

高速集装箱平车空气动力学仿真研究

Aerodynamic simulation of high speed container freight train

田丹，张济民，王永强

(同济大学铁道与城市轨道交通研究院 上海 201804)

摘要：通过采用 SST $k-\omega$ 湍流模型对 200km/h 高速集装箱平车进行外流场分析，得到了集装箱平车表面压力分布、机车和集装箱受到的阻力以及车侧流体速度分布，并对机车和集装箱相对高度差对列车空气阻力的影响进行了分析。研究表明：高速集装箱平车所受的空气阻力以压差阻力为主，并随着机车与集装箱平车相对高度的减小而增大。

关键词：star-csm; 200km/h; 集装箱平车；外流场

ABSTRACT: In this paper, the SST $k-\omega$ turbulence model is used for the numerical simulation on external flow field of high-speed container freight train with 200km/h. It studies the pressure distribution on the train surface, the resistance on locomotive and vehicles, the fluid velocity between vehicles as well as the effect of different relative height of the locomotive and the vehicle to train aerodynamics. The results show that: pressure drag dominates the large resistance of high-speed container freight train; the train resistance increase as the relative height decrease. We give some suggestions according the results at last.

KEYWORDS: star-csm; 200km/h ; container freight train; external flow field

1. 引言

20 世纪 90 年代中期我国铁路大提速，在旅客列车提速的带动下，货物列车的速度相应地提高了，高速和重载成为铁路发展永恒的主题，随着我国铁路跨越式发展的深入，铁路客运专线的建设突飞猛进，发展铁路高速货运已势在必行。

在快速、高速铁路货车技术领域发展较快的是法国、德国、美国、瑞典、日本等国家，其货车运行速度普遍达到 120 km/h~160 km/h，其中比较广泛的商业运行速度是 120 km/h，北美、欧洲铁路快运货物列车最高运行速度已达到 160 km/h，德国曾经创造货物列车

230km/h的世界记录。法国也曾试运过 200 km/h 的高速货车,其 Y37 型转向架取得了 281.8 km/h 的世界货车最高试验速度^[1]。

货车的外形是钝体形状,机车与车辆尺寸不一致,即使车速较低,其空气阻力在基本阻力中也占很大比重^[2]。开行高速货车会带来一系列问题,如列车空重车混编情况下各车辆受力及动力学性能尤其是空车的动力学性能;客货车会车压力波对旅客和货物的影响;货车通过隧道时的压力波对货物的影响;环境风影响下车辆自身动力学性能如运行的稳定性等^[3]。但由于现行货车的运行速度很低,考虑货运成本等因素,对货运列车空气动力学的研究还很少。开展货物列车空气动力学的研究,尤其是高速货运列车空气动力学的研究,为在结构设计时采取尽可能的措施降低空气阻力,减少能耗并满足环境保护的要求,将具有重大的现实意义及经济价值。

由于集装箱运输具有安全、迅速、经济、便利的特点,还可以实现多种运输的联运,高速货运很可能以集装箱平车为主。

鉴于上述情况,本文采用流场计算软件 star-cdm对高速集装箱平车空气阻力进行了数值计算。

2 研究方法

2.1 数值模拟

列车绕流问题一般为定常、等温、不可压缩的三维流场,由于复杂的外形会引起气流的分离,故应按湍流处理,本文采用 SST $k-\omega$ 湍流模型,该模型考虑到湍流剪切应力的输运,不但能够对各种来流进行准确的预测,还能在各种压力梯度下准确的模拟分离现象,综合了 $k-\omega$ 模型在近壁模拟和 $k-\epsilon$ 模型在外部区域计算的优点^[4]。

连续方程:

$$\text{div}(u) = 0$$

动量方程:

$$\rho \frac{Dv}{Dt} = \rho f - \nabla p + \mu \nabla^2 v$$

若分别以 ϕ_1 , ϕ_2 , ϕ_3 表示 $k-\omega$ 模型、 $k-\epsilon$ 模型和 SST 湍流模型中的函数关系,则 SST 湍流模型可表示为:

$$\phi_3 = F_1 \phi_1 + (1 - F_1) \phi_2$$

其中 $F_1 = \tanh(\arg^4)$

$$\arg_1 = \min\left[\max\left[\frac{\sqrt{k}}{\beta' \omega y}, \frac{500\nu}{y^2 \omega}\right], \frac{4\rho\sigma_{\omega_2} k}{CD_{k\omega} y^2}\right]$$

$$CD_{k\omega} = \max\left[2\rho\sigma_{\omega_2} \frac{1}{\omega} \nabla k \nabla \omega, 1.0 \times 10^{-10}\right] \quad F_2 = \tanh(\arg_2^2)$$

$$\arg_2 = \max\left[\frac{2\sqrt{k}}{\beta' \omega y}, \frac{500\nu}{y^2 \omega}\right]$$

