doi: 10.7690/bgzdh.2020.05.012

# 炮箍个数对身管组模态频率及振型的影响分析

黄晨烨[1]，戴劲松[1]，尹　强[2]，王茂森[1]
（1. 南京理工大学机械工程学院，南京 210094；2. 重庆长安工业(集团)有限责任公司特种装备研究所，重庆 401120）

**摘要：**为研究炮口处炮箍个数对火炮射击精度的影响，对某新型火炮的身管组进行模态分析。利用有限元仿真对某新型火炮身管组进行分析，分别考虑单炮箍及双炮箍对身管组模态频率的影响，得到身管组在 2 种情况下不同阶数的模态频率及振型图。有限元计算结果表明：在相同阶数下，两者的振型图相似，但双炮箍比单炮箍的身管组模态频率低，离自动机的实际射频范围远，双炮箍的模态频率具有更大的裕度。实弹射击对比实验结果显示，双炮箍的密集度更好。

**关键词：**身管；炮箍；模态频率；有限元；振型
**中图分类号：**TJ303　　**文献标志码：**A

# Influence Analysis of Gun Hoop Number on Modal Frequency and Vibration Modes of Gun Barrel Group

Huang Chenye[1], Dai Jinsong[1], Yin Qiang[2], Wang Maosen[1]
(1. *School of Mechanical Engineering*, *Nanjing University of Science & Technology*, *Nanjing* 210094, *China*;
2. *Institute of Special Equipment*, *Chongqing Chang'an Industry* (*Group*) *Co*., *Ltd*., *Chongqing* 401120, *China*)

**Abstract:** In order to study the influence of the number of gun hoops on the firing accuracy of the artillery, the modal analysis of the gun barrel group of a new type of artillery was carried out. The finite element analysis was used to analyze the gun barrel group of a new type of gun. The effects of single gun hoop and double gun hoop on the modal frequency of the gun barrel group were considered, and the modal frequency and vibration modes of the gun barrel group under different orders were obtained. The finite element calculation results show that the vibration modes of the two are similar under the same order, but the double gun hoop has lower modal frequency than the single gun hoop, which is far from the actual firing frequency range of the automaton. The modal frequency has a greater margin. The results of the live-shot comparison test show that the dispersion of the double hoop is better.

**Keywords:** gun barrel; gun hoop; modal frequency; finite element analysis; vibration mode

## 0　引言

随着现代火炮向着高初速、高射频、高射击精度和高机动性方向发展，研究人员对于火炮射击时的稳定性和安全性提出了更高的要求[1]。以往提高火炮发射稳定性优先考虑火炮的静态特性，通常采用加厚身管壁厚、加重火炮底座以及提高缓冲器的阻尼系数来加强静力学下的刚强度，但过厚的身管壁以及过重的火炮底座会造成材料浪费、制造成本变高以及制造难度加大，不利于火炮的轻量化设计。

火炮设计在考虑静态特性的基础上，也要考虑其整体动态特性[2]。近年来，伴随着振动理论的不断成熟，以及对于火炮更高性能的迫切需要，研究人员逐渐把重点放在火炮系统的模态分析上。火炮射击时的稳定性和射击精度与其整体的固有振动特性紧密联系。许多学者对机械系统的模态分析进行了研究，并取得卓有成效的成果。谢欢等[3]基于对炮塔和火炮的模态分析，研究炮塔和火炮与振动激励源的匹配问题；岳炯等[4]针对舰炮发射时的炮口振动问题，利用响应面法得到最佳的频率匹配策略来减小炮口振动；杨凡[5]研究了舰炮的固有振动特性和发射过程中的动态响应，探讨了导轨间隙及身管支撑位置对于炮口扰动的影响。

但上述研究均未考虑到身管结构参数的改变对于模态频率的影响，以及对火炮发射稳定性造成的影响。笔者基于对某新型火炮的身管组进行模态分析，改变身管组上的炮箍个数，通过有限元仿真，计算在单炮箍和双炮箍情况下火炮的固有频率及振型，并进行实弹射击对比实验。实验结果表明：双炮箍的结构设计能有效增强火炮发射稳定性，提高射击精度。

