

不同磁浮列车外形的气动性能比较*

刘堂红^{1,2}, 田红旗¹, 王承尧²

(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 :上海磁浮列车由于流线型车头较短,气动性能并不理想。根据国内厂家给定的列车横断面尺寸和对气动性能的要求,对国产磁浮列车气动外形进行多方案设计,通过求解三维可压 N-S 方程和 $k-\epsilon$ 双方程湍流模型,对提出的磁浮列车各种外形方案的气动性能进行数值模拟计算,并根据计算结果进一步改进气动外形,如此反复,直至得出气动性能和外观最优的磁浮列车外形。在最终选定的三种设计方案中,方案 3 由于水平投影轮廓线较窄、最大纵剖面轮廓线曲率较小,其整车空气阻力和列车交会压力波都较其它两种方案要小,因此为最佳的气动外形方案。通过比较分析,此次选用的国产磁浮列车外形,列车以 430km/h 运行时三节车总的空气阻力为 33.84kN,而上海磁浮列车为 54.07kN;国产磁浮列车最大列车交会压力波幅值为 2913Pa,而在同等条件下上海磁浮列车为 3827Pa,其气动性能明显优于上海磁浮列车。

关键词 :磁浮列车;数值模拟;外形优化;气动性能

中图分类号 :U237 **文献标识码** :A

Aerodynamic Performance Comparison of Several Kind of Nose Shapes of Maglev Train

LIU Tang-hong^{1,2}, TIAN Hong-qi¹, WANG Cheng-yao²

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

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

Abstract :Due to the short streamline nose, the aerodynamic performance of Shanghai maglev train is not very good. In this paper, several streamline shapes were designed for domestic maglev train according to the given section and requirements supplied by domestic rolling stock works. By using the three-dimensional compressible N-S equations and turbulence model, aerodynamic performances of all schemes were analyzed, and then the streamline shapes were optimized based on the calculation results. In so doing, the best streamline shape with good aerodynamic performance and good appearance were obtained. Because of the narrowest horizontal contour line and the smallest curvature of vertical contour line, the aerodynamic drag force and train passing pressure pulse of the third scheme are the least among the final three selected schemes, so it is the best. The results show that this streamline shape designed for domestic maglev train is better than Shanghai maglev train (TR08) in aerodynamic performance, and the aerodynamic drag force of domestic maglev train is 33.84KN at the speed of 4300 km/h, while TR08 is 54.07KN; at the same time, the train passing pressure pulse of domestic maglev train is 2913Pa, while TR08 is 3827Pa.

Key words :maglev train; numerical simulation; shape optimization; aerodynamic performance; aerodynamic drag force; train passing pressure pulse

近 20 年来,国外磁浮技术应用于现代交通,并成为高科技的现代地面交通运输方式,已取得突破性的进展。已从磁浮原理性试验研究步入磁浮运行技术的试验,进入到进行商业性的综合技术运行试验。德国的常导高速磁浮列车和日本的超导高速磁浮列车,都以时速 500km 的速度向世人展示技术的成熟,并证实能为人类社会提供全新的高速地面交通工具。为跟踪世界磁浮技术的发展,国家科委将“磁浮列车关键技术(常导)”列入“八五”科技攻关计划,通过对低速常导磁浮车的研制,掌握了悬浮、推进、导向、

* 收稿日期 :2005 - 12 - 15

基金项目 :国家 863 高技术资助项目(2004AA505240);牵引动力国家重点实验室开放课题资助项目(TPL0402)

作者简介 :刘堂红(1976—),男,博士生。

控制理论技术。随着上海高速磁浮列车的成功运营,磁浮列车国产化的研究已势在必行,且已取得了实质性的进展,本文即为国产化磁浮列车外形设计的部分研究内容。上海磁浮列车(TR08)头、尾端流线型部位长度为5.12m,车体宽度达3.7m,以最高速度430km/h运行时会产生较大的空气阻力和列车交会空气压力波^[1-2],因此在保持TR08车体宽度不变的基础上,根据生产厂家的要求,增加列车流线型长度至6m并对其外形进行优化,以改善国产磁浮列车气动性能。

