

战术导弹公路机动运输振动环境条件的研究

商霖, 周国峰, 卢鑫

(中国运载火箭技术研究院, 北京 100076)

摘要: **目的** 研究战术导弹在公路机动运输环境下振动试验条件的制定。**方法** 根据某型导弹实地跑车试验测量数据, 采用时域统计分析和频域功率谱分析的方法, 在基于悬挂频率、轮胎频率、导弹约束状态频率或车架大梁频率和弹上设备安装频率或舱段频率等四类主要频率进行修正的基础上, 合理地制定了战术导弹公路机动运输振动环境条件。**结果** 利用本文方法预测弹上和车上设备的振动环境条件, 并与试验场跑车试验结果对比分析表明, 本文方法正确、合理, 具有较高的工程应用价值。**结论** 通过与 GJB150A 和 MIL810G 的对比分析表明, 本文方法灵活、方便, 能够适应于不同种类的产品或设备。

关键词: 战术导弹; 公路运输; 振动环境条件; 最大谱; 谱平滑; 谱平均

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2017.12.008

中图分类号: T **文献标识码:** A

文章编号: 1672-9242(2017)12-0040-05

Vibration Environment Condition for Highway and Off-road Transportation of Tactical Missile

SHANG Lin, ZHOU Guo-feng, LU Xin

(China Academy of Launch Vehicle Technology, Beijing 100076, China)

ABSTRACT: Objective To study the formulation of vibration test condition for tactical missile in highway mobile transport environment. Method According to measurement data of transportation test on a tactical missile, statistical analysis and power spectrum analysis were taken to establish the tactical missile highway and off-road transportation vibration environment condition on the basis of four types of main frequencies, including frequency of suspension, frequency of tire, constraint frequency of missile and frequency of equipment installation. Results The method presented in this paper predicted the vibration environment conditions of navigation system in missile and control host in launching truck. The result was compared with test result on sports car in the test site. It showed that the method was correct and reasonable. Conclusion By the contrasts with GJB150A and MIL810G, it shows that the method is flexible and convenient, and can adapt to the different equipment in missile and launching truck.

KEY WORDS: tactical missile; highway and off-road transport; vibration environment condition; the max spectrum; spectral smoothness; spectral segmentation

战术导弹在部署执勤或战备值班状态下, 采用了公路机动运输的方式, 由此可以极大地提高其射前/后的生存能力。然而, 战术导弹在公路机动运输过程中遇到的环境却比较恶劣, 如战时遭到破坏的公路、未经修葺的荒野路面等。同时还要求能够具备长距离、高速机动

的能力, 由此对战术导弹的运输振动环境问题提出了比较严酷的要求。当前, 有关导弹公路机动运输振动环境问题的研究还很少, 已有研究主要集中在运输振动试验方法^[1-2]、运输振动试验模拟^[3]和运输环境条件加速模拟^[4]等方面。

收稿日期: 2017-06-27; 修订日期: 2017-07-29

作者简介: 商霖 (1977—), 男, 博士, 研究员, 主要研究方向为结构动力学。

导弹工程研制中,在没有实测数据的情况下,主要还是采用 GJB 150A^[5]和 MIL 810G^[6]中已有的运输振动环境条件。然而 GJB 150A 和 MIL 810G 只是单纯地提出了环境试验条件,对其应用情况和适用范围并未作过多的详细说明。实际应用时,设计人员通常直接使用这些标准条件对产品或设备进行振动试验,而未对导弹、弹上设备或车上设备等不同对象进行区别处理,由此可能与产品运输的实际振动环境相差甚远,甚至会导致过试验或欠试验的情况。

针对以上问题,文中根据某型战术导弹实地跑车试验,通过对其机动运输过程中的实测振动数据进行时域和频域的处理,提出了基于四类主要频率修正的战术导弹公路机动运输振动环境条件。随后,根据所提环境条件的方法外推并预测了弹上惯组与车控主机的运输振动环境条件,通过与某试验场内标准试验路面跑车试验结果对比表明,文中方法合理正确、可以满足工程设计需求。最后,通过与 GJB 150A 和 MIL 810G 对比分析,表明文中运输振动环境条件制定方法使用方便、操作灵活。

