



40 管 122 毫米火箭炮 振动模态试验报告

南京安正

王公廉

南京安正软件工程有限公司



40 管 122 毫米火箭炮振动模态试验报告

- 一、 试验时间：2000 年 8 月 7 日至 8 月 12 日
- 二、 试验地点：国家靶场白城三十一基地 4 区火箭炮位。
- 三、 试验方案：

工况 1(M 工况)：火箭炮处于射角 50° 、射向 45° 射击状态，40 管全部装上火箭弹。分别在垂向(Z 向)、横向(X 向)和纵向(Y 向)三个方向对全炮进行模态试验。

工况 2(K 工况)：火箭炮处于工况 1 的状态，40 管均不装火箭弹。分别在垂向(Z 向)、横向(X 向)和纵向(Y 向)三个方向对全炮进行模态试验。

工况 3(H 工况)：火箭炮处于 0° 射角、 0° 射向的状态，40 管均不装火箭弹。分别在垂向(Z 向)、横向(X 向)和纵向(Y 向)三个方向对全炮进行模态试验。

工况 4：火箭炮处于工况 1 的条件，按火箭弹发射的次序，每次卸下一发火箭弹后，敲击模态试验时的激励点，测量卸下火箭弹的炮管口部的振动响应。

四、试验仪器：

- | | |
|-------------------|-----|
| 1. 振动数据采集系统 | 1 套 |
| 2. 振动模态分析软件 | 1 套 |
| 3. 微机 | 1 台 |
| 4. 电荷放大器 B&K2626 | 2 台 |
| 5. 低通滤波器 | 1 台 |
| 6. 加速度传感器 B&K4370 | 1 只 |
| 7. 力锤及力传感器 | 1 套 |

五、试验方法：

1. 激励方法：

40 管 122 火箭炮装弹后重达 15 吨。由于激振器的激振力较小，难以激发起全炮的各阶模态，故采用激振锤进行冲击激励。本次试验选用锤体质量为 2 公斤，带橡胶锤头的激振锤进行冲击激励，最大冲击力可达 20—30KN，可将火箭炮的低阶模态都激发出来。

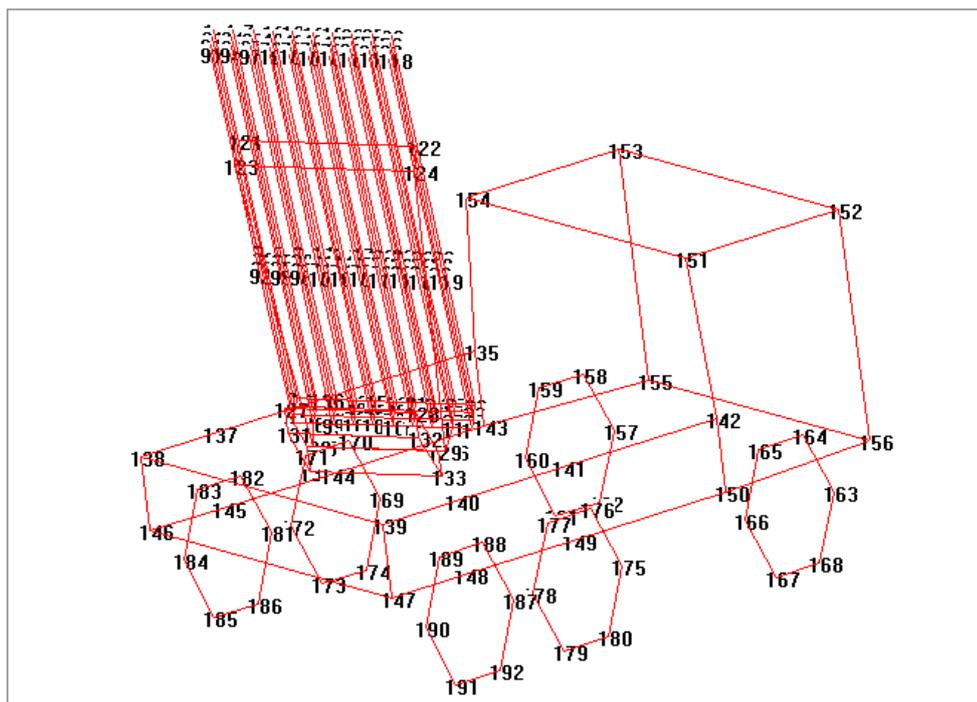
2. 响应的测量：

虽然采用冲击激励的方法激发火箭炮的振动，但由于全炮的质量比较大，激发出来的振动还是比较小的。因此，选用丹麦 B&K 的高灵敏度加速度传感器 4370 测量火箭炮的振动响应。该传感器具有灵敏度高，低频特性好的优点，测得信号的信噪比高，数据可靠。

