

探空火箭箭头随机振动仿真分析

卢山, 张晓旻

(中国航天科技集团公司第四研究院第四十一所, 西安 710025)

摘要:以探空火箭箭头为研究对象,利用有限元软件 ANSYS Workbench 对结构的模态及随机振动响应进行仿真分析,得到箭头的模态、随机振动响应谱、加速度均方根值、应力云图等,并与试验结果进行了对比,验证了仿真方法的正确性。仿真分析方法弥补了箭头随机振动试验手段的不足,得到更多的随机振动响应数据,并对箭头应力、变形、设备安装结构振动响应、测点位置影响等进行了分析,对箭头动态强度设计、设备与箭头振动试验方案设计等均有参考意义。

关键词:探空火箭箭头;模态分析;随机振动响应;仿真分析

本文引用格式:卢山,张晓旻.探空火箭箭头随机振动仿真分析[J].兵器装备工程学报,2017(5):73-77.

Citation format:LU Shan, ZHANG Xiao-min. Random Vibration Simulation of Sounding Rocket Warhead[J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2017(5):73-77.

中图分类号:TJ7

文献标识码:A

文章编号:2096-2304(2017)05-0073-05

Random Vibration Simulation of Sounding Rocket Warhead

LU Shan, ZHANG Xiao-min

(The 41st Institute of the Fourth Academy of Aerospace Science And Technology Corporation, Xi'an 710025, China)

Abstract: Using the finite element software ANSYS Workbench, the model analysis and random vibration responses analysis based on sounding rocket warhead were carried out. The simulation results of the mode, the random vibration response spectrum, the root mean square value of acceleration and the stress nephogram were obtained. The conclusions drawn from the simulations agreed well with the experimental results, and verified the correctness of the simulation method. The simulation method overcomes the shortcoming of random vibration test methods of the warhead, obtaining more random vibration response data. The stress and deformation of sounding rocket warhead, the vibration response of equipment installation structure and the influence of the measuring points were analyzed, having a certain reference value to dynamic strength design, vibration test design of warhead and equipment.

Key words: sounding rocket warhead; model analysis; random vibration response; simulation analysis

探空火箭主要用于探测近地空间环境,对近地空间资源进行开发实验,并利用空间特殊的环境条件对空间技术进行试验^[1]。火箭在主动飞行过程中,将受到复杂的噪声、冲击、振动等动力学载荷的影响,这些载荷将影响箭体结构和设备的可靠性^[2-5]。为保证探空火箭飞行过程的工作可靠性,箭头在出厂前,均需要经过随机振动试验考核。通过试验手段可以较为直观的检验箭体结构、电气连接、设备的工作可靠

性,但由于试验条件的限制,通常只对箭头的随机振动响应进行测量而不进行应力、变形以及内部设备安装结构的振动响应测量,此外环境力学试验需耗费较多的人力物力,因此有必要引入仿真分析手段。

频域分析方法在一致平稳随机激励作用下的振动研究方面具有完善的理论依据,可以较为快捷的获得结构响应^[6-9]。功率谱密度(PSD)是频域分析的主要数字特征,用

收稿日期:2016-12-25;修回日期:2017-01-25

作者简介:卢山(1986—),男,工程师,主要从事导弹/火箭结构设计研究。

于描述频域范围内随机信号的统计特征。箭头在飞行过程中的复杂的噪声、冲击、振动等均为随机振动载荷,具有宽频性、随机性的特点,不能用确切的时间函数进行描述,需采用随机振动功率谱密度方法进行振动分析。通过有限元软件 ANSYS Workbench,随机振动功率谱密度方法可在很宽的频率范围上对产品施加振动,使箭头各部位在不同的频率上同时受到激励,能够更加全面地分析箭头的随机振动响应情况。将探空火箭箭头随机振动仿真分析结果与试验结果对比,验证了仿真分析方法的正确性。此外,通过仿真分析手段,可得到箭头更多的随机振动响应数据,对箭头动态强度设计、设备与箭头振动试验方案设计等均有参考价值。