1 跑车试验

1.1 试验概述

跑车试验选定我国华北、西北地区进行,道路类型

涵盖了高速公路、普通柏油路、水泥搓板路和砂土碎石路等典型路面,路面上间或有路障、凸起和凹坑等,行车速度为 20~80 km/h。试验时,导弹按运输状态装填进入贮运发射箱、并固定,贮运发射箱通过发射架安装在运输车辆底盘上。同时,在导弹各舱段连接端面、前滑块和后滑块等位置布置了振动测点。振动传感器选用 BW14595 型加速度传感器,频响范围为 0.5~2000 Hz。信号采集器选用 32 通道 ICP 电压型 MDR 数字信号记录器,采样频率为 1280 Hz。跑车试验全程,采用低噪声电缆将振动信号接入 MDR 数字信号记录器。

1.2 时域统计分析

时域统计分析是指对信号的各种时域参数、指标的估计或计算。振动信号的常用时域参数和指标主要包括:峰值、均方根值、斜度和峭度以及概率密度函数等。图 1 给出了在特定路面类型/等级和某一运输速度组合下导弹前滑块位置 x 向的振动信号时间历程曲线。表 1 和图 2 为图 1 测量数据的时域统计分析结果。

从表 1 中数据可见,信号峰值 P 是 3 倍均方根值 R 的 2 倍,表明振动信号中夹杂了冲击信号,而峭度 K 值表明冲击信号幅值较低、数量较少。此外,从图 2 中图形外廓可见,信号峰值概率密度函数曲线略微右偏,这正对应了表 1 中斜度 S 值小于 0。

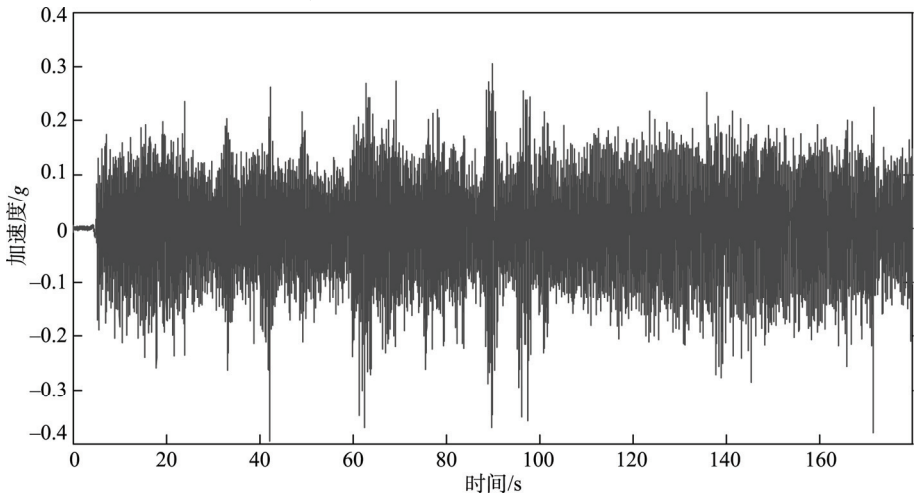


图 1 振动信号的加速度时程曲线

表 1 加速度信号的时域统计分析

峰值 P	均方根值 R	斜度 S	峭度 K
0.396	0.066	-0.154	0.580

信号峭度 K 和斜度 S 等于 0,表明信号是标准正态分布,即是高斯信号。非高斯信号峭度 K 不等于 0,信号峭度 K 小于 0 是亚高斯信号,信号峭度 K 大于 0 是超高斯信号。文中信号斜度 S 和峭度 K 均较小,基本可以看作是高斯信号。如果信号峭度 K 较大,表明运输环境中振动信号伴随着大量的冲击信号,由此则必须看作超高斯信号处理,相应的处理方法可参见