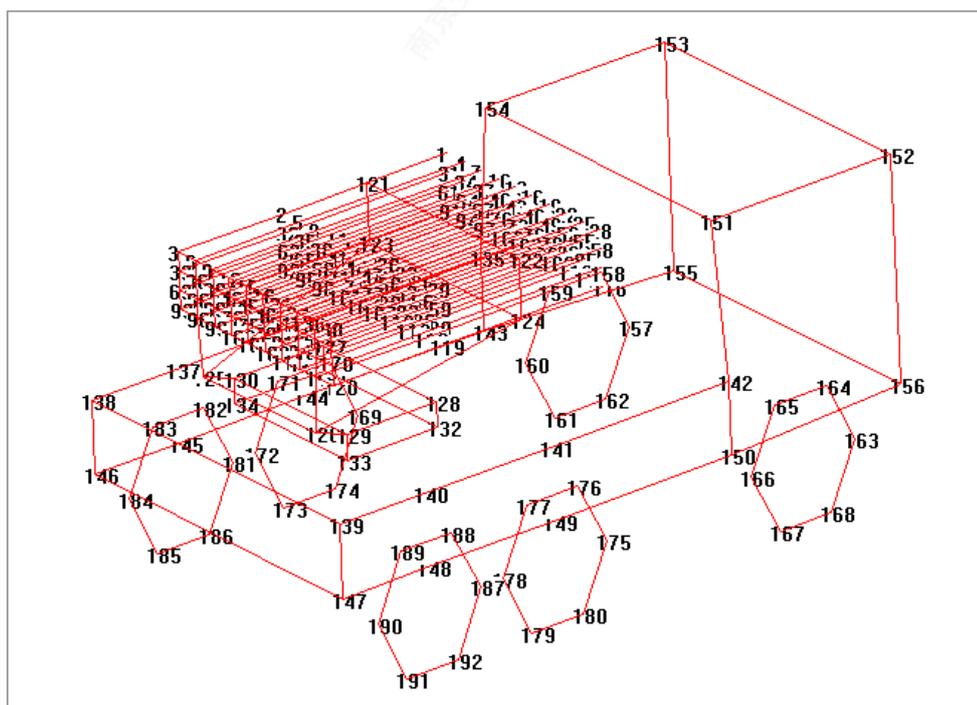
3. 火箭炮频率响应函数的测量：

频率响应函数测量是振动模态分析的关键。根据火箭炮的特点，拟采用始终在火箭炮上某一点进行冲击激励，依次测量火箭炮上各个测量点的振动响应。这样，便可以获得火箭炮频率响应函数矩阵的一系列元素。通过这一系列频率响应函数的曲线拟合，就可以分析得到火箭炮的模态参数。因此，激励点的选择相当重要。激励点的选择要考虑二个主要因素：第一，激励点要选择火箭炮上比较刚硬的部位，冲击时不易产生局部变形，能把火箭炮的振动激发出来；第二，激励点要避开火箭炮各阶模态的节线位置，以便将火箭炮的所有低阶模态都能激发出来，不至于漏掉某一阶模态。经过多次比较，选取火箭炮车体在大梁后端部作为激励

点[该点号为 138，见图(1)、图(2)火箭炮模态试验测点分布图]。

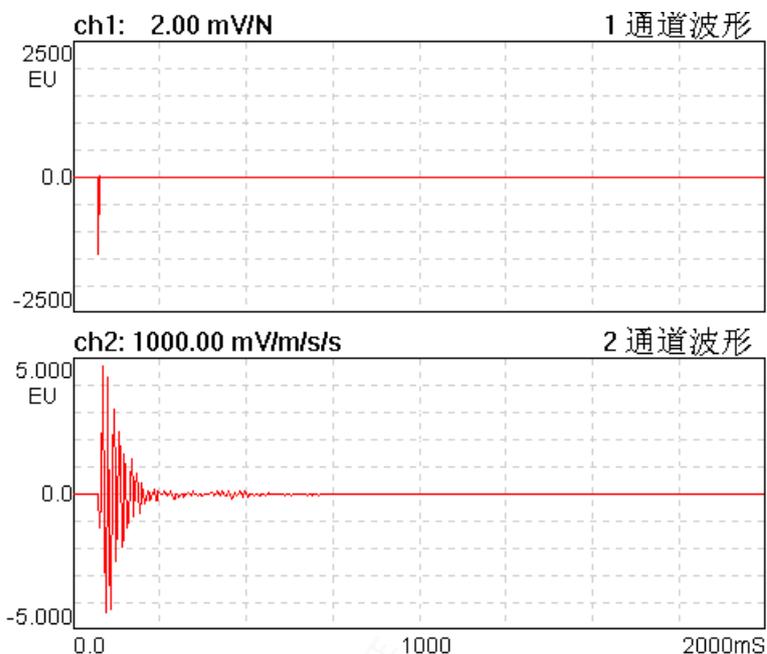


图(1) 工况 1、2 火箭炮模态试验测点分布图



图(2) 工况 3 火箭炮模态试验测点分布图

在频率响应函数测量时，始终检查测量的相干函数，以确保测量数据的可靠性。一般各阶模态频率附近的相干函数在 0.8 以上，则表明所测量的频率响应函数有效，可信，予以接受。否则，测量数据不可靠，检查原因，重新测量，直到达到要求。图(3)为激励力信号(上)与响应测量信号(下)。图(4)为相干函数(上)与频率响应函数的相频(中)、幅频曲线(下)。

