车型P50风阻力系数分别增加28.5%、28.0%, 满载C80、满载C70在 α 为25°时较标定车型满载C65分别增加30.5%、29.0%, 空载C80、空载C70分别较对应车型满载状态增加47.1%、59.8%。最后, 基于曲线拟合, 回归出风阻力系数计算模型。本研究解决了驼峰设计及调速控制中长期存在的铁路货车风阻力系数标定不全及轻载车辆风阻力值偏小的问题, 具有重要的理论及实际意义。

关键词: 铁路运输; 风阻力系数; 空气动力学; 铁路货车; Fluent仿真; 驼峰溜放

Air Resistance Coefficient of Hump Rolling Wagon Based on Fluent Simulation

YANG Jing¹, ZHANG Hong-liang^{*2}, ZHOU Jia-jie², DUAN Yue-yi²

(1. School of Civil Engineering and Transportation, Beijing University of Civil Engineering and Architecture, Beijing 100044, China; 2. School of Traffic and Transportation, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract: The influences of rail wagon body parameters and loading status on Air Resistance Coefficient(ARC) during the hump rolling process are studied. Based on aerodynamics, fluent simulation models of 27 t-axle load general freight wagon, as C80, P80, and 23 t-axle load freight wagon, as C70, P70, are established. Considering different angles between the wind & wagon combined speed and the longitudinal axis of wagon during 0~80° range, the ARCs of different wagon types with different loading status are calculated. The simulation results show that, ARCs have changed a lot with different wagon types and loading status: the ARCs of P80, P70 increase significantly with growth rates 28.5%, 28.0% compared with those of standardized wagon P50, the ARCs of full load C80, full load C70 increase with rates 30.5%, 29.0% compared with those of standardized wagon C65, the ARCs of empty C80, empty C70 increase with rates 47.1%, 59.8% compared with full load C70 status. Then based on the curve fitting method, the ARC calculation model is detained. This paper solves the problem that the ARC was calculated inaccurately for different wagon type and loading status in the past hump design and speed control. Therefore, this paper has important theoretical and practical significance.

Keywords: railway transportation; air resistance coefficient; aerodynamics; rail wagon; Fluent simulation; hump rolling

收稿日期: 2018-02-05

修回日期: 2018-04-12

录用日期: 2018-04-20

基金项目: 国家自然科学基金/Nation Natural Science Foundation of China(51308029); 中央高校基本科研业务费/Fundamental Research Funds for the Central Universities(2017JBM036); 北京市教育委员会科技计划一般项目/ Science and Technology Program of Beijing Education Committee (SQKM201810016006).

作者简介: 杨静(1980-), 女, 河北张家口人, 讲师, 博士。

*通信作者: HLZhang@bjtu.edu.cn

0 引言

“货运重载化”是铁路运输发展趋势之一,我国铁路自20世纪80年代通过线路改造、开行组合式重载列车、新建重载专线等方式发展大秦、朔黄、晋中南、蒙西至华中等重载运煤专线以来,开始研究既有线的重载运输问题。提高轴重是实现重载化的关键,我国铁路在经历了建国初期的18 t轴重,20世纪70年代末的21 t轴重,21世纪初的23 t轴重等发展阶段后,开始研究27 t轴重通用货车在既有线的应用^[1-5](与通用货车对应的是专用货车,由于设计结构特殊,仅在某些专线上使用,如无特殊说明本文均指通用货车)。

驼峰溜放风阻力是货车在溜放过程中与空气相对运动而受到的阻力,其大小与车辆形状、尺寸、溜放速度、风速及风向等因素有关。风阻力系数是以车辆溜放过程中正面受风阻力为基准,不同风速与车速的合速度与车辆纵轴方向夹角下所受风阻力与正面受风阻力的比值。驼峰溜放所受阻力中,风阻力占难行车驼峰溜放总阻力达30%以上^[6-7],其系数标定准确与否对驼峰设计及作业控制具有重要影响。

既有风阻力系数标定及后续研究均基于20世纪70年代的风洞试验^[8-10],标定车型为P50、满载C65及满载C50,这些车型早已不是铁路货物运输的主型车;且风阻力系数标定未考虑空载状态,标定范围也不够全面。与标定车型相比,我国正在研