文献[7-8]。

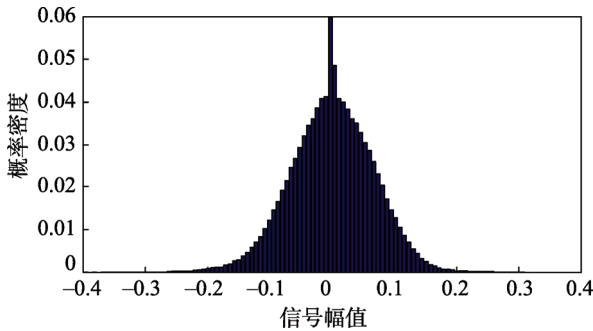


图 2 加速度信号的幅值概率密度函数

1.3 频域功率谱分析

功率谱密度^[9]是一种概率统计方法,是对随机变量均方值的度量。物理定义中,功率谱密度是指单位频带内的信号功率,即信号功率在各频点的分布,对功率谱在频域上的积分可以得到信号的功率。对跑车试验中,导弹前、后滑块和各舱段连接端面等位置的振动测量数据进行频域功率谱密度分析,可以发现各测点垂直 y 向的振动较为剧烈。因此,将高速公路和普通路面跑车状态下导弹前、后滑块 y 方向的功率谱密度曲线画在图3中进行比对和分析。其中,普通路面功率谱密度曲线是综合并包络了不同车速下通过普通柏油路、水泥搓板路和砂土碎石路等路面功率谱密度曲线的最大谱^[10-11],每种车速每种路面功率谱密度曲线是通过对所测数据进行功率谱密度估算并采用谱平滑和谱平均技术^[12-13]得到的。

从图3中可以发现:导弹前、后滑块 y 方向的功率谱密度曲线主要包含5个谱峰,分别对应于底盘系统垂直方向的悬挂频率(频率 f_1 、 f_2 和 f_3)和轮胎的支撑频率(频率 f_4 和 f_5),其谱峰频率值与文献[14]中汽车悬挂(车身)质量的固有频率和非悬挂(车轮)质量部分的固有频率较为接近。其中, f_1 为前悬频率、 f_2 为后悬频率,后前比约为1.6, f_3 为底盘前、后悬整体的俯仰频率,与文献[15]中双质量振动系统前、后悬频率与频率比的通用设计相符合。此外,从图3中可见,高速公路功率谱密度相对普通路面功率谱密度来说基本可以忽略,因此设计分析中需要区别对待、单独处理。

