文章编号：1003-1421(2026)04-0084-13
引用格式：马玉坤，李涵，陈波，等. 200 km/h客货共线线路动货交会集装箱装载稳定性研究[J]. 铁道运输与经济，2026，48(4)：84-96.
MA Yukun，LI Han，CHEN Bo，et al. Research on Container Loading Stability During Meeting Operations Between EMUs and Freight Trains on 200 km/h Mixed Passenger-Freight Railway[J]. Railway Transport and Economy，2026，48(4)：84-96.

200 km/h客货共线线路动货交会集装箱装载稳定性研究

马玉坤[1]，李　涵[1]，陈　波[2, 3, 4]，陈　光[2, 3, 4]，熊小慧[2, 3, 4]

(1.中国铁道科学研究院集团有限公司 运输及经济研究所，北京　100081；2.中南大学 交通运输工程学院，湖南 长沙　410075；3.中南大学 轨道交通安全教育部重点实验室，湖南 长沙　410075；4.中南大学 轨道交通列车安全保障技术国家地方联合工程研究中心，湖南 长沙　410075)

摘　要：为验证200 km/h客货共线铁路动车组与集装箱列车交会运行的安全性，依托昆楚大线实车试验，针对隧道直线场景，开展集装箱装载稳定性研究。通过监测气动压力、加速度等数据，分析交会过程中集装箱的气动横向力、升力及加速度变化，并参考《铁路货物装载加固规则》从倾覆稳定性和水平移动稳定性2个方面进行校核。研究表明，20 ft集装箱的横向倾覆稳定性整体上优于40 ft集装箱；在最高200 km/h与120 km/h交会速度下，不同装载工况下集装箱横向倾覆稳定性均满足安全要求；对FT-R锁的结构强度进行校核计算，校核计算结果满足集装箱水平移动稳定性的要求。影响集装箱所受气动载荷的主要因素是动车组的交会速度和动车组车型，集装箱列车运行速度的变化对气动横向力的影响较小；相比动力分散动车组，集装箱列车与动力集中动车组交会时集装箱所受气动横向力更大。研究结果可以为200 km/h客货共线铁路动货交会运行提供实证支撑，为高速铁路货运安全与组织优化提供参考。

关键词：客货共线线路；动车组；集装箱装载稳定性；列车交会；实车试验；气动载荷
中图分类号：U292　　**文献标识码**：A　　DOI：10.16668/j.cnki.issn.1003-1421.20251209002

Research on Container Loading Stability During Meeting Operations Between EMUs and Freight Trains on 200 km/h Mixed Passenger-Freight Railway

MA Yukun[1]，LI Han[1]，CHEN Bo[2, 3, 4]，CHEN Guang[2, 3, 4]，XIONG Xiaohui[2, 3, 4]

(1. Transportation & Economics Research Institute, China Academy of Railway Sciences Corporation Limited, Beijing 100081, China; 2. School of Traffic & Transportation Engineering, Central South University, Changsha 410075, Hunan, China; 3. Key Laboratory of Traffic Safety on Track Ministry of Education, Central South University, Changsha 410075, Hunan, China; 4. National & Local Joint Engineering Research Center of Safety Technology for Rail Vehicle, Central South University, Changsha 410075, Hunan, China)

Abstract: To verify the safety of meeting operations between electric multiple units (EMUs) and container trains on 200 km/h mixed passenger-freight railways, this paper investigated container loading stability based on real train tests on the Kunming-Chuxiong-Dali Line, focusing on straight

收稿日期：2025-12-09
通信作者：陈波(1996—)，男，贵州贵阳人，中南大学交通运输工程学院博士研究生。
基金项目：中国国家铁路集团有限公司科技研究开发计划课题(P2024X007)

tunnel scenarios. Aerodynamic pressure and acceleration data were monitored to analyze the variations in aerodynamic lateral force, lift force, and acceleration of containers during meeting operations. The overturning stability and horizontal movement stability were verified with reference to the *Railway Freight Loading Reinforcement Rules*. The results show that the transverse overturning stability of 20 ft containers is generally better than that of 40 ft containers. Under the maximum meeting speeds of 200 km/h and 120 km/h, the transverse overturning stability of containers under different loading conditions meets safety requirements. The structural strength of FT-R locks is verified by calculation, and the results satisfy the requirements for horizontal movement stability. The main factors affecting the aerodynamic load on containers are the meeting speed and the EMU type, while the variation in the container train's running speed has little influence on the aerodynamic lateral force. Compared with distributed power EMUs, the aerodynamic lateral force on containers is greater when meeting concentrated power EMUs. The research results can provide empirical support for meeting operations between EMUs and freight trains on 200 km/h mixed passenger-freight railways and offer a reference for the safety and operational optimization of high speed rail freight.

Keywords: Mixed Passenger-Freight Railway; Electric Multiple Unit; Container Loading Stability; Train Meeting; Real Train Test; Aerodynamic Load

0　引言

200 km/h客货共线线路是铁路提升路网效能、发展快捷物流的重要载体。为提升客货共线线路利用率、丰富铁路快运班列产品，目前部分铁路局集团公司利用管内200 km/h客货共线线路开行120 km/h通用集装箱班列。组织动车组与货运列车区间交会(以下简称“动货交会”)运营，有助于挖掘200 km/h客货共线线路运输能力，实现客货运输协同增效。

在动货交会时，特别是在隧道等受限空间内，列车之间的相对高速运动会产生强烈的压缩波与压力脉动，导致列车受到瞬态的气动横向力和升力，从而影响车辆运行稳定性及货物装载安全。针对隧道内高速列车的气动效应研究，已有系统综述[1-3]与数值/试验研究[4-6]总结了压力波产生机理、传播规律及对列车与隧道结构的影响，研究成果为后续的实车试验与工程校核提供了理论依据。相比动车组，对于货运列车在强瞬态气动载荷作用下的实车试验与量化研究相对较少。120 km/h快速班列通常以整列通用集装箱作为装载单元，集装箱结构外形规则、侧向迎风面积较大，受瞬态压力差作用时容易产生明显的气动横向力和升力，从而增大其发生位移或横向倾覆的可能性，一旦失稳程度加剧甚至可能影响邻线动车组运行安全[7-8]。因此，通过实车试验采集高速交会场景下集装箱表面压力、气动载荷与加速度等数据，并对其装载稳定性进行评价，有助于200 km/h客货共线线路动货交会运营的安全评估与组织优化。

此外，既有研究文献表明，集装箱的装载加固状态(如空/重箱、偏重偏载、锁闭装置约束失效等)和车辆满载/空载状态，会显著改变车辆或集装箱在气动载荷下的响应特性[9-10]，如空载货车在侧风或瞬态气动作用下更容易出现轮重减载或倾覆风险，而满载/重载工况可能减小某些气动响应但同时改变升力/力矩分布，因此有必要在多装载工况下开展试验或仿真对比分析。

基于上述背景与需求，依托昆楚大线(昆明—楚雄—大理)时速200 km动货交会试验，基于不同交会场景下(不同动车组车型、不同货运列车装载工况、不同交会速度级)集装箱表面压力、气动载荷与加速度等实测数据，以《铁路货物装载加固规则》[11](以下简称《加规》)中加固强度计算指标为评判标准，验证集装箱的装载稳定性并分析影响因素，旨在为200 km/h客货共线线路组织动货交会运营提供技术支撑和安全依据。

1　试验方案

1.1　试验区段及试验列车

昆楚大线正线为国铁Ⅰ级铁路，设计速度目标值为200 km/h。经模拟计算，在动车组与集装箱列车隧道内交会的不利空气动力学工况中[8]，最不利隧道长度为4 454 m。昆楚大线下庄4号隧道实际长度为4 093 m，与上述不利工况对应的隧道长度最