究的27 t轴重C80及P80货车,以及目前主要应用的23 t轴重C70、P70车体尺寸变化显著,采用既有风阻力系数进行计算势必会存在较大误差。因此,有必要重新研究铁路货车驼峰溜放风阻力系数问题。

1 车体尺寸对风阻力系数的影响

货车驼峰溜放过程中受风阻力示意图如图1所示,根据风阻力系数计算原理,车体不同方向尺寸变化对风阻力系数的影响不同。车体高度增加会同比增加侧墙面积与端墙面积,由于风阻力系数以端墙正面受风阻力为基准进行计算,因此风阻力系数反而有减小趋势;车体宽度增加会增大端墙面积,风阻力系数亦会减小;车体长度增加会增大侧墙面积,风阻力系数有增大趋势。

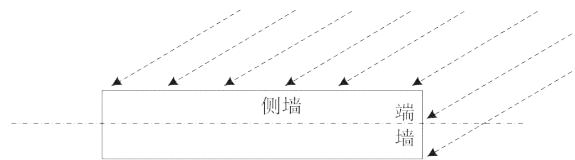


图1 车辆溜放受风阻力示意图

Fig. 1 ARC of wagon during the hump rolling process

27 t轴重、23 t轴重主型车及风阻力系数标定车型车体尺寸如表1所示,与标定车型相比,P80、P70、C80、C70等货车车体尺寸与对应车型增加显著。其中,车辆长度全面增加,P80货车长度较P50增加近40%;除P70外,其他车型车体宽度均略有增加;C80、C70车辆高度较标定车型均有不同程度增幅。

表1 不同车型车体尺寸

Table 1 Different wagon types' body size (mm)

车型	长(含端柱)	宽(含侧柱)	高(不含顶棚)	高(含顶棚)	轮径
P80	18 364	3 080	2 920	3 677	915
P70	16 374	2 960	2 920	3 677	840
C80	13 280	3 182	2 537	2 537	915
C70	13 280	3 172	2 250	2 250	840
P50	13 226	3 049	2 920	3 677	840
C65	13 268	3 076	2 100	2 100	840

2 基于Fluent的铁路货车驼峰溜放风阻力仿真建模

2.1 基本假设

根据货车驼峰溜放情况对仿真模型做如下假

设^[11-13]。

(1) 车辆周围的流场不可压缩。

货车驼峰溜放速度较低,且车辆在非极端环境下受到的最大风力值一般情况下不会超过50 m/s,

风速和车辆的合速度与标准大气压下的音速的比值小于0.3,即马赫数小于0.3,因此,可以忽略压缩空气的影响,车辆的外流场不可压缩。

(2) 车辆周围流场为定常流。

本文研究计算特定工况下车辆所受风阻力大小,并不考虑流体温度、密度、压强等随时间推移而发生变化的情况,把空气流动过程的物性参数看作是不变的。

(3) 无需求解能量方程。

由于空气相对车辆的移动速度很小,因此车辆受到风阻力时,不考虑风力与车辆外表面所产生的摩擦生热现象,无需求解能量方程。

2.2 控制方程

Fluent 软件包提供了多种湍流仿真模型,本文采用工程上应用较多的 $k-\varepsilon$ 双方程模型。描述方程组如下^[14-16]。

连续性方程为

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

动量方程为

$$\rho u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\mu + \mu_t) \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] \quad (2)$$

湍动能方程为

$$\frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + \mu_t \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \left(\frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) - \rho \varepsilon \quad (3)$$

湍流耗散率方程为

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_1 \mu_t \frac{\varepsilon}{k} \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \left(\frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) - C_2 \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (4)$$

式中: u_i 和 u_j 表示货车周围流场的速度; x_i 和 x_j 表示坐标系统的分量; ρ 表示空气的密度; p 表示压力; μ 表示空气动力粘度; μ_t 为湍流粘性参数, $\mu_t = C_\mu \rho k^2 / \varepsilon$; k 为湍动能; ε 为湍流耗散率; C_μ 为湍流常数; $C_1, C_2, \sigma_\varepsilon, \sigma_k$ 为经验常数。