在模型中为获得正确的输运特性，定义涡粘性系数 μ_t

$$\mu_t = \frac{\alpha_1 k}{\max(\alpha_1 \omega, SF_2)}$$

上述式子中所需常数为 $\beta' = 0.09$ $\alpha_1 = 5/9$ $\sigma_{\omega_2} = 0.856$

2.2 计算模型

高速集装箱平车由机车和数节截面形状一样的集装箱平车组成，当气流流过机车一定距离后，绕流边界层的结构已趋于稳定，车辆气动力变化也趋于稳定，因此计算模型取机车连接三节 40 尺高柜集装箱平车^[5,6,7]。模型中省略了车头灯、门把手等，机车外形用现有机车外形并省掉了转向架而以裙板代替，如图 1 所示。为减小网格数量，采用半车模型。计算区域如图 2 所示。

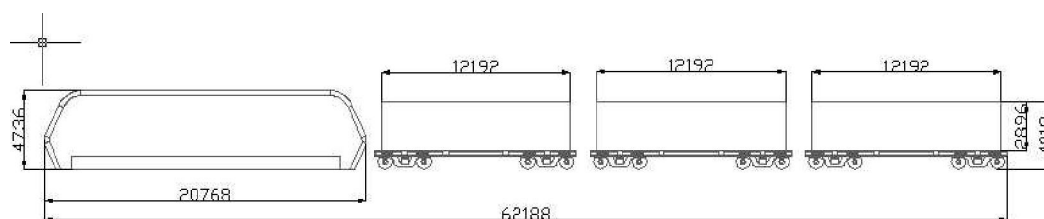


图 1 集装箱平车计算模型

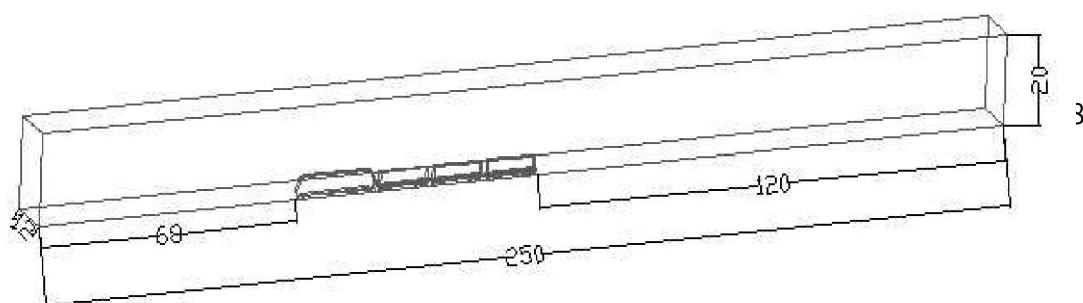


图 2 计算区域图

2.3 网格划分

采用切面体网格，在列车表面及地面处生成边界层网格，边界层总厚度为 0.025m 共 8 层，增长比为 1.5。整个区域的网格总数为 7351383 个，网格划分如图 3 所示。



图 3 计算区域网格

2.4 边界条件设定

根据相对性原理在流场中设定速度入口边界条件，来流速度大小为列车运行速度 200km/h，方向与列车运行速度方向相反；出口为压力出口边界，出口压力相对于参考大气压为零；对地面考虑地面效应，设定地面移动速度与主流入口流速大小相等，方向相同；计算域上表面和侧面设定为滑移墙壁（slipwall）；对称面为对称边界；其余为墙壁（wall）边界。

3. 计算结果及分析

图 4 和图 5 为列车表面的压力分布云图，可以看出列车表面压力分布符合下列规律：列车在向前行驶的过程中，将迎面静止的气流向后排开，气流受到机车头部的压缩后速度迅速降低，压力升高，机车头部附近出现正压区，且有较大的压力梯度。气流在机车鼻尖处分三部分：一部分流向车顶，一部分流向车体侧壁，一部分流向车底。机车的流线型使流向车顶的气流在流经机车曲面向车顶的过渡区时绕流速度加快，该区域的压力急剧降低，出现了高负压区，此后因列车壁面黏性的阻滞作用，速度逐渐降低，负压随之降低。机车侧墙与车头的流线型连接处同样因为流速加快出现了一个较大的负压区，下部气流在列车底部形成的是负压区。机车尾部受到空气黏性和尾部旋涡的影响，压力分布与头部相似，也是过渡区有较大的负压，其余为正压，但其压力均低于头部相应部位。机车车身大部分为负压，且明显低于机车头部和尾部向顶部过渡区及侧墙与车头的流线型连接处的负压值^[8,9]。

