

doi: 10.7690/bgzdh.2015.01.006

## 某火箭炮定向器模态测试方案

汤平安<sup>1</sup>, 徐强<sup>1</sup>, 王军<sup>2</sup>, 梁畅飞<sup>3</sup>

(1. 南京理工大学机械工程学院, 南京 210094; 2. 总装工兵军代局驻沈阳地区军代室, 沈阳 110004;  
3. 总装驻泸州地区军代室, 四川 泸州 646000)

**摘要:** 针对目前对模态测试优化没有一套成熟理论的问题, 以某型火箭炮定向器为研究对象进行模态测试。阐述模态测试优化的相关理论, 对某火箭炮定向器的有限元模型进行模态分析, 提取其模态参数, 通过 Matlab 编程计算, 得到最优悬挂点、测点及参考点, 并通过锤击试验进行验证。结果表明: 优化后的方案在取点上有理论依据, 测试更容易避开节线, 能避免模态遗漏, 得到更好的振型。

**关键词:** 模态测试; 定向器; 动力学特性; 火箭炮; 悬挂点

**中图分类号:** TJ393 **文献标志码:** A

## Model Testing Scheme on Certain Type Rocket Guider

Tang Ping'an<sup>1</sup>, Xu Qiang<sup>1</sup>, Wang Jun<sup>2</sup>, Liang Changfei<sup>3</sup>

(1. School of Mechanical Engineering, Nanjing University of Science & Technology, Nanjing 210094, China;  
2. PLA Military Presentation Office in Shenyang District, PLA Engineer Military Representation Bureau of General Equipment Headquarters, Shenyang 110004, China;  
3. PLA Military Presentation Office in Luzhou District, General Equipment Headquarters, Luzhou 646000, China)

**Abstract:** To solve the problem of there is no mature methods in model testing optimization, the paper used the certain type rocket launcher device for model testing. Introduce related theory of model testing optimization, carry out model analyzing of certain type rocket guider, extract its model parameter, and acquire optimal suspension point, test point and reference point by Matlab programming calculation. Then, verify it by hammering test. The results shows that the optimal scheme has theory basis for selecting point, test avoids pitch line more easily, prevents modal omission, and acquires better vibration mode.

**Keywords:** modal test; directional device; dynamic characteristics; rocket launcher; suspension point

### 0 引言

定向器是火箭发射系统中的重要组成部分, 其结构动力学特性对发射精度有极大的影响<sup>[1]</sup>。为了分析定向器的动力学特性, 需要对其进行模态测试。

目前, 在定向器模态测试中, 一般是根据试验人员的经验选择悬挂点、测点及参考点的位置, 这样的试验方案缺乏理论依据和技术指导, 可能影响试验数据的准确性和可靠性。

根据模态测试理论, 要使测件在给定频率段内的所有模态都能被充分激发, 获得准确可靠的模态参数, 应当选取合适的悬挂点、测点及参考点<sup>[2]</sup>。目前, 国内外学者对模态测试优化方面做了很多探索, 但还没有一套成熟的理论<sup>[3]</sup>。

笔者以某火箭炮定向器为研究对象, 对其有限元模型进行模态分析, 并进行了验证, 以确保在软硬件条件一定的情况下, 能够更加可靠地获取定向器的模态参数。

### 1 预试验分析

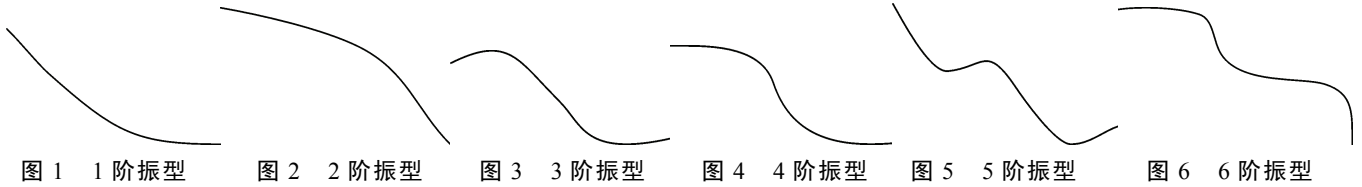
在对模态测试方案优化前, 为了得到其模态参数, 应当建立一个较为精确的有限元模型, 划分合适的网格, 将所有网格结点作为预选点, 通过模态计算, 得到各阶频率及各结点的振型。