**收稿日期：**2020-01-02；**修回日期：**2020-02-23
**作者简介：**黄晨烨(1994—)，男，江苏人，硕士，从事制造装备智能化技术研究。E-mail: hcy9390@163.com。

## 1　身管组的有限元模型

### 1.1　基本假设

1) 身管组上各零件均为同种材料；

2) 材料各向同性且质地均匀；

3) 不考虑温度对材料性能的影响；

4) 由于火炮在不同工况下的固有频率与振型不同，笔者只考虑火炮在水平工况下的固有频率与振型。

### 1.2　材料属性

由文献[6]可知：影响系统固有频率和振型的最主要因素为材料的密度、泊松比和弹性模量。其材料数据如表 1 所示。

表 1　身管组材料性能属性

| 材料 | 弹性模量 $E$/GPa | 泊松比 $\mu$ | 密度 $\rho$/(kg•m$^{-3}$) |
|---|---|---|---|
| 钢 | 206 | 0.3 | 7 800 |

### 1.3　模型建立

为研究身管组上炮箍个数与身管组模态之间的关系，建立身管组 3 维模型。该身管组由身管、炮箍、三支点、被筒及炮尾体组成，保证身管组质量分布及质心位置相对不变，简化前炮尾体的质量为 24.7 kg，质心以炮尾体后端面计为沿中心 141 mm 处；简化后的质量为 25 kg，质心为沿中心 142 mm 处。误差均小于 2%，对于模态分析的影响可以忽略。对身管组上一些局部细小特征进行简化处理，简化后的身管组模型如图 1 所示。

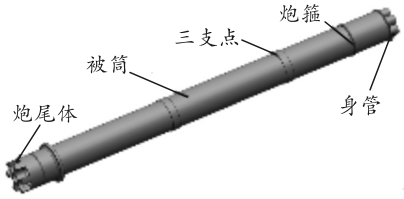



图 1　简化后的身管组装配

### 1.4　网格划分及边界条件设置

为了使模态分析计算结果更加精确，这里使用六面体网格为主的划分方式，设置网格单元边长大小为 20 mm，网格划分效果如图 2 所示，其中共有 137 156 个结点以及 40 853 个网格。

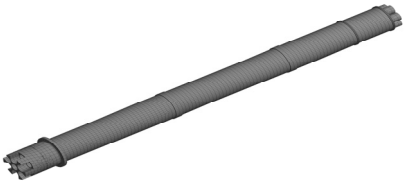


图 2　身管组网格划分

身管组的振动主要是炮口后坐力产生的切向反作用力和弹丸与身管的碰撞等原因，根据身管组部件装配关系以及考虑到实际工作时，身管组围绕其中心轴线旋转；因此，将炮尾体部分和三支点添加圆柱副约束处理如图 3 所示。

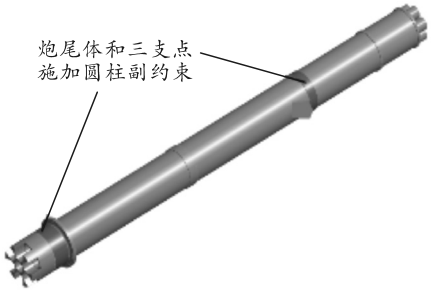



图 3　炮尾体和三支点的圆柱副约束

### 1.5　振动方程

身管组是一个 $n$ 自由度的系统，其运动微分方程可表示为：

$$\boldsymbol{M}\ddot{\boldsymbol{q}}+\boldsymbol{C}\dot{\boldsymbol{q}}+\boldsymbol{K}\boldsymbol{q}=\boldsymbol{Q}\text{。}\tag{1}$$

其中：$\boldsymbol{M}$,$\boldsymbol{C}$ 和 $\boldsymbol{K}$ 分别是身管组的质量矩阵、阻尼矩阵和刚度矩阵；$\boldsymbol{q},\dot{\boldsymbol{q}},\ddot{\boldsymbol{q}}$ 和 $\boldsymbol{Q}$ 分别为身管组的位移向量、速度向量、加速度向量和外激励向量。式(1)是一组耦合方程。当系统的自由度很大时，求解该耦合方程组极其困难；因此，对该方程进行变换，使其变为非耦合的独立方程组，这就是模态分析需要解决的问题。

