

doi: 10.7690/bgzd.2013.11.007

狙击步枪枪管动态特性分析

齐心, 申文杰, 贺亮

(中国兵器工业第二零八研究所枪械研究室, 北京 102202)

摘要: 针对精确狙击步枪射击时枪管的振动影响射击精度的问题, 对不同外形结构下的精确狙击步枪枪管进行动态特性分析。以狙击步枪枪管模态分析为基础, 通过在有限元软件 ANSYS 中对不同外形结构的狙击步枪枪管进行瞬态响应分析, 并研究枪管在火药气体作用力下的动态特性, 得到了枪口中心点的位移及速度响应。分析结果证明: 在长度及重量基本相同时, 锥形结构枪管的刚度较大, 其枪口的位移响应及速度响应较小。该结果对狙击步枪枪管的结构设计有一定的参考价值。

关键词: 狙击步枪; 枪管; 模态分析; 瞬态分析

中图分类号: TJ203⁺.1 **文献标志码:** A

Analysis of Dynamic Characteristic of Sniping Rifle Barrel

Qi Xin, Shen Wenjie, He Liang

(Gun Laboratory, No. 208 Research Institute of China Ordnance Industries, Beijing 102202, China)

Abstract: For a sniping rifle, the vibration of the barrel had important influence on its firing accuracy. The dynamic characteristic of different sniping rifle's barrels was researched. Based on the modal analysis, the transient analysis of different morphological structure on finite element software ANSYS, and dynamic characteristic of barrel under powder gas force was researched. The displacement response and velocity response of the centrality of gunpoint was obtained. The result proved that the inflexibility of cone barrels was bigger than cylinder barrels. For cone barrels, the displacement response and velocity response of the centrality of gunpoint was smaller. These results provide the theoretical basis for the design of the barrel of the sniping rifle.

Key words: sniping rifle; barrel; modal analysis; transient analysis

0 引言

狙击步枪是指在普通步枪中挑选或专门设计制造, 射击精度高、距离远、可靠性好的专用步枪。一般把口径小于 10 mm, 主要用来精确杀伤有生目标的狙击步枪称为精确狙击步枪^[1]。精确狙击步枪具有很高的射击精度, 能准确命中目标指定部位和暴露的小面积部位, 作战成功率高。狙击步枪枪管的振动对射击精度的影响很大, 在枪弹击发时, 由于枪管赋予弹头一定的飞行方向和速度, 因此枪管振动对射击精度会产生较大的影响。枪管的振动形式很复杂, 一般有横向、纵向和扭转等^[2]。试验证明, 枪管的横向振动对射击精度的影响最大。基于此, 笔者对不同外形结构下的精确狙击步枪枪管进行动态特性分析, 为狙击步枪枪管的设计提供一定的理论依据。

1 狙击步枪枪管模态分析

1.1 模态分析理论^[3-4]

结构的模态分析是结构动力分析的基础, 通过对结构进行模态分析得到模态参数, 从而得到各阶频率下结构的相对变形, 对于改善结构的动态特性

及枪管的结构设计有一定的指导意义, 同时为瞬态响应分析提供理论基础。

模态分析的实质是一种坐标变换^[5], 就是利用系统固有模态的正交性, 对选取的物理坐标进行线性变换, 使得振动系统以物理坐标和物理参数所描述的相互耦合的运动方程组, 能够变成一组彼此独立的方程。

对具有 n 个自由度的线性无阻尼振动系统, 其运动微分方程为:

$$[M]\{\ddot{x}\} + [C]\{\dot{x}\} + [K]\{x\} = \{f(t)\} \quad (1)$$

式中: $f(t)$ 为系统各点上的动态力; $\{\ddot{x}\}$ 、 $\{\dot{x}\}$ 、 $\{x\}$ 分别为系统各点的加速度响应、速度响应和位移响应; $[M]$ 、 $[C]$ 、 $[K]$ 分别为系统的质量矩阵、阻尼矩阵和刚度矩阵。

公式 (1) 是一个相互耦合的常微分方程, 而模态分析就是利用系统模态振型的加权正交性进行坐标变换, 使得系统在新的坐标中运动方程组变成一组互不耦合的彼此独立的方程。