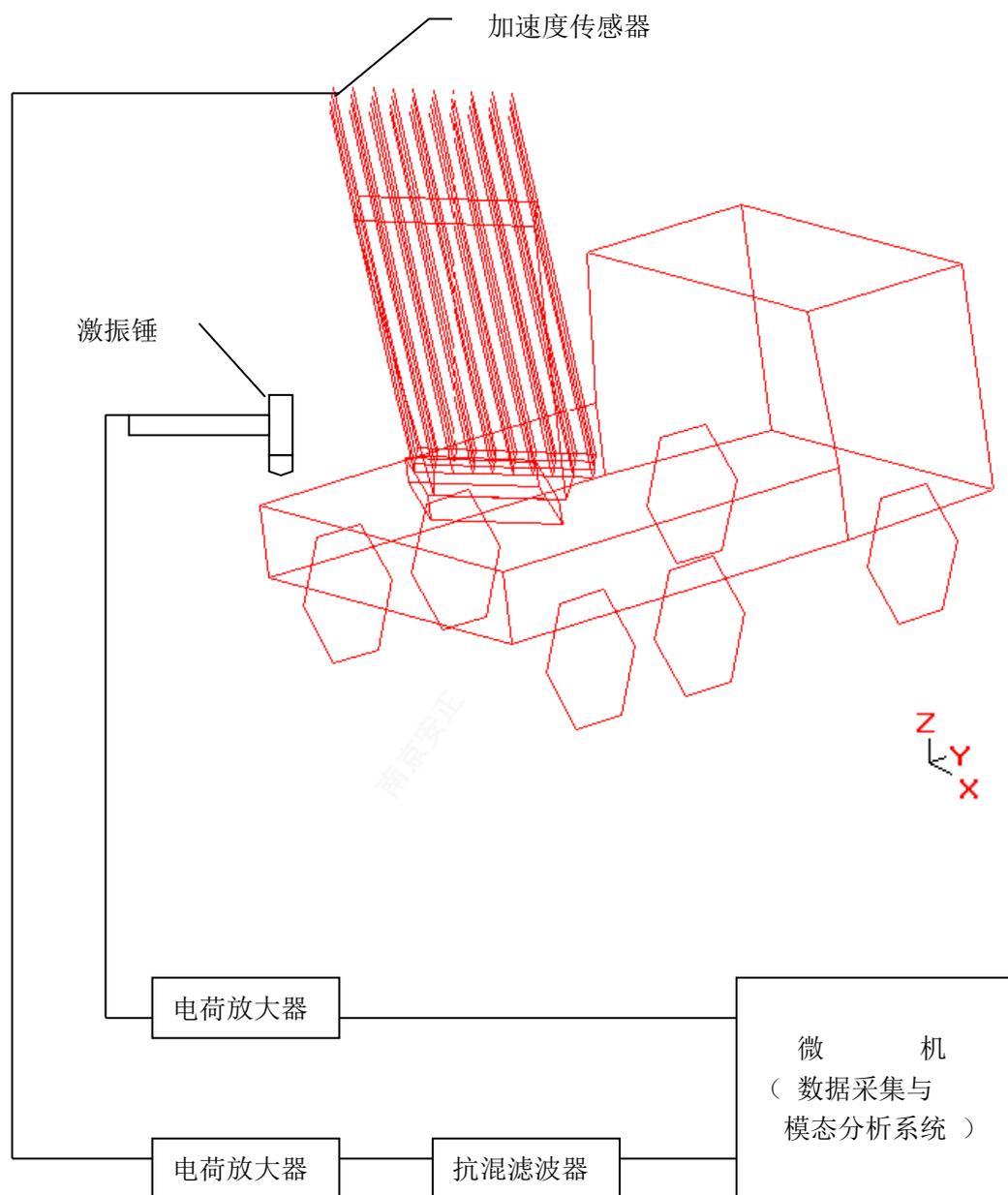


图（3）冲击激励力信号（上）与振动加速度响应信号（下）



图（4）相干函数（上）与频率响应函数的相频（中）、幅频（下）

4. 模态试验框图：
火箭炮模态试验框图见图(5)所示。



图(5) 火箭炮模态试验框图

5. 模态试验参数：

火箭炮的动态特性主要取决于低频特性，因此本次模态试验分析 100HZ 以下的各阶模态。模态试验的参数为：

- 分析频率范围： $f_c = 100HZ$
- 采样频率： $f_s = 256HZ$
- 采样间隔： $T = 3.9$ 毫秒
- 采样点数： $N=1024$



样本长度: $T_0 = NT = 4$ 秒
 频率分辨率: $F = 1/T_0 = 0.25$ HZ
 谱线数: $M=401$
 平均次数: $n=4$

6. 测点布置

由于试验状态工况 1 时火箭炮管与车体有一定的角度（射角 50° ，射向 45° ），因此火箭炮管与车体采用不同的局部坐标来表示。部件 A 为车体，部件 B 为发射管。取总体坐标与车体的局部（部件 A）一致，即总体坐标的 Z 向为铅垂向上，Y 向为车体的前进方向，则 X 向指向车体的右侧。火箭炮管用局部坐标 $x'y'z'$ （部件 B）表示。沿火箭炮管的发射方向为 y' 正向，在铅垂面内与火箭炮管垂直向上的方向为 z' 的正向，则指向火箭炮管右侧的方向为 x' 的正向。

为把二个部件组装成整体，还要确定每个部件坐标与总体坐标的相对位置，即确定部件坐标原点在总体坐标中的坐标位置及部件坐标轴相对于总体坐标轴转过的角度。经过计算，二个部件与总体坐标的坐标关系如表(1)所示。

