

基于分离涡方法的高速列车横风非定常气动特性

郝艳红¹, 毛军¹, 高亮¹, 杨国伟²

- (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: 采用分离涡方法模拟恒定风场中高速列车绕流的非定常流动, 在时域和频域内分析车辆气动特性的瞬态性质。结果表明: 在恒定来流中, 列车的背风侧和尾车的尾迹区存在着强度不同、空间几何尺度各异并随时间随机变化和脉动的分离涡; 各节车辆的非定常气动荷载的时均值与按整场定常流动计算得到的结果基本一致, 但瞬态荷载峰值却比时均值高出较多; 振幅频谱和功率谱密度的最大峰值所对应的频率不尽相同, 但都集中在 0~4 Hz 内, 处于某些列车部件的固有频率范围内。头车的横向力和倾覆力矩的分布频率范围较大, 与车体自身频率耦合的范围较宽, 横风气动安全性较差。

关键词: 高速列车; 横风; 气动力/力矩; 功率谱密度; 分离涡模拟

中图分类号: U266.2

文献标志码: A

文章编号: 1672-7207(2015)03-1129-11

Aerodynamic force/moment for high-speed train in crosswind field based on DES

XI Yanhong¹, MAO Jun¹, GAO Liang¹, YANG Guowei²

- (1. The Civil Institute, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China;
2. Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract: Flow field around high-speed train and transient behavior of the aerodynamic characteristics in constant wind field were simulated by Detached Eddy simulation, and the unsteady property was analyzed. The results show that, in steady inlet flow field, there are separated vortexes with different intensities and geometric dimensions that change and pulse randomly with time on the leeward side and wake region of train; that the time-averaged value of unsteady aerodynamic load value of each car is almost the same as that calculated in whole-field steady flow, while the peak value of transient load is higher than the time-averaged value; that the maximum peak values of amplitude frequency spectrum and power spectrum are not the same, but they are concentrated in 0~4 Hz, which is in the range of inherent frequency of some train parts. For head car, the range of distribution frequency of lateral force and overturning moment is large, it has a wide range of frequency coupling with the train itself, and the aerodynamic safety is poor in crosswind.

Key words: high-speed train; crosswind; aerodynamic force/moment; power spectrum density; DES

由横风引起的高速列车空气动力学问题越来越突出, 由此引起的列车事故屡见不鲜。由于流场及列车

本身模型的复杂性, 在目前的研究中, 一般将其简化为一个定常问题。但是, 已有部分研究结果指出, 横

收稿日期: 2014-05-11; 修回日期: 2014-07-20

基金项目(Foundation item): 国家自然科学基金资助项目(51278032); “十一五”国家科技支撑计划重大项目(GTYZ200902); 中国博士后科学基金资助项目(2013M530520) (Project(51278032) supported by the National Natural Science Foundation of China; Project(GTYZ200902) supported by Key Projects in the National Science & Technology Pillar Program during the Eleventh Five-Year Plan Period; Project(2013M530520) supported by National Science Foundation for Post-Doctoral Scientists of China)

通信作者: 毛军, 博士, 博士生导师, 教授; 从事高速列车空气动力性和火灾科学研究; E-mail: jmao@bjtu.edu.cn

风作用在列车上的定常气动载荷不足以解释列车被大风吹翻的原因^[1], 研究横风下列车的非定常气动载荷具有重要的意义。Christina 等^[2]指出, 在较大的横风情况下, 列车的空气动力特性表现出很强的非定常性。关于高速列车非定常空气动力学特性, 目前尚缺乏针对真实场景的系统研究。一般是将列车模型简化或把三维问题简化为二维问题进行研究^[3-6], 还没有检索到对横风作用下实车非定常气动特性研究的报道。Hassan 等^[7-8]指出, 横风导致列车所受非定常空气动力的频率较低, 接近真实列车系统的固有频率, 应该研究横风作用下列车空气动力特性的非定常特性。因此, 为了进一步评估横风中高速列车的气动安全性, 本文作者以 CRH 型高速列车为典型对象, 根据其真实外形建立三维模型, 采用兼有雷诺时均方法和大涡模拟的优点并可应用于模拟列车这种长大物体周围的瞬态流场^[9]、计算结果和实验结果基本吻合的^[10-13]分离涡模拟法进行大规模并行计算, 分析列车的非定常扰流流场和气动荷载的时域及频域特性。

1 计算模型和条件

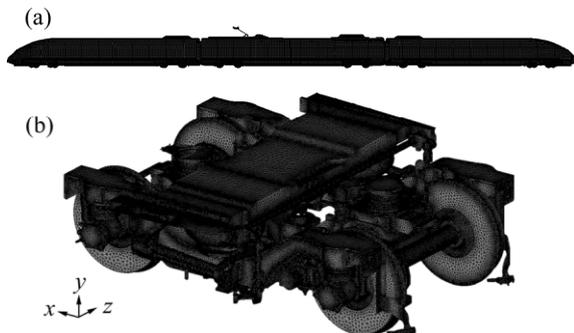
1.1 计算模型

本文作者采用 3 辆车编组, 即头车+中间车+尾车, 长度分别为 25.675, 24.775 和 25.675 m, 列车宽度为 3.265 m, 高度为 3.89 m, 考虑真实的转向架、受电弓、风挡、空调导流罩等细部结构, 头车和尾车均为流线形。所用模型及网格如图 1 所示, 计算域如图 2 所示。

1.2 计算条件和方法

1) 列车车速 300 km/h; 横风风速 20 m/s, 采用指数风, 即在气象上 10 m 高度处的风速为 20 m/s, 横风风向角为 90°, 指数风场按照参考文献^[14]确定。

2) 采用 trim 网格, 加密列车周围、列车尾流、列



(a) 整车图; (b) 转向架网格划分

图 1 所用模型及网格图

Fig. 1 Train model and grid system

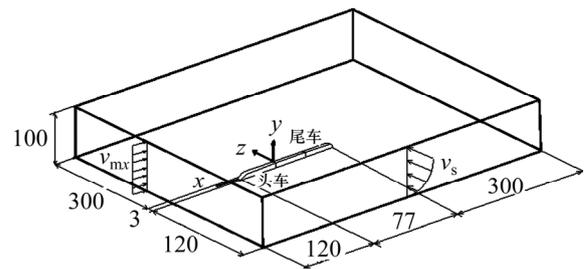


图 2 计算域

Fig. 2 Computational domain

车的背风侧等流场变化大的区域。定常计算时, 在近壁面区采用壁面函数法, 列车壁面和地面的边界层均设 6 层, 共 4.86 mm, 近壁面第 1 层网格到壁面的距离均为 0.2 mm, 网格总量约为 3 100 万; 在分离涡非定常工况下, 列车壁面和地面的边界层均设 15 层, 网格总量约为 8 200 万。

3) 定常计算中, 数值模拟使用 SST $k-\omega$ 两方程湍流模型, 扩散项使用二阶中心差分格式, 对流项采用二阶迎风格式进行离散; 分离涡非定常计算中, 分离涡模拟基于 Menter $k-\omega$ SST 2 个方程湍流模型, 经反复试算, 考虑计算精度及效率 2 个方面因素, 确定非定常计算的时间步长为 5×10^{-4} s, 每 1 个时间步内进行 20 次子迭代, 通过监测列车气动力参数以保证每个时间步内的计算收敛, 总共计算 4 000 个时间步, 并保存每一时间步的有效数据, 非定常时程为 2 s。计算时首先使用雷诺时均法对定常流场进行求解, 得到的结果作为非定常流场的初始准定常解即初始条件。然后, 使用分离涡模拟方法进行非定常流场计算。

