

doi: 10.7690/bgzdh.2021.09.016

# 某通用机枪在不同土壤中的约束模态分析

韩 祥, 赫 雷, 周克栋, 陆 野  
(南京理工大学, 南京 210094)

**摘要:** 为分析某通用机枪在不同土壤中射击时的动态特性并提高其射击精度, 以某通用机枪为研究对象, 在 SolidWorks 中建立 3 维模型, 通过 ABAQUS 软件建立其在不同土壤中的耦合模型并对其进行计算模态分析; 建立实验系统且对该机枪进行激励、参数测量与分析, 得到其试验模态参数。理论与试验结果表明: 该模型具有良好的精度, 对了解机构的动态特性及机枪的枪架结构设计具有一定的指导意义。

**关键词:** ABAQUS; 计算模态; 试验模态

**中图分类号:** TJ206 **文献标志码:** A

## Restraint Modal Analysis of Certain Type General-purpose Machine Gun in Different Soils

Han Xiang, He Lei, Zhou Kedong, Lu Ye  
(Nanjing University of Science & Technology, Nanjing 210094, China)

**Abstract:** In order to analyze the dynamic characteristics of a general-purpose machine gun when shooting in different soils and improve its shooting accuracy, a certain type general-purpose machine gun is taken as the research object, a 3D model is established in SolidWorks, and its coupling model in different soils is established through ABAQUS software. It conducts computational modal analysis, establishes an experimental system and performs excitation, parameter measurement and analysis on the machine gun to obtain its experimental modal parameters. Theoretical and experimental results show that the model has high accuracy and has certain guiding significance for understanding the dynamic characteristics of the mechanism and the structure design of the machine gun frame.

**Keywords:** ABAQUS; calculation modal; test modal

### 0 引言

为分析某通用机枪在不同土壤中射击时的动态特性并提高其射击精度, 需对该枪进行模态分析。通常采用理论与试验模态相结合的方法<sup>[1-2]</sup>来验证有限元模型的精度, 用试验模态结果修正有限元模型, 从而得到具有较高精度的有限元模型。目前, 关于自动武器模态方面的研究大都是自由模态或单个约束模态, 少有做机枪系统在不同土壤上的约束模态分析。笔者以提高某通用机枪射击精度为目的, 使用 3 维建模软件 SolidWorks 和有限元分析软件 ABAQUS 建立了机枪系统的 3 维简化模型, 通过对比理论与实验结果验证了该模型具有良好的精度。

### 1 计算模态的相关理论

模态分析是研究机构动态特性的主要方法之一, 分为计算模态分析和试验模态分析。其主要研究某机构的固有频率与固有振型, 实质是坐标变换

与方程解耦<sup>[3]</sup>。实际工程中, 为便于机构的模态分析, 将机构离散为若干单元。根据牛顿第二定律建立系统的动力学方程:

$$M\ddot{x} + C\dot{x} + Kx = F(t) \quad (1)$$

式中:  $M$  为系统的质量矩阵;  $C$  为系统的阻尼矩阵;  $K$  为系统的刚度矩阵;  $F(t)$  为系统的广义力;  $x$  为系统的位移、速度、加速度。

该方程求得的若干特征值和特征向量即为该结构的固有频率和固有振型。由于阻尼系统对固有频率影响较小, 所以在求解特征值时可忽略阻尼系统, 且模态是机构的固有特性, 因此与施加载荷无关。故式(1)的无阻尼自由振动方程可写为

$$M\ddot{x} + Kx = 0 \quad (2)$$

令  $\{x_i\} = \{\phi_i\} \sin(\omega_i t)$ , 代入式(2)可得

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

式(3)中求得的 1 组  $\{\omega_i\}$  即为系统的固有频率, 对应的  $\{\phi_i\}$  即为系统的固有振型。

收稿日期: 2021-04-25; 修回日期: 2021-06-12

作者简介: 韩 祥(1995—), 男, 江苏人, 硕士, 从事自动武器结构与仿真研究。E-mail: 1471847873@qq.com。

## 2 系统模型的建立

### 2.1 机枪 3 维简化模型的建立

由于机枪的结构较复杂,直接在 ABAQUS 软件里创建模型比较繁琐,因此选择在 3 维建模软件 SolidWorks 中建模后导入到 ABAQUS 中进行模态分析。导入前需对其进行必要的简化,从而在减少网格数量和保证计算精度的前提下达到提高计算效率的目的。在建模时,忽略对武器动态特性影响不大的零部件微小特征,如螺纹连接、握把上的纹理印花等。全枪系统经简化后主要由枪管、枪匣、枪尾及枪架组成,其 3 维实体简化模型如图 1 所示。