集装箱平车大部分为正压，其中第一节迎风面的正压最大。图 6 示出了对称面上机车与集装箱平车连接处的速度云图，由图可看出机车尾部因流线型不太好出现了流动分离，使该区域流体压力相对未发生分离的区域有所下降，增大了机车的压差阻力。机车尾流向前流动过程中受到集装箱平车迎风面的阻力作用，压力迅速增加，从而形成了很大的正压区。在流经集装箱上部棱角时，集装箱上方流体压力较小不足以迫使流体紧贴物面流动而发生分离，随后壁面的黏性阻滞作用使流速有所降低，压力增加，流体再次附着在集装箱表面。此时，之前棱角处的压力更低，从而形成了从再附点开始的反向流动，反向与正向流动相互作用，

形成了集装箱顶部的小漩涡并在此处形成一个负压区。

现有货车车辆受编组方式、结构、货运成本等的限制，没有客车车辆间的风挡装置，车辆间有较大的间隙。由于集装箱平车是钝体形状，气流流过车辆间隙时在惯性作用下向前流动，集装箱背风侧最初几乎没有气流流过，压力很小。到达下节集装箱迎风面的气流受阻力作用，流速下降，压力上升，且流动方向被迫发生改变：一部分流经集装箱棱角向上流动，从而产生了与第一节集装箱顶部相似的负压区，只是因流体速度有所降低，负压范围很小，流动分离现象也不如第一节明显；另一部分气流沿集装箱向下流动，并在流动过程中向压力小的集装箱背风侧逆流，形成一个比较大的漩涡。列车底部的气流也会参与间隙处漩涡的形成，使间隙处的流动更加复杂，如图 7所示。

图 8示出了列车尾流的流线图，由图可知：集装箱的钝体形状使尾流主要呈现 S形，很容易将地面尘土及道碴卷起，列车驶过后，尘土飞扬，污染铁路沿线环境，伤害道旁人员，在设计时可考虑集装箱流线型化。