1.3 数值计算方法可靠性验证

在中国空气动力研究与发展中心的 8 m × 6 m 风洞中进行高速列车气动性能的缩尺模型实验, 对相同的模型和工况进行数值模拟计算, 与缩尺模型实验的结果进行对比分析, 以验证数值模拟方法的适用性和准确性。

2 计算结果与分析

2.1 列车外流场的流线谱

列车外流场的非定常性质可通过不同时刻的流场结构反映出来。在头车、中间车和尾车上各取若干截面, 对其流线图进行分析, 由于篇幅限制, 只给出 2 个截面的流线图, 如图 3 和图 4 所示。由图 3 和图 4 可知: 采用分离涡模拟得到的流场信息比雷诺平均的

结果要细致得多。在非定常流动各个时刻的流线路图中,在 $t=0.1\text{ s}$ 时与定常流动结果最接近。但随着时间的推移,与定常流动的相比,截面在各个时刻的背风侧分离涡的几何尺度和位置均发生变化,而且分离涡的数量也发生改变,2种流动流场结构的差异逐步增大。

如果视定常流动的结果为非定常流动的起始时刻 ($t=0\text{ s}$),那么在整个时间进程中,可以看到背风侧涡流的演化过程。例如图3所示的截面,在整个过程中始终存在着主流分离涡A,但其形状、尺寸和位置发生变化,并伴生出附加的小尺度分离涡。在 $t=0\text{ s}$ 时,背风侧壁面上下转角处开始形成小分离涡B和C;小涡C在 $t=0.1\text{ s}$ 时形成,在 $t=0.5\text{ s}$ 时破碎扩散,在 $t=1.0\text{ s}$ 时又重新开始构造,至 $t=1.4\text{ s}$ 时完全形成;而小涡B在 $t=1.0\text{ s}$ 时初现雏形,在 $t=1.4\text{ s}$ 时完全形成,在 $t=2.0\text{ s}$ 时又破碎扩散。其间,在 $t=1.4\text{ s}$ 时,生成了小涡D,共有4个分离涡初现,该时刻是背风侧出现分离涡相对最多的时刻,随后又恢复到3个。

另外,转向架所在截面的车体底部存在较多不稳定的小分离涡,而且会影响到车体侧面下方的流场,伴生出一些分离涡。这一现象说明转向架、受电弓基

座等局部构件的扰动对非定常流动的影响较大,也是引起局部非定常流动的因素。

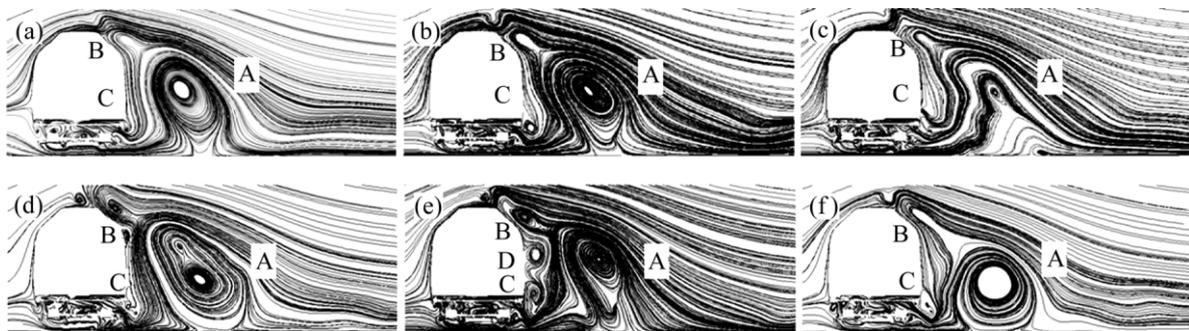
在列车的尾流区,如图4所示的位于下游距鼻锥 3.462 m 的截面,与定常流动的流线路图相比,涡流随着时间的推进而演化的不稳定性也是十分明显的。2个主涡虽然一直保持,但其形状、尺度和位置是变化的。而且在它们之间有1个不稳定的小尺度涡周期性地产生和消失。

2.2 列车气动荷载的时域及频域特性

由于列车外流流场结构的非定常性,列车表面的压力分布具有明显的脉动性质,因此,列车所受的气动荷载也是非定常的,分析其时域特性可以得到气动荷载随时间变化的规律;分析其频域特性可以发现气动力峰值频率与车辆系统固有振动模态频率之间的关系,有助于对列车的气动安全性进行深入分析。

2.2.1 列车表面的压力分布

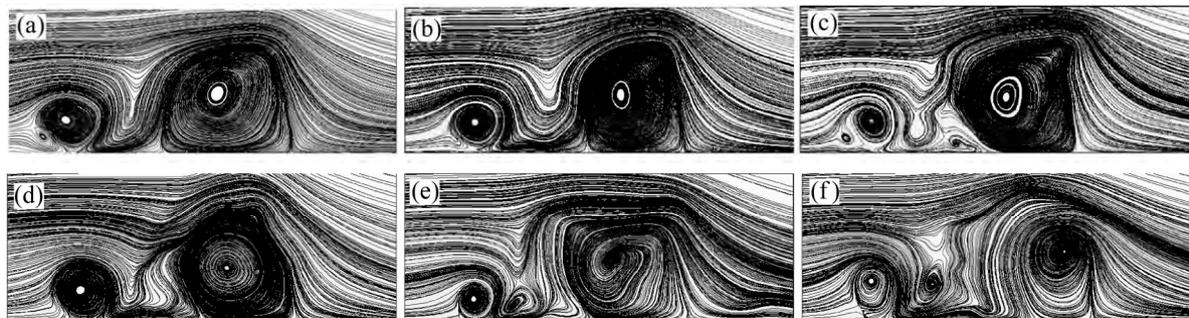
为了分析压力波的时程变化情况,在列车的表面和周围布置若干压力监测点。图5所示为各监测点的位置。压力监测点3和4位于头车上,点6,8,10,7和9位于中间车上,点15位于尾车上;点8距轨顶



(a) 定常流动; (b) $t=0.1\text{ s}$; (c) $t=0.5\text{ s}$; (d) $t=1.0\text{ s}$; (e) $t=1.4\text{ s}$; (f) $t=2.0\text{ s}$

图3 列车上横截面的定常与非定常流动的流线路图

Fig. 3 Motion patterns of steady and unsteady flow at same cross section



(a) 定常流动; (b) $t=0.1\text{ s}$; (c) $t=0.5\text{ s}$; (d) $t=1.0\text{ s}$; (e) $t=1.4\text{ s}$; (f) $t=2.0\text{ s}$

