

基于实测数据的空空导弹自由飞振动条件制定方法研究

刘凯

(中国空空导弹研究院, 河南 洛阳 471009)

摘要:目的 基于实测数据来分析和研究空空导弹自由飞振动环境,讨论并建议空空导弹自由飞振动试验条件制定方法。方法 针对空空导弹振动数据的特殊性对数据进行处理分析。结果 实测数据处理得到空空导弹每个区域的振动响应谱,通过地面试验和动力学仿真分析修订得出地面试验谱。结论 要制定一个合理的空空导弹自由飞振动试验条件,必须基于实测数据进行处理分析,并建立在适当的振动实施条件下。

关键词:自由飞振动实测数据;统计归纳;容差上限;振动试验条件振动

DOI:10.7643/issn.1672-9242.2014.05.022

中图分类号: TJ760.6 **文献标识码:** A

文章编号: 1672-9242(2014)05-0114-05

Study on the Method of Making Free Flight Vibration Profile for Air-to-air Missile Based on Measured Data

LIU Kai

(China Airborne missile academy, Luoyang 471009, China)

ABSTRACT: Objective To analyze and study the free flight vibration environment of air-to-air missile based on the measured data, and to discuss and recommend the formulation method of free flight vibration test condition for air-to-air missile.

Methods The data was processed and analyzed considering the particularity of vibration data of air-to-air missile. **Results** The spectra of vibration response of air-to-air missile in each area were obtained after processing of the measured data, and the ground test profile was obtained through the ground test and dynamic simulation analysis and revision. **Conclusion** To formulate a reasonable free flight vibration test condition for air-to-air missile, the analysis should be based on the measured data, under the condition of appropriate vibration implementation.

KEY WORDS: measured data of free flight vibration; statistic induction; tolerance limit; vibration test condition profile

GJB 150—86《军用设备环境试验方法》是目前空空导弹振动试验主要依据的试验标准,鉴于当前

收稿日期: 2014-07-11; 修订日期: 2014-08-22

Received: 2014-07-11; Revised: 2014-08-22

作者简介: 刘凯(1983—),男,咸阳人,工程师,主要研究方向为空空导弹振动环境预示。

Biography: LIU Kai(1983—), Male, from Xianyang, Engineer, Research focus: vibration environment prediction for air-to-air missile.

空空导弹振动试验的状况和通用振动标准的性质,按 GJB 150—86《军用设备环境试验方法》进行的振动试验不可能精确模拟实际试件的使用环境条件。它只能偏保守地反映使用环境的主要特征或损坏能力,尤其对于空空导弹自由飞振动试验条件。依据标准得出的条件和实测差异很大^[1]。因此为降低通用振动标准的不确定性,途径之一就是开展实测工作,更细致、更合理地划分产品类型、安装区域及数据采集和归纳中所用的状态,利用实测数据来统计归纳地面试验条件。

大量的振动测量、分析结果只有通过恰当的归纳处理才能反映一类或一种产品的综合振动特性,并在一定的理论基础上规定出适当的设计及试验标准。国内目前有关测振数据归纳的标准 HB/Z 87—84《飞机飞行振动环境测量数据的归纳方法》和 GB/T 10593.3—90《电工电子产品环境参数测量方法 振动数据处理和归纳方法》^[2-3],采用的是极值包络法,没有根据数据样本数量和数据分布特性进行统一处理,即按一定的置信度和包含数据百分位点来统计环境数据。2000 年实施的 GJB/Z 126—99《振动、冲击环境测量数据归纳方法》提出的统计容差法是振动数据归纳从传统的上限包络到用统计概念进行归纳的飞跃^[4-5],是目前主要依据的数据统计标准。

空空导弹作为一种特殊的产品,它的细长结构和空中全自由状态大马赫飞行特点决定了空空导弹振动的特殊性。振动环境对空空导弹的性能以至安全的影响是决定性的,尤其是高性能、高可靠性空空导弹的研制更是需要对其飞行环境进行精确预示。文中通过分析空空导弹自由飞振动实测数据的特点,给出较为合理、便于实现的地面试验条件处理方法。

