

文章编号: 1000-8055(2024)11-20230823-06

doi: 10.13224/j.cnki.jasp.20230823

超高速单轨火箭橇失效分析与改进措施

杨 珍, 范 坤, 付 良, 曾 一

(中国兵器工业集团有限公司 中国兵器工业试验测试研究院, 陕西 华阴 714200)

摘 要: 探讨了国外火箭橇高速运行失稳现象和原因, 针对近期超高速单轨火箭橇试验失败现象, 从光电经纬仪、遥测、轨道不平顺和靴轨间隙等实测数据方面展开了故障分析, 采用橇轨耦合动力学分析方法对故障进行复现, 提出了有效解决措施, 对系统进行了改进, 并进行了试验验证和振动数据对比。结果表明: 火箭橇系统在 1 100 m/s 速度附近发生剧烈共振, 导致产品橇舱体在薄弱处发生破坏; 靴轨间小间隙加剧了火箭橇在低速条件下的振动, 而高速条件下熔融磨损使间隙增加, 又加剧了单轨火箭橇滚转扭转效应, 导致系统发生局部失效破坏; 调整轨道不平顺度、增加产品橇结构强度和刚度、改善靴轨间隙可以有效提升系统运动稳定性。

关 键 词: 单轨火箭橇; 振动; 失稳; 轨道不平顺; 靴轨间隙

中图分类号: V216.7

文献标志码: A

Failure analysis and improvement measures of hypervelocity monorail rocket sled

YANG Zhen, FAN Kun, FU Liang, ZENG Yi

(Norinco Group Test and Measuring Academy,

China North Industries Group Corporation Limited, Huayin Shaanxi 714200, China)

Abstract: To analyze the failure of the recent hypervelocity monorail rocket sled test, the instability phenomenon and causes of foreign high-speed rocket sleds were discussed, and failure analysis was carried out in terms of measured data such as photoelectric theodolite, telemetry equipment, rail irregularity and boot-rail gap. The sled-rail coupling dynamics analysis method was used to reproduce the failure, and effective solution measures were proposed. The system of the rocket sled was optimized and improved. The test verification and vibration data comparison were carried out. The results of the study showed that the rocket sled system resonated violently near the velocity of 1 100 m/s, leading to destruction of the sled at weak points. The small gap between the slipper and rail exacerbated the vibration of the rocket sled at low speeds, while melt wear increased the gap at high speeds. This exacerbated the monorail rocket sled roll torsion effect, causing localized failure damage to the system. The system motion stability can be effectively improved by adjusting the rail irregularity, increasing the structural strength and stiffness of the sled, and improving the slipper-rail gap.

Keywords: monorail rocket sled; vibration; instability; rail irregularity; slipper-rail gap

火箭橇系统沿滑轨超高速运行过程是一个变速度、变冲击、大过载、系统质量递减、包含地面

效应的时变非线性复杂物理过程, 火箭橇结构的频率、振型以及动态特性在试验全程不断变化,

收稿日期: 2023-12-27

基金项目: 科技创新项目(70902020724)

作者简介: 杨珍(1984—), 女, 副研究员, 硕士, 主要从事火箭橇在轨动力学特性研究。E-mail: xjtu_yangzhen@126.com

引用格式: 杨珍, 范坤, 付良, 等. 超高速单轨火箭橇失效分析与改进措施[J]. 航空动力学报, 2024, 39(11): 20230823. YANG Zhen, FAN Kun, FU Liang, et al. Failure analysis and improvement measures of hypervelocity monorail rocket sled[J]. Journal of Aerospace Power, 2024, 39(11): 20230823.

影响火箭橇系统的运动稳定性^[1-3]。火箭橇沿钢轨高速运动的试验过程中,会受到火箭发动机推力脉冲、轨道不平顺度、气动力、制动力等复杂激励载荷因素的影响,并且滑靴并不是时刻与轨道保持接触的,而是以自由状态飞行,并不时地撞击轨道^[4-6]。滑靴与轨道的接触碰撞时间非常短暂,并且伴随着能量损耗。随着火箭橇运行速度的增加,随机激励源载荷使火箭橇产生较为剧烈的振动,可能会导致系统失稳,轻则导致发动机或被试品的约束失效,重则严重损伤或破坏橇体结构,甚至引起发动机燃爆、被试品爆炸等系统解体故障。单轨火箭橇仅使用一条滑轨作为约束,具有结构紧凑、气动阻力小、推质比大等优点。但单轨火箭橇产生的滚转效应会降低系统稳定性,速度越高,滑靴磨损量越严重,滚转效应越明显,从而严重降低试验系统的可靠性和安全性^[7-9]。