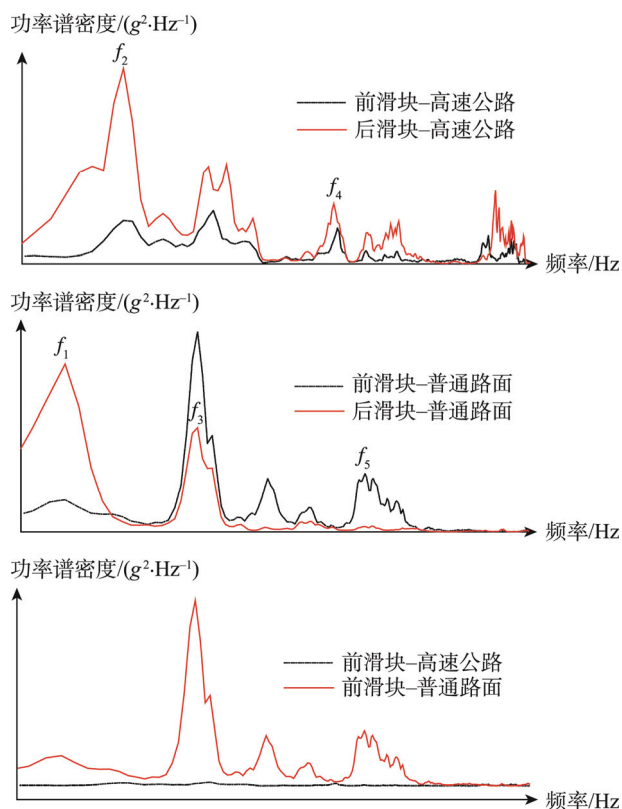


图3 振动信号的加速度功率谱密度曲线

2 振动环境条件的预测

结合跑车试验,测量导弹关心位置的振动响应,利用频域功率谱分析方法获取最大频谱以包络所有工作环境中所有状态下的频谱,由此可以得到导弹或弹上设备在公路机动运输时的振动环境条件。同时,为了简化试验条件,采用斜率为0, ± 3 , ± 6 dB的一系列直线,文中采用五条或七条线段,来对最大谱进行平滑。图4和图5分别为根据跑车试验测量结果平滑得到的高速公路和普通路面机动运输振动环境条件。图4中振动环境条件的功率谱密度值采用了2.223的加速因子,以保证按振动环境条件振动1 h可以等效1600 km的高速公路机动运输。图5中振动环境条件的功率谱密度值采用了1.850的加速因子,以保证按本文振动环境条件振动40 min可以等效804 km的普通路面机动运输。此外,为保证试验操作方便,还可将图4振动环境条件加速至图5振动环境条件,并将两者综合从而采用一个振动环境条件来表征高速公路和普通路面机动运输振动环境,如此处理的思想来自于GJB 150A和MIL810G等军标中疲劳等效关系。