为接近，因此选取该隧道作为实车交会试验地点。

目前在线运营的动车组主要包括动力分散与动力集中2种类型，为全面评估不同类型动车组在隧道交会时的气动响应，对2类车型均开展试验研究。综合考虑气动效应(车体断面积较大的车型会带来更显著的气动影响)及试验测试设备部署的便捷性，试验选取CR400系列高速综合检测动车组作为动力分散动车组的代表车型，选取大连唐山CR220J3-1601动力车和株机浦镇CR220J1-2601控制车作为动力集中动车组的代表车型。

试验集装箱列车编组55辆，车辆采用NX_{70A}型平车，编组包括15辆集装箱重箱车、1辆试验车、38辆集装箱空箱车和1辆空平车。综合考虑列车编组和测试条件，在集装箱列车编组第27#，30#，31#，32#车装载的试验集装箱上，布置动态压力测点和加速度传感器，用于采集交会过程中集装箱受到的气动横向力、气动升力及加速度等测试数据。每辆试验车设置不同装载工况，其中，27#车为偏重偏载工况；30#，31#为正常装载工况；32#车为锁头异常工况(4个FT-R锁头选取非交会一侧的1个锁头不翻起，其余3个锁头处于工作位)。试验集装箱装载说明如表1所示。

选取昆楚大线下庄4号隧道内完成交会试验，包括动力分散动车组160 km/h与货车120 km/h交会3次，动力分散动车组200 km/h与货车90 km/h交会3次，动力分散动车组200 km/h与货车120 km/h交会3次，重联动力集中动车组200 km/h与货车120 km/h交会3次，重联动力集中动车组200 km/h与货车90 km/h交会3次，重联动力集中动车组200 km/h与货车静止交会1次，共交会16次。

1.2　试验设备

选取典型的35 t通用集装箱进行集装箱装载稳定性试验，分别测试不同交会场景下，不同装载工况的试验集装箱受到的气动横向力、气动升力及加速度，以验证集装箱装载稳定性。试验的主要测试参数包括集装箱表面压力和集装箱振动加速度，试验使用的动态数据采集系统主要由前端传感器、数据采集设备、信号线缆、交换机、网线和稳压电源等组成。前端传感器安装在集装箱表面，信号线缆根据现场情况沿路径接入到数据采集设备，数据采集设备将传感信号进行调理和转换通过交换机对数据进行中转，由网线传输至现场移动式计算机，由计算机对采集的数据进行分析及存储。测试过程中，使用稳压电源对数据采集系统和计算机进行不间断供电。试验数据采集和传输流程如图1所示。

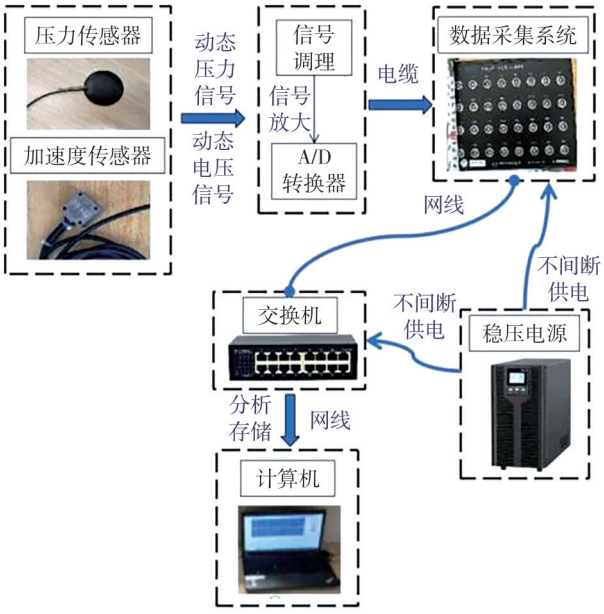


图1　测试数据采集和传输流程

Fig.1　Test data collection and transfer process

1.3　试验测点布置

本次试验通过在集装箱表面布置的有限点进行积分获得气动横向力和气动升力，为了提高测点采

表1　试验集装箱装载说明

Tab.1　Loading conditions of tested containers

试验列车编组序号	试验车辆	试验集装箱	工况
27#	NX_{70A} 5720692	20 ft重箱 TBJU 9826220	偏重偏载工况
30#	NX_{70A} 5482289	40 ft空箱 TBJU 7853551	正常装载工况
31#	NX_{70A} 5746894	20 ft空箱 TBJU 9785203	正常装载工况
32#	NX_{70A} 5727755	40 ft空箱 TBJU 7853551	FT-R锁锁头异常工况

注：第27#，31#试验车分别装载2只装载状态相同的20 ft集装箱，各选取其中1只作为试验集装箱。

集数据的可靠性，使用三维数值仿真的方法对比有限点积分和软件监控获得的基准数据的差异，优化并确定实车试验时试验测点布置方案。以40 ft集装箱为例，模拟试验测点布置方案对比如表2所示。以测点布置方案3为例，模拟测点布置示意图如图2所示。

表2　模拟试验测点布置方案对比

Tab.2　Comparison of measuring point layouts for simulation scenarios

测点布置方案	气动横向力积分测点	气动升力积分测点
方案1	3行×3列	2行×3列
方案2	3行×5列	2行×5列
方案3	3行×7列	2行×7列

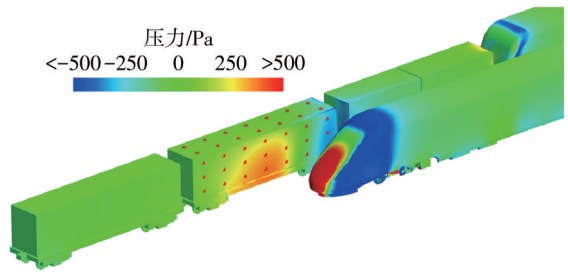


图2　模拟测点布置示意图

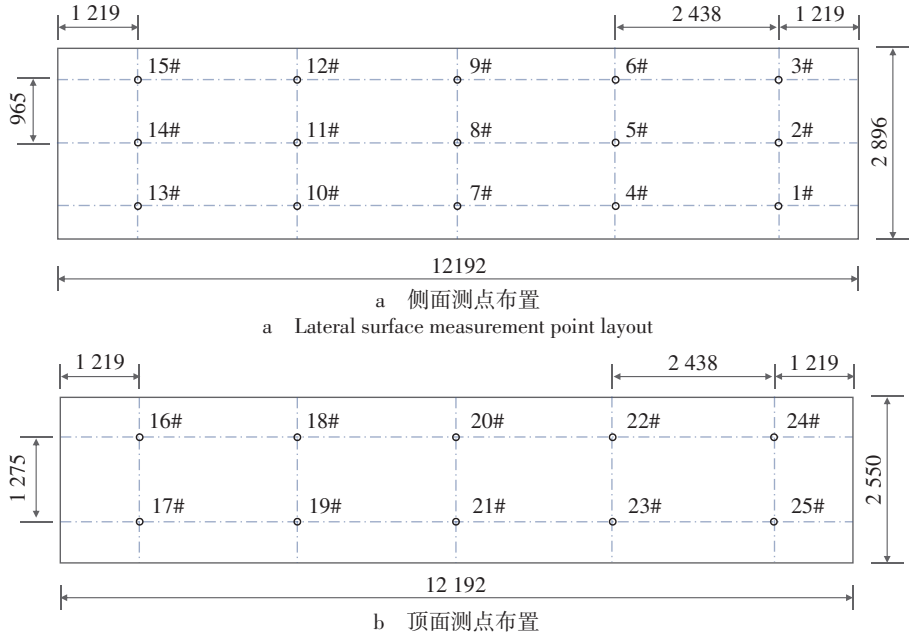
Fig.2　Schematic diagram of simulated measuring points