国内外火箭橇在向高速化发展的过程中均存在过在轨运行失稳而导致试验失败的现象,许多学者针对靴轨碰撞现象进行了研究。俄罗斯实验物理研究所 Geraimov 等^[10]研究了火箭橇滑动接触条件下的运动稳定性,研究发现轨道变形、断裂或异常移动多发生在后级橇射流影响的松弛段或最后一级发动机运行结束时。当火箭橇达到 1 440 m/s 及以上时,滑靴接触面和滚轴的磨损超过允许值,滑靴滚转角度发展到 $7^{\circ}\sim 30^{\circ}$,从而导致滑靴断裂、轨道损坏。在霍洛曼高速测试轨道上实施的两发爱国者导弹火箭橇试验^[11],在临界速度为 1 158 m/s 时,轨道均发生了断裂失效而试验失败。Lamb 认为滑轨断裂的原因是由于火箭橇与

滑轨之间的相互作用产生了剧烈的耦合共振现象。Szmerekovsky、Yeo 等^[12-14]对超声速下的火箭橇靴轨撞击过程进行了建模仿真,研究表明火箭橇在高速运行过程中,滑靴与滑轨之间会发生磨损、凿削等现象,对滑轨造成损伤,大大降低火箭橇在轨运行稳定性和安全性。国内火箭橇试验失败现象时有发生,但鲜见相关报道;国外学者多采用理论解析和数值仿真计算方法找出火箭橇运行失稳原因,没有相关测试数据,且未提出改进措施和验证试验。

本文针对国内某发失败的单轨火箭橇试验,从光电经纬仪数据、振动数据、轨道不平顺数据和靴轨间隙等方面分析了火箭橇在轨运行失稳原因,采用橇轨耦合分析方法复现了失稳现象,提出了相应解决措施,并试验验证了该措施的有效性。

1 某发单轨火箭橇试验简介

1.1 火箭橇简介

火箭橇系统采用单轨橇 3 级推进结构,如图 1 所示,1、2 级橇各装载 1 枚固体火箭发动机,通过两枚滑靴约束在滑轨上;产品橇前部安装固定战斗部,后部安装 1 枚固体火箭发动机,通过两枚滑靴约束在滑轨上;两级火箭橇之间通过推力传递装置传递发动机推力。火箭橇在轨通过 3 级助推加速滑行,在滑轨终点达到最大速度,随后战斗部与火箭橇系统解除约束飞出滑轨,单独侵彻靶标。试验过程中采用光电经纬仪、高速摄像机和遥测等测试方法获取关键图像数据。

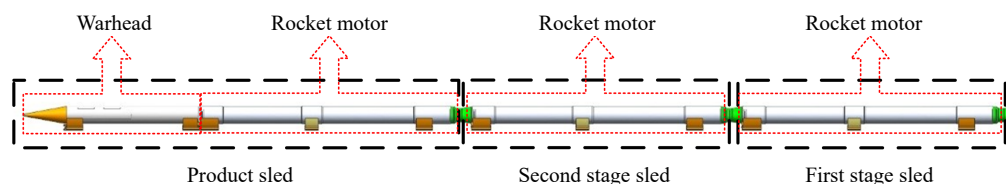


图 1 火箭橇试验系统示意图

Fig. 1 Diagram of rocket sled test system

1.2 试验现象

火箭橇试验中通常采用光电经纬仪和高速摄像设备获取试验图像数据,经纬仪可以从宏观上对试验全过程进行跟踪,获取火箭橇运行速度、位移和运动图像,高速摄像设备可以获取某关键点位高清运动图像。经纬仪测试图像显示,1、2 级橇上和产品橇后部的 3 枚固体火箭发动机均动

态点火正常。当火箭橇运行速度约 1 500 m/s 时,产品橇上有异常物体飞出;运行达到 1 609 m/s 时,系统出现异常火光,同时伴随异常物体飞出,而后战斗部从产品橇上脱离,随后发动机尾焰的长度突然缩短约一半;之后产品橇继续在滑轨上运行,发动机头部也出现火焰,且前半部结构包裹在火焰中;随着火箭橇向前运行,头部断续有火