1.2 模态分析过程

取国内外常见的 3 种狙击步枪枪管结构, 编号

收稿日期: 2013-05-07; 修回日期: 2013-06-25

作者简介: 齐心 (1988—), 男, 山东人, 在读硕士, 从事自动武器结构设计及仿真研究。

a, b, c。为了在同等条件下进行对比分析,在取外形尺寸时,各枪管长度相同,且重量相差在 5%以内^[6-7]。其中, a 和 b 为锥形枪管,其中枪管 a 只有一个锥度,枪管 b 为 2 个锥度。枪管 c 为普通圆柱形枪管。

1) 几何模型的建立。

根据各枪管尺寸在 ANSYS 中直接建立各枪管的实体模型。

2) 定义材料属性。

狙击步枪枪管材料多采用合金钢,其材料参数为:弹性模量, $E=210\,000\text{ N/mm}^2$;泊松比, $\lambda=0.28$;密度, $\rho=7\,830\text{ kg/m}^3$ 。

3) 划分网格。

基于所建立的几何模型,笔者采用 8 节点六面体单元对结构进行有限元网格划分,生成网格并进行模型检查,消除重复节点。

4) 边界约束设定。

枪管尾部约束 6 个自由度,其余部位自由。

5) 提交分析。

选择分块兰索士法(Block Lanczos)提交进行求解,该方法的特点是计算速度较快,输入的参数少,特征值和特征向量的求解精度高。

1.3 结果及分析

表 1 给出了 3 种枪管前六阶固有频率。

表 1 各枪管前六阶固有频率 Hz

阶数	固有频率		
	枪管 a	枪管 b	枪管 c
1	53	47	41
2	281	276	261
3	835	792	725
4	1 619	1 534	1 406
5	2 630	2 508	2 292
6	3 758	3 530	3 369

在枪管的横向振动中有基阶振动、第一高阶振动和高阶振动。频率过高的振动发生在枪弹被击发的时刻,当弹丸在枪管内高速运动时高阶振动已消失,且高阶振动能量很小,对枪管的振动贡献也小。基阶振动的频率低,一般在 100 Hz 以下,对单发的狙击步枪枪管而言,振动传导到枪口时弹丸已飞出枪口,因此对单发的狙击步枪而言无太大意义。故单发射击时,对枪管振动影响较大的是第一高阶振动。理论上,枪管振动的第一高阶振动频率是基阶振动的 5~7 倍。从表 1 可以看出,在长度相同、重量相当条件下,枪管的外形结构对其固有频率有较大影响。圆柱形枪管(枪管 c)的固有频率较小,

微锥形枪管(枪管 a, b)的固有频率较大。锥型枪管由于在轴向上存在均匀的壁厚差,结构较为紧凑,其结构刚度较大,振动较小。

2 狙击步枪枪管瞬态响应分析

2.1 瞬态响应分析概述

对结构进行瞬态响应分析的目的就是计算时变载荷激励下结构的动力行为。随时间变化的载荷激励是在时间域中明确定义的,所以每一时刻作用在结构上的外载荷都是已知的。载荷的形式可以是外力或强迫运动。通过瞬态动力学分析,可以确定结构在稳态载荷、瞬态载荷和简谐载荷的随意组合作用下随时间变化的位移、应变、应力等^[8]。

2.2 建立分析模型

将各枪管在三维造型软件 UG 中分别与枪身进行装配,通过中间格式 Parasolid 将其导入 ANSYS-Workbench 中,各前处理步骤与模态分析相似。把模态分析的结果作为瞬态动力学分析的前提条件加载到前处理中,对枪管进行柔性设置,其余部件进行刚性化设置,同时定义各部件间的接触类型为绑定接触(bonded contact)。

边界条件:由于枪管轴向方向的位移对射击精度并不产生影响,因此对枪尾约束其 6 个自由度。脚架支撑于地面上,并与之产生一定摩擦,故脚架与地面之间添加接触类型为摩擦接触(frictional contact)。查询机械设计手册,摩擦系数设定为 0.6。