1 基本理论与求解方法

探空火箭在飞行过程中会承受不同时间历程的振动载荷,由于时间历程的不确定性,需要从概率统计角度出发,将时间历程的统计样本转换为功率谱密度函数(PSD),在功率谱密度的基础上进行随机振动分析,得到箭头响应的概率统计值。随机振动分析是一种频域分析,首先需要进行模态分析,在模态分析的基础上进行随机振动分析,得到箭头上各点的响应曲线^[10]。

1.1 模态分析方法

模态分析是计算结构振动特性的数值技术,包含固有频率和振型,是进行谐响应、响应谱、随机振动等动力学分析的基础。应用弹性力学有限元法,自由模态分析求解的基本方程为:

$$[M]\{x''\} + K\{x\} = \{0\} \quad (1)$$

设结构的自由振动为简谐振动,即位移为正弦函数:

$$x = x \sin(\omega t) \quad (2)$$

由(1)、(2)可得:

$$([K] - \omega^2[M])\{X\} = \{0\} \quad (3)$$

由方程(3)求得特征值 ω_i 就是自振圆频率,自振圆频率为 $f = \frac{\omega_i}{2\pi}$ 。特征值 ω_i 所对应的特征向量 $\{x_i\}$ 就是相应的振型。

为保证模态分析与随机振动分析的箭头动态特性保持一致,模态分析时候应施加与随机振动分析一致的边界条件。同时,模态分析应提取主要被激活振型的频率和振型,提取出来的频谱应该位于 PSD 曲线频率范围之内。为了保证计算考虑所有影响显著的振型,应包含在振动频谱的曲线范围之内。

1.2 随机振动响应分析方法

箭头受到随机激励时,激励和响应均为非确定性时间函数,无法用确定函数来表示其时间历程。结合统计学理论而发展和完善的频率分析方法能够用于结构系统的随机振动响应分析^[11-12]。

复杂的结构系统,其离散后的动力学方程如下式:

$$[M]\{x''\} + [C]\{x'\} + [K]\{x\} = \{F(t)\} \quad (4)$$

式中, $[M]$ 、 $[C]$ 、 $[K]$ 分别为结构系统的质量矩阵、阻尼矩阵

和刚度矩阵, $\{x''\}$ 、 $\{x'\}$ 、 $\{x\}$ 分别表示结构系统的加速度向量、速度向量和位移向量, $\{F(t)\}$ 表示系统所受的随机激励向量。

随机激励为平稳随机激励时,设其功率谱密度函数矩阵为 $S_F(\omega)$,则响应的功率谱密度函数矩阵表示为:

$$S_F(\omega) = H(\omega) * S_F(\omega) H(\omega)^T \quad (5)$$

$H(\omega)$ 为结构系统的频率响应矩阵。系统响应矩阵 $T(t)$ 的方差可通过功率谱密度函数矩阵积分得到:

$$\text{cov}[F(t), F(t)] = E[F(t)F(t)^T] = \int_{-\infty}^{+\infty} S_F(\omega, t) d\omega = \sum_i S_F(\omega_i, t) \Delta\omega_i \quad (6)$$

对于上述功率谱密度函数矩阵,当激励信号为一致平稳随机信号时,其功率谱密度函数是其自相关函数的傅里叶变换:

$$S(x) = \int_{-\infty}^{+\infty} R(\tau) \exp(-j\omega t) dt \quad (7)$$

式中, $R(\tau)$ 为激励信号的自相关函数。

信号的自相关函数是用来描述同一信号在相隔时间为 τ 的两个数值之间的相互关系,通常用 $R(\tau)$ 表示:

$$R(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T x(t)x(t+\tau) dt \quad (8)$$

自相关函数得到了任何时刻数据对未来数据值的影响,解决了概率密度函数不能给出随机振动信号的时间历程或频率成分的问题,更加完善了对随机振动的描述。

由上述理论分析可知,已知作用于结构系统的某激励随时间变化曲线,就可以通过数学函数变换得到其功率谱密度,从而对结构系统微分方程进行求解,获得系统的响应值。

2 箭头随机振动分析

使用有限元软件 ANSYS Workbench 建立某探空火箭的箭头有限元模型,箭头直径为 $\Phi 200$ mm,长为 1 260 mm,由整流罩和分离舱 2 个舱段组成,整流罩为复合材料,长 800 mm,分离舱为结构钢(45 钢),长 460 mm,两个舱段通过连接环套接。