焰出现、自前向后延展、消失的现象;火箭橇至轨道终点时,产品橇前部结构大部分均已破坏,最终着靶速度为 1 364 m/s。试验后经轨道检查,在火箭橇速度达 1 100、1 500 m/s 和 1 600 m/s 处附近发现轨道顶面、侧面均出现不同程度的磨损,速度达 1 500 m/s 处附近发现轨道顶面有金属附着物,轨道没有发生凿削、弯曲及断裂现象。

2 火箭橇在轨运行失稳分析

2.1 光电经纬仪测试数据分析

将光电经纬仪测试得到的速度数据与理论弹道进行对比,如图 2 所示,在发动机工作起爆点之前,实际弹道与理论弹道十分吻合。火箭橇运行至 9.6 s,速度约 1 600 m/s,位移约 5 940 m,理论估算弹道、测试数据与复核情况相一致,系统运行弹道正常。9.6 s 后,火箭橇系统出现异常情况,弹道速度首先异常增大之后不断减速直至撞击靶标。这是因为此处系统出现失效破坏,导致质量大幅减轻,推质比增加导致速度的突变。

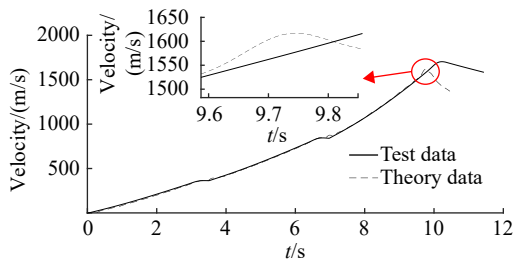


图 2 火箭橇试验速度变化与理论速度变化

Fig. 2 Comparison of test and theory velocity variation of rocket sled

如图 3 所示,经对光电经纬仪测得的数据和理论弹道进行分析可得火箭橇运行全程的航向加速度,即航向过载。可以发现理论航向过载几乎没有波动,而火箭橇在试验过程中的航向过载存在大量的波动。特别是在动态点火时刻,系统加速度扰动较大,但扰动处于动态稳定状态。在 8.13~9.6 s 期间,系统加速度(a)再次出现大幅扰动,幅值达到 $10g$ (g 为重力加速度),扰动中线值约 $32g$,与理论计算得到的加速度吻合;9.6 s 后,系统加速度发生突变,在 9.66 s 时加速度陡增至 $72.45g$ 后急剧减小;从 9.75 s 开始,火箭橇做减速运动,于 9.97 s 负向加速度达到最大值 $-59.18g$,而后火箭橇一直减速。

在 9.59~9.66 s 时间段内,按加速度平均值计算,则加速度变化量为 $72.45g-32g=40.45g$,按瞬

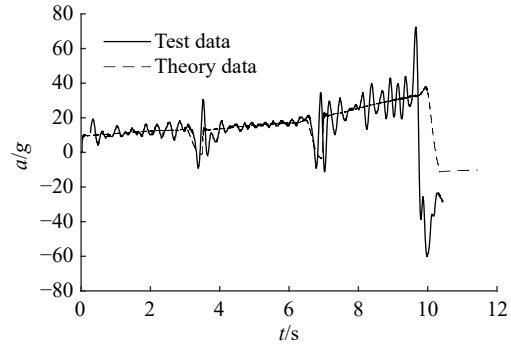


图 3 测试加速度与理论加速度对比

Fig. 3 Comparison of test and theory acceleration

时加速度最大值计算,则加速度变化量为 $72.45g-45.92g=26.53g$ 。发动机在 9.6 s 时的理论推力为 236 228 N,得到该时刻的系统质量在 525~753 kg 之间,发动机在 9.66 s 时刻的理论推力为 236 417 N,该时刻的系统质量为 333 kg。因此,系统在 0.6 s 时间间隔内的质量变化为 192~420 kg。从产品橇在 6.89 s 时第 3 次点火,到推力发生突变时已经燃烧了 2.8 s,发动机壳体和装药量约 270 kg,药量的变化仅为 70 kg。这说明在发动机出现异常前,产品橇系统已经出现破坏并有零部件脱离火箭橇。