表(1) 部件坐标相对总体坐标位置

| 部件代号 | 坐标类型 | x_0 | y_0 | z_0 | 绕 x 转角 | 绕 y 转角 | 绕 z 转角 |
|------|------|-------|-------|-------|--------------|--------------|--------------|
| A | 直角 | 0 | 0 | 0 | 0° | 0° | 0° |
| B | 直角 | 600 | -600 | 1700 | 40.1° | 32.7° | 32.7° |

为了描述 40 管火箭炮整体形态，火箭炮每管布置三个测点，共计 120 个测点，分别为第 1 点到第 120 点。摇架和回转部分布置 14 个测点，分别为第 121 点到第 134 点。为了描述车体的轮廓，在车体的大梁及外廓角点布置 22 个测点，分别为第 135 点到第 156 点。每个车轮用六个点描述，六个车轮共 36 个测点号，分别为第 157 点到第 192 点。对于车轮，实际测量时以轮轴的振动响应作该车轮六个点的振动响应数据，用以描述该车轮相对于车体的振动。这样整个火箭炮共布置 192 个测点。测点的坐标见表(2)。

表(2) 40 管火箭炮模态试验测点坐标

| 测点号 | 部件 | x | y | z | 测点号 | 部件 | x | y | z |
|-----|----|------|------|-----|-----|----|------|------|-----|
| 1 | B | -675 | 3000 | 900 | 10 | B | -225 | 3000 | 900 |
| 2 | B | -675 | 1200 | 900 | 11 | B | -225 | 1200 | 900 |
| 3 | B | -675 | 0 | 900 | 12 | B | -225 | 0 | 900 |
| 4 | B | -525 | 3000 | 900 | 13 | B | -75 | 3000 | 900 |
| 5 | B | -525 | 1200 | 900 | 14 | B | -75 | 1200 | 900 |
| 6 | B | -525 | 0 | 900 | 15 | B | -75 | 0 | 900 |
| 7 | B | -375 | 3000 | 900 | 16 | B | 75 | 3000 | 900 |
| 8 | B | -375 | 1200 | 900 | 17 | B | 75 | 1200 | 900 |
| 9 | B | -375 | 0 | 900 | 18 | B | 75 | 0 | 900 |

| 测点号 | 部件 | x | y | z |
|-----|----|------|------|-----|
| 19 | B | 225 | 3000 | 900 |
| 20 | B | 225 | 1200 | 900 |
| 21 | B | 225 | 0 | 900 |
| 22 | B | 375 | 3000 | 900 |
| 23 | B | 375 | 1200 | 900 |
| 24 | B | 375 | 0 | 900 |
| 25 | B | 525 | 3000 | 900 |
| 26 | B | 525 | 1200 | 900 |
| 27 | B | 525 | 0 | 900 |
| 28 | B | 675 | 3000 | 900 |
| 29 | B | 675 | 1200 | 900 |
| 30 | B | 675 | 0 | 900 |
| 31 | B | -675 | 3000 | 750 |
| 32 | B | -675 | 1200 | 750 |
| 33 | B | -675 | 0 | 750 |
| 34 | B | -525 | 3000 | 750 |
| 35 | B | -525 | 1200 | 750 |
| 36 | B | -525 | 0 | 750 |
| 37 | B | -375 | 3000 | 750 |
| 38 | B | -375 | 1200 | 750 |
| 39 | B | -375 | 0 | 750 |
| 40 | B | -225 | 3000 | 750 |
| 41 | B | -225 | 1200 | 750 |
| 42 | B | -225 | 0 | 750 |
| 43 | B | -75 | 3000 | 750 |
| 44 | B | -75 | 1200 | 750 |
| 45 | B | -75 | 0 | 750 |
| 46 | B | 75 | 3000 | 750 |
| 47 | B | 75 | 1200 | 750 |
| 48 | B | 75 | 0 | 750 |
| 49 | B | 225 | 3000 | 750 |
| 50 | B | 225 | 1200 | 750 |
| 51 | B | 225 | 0 | 750 |
| 52 | B | 375 | 3000 | 750 |
| 53 | B | 375 | 1200 | 750 |
| 54 | B | 375 | 0 | 750 |
| 55 | B | 525 | 3000 | 750 |
| 56 | B | 525 | 1200 | 750 |

| 测点号 | 部件 | x | y | z |
|-----|----|------|------|-----|
| 57 | B | 525 | 0 | 750 |
| 58 | B | 675 | 3000 | 750 |
| 59 | B | 675 | 1200 | 750 |
| 60 | B | 675 | 0 | 750 |
| 61 | B | -675 | 3000 | 600 |
| 62 | B | -675 | 1200 | 600 |
| 63 | B | -675 | 0 | 600 |
| 64 | B | -525 | 3000 | 600 |
| 65 | B | -525 | 1200 | 600 |
| 66 | B | -525 | 0 | 600 |
| 67 | B | -375 | 3000 | 600 |
| 68 | B | -375 | 1200 | 600 |
| 69 | B | -375 | 0 | 600 |
| 70 | B | -225 | 3000 | 600 |
| 71 | B | -225 | 1200 | 600 |
| 72 | B | -225 | 0 | 600 |
| 73 | B | -75 | 3000 | 600 |
| 74 | B | -75 | 1200 | 600 |
| 75 | B | -75 | 0 | 600 |
| 76 | B | 75 | 3000 | 600 |
| 77 | B | 75 | 1200 | 600 |
| 78 | B | 75 | 0 | 600 |
| 79 | B | 225 | 3000 | 600 |
| 80 | B | 225 | 1200 | 600 |
| 81 | B | 225 | 0 | 600 |
| 82 | B | 375 | 3000 | 600 |
| 83 | B | 375 | 1200 | 600 |
| 84 | B | 375 | 0 | 600 |
| 85 | B | 525 | 3000 | 600 |
| 86 | B | 525 | 1200 | 600 |
| 87 | B | 525 | 0 | 600 |
| 88 | B | 675 | 3000 | 600 |
| 89 | B | 675 | 1200 | 600 |
| 90 | B | 675 | 0 | 600 |
| 91 | B | -675 | 3000 | 450 |
| 92 | B | -675 | 1200 | 450 |
| 93 | B | -675 | 0 | 450 |
| 94 | B | -525 | 3000 | 450 |