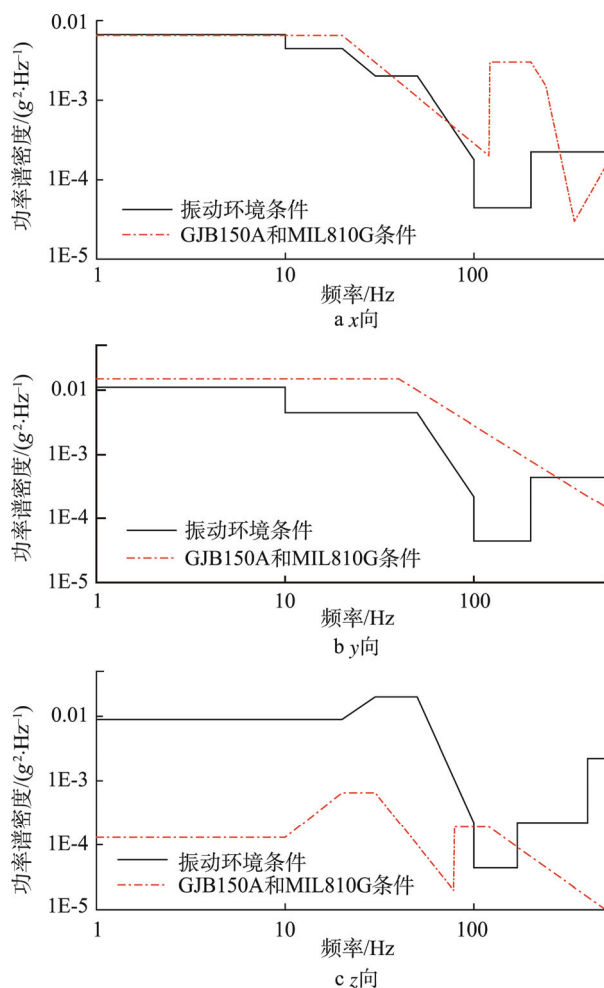


图4 战术导弹公路机动运输振动环境条件-高速公路

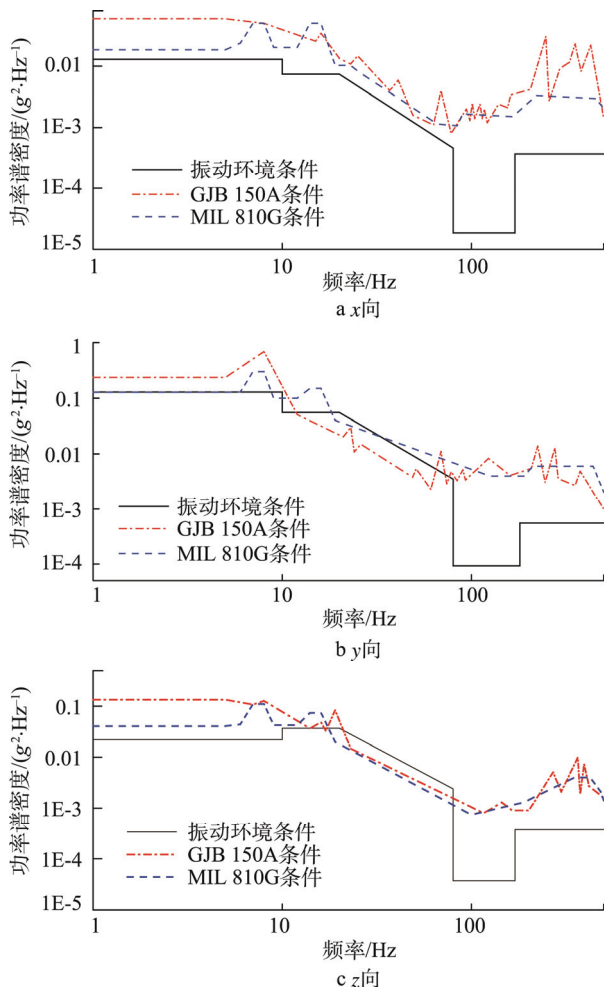


图 5 战术导弹公路机动运输振动环境条件-普通路面

文中振动环境条件的制定,在参照跑车试验最大谱的基础上,主要考虑根据悬挂频率(1~10 Hz)、轮胎频率(10~20 Hz)、导弹装箱/筒状态频率或车架大梁频率(20~50 Hz)和弹上设备安装频率或舱段频率(170~500 Hz)等四类主要频率进行修正。因此,当导弹或弹上设备未经历跑车环境时,其振动响应或环境条件可根据本文振动环境条件利用外推法来预测,继而得到适用于不同类型运输车辆、不同规模导弹的振动环境条件。此外,通过调整第四类频率,还可以分别得到导弹和弹上设备的振动环境条件。其中,导弹的运输振动试验可参照文献[3]执行,弹上设备的运输振动试验可参照 GJB 150A 第 16 部分振动试验中的一般振动来执行。

图 6 为弹上惯组与车控主机在国内某试验场跑车实测信号振动功率谱密度曲线与文中振动环境条件的对比。其中,弹上惯组安装在刚性平台上,其安装频率较高、且单一,因此用原条件即可包络。车控主机安装支架频率较低且丰富,从减振角度考虑还在四个安装支点位置加装了减振器,因此在其减振器频率附近超出了原条件,同时在支架频率附近接近原条件,在高频 400 Hz 以后由于减振器和支架的共同作用也超出了原条件。这里根据前期模态试验获取的车控主机的减振器传