图4 列车尾流横截面的定常与非定常流动的流线路图

Fig. 4 Motion patterns of steady and unsteady wake flow at same cross section

面 1.82 m，是列车横截面的最宽处。这些点是列车表面上的压力监测点，其中，监测点 3，4，6，8 和 10 均位于背风侧的壁面上。监测点 S_4, S_8, S_{12}, S_{13} 和 S_{15} 是列车周围的压力监测点，共有 A，B 和 C 3 列，A 列布置在迎风侧，B 列和 C 列布置在背风侧，沿纵向分布，与头车的鼻锥高度相同，距轨顶面 0.9 m。

图 6 所示为列车背风侧表面监测点的压力变化曲线。由图 6 可知：表面压力波围绕某一平均值脉动，并具有一定的脉动周期，但各点脉动周期并不完全相同。脉动程度最大的是中间车的监测点 6，压力在正压和负压之间变化，最大压差可达 350 Pa，其次是监测点 8 和 10；其余监测点的压力均为负压，尾车上监测点 15 的压力脉动幅度最小；头车的监测点 3 和 4 的压力脉动幅度位于中间车的和尾车的之间。同一横截面，离列车底部越近，受到的扰动越大，压力波脉动的幅度越大。

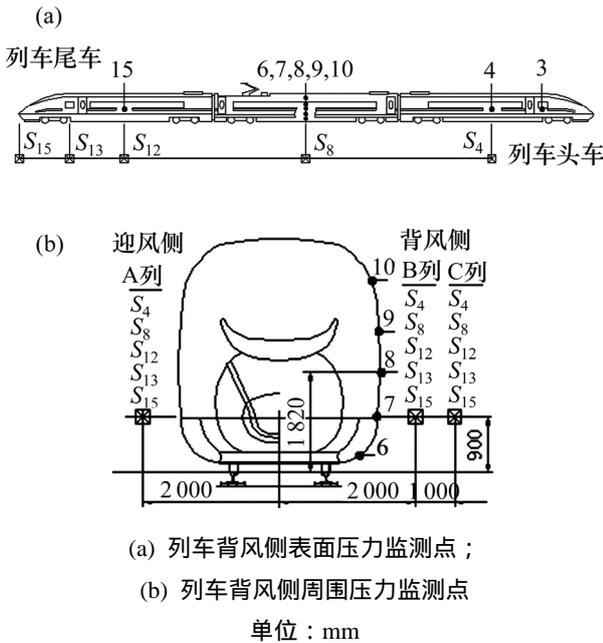
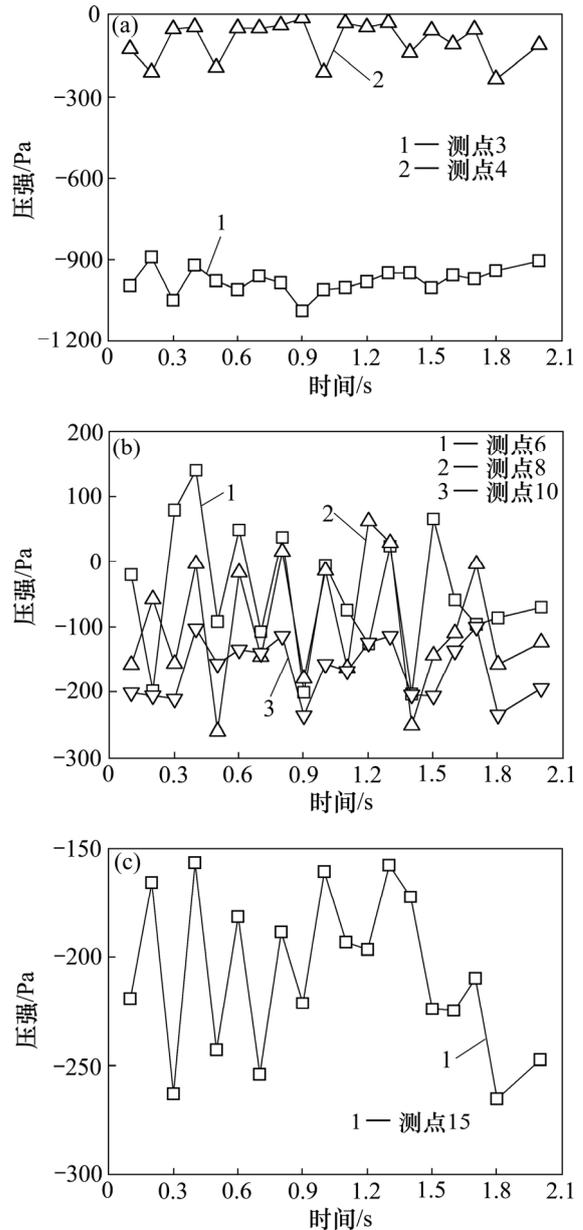


图 5 列车的表面及其周围的压力监测点分布图
Fig. 5 Pressure monitoring distribution system

2.2.2 列车周围的监测点压力脉动

图 7 所示为通过头车鼻锥的水平截面在不同时刻的列车周围的压力分布。由图 7 可知：不同时刻的压力分布规律大体相同，但分布区域和范围以及压力存在差别。特别是在尾车的流线体段附近，压力分布在不同的时刻有比较明显的变化。

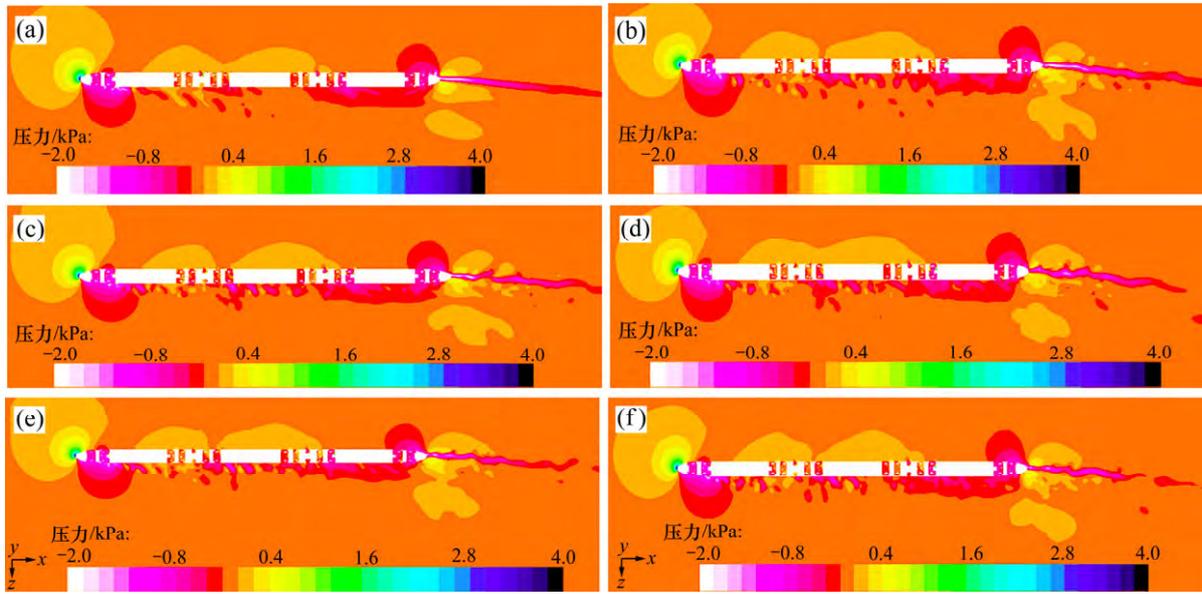
为了详细分析列车周围的压力波变化情况，在流场中选取若干点监测其压力变化，监测点的位置与图 6 的一致，其压力波的变化情况如图 8 所示，时间间