1 列车头部外形设计方案

根据给定的列车横断面尺寸,结合第一阶段“863”项目“车辆空气动力特性研究”成果^[3],设计出三种流线型头部外形(图1~图5所示),其特征列于表1中。

表1 三种流线型头部外形特征

Tab.1 Three streamline shapes' characteristics

编号	列车头部外形特征			
	流线型头部长度	最大纵剖面轮廓线	水平轮廓线	头形
1	6.0m	曲率最大	前端最宽	单拱
2	6.0m	曲率比方案1小,比方案3大	前端比方案1窄,比方案3宽	
3	6.0m	曲率最小	前端最尖	

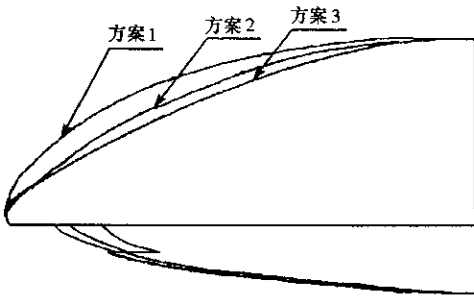


图1 流线型头部纵向投影轮廓线
Fig.1 Vertical outline of streamline nose

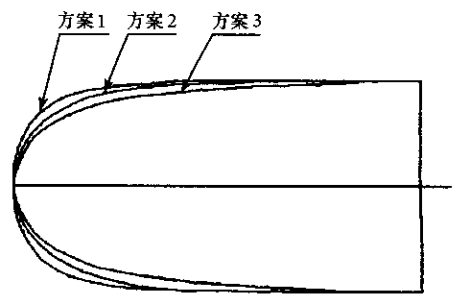


图2 流线型头部水平投影轮廓线
Fig.2 Horizontal outline of streamline nose

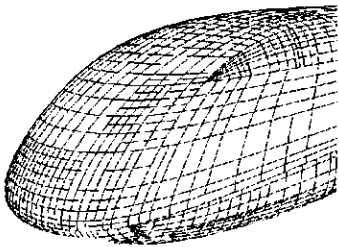


图3 1号方案头部外形
Fig.3 Shape of the first scheme

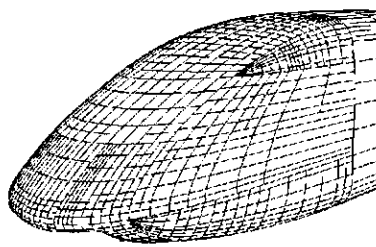


图4 2号方案头部外形
Fig.4 Shape of the second scheme

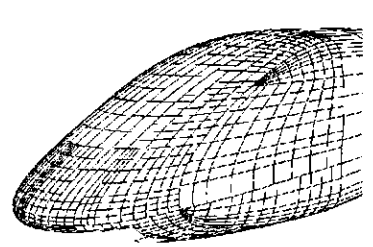


图5 3号方案头部外形
Fig.5 Shape of the third scheme

2 磁浮列车气动性能计算分析

2.1 控制方程

列车气动性能数值模拟计算,分为定常流动和非定常流动两类。列车的空气阻力和升力按定常流动进行计算,列车交会空气压力波为非定常流动,需采用滑移网格或动网格技术,以实现两交会列车之间的相对运动。

高速磁浮列车其最高运行速度(430km/h)在马赫数0.3以上,必须考虑空气的可压缩性,且列车流场雷诺数一般大于 10^6 ,因此,对高速磁浮列车气动性能的计算分析,需采用三维粘性可压缩湍流流动处理。本文采用 $k-\epsilon$ 双方程湍流模型,其流场计算数学模型可用下面的控制方程组描述^[4]:

连续性方程：

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho \mathbf{v}) = 0 \tag{1}$$

动量守恒方程：

$$\frac{\partial(\rho v_x)}{\partial t} + \text{div}(\rho v v_x - \mu \text{grad} v_x) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \text{div} \mu \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial x} \tag{2}$$

$$\frac{\partial(\rho v_y)}{\partial t} + \text{div}(\rho v v_y - \mu \text{grad} v_y) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \text{div} \mu \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial y} \tag{3}$$

$$\frac{\partial(\rho v_z)}{\partial t} + \text{div}(\rho v v_z - \mu \text{grad} v_z) = -\frac{\partial p}{\partial z} + \text{div} \mu \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial z} \tag{4}$$