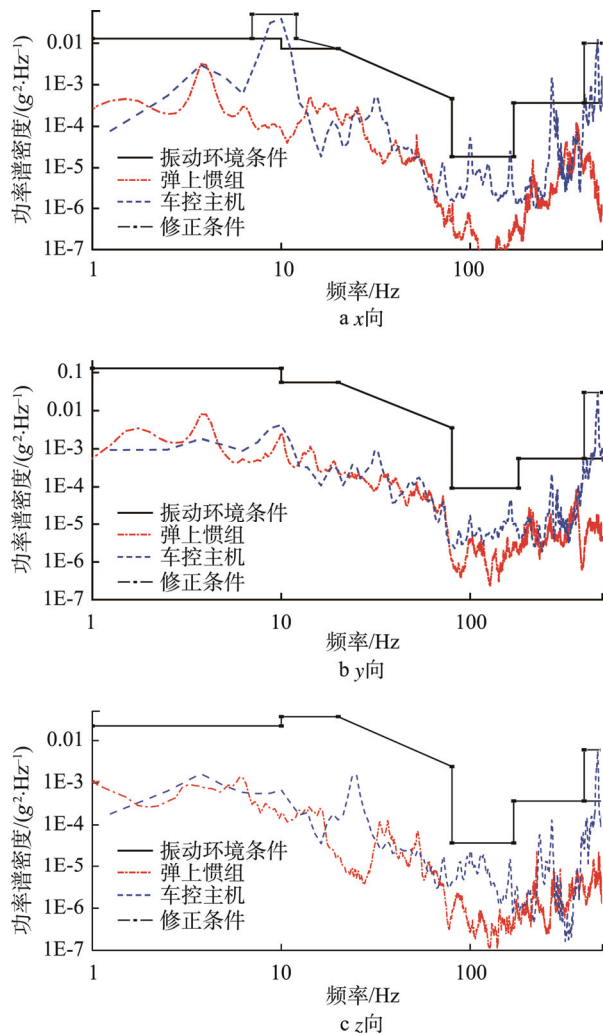


图 6 弹上惯组和车控主机公路机动运输振动环境条件-普通路面

递特性和安装支架频率,对文中条件进行适当修正以包络实际振动响应。

3 与国内外军标的比对

图 4 和图 5 给出了文中振动环境条件与 GJB 150A 和 MIL 810G 振动环境的比对,其中 GJB 150A 是参考 MIL 810F 制定的,因此 GJB 150A 和 MIL 810G 都属于美军标体系,其工程设计方法和试验数据来源是一致的。从图示对比来看,文中振动环境条件与 GJB 150A/MIL 810G 在低频段从幅值和频带都比较切合,这表明国内外车辆底盘的常用悬挂和轮胎的设计是一致的。从中高频段和高速公路 z 向来看,二者相差比较大。这主要是由于环境条件制定方法和数据采集点位置不同,GJB 150A/MIL 810G 高速公路卡车环境条件是从 7 种不同的技术状态情况的卡车和半拖车的货舱底板上测量得到的数据,GJB 150A/MIL 810G 组合轮式车辆环境条件是从 20 种车辆的卡车和半拖车的车架大梁上 2~12

个测点位置得到的测量数据,而文中环境条件是从某型导弹各关键位置测量数据所得最大谱平滑而来,条件制定时采用了四类已知频率对其进行局部修正。由此看来,文中方法在使用上具有更好的适应性、在操作上有更大的自由度。此外,从图 6 看来,文中方法在工程上合理、可行,具有较高的应用价值。

4 结 论

利用某型导弹实地跑车试验数据进行时域统计分析和频域功率谱分析,提出了基于四类主要频率修正的战术导弹公路机动运输振动环境条件。通过与试验场跑车结果和 GJB 150A 及 MIL 810G 对比分析,得出如下结论。

1) 通过实测数据得到的最大频谱来确定振动环境条件,可以更真实地反映导弹或弹上设备的实际运输环境,避免出现欠试验或过实验的情况。

2) 基于四类主要频率的修正,文中环境条件可以应用于不同种类的产品,如导弹、弹上设备和车上设备等,通过试验结果的验证,该方法合理正确,满足工程需求。

3) 文中运输振动环境条件制定方法简单方便、使用灵活,具有一定的工程应用价值。

参考文献:

- [1] 靳晓雄,张帆. 时域波形再现技术在汽车道路模拟中的应用[J]. 中国工程机械学报, 2006, 4(2): 220—222.
- [2] 卢彩玲,康宁民,王树荣. 设备运输振动试验方法探讨[J]. 环境技术, 2011(1): 17—20.
- [3] 杨炳渊,张声雷,宋汉文. 导弹运输环境的单轴振动台模拟试验技术[J]. 装备环境工程, 2005, 2(4): 1—5.
- [4] 姚国年,卫军胡,王丽娟,等. 特种产品运输振动加速模拟试验条件的研究[J]. 西安交通大学学报, 2009, 43(3): 74—77.
- [5] GJB 150A, 军用装备实验室环境试验方法[S].
- [6] MIL-STD-810G, Environmental Engineering Considerations and Laboratory Tests[S].
- [7] 李明月,朱大鹏. 铁路运输环境中超高斯随机振动信号模拟技术[J]. 交通科技与经济, 2013, 15(5): 13—16.
- [8] 朱大鹏,李明月. 铁路非高斯随机振动的数字模拟与包装件响应分析[J]. 包装工程, 2016, 37(1): 1-5.
- [9] 商霖,李璞,廖选平. OMEGA 算法在导弹振动工程中的应用[J]. 装备环境工程, 2015, 12(3): 58—63.
- [10] NASA-HDBK-7005, Dynamic Environmental Criteria[S].
- [11] 刘树林,王金东. 冲击与振动手册[M]. 北京: 中国石化出版社, 2007.
- [12] 白化同,郭继忠. 模态分析理论与试验[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2001.
- [13] 黄怀德. 振动工程[M]. 北京: 中国宇航出版社, 2005.
- [14] 余志生. 汽车理论[M]. 北京: 机械工业出版社, 2007.
- [15] 喻凡. 汽车系统动力学[M]. 北京: 机械工业出版社, 2005.