载荷施加:狙击步枪属于精确射击武器,为了能尽可能全面准确地模拟火药气体对枪管的作用,笔者从 2 个方面考虑火药气体的作用力:一是火药气体对膛底的冲击力;二是火药气体在径向对枪管的膨胀力作用。对于膛底的冲击力,依据膛压-时间曲线,采用列表输入法进行施加。对径向膨胀力,其大小随时间而变化,同时其作用区域也随时间而变化,即所施加的压力载荷是一个随时间变化的、移动边界的分布压力载荷,其作用的范围由弹丸所走过的行程确定,故需作近似处理。沿身管轴线方向,将整个身管内壁离散成较小的作用区。根据膛压-时间曲线和弹丸到达某一作用区域所对应的时刻,确定相应的载荷。最后,在各个不同的离散区域作用相应的载荷,按离散值循环加载并求解。

2.3 模型求解及结果分析

在 Workbench 求解器中进行计算,分析类型为瞬态响应分析。设定时间步长为 10^5 s ,步数为 150

步。得到各枪口中心点高低和左右方向的位移 s 、速度 v 随时间的变化曲线，如图 1~图 12 所示。

可以看出，枪管 a 和枪管 b 的枪口中心点位移响应和速度响应的最大值及弹丸出枪口时刻

($t=1.41\text{ ms}$) 的响应值均比枪管 c 偏小。这是由于锥形枪管由于其沿轴向有壁厚差，刚度较大，振动能量较小，这和模态分析中其固有频率较大的结果是一致的。