湍流动能方程：

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \text{div}(\rho v k - \frac{\mu}{\sigma_k} \text{grad} k) = G - \rho \epsilon \tag{5}$$

湍流动能耗散率 ϵ 方程：

$$\frac{\partial(\rho \epsilon)}{\partial t} + \text{div}(\rho v \epsilon - \frac{\mu}{\sigma_\epsilon} \text{grad} \epsilon) = \frac{\epsilon}{k} (C_1 G - C_2 \rho \epsilon) \tag{6}$$

式中 ρ 为空气密度； \mathbf{v} 为速度矢量； p 为压力； v_x, v_y, v_z 为 x, y, z 方向上的速度分量； k 为湍流动能； ϵ 为湍流动能耗散率； G 为湍流动能生成项； μ 为空气粘性系数； C_1, C_2 为经验常数， $\sigma_k, \sigma_\epsilon$ 分别是与湍流动能 k 和耗散率 ϵ 对应的 Prandtl 数。

2.2 磁浮列车空气阻力、升力分析

随着列车运行速度的提高，空气阻力在运行总阻力中占的比重不断增大，通过对轮轨系统列车的研究，当列车运行速度达 300km/h 时，空气阻力占到运行总阻力的 80% 左右（曲线及坡道阻力未计入）^[5]。对于更高运行速度的磁浮列车，除克服切割悬浮、导向磁场的作用力外，主要是空气阻力，其在运行总阻力中所占比重会更大。对于升力，正升力可减小悬浮电磁铁的悬浮力，因此，正升力愈大，愈有利于磁浮列车运行^[6-7]。

本次按三节车编组（头车 + 中间车 + 尾车）进行数值计算。在建模过程中将磁转向架进行了简化，其内表面按光滑壁面处理，由于磁转向架与磁轨之间间隙较小，气流速度较低，这一简化不会对计算结果有大的影响。计算模型尺寸如图 6 所示（以方案 3 为例）。

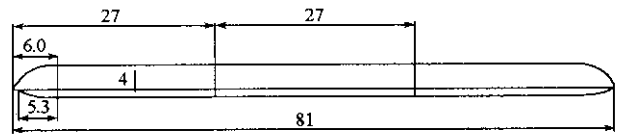


图 6 阻力、升力计算模型尺寸(单位:m)

Fig.6 Calculation model size of drag force and lift force(unit:m)

表 2 为列车以 430 km/h 速度运行时三种外形方案列车空气阻力、升力的计算结果。其计算结果表明：外形方案 3 头车和尾车空气阻力值较外形方案 2 和外形方案 2 小，外形方案 1 阻力值最大；中间车空气阻力三种方案接近。所有列车尾端升力远大于前端，外形方案 3 头车和尾车空气升力值较外形方案 1 和外形方案 2 小，外形方案 1 升力最大。

表 2 三种方案及 TR08 空气阻力、升力值(kN)

Tab.2 Drag force and lift force of three schemes and TR08(kN)

车辆在列车 中编组部位	外形方案 1		外形方案 2		外形方案 3		TR08	
	阻力	升力	阻力	升力	阻力	升力	阻力	升力
头车	9.13	10.29	7.55	8.85	6.77	8.27	14.87	8.01
中间车	8.96	3.78	9.10	3.91	9.05	3.84	8.93	3.95
尾车	20.99	28.56	19.68	27.47	18.02	25.85	30.27	34.33
三车合力	39.08	42.63	36.33	40.23	33.84	37.96	54.07	46.29

2.3 磁浮列车交会压力波分析

空气压力波幅值大小取决于车间距、列车运行速度及列车的外形。车间距愈小、运行速度愈高、列车气动外形不良,引发的空气压力波幅值愈大,如果在隧道中交会,该幅值将成倍增长。过大的交会空气压力波导致列车横向振动加大,将危及行车安全、损坏车体结构和导向磁铁;车厢气密性不良还会影响旅客舒适性^[8]。列车交会时周围空气流动为非定常流动,其计算是由很多时间步来完成的,为缩短计算时间,本次计算模型取头尾两节车并截去部分中间截面不变的车体,总长为42m,线间距为5.1m,计算模型尺寸如图7所示。由于本次交会计算主要是对三种外形方案进行比选研究,上述简化不会对研究结果产生影响。这里只计算两列车都以430km/h速度运行时的交会压力波。本次计算采用非结构化四面体网格,体网格总数约为85万。