#### 1.1 有限元模态分析

笔者使用 ABAQUS 分别建立了定向器的实体模型和简化模型。实体模型按照定向器的真实形状建模, 采用 S4R 单元进行了复合材料的划分; 简化模型则是将定向器简化为截面为圆管的梁<sup>[4]</sup>。忽略其细节, 采用 PIPE31 单元划分网格, 分别对二者进行模态分析。通过对比发现, 简化模型与实体模型计算出的各阶模态保持着高度相关性、一致性。因此, 为了简化计算过程, 笔者选择简化模型计算的模态参数来进行方案优化。图 1~图 6 为简化模型的六阶模态振型。

收稿日期: 2014-07-02; 修回日期: 2014-08-29

作者简介: 汤平安(1989—), 男, 安徽人, 硕士, 从事兵器发射理论与技术研究。



1.2 提取模态参数

选定简化模型进行模态分析后，需提取其模态参数，具体步骤：1) 利用 ABAQUS 的 Tools 中 set 功能，选取简化模型的所有网格结点，将其定义为组；2) 使用 Model 中 Edit Keywords，加入输出命令，即可输出模态参数<sup>[5]</sup>。

最终，在 dat 文件中得到各结点振型。图 7 为整理后的部分模态参数，其中结点号为有限元分析中网格划分得到的结点编号，振型并非代表真实位移，而是该阶模态中各点位移之比。

结点号	1阶	2阶	3阶	4阶	5阶	6阶
1	1	6.55E-09	-1	-1.47E-09	1	-1.94E-09
2	0.9718	6.36E-09	-0.9522	-1.40E-09	0.9326	-1.82E-09
3	0.9437	6.18E-09	-0.9043	-1.33E-09	0.8652	-1.71E-09
4	0.9155	5.99E-09	-0.8564	-1.26E-09	0.7978	-1.59E-09
5	0.8873	5.81E-09	-0.8086	-1.19E-09	0.7304	-1.48E-09
6	0.8592	5.63E-09	-0.7608	-1.12E-09	0.6632	-1.36E-09
7	0.831	5.44E-09	-0.713	-1.04E-09	0.5963	-1.25E-09
8	0.8029	5.26E-09	-0.6653	-9.74E-10	0.5296	-1.14E-09
9	0.7747	5.07E-09	-0.6178	-9.04E-10	0.4634	-1.03E-09
10	0.7466	4.89E-09	-0.5704	-8.34E-10	0.3977	-9.22E-10
11	0.7185	4.71E-09	-0.5231	-7.64E-10	0.3328	-8.07E-10
12	0.6905	4.52E-09	-0.4761	-6.94E-10	0.2686	-6.88E-10
13	0.6625	4.34E-09	-0.4294	-6.25E-10	0.2054	-5.65E-10
14	0.6345	4.15E-09	-0.3829	-5.56E-10	0.1433	-4.37E-10
15	0.6066	3.97E-09	-0.3369	-4.89E-10	8.24E-02	-3.04E-10
16	0.5787	3.79E-09	-0.2912	-4.22E-10	2.29E-02	-1.67E-10
17	0.5509	3.61E-09	-0.2459	-3.56E-10	-3.50E-02	-2.77E-11
18	0.5232	3.43E-09	-0.2012	-2.91E-10	-9.12E-02	1.13E-10
19	0.4955	3.24E-09	-0.157	-2.27E-10	-0.1455	2.55E-10
20	0.468	3.06E-09	-0.1135	-1.64E-10	-0.1979	3.95E-10
21	0.4405	2.88E-09	-7.06E-02	-1.02E-10	-0.2481	5.30E-10
22	0.4132	2.71E-09	-2.84E-02	-4.06E-11	-0.2961	6.59E-10
23	0.3859	2.53E-09	1.30E-02	1.96E-11	-0.3416	7.81E-10
24	0.3588	2.35E-09	5.36E-02	7.87E-11	-0.3845	8.94E-10
25	0.3319	2.17E-09	9.33E-02	1.36E-10	-0.4248	9.98E-10
26	0.3051	2.00E-09	0.1321	1.93E-10	-0.4623	1.09E-09
27	0.2785	1.82E-09	0.1699	2.48E-10	-0.4969	1.18E-09
28	0.252	1.65E-09	0.2066	3.01E-10	-0.5285	1.25E-09
29	0.2257	1.48E-09	0.2423	3.52E-10	-0.557	1.30E-09
30	0.1996	1.31E-09	0.2768	4.02E-10	-0.5824	1.35E-09