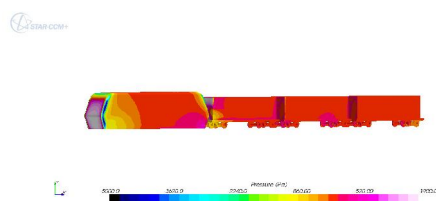


图 4 集装箱平车表面压力分布（迎风）

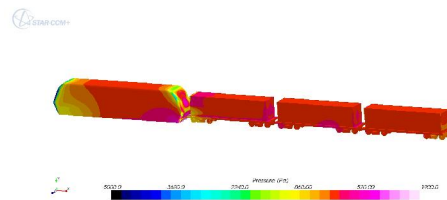


图 5 集装箱平车表面压力分布（背风）

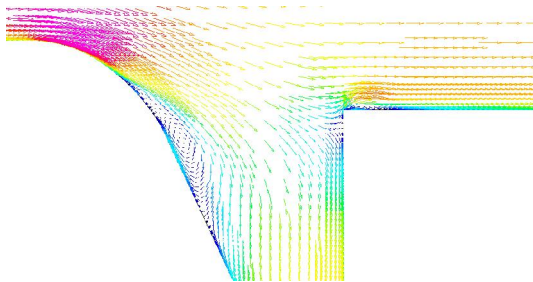


图 6 机车与集装箱连接处速度流线

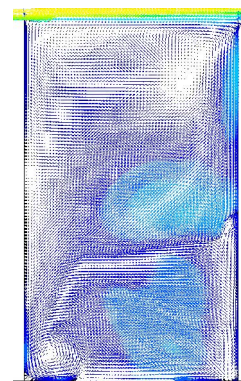


图 7 集装箱链接处速度云图

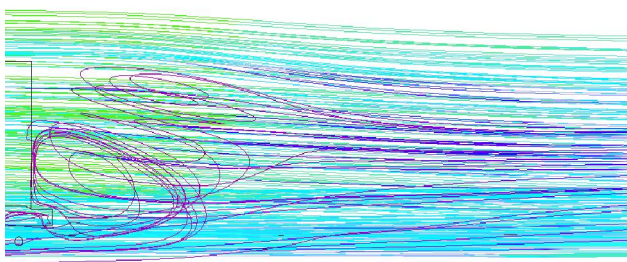


图 8 列车尾流的流线图

列车的气动阻力 D 包括压差阻力 N 和摩擦阻力 S ，由以下公式表示： $D=N+S$ 。表 1 给出了机车和集装箱等所受压差阻力、摩擦阻力、总阻力的计算结果。由结果可知：列车的气动阻力中压差阻力占很大比重，与机车连挂集装箱的气动阻力很大，其次是最后一节集装箱的气动阻力。在动车组列车空气动力学计算中，车辆间平滑过渡，没有间隙，中间车辆主要受摩擦阻力。如果开行的高速集装箱平车采用 20 节车编组方式并采用某种结构使各车辆平滑过渡，没有间隙，则可以减小约 10500N 的力，节省约 580kW 的功率。可见，在进行高速货运列车的设计研究中，进行机车外形、机车和集装箱平车连接处及各集装箱平车连接处的改进极为关键。

表 1 列车的气动阻力

	压差阻力 (N)	摩擦阻力 (N)	总阻力 (N)
机车	8538	936	9474
集装箱 1	5414	368	5782
集装箱 2	492	302	794
集装箱 3	1614	284	1898
Total	16058	1890	17948

为了研究机车与集装箱平车相对高度差对列车空气阻力的影响，对机车连挂三节 40 尺柜集装箱平车和机车连挂三节与其相对高度差为零的集装箱平车也做了数值仿真。其中连挂 40 尺柜时其相对高度差为 1023mm，连挂 40 尺高柜时为 717mm，结果如下：

表 2 机车连挂三节 40 尺柜集装箱平车时的阻力

	压差阻力 (N)	摩擦阻力 (N)	总阻力 (N)
机车	8480	942	9422
集装箱 1	4040	346	4386
集装箱 2	418	280	698
集装箱 3	1596	268	1864
Total	14534	1836	16370

表 3 机车连挂三节与其高度差为零的集装箱平车时的阻力

	压差阻力 (N)	摩擦阻力 (N)	总阻力 (N)
机车	6754	926	7680
集装箱 1	8562	406	8968
集装箱 2	634	342	976
集装箱 3	1966	332	2298
Total	17916	2006	19922

由表可知，连挂 40 尺柜和 40 尺高柜时，机车的总阻力相差不大，而连挂与机车高度差

为零的集装箱平车时,机车的总阻力下降近 2kN 主要是压差阻力下降。原因可能是机车尾流在流经集装箱时受到的阻力范围较大,气流流速降低,机车尾部压力较其他两种情况有所升高,从而使机车前后表面的压力差减小。如图 9和 10机车尾部压力比较,两种情况下机车尾部压力分布类似,但是连挂与机车高度差为零的集装箱平车时尾部正压范围比较大,故机车的压差阻力较小。

集装箱平车 1的压差阻力和摩擦阻力均随着相对高度差的增加而增加,其中压差阻力增加较快,尤其是相对高度差为零时,集装箱平车迎风面受阻面积增大,压差阻力呈跳跃式增加。集装箱平车 2和 3阻力变化与第一节类似,只是没有第一节变化大。列车总阻力随着机车与集装箱平车相对高度差的减小而增加。当高速集装箱平车采用 20节车编组方式时,三种情况下机车和集装箱的受力分别为 28236N 31446N和 36514N。在实际应用过程中,应该综合考虑机车的牵引功率,运货量的大小等因素,选取高度合适的集装箱。此外,随着相对高度差的减小,第一节集装箱平车棱角处的流动分离现象越来越明显,集装箱上部的涡流增大,列车流场更加复杂。如图 11所示。