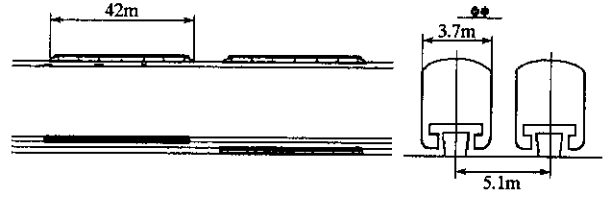


图7 交会压力波计算模型尺寸(单位:m)
Fig.7 Calculation model size of train passing pressure pulse(unit m)

对三种方案,均布置了13个测点,测点布置示于图8。从以前的计算和实车试验结果可知,交会压力波头波的总幅值比尾波大,图9为方案3④号测点的交会压力波波形,也说明了这一点,所以三种方案进行比较时,只对头波幅值进行比较,计算结果示于表3。

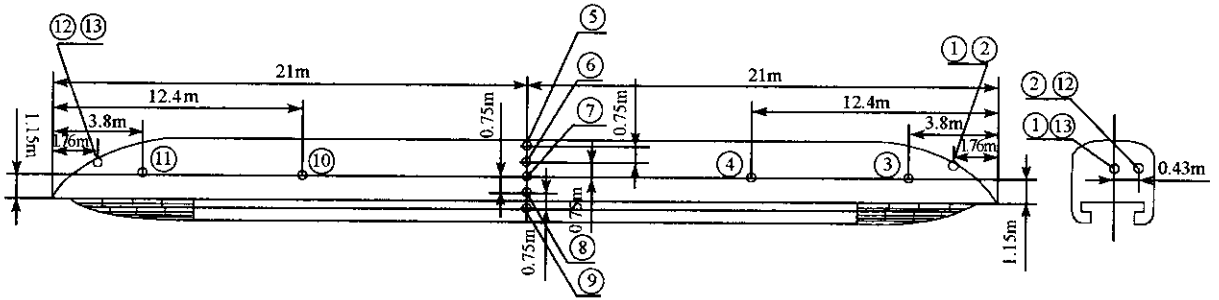


图8 交会空气压力波测点布置图
Fig.8 Measuring point distributing of train passing pressure pulse

从计算结果可知:方案3的交会压力波最小,其次是方案2,方案1的交会压力波最大。而由文献[3]可知,同等条件下上海磁浮(TR08)列车的最大交会压力波为3827Pa,明显比这三种方案大。

表3 三种方案交会压力波幅值(Pa)

Tab.3 Train passing pressure pulse of three schemes(Pa)

测点	方案1	方案2	方案3
1	1363	1308	1237
2	1077	1025	953
3	2974	2692	2191
4	2970	2944	2816
5	2783	2548	2471
6	2977	2900	2826
7	3043	3041	2913
8	2855	2762	2639
9	2107	2075	1934
10	2990	2941	2816
11	3185	3096	2314
12	1247	1188	1136
13	1137	1117	1060

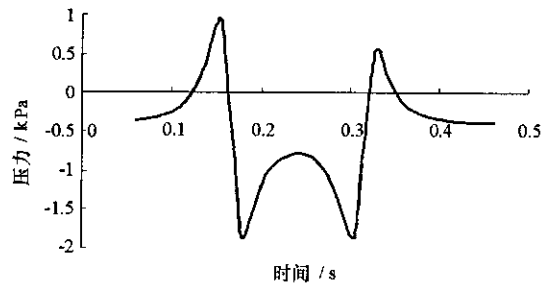


图9 方案3④号测点交会压力波波形
Fig.9 No.4 measuring point's train passing pressure pulse of the third scheme