综合对比不同方案所得气动横向力和气动升力比较结果，得到40 ft集装箱气动横向力测点布置方案为3行×5列(交会侧和非交会侧对称布置)，气动升力测点布置方案为2行×5列(顶面和底面对称布置)；同理得到20 ft集装箱气动横向力测点布置方案为3行×3列(交会侧和非交会侧对称布置)，气动升力测点布置方案为2行×3列(顶面和底面对称布置)。实车试验时，在40 ft集装箱两侧各对称布置15个测点，在顶面和底面各对称布置10个测点，合计布置50个动态压力测点，40 ft集装箱动态压力传感器布置示意图如图3所示。20 ft集装箱(每车选其中一箱布置测点即可)两侧各对称布置9个测点、顶面和底面各对称布置6个测点，合计布置30个动态压力测点，20 ft集装箱动态压力传感器布置示意图如图4所示。

对于试验集装箱加速度数据的采集，分别在20 ft和40 ft试验集装箱的前、后底部端梁处(距离车辆纵中心线的距离不超过1 m)各布置3个加速度传感器，单个集装箱共布置6个加速度测点，集装箱加速度测点布置示意图如图5所示。

1.4　试验重复性验证

为保证试验集装箱测点试验结果的可靠性，针对20 ft集装箱的1#动态压力传感器，重复开展3次隧道直线交会试验并对试验结果进行对比分析，



a　侧面测点布置

a　Lateral surface measurement point layout

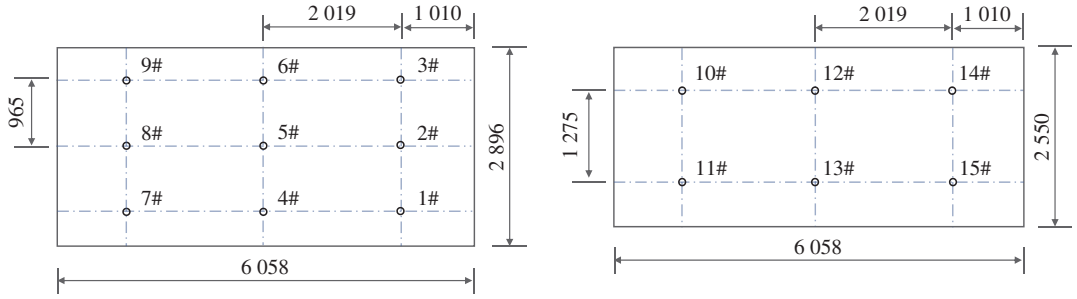
b　顶面测点布置

b　Top surface measurement point layout

注：图中数据单位为mm。

图3　40 ft集装箱动态压力传感器布置示意图

Fig.3　Schematic diagram of dynamic pressure sensor layout for 40 ft container



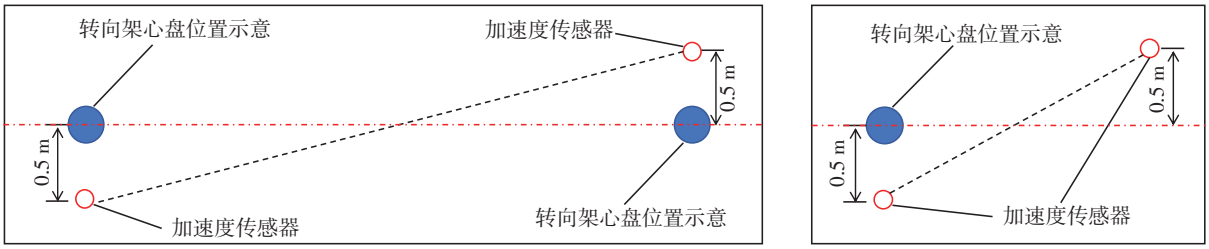
a　侧面测点布置
a　Lateral surface measurement point layout

b　顶面测点布置
b　Top surface measurement point layout

注：图中数据单位为mm。

图4　20 ft集装箱动态压力传感器布置示意图

Fig.4　Schematic diagram of dynamic pressure sensor layout for 20 ft container



a　40 ft集装箱测点布置
a　40 ft container measurement point layout

b　20 ft集装箱测点布置
b　20 ft container measurement point layout

图5　集装箱加速度测点布置示意图

Fig.5　Schematic diagram of acceleration measurement point layout for containers

20 ft集装箱1#测点动态压力时程曲线如图6所示，测点压力变化峰峰值重复性结果如表3所示。3次重复性试验下，所得到的20 ft集装箱1#测点压力时程曲线基本一致，压力峰峰值的平均偏差为18.6 Pa，相对平均偏差为2.6%。综合考虑列车速度误差、试验环境差异及测试系统误差等因素的影响，可认为集装箱表面压力试验采用的测试系统具有较高的可靠性，试验结果具有可重复性。

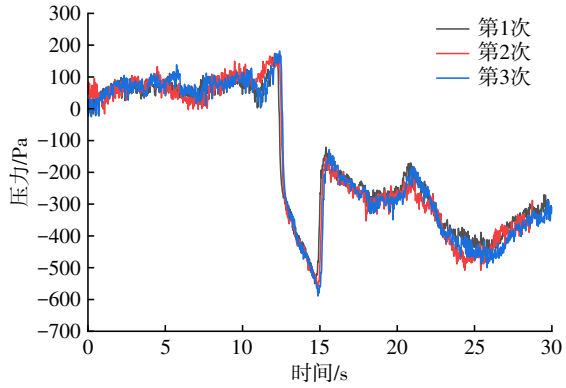


图6　20 ft集装箱1#测点动态压力时程曲线

Fig.6　Dynamic pressure time-history curve at measurement point 1 on 20 ft container

表3　测点压力变化峰峰值重复性结果

Tab.3　Repeatability of pressure peak-to-peak values at measurement point

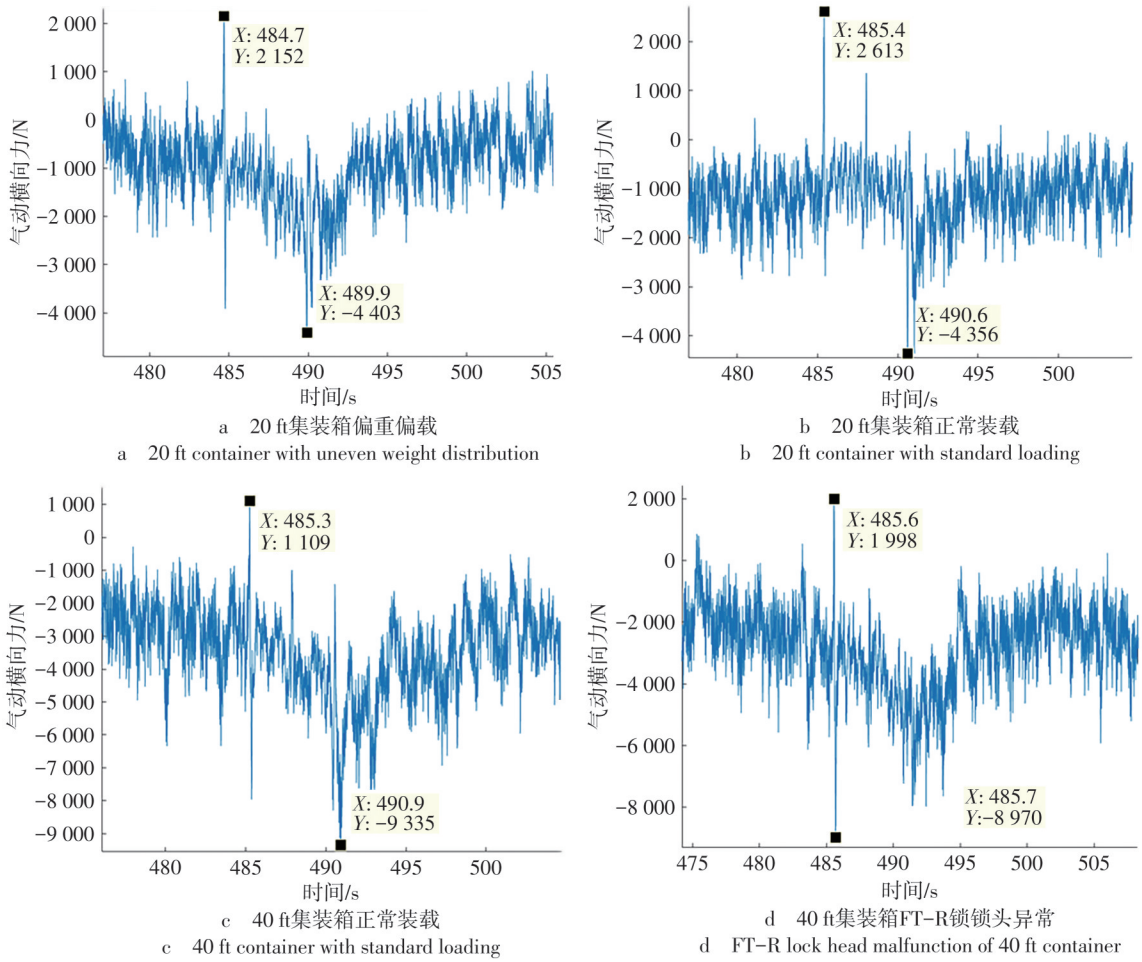
测点序号	压力峰峰值/Pa			重复性结果	
	第1次试验	第2次试验	第3次试验	平均偏差/Pa	相对平均偏差/%
1#	700.7	714.4	749.5	18.6	2.6