图 7 部分模态参数

2 测试方案优化

2.1 悬挂点

模态试验中通常使用自由-自由边界条件，理论上在自由-自由边界条件下，测件不能接触任何物体，但在现实情况下是难以实现的。通常，在实际测试中，都是用软弹簧、弹性绳悬挂测件，来模拟自由-自由边界条件<sup>[6]</sup>。那么，要想尽可能减小悬挂对测试的附加作用，就应当选择合适的悬挂位置，使其对结构的干扰最小<sup>[7]</sup>。

1) 平均驱动自由度位移。

在一个多自由度系统中，响应点  $m$  和激励点  $n$  之间的频响函数为

$$H_{mn}(\omega) = \sum_{r=1}^N \frac{\varphi_{mr}\varphi_{nr}}{M_r(\omega_r^2 - \omega^2 + j2\zeta_r\omega_r\omega)}$$

其中： $\varphi_{mr}$  表示第  $m$  个自由度的第  $r$  阶振型； $M_r$  为模态质量； $\zeta_r$  为阻尼比。当激励频率接近  $\omega_r$  时，近似有

$$H_{mn}(\omega) = \sum_{r=1}^N \frac{\varphi_{mr}\varphi_{nr}}{jM_r2\zeta_r\omega_r^2}$$

线性系统的位移响应幅值与频响函数幅值成正比关系，对此再做假设，当振型以质量矩阵归一化后，各阶阻尼几乎相等，就得到

$$X(\omega) \propto \sum_{r=1}^N \frac{\varphi_{mr}\varphi_{nr}}{\omega_r^2}$$

定义第  $i$  个自由度的平均驱动自由度位移为

$$ADDOFD(i) = \sum_{r=1}^N \frac{\varphi_{ir}^2}{\omega_r^2}$$

ADDOFD( $i$ ) 用以计算在一定激励下，第  $i$  个自由度的各阶平均响应是多少。为了尽可能模拟自由边界条件，应当使每一个悬挂点尽量地接近测件各阶振型的节线处，这样得到的悬挂点振动响应最小，可以尽可能减少悬挂对测试的影响。因此，通常可以对有限元模型中各个结点的模态参数进行计算，挑选平均驱动自由度位移最小的点作为悬挂点<sup>[6]</sup>。

2) 最优驱动自由度位移。

使用平均驱动自由度位移法选出的悬挂点可能会在某阶响应较大，从而使测件在该阶频率下产生较大振幅。为了克服这一缺陷，笔者引入最大驱动自由度位移的概念，通过比较各结点在各阶频率下振型取得的最大值，以评价一个结点是否适合作为悬挂点，如下式所示：

$$D_{\max}(i) = \max_r |\varphi_{i,r}|$$

$D_{\max}(i)$  的值代表结点  $i$  在关心频率段内最大的响应值，它的值越高，意味着该点越不适合作为悬挂点。因此，悬挂点应该避免最大驱动自由度位移值高的点。

综合以上 2 种方法的优劣，笔者将平均驱动自由度位移与最大驱动自由度位移一起作为目标函数，选取其中参数值最小的点作为悬挂点，公式如

下所示，即为最优驱动自由度位移。

$$D_{\text{best}}(i) = \text{ADDOFD}(i) \times D_{\text{max}}(i)$$

$D_{\text{best}}(i)$  值是前 2 个参数值的乘积，值越大，代表该点的平均驱动自由度位移响应与最大驱动自由度位移响应越大，就不适合做悬挂点。将简化模型的模态参数代入 Matlab 程序加权计算后，得到最优驱动自由度位移响应值分布图，如图 8 所示。图中画圈位置为适合作为悬挂点的区段，最终选择 29、110 点作为悬挂点。

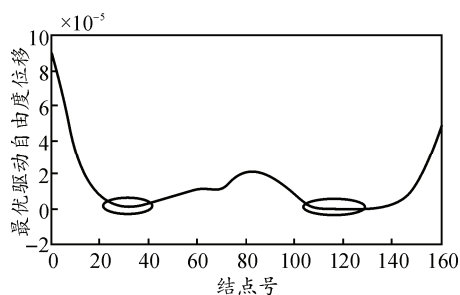


图 8 最优驱动自由度位移

## 2.2 测点

根据 Maxwell 互易性定理，如果在 2 个点激励引起 8 个点响应，就等同于在同样的 8 个点的激励引起的这 2 个点的响应，也就是说，激励点和测点可以互相交换<sup>[8]</sup>。那么，为了激发出测件的各阶模态，应当取平均驱动自由度位移响应值较大的点作为测点，在所有测点中，选响应值最大的点作为参考点即可。但是，如果只考虑响应值大小，这就会导致选出的测点位置过于集中，影响振型的显示，所以，笔者通过引入香农定理来选取测点。