(a) 头车背风侧；(b) 中间车背风侧；(c) 尾车背风侧
图 6 列车背风侧表面监测点的压力时程曲线

Fig. 6 Variation of pressure with time at leeward surface

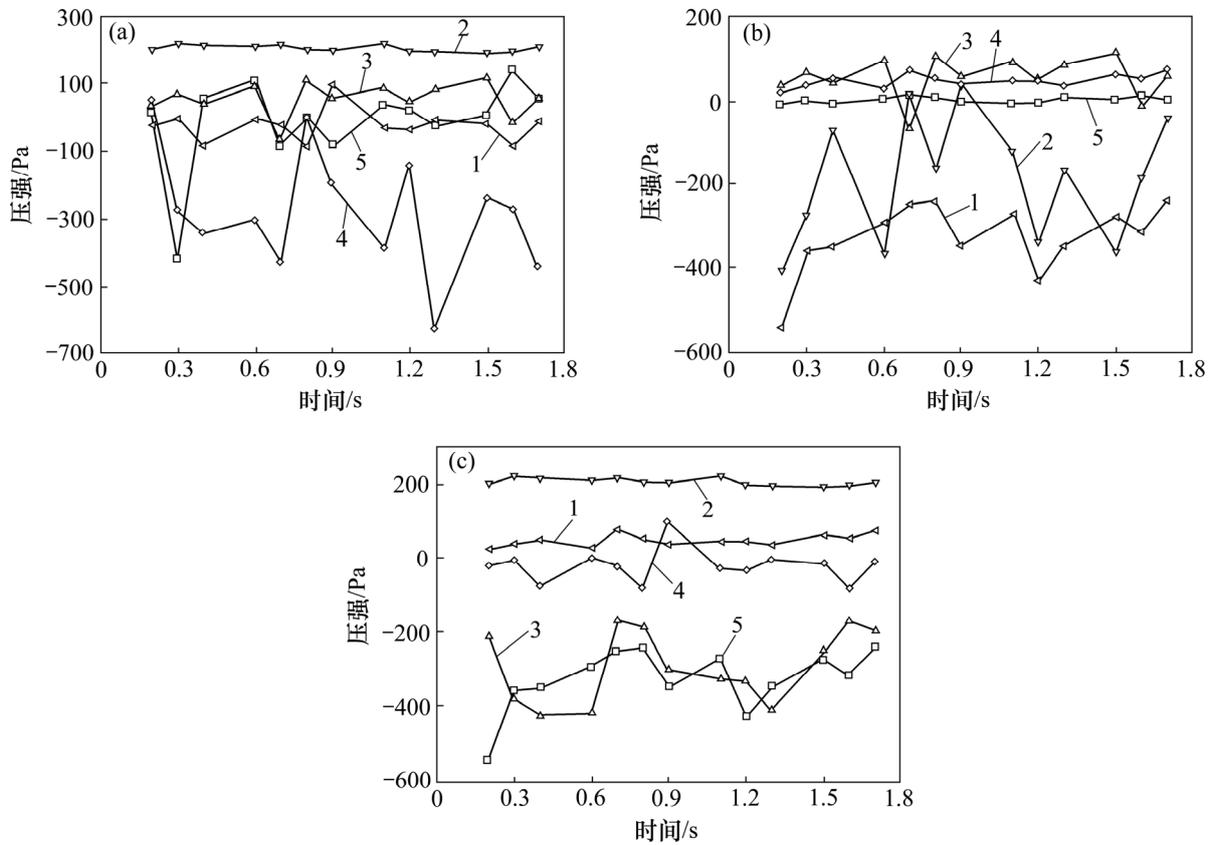
隔为 0.1 s。由图 8 可知：部分监测点的压力脉动较小，脉动幅值在 200 Pa 以内，例如迎风侧 A 列的 S_4, S_8 和 S_{12} 点，背风侧 B 列的 S_{12}, S_{13} 和 S_{15} 点，背风侧 C 列的 S_4, S_8 和 S_{13} ，其中 A 列和 C 列中的 S_8 点的脉动幅值不超过 50 Pa；部分监测点的压力脉动较大，例如迎风侧 A 列的 S_{13} 点脉动幅值最大可达 600 Pa， S_{14} 点的也达到 400 Pa，背风侧 B 列的 S_8 和 S_4 点的压力脉动幅值分别超过 400 Pa 和 300 Pa，背风侧 C 列的 S_{12} 和 S_{15} 点的压力脉动幅值均在 300 Pa 左右。可见：列车周围的压力波都处于随机变化状态，大部分区域的



t/s : (a) 0.1; (b) 0.5; (c) 1.0; (d) 1.4; (e) 1.8; (f) 2.0

图7 不同时刻列车周围的压力分布(通过车头鼻锥的水平截面)

Fig. 7 Pressure distribution around train with different time (horizontal section through first car nose)