定义火箭的轴线方向为 X 方向,指向箭头为正, Y 方向在纵向对称面内,与 X 轴垂直,指向上方为正, Z 方向可由右手定则确定。

2.1 振动试验条件

箭头在飞行过程中处于自由状态,地面试验时,根据现有的随机振动试验条件,需要对箭头在振动台上进行夹持固定,导致地面试验与实际飞行存在差异。为减小天地差异,使试验能够较准确的反映真实飞行情况,工装夹持位置应选择箭头结构响应值较小处,减小对箭头固有属性的影响。

为使试验能够准确反映真实飞行情况,在随机振动试验前,需进行不加约束的模态分析,对箭头工装夹持部位进行分析,使试验能够较准确的反应真实飞行情况。经不加约束的模态分析,整流罩后部与分离舱中部之间的结构响应值相对较小,应在该区间选取刚度较好的部位进行工装夹持。同时两个工装夹持部位应在质心两边,且兼顾箭头安装固定的便利性和可靠性,箭头在振动试验台上的固定如图 1 所示。

在振动工装上粘贴的振动传感器,用于控制随机振动输入谱。在整流罩中部、分离舱后部粘贴的振动传感器,用于采集随机振动响应信号。

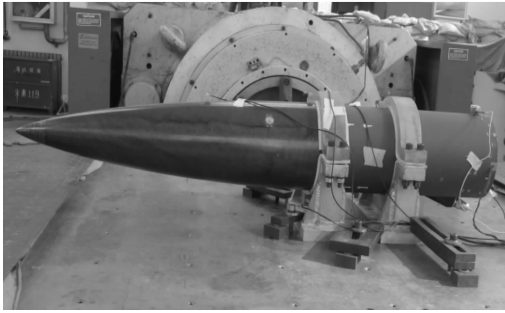


图1 随机振动试验

根据探空火箭环境试验条件的相关要求,箭头振动的输入条件如图2所示:

- 10 ~ 100 Hz: 3 dB/oct(上升谱), 100 Hz: 0.01 g^2/Hz ;
- 100 ~ 1 000 Hz: 0.02 g^2/Hz (平直谱);
- 1 000 ~ 2 000 Hz: -3 dB/oct(下降谱), 1 000 Hz处 0.02 g^2/Hz 。

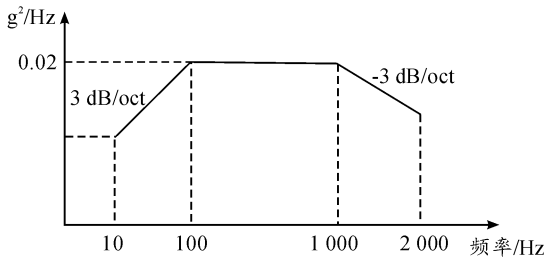


图2 箭头随机振动谱

2.2 箭头模态分析

有限元模型中,为模拟工装对箭头的固定作用,在整流罩与分离舱的工装夹持部位施加固定约束条件。经模态分析可得,箭头在 2 000 Hz 内包含 50 阶模态,第 51 阶模态频率为 2 001.7 Hz,见图3所示,因此提取箭头前 50 阶模态进行后续的随机振动分析。

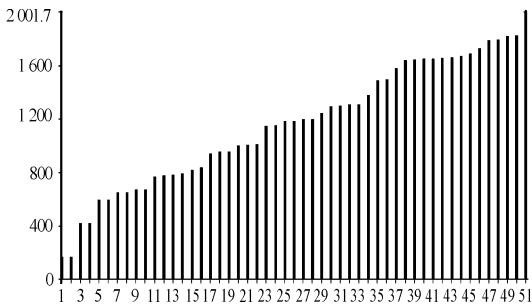


图3 箭头模态频率

2.3 随机振动分析

由于箭头 Y、Z 方向的振动特性高于 X 向,故只进行了 Y、Z 方向的随机振动分析。随机振动试验仿真分析时,将随

机振动谱输入有限元模型中,并将输入的振动谱施加在整流罩和分离舱的两个工装夹持部位。同时,在整流罩中部、分离后部各设置一个振动响应输出点,与随机振动试验的传感器粘贴位置保持一致。