### 1) 香农定理。

Norris Stubbs 指出，应当使用香农定理来选取测点，步骤如下：① 测出测件关心频率范围内最高频率；② 估算出该最高频率的半波长；③ 在半波长的每个节点处设置一个测点；④ 在半波长上均匀布置 2 个测点<sup>[9]</sup>。

使用香农定理选择测点，可保证测点均匀分布于测件上，得到良好的振型。通过有限元模态分析可获得定向器结点的位移，对其进行曲线拟合，得到其波长为 1 000 mm，再以其半波长 500 mm 为单位均分定向器即可保证其振型完整，从兼顾准确性和效率的角度考虑，笔者选择 150 mm 为单位划分。

### 2) 选取测点。

根据香农定理，将定向器划分为等距的 11 段，将有限元计算得到的模态参数代入 Matlab 程序中，

计算出平均驱动自由度位移响应值(如图 9 所示)，选取各段中响应值最大的点作为测点，如表 1。

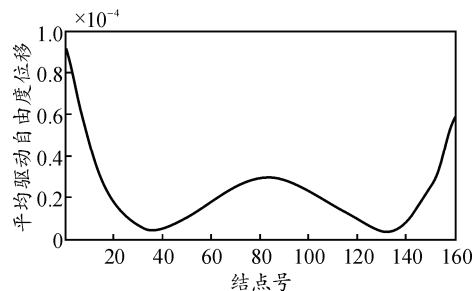


图 9 平均驱动自由度响应值

表 1 响应值最大点

段号	对应点号	响应值最大点
1	1~15	1
2	16~30	16
3	31~45	45
4	46~60	60
5	61~75	75
6	76~90	81
7	91~105	91
8	106~120	106
9	121~135	135
10	136~150	150
11	151~165	166

## 2.3 参考点

在单点激励和多点测量(SIMO)测试中，参考点的选择极为重要，既可是力锤激励点，又可是传感器测试点。如果将参考点设置在某阶振型的节点处，就极可能因为响应过小而得不到该阶模态<sup>[10]</sup>。因此，为了得到测件的完整模态，需要将参考点放在一个响应较大、同时避开各阶节点的位置<sup>[11]</sup>。在这里，使用最优参考点法，选出结构中能激励出最大响应的最优参考点位置，再用最差参考点法，排除结构中可能会导致某阶模态无法被激励出来的最差激励点位置。这样，获得的参考点才能有效地测出结构各阶振型，同时，各阶振型的响应又比较大<sup>[12]</sup>。

### 1) 最优参考点。

为了选取较好的参考点，使测件的模态被充分激发，应当选择远离节线位置并且平均响应较大的点，即为最优参考点，用数学形式表达即为

$$\text{ODP}(i) = \prod_{r=1}^m |\varphi_{i,r}|$$

式中： $\varphi_{i,r}$  表示有限元模型上第  $i$  点的第  $r$  阶振型； $m$  为总的模态阶数。ODP( $i$ ) 的值是将各阶的振型进行连乘，是它们的乘积，这个值越高，说明该点离节线越远，越适合作为参考点；反之，参数值接近 0 的点，离节线位置相对较近，不适合做参考点。将提取的模态参数代入 Matlab 程序中，计算得出最

优参考点号为 1、166。

2) 最差参考点。

通过最优参考点法选出了参考点，为了防止参考点出现总的响应值较大、在某阶振型却较小的情况，笔者引入最差参考点法。最差参考点法通过计算有限元模型中结点在各阶中的最小振型，来判断一个点是否适合作为参考点。公式如下：

$$NODP(i) = \min_r (|\phi_{i,r}|)$$

式中  $NODP(i)$  表示第  $i$  个自由度在各阶振型中的最小值， $NODP$  的值越大，越不适合作为参考点。将模态参数代入 Matlab 程序中处理，得到最差参考点 (如图 10 所示) 为 17、23、38、60、83、84、109、129、144、150，发现选取的最优参考点与最差参考点并无交集，故仍然选 1、166 点作为参考点。