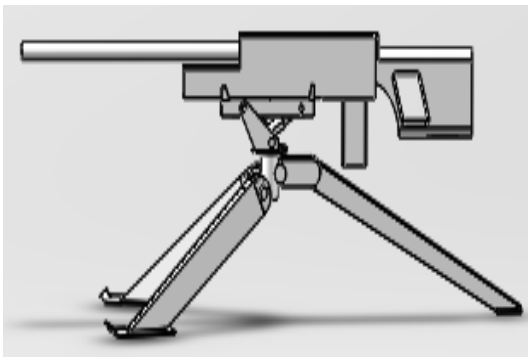


图 1 机枪 3 维简化模型

### 2.2 机枪与土壤耦合模型的建立

ABAQUS 的特长是计算各种不同材料、复杂载荷过程及变化接触条件的非线性组合问题,因此很适合用于土壤方面的研究。在土壤相关研究中,一般摩尔-库伦模型(简称 M-C 模型)的参数可从工程地质手册中查阅获得,故选用 M-C 模型对土壤进行建模。该模型需输入如下参数:摩擦角、膨胀角、凝聚力、屈服应力、绝对塑性应变等。混凝土采用塑性损伤模型。驻锄与土壤接触属于面面接触,在 ABAQUS 中通常可用定义接触对的方法来模拟面面接触,对于主从面的选择一般有如下要求:通常以刚性单元组成的面作为主面,以柔性单元组成的面作为从面。选取机枪驻锄底面作为主面,土壤为从面,建立四对接触对,采用有限滑移接触公式来模拟土壤-驻锄之间的接触。接触面之间的法向行为选择硬接触,切向行为选择摩擦系数为 0.2 的罚摩擦。土壤网格以自由划分为主,采用正六面体扫掠划分,由于无限远处的土壤对机枪结构的动态特性影响甚微,故在 3 个驻锄与土壤接触的地方网格划分较细。由于本文中研究的是机枪在不同土壤中的模态,只需改变土壤的材料属性,故只列出如图 2 所示的砂土-机枪耦合模型。

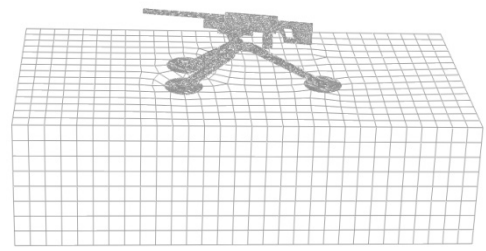


图 2 砂土-机枪耦合模型

## 3 实验模态相关理论

1 个  $n$  自由度振动系统的运动微分方程为

$$[M]\{\ddot{x}\} + [C]\{\dot{x}\} + [K]\{x\} = \{f(x)\} \quad (4)$$

对其作拉普拉斯变换,并设所有初始速度和位移均为 0,则有:

$$(s^2[M] + s[C] + [K])\{X(s)\} = \{F(s)\},$$

$$[H(s)]^{-1}\{X(s)\} = [F(s)]. \quad (5)$$

式中  $[H(s)] = \{[M]s^2 + [C]s + [K]\}^{-1}$ 。

对于  $n$  阶自由度系统,  $p$  点激励在 1 点测量响应时,根据线性代数理论,可导出其传递函数为

$$H_{1p}(w) = X_1/F_p = \sum_{i=1}^n ((\varphi_{1i}\varphi_{pi}) / (K_i - w^2M_i + jwC_i)) \quad (6)$$

式中:  $X_1$  为响应点位移;  $F_p$  为激励力;  $\varphi_{1i}$  为第  $i$  阶模态在 1 点的振型分量;  $\varphi_{pi}$  为第  $i$  阶模态在  $p$  点的振型分量。

将式(6)分解成实部和虚部,表达式为:

$$R_e(H_{1p}) = \sum_{i=1}^N ((\varphi_{1i}\varphi_{pi}) / K_i) ((1 - (w/w_i)^2) / ([1 - (w/w_i)^2]^2 + [2\zeta_i(w/w_i)]^2)),$$

$$I_e(H_{1p}) = \sum_{i=1}^N (\varphi_{1i}\varphi_{pi} / K_i) ((-2\zeta_i(w/w_i)) / ([1 - (w/w_i)^2]^2 + [2\zeta_i(w/w_i)]^2)) \quad (7)$$

式中:  $\zeta_i = C_i / 2\sqrt{M_iK_i}$  为第  $i$  阶相对阻尼系数;