仿真分析和试验得到的整流罩中部与分离舱后部随机振动响应的加速度均方根值见表1所列。仿真分析和试验得到的测点随机振动试验响应曲线如图4~图7所示。由上述图表可知,仿真分析得到的加速度均方根值与试验结果基本一致,仿真分析与试验所得的响应曲线趋势一致,各特征点吻合较好,可以较好的对随机振动试验进行模拟。

表1 箭头随机振动均方根响应值

测点位置	整流罩中部 g	分离舱后部 g
试验结果	16.05	14.51
仿真结果	15.95	14.36

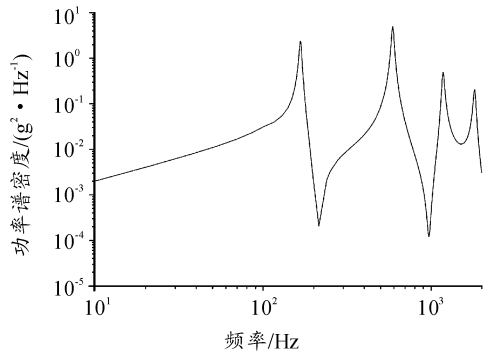


图4 整流罩中部响应的仿真曲线

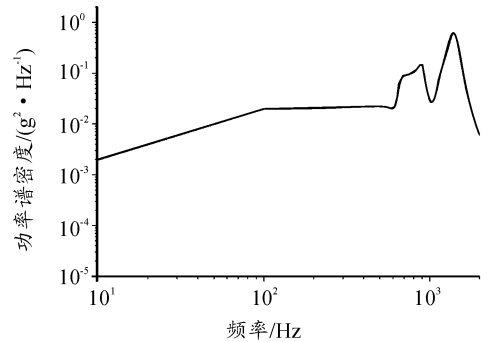


图5 分离舱后部响应的仿真曲线

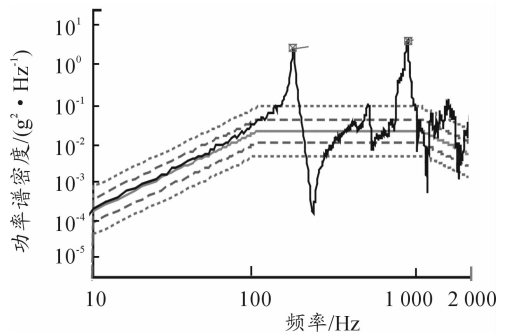


图6 整流罩中部响应的试验曲线

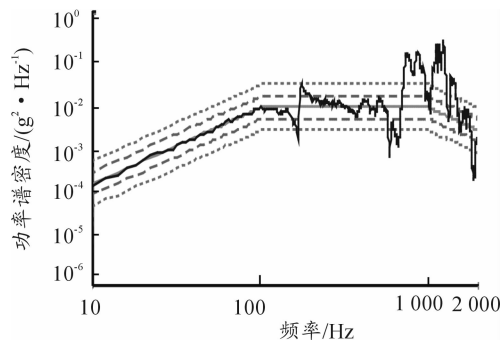


图7 分离舱后部响应的试验曲线

由图4、图6可知,整流罩中部在频率150~200 Hz、500~700 Hz均出现了较大响应。经对比模态分析结果可知,整流罩在167.02 Hz和591.2 Hz处分别出现了一阶、二阶弯曲模态,导致随机振动过程中,整流罩在这两个频率附近会出现较大的响应,模态振型见图8、图9所示。