2　试验结果

2.1　气动载荷和加速度试验结果分析

2.1.1　气动载荷

以重联动力集中动车组与集装箱列车在隧道直线段以200 km/h与120 km/h速度交会为例，交会过程中集装箱所受气动横向力时程曲线如图7所示，图中X表示时间，Y表示气动横向力，图中的峰值分别代表两车交会开始和交会结束时的最大气动横向力。由图可知，同箱型不同装载工况下，集装箱气动横向力的峰峰值差异较小，其中20 ft集装箱的差异为6.3%，40 ft集装箱为5.0%。气动横向力的大小取决于交会过程中集装箱两侧的压差，而压差主要受其迎风投影面积控制，数据验证了箱型相同



a　20 ft集装箱偏重偏载
a　20 ft container with uneven weight distribution

b　20 ft集装箱正常装载
b　20 ft container with standard loading

c　40 ft集装箱正常装载
c　40 ft container with standard loading

d　40 ft集装箱FT−R锁锁头异常
d　FT−R lock head malfunction of 40 ft container

图7　交会过程中集装箱所受气动横向力时程曲线

Fig.7　Time-history curve of aerodynamic lateral force on containers during meeting

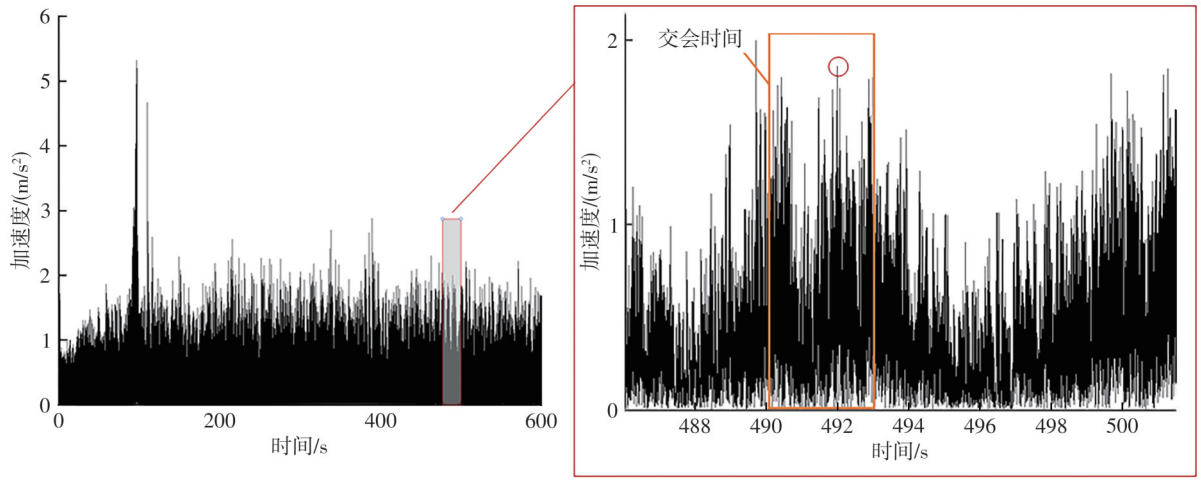
的前提下，不同装载工况对气动横向力的影响不大。研究同时指出，隧道内列车交会所诱发的压力波叠加效应会显著增大车体侧向力，进一步说明横向力对投影面积的敏感性高于具体装载状态。试验数据存在一定误差，与集装箱在编组中所处的位置有关，不同交会位置会局部改变集装箱周围的气动压力分布，从而对横向力幅值产生一定影响。

根据上述气动载荷特征，对比不同箱型的横向倾覆稳定性，20 ft集装箱的横向倾覆稳定性整体上优于40 ft集装箱；对比同箱型不同装载工况下集装箱的横向倾覆稳定性，其中偏重偏载工况下的20 ft重箱由于重心向列车交会一侧横向偏移，集装箱自身的稳定力矩相比20 ft空箱更小，因此在所受气动载荷相近的情况下，其横向倾覆稳定性更不利。而对比FT−R锁锁头异常工况与正常装载工况下的40 ft空箱，其横向倾覆稳定性差异不大。

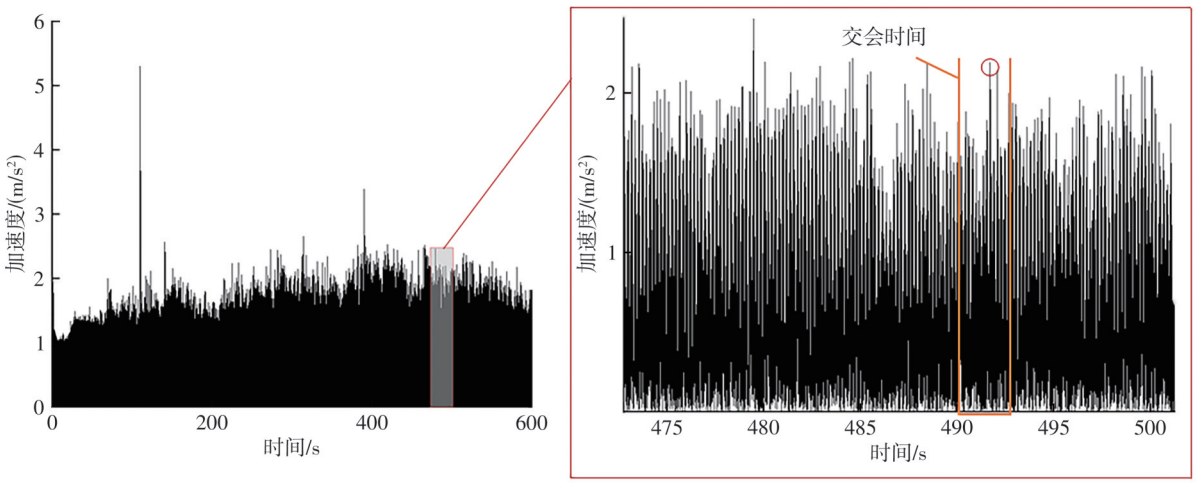
2.1.2　加速度

集装箱列车在运行过程中，由于轨道不平顺、列车加减速等因素影响，集装箱会在纵向、横向及垂向产生瞬时加速度变化[12]。当集装箱列车与动车组交会时，气动载荷也将引起集装箱在3个方向上的加速度变化。为研究交会过程中加速度的幅值及其对集装箱列车运行平稳性的影响，对比分析20 ft空箱与FT−R锁锁头异常工况下的40 ft空箱在运行中的加速度响应，20 ft空箱加速度时程曲线如图8所示，40 ft空箱加速度时程曲线如图9所示。