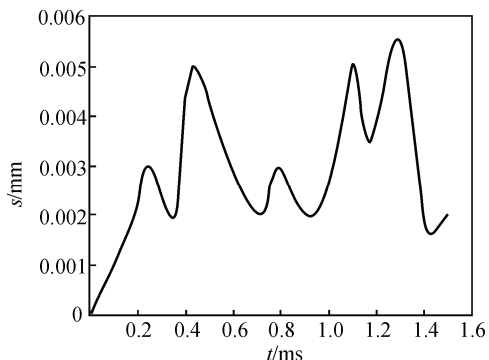


图 1 枪管 a 在高低方向的位移响应曲线

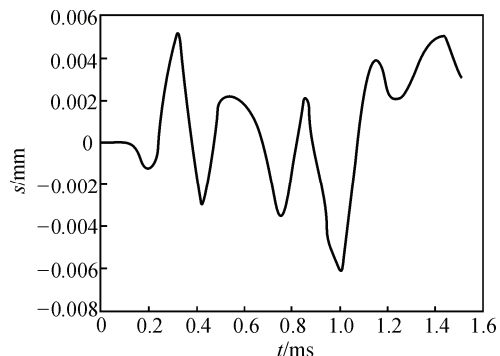


图 2 枪管 a 在左右方向的位移响应曲线

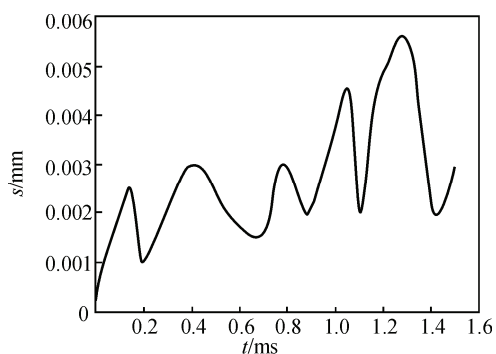


图 3 枪管 b 在高低方向的位移响应曲线

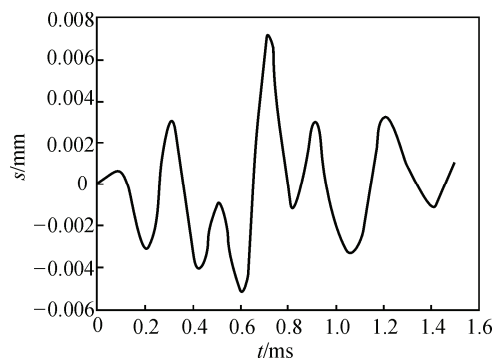


图 4 枪管 b 在左右方向的位移响应曲线

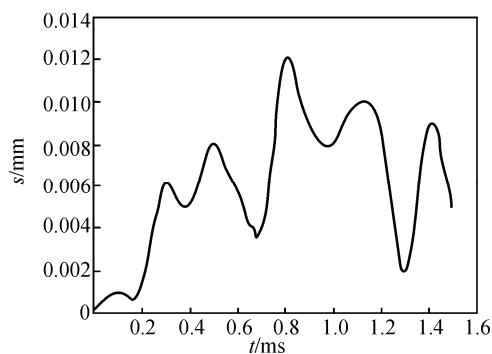


图 5 枪管 c 在高低方向的位移响应曲线

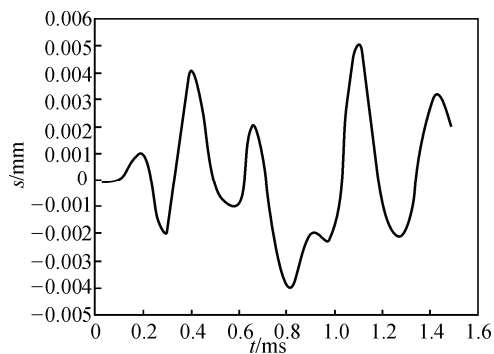


图 6 枪管 c 在左右方向的位移响应曲线

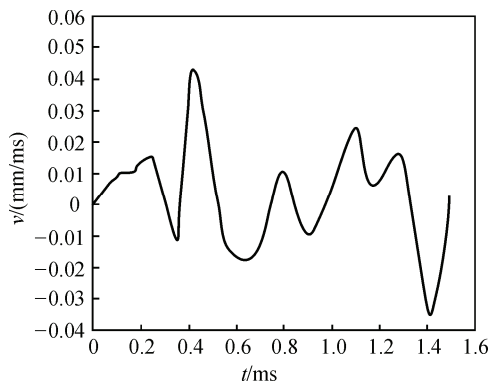


图 7 枪管 a 在高低方向的速度响应曲线

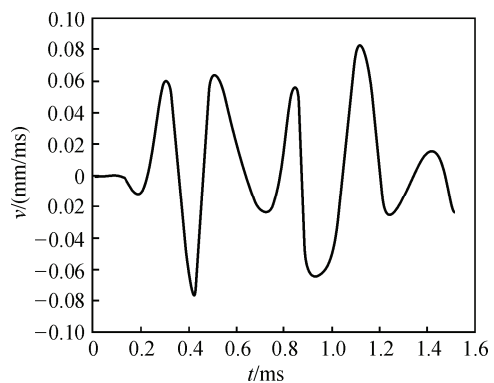


图 8 枪管 a 在左右方向的速度响应曲线

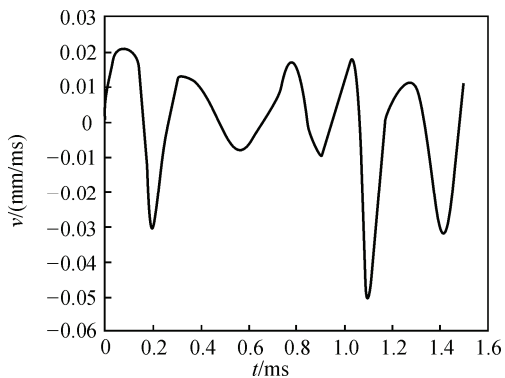


图 9 枪管 b 在高低方向的速度响应曲线

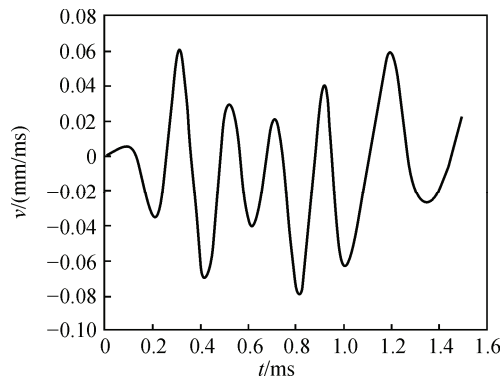


图 10 枪管 b 在左右方向的速度响应曲线

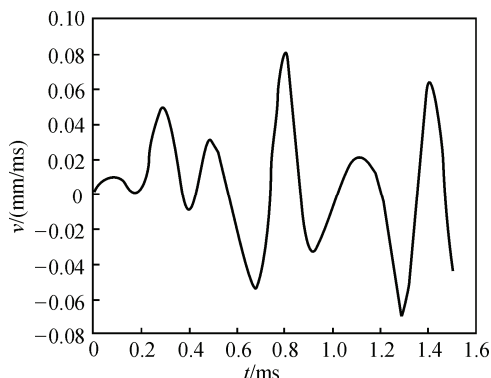


图 11 枪管 c 在高低方向的速度响应曲线

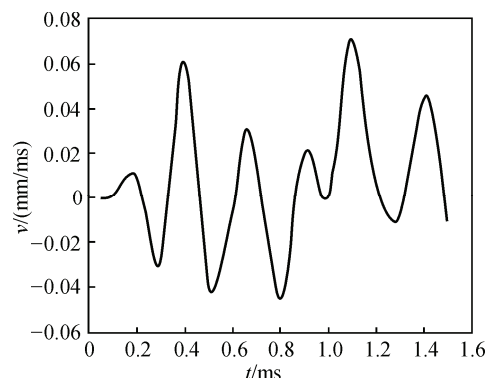


图 12 枪管 c 在左右方向的速度响应曲线

计算位移响应和速度响应在 100 m 距离上的偏移量可知，速度响应所引起的弹着点偏移量比位移响应所引起的弹着点偏移量要大得多。对狙击步枪枪管，影响弹丸偏移量的主要因素为枪口的速度响应。枪口速度响应减小，可有效减小弹丸出枪口后飞行过程中的偏移量，这对提高狙击步枪的射击精度及射击稳定性是十分有利的。

3 结束语

研究表明：在长度及重量基本相同时，锥形结构枪管的刚度较大，其枪口的位移响应及速度响应较小。同时，对狙击步枪枪管，枪口中心点的速度响应是影响弹丸出枪口后偏移的主要因素。该研究可为狙击步枪枪管的外形结构设计提供可靠的理论依据，同时对狙击步枪射击精度影响因素的研究有一定的参考价值。