对于交会压力波的变化规律,分别选取方案3水平方向测点和垂向方向测点进行分析,交会压力波在车长方向和车高方向的变化规律分别如图10和图11所示,从图中可以看出,交会压力波沿车长方向随着测点距车头鼻尖距离的增大先增加,然后减小,车体中部测点交会压力波最大。交会压力波幅值与测量车上测点位置及交会车间的横向距离有关,测点与交会车横向距离越大,则压力波幅值越小,交会一侧以纵向对称面处(鼻尖)压力波幅值最小。距离交会车横向距离越小,则交会压力波幅值越大。同时由于空气附面层的影响,测点离列车端部的距离越大,则测点受到的交会压力波越大。因此,在列车交会过程中,列车侧窗受到的空气瞬态压力冲击要大于前窗所受到的冲击,侧窗玻璃比前窗更容易受到损坏,可重点对侧窗的压力波规律进行研究。交会压力波在车高方向的变化却是在车体最宽的中间部位(测点⑦)最大,随着测点高度的增加或减小,交会压力波也明显减小。

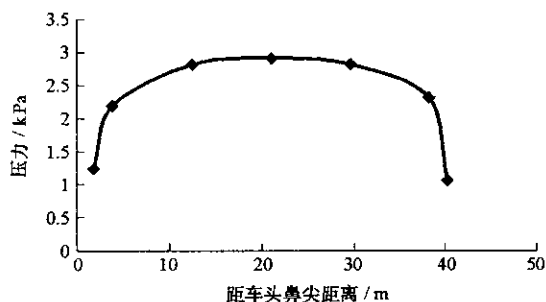


图10 交会压力波沿车长方向的变化

Fig. 10 Train passing pressure pulse variation in horizontal direction

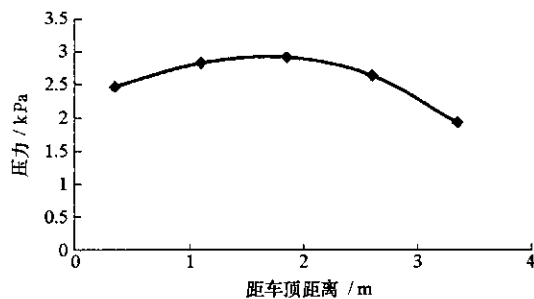


图11 交会压力波沿车高方向的变化

Fig. 11 Train passing pressure pulse variation in vertical direction

3 结论

从上述计算分析可知,磁浮列车空气动力性能随列车气动外形变化的规律,与轮轨系统高速列车研究结果相同^[9]:流线型端部纵剖面轮廓线曲率变小能降低空气阻力,而水平轮廓线宽度变窄能降低交会压力波幅值,但同时会使气动升力减小。磁浮列车要求具有小的空气阻力、大的气动升力和小的列车交会空气压力波,但这些要求彼此之间是一矛盾体,需综合考虑各种因素。在以相同列车横断面设计的国产化磁浮列车外形中,方案3的空气阻力和列车交会压力波都最小,这也是列车高速运行时必须考虑的首要问题,因此方案3为最佳的气动外形方案,且其气动性能明显优于上海磁浮列车。

参考文献:

- [1] 刘堂红,田红旗.磁浮列车明线交会横向振动分析[J].交通运输工程学报,2005,5(1):39-44.
- [2] 姚曙光,许平.高速磁浮列车车体国产化[J].交通运输工程学报,2004,4(2):40-44.
- [3] 田红旗,卢执中.上海磁浮列车研究报告[R].长沙:中南大学高速列车研究中心,2003.
- [4] 吴望一.流体力学[M].北京:北京大学出版社,2004:145-192.
- [5] Raghunathan R S, Kim H D, Setoguchi T. Aerodynamics of High-speed Railway Train[J]. Progress in Aerospace Sciences, 2002, 38: 469-514.
- [6] 武青海,俞翰斌,李和平.磁悬浮列车空气动力学仿真计算探讨[J].铁道机车车辆,2004,24(2):18-20.
- [7] 毕海权,雷波,张卫华.TR型磁浮列车气动特性数值计算研究[J].铁道学报,2004,26(4):51-54.
- [8] 张经强,梁习锋.高速列车外形的气动性能数值计算和头部外形的改进[J].计算力学学报,2003,20(5):631-635.
- [9] 梁习锋,田红旗.列车气动性能评估参数研究[J].中国铁道科学,2003,24(1):38-42.