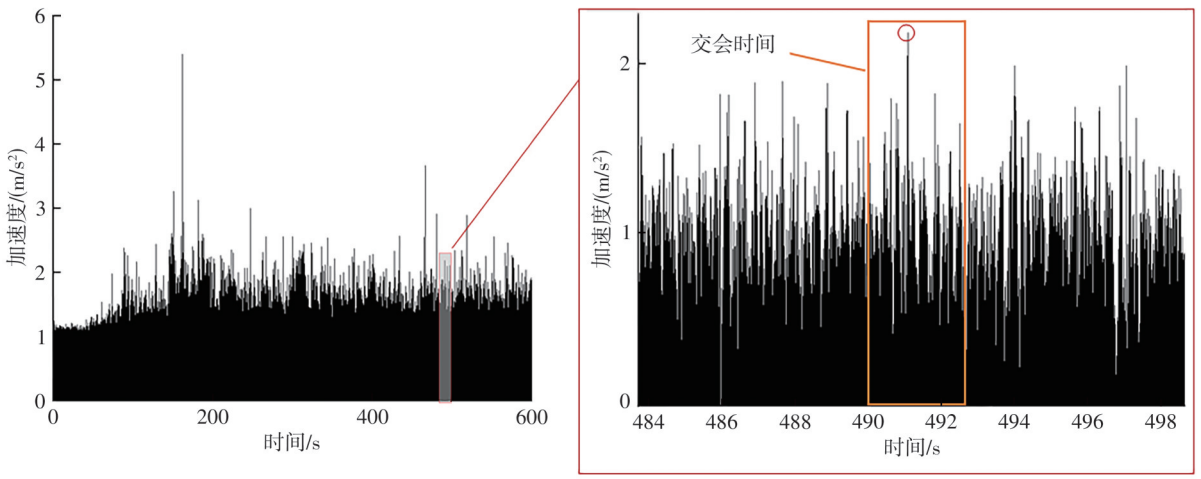
试验数据表明，20 ft与40 ft空箱在运行中的瞬时最大横向加速度分别为5.2 m/s²(约0.53 g)与5.4 m/s²(约0.55 g)，瞬时最大纵向加速度分别为5.4 m/s²(约0.55 g)和4.5 m/s²(约0.46 g)，均出现在列车调速制动过程中。交会过程中，集装箱在3个方向的加速度均未出现显著突增，其变化趋势与列车因线路条件



a　横向加速度
a　Lateral acceleration

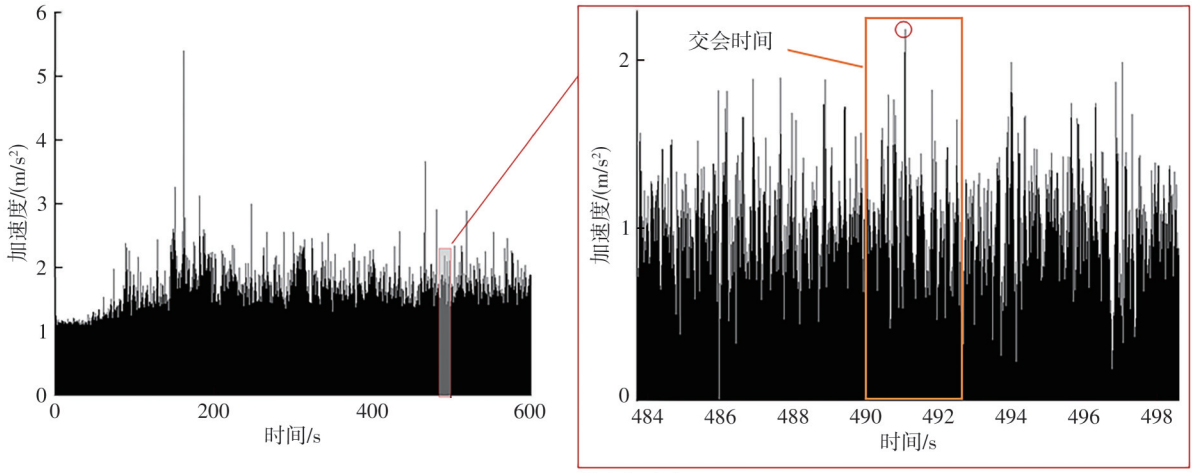


b　纵向加速度
b　Longitudinal acceleration

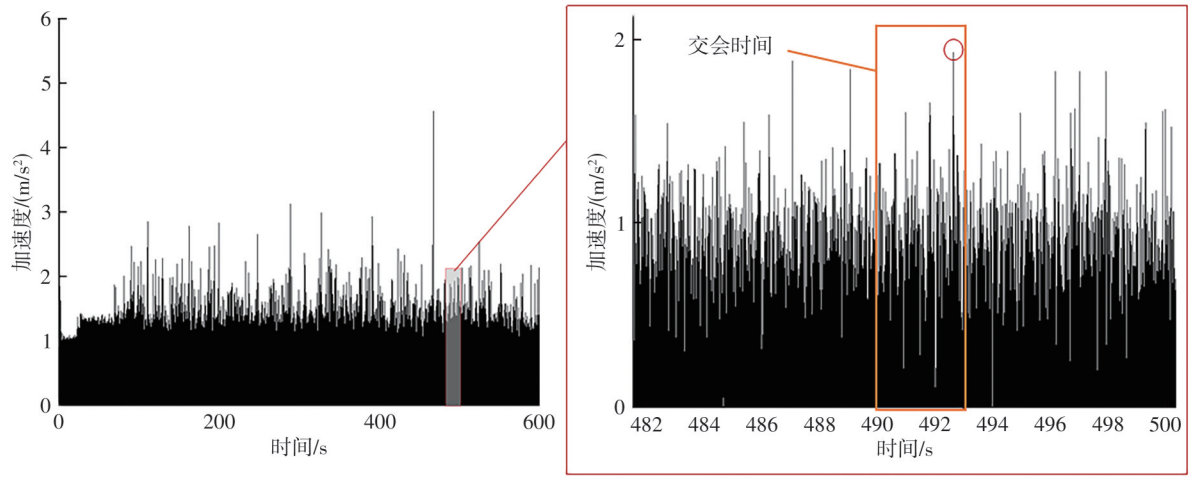


c　垂向加速度
c　Vertical acceleration

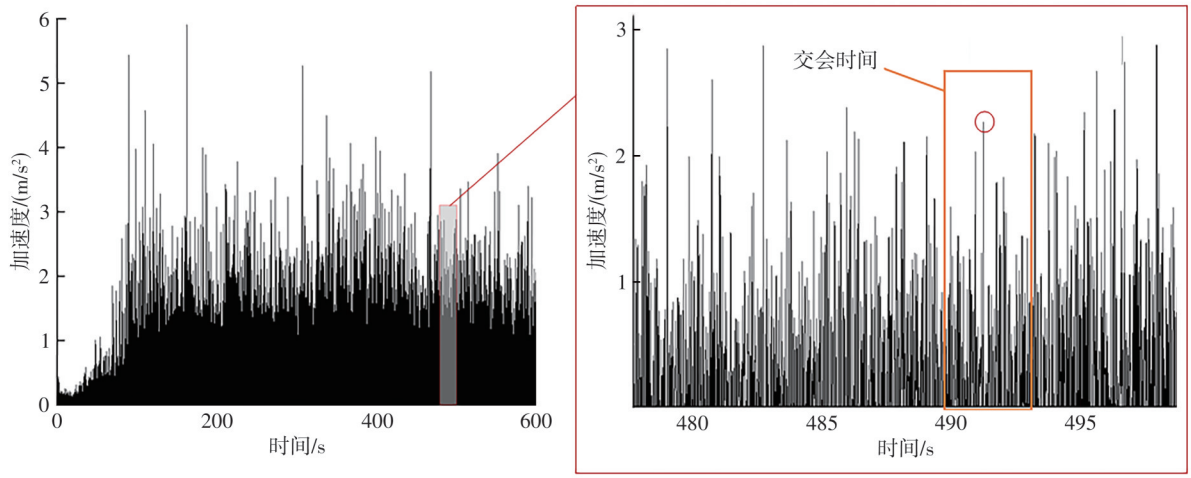
图8　20 ft空箱加速度时程曲线
Fig.8　Acceleration time-history curve of 20 ft empty container