(上接第 11 页)

[4] Fair H D. Electromagnetic launch science and technology in the United States enters a new era[J]. IEEE Trans. on Magn., 2005, 41(1): 158-164.
 [5] Tsukerman I A., Konrad A I., Meunier G. et al. Sabonnadikre. coupled field-circuit problems: trends and

参考文献:

[1] 刘学昌. 美国轻武器[M]. 北京: 国防工业出版社, 1989.
 [2] 王宝元, 李魁武. 自动武器机构动力学[M]. 北京: 国防工业出版社, 2003.
 [3] 许本文, 焦群英. 机械振动与模态分析基础[M]. 北京: 机械工业出版社, 1998.
 [4] 徐亚栋. 复合材料身管动态响应分析[D]. 南京: 南京理工大学, 2003.
 [5] 张亚军, 齐杏林, 董成基. 基于机器视觉的枪弹钢芯自动检测系统[J]. 兵工自动化, 2012, 31(7): 8-11.
 [6] 吴尚礼, 吴倍增. 美国的制式步枪[M]. 北京: 兵器工业出版社, 1993.
 [7] 欧学炳, 殷仁龙, 王学颜. 自动武器结构设计[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 1995.
 [8] 商跃进. 有限元原理与 ANSYS 应用指南[M]. 北京: 清华大学出版社, 2006.
 accomplishments[J]. IEEE Trans. on Magn., 1993, 29(2): 1701-1704.
 [6] Shokair I R., Cowan M., Kaye R J., et al. Performance of an induction coil launcher[R]. Albuquerque, New Mexico: Sandia National Laboratories, 1995
 [7] 刘全胜, 王帅帅, 高玉水, 等. 步兵战车炮塔振动仿真[J]. 兵工自动化, 2012, 31(12): 93-96.