| 测点号 | 部件 | x | y | z |
|-----|----|------|------|------|
| 95 | B | -525 | 1200 | 450 |
| 96 | B | -525 | 0 | 450 |
| 97 | B | -375 | 3000 | 450 |
| 98 | B | -375 | 1200 | 450 |
| 99 | B | -375 | 0 | 450 |
| 100 | B | -225 | 3000 | 450 |
| 101 | B | -225 | 1200 | 450 |
| 102 | B | -225 | 0 | 450 |
| 103 | B | -75 | 3000 | 450 |
| 104 | B | -75 | 1200 | 450 |
| 105 | B | -75 | 0 | 450 |
| 106 | B | 75 | 3000 | 450 |
| 107 | B | 75 | 1200 | 450 |
| 108 | B | 75 | 0 | 450 |
| 109 | B | 225 | 3000 | 450 |
| 110 | B | 225 | 1200 | 450 |
| 111 | B | 225 | 0 | 450 |
| 112 | B | 375 | 3000 | 450 |
| 113 | B | 375 | 1200 | 450 |
| 114 | B | 375 | 0 | 450 |
| 115 | B | 525 | 3000 | 450 |
| 116 | B | 525 | 1200 | 450 |
| 117 | B | 525 | 0 | 450 |
| 118 | B | 675 | 3000 | 450 |
| 119 | B | 675 | 1200 | 450 |
| 120 | B | 675 | 0 | 450 |
| 121 | B | -675 | 2100 | 900 |
| 122 | B | 675 | 2100 | 900 |
| 123 | B | -675 | 2100 | 430 |
| 124 | B | 675 | 2100 | 430 |
| 125 | B | -500 | 0 | 0 |
| 126 | B | 500 | 0 | 0 |
| 127 | A | -700 | 0 | 1600 |
| 128 | A | 0 | 700 | 1600 |
| 129 | A | 700 | 0 | 1600 |
| 130 | A | 0 | -700 | 1600 |
| 131 | A | -700 | 0 | 1400 |
| 132 | A | 0 | 700 | 1400 |

| 测点号 | 部件 | x | y | z |
|-----|----|-------|-------|------|
| 133 | A | 700 | 0 | 1400 |
| 134 | A | 0 | -700 | 1400 |
| 135 | A | -1100 | 3000 | 1380 |
| 136 | A | -1100 | 1000 | 1380 |
| 137 | A | -1100 | -400 | 1380 |
| 138 | A | -1100 | -1350 | 1380 |
| 139 | A | 1100 | -1350 | 1380 |
| 140 | A | 1100 | -400 | 1380 |
| 141 | A | 1100 | 1000 | 1380 |
| 142 | A | 1100 | 3000 | 1380 |
| 143 | A | -1100 | 3000 | 800 |
| 144 | A | -1100 | 1000 | 800 |
| 145 | A | -1100 | -400 | 800 |
| 146 | A | -1100 | -1350 | 800 |
| 147 | A | 1100 | -1350 | 800 |
| 148 | A | 1100 | -400 | 800 |
| 149 | A | 1100 | 1000 | 800 |
| 150 | A | 1100 | 3000 | 800 |
| 151 | A | 1000 | 3000 | 2600 |
| 152 | A | 1000 | 5000 | 2600 |
| 153 | A | -1000 | 5000 | 2600 |
| 154 | A | -1000 | 3000 | 2600 |
| 155 | A | -1000 | 5000 | 800 |
| 156 | A | 1000 | 5000 | 800 |
| 157 | A | -1000 | 4476 | 500 |
| 158 | A | -1000 | 4188 | 1000 |
| 159 | A | -1000 | 3612 | 1000 |
| 160 | A | -1000 | 3324 | 500 |
| 161 | A | -1000 | 3612 | 0 |
| 162 | A | -1000 | 4188 | 0 |
| 163 | A | 1000 | 4476 | 500 |
| 164 | A | 1000 | 4188 | 1000 |
| 165 | A | 1000 | 3612 | 1000 |
| 166 | A | 1000 | 3324 | 500 |
| 167 | A | 1000 | 3612 | 0 |
| 168 | A | 1000 | 4188 | 0 |
| 169 | A | -1100 | 1576 | 500 |
| 170 | A | -1100 | 1288 | 1000 |