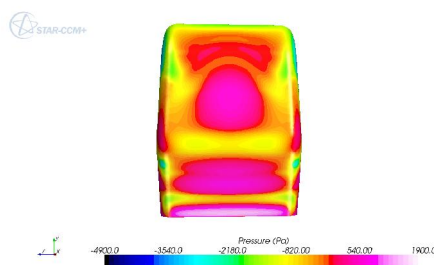


图9 连挂 40 尺高柜集装箱时机车尾部压力

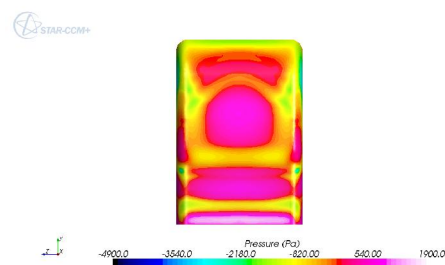


图 10 连挂与机车高度差为零的集装箱时机车尾部压力

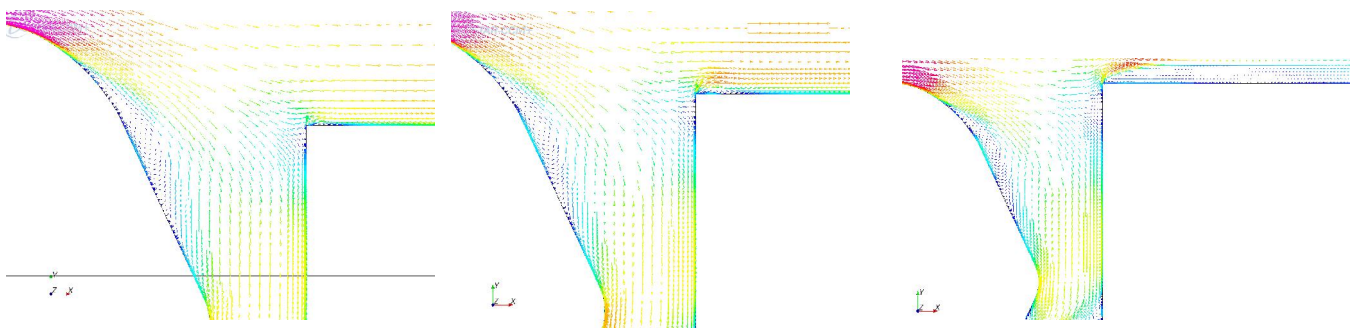


图 11 相对高度差由小到大缩对应的第一节集装箱棱角处的流动分离现象

4 结论

通过对 200km/h高速集装箱平车进行数值模拟计算,得到了列车表面压力分布、机车和各集装箱平车所受阻力以及车间流场速度分布等,并对机车和集装箱平车相对高度差对列车空气阻力的影响进行了分析。由计算结果可知高速集装箱列车受到的空气阻力较大,其中压

差阻力占很大比重,列车绕流复杂,列车空气动力学性能比较差。列车的阻力随着机车与集装箱平车相对高度的减小而增加。根据计算结果,对高速集装箱平车设计提出以下建议:

1 本文中的机车外形采用现有机车外形,流线型比较差,机车所受的阻力较大,如果采用流线型比较好的机车则可以有效地减少流动分离,从而降低机车的压差阻力,使列车(直接与空气气流相接触的机车)有良好的空气动力特性。

2 如有可能可在机车与集装箱平车之间设置导流装置,使气流由机车平稳过渡到集装箱平车表面,减小机车、集装箱平车的压差阻力,具体结构有待进一步的研究设计。

3 如果不在机车与集装箱平车之间设置导流装置,就应该综合考虑机车的牵引功率,运货量的大小等因素,选取高度合适的集装箱。

4. 对现有集装箱平车进行改造。动车组和高速客车的外风挡使其有很好的空气动力性能,对其改造主要考虑使集装箱流线型化和在集装箱平车上加装类似客车外风挡的结构。

5. 考虑集装箱平车间距对列车空气动力性能的影响,有待进一步研究。

5.参考文献:

- [1] 傅茂海,李芾,于明,马志援. 160km/h高速货车转向架方案及其动力学性能分析[J]. 铁道车辆, 2003,41(11): 1-6.
- [2] 张健,陈南翼. 降低货物列车空气阻力的研究[J]. 国外信息. 1997:38-41
- [3] Raghu S. Raghunathana, H.-D. Kimb, T. Setoguchic. Aerodynamics of high-speed railway train. Progress in Aerospace Sciences 38 (2002) 469- 514.
- [4] 吴军,谷正气,钟志华. SST湍流模型在汽车绕流仿真中的应用[J]. 汽车工程, 2003 4(25):326-329.
- [5] Hassan Hemida, Chris Baker. Large-eddy simulation of the flow around a freight wagon subjected to a crosswind. Computers & Fluids. 39(2010)1944-1956.
- [6] 李燕飞,梁习锋,刘堂红. 环境风对路堤上快运集装箱平车气动力性能影响[J]. 铁道科学与工程学报, 2007,4(5):78-82.
- [7] 周丹,张健. 横风对双层集装箱平车气动特性的影响[J]. 铁道机车车辆, 2004, 24(3): 17-20.
- [8] 田红旗. 列车空气动力学[M]. 北京:中国铁道出版社, 2007.
- [9] 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.