(a) 迎风侧, A 列监测点; (b) 背风侧, B 列监测点; (c) 背风侧, C 列监测点

1— S_4 ; 2— S_8 ; 3— S_{12} ; 4— S_{13} ; 5— S_{15}

图8 列车周围监测点的压力时程曲线

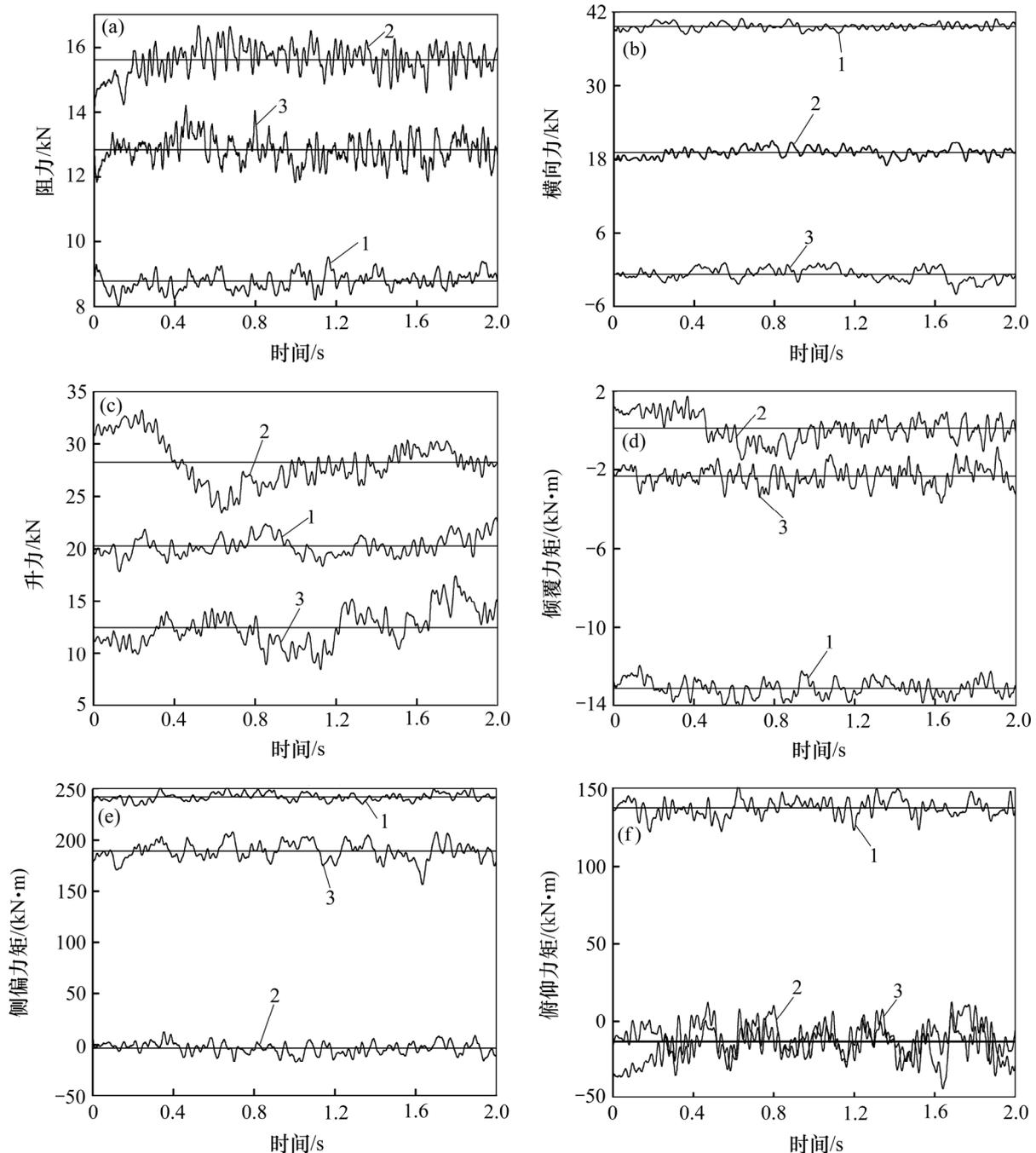
Fig. 8 Variation of pressure with time around train

压力围绕平均值变化,但也有偏离平均值很远的情况,而且脉动周期也是多变的。

2.3.3 列车气动荷载的时域特性

上述压力变化的随机性和脉动性必然使得列车的气动荷载也表现出相应的、比较明显的非定常性质。图 9 所示为采用分离涡模拟得到的气动力和力矩的时程曲线。由图 9 可知:各节车辆的气动力和力矩都具有明显的非定常性质,并且围绕某一时均值上下脉动。

虽然如此,但作用于各节车辆的气动力时均值的关系与按定常流计算所得到的结果是一致的。3 节车辆中,头车受到的横向力、倾覆力矩(绝对值)和侧偏力矩最大,且远比另 2 节车辆的大,其气动安全性较差。为了分析流动非定常性质对气动力和力矩的数值模拟结果的影响,表 1 所示为在定常条件下采用雷诺平均法模拟得到的气动力和力矩与其在非定常条件下采用分离涡模拟得到的气动力和力矩的比较。由表 1 可知:



(a) 阻力; (b) 横向力; (c) 升力; (d) 倾覆力矩; (e) 侧偏力矩; (f) 俯仰力矩

图 9 高速列车(三节车编组)气动作用力变化时程曲线

Fig. 9 Variation of the aerodynamic forces with time

表1 非正常气动力平均值与正常气动力的比较

Table 1 Aerodynamic forces of unsteady average values in comparison with steady values

车辆	阻力/kN			横向力/kN			升力/kN			倾覆力矩/(kN·m)		
	定常	非正常平均值	相对差值/%	定常	非正常平均值	相对差值/%	定常	非正常平均值	相对差值/%	定常	非正常平均值	相对差值/%
头车	9.20	8.78	4.62	40.47	239.62	2.11	21.39	20.26	5.28	-12.97	-13.10	-1.02
中间车	13.91	15.61	-12.24	17.87	19.06	-6.71	32.49	28.27	13.01	1.96	0.11	94.41
尾车	13.31	12.83	3.61	3.48	-0.74	121.2	10.78	12.46	-15.55	-2.56	-2.34	8.68
全车	36.42	37.22	2.20	61.82	57.94	6.28	64.66	60.99	5.68	13.57	15.33	12.97

定常流动模拟的气动力和力矩与非正常流动模拟的相比,二者存在一定的差异,相对误差一般在15%以内,只有尾车的横向力和中间车的倾覆力矩的相对差值在100%左右。从流动结构的角度看,具有定常流动的流场与非正常流动的流场具有大体相同的结构,总体涡流的趋势一致,所以,气动力的计算在流场结构相对稳定的地方不至于相差很大,但在流场结构不太稳定的地方,非正常流动的脉动性加强,气动力的计算结果相差较大。例如,头车的作用力计算值非常接近,而中间车的背风侧的尾迹区、尾车的背风侧的尾迹区以及尾车后方尾迹区的涡脱流明显,中间车和尾车的个别计算结果相差较大。头车的气动力平均值的相对误差最大为5.28%,最小为1.02%,说明定常流动与非正常流动时均流动的结果吻合得较好。而恰好头车是3节车辆中气动安全性最差的,并且尾车的横向力和中间车的倾覆力矩都很小,因此,在列车横风安全性评估中,头车的气动特性是关键。其他车辆的气动力虽然差值较大,但对于列车气动安全性的评估不至于产生明显的影响。此外,尽管部分局部的荷载相差较大,但从全车的气动荷载看,按定常流动与按非正常流动计算的结果却相差较小,作用力的最大偏差为6.28%,作用力矩的最大偏差为12.97%,在可接受的范围之内。

需要指出的是:虽然整场定常流动与整场非正常流动的时间平均效果是基本一致的,但非正常流动中的荷载峰值却比荷载平均值高出较多。若峰值荷载持续时间较长,也就是说频率较低,则气动安全性产生影响。下面将就荷载的频域特性进行分析。

2.3.4 列车气动荷载的频谱分析

由图9可知:气动力和力矩都可视为时间的非周期性离散函数,将它们进行快速傅氏变换,可得到阻力、横向力、升力和倾覆力矩等主要气动荷载的频谱分布情况,以便更好地分析列车在横风作用下的非正常气动荷载的脉动振幅特性。