2.3 Fluent 仿真建模

(1) 几何模型。

对车辆门把手、通风窗、梯子等较精细凸出部分,车辆底部转向架等复杂部分,以及对车辆外流场影响较小的部分进行适当简化,以突出主要影响因素。以 P80 通用货车为例,按照同等尺寸大小

构建几何模型如图 2 所示。

(2) 计算区域。

经过多次试算及调整,计算区域进口边界取距车辆受风端面距离为 10 m,侧面距离取 12 m,出口边界取车辆受风端面距离 50 m,距背风侧面取 25 m,计算区域高度取 15 m,计算区域如图 3 所示。

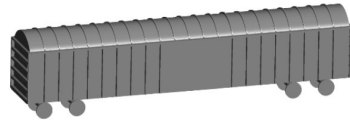


图 2 P80 通用货车几何模型

Fig. 2 Geometry model of P80

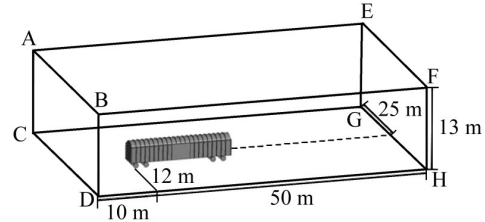


图 3 车辆计算区域示意图(P80)

Fig. 3 Calculation area of wagons (P80)

(3) 计算域网格。

考虑到非结构网格中四面体混合网格对车辆端柱、侧柱等表面凸起物具有较好的适应性,能够根据车辆不同部位的外形自动生成合适尺寸、形状的网格。本文采用非结构四面体混合网格划分方式,以四面体为主,对研究车辆计算域进行网格的划分。经多次试算,确定车身外面网格边长为 0.01~0.05 m。车体外表面边界划分 7 层,边界层采用的是棱柱型网格。对车身附近、背风区及生成网格质量差的地方采用高密度网格,以反映流场变化情况,如图 4 所示。采用八叉树方式生成体网格,并进行优化,最终共生成约 500 万个网格,如图 5 所示。

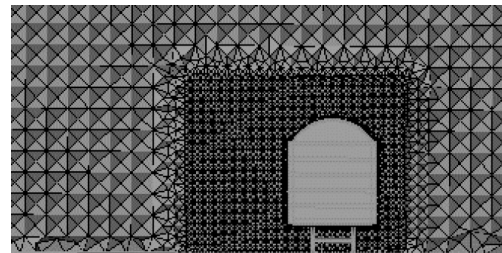


图 4 车辆附近密度区横截面示意图

Fig. 4 Cross-section schematic view of the density near the wagon

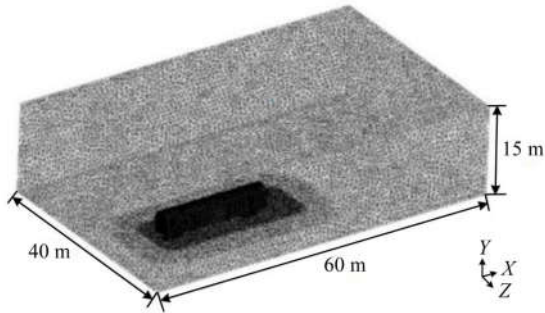


图5 计算域生成网格示意图

Fig. 5 The grid that calculation area generates

(4) 边界条件.

在车辆轴线方向的进口速度大小设置为车辆速度大小与风速在车辆轴线方向速度分量大小之和;侧面进口速度大小为风速在垂直于车辆轴线方向速度分量的大小,来流方向均垂直于入口截面.其中,当来流方向与坐标轴方向相同时取正值,方向相反时取负值.在计算域中固体区域有车辆及地面,流体区域为除车辆及地面外的整个计算域.考虑到本文所研究车辆运行速度较低,车辆及地面之间相对运动与否对气流剪切应力的影响很小,可以忽略不计.因此,将车辆和地面均设置为无滑移壁面边界条件.