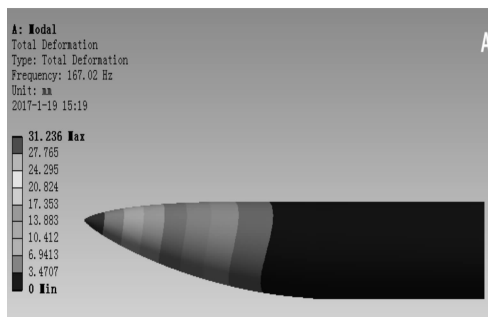


图8 整流罩一阶弯曲振型图

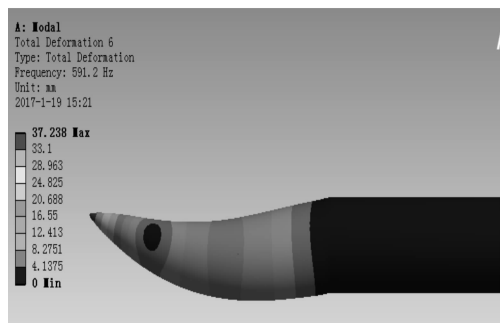


图9 整流罩二阶弯曲阵型图

由图5、图7可知,分离舱后部在频率500~1500 Hz出现了较大响应。经对比模态分析结果可知,分离舱在668.87 Hz、939.07 Hz、1376.7 Hz处均有局部模态,导致分离舱后部在这些频率附近会出现较大的响应,模态振型见图10~图12所示。

2.4 应力、变形分析

箭头随机振动试验时,受试验条件的限制,通常只对箭头的随机振动响应进行测量,而不进行应力、变形的测量。通过仿真分析的方法可以弥补试验的不足,得到试验过程中箭头的应力、变形分布情况。箭头在随机振动下的应力、变

形见图13、图14所示。由分析可知,箭头在工装夹持位置附近的应力较大,最大值为2.49 MPa,远小于分离舱、整流罩的材料强度极限,结构强度满足要求。整流罩前端的变形较大,最大值为0.19 mm,主要是由于整流罩前端离工装夹持位置较远,因此位移响应较大。