1.1 空空导弹自由飞实测数据特点

空空导弹命中目标后将发生爆炸或坠毁,试验成本巨大,实测工作一般在科研阶段随着科研试验一起进行,数据通过地面遥测获取。空空导弹是由多个舱段组成的细长结构体,在发射后自由飞行,导弹振动由发动机助推器的噪声和气动噪声引起。实测表明,发动机噪声对空空导弹振动影响很小,气动载荷是空空导弹自由飞振动的主要环境诱因,且每个舱段因自身结构特点各异,振动都有所不同^[6]。气动载荷是由气流绕弹体流动,在弹体表面上出现

吸力和压力而产生的,气动载荷的大小和飞行高度、速度、机动过载有关,但在超声速状态下导弹振动大小与飞行状态的关系,GJB 150 中规定的振动计算公式已不适用。经过对目前获取的空空导弹自由飞振动数据和飞行状态分析,导弹横向和纵向过载变化引起的振动远大于导弹在大动压下的振动,这也说明了气动载荷突变对导弹振动影响很大^[7]。目前尚无成熟技术可以定量分析基本的气动噪声源^[8],统计能量法对高频振动预示结果误差较大^[9],只有对实测获取的数据样本进行科学的划分和处理,才能精确预示空空导弹的自由飞振动环境。

1.2 数据处理方法

在获取有效振动实测数据后,首先对振动数据和飞参数据进行数据转换,以得到正确、有用、可以直接进行信号处理的数据,其次按以下步骤进行数据处理。

1) 导弹飞行状态划分。空空导弹自由飞数据一般持续时间很短,只有十多秒至几十秒左右,其中包括发射冲击(暂不讨论)、平稳飞行和预靶段等 3 个过程。为了获得精确的处理结果,需要根据多个飞行参数对导弹整个飞行过程进行细分,可根据发动机工作状态、飞行高度、速度、过载等参数划分。尽量保证分段后的随机数据近似平稳,然后计算每段随机振动数据的自功率谱密度。

2) 平稳数据处理。为保证统计精度,功率谱计算的统计自由度取 120,重叠率为 50%,频率分辨率为 2 Hz。考虑到空空导弹数据长度比较短,很多情况下不能满足以上计算要求,可对多次测试局部平稳随机振动功率谱密度估算结果进行平均作为最终结果^[10]。对选定处理的数据段,进行子样划分 $a_m(n)$,其中 $m=1,2,3,\dots,q,n=1,2,3,\dots,NFFT$ 。

对每个子样加汉宁窗,计算每个子样的频谱 $X_m(k)$:

$$X_m(k) = \sum_{n=1}^N a_m(n) \cdot e^{-j\frac{2\pi nk}{N}} \quad (1)$$

式中: $k=1,2,3,\dots,N$; $X_m(k)$ 表示频率为 $\frac{Fs \cdot k}{N}$ 值处的幅值。

计算每个子样的自功率谱密度 $G_m(k)$,并由汉宁窗系数进行修正。

$$G_m(k) = \frac{2}{NFFT \cdot Fs} \cdot |X_m(k)|^2 \quad (2)$$

修正后的结果为: $\bar{G}_m(k) = 2.67G_m(k)$ (3)

3) 非平稳数据处理。实测数据功率谱密度处理基于平稳数据,非稳态数据是由时变的随机激励产生的,在空空导弹飞行过载变化过程中会出现短时非稳态振动,从计算方法来看,非稳态信号用时变自谱分析和最大谱包络处理^[11],最大谱对动态环境提供了一个保守的评估。处理结果中的每个频率上的非稳态最大值只是瞬时出现的,由于结构和设备的破坏机理通常和动态载荷的持续时间以及它的整体谱值分布有关,因此空空导弹非稳态数据产生的时刻非常短。非稳态激励产生的频响类似于冲击响应,目前存在非平稳振动和平稳随机振动试验的损伤效应差异问题,需进一步研究并慎重使用。

4) 一定状态下同一测点多个测量数据的归纳。一般一定状态、同一测点的数据也是随机的。因此,原则上应用多个弹道测出一定状态下同一点的多个数据,然后作统计估计。估计方法如下:设一定状态下同一测点(同一测量方向)拥有 K 个测量数据,按相同频率,其量值(谱密度值)分别为 $A_1, A_2, \dots, A_K$, 则取:

$$\bar{A} = \frac{1}{K} \sum_{i=1}^K A_i \quad (4)$$

$$\bar{S} = \sqrt{\frac{1}{K-1} \sum_{i=1}^K (A_i - \bar{A})^2} \quad (5)$$

式中: $\bar{A}, \bar{S}$ 分别为样本平均值及标准差; A 为响应母体均值。

根据置信系数 $1-a$ 得到均值置信上限值为:

$$A_{1-a}^u = \bar{A} + \frac{\bar{S} \cdot t_{K-1, a/2}}{\sqrt{K}} \quad (6)$$

式中: $1-a$ 为规定的置信系数,取 $a=0.1$; $t_{K-1, a/2}$ 为按自由度 $K-1$ 及 $a/2$ 值自 t 分布上查出的值。在不同离散频率 f_n 处都可以得到相应的 A_{1-a}^u 值,这些离散点连成的新谱线形成该测点的单一振动数据。

5) 一定状态下,同一安装区域多个测点的数据归纳。空空导弹在每个区域中一般都有多个测点,为了给出该区域的地面试验条件,建议采用包线方法进行归纳,因为空空导弹地面试验条件必须能反映该区域中的最严酷振动。例如在一定状态下 M 个测点得到 M 条单一振动数据统计曲线,画于同一张图上,然后根据包围绝大部分数据,仅摒弃少数突出数据点的原则,划分出 4 个不同的频段,分别连出

相应的常值包线,如图 1 所示。必须综合考虑并选择划分这 4 个频段,其他状态的频段划分尽量与此保持一致。图 1 中 A_q^1, A_q^2, A_q^3 和 A_q^4 分别为这 4 个频段的包线值。

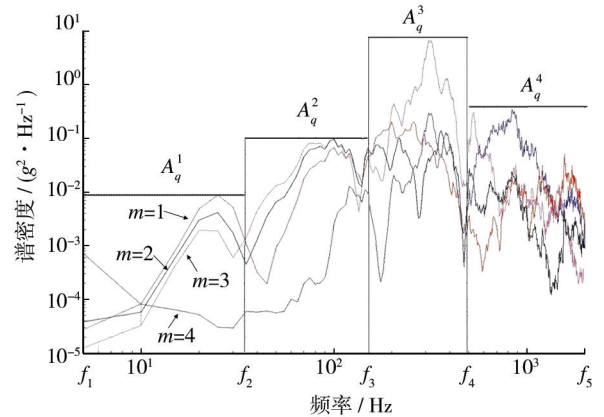


图 1 第 q (共 $q=1, 2, \dots, i$ 个状态) 个状态、 m 个测点的单一振动数据

Fig. 1 Single vibration data for the m points in q ($q=1, 2, \dots, i$ state) state

6) 相同频段、所有状态的数据归纳。例如,共划分了 i 个状态,分析第 y 频段(f_1, f_2),得到 i 个常值包线值 A_q^1 ($q=1, 2, \dots, i$),其中状态 Q 对应的包线值最大。按峰值准则,处理结果量值 A_Q^1 取为:

$$A_Q^1 = \max(A_q^1; q=1, 2, \dots, i) \quad (7)$$

依次得到 4 个频段的最大包线值,即为处理结果量值 ($y=1, 2, 3, 4$)。

7) 同一区域所有频段的数据综合。最后将所有频段归纳结果合在一起得到振动试验标准所要求的振动谱形。如图 2 所示。

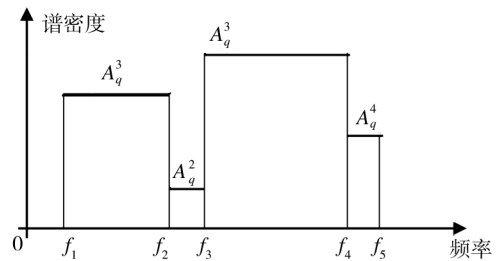


图 2 数据综合谱

Fig. 2 Comprehensive spectral data

8) 规范谱型。根据实测数据并结合现有国家军用标准,采用平谱、梯形谱或折线谱来规范上述数据综合结果。对于频率在(f_1, f_2)之间的升谱,若用

n 分贝/倍频程表示,则有:

$$G(f) = G_1(f/f_1)^{n/3} = G_2(f/f_1)^{n/3} \quad (8)$$

式中: $G(f)$ 为频率 f 对应的谱密度值, G_1 和 G_2 分别为对应于频率 f_1 和 f_2 的谱密度值。

2 地面试验条件制定方法

2.1 舱段级产品地面试验条件制定

在统计归纳结果的基础上,得到了每一个区域的空中振动谱型,结合测点位置设计舱段振动试验条件。实测数据处理结果是导弹内部响应结果,若依此来制定系统级产品地面环境试验条件,需要进行试验控制点谱型拟合和反推。如果飞行实测点为舱段连接处的内部结构,内外相差不大,可以认为空中实测谱就是地面试验外加的振动谱。若测点位置的结构特点与舱段外控制点安装位置结构差异较大,则需要在地面进行试验摸底,对比弹内外响应差异,结合动力学仿真分析修正地面试验谱^[12-13],使内部测点响应尽量接近空中实测谱。