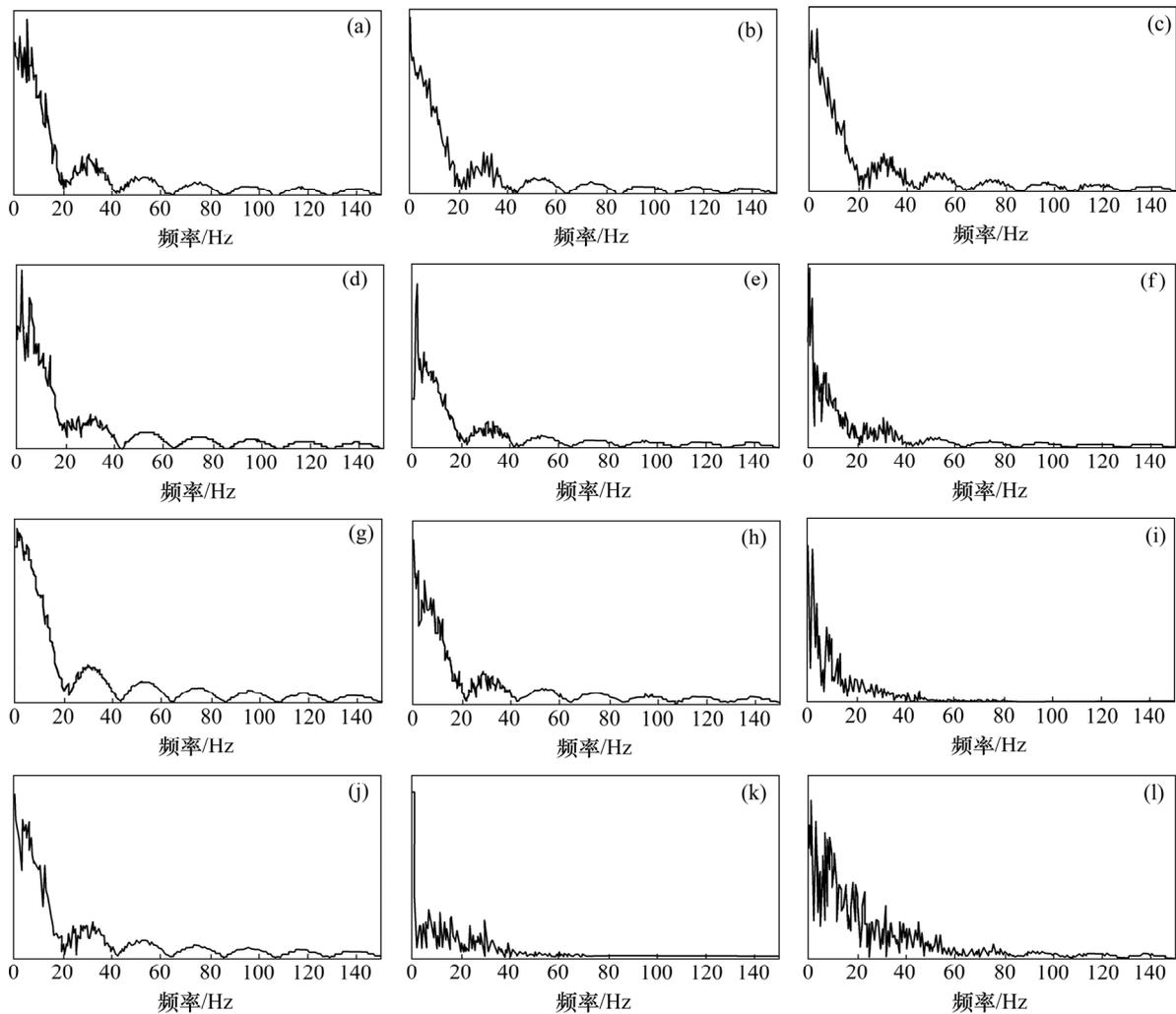
图10所示为列车的各节车辆的气动荷载频谱(力

的频谱密度、力矩的频谱密度。由图10可知:非正常气动荷载分布大都在0~150 Hz的范围内,荷载频谱主要出现在0~40 Hz范围内,主要峰值频率集中在0~10 Hz范围内。在0~20 Hz的范围内,随着频率的增加,振幅频谱峰值迅速衰减到最大峰值的1/10甚至更低,说明由定常横风所导致的列车所受非正常气动荷载主值的频率较低;头车、中间车和尾车的最大振幅频谱峰值所对应的频率并不相同,阻力、升力、横向力和倾覆力矩的最大振幅频谱峰值频率也各不相同。

图10表明:对于阻力和升力,头车的峰值振幅频谱极值最小,分别不超过480和1280 N/Hz;而中间车的最大,分别接近1000和2500 N/Hz;尾车的居中,分别接近730和1570 N/Hz。这一趋势与头车的迎流流场比中车和尾车的流场要稳定些的性质是一致的。

而对于横向力和倾覆力矩,头车的峰值振幅频谱极值最大,分别接近于1940 N/Hz和720 N·m/Hz;尾车的最小,分别接近于660 N/Hz和230 N·m/Hz;中间车的居中,而且头车的倾覆力矩的频谱比中间车的和尾车的都要宽,说明其在横风作用下与车体自身频率耦合的范围较宽,危险性更大。这一趋势与文献[15]计算得到的头车的横向力和倾覆力矩最大的结论也是一致的。此外,尾车的升力、横向力和倾覆力矩的频谱在40 Hz内最不稳定,脉动性比另外2节车的更强。

为了进一步分析,将频率分为2段,参见表2。在第1频段(0~20 Hz)内,荷载振幅频谱峰值出现的频率范围是0.49~5.37 Hz,第1峰值与第2峰值相差不大,但对应的频率却一般相差1~3倍。例如,尾车阻力振幅频谱的第1峰值与第2峰值分别为727.787和724.67 N/Hz,几乎相等,但对应的频率分别为2.93和0.98 Hz,相差近2倍;头车的倾覆力矩振幅频谱的第1峰值与第2峰值分别为718.31和714.68 N·m/Hz,但对应的频率相差近1倍。荷载振幅频谱在该频段内的总体下降趋势虽然十分明显,但仍然存在多个峰值,其中有的与最大峰值(第1峰值)比较接近。例如,表



(a) 头车阻力的频谱密度；(b) 中间车阻力的频谱密度；(c) 尾车阻力的频谱密度；(d) 头车升力的频谱密度；(e) 中间车升力的频谱密度；(f) 尾车升力的频谱密度；(g) 头车横向力的频谱密度；(h) 中间车横向力的频谱密度；(i) 尾车横向力的频谱密度；(j) 头车倾覆力矩的频谱密度；(k) 中间车倾覆力矩的频谱密度；(l) 尾车倾覆力矩的频谱密度

图 10 气动作用力和力矩的频谱密度

Fig. 10 Spectral density of force and moment

表 2 各种荷载峰值振幅频谱密度与频率的对应关系

Table 2 Peak amplitude spectrum density and frequency of aerodynamic forces

荷载类型	车辆位置	第 1 频段(0~20 Hz)				第 2 频段(20~40 Hz)			
		第 1 峰值	频率 1	第 2 峰值	频率 2	第 1 峰值	频率 1	第 2 峰值	频率 2
阻力	头车	475.60	5.37	431.60	2.44	111.62	30.27	100.23	29.70
	中间车	962.31	0.49	811.23	0.98	224.74	30.27	220.17	33.69
	尾车	727.78	2.93	724.67	0.98	163.98	30.27	159.46	32.71
升力	头车	1 271.11	1.95	1 071.62	5.37	167.47	30.27	253.20	29.79
	中间车	2 486.68	1.46	1 669.27	0.98	386.96	30.27	397.31	32.71
	尾车	1 562.29	0.98	1 304.62	1.95	181.94	30.27	267.56	31.25
横向力	头车	1 932.74	0.98	1 886.97	1.95	384.57	30.27	404.84	29.79
	中间车	1 271.25	0.49	1 027.50	1.95	106.34	30.27	233.16	28.81
	尾车	657.66	0.49	607.92	1.95	43.48	30.27	90.33	21.97
倾覆力矩	头车	718.31	0.98	714.68	0.49	139.51	30.27	151.79	32.23
	中间车	508.59	0.98	507.00	0.49	113.79	30.27	94.62	23.93
	尾车	223.41	1.46	194.76	0.49	22.60	30.27	76.10	31.74