a　横向加速度
a　Lateral acceleration



b　纵向加速度
b　Longitudinal acceleration



c　垂向加速度
c　Vertical acceleration

图9　40 ft空箱加速度时程曲线
Fig.9　Acceleration time-history curve of 40 ft empty container

和运行状态所引起的加速度响应较为相似。因此可以认为，列车交会所产生的加速度变化对集装箱自身稳定性的影响较为有限。

2.2　集装箱气动载荷影响因素分析

2.2.1　交会速度

研究表明，交会产生的强瞬态气动载荷与交会速度密切相关[13]，为研究交会速度对集装箱装载稳定性的影响，以动力分散动车组为例，对比其与集装箱列车以不同速度级在隧道直线段交会时的试验数据(取每个试验工况下不同趟次测试结果气动载荷峰峰值的均值进行分析，下同)，不同交会速度级试验数据对比如表4所示。

当集装箱列车运行速度相同(120 km/h)时，动车组运行速度由160 km/h增加至200 km/h，速度增加25%，正常装载工况下40 ft空箱受到的气动横向力增加49.9%，横向倾覆稳定系数下降33.6%；20 ft空箱受到的气动横向力增加42.4%，横向倾覆稳定系数下降29.9%。当动车组运行速度相同(200 km/h)时，集装箱列车运行速度由90 km/h增加至120 km/h，速度增加25%，正常装载工况下40 ft空箱受到的气动横向力增加6.2%，横向倾覆稳定系数下降10.9%；20 ft空箱受到的气动横向力增加2.5%，横向倾覆稳定系数下降3.3%。

试验数据表明，动力分散动车组运行速度的变化对气动横向力的影响，显著大于相同速度增幅(25%)下集装箱列车所带来的影响。影响列车交会时气动横向力的主要因素为交会时对向列车的运行速度(即动车组速度)，而集装箱列车运行速度的变化对气动横向力的影响较小。

2.2.2　动车组车型

动力集中动车组与动力分散动车组由于牵引车辆的方式和位置不同，二者与集装箱列车交会时对集装箱的作用力也不尽相同[14]，为研究不同动力分布的动车组对集装箱装载稳定性的影响，对比不同动车组车型分别与集装箱列车在隧道直线段交会时的试验数据，不同动车组车型交会试验数据对比如表5所示。

重联动力集中动车组与集装箱列车以200 km/h与120 km/h速度级在隧道直线段交会时，正常装载工况下40 ft空箱受到的气动横向力较动力分散动车组在相同交会场景下增加4.5%，横向倾覆稳定系数下降1.8%；20 ft空箱气动横向力增加18.8%，横向倾覆稳定系数下降12.6%。

试验数据表明，对比不同动车组车型，在相同交会速度和交会场景下，动力分散动车组与集装箱列车交会，集装箱的倾覆稳定系数略大于动力集中动车组。分析原因是动力集中动车组的车头流线型长度较动力分散动车组更短，且动力集中动车组车高较动力分散动车组高130 mm，使得列车在隧道内运行时的阻塞比增加，导致交会时产生的压力波更为强烈，压力差数值更大，因此与动力集中动车组交会时集装箱所受气动横向力更大。

表4　不同交会速度级试验数据对比

Tab.4　Comparison of test data under different meeting speeds

交会车型	交会工况	箱型	气动横向力峰峰值/kN	气动升力峰峰值/kN	横向倾覆稳定系数
动力分散动车组与集装箱列车	隧道直线 160 km/h与120 km/h	40 ft	6.78	2.99	2.47
		20 ft	4.03	1.76	2.94
	隧道直线 200 km/h与90 km/h	40 ft	9.57	4.29	1.84
		20 ft	5.60	2.49	2.13
	隧道直线 200 km/h与120 km/h	40 ft	10.16	6.06	1.64
		20 ft	5.74	2.46	2.06

表5　不同动车组车型交会试验数据对比

Tab.5　Comparison of test data for meeting with different EMU types

交会工况	动车组车型	箱型	气动横向力峰峰值/kN	气动升力峰峰值/kN	横向倾覆稳定系数
隧道直线 200 km/h与120 km/h	重联动力集中动车组	40 ft	10.62	5.72	1.61
		20 ft	6.82	3.69	1.80
	动力分散动车组	40 ft	10.16	6.06	1.64
		20 ft	5.74	2.46	2.06

2.3　集装箱装载稳定性校核计算

2.3.1　横向倾覆稳定性

当集装箱列车与动车组高速交会时，剧烈的气压波动会在集装箱表面产生显著的横向压差与气动载荷，增大其倾覆风险[5]。为系统评估集装箱在不同运行工况下的横向稳定性，取多趟次交会试验中集装箱所受气动横向力与气动升力的最大单峰值，以及交会过程中集装箱的振动加速度数据，据此计算其横向倾覆稳定系数。不同交会工况下40 ft集装箱试验数据如表6所示，不同交会工况下20 ft集装箱试验数据如表7所示[15]。

由表6和表7可知，在所有工况下，正常装载工况下的20 ft和40 ft空箱的横向倾覆稳定系数最小值分别为2.24和1.74；偏重偏载工况下的20 ft重箱横向倾覆稳定最小值为1.78；集装箱FT-R锁锁头异常工况下的40 ft空箱横向倾覆稳定系数最小值为1.72。所有试验集装箱的横向倾覆稳定系数均大于《加规》中的判定限值1.25，具有较大安全裕量，其横向倾覆稳定性均符合《加规》要求。

此外，为验证极限条件下(10级风力正向叠加交会气动力)的集装箱装载安全性，选取40 ft空箱进行倾覆稳定性校核计算。在《加规》中计算货物横向稳定性系数公式的基础上，考虑了垂向加速度和气动升力等因素对稳定力矩的影响，使计算结果更加符合工程实际，40 ft空箱受力分析示意图如图10所示。取本次试验中40 ft空箱在交会时受到的气动横向力最大值9.335 kN (交会吸力)、气动升力最大值6.994 kN，交会时40 ft空箱横向、垂向加速度分别取最大值0.22 g和0.22 g，大风条件下的风力取《加规》中的计算风压0.49 kN/m^2(约10级风力)，计算40 ft空箱受到的风力$W_{风}$为17.3 kN，以上参数代入公式进行校核计算如下。

40 ft空箱的稳定力矩为

$$M_{稳定} = Q(9.8 - a_{垂})b - F_{升}b' \tag{1}$$

式中：$M_{稳定}$为稳定力矩，kN·m；Q为货物质量，t，40 ft空箱为3.75 t；$a_{垂}$为货物的垂向加速度，g；b为货物重心所在纵向垂直平面至货物倾覆点之间的距离，mm，40 ft空箱为1 275 mm；$F_{升}$为气动升力，kN；b'为气动升力合力作用点所在纵向垂直平面至货物倾覆点之间的距离，mm，40 ft空箱为1 275 mm。

表6　不同交会工况下40 ft集装箱试验数据

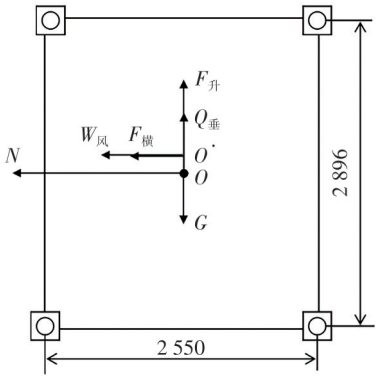
Tab.6　Test data for 40 ft containers under different meeting conditions