2.2 振动数据分析

采用遥测方法获取产品橇滑靴振动数据^[15],经滤波器对振动数据进行低频滤波后发现,滑靴在火箭橇运行速度 1 100 m/s 附近时产生了剧烈的振动,如图 4 所示,图中 σ 表示竖直方向振动加速度的方均根。试验现象及振动数据表明火箭橇在该时刻可能发生了剧烈共振或靴轨之间发生大幅度冲击碰撞,这也与该速度下轨道出现的如图 5 所示的磨痕相对应。所以靴轨间出现了卡顿,产生了较大的航向冲击,引起了产品橇上的发动机发生了不稳定燃烧,这样又促使了系统不稳定性的加剧。

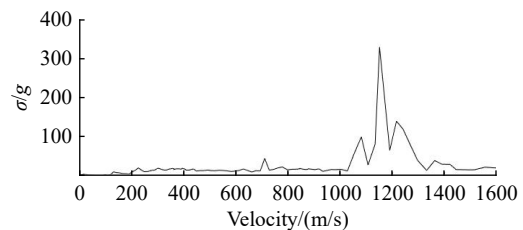


图 4 竖向振动方均根

Fig. 4 Root mean square of vertical vibration

2.3 轨道数据分析

不平顺的滑轨是高速状态下的火箭橇产生振



图 5 轨道磨痕

Fig. 5 Rail wear trace

动的一个主要外部激励,滑轨的局部不平顺会引起火箭橇系统产生高频振动,周期性的不平顺可能会使滑轨与火箭橇系统产生剧烈共振,使火箭橇运行失稳^[16-17]。试验前的高速段轨道不平顺数据显示轨道竖向不平顺数据具有明显的周期性,波长为 15 m,轨道的波长决定火箭橇不同运行速度下的激励频率,由公式 $f = v/\lambda$ (v 是火箭橇运行速度, λ 为轨道特征波长 15 m) 可知,当火箭橇以 1 100 m/s 速度运行时,计算得到对应的轨道激励频率为 73 Hz,而发动机装药燃烧完后的 1 阶频率为 75 Hz,轨道的激励频率与发动机固有频率接近,共振条件在短时间内被激发,如果单轨火箭橇的结构强度不够就会发生破坏。

2.4 靴轨间隙分析

火箭橇沿地面滑轨高速运动的方式为滑行,

主要依靠滑靴与滑轨的配合。靴轨间隙是火箭橇结构设计中重要的设计参数之一,间隙太大,可能导致火箭橇在运行过程中失稳;间隙太小,可能导致火箭橇靴轨间碰撞次数增加,产生烧蚀、卡滞等现象,不利于火箭橇稳定地运行^[18-19]。

由回收的 2 级橇靴轨间隙和高速段轨道附着物分析,发现滑靴在低速段以机械磨损为主,靴轨间隙小使系统卡滞,恶化了橇轨耦合力学环境,而高速段滑靴发生熔融磨损使靴轨间隙增大,加剧了单轨火箭橇在高速下的滚转扭转运行,导致火箭橇系统失稳。

3 故障复现

根据火箭橇实际加工结构和试验前检测的轨道不平顺数据建立了产品橇系统的橇轨耦合动力学模型,如图 6 所示(曲线纵坐标为轨道不平顺值,单位为 mm)。在有限元分析软件中采用实体网格进行系统离散,建立考虑失效的随动硬化弹塑性材料本构模型,加载相应速度条件下的气动阻力、升力和发动机推力载荷,分别计算了 1 100 m/s 速度下靴轨小间隙工况、1 600 m/s 速度下靴轨大间隙工况下火箭橇在轨运行动态响应情况。