3 仿真计算结果及分析

为全面探讨车体参数变化对风阻力系数的影响,本文分别对即将投入运营的27 t轴重P80、C80,以及当前23 t轴重P70、C70车型进行仿真计算.设定工况为车速4 m/s,风速4 m/s,计算风速与车速的合速度与车辆纵轴方向夹角0~80°区间内不同车型、不同装载状态风阻力,以0°角风阻力为基准计算不同角度的风阻力系数.为确保仿真结果的有效性,本文首先对满载C65货车进行风阻力试算,并调整仿真参数使模型计算结果与实验数值接近,并以此参数计算其他车型.

3.1 仿真数据后处理

当残差值曲线收敛后,使用Fluent Post进行数据后处理,从而得到车辆外表面的压力云图及车辆周围流场的速度矢量图,以P80车辆为例,分别如图6和图7所示.从图6和7中可以看出,气流遇到车体之后,气流一部分沿着车体表面向上爬升,

另一部分沿着车体底部通过.气流流过车辆顶部最高点后,于车体背风面形成涡流;车辆迎风面为正压,背风面形成负压.

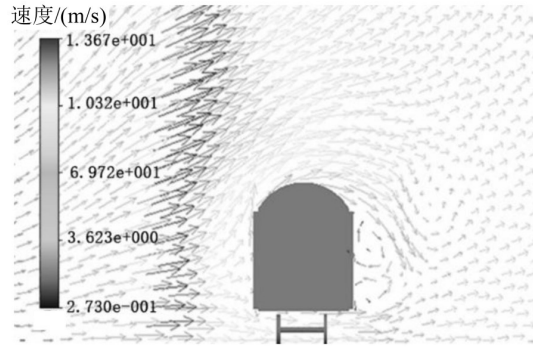


图6 车辆周围流场图(P80)

Fig. 6 Flow around the wagon(P80)

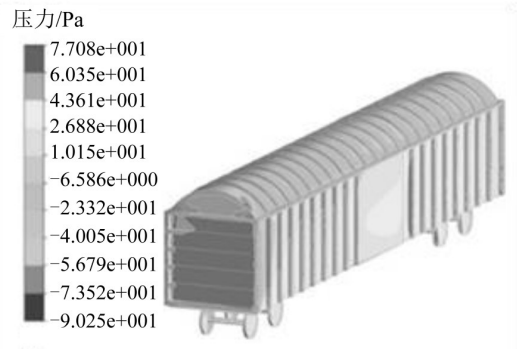


图7 车辆外表面压力云图(P80)

Fig. 7 Wagon exterior pressure cloud chart(P80)

3.2 与标定车型风阻力系数对比分析

P80、P70及满载状态的C80、C70与标定车型(P50、满载C65)风阻力系数对比情况分别如表2、图8和图9所示.

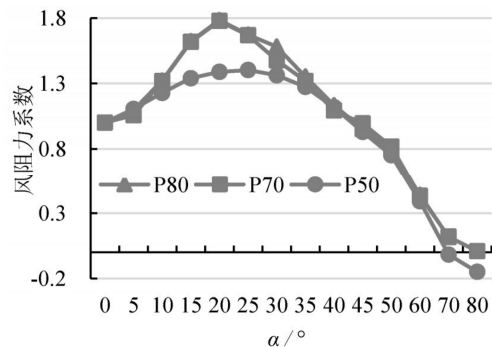


图8 棚车与标定车型对比情况

Fig. 8 The situation of comparison between standardized wagon and box wagon

表2 不同车型风阻力系数对比表
Table 2 ARC of different wagon types

$\alpha/^\circ$	0	5	10	15	20	25	30
P80	1.000	1.095	1.321	1.622	1.783	1.672	1.580
P70	1.000	1.056	1.317	1.617	1.777	1.668	1.476
P50	1.000	1.104	1.227	1.339	1.388	1.402	1.362
C80(满)	1.000	1.132	1.251	1.392	1.576	1.690	1.548
C70(满)	1.000	1.112	1.256	1.418	1.600	1.671	1.615
C65(满)	1.000	1.028	1.150	1.220	1.292	1.295	1.276
$\alpha/^\circ$	35	40	45	50	60	70	80
P80	1.352	1.133	0.951	0.797	0.440	0.117	0.009
P70	1.318	1.093	0.994	0.817	0.433	0.120	0.008
P50	1.273	1.118	0.929	0.751	0.391	-0.018	-0.150
C80(满)	1.275	1.022	0.836	0.717	0.400	0.079	0.001
C70(满)	1.394	1.141	0.926	0.791	0.476	0.115	0.012
C65(满)	1.228	1.221	1.059	0.867	0.495	0.167	-0.078