2.2 全弹地面试验条件制定方法建议

要完全考核产品性能,降低飞行风险,最简单的办法就是全弹地面试验时产品关键点响应谱型完全包络实测谱型。地面全弹试验边界约束和激励不可能完全模拟空中状态,且不可能制定出一个系统级地面环境试验谱,使导弹内部所有测点的响应谱同时覆盖空中实测情况。如果要完全考核导弹头尾,势必造成其它部位严重过试验。若对试验方法和条件不能及时改进,将无法完全考核导弹性能,会大大增加导弹使用风险,而有的部件严重过试验会损坏产品、浪费资源和增加研发成本。现有的较成熟试验手段是进行双台或多台激振^[14-15],同时对导弹头部和尾部用各自地面试验条件进行。基于此试验方法制定的条件也不能完全解决导弹天地一致性问题,仅适用于考核舱段间性能匹配、功能完整性,同时起到统一设计要求、质量控制、生产管理及产品验收的作用。

3 结语

通过以上分析可见,要制定一个合理先进的振

动试验条件,所采用的数据归纳方法必须从具体情况出发,综合吸收各种归纳方法的优点,并建立在适当的振动实施条件下。由于国内空空导弹实测数据样本很少,特别是导弹自由飞实测数据更少,获取数据的成本很大。因此目前建议做法是在产品地面振动试验(包括舱段和全弹)中测得各测点的地面试验响应谱,在取得空中实测数据后,将空中数据进行归纳处理,最后将同一测点的地面试验响应谱和空中响应结果进行对比。若每个测点的地面响应谱均能包络空中实测结果,则认为地面试验是充分的;若某个测点某些频带无法包络空中实测结果,则根据具体情况进行分析,必要时对舱段级地面试验条件进行适当修订并验证,直至包络空中实测结果。

参考文献:

- [1] GJB 150—86,军用设备环境试验方法[S].
GJB 150—86, Environmental Test Methods for Military Equipments[S].
- [2] HB/Z87—84,飞机飞行振动环境测量数据的归纳方法[S].
HB/Z87—84, The Induction Method for Environmental Measured Data of Aircraft Flying[S].
- [3] GB/T10593.3—90,电工电子产品环境参数测量方法振动数据处理和归纳方法[S].
GB/T10593.3—90, Measurement Method of Environmental Parameters for Electric and Electronic Products, Vibration Data Processing and the Induction Method[S].
- [4] GJB/126—99,振动、冲击环境测量数据归纳方法[S].
GJB/126—99, The Inductive Method for Environment Measured Data of Vibration and Shock[S].
- [5] 袁宏杰,罗敏,姜同敏.随机振动环境测量数据归纳方法研究[J].航空学报,2007,28(1):115—117.
YUAN Hong-jie, LUO Min, JIANG Tong-min. Study on Inductive Method for Environmental Measured Data of Random Vibration[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2007, 28(1): 115—117.
- [6] 郭迅,郭金岭.空空导弹振动试验条件分析[J].装备环境工程,2012,9(3):99—103.
GUO Xun, GUO Qiang-ling. Analysis of Vibration Test Condition of Air-to-air Missile[J]. Equipment Environmental Engineering, 2012, 9(3): 99—103.
- [7] 王靖,罗金玲,周丹杰,等.高速飞行的特殊载荷问题研究[J].飞航导弹,2010,9:52—57.
WANG Jing, LUO Jin-ling, ZHOU Dan-jie, et al. Research