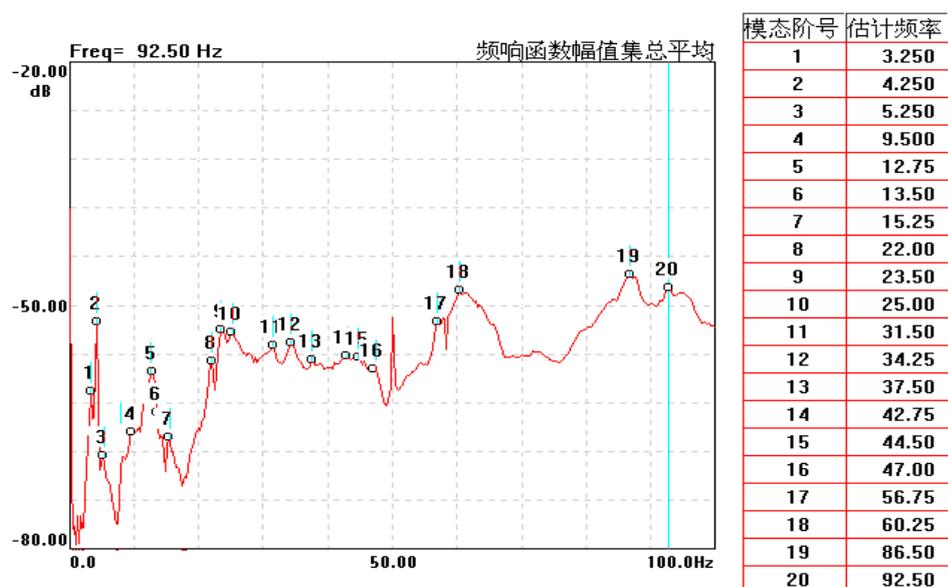
| 测点号 | 部件 | x | y | z |
|-----|----|-------|------|------|
| 171 | A | -1100 | 712 | 1000 |
| 172 | A | -1100 | 424 | 500 |
| 173 | A | -1100 | 712 | 0 |
| 174 | A | -1100 | 1288 | 0 |
| 175 | A | 1100 | 1576 | 500 |
| 176 | A | 1100 | 1288 | 1000 |
| 177 | A | 1100 | 712 | 1000 |
| 178 | A | 1100 | 424 | 500 |
| 179 | A | 1100 | 712 | 0 |
| 180 | A | 1100 | 1288 | 0 |
| 181 | A | -1100 | 176 | 500 |

| 测点号 | 部件 | x | y | z |
|-----|----|-------|------|------|
| 182 | A | -1100 | -122 | 1000 |
| 183 | A | -1100 | -688 | 1000 |
| 184 | A | -1100 | -976 | 500 |
| 185 | A | -1100 | -688 | 0 |
| 186 | A | -1100 | -112 | 0 |
| 187 | A | 1100 | 176 | 500 |
| 188 | A | 1100 | -122 | 1000 |
| 189 | A | 1100 | -688 | 1000 |
| 190 | A | 1100 | -976 | 500 |
| 191 | A | 1100 | -688 | 0 |
| 192 | A | 1100 | -122 | 0 |

六、模态参数识别：

1. 模态频率的初步估计：

依据每一工况试验测量获得的火箭炮所有测量点的频率响应数据，便可以识别出火箭炮的模态参数。首先采用幅频集总平均的方法，估计各阶模态固有频率初始拟合值。所谓“幅频集总平均”是将全部测量的频率响应函数的幅值进行线性平均的结果。这种平均曲线虽然不能代表任何一个具体测量，却总体上反映了结构在分析频率范围内总共有多少阶模态。因为单个测量的频率响应幅频曲线上的峰值或许是干扰或混迭频率；而不是峰值的地方或许恰恰被漏掉了的模态，因为在振形节线上的测量点不会出现该阶模态。经过大量测量数据的集总平均，可以大大减小上述两种错误。大量的模态试验实践，表明这种设置初始模态频率估计的方法是特别有效的。图(6)为工况 1 垂向(Z 向)测量的所有频率响应函数数据的幅频集总平均曲线。由该曲线的峰值位置，初步估计出火箭炮前 20 个模态固有频率，见图(6)右侧的频率估计表。



图(6) 工况 1 垂向(Z 向)测量的幅频集总平均曲线

2. 参数识别:

模态参数识别方法有实模态方法和复模态方法。实模态理论假定系统的阻尼是比例阻尼。所谓比例阻尼是阻尼矩阵比例于质量矩阵或刚度矩阵。通常当阻尼较小时,用实模态分析是合理的。当阻尼较大或模态密集的情况下,可以采用复模态方法进行参数识别。但使用复模态方法要特别谨慎,常常会出现不收敛的情形,识别的效果并不理想。大量工程实践证明,实模态方法是很有效的。因此,本次试验采用实模态方法进行曲线拟合和模态参数识别。

分别对每一工况下每一个方向的所有频率响应函数数据,进行幅频集总平均。再由幅频集总平均曲线,初步估计模态频率。根据这些预估的模态频率采用实模态整体曲线拟合的方法,识别出各阶模态的模态参数。并且用模态置信因子(MCF)模态置信度判据(MAC)以及振型协调原理,剔除虚假模态和局部模态。