对式(1)进行拉氏变化，得到：

$$\left(s^2M+sC+K\right)\left\{q(s)\right\}=Q(s)\text{。}\tag{2}$$

令 $s=j\omega$，则式(2)变为

$$\left(-\omega^2M+j\omega C+K\right)\left\{q(\omega)\right\}=Q(\omega)\text{。}\tag{3}$$

引入模态坐标，令 $q=[\phi]p$，其中 $[\phi]$ 为振型矩阵，$p$ 为模态坐标，则式(3)变为

$$\left(-\omega^2M+j\omega C+K\right)[\phi]\{p\}=Q(\omega)\text{。}\tag{4}$$

根据振型的矩阵对于质量、刚度矩阵的正交性关系：

$$[\phi]^{\mathrm{T}}[M][\phi]=\begin{pmatrix}\ddots & & \\ & m_i & \\ & & \ddots\end{pmatrix},$$

$$[\phi]^{\mathrm{T}}[K][\phi]=\begin{pmatrix}\ddots & & \\ & K_i & \\ & & \ddots\end{pmatrix}\text{。}\tag{5}$$

若阻尼矩阵也近似被对角化，即有

$$[\phi]^{\mathrm{T}}[C][\phi]=\begin{pmatrix}\ddots & & \\ & C_i & \\ & & \ddots\end{pmatrix}。\tag{6}$$

对式(4)等号两边同时左乘$[\phi]^{\mathrm{T}}$，得到：

$$\left(-\omega^2 M+j\omega C+K\right)\{p\}=[\phi]^{\mathrm{T}}Q(\omega)。\tag{7}$$

经过上述正交变换过程，将原耦合方程组解耦，得到身管组模型在模态分析下各自独立的 $n$ 自由度系统的方程组，解耦后的第 $i$ 个方程可表示为：

$$\left(-\omega^2 M_i+j\omega C_i+K_i\right)\{p_i\}=\sum_{j=1}^{n}\phi_{ji}Q_i\left(i=1,2,\cdots,n\right)。\tag{8}$$

式中：$M_i,C_i,K_i$ 分别为第 $i$ 个自由度的模态质量、模态阻尼及模态刚度；$\phi_i$ 为模态振型。由上述推导过程可知：采用模态坐标后，$n$ 个自由度的系统响应等价于 $n$ 个模态坐标下单自由度系统的响应之和。采用归一化方法，使得模态质量归一，记模态质量归一化振型为$\phi$，可得

$$[\phi]^{\mathrm{T}}[M][\phi]=[I],\ [\phi]^{\mathrm{T}}[K][\phi]=\left[\omega_i^2\right]。\tag{9}$$

式中：$[I]$为单位矩阵；$\omega_i=\sqrt{K_i/M_i}$ 为模态固有频率。

## 2　身管组模态分析

模态是机械结构的固有振动特性，每一阶模态都对应特定的固有频率、模态振型[7]。在模态分析中，低阶模态频率对结构的影响较大，根据实际需要，笔者只分析前 6 阶的频率。

由于炮口距离炮尾体和摇架较远，缺乏固定约束，更容易发生大幅度振动；因此，在火炮发射过程中，尤其需要注意炮口处的结构参数变化对身管组模态频率的影响[8]，避免在火炮射击过程中带来的共振。在炮口只有一个炮箍的情况下，在距离炮口一定距离处，再增加一个炮箍，比较两者之间的模态频率及振型的差别。