交会工况	集装箱装载工况	气动横向力单峰值/kN	气动横向力峰峰值/kN	气动升力单峰值/kN	气动升力峰峰值/kN	加速度/g	横向倾覆稳定系数
动分隧道直线段160 km/h与120 km/h	正常装载	5.07	7.49	2.92	3.54	横向：0.17 垂向：0.18	2.90
	FT-R锁锁头异常	4.55	7.28	5.46	4.33	横向：0.17 垂向：0.18	2.82
动分隧道直线段200 km/h与120 km/h	正常装载	7.78	10.38	5.26	4.71	横向：0.20 垂向：0.20	1.98
	FT-R锁锁头异常	6.56	9.57	5.79	4.15	横向：0.20 垂向：0.20	2.14
动分隧道直线段200 km/h与90 km/h	正常装载	6.06	9.78	4.38	5.11	横向：0.19 垂向：0.20	2.39
	FT-R锁锁头异常	6.11	9.52	4.73	4.81	横向：0.19 垂向：0.20	2.36
动集隧道直线段200 km/h与120 km/h	正常装载	9.34	11.94	5.82	7.07	横向：0.22 垂向：0.22	1.74
	FT-R锁锁头异常	8.97	12.55	6.94	6.27	横向：0.22 垂向：0.22	1.72
动集隧道直线段200 km/h与90 km/h	正常装载	7.44	10.87	4.45	6.24	横向：0.21 垂向：0.22	2.08
	FT-R锁锁头异常	8.28	12.11	5.68	6.07	横向：0.21 垂向：0.22	1.88
动集隧道直线段200 km/h与0 km/h	正常装载	5.07	8.19	2.79	3.14	横向：0.20 垂向：0.19	2.67
	FT-R锁锁头异常	5.71	8.67	1.16	1.69	横向：0.20 垂向：0.19	2.65

表7　不同交会工况下20 ft集装箱试验数据

Tab.7　Test data for 20 ft containers under different meeting conditions

交会工况	集装箱装载工况	气动横向力单峰值/kN	气动横向力峰峰值/kN	气动升力单峰值/kN	气动升力峰峰值/kN	加速度/g	横向倾覆稳定系数
动分隧道直线段160 km/h与120 km/h	偏重偏载	2.91	4.61	1.70	2.75	横向：0.15 垂向：0.15	2.78
	正常装载	2.63	4.22	2.51	2.28	横向：0.15 垂向：0.16	3.51
动分隧道直线段200 km/h与120 km/h	偏重偏载	4.01	6.37	3.42	4.13	横向：0.15 垂向：0.18	2.18
	正常装载	3.63	6.36	2.71	4.28	横向：0.20 垂向：0.20	2.56
动分隧道直线段200 km/h与90 km/h	偏重偏载	4.14	5.99	2.15	2.87	横向：0.15 垂向：0.17	2.29
	正常装载	3.18	6.00	2.29	2.98	横向：0.19 垂向：0.19	2.85
动集隧道直线段200 km/h与120 km/h	偏重偏载	5.02	8.47	3.86	4.76	横向：0.20 垂向：0.19	1.78
	正常装载	4.75	7.85	3.35	4.36	横向：0.20 垂向：0.21	2.24
动集隧道直线段200 km/h与90 km/h	偏重偏载	4.18	8.22	2.96	4.45	横向：0.19 垂向：0.20	2.05
	正常装载	4.35	7.11	2.49	3.35	横向：0.21 垂向：0.21	2.44
动集隧道直线段200 km/h与0 km/h	偏重偏载	4.54	7.21	1.08	1.30	横向：0.18 垂向：0.17	2.16
	正常装载	3.40	6.28	1.41	2.26	横向：0.18 垂向：0.18	2.87



注：图中数据单位为mm。

图10　40 ft空箱受力分析示意图

Fig.10　Schematic diagram of force analysis for 40 ft empty container

40 ft空箱的倾覆力矩为

$$M_{倾覆} = Qa_{横}h + Wh' \tag{2}$$

式中：$M_{倾覆}$为倾覆力矩，kN·m；$a_{横}$为货物的横向加速度，g；h为货物重心自倾覆点所在水平面起算的高度，mm，40 ft空箱为1 158.4 mm；W为作用于货物上的气动横向力与风力的合力，kN；h'为气动横向力与风力的合力作用点自倾覆点所在水平面起算的高度，mm，40 ft空箱为1 448 mm。

40 ft空箱的横向倾覆稳定系数为

$$\eta = M_{稳定}/M_{倾覆} \tag{3}$$

式中：η为集装箱的横向倾覆稳定系数。

根据《加规》要求，当倾覆稳定系数小于1.25时，需要采取加固措施。由计算可知，在风力和交会吸力同向叠加的最不利条件下，40 ft空箱的横向倾覆稳定系数为0.77，小于1.25。表明此时40 ft空箱自身的稳定力矩不足倾覆力矩的1.25倍，为防止集装箱发生横向倾覆，此时需要由FT-R锁提供额外的稳定力矩来抵消集装箱的倾覆力矩。

如图10所示，计算FT-R锁锁头为防止空箱横向倾覆应承受的载荷。由力矩平衡方程可知，若以集装箱自身重力和角件受到的垂向力来抵消集装箱的横向倾覆力矩，考虑1.25倍的安全系数，则一侧2个锁头共同提供的稳定力矩至少为23.01 kN·m，FT-R锁需提供防横向倾覆加固力值至少为17.63 kN。

校核FT-R锁受力截面的结构强度。FT-R锁为防止集装箱角件垂向脱出结构的危险截面积约为1 810 mm^2，受力方向为材料剪切方向，依据《机车车辆强度设计及试验鉴定规范 车体 第2部分》

(TB/T 3550.2—2019)，E级钢第二工况的许用应力值为425 MPa，相应剪切许用应力值为255 MPa，该截面处垂向的允许载荷值约为461.55 kN，FT-R锁为抵消集装箱横向倾覆所需的加固力值小于其允许载荷。校核计算结果表明在FT-R锁锁闭条件下，即便在叠加大风的条件下仍有较大的安全裕量可保障集装箱的倾覆稳定性。

2.3.2　水平移动稳定性

试验数据表明，试验过程中40 ft空箱在横向、纵向的瞬时最大加速度分别为5.4 m^2/s(约0.55 g)和4.5 m^2/s(约0.46 g)，集装箱角件与FT-R锁锁座接触处的摩擦系数约为0.3，即集装箱在纵向和横向所受的摩擦力均小于其惯性力，集装箱在列车的冲击和振动下会发生水平移动，因此有必要结合试验数据对FT-R锁的结构强度进行校核计算，以验证交会过程中集装箱的水平移动稳定性。

考虑货物惯性力主要受货物质量影响，选取最不利的40 ft重箱(满载总重为35 t)进行集装箱水平移动稳定性校核计算。根据《加规》中计算公式可知40 ft 35 t通用集装箱的纵向惯性力T、横向惯性力N、垂向惯性力$Q_{垂}$分别为666.16 kN，98.70 kN，123.90 kN。考虑交会气动力和风力正向叠加的最不利条件，侧向计算风压取《加规》中的0.49 kN/m^2，得到风力$W_{风}$为17.3 kN，气动横向力、气动升力取所有交会工况下实测的最大单峰值分别为9.335 kN和6.944 kN，对FT-R锁的强度进行校核如下。

(1) 摩擦力F为

纵向：$F_{摩}^{纵}=9.8\mu Q$　　(4)

横向：$F_{摩}^{横}=\mu(9.8Q-Q_{垂}-F_{升})$　　(5)