各种工况每一个测量方向的火箭炮的前 20 阶模态固有频率及阻尼比的分析结果如表(3)、(4)、(5)所示。各阶模态的振型如图(7)至图(24)所示。

工况 4 炮口振动响应测量的主要频率的读值,见表(6)、(7)、(8)。由于分析的频率分辨率为 0.25HZ,故读值的精度亦为 0.25HZ。

表(3) 工况 1 各阶模态固有频率及阻尼比:

| 垂向(MZ) | | | 横向(MX) | | | 纵向(MY) | | |
|--------|-------|-------|--------|-------|-------|--------|-------|-------|
| 阶号 | 频率 | 阻尼(%) | 阶号 | 频率 | 阻尼(%) | 阶号 | 频率 | 阻尼(%) |
| 1 | 3.02 | 4.452 | 1 | 1.75 | 4.452 | 1 | 1.38 | 4.452 |
| 2 | 4.19 | 3.906 | 2 | 4.22 | 4.452 | 2 | 3.16 | 4.452 |
| 3 | 5.23 | 3.017 | 3 | 8.95 | 4.452 | 3 | 4.71 | 4.452 |
| 4 | 8.00 | 4.452 | 4 | 10.24 | 4.452 | 4 | 7.99 | 4.452 |
| 5 | 10.76 | 4.452 | 5 | 12.69 | 4.452 | 5 | 11.02 | 4.452 |
| 6 | 12.47 | 3.959 | 6 | 15.58 | 4.452 | 6 | 16.84 | 4.452 |
| 7 | 15.30 | 4.452 | 7 | 21.81 | 4.452 | 7 | 20.63 | 4.452 |
| 8 | 21.68 | 4.452 | 8 | 23.28 | 4.452 | 8 | 22.38 | 4.452 |
| 9 | 24.38 | 4.452 | 9 | 24.11 | 2.868 | 9 | 25.02 | 4.056 |
| 10 | 25.30 | 4.452 | 10 | 30.82 | 4.452 | 10 | 25.58 | 3.264 |
| 11 | 30.91 | 4.452 | 11 | 33.02 | 4.452 | 11 | 37.10 | 4.452 |
| 12 | 34.82 | 3.853 | 12 | 47.88 | 4.452 | 12 | 43.07 | 4.452 |
| 13 | 37.75 | 4.452 | 13 | 58.72 | 2.076 | 13 | 45.86 | 3.070 |
| 14 | 43.02 | 4.452 | 14 | 60.79 | 2.868 | 14 | 63.48 | 2.868 |
| 15 | 44.76 | 4.452 | 15 | 61.30 | 2.868 | 15 | 67.13 | 4.452 |
| 16 | 47.06 | 4.452 | 16 | 74.74 | 2.322 | 16 | 70.67 | 3.853 |
| 17 | 56.33 | 2.815 | 17 | 79.34 | 2.621 | 17 | 73.20 | 3.167 |
| 18 | 61.12 | 2.172 | 18 | 90.81 | 1.829 | 18 | 86.97 | 3.211 |
| 19 | 86.88 | 2.718 | | | | 19 | 92.89 | 1.583 |
| 20 | 92.34 | 1.926 | | | | | | |

表(4) 工况 2 各阶模态固有频率及阻尼比:

垂向(KZ)

横向(KX)

纵向(KY)

| 阶号 | 频率 | 阻尼(%) | 阶号 | 频率 | 阻尼(%) | 阶号 | 频率 | 阻尼(%) |
|----|-------|-------|----|-------|-------|----|-------|-------|
| 1 | 3.89 | 3.893 | 1 | 1.96 | 5.380 | 1 | 1.74 | 5.380 |
| 2 | 5.49 | 1.764 | 2 | 4.77 | 5.380 | 2 | 3.98 | 5.380 |
| 3 | 8.67 | 5.380 | 3 | 5.51 | 3.901 | 3 | 5.97 | 5.380 |
| 4 | 11.45 | 5.380 | 4 | 7.99 | 4.500 | 4 | 8.84 | 3.652 |
| 5 | 15.32 | 4.521 | 5 | 10.73 | 5.380 | 5 | 11.23 | 4.323 |
| 6 | 18.58 | 5.380 | 6 | 12.98 | 4.132 | 6 | 14.65 | 5.380 |
| 7 | 22.29 | 5.380 | 7 | 17.61 | 5.380 | 7 | 15.51 | 5.380 |
| 8 | 26.35 | 4.252 | 8 | 19.92 | 5.380 | 8 | 20.79 | 5.380 |
| 9 | 30.25 | 5.160 | 9 | 22.06 | 3.400 | 9 | 23.41 | 5.380 |
| 10 | 33.69 | 5.380 | 10 | 26.67 | 5.380 | 10 | 32.88 | 5.380 |
| 11 | 41.37 | 1.860 | 11 | 30.42 | 5.380 | 11 | 41.27 | 4.524 |
| 12 | 56.71 | 1.135 | 12 | 32.08 | 5.380 | 12 | 45.68 | 5.380 |
| 13 | 59.51 | 5.380 | 13 | 41.28 | 2.740 | 13 | 48.26 | 3.736 |
| 14 | 68.26 | 5.247 | 14 | 43.84 | 5.380 | 14 | 58.83 | 4.080 |
| 15 | 77.22 | 0.980 | 15 | 59.07 | 1.860 | 15 | 64.48 | 5.380 |
| 16 | 83.48 | 2.300 | 16 | 69.02 | 4.500 | 16 | 72.60 | 3.925 |
| 17 | 84.28 | 0.540 | 17 | 78.24 | 1.248 | 17 | 76.35 | 2.838 |
| 18 | 86.36 | 0.980 | 18 | 85.16 | 1.504 | 18 | 81.28 | 1.860 |
| 19 | 89.68 | 1.982 | 19 | 91.41 | 2.344 | 19 | 85.69 | 1.451 |
| 20 | 93.36 | 1.420 | 20 | 95.31 | 0.980 | 20 | 90.12 | 5.380 |