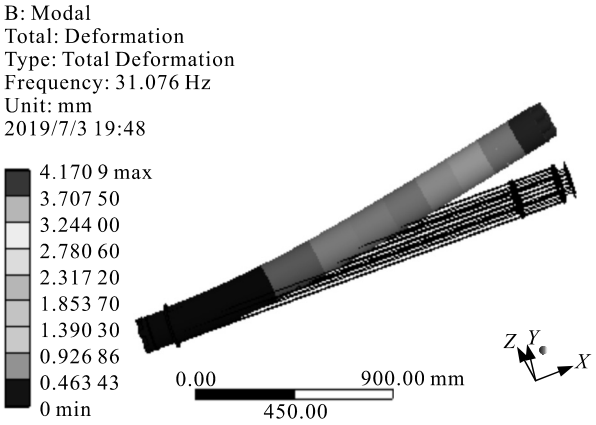
### 2.1　单炮箍时的模态分析

单炮箍距离炮口位置为 260 mm，模态频率及振型类型如表 2 所示。

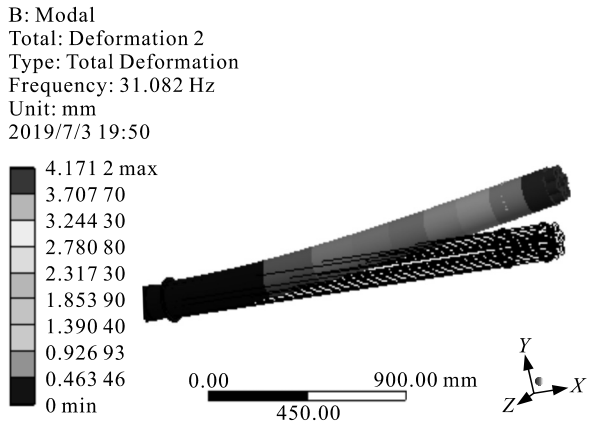
**表 2　单炮箍时，身管组模态频率及振型类型分析**

| 阶数 | 频率/Hz | 振型类型分析 |
|---|---|---|
| 1 | 31.07 | 身管组 1 阶水平弯曲 |
| 2 | 31.08 | 身管组 1 阶垂直弯曲 |
| 3 | 188.42 | 身管组 2 阶水平弯曲 |
| 4 | 188.44 | 身管组 2 阶垂直弯曲 |
| 5 | 340.11 | 身管组 1 阶扭转，炮口膨胀 |
| 6 | 501.63 | 身管组 3 阶水平弯曲 |