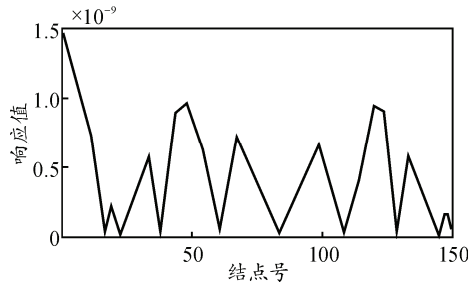


图 10 最差参考点

3 试验模态分析

在得到优化的悬挂点、测点及参考点后，将其标记在定向器的相应位置上，用弹性绳悬挂在最优悬挂点位置，模拟自由-自由边界条件，如图 11。

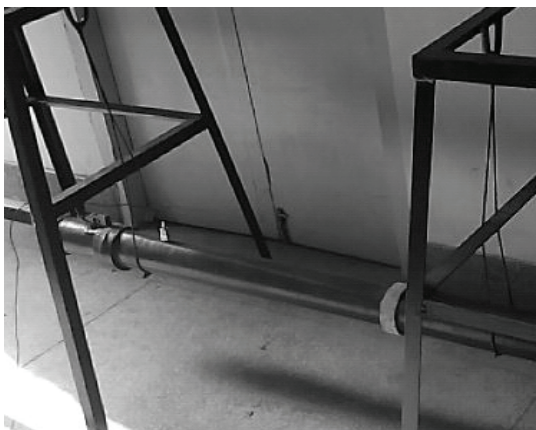


图 11 实验设置

测试中，笔者使用单点激励和多点测量的方法，测出定向器各测点的频响函数，进而识别出各阶模态。测试使用的设备包括安正模态测试系统、联能 LC-01A 型力锤和联能 CA-YD 型传感器。由于在关注的 0~700 Hz 范围内，塑胶锤头力谱衰减仅为 2~

3 dB，而橡胶锤头衰减较为明显，达到 20~40 dB。为充分激发出模态，力锤锤头选用塑胶头。传感器选用 CA-YD-107 型，与 CA-YD-109 相比，其质量较轻 (28 g)，只有后者的 1/7，可以减少附加质量对测试的干扰。

测试过程中，传感器位置不变，按照测量顺序逐点用力锤进行激励，每个点测 2 次，取相干函数值在 80% 以上的数据作为结果，直至测完所有点。测得前 6 阶频率。各阶振型如图 12~图 17 所示。

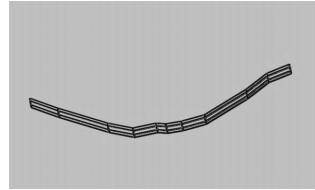


图 12 1 阶振型

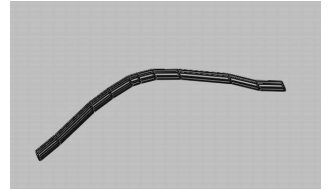


图 13 2 阶振型

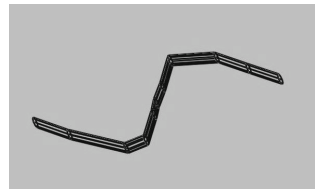


图 14 3 阶振型

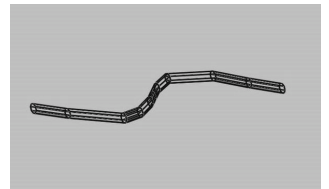


图 15 4 阶振型

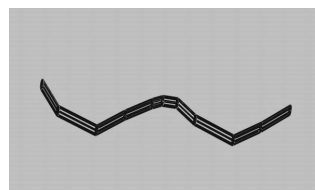


图 16 5 阶振型

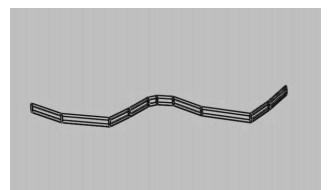


图 17 6 阶振型

将采用经验测试方案得到的结果 1 与优化方案测得的结果 2 对比，发现 2~6 阶模态基本一致，但结果 1 中却没有一阶模态。结果 1 出现了模态遗漏，原因有 2 点：

1) 定向器为近似对称的物体，那么它的模态应该会出现对称模态，即在 1 阶弯曲模态应该有 2 个相近的频率；

2) 与有限元模型的模态振型 (图 1~6) 比较，经验测法没有得到一阶弯曲的对称模态。

因为经验测试方案的悬挂点、测点及参考点不佳，导致其一阶模态上响应过小，不能被识别。

表 2 固有频率 Hz

阶数	结果1	结果2
1	—	94.978
2	127.500	122.508
3	280.000	280.375
4	345.000	342.058
5	532.500	532.174
6	635.000	623.947