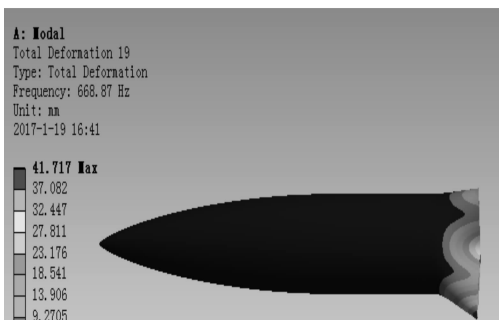


图10 分离舱在668.87 Hz振型图

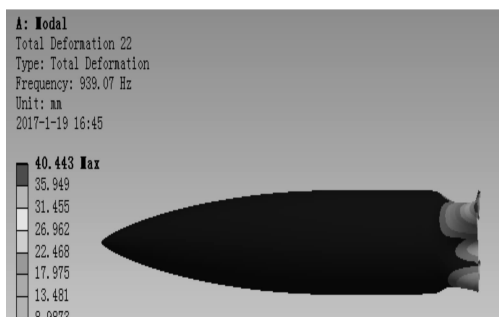


图11 分离舱在939.07 Hz振型图

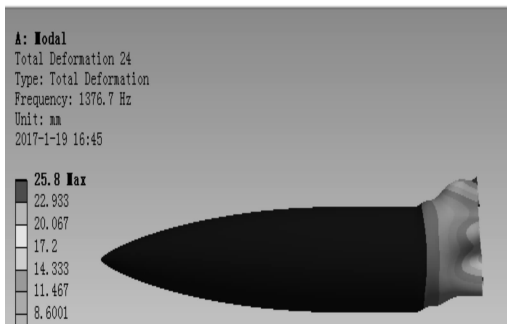


图12 分离舱在1376.7 Hz振型图

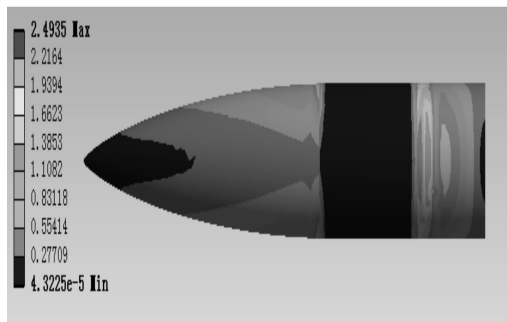


图13 箭头应力云图

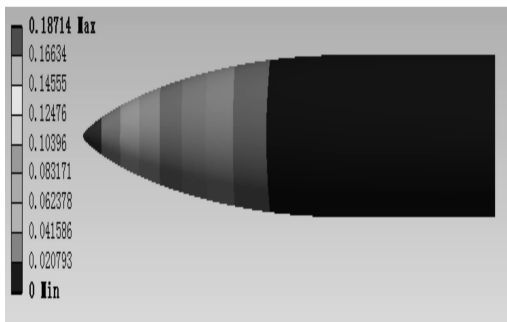


图 14 箭头变形云图

2.5 设备安装结构响应分析

在箭头分离舱的前端和中部,分别设计有探空仪安装盘和分离点火装置安装盘,为探空仪和分离点火装置提供安装接口和工作环境。设备安装结构的随机振动响应将作为随机振动输入传递到设备上。探空仪安装盘和点火装置安装盘随机振动响应的加速度均方根值见表 2,响应曲线见图 15。

由仿真结果可知道,探空仪安装盘和点火装置安装盘振动响应的加速度均方根值放大不明显,说明安装结构的刚度较好。其中探空仪安装盘的响应曲线与输入曲线基本一致,分离点火装置安装盘的响应曲线在频率 500 ~ 1 500 Hz 略有放大,是由于分离舱后部在这个频率范围有局部模态。在点火装置单项随机振动试验时,应结合仿真分析结果在频率 500 ~ 1 500 Hz 进行加严考核。

表 2 箭载设备安装盘加速度均方根值

名称	探空仪安装盘	分离点火装置安装盘
均方根值 g	5.73	8.28

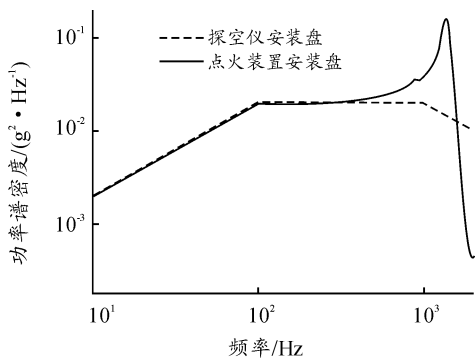


图 15 设备安装盘响应曲线

2.6 随机振动测点位置影响分析

随机振动试验中,振动传感器是测试人员手工粘贴在箭头外表面,粘贴位置偏差一般在 ±20 mm 范围内。通过增加随机振动仿真分析的输出测点,可进行传感器粘贴位置影响分析。在离整流罩中部测点前 20 mm、100 mm、200 mm 分别增加 3 个测点,所得的随机振动响应的加速度均方根值见表 3,响应曲线见图 16。

从表 3、图 16 可知,整流罩 4 个测点随机振动响应值的加速度均方根基本一致,随测点离工装夹持位置距离的增加,加速度均方根值略有增大。4 个测点的随机振动响应放大处的频率基本保持一致,其中离整流罩中部 20 mm 处的测点与整流罩中部测点的响应曲线基本吻合,其他两个测点的响应曲线在各放大处的幅值有较为明显的差别。由上述分析可知,在随机振动试验时,较小的位置偏差(20 mm 内)对测量点振动响应曲线影响较小,但较大的位置偏差会对测点的振动响应曲线产生明显影响。为保证振动试验测试结果的精度,应当对传感器粘贴位置精度进行明确规定,同时允许存在较小的位置偏差。

表 3 整流罩测点的加速度均方根值

离整流罩中部测点的距离	0	20 mm	100 mm	200 mm
均方根值 g	15.95	16.15	16.28	16.88

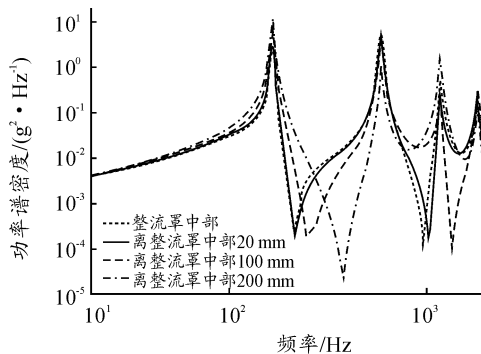


图 16 整流罩测点响应曲线

3 结论

- 1) 仿真结果与试验结果两者的加速度均方根值和随机振动响应曲线一致性较好。
- 2) 整流罩与分离舱在某些频率出现较大响应,是由于该频率附近存在箭头模态。
- 3) 仿真分析得到的箭头应力、变形分布数据以及设备安装结构的随机振动响应数据,可为箭体结构动强度设计、设备单项试验等提供依据。
- 4) 在随机振动试验时,应对测点的位置精度进行明确规定,允许存在较小的位置偏差。

参考文献:

[1] 宋忠保,李大耀. 探空火箭设计[M]. 北京:宇航出版社,1993.
 [2] 陈幼明. 战术导弹振动控制[J]. 飞航导弹,1985(3):30-42.