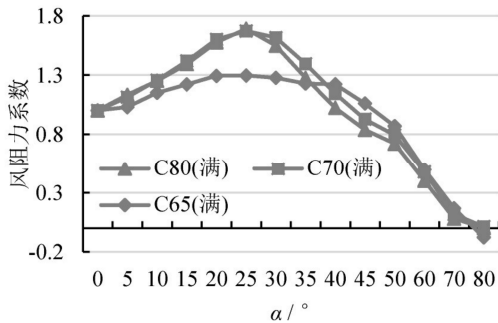


图9 敞车与标定车型对比情况

Fig. 9 The situation of comparison between standardized wagon and open wagon

从表2、图8和图9可以看出：P80、P70、满载C80、满载C70风阻力系数变化规律与标定车型基本一致，均是先增大后减小，在20~25°达到最大值

后逐渐趋近于0；相比于标定车型，P80、P70、满载C80、满载C70风阻力系数波动幅度有所增大。 α 为20°时，P80、P70风阻力系数较标定车型P50分别增加0.395、0.389，增幅分别达28.5%、28.0%； α 为25°时，满载C80、满载C70风阻力系数较标定车型满载C65分别增加30.5%、29.0%，增幅显著。此外，不同车型风阻力系数差异较大，建议分别计算。

3.3 不同装载状态风阻力系数对比分析

对于敞车，由于其车体的开放性，不同装载状态对风阻力系数也有影响，为比较不同装载状态风阻力，以满载状态正面受风为基准，计算出空载状态下风阻力系数如表3所示，变化趋势分别如图10和图11所示。

表3 不同装载状态货车风阻力系数
Table 3 ARC of wagons under different loading status

$\alpha/^\circ$	0	5	10	15	20	25	30
C80(满)	1.000	1.132	1.251	1.392	1.576	1.690	1.000
C80(空)	1.638	1.866	2.082	2.199	2.318	2.280	2.037
C70(满)	1.000	1.112	1.256	1.418	1.600	1.671	1.000
C70(空)	1.565	1.759	2.097	2.438	2.556	2.497	2.259
$\alpha/^\circ$	35	40	45	50	60	70	80
C80(满)	1.548	1.275	1.022	0.836	0.717	0.400	0.079
C80(空)	1.665	1.404	1.203	1.089	0.687	0.196	0.025
C70(满)	1.615	1.394	1.141	0.926	0.791	0.476	0.115
C70(空)	1.853	1.547	1.326	1.132	0.609	0.218	0.021

从表3、图10和图11可以看出，不同装载状态风阻力系数达到最大值时的角度不同：满载C80、满载C70在25°达到最大值；空载C80、空载C70在

20°达到最大值。空载C80、空载C70风阻力系数总体均较对应车型满载状态大，其中，空载C80风阻力系数最大值达到2.318，空载C70风阻力系数最

大值达到 2.556, 分别较对应车型满载状态相同夹角风阻力系数增加 47.1%、59.8%。由此可见, 过去对风阻力系数标定并未考虑空载状态, 导致驼峰设计及调速控制中, 长期存在对轻载车辆风阻力计算偏小问题。

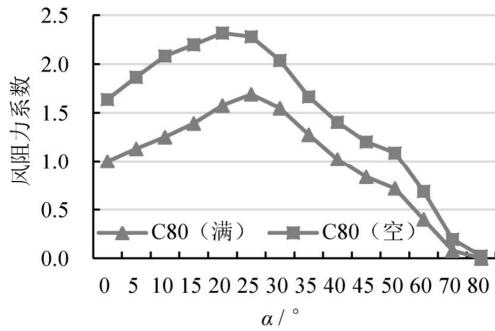


图 10 C80 不同装载状态风阻力系数变化趋势
Fig. 10 Variation tendency of ARC under different loading status of C80