式中：$F_{摩}^{纵}$，$F_{摩}^{横}$分别为集装箱受到的纵向和横向摩擦力，kN；$Q_{垂}$为货物的垂直惯性力，kN；$F_{升}$为实测的40 ft集装箱受到的最大气动升力单峰值，kN，取6.944 kN；μ为摩擦系数，取0.4。

(2) FT-R锁应承受的纵向、横向力为

纵向：$\Delta T=T-F_{摩}^{纵}$　　(6)

横向：$\Delta N=1.25\left(N+W+F_{摩}^{横}\right)$　　(7)

式中：ΔT，ΔN分别为集装箱FT-R锁应承受的纵向、横向力，kN；$F_{横}$为实测的40 ft集装箱受到的最大气动横向力单峰值，kN，取9.335 kN。

集装箱FT-R锁应承受的纵向力和横向力至少为528.96 kN和71.81 kN。水平方向上FT-R锁受力结构的危险截面面积约为5 500 mm^2，则该处最大剪切应力值为96.2 MPa，满足《机车车辆强度设计及试验鉴定规范 车体 第2部分》(TB/T 3550.2—2019)规定的材料剪切许用应力，剪切许用应力按照材料许用应力的0.6倍计算，即255 MPa。

3　结束语

高速交会场景下，影响集装箱所受气动横向力的主要因素为交会时对向列车的运行速度(即动车组速度)，而集装箱列车运行速度的变化对气动横向力的影响较小[16-18]。列车交会时集装箱产生的加速度变化对其平稳性的影响有限。在集装箱倾覆稳定性方面，试验集装箱在所有交会场景下，其横向倾覆稳定系数最小值为1.72，均大于《加规》中的判定限值1.25，具有较大安全裕量。考虑10级风力正向叠加交会气动力极限条件下，最不利的试验箱型40 ft空箱，仍需要FT-R锁鹰钩结构提供防倾覆加固作用。校核计算结果表明，即便在极限条件下，FT-R锁的结构强度仍能保障集装箱的倾覆稳定性有较大的安全裕量。在水平移动稳定性方面，水平方向上FT-R锁锁头处的最大剪切应力值满足材料的许用应力值，试验集装箱在所有交会场景下的水平移动稳定性均符合《加规》要求。

参考文献：

[1] AHMED S R, GAWTHORPE R G, MACKRODT P A. Aerodynamics of Road and Rail Vehicles[J]. Vehicle System Dynamics, 1985, 14: 319-392.

[2] 王英学，高　波. 高速列车进出隧道空气动力学研究的新进展[J]. 中国铁道科学，2003，24(2)：83-88.
WANG Yingxue, GAO Bo. New Development of the Aerodynamics of High Speed Trains Passing in and out Tunnels[J]. China Railway Science, 2003, 24(2): 83-88.

[3] 田红旗. 中国列车空气动力学研究进展[J]. 交通运输工程学报，2006，6(1)：1-9.
TIAN Hongqi. Study Evolvement of Train Aerodynamics in China[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2006, 6(1): 1-9.

[4] 马伟斌，张千里，刘艳青. 中国高速铁路隧道气动效应研

究进展[J]. 交通运输工程学报，2012，12(4)：25-32.
MA Weibin，ZHANG Qianli，LIU Yanqing. Study Evolvement of High Speed Railway Tunnel Aerodynamic Effect in China[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering，2012，12(4)：25-32.

[5] 王　涛，臧建彬，李　芃. 列车隧道空气动力学研究综述[J]. 隧道建设(中英文)，2022，42(S1)：7-18.
WANG Tao，ZANG Jianbin，LI Peng. A Review on Railway Tunnel Aerodynamics[J]. Tunnel Construction，2022，42(S1)：7-18.

[6] 梅元贵，李绵辉，郭　瑞. 高速铁路隧道内列车交会压力波气动载荷分布特性[J]. 中国铁道科学，2019，40(6)：60-67.
MEI Yuangui，LI Mianhui，GUO Rui. Aerodynamic Load Distribution Characteristics of Pressure Wave when Trains Passing Each Other in High Speed Railway Tunnel[J]. China Railway Science，2019，40(6)：60-67.

[7] 高广军，田红旗，张　健. 横风对双层集装箱平车运行稳定性的影响[J]. 交通运输工程学报，2004，4(2)：45-48.
GAO Guangjun，TIAN Hongqi，ZHANG Jian. Cross-Wind Affection on Double Container Train[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering，2004，4(2)：45-48.

[8] 何淑旭. 列车隧道临界交会长度的空气动力学仿真研究[D]. 成都：西南交通大学，2014.

[9] 王开云，何文涛，胡彦霖，等. 横风作用下空载和满载敞车的动力学特性对比[J]. 交通运输工程学报，2024，24(3)：217-226.
WANG Kaiyun，HE Wentao，HU Yanlin，et al. Comparison of Dynamics Characteristics of Empty and Full Load Gondola Cars Subjected to Crosswind[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering，2024，24(3)：217-226.

[10] 张可新，张哲铭，谢　泽，等. 时速200 km客货共线铁路动车组与货物列车区间交会技术可行性研究[J]. 铁道运输与经济，2024，46(12)：209-215.
ZHANG Kexin，ZHANG Zheming，XIE Ze，et al. Technical Feasibility Research of Electric Multiple Units Passing by Freight Trains on a 200 km/h Mixed Passenger and Freight Railway[J]. Railway Transport and Economy，2024，46(12)：209-215.

[11] 中国铁路总公司. 铁路货物装载加固规则[A]. 北京：中国铁路总公司，2015.

[12] 梁习锋，田红旗. 200 km/h动车组交会空气压力波试验[J]. 中南工业大学学报，2002(6)：621-624.
LIANG Xifeng，TIAN Hongqi. Test Research on Crossing Air Pressure Pulse of 200 km/h Electric Multiple Unit[J]. Journal of Central South University of Technology (Natural Science)，2002(6)：621-624.

[13] 田红旗，许　平，梁习锋，等. 列车交会压力波与运行速度的关系[J]. 中国铁道科学，2006，27(6)：64-67.
TIAN Hongqi，XU Ping，LIANG Xifeng，et al. Correlation between Pressure Wave of Train Passing and Running Speed[J]. China Railway Science，2006，27(6)：64-67.

[14] 刘堂红，田红旗. 不同外形列车过隧道实车试验的比较分析[J]. 中国铁道科学，2008，29(1)：51-55.
LIU Tanghong，TIAN Hongqi. Comparison Analysis of the Full-Scale Train Tests for Trains with Different Shapes Passing Tunnel[J]. China Railway Science，2008，29(1)：51-55.

[15] 中国铁道科学研究院集团有限公司. 时速200 km客货共线动车组与集装箱列车交会综合试验研究[R]. 北京：中国铁道科学研究院集团有限公司，2024.

[16] 李　鑫，丁文赢，杨广全. S1Z型双层集装箱连接锁的研究设计[J]. 铁道运输与经济，2018，40(11)：116-121.
LI Xin，DING Wenying，YANG Guangquan. A Design of the Connecting Lock for S1Z Double-Stack Container[J]. Railway Transport and Economy，2018，40(11)：116-121.

[17] 丁文赢. “敞顶箱+卷钢托盘”运输方案及应用研究[J]. 铁路物流，2025，43(8)：34-39.
DING Wenying. Transportation Scheme and Application of “Open-Top Container+Coiled Steel Pallet”[J]. Railway Logistics，2025，43(8)：34-39.

[18] 马欣然，汪正义，李小雷，等. 50 ft铁路运输汽车集装箱设计与试验研究[J]. 铁路物流，2025，43(6)：28-34.
MA Xinran，WANG Zhengyi，LI Xiaolei，et al. Design and Testing of 50 ft Railway Transport Vehicle Container[J]. Railway Logistics，2025，43(6)：28-34.

(责任编辑　李丹丹)