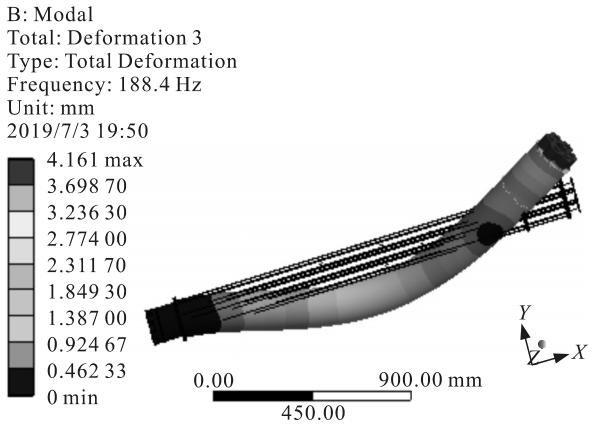
单炮箍时，其 1～6 阶模态振型如图 4 所示。



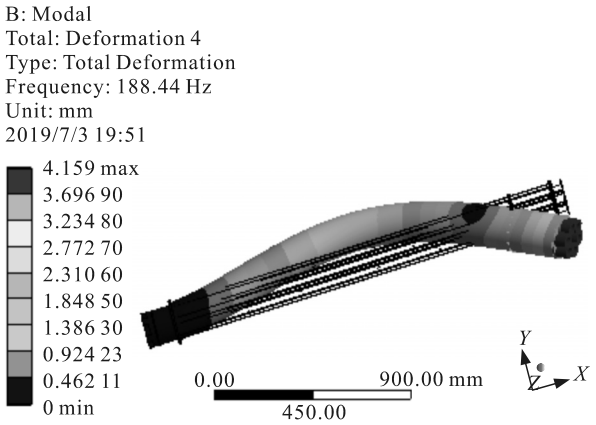

(a) 1 阶振型



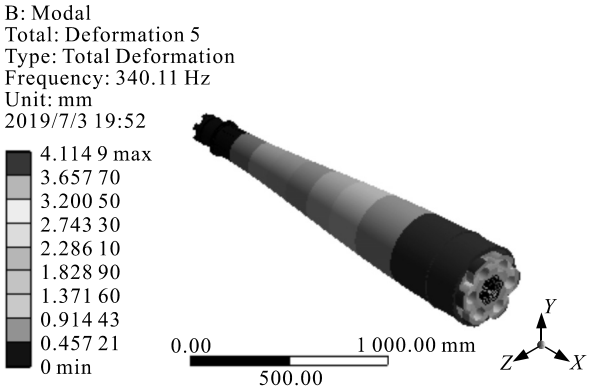

(b) 2 阶振型



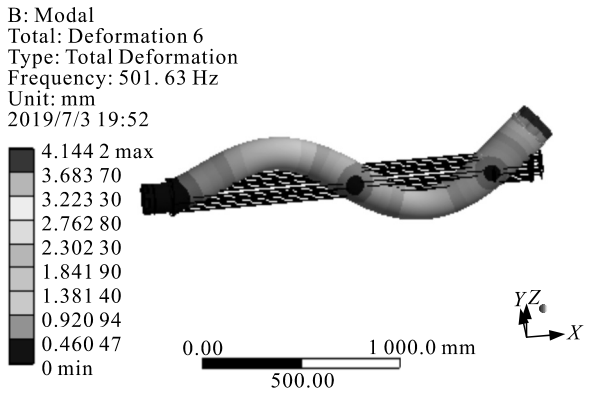

(c) 3 阶振型




(d) 4 阶振型




(e) 5 阶振型




(f) 6 阶振型

图 4　单炮箍时，身管组不同阶数振型

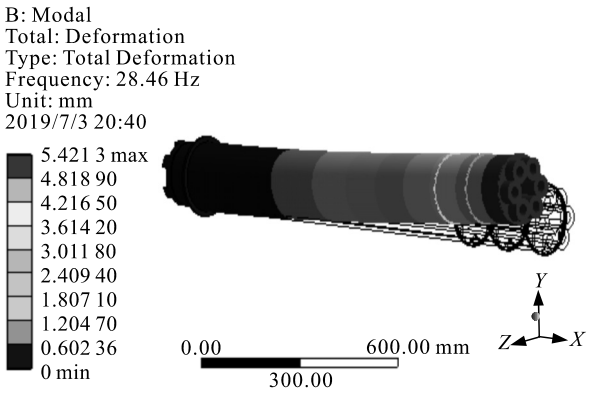
## 2.2　双炮箍时的模态分析

增加 1 个炮箍，其中第 1 个炮箍距离炮口 260 mm，第 2 个炮箍距离炮口 460 mm，其模态频率及振型类型如表 3 所示。

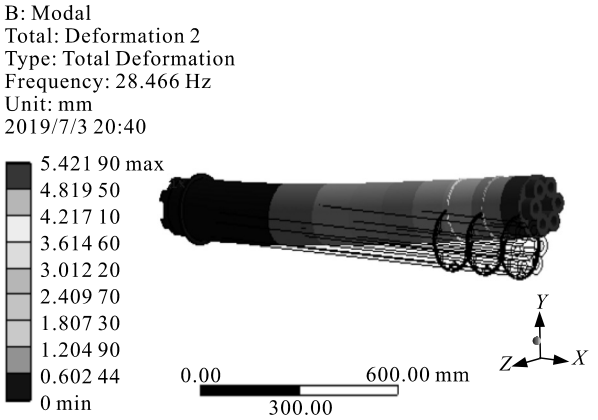
表 3　双炮箍时，身管组模态频率及振型类型分析

| 阶数 | 频率/Hz | 振型类型分析 |
|---|---|---|
| 1 | 28.46 | 身管组 1 阶水平弯曲 |
| 2 | 28.47 | 身管组 1 阶垂直弯曲 |
| 3 | 171.97 | 身管组 2 阶水平弯曲 |
| 4 | 172.01 | 身管组 2 阶垂直弯曲 |
| 5 | 307.88 | 身管组 1 阶扭转，炮口膨胀 |
| 6 | 456.34 | 身管组 3 阶水平弯曲 |