3.4 风阻力系数计算模型的拟合

如前文数据及分析图所示, 虽然车型不同, 但风阻力系数变化规律具有一致性。为此, 基于仿真

数据, 采用曲线拟合方法对不同车型、不同装载状态风阻力系数分别进行拟合, 得到不同车型、不同装载状态风阻力系数计算函数形式一致, 如式(5)所示, 拟合指标 R-Square 达到 0.9 以上, SSE、RMSE 等指标较小, 表明拟合度较好。

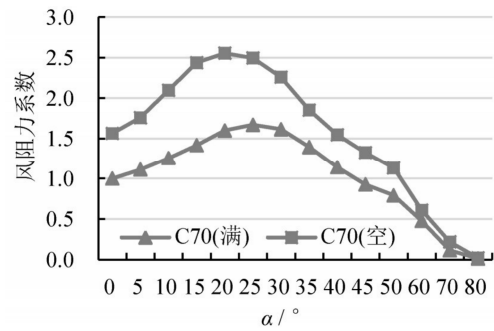


图 11 C70 不同车型不同装载状态风阻力比值
Fig. 11 Variation tendency of ARC under different loading status of C70

$$F(x) = a + b \cdot \cos(cx) + d \cdot \sin(cx) \quad (5)$$

式中: $F(x)$ 为风阻力系数函数; a 、 b 、 c 、 d 均为拟合参数; x 为 α 角。

不同车型风阻力系数计算参数如表 4 所示。

表 4 不同车型风阻力系数曲线拟合参数表
Table 4 Curve fitting parameters of ARC of different wagon types

车型	P80	P70	满 C80	满 C70	空 C80	空 C70
a	0.831	0.817	0.773	0.802	1.137	1.227
b	0.147	0.161	0.181	0.136	0.566	0.367
c	0.060	0.060	0.060	0.059	0.054	0.059
d	0.788	0.768	0.738	0.756	0.888	1.099

4 结论

分析了铁路货车车体参数变化对风阻力系数的影响, 基于空气动力学理论, 采用 Fluent 软件分别对 P80、P70、C80、C70 货车进行建模, 以 C65 满载货车标定模型参数, 计算出不同车型不同 α 角度下风阻力系数, 并拟合出不同车型的风阻力系数计算函数。本文研究修正了驼峰设计与调速控制中长期存在的不足, 可为科研及工程实践提供理论参考。主要结论如下:

(1) 未来即将投入运营的 27 t 轴重货车 P80、C80 及目前正在运营的 23 t 轴重货车 P70、C70 车体尺寸参数均较驼峰设计文献中标定车型差别较

大, 风阻力系数差别较大, 既有风阻力系数已不适应新型货车风阻力计算。

(2) 仿真结果显示, 不同车型、不同装载状态下货车所受风阻力差别较大, 风阻力系数差别也较大, 风阻力系数的计算需要区分具体车型及装载状态。

(3) 仿真结果显示, 相同条件下, 空载 C80、空载 C70 风阻力系数最大较对应满载状态增加 47.1%、59.8%。过去对风阻力系数标定未考虑空载情况, 导致驼峰设计及调速控制过程中, 长期存在对轻载车辆风阻力计算偏小问题。

(4) 建议对 27 t 轴重 P80、C80, 以及 23 t 轴重

P70、C70 货车风阻力系数采用式(5)及表4中参数。

参考文献:

- [1] ZHANG H L, YANG J, YANG T Y. Multiobjective optimization model for profile design of hump distributing zone[J]. *Mathematical Problems in Engineering*, 2017(2017): 9318025.
- [2] 张红亮, 李荣华, 刘博. 27 t 轴重通用货车对驼峰设计及作业控制的影响与对策[J]. *铁道货运*, 2016, 34(11): 24-27. [ZHANG H L, LI R H, LIU B. The influences and countermeasures of 27t axle-load general service freight car to hump design and operating control[J]. *Railway Freight Transport*, 2016, 34(11): 24-27.]
- [3] 张红亮, 杨浩, 夏胜利, 等. 重载货车应用下调车场连挂区纵断面设计优化方法研究[J]. *铁道学报*, 2016, 38(10): 14-19. [ZHANG H L, YANG H, XIA S L, et al. Research on profile optimization design method for coupling area in marshalling yard under application of heavy haul freight car[J]. *Journal of the China Railway Society*, 2016, 38(10): 14-19.]
- [4] 王俊彪, 张岳松, 田长海, 等. 既有线开行27t轴重货物列车对线路通过能力的影响[J]. *中国铁道科学*, 2014, 35(2): 91-97. [WANG J B, ZHANG Y S, TIAN C H, et al. Influence of freight train with 27t axle load on the carrying capacity of existing lines[J]. *China Railway Science*, 2014, 35(2): 91-97.]
- [5] 张红亮, 杨浩, 赵鹏, 等. 驼峰间隔制动减速器对大轴重通用货车的制动适应性研究[J]. *铁道学报*, 2013, 35(10): 33-37. [ZHANG H L, YANG H, ZHAO P, et al. Study on braking adaptability of hump spacing-braking retarder to large axle load general service freight car[J]. *Journal of the China Railway Society*, 2013, 35(10): 33-37.]
- [6] 向劲松, 李金海. 铁路货车溜放风阻力探讨[J]. *西南交通大学学报*, 1990(1): 119-125. [XIANG J S, LI J H. Discussion on the wind resistance of rolling waggons[J]. *Journal of Southwest Jiaotong University*, 1990(1): 119-125.]
- [7] 张超, 李海鹰, 刘彦邦. 点连式驼峰峰高设计中风阻力计算公式及车辆溜放速度的选择[J]. *北方交通大学学报*, 1995, 19(增刊1): 81-83. [ZHANG C, LI H Y, LIU Y B. Choice of wind resistance calculation method and rolling speed in point-continued hump height design[J]. *Journal of Northern Jiaotong University*, 1995, 19(Sup1): 81-83.]
- [8] 铁道第四勘察设计院. 站场及枢纽[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2004. [China Railway SIYUAN survey and Design Institute. *Railway Station and Terminal*[M]. Beijing: China Railway Publishing House, 2004.]
- [9] 陶德高. 调车场内车辆溜放基本阻力与风阻力分布规律研究[J]. *减速顶与调速技术*, 1987(4): 17-22. [TAO D G. Research on the distribution of basic resistance and wind resistance in marshalling yard[J]. *Retarders and Speed Control Technology*, 1987(4): 17-22.]
- [10] 丁昆. 车辆溜放风阻力探讨[J]. *铁道运输与经济*, 1984(11): 17-20. [DING K. Discussion on wind resistance of rolling car[J]. *Railway Transport and Economy*, 1984(11): 17-20.]
- [11] 费天翔. 侧风作用下列车行驶的安全性研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2014. [FEI T X. Study on the train's operational safety under cross wind actions[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2014.]
- [12] 张国耕. 车身仿生非光滑表面气动减阻特性研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2010. [ZHANG G G. Mechanism research on aerodynamic drag reduction of vehicle body with bionic non-smooth surfaces[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2010.]
- [13] 陈燕荣, 肖友刚. 高速列车空气动力学性能计算[J]. *铁道车辆*, 2009, 47(1): 14-16, 48. [CHEN Y R, XIAO Y G. Calculation in aerodynamics performance of high speed trains[J]. *Rolling Stock*, 2009, 47(1): 14-16, 48.]
- [14] 何华, 田红旗, 熊小慧, 等. 横风作用下敞车的气动性能研究[J]. *中国铁道科学*, 2006, 27(3): 73-78. [HE H, TIAN H Q, XIONG X H, et al. Study on the aerodynamics performance of gondola car under cross wind[J]. *China Railway Science*, 2006, 27(3): 73-78.]
- [15] 李佳圣. 列车侧风效应的数值模拟研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2004. [LI J S. Study on side wind effect of train by numerical simulation[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2004.]
- [16] 梁习锋, 熊小慧, 易仕和. 强侧风作用下棚车气动外形优化[J]. *国防科技大学学报*, 2006, 38(2): 26-30. [LIANG X F, XIONG X H, YI S H. Optimization research on aerodynamic figure of the box car under crosswinds[J]. *Journal of National University of Defense Technology*, 2006, 38(2): 26-30.]