表(5) 工况 3 各阶模态固有频率及阻尼比:

垂向(HZ)

横向(HX)

纵向(HY)

| 阶号 | 频率 | 阻尼(%) | 阶号 | 频率 | 阻尼(%) | 阶号 | 频率 | 阻尼(%) |
|----|-------|-------|----|-------|-------|----|-------|-------|
| 1 | 4.03 | 4.530 | 1 | 2.24 | 5.172 | 1 | 1.75 | 5.380 |
| 2 | 6.27 | 5.380 | 2 | 6.24 | 2.571 | 2 | 3.43 | 5.380 |
| 3 | 10.76 | 5.380 | 3 | 8.77 | 5.380 | 3 | 7.02 | 5.380 |
| 4 | 12.83 | 5.380 | 4 | 11.81 | 2.300 | 4 | 9.39 | 5.380 |
| 5 | 13.97 | 5.380 | 5 | 14.10 | 1.187 | 5 | 10.89 | 4.504 |
| 6 | 17.41 | 3.955 | 6 | 16.18 | 5.380 | 6 | 14.29 | 5.380 |
| 7 | 21.27 | 5.380 | 7 | 17.42 | 5.380 | 7 | 17.58 | 5.380 |
| 8 | 25.23 | 3.620 | 8 | 23.29 | 1.563 | 8 | 20.93 | 5.380 |
| 9 | 27.15 | 4.231 | 9 | 31.10 | 5.380 | 9 | 24.73 | 5.380 |
| 10 | 33.36 | 3.058 | 10 | 38.32 | 5.380 | 10 | 30.21 | 4.515 |
| 11 | 35.92 | 5.380 | 11 | 46.92 | 3.620 | 11 | 32.96 | 4.064 |
| 12 | 39.14 | 5.380 | 12 | 58.95 | 3.002 | 12 | 43.97 | 4.500 |
| 13 | 42.20 | 1.860 | 13 | 59.46 | 3.180 | 13 | 48.44 | 1.860 |
| 14 | 45.52 | 5.380 | 14 | 64.46 | 2.387 | 14 | 57.79 | 2.740 |
| 15 | 48.22 | 2.999 | 15 | 65.80 | 2.328 | 15 | 65.26 | 4.696 |
| 16 | 53.82 | 5.380 | 16 | 79.33 | 1.471 | 16 | 67.38 | 3.977 |
| 17 | 55.83 | 1.898 | 17 | 88.23 | 1.860 | 17 | 75.96 | 2.760 |
| 18 | 59.96 | 2.740 | 18 | 88.94 | 1.102 | 18 | 80.72 | 2.740 |
| 19 | 63.37 | 5.261 | 19 | 97.57 | 1.007 | 19 | 85.23 | 2.850 |
| 20 | 65.69 | 3.620 | | | | 20 | 89.62 | 2.740 |

七、模态试验结果分析：

1. 火箭炮的低阶模态为全炮在悬挂系统或轮胎弹性支撑下的刚体运动。这些刚体运动有全炮上下振动，前后摆动，左右摆动等。这些刚体模态的固有频率与质量有关。装满火箭弹工况 1 火箭炮的刚体模态的固有频率低于未装火箭弹工况 2 的固有频率。装满火箭弹的工况 1 垂向(Z 向)、横向(X 向)、纵向(Y 向)的刚体模态固有频率分别为 3.02HZ、1.75HZ、1.38HZ。未装火箭弹工况 2 三个方向的刚体模态固有频率分别为 3.89HZ、1.96HZ、1.74HZ。

2. 第二、三阶以上的模态一般为发射管相对于车体的摆动或扭动以及车架的各阶弯曲变形模态。

3. 更高阶的模态一般为发射管之间的相对振动。

总的来讲，火箭炮是一个复杂的结构，各部件之间的连接存在着间隙，空回和相对滑动等各种非线性因素，不是完全刚性连接的线性系统。模态试验和模态分析理论是建立在线性理论基础上的。因此，要完全准确获得整个结构的模态特性有一定的难度。但是可以采取一定的措施减小非线性因素的影响，提高测量信号的信噪比，达到提高模态试验的准确性。本次试验所采取的措施归纳如下：

1. 采取较重的激振锤，增加激励的能量，尽量将全炮的低阶模态都激发出来。

2. 激励点的位置要选择在结构刚硬的部件，减小结构局部变形和非线性的影响。

3. 激励点的位置要避开各阶模态的节线位置，以免漏掉某一阶模态。

4. 选用高灵敏度，频响特性的好的测量振动响应的加速度传感器，提高振动响应测量的质量，确保较高的信噪比。

5. 使用低通抗混滤波器，滤掉分析频率范围以外的高频信号，消除混迭误差。

6. 用幅频集总平均曲线确定模态固有频率初值，采用实模态整体拟合的方法进行模态参数识别。用模态置信因子(MCF)、模态置信度判据(MAC)以及振型协调原理，剔除虚假模态和局部模态，获得火箭炮的各阶模态参数。