- on the Special Problems of High sSpeed Flight Load[J]. Cruise Missile, 2010, 9: 52—57.
- [8] 骆寰宇, 邓忠民, 孙兰, 等. 飞行器声振动力学环境响应预示方法[J]. 战术导弹技术, 2012, 6: 22—27.
- LUO Huan-yu, DENG Zhong-min, SUN Lan, et al. The Methods of the Response Prediction of Aircraft under Acoustic Vibration Environment[J]. Tactical Missile Technology, 2012, 6: 22—27.
- [9] 聂旭涛, 雄飞峤. 运用统计能量分析法预示空空导弹舱内动力学环境[J]. 振动与冲击, 2007, 26(4): 140—144.
- NIE Xu-tao, XIONG Fei-qiao. Predicting Dynamic Environment of Air to Air Missile Module with Statistical Energy Analysis Method [J]. Journal of Vibration and Shock, 2007, 26(4): 140—144.
- [10] 李奇志, 陈国平, 邓君. 随机振动环境实测数据无偏评估方法研究[J]. 现代雷达, 2011, 33(2): 70—72.
- LI Qi-zhi, CHEN Guo-ping, DENG Jun. A Study on Unbiased Estimation Data Method of Field Measure in Random Vibration Environment[J]. Modern Radar, 2011, 33(2): 70—72.
- [11] MIL-STD-810F, 国防部试验方法标准 环境工程考虑和试验室试验[S].
- MIL-STD-810F, Standard Method of Test for the Department of Defense, Environmental Engineering Considerations and Laboratory Tests[S].
- [12] 范伯钧, 刘炜. 虚拟振动环境试验在导弹研制中的应用[J]. 现代防御技术, 2007, 35(6): 51—54.
- FAN Bo-jun, LIU Wei. Application of Virtual Vibration Environment Test on the Development of Missile [J]. Modern Defence Technology, 2007, 35(6): 51—54.
- [13] 王亮, 商霖, 王乐. 战术导弹结构动力学建模研究[J]. 战术导弹技术, 2013, 1: 24—27.
- WANG Liang, SHANG Lin, WANG Le. Study on the Structure Dynamic Modeling of Tactical Missile [J]. Tactical Missile Technology, 2013, 1: 24—27.
- [14] 陈家炎, 周建川, 陈章位, 等. 多点同步并激振动试验控制系统的设计与实现[J]. 系统工程与电子技术, 2010, 32(12): 2676—2679.
- CHEN Jia-yan, ZHOU Jian-chuan, CEHN Zhang-wei, et al. Design and Implementation of Vibration Test Control System of Multi-exciter Synchronization[J]. Systems Engineering and Electronics, 2010, 32(12): 2676—2679.
- [15] 叶建华, 李传日. 多点随机振动试验控制技术[J]. 系统工程与电子技术, 2008, 30(1): 124—127.
- YE Jian-hua, LI Chuan-ri. Control Technique of Multi-exciter Random Vibration Test [J]. Systems Engineering and Electronics, 2008, 30(1): 124—127.

(上接第 102 页)

- [7] 王宪成, 何星, 胡俊彪, 等. 发动机环境适应性模糊评价研究[J]. 内燃机工程, 2013, 34(2): 88—91.
- WANG Xian-cheng, HE Xing, HU Jun-biao, et al. Research on Engine Environmental Adaptability Based on Fuzzy Evaluation [J]. Chinese Internal Combustion Engine Engineering, 2013, 34(2): 88—91.
- [8] 武月琴, 傅耘, 敖亮. 典型环境条件下装备环境适应性的评估方法[J]. 装备环境工程, 2010, 7(6): 109—112.
- WU Yue-qin, FU Yun, AO Liang. Equipment Environmental Worthiness Evaluation Method in Representative Environmental Condition [J]. Equipment Environmental Engineering, 2010, 7(6): 109—112.
- [9] 谢季坚, 刘承平. 模糊数学方法及其应用(第 4 版) [M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2013.
- XIE Ji-jian, LIU Cheng-ping. Fuzzy Mathematics Method and Its Application (Fourth Edition) [M]. Wuhan: Huazhong University of Science & Technology Press, 2013.
- [10] 李方鹏, 朱信忠, 赵建民, 等. 基于 AHP 多专家评估决策在物流运输方案选择中的应用[J]. 产业聚焦, 2013, 22—24.
- LI Fang-peng, ZHU Xin-zhong, ZHAO Jian-min, et al. Multiple Expert Evaluation Decision Making Based on AHP in the Application of Logistics Transportation Scheme Selection [J]. Computer CD Software and Applications, 2013, 22—24.