中的第 2 峰值与第 1 峰值一般相差 10% 左右, 最大相差 32.9%, 最小相差仅 0.31%。而在第二频段(20~40 Hz)内, 荷载振幅频谱峰值远低于第一频段内的峰值, 二者相差 2~4 倍。该频段内的峰值对应的频率范围为 21.97~33.69 Hz, 最大峰值多数出现在 30.27 Hz 附近, 该频率范围内的峰值相差不大; 第 1 峰值和第 2 峰值对应的频率也比较接近。

可见: 在横风作用下, 非定常流动中频谱峰值大、对频率变化敏感的荷载集中在 0~20 Hz 的第一频段内, 最大峰值的频率范围是 0~6 Hz, 而且头车、中间车、尾车的最大峰值对应的频率并不完全相同。该频率范围内的气动荷载波动比较大, 与列车系统本身存在的一些固有振动模态频率接近, 例如: 中间车的横向力和尾车的倾覆力矩的最大峰值频谱对应的频率为 1.46 Hz, 与车体上心滚摆模态频率(约为 1.5 Hz)就很接近; 尾车的升力和横向力, 中间车的阻力和横向力的最大峰值频谱对应的频率均为 0.49 Hz, 与车体固有摇头频率(约为 0.64 Hz)^[16]比较接近。在 0~6 Hz 的范围内总能找到与滚摆模态频率和摇头频率相耦合的频率。因此, 即使按恒定横风和整场定常流动进行模拟得到的气动荷载不影响列车的气动安全性, 也不能完全断定列车一定处于安全运行状态。由恒定横风和列车风形成的大雷诺数湍流绕流具有明显的非定常性质, 仍然存在因列车车身的周期性分离涡而引起列车

局部共振、进而导致列车倾覆的可能性。

2.3.5 列车气动荷载的功率谱分析

前面通过频谱密度分析了气动荷载波动最明显的频率范围。从能量贡献的角度看, 需要对气动荷载的时域随机信号进行功率谱计算。根据 Parseval 定理, 信号傅氏变换模平方被定义为能量谱, 能量谱密度在时间上平均就得到了功率谱。实际上, 它也是自相关函数的傅里叶变换, 表述为

$$s(\omega) = |F(\omega)|^2 = \int_{-\infty}^{+\infty} [f(t)]^2 e^{-i\omega t} dt$$

或

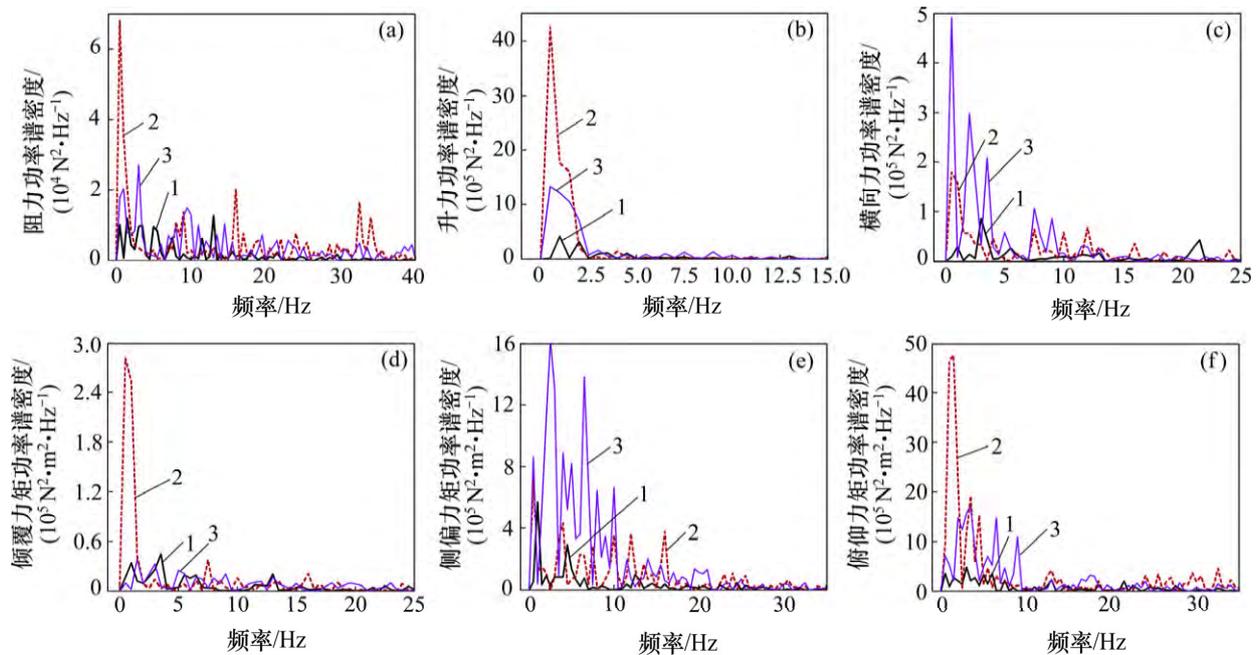
$$\int_{-\infty}^{+\infty} [f(t)]^2 dt = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} |F(\omega)|^2 d\omega \quad (1)$$

可通过数值模拟求出各气动荷载的功率谱密度与斯特劳哈尔数 S_t 的关系曲线, 再通过 S_t 求出气动力频率 f , 则斯特劳哈尔数(Strouhal number) S_t 为

$$S_t = \frac{fD}{v_\infty} \quad (2)$$

式中: D 为特征长度, 用列车横截面的水力直径表示, $D=3.25$ m; v_∞ 为来流速度(m/s), 是车速与横风风速的合成速度。在后面的频域分析中, 计算出 S_t 后, 可通过式(2)计算出尾涡的频率 f 。

图 11 所示为各气动荷载的功率谱密度与频率的关系。各气动荷载的功率谱密度在频率范围内的分布



(a) 阻力功率谱密度; (b) 升力功率谱密度; (c) 横向力功率谱密度; (d) 倾覆力矩功率谱密度; (e) 侧偏力矩功率谱密度; (f) 俯仰力矩功率谱密度
1—头车; 2—中间车; 3—尾车

图 11 气动荷载的功率谱密度与频率之间的关系

Fig. 11 Relationship between spectrum density and frequency

情况有所不同,表明能量集中在不同的频率范围内。各自功率谱密度峰值及其对应的频率见表 3。由表 3 可知:功率谱密度峰值集中在 0.5~3.5 Hz 的主频范围内,说明气动荷载的能量集中在该频率范围内,该范围与表 2 给出的振幅频谱峰值对应的频率范围基本相同。但由功率谱密度和振幅频谱得到的头车、尾车和中间车的非定常气动荷载的频率不完全相同。振幅频谱分析说明了气动荷载波动程度与频率的关系,若波动朝着收敛的方向进行,则不会对车体的稳定性造成不利影响,波动程度大一些并不会破坏车体的稳定性;若波动是朝着发散的方向进行,则可能导致车体失稳。功率谱密度分析表征了气动荷载能量与频率的关系,能量越大,所对应的频率若与系统固有频率耦合,则会使车体失稳。不过,各节车辆的 6 个气动荷载功率谱密度峰值所对应的频率并不相同,即使是对气动安全性影响较大升力、横向力和倾覆力矩,它们的峰值频率也不尽相同。