$w_i = \sqrt{K_i/M_i}$  为第  $i$  阶振动频率<sup>[4]</sup>。

根据传递函数实部和虚部可得出振动结构的实频曲线和虚频曲线,由此确定其  $n$  阶的模态频率、模态阻尼和振型。实际上,只要测量导纳矩阵<sup>[5]</sup>的 1 行或 1 列元素(传递函数),就可得到各阶模态参数,从而确定系统的固有特性。

## 4 实验模态系统的搭建

测试系统包括激励系统、传感系统与数据分析系统 3 部分。模态实验的激励信号分为确定性信号与非确定性信号。由于非确定性信号存在统计

方差和分析处理时间较长等问题，故采用确定性信号中的脉冲信号作为激励信号。此信号可由锤击法产生，具有设备简单、操作方便和实验周期较短的优点，缺点是只能激励出低频模态，难以激励出高频模态。激励系统中，采用多点激励单点拾振的方法，各阶模态测试数据的信噪比较为均匀，且可以激励出较纯模态。传感系统中，力锤进行锤击时输入的是力信号，故采用力传感器测量；输出系统采用加速度传感器进行测量。信号处理系统使用 DHDAS 软件进行信号处理，通过在机枪枪体上布置 7 个激励点，选取第 4 激励点作为拾振点，而后将该机枪架设在不同土壤上进行模态实验，整体实验系统如图 3—5 所示。



图 3 机枪系统在砂土中的实验现场



图 4 机枪系统在黏土中的实验现场



图 5 机枪系统在混凝土中的实验现场

实验流程：1) 力锤敲击各激励点产生激励信号，引起机枪系统的振动；2) 力传感器与加速度传感器将输出信号直接传送到采集系统中，通过

DHDAS 软件对信号进行分析和处理，输出频响函数 (FRF) 和相干函数，通过软件对所有的频响函数做整体曲线拟合，进而进行模态识别，并得出相关实验模态参数。

## 5 模态结果对比与分析

模态参数表明了机枪产生共振的频率及在各阶频率下的结构变形。模态分析中一般不需要施加荷载，只需施加约束即可。ABAQUS 中有分块兰索斯 (Lanczos) 特征求解器、AMS 特征值求解器和子空间迭代 (Subspace) 特征值求解器。Lanczos 特点是求解精度高、计算速度快，适用范围与子空间法相同。子空间法特点是求解精度高、计算速度快，适用于大型对称特征值求解问题。笔者利用子空间迭代法，得到机枪在不同土壤中模态参数与实验所得结果比较如表 1—3 所示。

表 1 机枪系统前六阶固有频率(砂土) Hz

阶数	实验值	计算值	阶数	实验值	计算值
1	29.50	29.18	4		70.68
2		32.02	5	94.98	96.41
3	46.51	43.06	6	142.82	144.69

表 2 机枪系统前六阶固有频率(粘土) Hz

阶数	实验值	计算值	阶数	实验值	计算值
1	30.30	29.81	4		72.76
2		32.87	5	100.95	97.75
3		46.26	6	179.67	174.18

表 3 机枪系统前六阶固有频率(混凝土) Hz

阶数	实验值	计算值	阶数	实验值	计算值
1	29.66	29.81	4		72.78
2		32.88	5	92.16	97.77
3		46.29	6	142.82	144.69

通过对比理论与实验的结果，可明显看出：机枪在单个土壤中固有频率的仿真结果与计算所得十分接近，一阶固有频率误差大约是 1%；其他几阶固有频率之间存在一定的误差。通过对比几种不同土壤中机枪的约束模态，发现其中的低阶固有频率虽较接近，但还是略有差别。前两阶振型如图 6—11 所示。

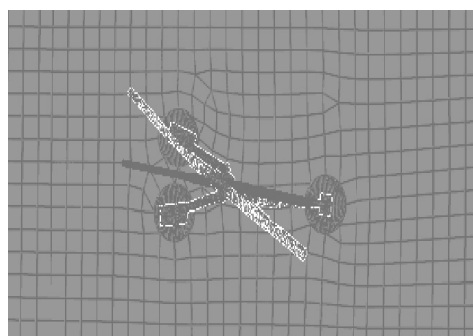


图 6 一阶振型(砂土)

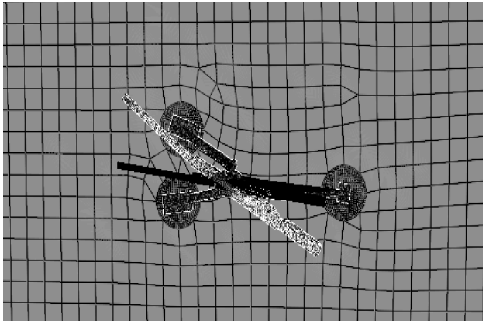


图 7 一阶振型(黏土)