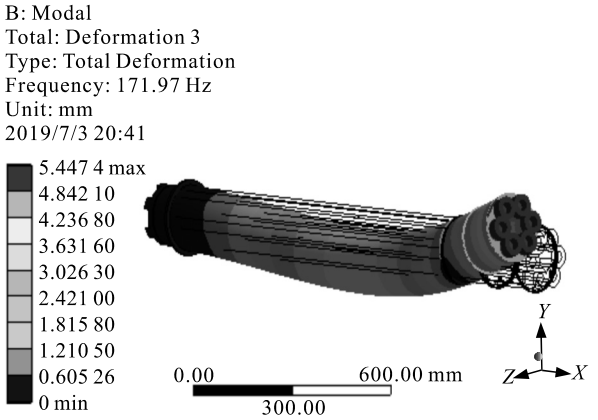
双炮箍时，1～6 阶模态振型如图 5 所示。



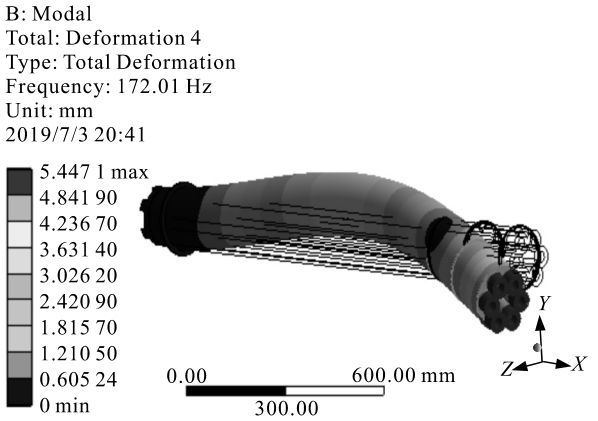

(a) 1 阶振型



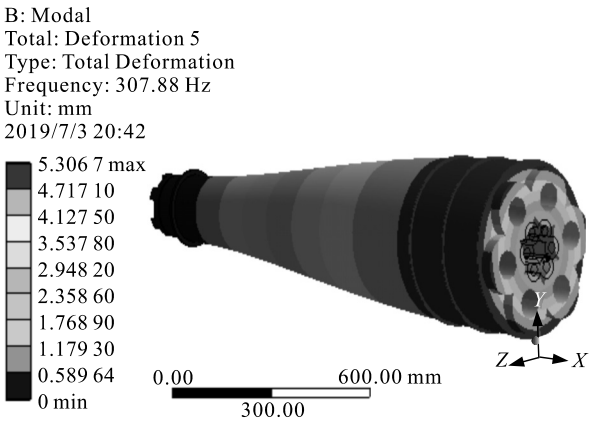

(b) 2 阶振型



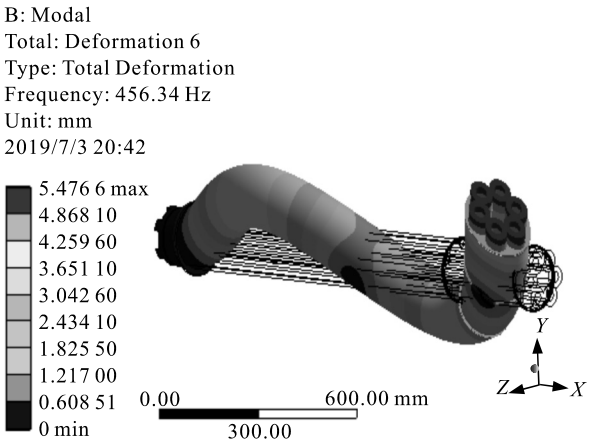

(c) 3 阶振型




(d) 4 阶振型




(e) 5 阶振型




(f) 6 阶振型

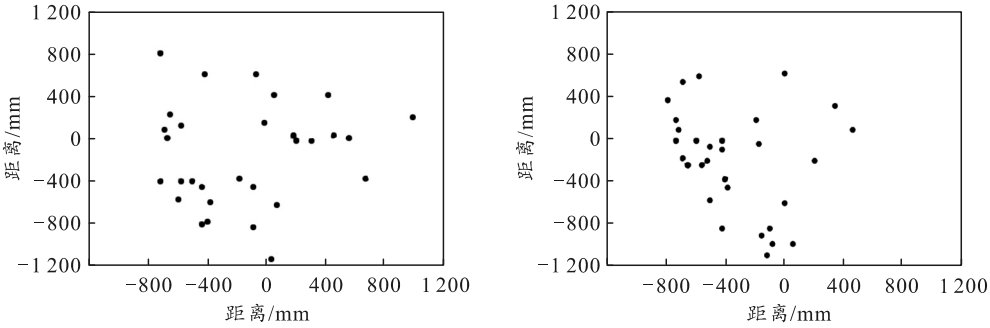
**图 5　双炮箍时，身管组不同阶数振型**

图 4 和图 5 结果显示，单炮箍与双炮箍的身管组在同阶数下的振型图相似。对比表 2 和表 3 在同阶数下的频率，两者相差 9%左右，双炮箍的模态频率更低。

自动机的射频为 4 000～4 500 发/min，即 67～75 Hz，双炮箍在 1 阶及 2 阶的模态频率距离自动机的射频更远，产生共振的可能性更低；因此，射击稳定性更好。

## 3　火炮实弹射击实验

为验证数值模拟方法的准确性，分别进行 2 组实验。在 30 连发的情况下，比较炮箍个数对立靶密集度的影响。图 6(a)是单炮箍的情况下，弹着点分布情况，其立靶密集度为 $E_x$=2.047，$E_y$=1.611；图 6(b)是双炮箍的情况下，弹着点分布情况，其立靶密集度为 $E_x$=1.502，$E_y$=1.620。可见，双炮箍比单炮箍的射击精度高。




(a) 单炮箍的弹着点分布　　(b) 双炮箍的弹着点分布

**图 6　在 30 连发的情况下，2 块标靶的弹着点分布**

## 4　结论

笔者针对炮口处炮箍的个数对身管组模态频率及振型的影响，以及对火炮射击稳定性的影响，进行了有限元仿真及实弹射击实验，得出以下结论：