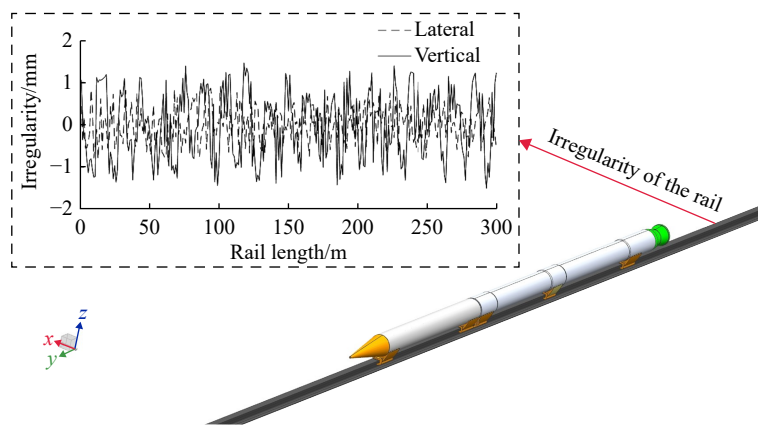


图 6 橇轨耦合动力学模型

Fig. 6 Sled-rail coupling dynamic model

计算结果表明 1 100 m/s 速度靴轨小间隙工况下,产品橇头舱与发动机连接处材料达到破坏极限而出现局部裂缝。该裂缝主要产生在连接部位,由舱体与卡环连接处顶部开始,传递至舱体外缘边界停止。以 1 100 m/s 速度工况的计算结果作为初始边界,计算 1 600 m/s 速度靴轨大间隙工况下的橇轨耦合动态响应,裂缝沿橇体航向正向进一步延伸扩展,破坏范围进一步增加,如图 7

所示。

由计算结果可知,产品橇头部用于固定被试品的舱体结构刚度和强度不足,导致薄壁舱体在火箭橇发生剧烈共振时局部结构失效;在 1 600 m/s 高速运行条件下,靴轨间隙的增加导致系统在轨运行失稳,破坏范围进一步扩大;在恶劣的振动冲击环境下,舱体结构破坏,导致战斗部失去约束与产品橇提前分离,从而试验失败。

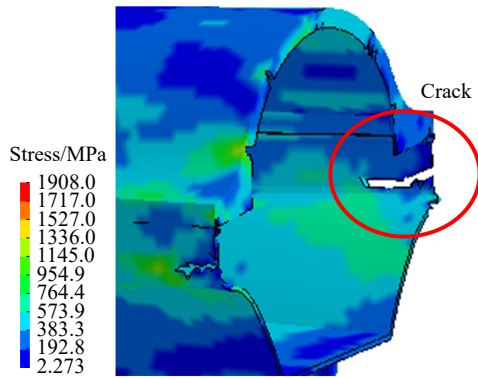


图 7 产品橇失效故障复现

Fig. 7 Fault recurrence of payload sled

4 火箭橇试验系统改进及验证

4.1 靴轨配副间隙改进

考虑到 1 500 m/s 速度时, 滑靴出现了熔融磨损现象, 为防止此现象的出现, 将滑轨涂层进行延长, 故选择从 1 400 m/s 速度时火箭橇系统进入涂层; 系统进入涂层后其磨损量会大幅减小, 为确保 1 700 m/s 速度时的靴轨间隙, 则需增加 1 400 m/s 速度时的靴轨间隙, 可以通过增加初始间隙的方式解决, 初始间隙从 0.5 mm 增加到 1 mm。

4.2 产品橇舱体结构改进

产品橇头部安装被试品的舱体为薄壁结构, 高速运行过程中舱体承受较大的扭转力矩, 而战斗部尾部至发动机头部之间为整个产品橇刚度相对薄弱的部分。因此, 一方面, 通过增强舱体与发动机连接部位的刚度来提高整个产品橇的抗扭转能力; 另一方面, 可改进头锥的结构, 通过减小质量降低扭矩。

4.3 轨道不平顺调校

为降低因滑轨不平顺度导致的 1 100 m/s 速度段振动放大问题, 在第 2 发试验中对该速度段对应的轨道不平顺进行调整, 减小竖向不平顺度。

4.4 试验验证与数据对比分析

对产品橇改进后开展第 2 发火箭橇试验验证, 试验获取了相同部位的振动响应曲线。经对数据分析发现测点侧向振动曲线平稳, 未出现振动突变, 说明该结构在轨摆动较小。而竖向振动在产品橇动态点火时刻增大, 结合经纬仪图像和航向过载数据发现此时橇体减速出现负向过载。这表明橇体进入被动段出现了竖向振动不稳定, 橇体再次进入主动段后回稳, 振动降低。当橇体运行速度到达 1 100 m/s 左右时, 进入结构与轨道的共振速度段, 中滑靴三向振动均增大, 越过共振段