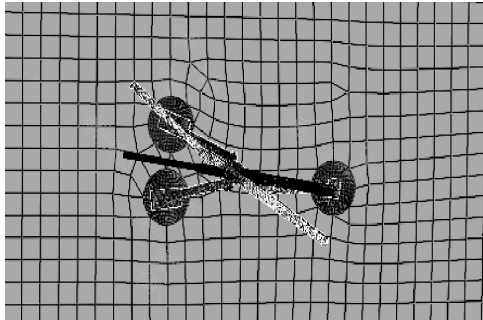


图 8 一阶振型(混凝土)

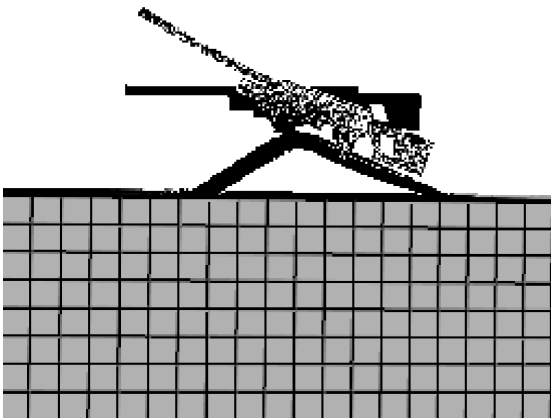


图 9 二阶振型(砂土)

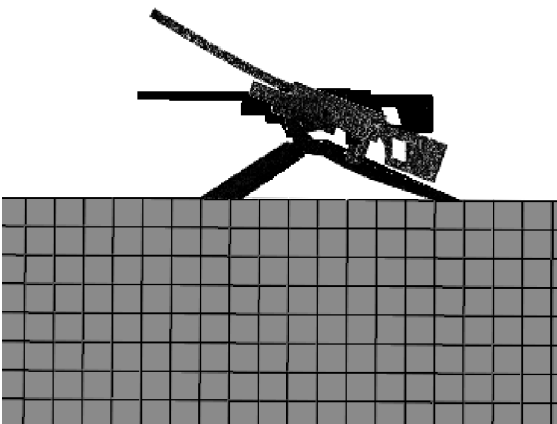


图 10 二阶振型(黏土)

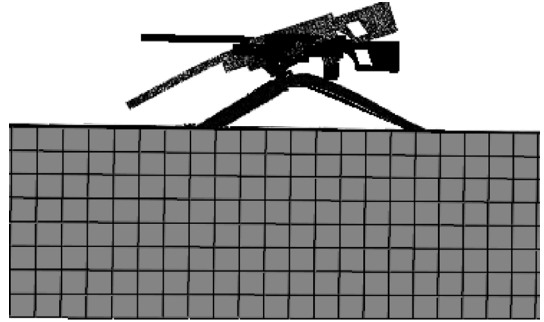


图 11 二阶振型(混凝土)

由图中可以看出：该机枪的第一阶振型为枪架的左右转动，第二阶振型为枪身的上下振动，由于机枪轻量化使得枪架与枪身的刚度减小，导致机枪的剧烈振动及枪口振动幅度加大。该型号机枪实测射击频率为 16.2 Hz。由上表可得：机枪的基频与射击频率既不相等也不存在整数倍关系，避开了共振频率。

### 6 结论

笔者建立的机枪在不同土壤中的耦合有限元模型的计算所得结果与实验模态所得结果误差甚微，证明具有良好的精度。在本模型中，通过改变 M-C 模型与混凝土塑性损伤模型中土壤的不同参数，可获得机枪在不同土壤中的固有频率与振型。在今后使用该型号机枪进行振动研究时，可用枪—土耦合模型通过改变土壤参数的方法，求解系统的模态属性。通过模态振型可看出机枪各部分的变形情况，了解到射击时对子弹散布精度影响较大的部件，并通过优化部件结构来实现机枪系统的动态稳定性，以减小武器在不同土壤环境中射击时对土壤的敏感程度。

### 参考文献：

- [1] 姚建军, 徐诚. 机枪系统发射动力学研究[J]. 兵工学报, 2002, 23(3): 406-408.
- [2] 胡晟荣, 张瑞洁, 沈嫣秋. 某小型遥控武器站发射动力学仿真[J]. 兵工自动化, 2020, 39(5): 37-40.
- [3] 王瑞林. 连发武器射频与固有频率匹配关系研究[J]. 兵工学报, 2002, 21(2): 46-58.
- [4] 杨晓文. 滚筒式洗衣机的振动模态分析[D]. 上海: 上海交通大学, 2006: 9-11.
- [5] 王进. 机枪系统的模态测试与分析[D]. 南京: 南京理工大学, 2010: 5-13.