经过实际验证表明:该技术结构可靠,校准精度高,平均精度达到9环;操作简便,校准效率高,一般单支校准时间不大于1 min;节省弹药,将原来每支枪校射平均需要10发弹降低到批量校射、抽样检查的平均用弹不到1发;安全性高,由于基本不使用实弹,大大降低了校枪活动的危险性。

5 结论

激光校枪器主要应用于两个方面:一是进行轻武器校准,既可以校准机械瞄准具也可以校准光学瞄准镜;二是模拟射击训练,检查弹着点位置。通过针对不同口径武器进行设计调整,可实现对绝大多数轻武器的无弹校准和模拟射击,具有广阔的推广应用前景。现已在部队、公安特警等多个单位推广应用,取得较好效果。

参考文献:

[1] 陈一中,周群乐,田国辉.武器出厂前校枪方法探索[J].四川兵工学报,2003,24(3):18-20.
[2] 王秀宇,赵晓东.92式9mm手枪可靠性实证[J].轻兵器,2003(5):39.

[3] 韩江节译.激光校枪镜[J].轻武器论证研究,2001(1):29-30.
[4] 毛翔,杨晓波.新颖亮相:一体式激光指示器[J].轻兵器,2009(2):12-15.
[5] 周宁生,毛文清.激光校枪打靶仪的设计与应用[J].射击学报,2004(2):87-88.
[6] 吴仕绪.多功能无弹校枪仪的创新价值[J].军事运筹与系统工程,2010(3):40.
[7] 安宝林,杨耿,薛晋生.基于CCD成像技术的枪械设计准确度验收系统[J].兵工学报,2010,31(2):239-241.
[8] 王丽丽.轻武器电子校瞄系统研究[D].太原:中北大学,2016.
[9] 曹明晶.轻武器射击教材[M].济南:黄河出版社,2000.
[10] 朵英贤.95式5.8mm班用枪族的研制[J].中国工程科学,1999,1(2):57-61.
[11] 陈超博.新14.5枪管膛线损坏原因分析[J].四川兵工学报,1999,20(4):9-10.
[12] 饶昌政.DBP10式5.8mm普通弹[J].轻兵器,2011(12):21-23.

(责任编辑 周江川)

(上接第77页)

[3] 厉行军,赵建华,张春辉.带限位的隔离系统抗冲击性能分段建模法研究[J].兵器装备工程学报,2016,37(8):30-32.
[4] 赵于鉴,马栋,多点控制在导弹随机振动试验中的应用[J].国外电子测量技术,2005,24(10):37-40.
[5] 方宝东.卫星收拢太阳翼频率响应分析[J].机械设计与研究,21(3),2005:95-97.
[6] 袁名松,冯建伟,黄云,等.巡飞攻击导弹红外成像导引头随机振动响应分析[J].红外技术,37(4),2015:342-246.
[7] 李璐.基于虚拟激励法的火箭仪器舱随机振动研究[D].大连:大连理工大学,2011.

[8] 张阳阳,楼京俊.船舶推进轴系纵向振动特性及控制技术[J].兵器装备工程学报,2016,37(1):23-26.
[9] 张玉梅,韩增尧,邹元杰,随机振动环境下航天器结构强度设计方法综述[J].力学进展,2012,42(4):464-471.
[10] 许进峰.ANSYS Workbench 15.0完全自学一本通[M].北京:电子工业出版社,2014.
[11] 郑志国,王宇峰.随机振动中的参数介绍及计算方法[J].电子产品可靠性与环境试验,2009,27(6):45-48.
[12] 王亮,马大伟,姚琳.超声速导弹随机振动响应分析[J].战术导弹技术,2015(6):42-47

(责任编辑 周江川)