后橇体回稳。火箭橇在发动机推力作用下平稳沿滑轨平稳运行, 并按预定速度撞击靶标。

如图 8 所示, 经对比分析两发火箭橇试验数据可以发现第 2 发的数据除了在二次动态点火段振动较大外, 其余时刻的振动量都比第 1 发试验小。尤其在橇轨耦合共振段, 在振动峰值不变的条件下, 低频振动减小了约 5/6, 说明结构刚度的增加和靴轨间隙的优化增加了系统运动的稳定性。

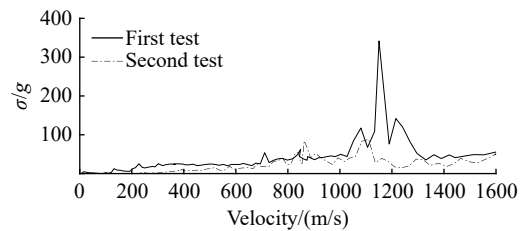


图 8 两发滑靴竖向振动数据对比

Fig. 8 Comparison of two test data for vertical vibration of slipper

5 结 论

本文针对某超高速单轨火箭橇试验故障问题, 从影响火箭橇运行稳定性的原因入手, 对各类试验数据进行分析 and 仿真复现, 确定了故障发生的原因: 对经纬仪数据分析得到火箭橇航向过载, 与理论过载对比, 确定发动机出现异常前产品橇系统已经出现破坏并有零部件脱离火箭橇; 对遥测振动数据进行分析得到产品橇发生故障前的振动响应情况, 确定火箭橇系统速度在 1 100 m/s 附近发生短时共振, 导致产品橇舱体在薄弱处发生破坏; 对轨道不平顺数据进行分析, 找到了火箭橇发生共振的原因是轨道 15 m 周期性波长在 1 100 m/s 速度下产生 73 Hz 激励频率, 与发动机固有频率接近; 对火箭橇试验滑轨及靴轨间隙进行了分析, 发现滑靴在低速段和高速段的磨损形式不同, 低速段以机械磨损为主, 靴轨间隙小使系统卡滞, 而高速段滑靴发生熔融磨损使靴轨间隙增大, 加剧了单轨火箭橇在高速下的滚转和扭转运动, 导致系统失稳失效。

采用橇轨耦合动力学分析方法对故障进行了复现, 提出了调整轨道不平顺、增加产品橇刚度、增加舱体薄弱位置连接强度、改进靴轨间隙等改进措施, 并进行了试验验证。试验完成了预期目标, 两发火箭橇试验的相同滑靴位置的振动数据

结果表明,改进后的火箭橇系统振动力学环境优于故障系统,系统稳定性增强。

参考文献:

- [1] MINTO D W, BOSMAJIAN N. A hypersonic test capabilities at the Holloman high-speed test track[J]. *Progress in Astronautics and Aeronautics*, 2002, 198: 499-530.
- [2] 孙其会, 夏有财, 袁子洋, 等. 轨道不平顺对单轨橇车结构动力学影响分析[J]. *兵器装备工程学报*, 2022, 43(2): 105-109. SUN Qihui, XIA Youcai, YUAN Ziyang, et al. Analysis of influence of track roughness on dynamic characteristics for monorail rocket sled[J]. *Journal of Ordnance Equipment Engineering*, 2022, 43(2): 105-109. (in Chinese)
- [3] 赵项伟, 杨珍, 杨洋. 火箭橇靴轨接触特性数值分析[J]. *振动与冲击*, 2022, 41(1): 238-243. ZHAO Xiangwei, YANG Zhen, YANG Yang. Numerical analysis for slipper-rail contact characteristics of rocket sled[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2022, 41(1): 238-243. (in Chinese)
- [4] 余元元, 王方元, 王彬, 等. 超声速火箭橇流动特征和气动力激励振动分析[J]. *西北工业大学学报*, 2022, 40(5): 1080-1089. YU Yuanyuan, WANG Fangyuan, WANG Bin, et al. Analysis on flow characteristics and aerodynamic-force-induced vibration of supersonic rocket-sled[J]. *Journal of Northwestern Polytechnical University*, 2022, 40(5): 1080-1089. (in Chinese)
- [5] 顾凯旋, 龚明生, 王磊, 等. 双轨火箭橇全时程动力学仿真分析研究[J]. *航空工程进展*, 2020, 11(2): 245-250. GU Kaixuan, GONG Mingsheng, WANG Lei, et al. Study on full time dynamics simulation of two-track rocket sled[J]. *Advances in Aeronautical Science and Engineering*, 2020, 11(2): 245-250. (in Chinese)
- [6] 杨珍, 范坤, 胡兵, 等. 超声速单轨火箭橇动态载荷预示技术研究[J]. *兵器装备工程学报*, 2019, 40(3): 247-251. YANG Zhen, FAN Kun, HU Bing, et al. Study on dynamic load prediction of the supersonic monorail rocket sled[J]. *Journal of Ordnance Equipment Engineering*, 2019, 40(3): 247-251. (in Chinese)
- [7] FURLOW J S. Parametric dynamic load prediction of a narrow gauge rocket sled [D]. Las Cruces, US: New Mexico State University, 2006.
- [8] 夏洪利, 范坤, 田建明. 单轨火箭橇滚转效应预示方法[J]. *兵器装备工程学报*, 2019, 40(5): 47-51. XIA Hongli, FAN Kun, TIAN Jianming. Research on rolling effect predictable method of monorail rocket sled[J]. *Journal of Ordnance Equipment Engineering*, 2019, 40(5): 47-51. (in Chinese)
- [9] XIA Hongli, FAN Kun, TIAN Jianming. Research on rolling effect predictable method of monorail rocket sled[J]. *Journal of Ordnance Equipment Engineering*, 2019, 40(5): 47-51.
- [10] GERASIMOV S I, EROFEEV V I, KAMCHATNYI V G, et al. The sliding contact condition in stability analysis of stage motion for a rocket sled track facility[J]. *Journal of Machinery Manufacture and Reliability*, 2018, 47(3): 221-226.
- [11] LAMB J. Critical velocities for rocket sled excitation of rail resonance[J]. *Johns Hopkins Apl Technical Digest*, 2000, 21: 448-458.
- [12] SZMERKOVSKY A G, PALAZOTTO A N, BAKER W P. Scaling numerical models for hypervelocity test sled slipper-rail impacts[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2006, 32(6): 928-946.
- [13] SZMERKOVSKY A, PALAZOTTO A. Structural dynamic considerations for a hydrocode analysis of hypervelocity test sled impacts[J]. *AIAA Journal*, 2006, 44(6): 1350-1359.
- [14] YEO C D, PALAZOTTO A, SONG Jingan, et al. Evaluation of thermomechanical damage of a slipper and rail in a rocket sled system[J]. *Journal of Testing and Evaluation*, 2016, 44(4): 1443-1453.
- [15] 刘鹏, 杜剑英, 王西泉, 等. 高超声速火箭橇遥测系统[J]. *探测与控制学报*, 2022, 44(5): 64-70. LIU Peng, DU Jianying, WANG Xiquan, et al. On-board telemetry system of hypersonic rocket sled[J]. *Journal of Detection & Control*, 2022, 44(5): 64-70. (in Chinese)
- [16] 张立乾, 邓宗才, 郭富民, 等. 滑橇高速运动动态效应与滑轨平顺度的关系研究[J]. *弹道学报*, 2011, 23(2): 106-110. ZHANG Liqian, DENG Zongcai, GUO Fumin, et al. Study on relation of slide-rail regularity and high-speed movement dynamic response of sled[J]. *Journal of Ballistics*, 2011, 23(2): 106-110. (in Chinese)
- [17] 周学文, 赵项伟, 杨珍, 等. 单轨火箭橇在轨动力学特性数值分析[J]. *航空动力学报*, 2022, 37(6): 1327-1335. ZHOU Xuewen, ZHAO Xiangwei, YANG Zhen, et al. Numerical analysis of dynamic characteristics for monorail rocket sled on rail [J]. *Journal of Aerospace Power*, 2022, 37(6): 1327-1335. (in Chinese)
- [18] MINTO D. The holloman high speed test track hypersonic upgrade program (invited)[R]. AIAA-2002-3034, 2002.
- [19] KEVIN D. Holloman high speed test track design manual[R]. Holloman, US: AAC/PA07-13-05-270, 2005.

(编辑: 陈 越)