表 3 各种荷载功率谱密度峰值与频率的对应关系

Table 3 Relationship between peak amplitude spectrum density and frequency

荷载类型	车辆位置	功率谱密度峰值/ ($10^5 \text{ N}^2 \cdot \text{Hz}^{-1}$)	频率/ Hz
阻力	头车	0.121 720	1.50
	中间车	0.680 797	0.50
	尾车	0.270 082	3.00
升力	头车	4.240 000	1.00
	中间车	42.600 000	0.50
	尾车	13.300 000	0.50
横向力	头车	0.297 000	1.00
	中间车	1.798 330	0.50
		4.919 810	0.50
	尾车	2.984 130	0.50
倾覆力矩	头车	0.448 330	3.50
	中间车	2.820 960	0.50
	尾车	0.384 400	1.50
	侧偏力矩	头车	5.699 540
中间车		7.141 720	0.50
		16.204 600	2.50
尾车		13.830 100	6.50
俯仰力矩	头车	13.079 800	3.00
	中间车	4.834 920	3.00
	尾车	47.704 400	1.50
		17.157 600	3.50

4 结论

1) 高速列车的背风侧和尾车的尾迹区存在许多涡量强度不同、空间几何尺度各异并随时间变化的分离涡,它们不断从车体产生、脱落、附着、分离、合并,并向下游运动,涡的运动及相互之间的位置关系具有明显的随机性和脉动性。

2) 列车周围的压力波都处于随机变化状态,且大多区域的压力围绕平均值变化,脉动周期也是多变的。在同一横截面,离列车底部越近,受到的扰动越大,压力波脉动的幅度越大。

3) 各节车辆的气动力和力矩围绕某一时均值上下脉动,作用于各节车辆的气动力时均值与按整场定常流计算所得到的宏观力学结果基本一致,但局部的气动力按 2 种流动计算的结果则相差较大。此外,非定常流动中的荷载峰值比荷载平均值高出较多,若峰值荷载持续时间较长或作用频率较低,则会对列车的气动安全性产生影响。

4) 列车各节车辆的气动荷载频谱主要出现在 0~40 Hz 范围内,主要峰值频率集中在 0~10 Hz 范围内,最大峰值频率集中在 0~6 Hz 内。随着频率的增加,振幅频谱峰值迅速衰减,由横风所导致的非定常气动荷载的频率较低。

5) 头车、中间车和尾车的气动荷载最大峰值频率各不相同。3 节车辆中,头车的横向力和倾覆力矩振幅频谱幅值最大,且频率带比中间车的和尾车的宽,在横风作用下与车体自身频率耦合的范围较宽,气动安全性相对较差。

参考文献:

- [1] 王兆军, 张军, 朱春华, 等. 南疆列车倾覆事故的动理学因素分析[J]. 力学与实践, 2007, 29(5): 87-89.
WANG Zhaojun, ZHANG Jun, ZHU Chunhua, et al. Dynamics analysis on the train overturn accident in south Xinjiang, Mechanics in Engineering, 2007, 29(5): 87-89.
- [2] Rolén C, Rung T, Wu D. Computational modeling of cross-wind stability of high-speed trains[C]// ECCOMAS2004. European Congress on Computational Methods in Applied Sciences and Engineering. Jyväskylä, 2004.
- [3] 马静, 张杰, 杨志刚. 横风下高速列车非定常空气动力特性研究[J]. 铁道学报, 2008, 30(6): 109-114.
MA Jing, ZHANG Jie, YANG Zhigang. Study on the unsteady aerodynamic characteristics of a high-speed train under cross

- wind[J]. Journal of the China Railway Society, 2008, 30(6): 109-114.
- [4] 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.
- [5] 刘加利, 于梦阁, 张继业, 等. 基于大涡模拟的高速列车横风运行安全性研究[J]. 铁道学报, 2011, 33(4): 13-21.
LIU Jiali, YU Mengge, ZHANG Jiye, et al. Study on running safety of high-speed train under crosswind by large eddy simulation[J]. Journal of the China Railway Society, 2011, 33(4): 13-21.
- [6] 杨志刚, 马静, 陈羽, 等. 横风中不同行驶工况下高速列车非定常空气动力特性[J]. 铁道学报, 2010, 32(2): 18-23.
YANG Zhigang, MA Jing, CHEN Yu. The unsteady aerodynamic characteristics of a high-speed train in different operating conditions under cross wind[J]. Journal of the China Railway Society, 2010, 32(2): 18-23.
- [7] Hemida H, Krajnovic S, Davidson L. Large-eddy simulation of the flow around a simplified high speed train under the influence of across-wind[C]// 17th Computational Fluid Dynamics Conference. Ontario Canada: AIAA, 2005: 5354.
- [8] Hemida H, Krajnovic S. Numerical study of the unsteady flow structures around train-shaped body subjected to sidewinds[C]// ECCOMAS CFD 2006, The Netherlands: Egmond aan Zee, 2006: 1-14.
- [9] 苗秀娟, 高广军. 基于 DES 的车辆横风气动性能模拟[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2012, 43(7): 2855-2860.
MIAO Xiujuan, GAO Guangjun. Aerodynamic performance of train under cross-wind based on DES[J]. Journal of Central South University (Science and Technology) 2012, 43(7): 2855-2860.
- [10] de Villiers E, Jackson A, Campos F. Aerodynamic simulations using vertically integrated open source solutions[C]// Proceedings of 7th MIRA International Vehicle Aerodynamics Conference. Coventry, UK: Mira Ltd, 2008: 378-388.
- [11] Diedrichs B. Aerodynamic crosswind stability of a regional train model[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers (Part F): Journal of Rail and Rapid Transit, 2010, 224(6): 580-591.
- [12] Emmanuel G. Numerical simulation with a DES approach[J]. SAE International Journal of Passenger Cars-Mechanical Systems, 2010, 3(1): 574-587.
- [13] Tristan F, Gunilla E. An assessment of detached-eddy simulations of unsteady crosswind aerodynamics of road vehicles[J]. Flow, Turbulence and Combustion, 2011, 87(1): 132-163.
- [14] 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 Yanhong, YANG Guowei. 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(2): 22-33.
- [15] 郝艳红, 毛军, 李明高. 高速列车侧风效应的数值模拟[J]. 北京交通大学学报, 2010, 34(1): 14-19.
XI Yanhong, MAO Jun, LI Minggao. Numerical study on the crosswind effects of high-speed train[J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2010, 34(1): 14-19.
- [16] 池茂儒, 张卫华, 曾京, 等. 蛇行运动对铁道车辆平稳性的影响[J]. 振动工程学报, 2008, 21(6): 639-643.
CHI Maoru, ZHANG Weihua, ZENG Jing. Influence of hunting motion on ride quality of railway vehicle[J]. Journal of Vibration Engineering, 2008, 21(6): 639-643.

(编辑 陈爱华)