1) 通过建立不同炮箍个数的有限元模型并进行仿真分析，结果表明：单炮箍和双炮箍的前 6 阶振型图相似，但是双炮箍比单炮箍在同阶数的模态频率低，双炮箍下的模态频率与火炮射频相距更远，因此，双炮箍具有更好的稳定性。

2) 在 1 阶及 2 阶模态下，双炮箍比单炮箍的频率大约低 8.4%；越往高阶，两者的频率差距百分比越大，在到达第 5 阶时，两者频率差距达到最大值为 9.4%，在第 6 阶频率差距开始减小，两者频率相差 9.0%。

3) 分别进行一组单双炮箍的实弹射击对比实验，实验结果表明：双炮箍要优于单炮箍的立靶密集度，验证了双炮箍的射击精度更好。

该研究成果可为火炮身管组的设计及提高火炮射击精度提供参考依据。

## 参考文献：

[1] 张相炎. 火炮设计理论[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2014: 71−73.

[2] 李猛. 某火炮动态特性与射击频率的匹配性分析[J]. 兵器装备工程学报, 2017, 38(1): 44−46.

[3] 谢欢, 王红岩, 郝丙飞, 等. 坦克火炮身管模态分析及振动特性研究[J]. 车辆与动力技术, 2018, 25(4): 22−27.

[4] 岳炯, 于存贵, 汪国梁, 等. 基于响应面法的某火箭炮结构参数优化[J]. 兵工自动化, 2015, 34(9): 83−86.

[5] 杨凡. 某舰炮固有频率及动态特性研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2013: 48−50.

[6] 刘军, 卫丰, 苟文选, 等. 温度场下火炮身管固有频率和振型的三维有限元分析[J]. 火炮发射与控制学报, 2004, 25(4): 5−7, 17.

[7] 吕佼珂, 程广伟, 苏林柏, 等. 某车载高炮火力系统模态分析[J]. 兵工自动化, 2019, 38(5): 70−73.

[8] 牛群峰. 高射频身管刚强度及热分析[D]. 南京: 南京理工大学, 2008: 27−30.