

# 南京航空学院

## 弹性限位对稳瞄隔振系统动响左的影响

### 一. 引言

根据航空航工业部 602 研究所的技术咨询要求, 本报告分析了弹性限位引起的非线性因素对稳瞄隔振系统动特性的影响, 着重研究了无限位、单侧限位、双侧限位等状态下稳瞄隔振系统在铅垂方向强正弦振动环境下的动响左数值介, 提供了若干定性结论.

### 二. 力学模型及动响左数值解法

由文献 [1], [2], 当稳瞄系统的 4 个悬挂点受同振幅、同相位的铅垂激励时, 稳瞄系统中可动部分 (同称之稳瞄口) 的动响左基本仅含铅垂分量, 其它方向的线性运动, 前边动因解耦设计措施而可不计. 因此, 稳瞄隔振系统的力学模型是一单自由度系统.

稳瞄隔振系统沿铅垂方向的隔振功能由图 1 中 4 个配有限位橡胶块的圆柱弹簧支承来实现; 另外, 稳瞄口向上的铅垂位移还受到了卵形板的弹性的

# 南京航空学院

束. 因此, 稳瞄隔振系统的力学模型可同化为图 2 中的双侧弹性限位分段线性系统.

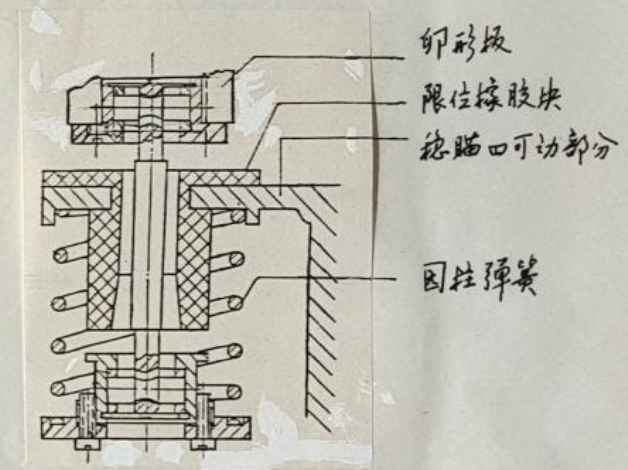


图 1. 稳瞄隔振系统 4 点悬挂装置之一

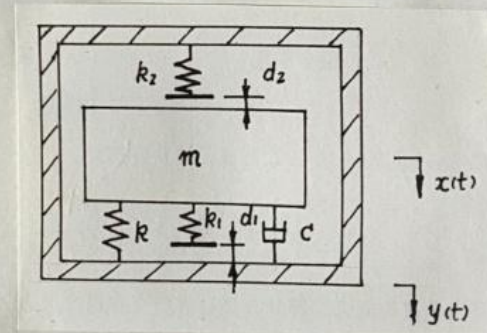


图 2. 有双向弹性限位的分段线性隔振系统

以系统的静平衡位置为基准建立图2示物理坐标  
 $x, y$  分别代表稳瞄口及卵形板的绝对位移, 记稳瞄口相对于卵形板的位移为  $z$

$$z(t) = x(t) - y(t). \quad (1)$$

由此可建立稳瞄口的相对运动微分方程

$$m\ddot{z}(t) + c\dot{z}(t) + p(z(t)) = -m\ddot{y}(t) \triangleq -mY_0 \sin \omega t, \quad (2)$$

其中  $m$  是稳瞄口质量,  $c$  是与方位化的粘性阻尼系数,

$p(z)$  反映了系统中弹性恢复力的分段线性特性

$$p(z) = \begin{cases} kz, & -d_2 \leq z \leq d_1, \\ kz + k_1(z - d_1), & d_1 < z, \\ kz + k_2(z + d_1), & z < -d_2. \end{cases} \quad (3)$$

式中的刚度  $k, k_1, k_2$  及间隙  $d_1, d_2$  含义参见图2.

这一分段线性系统初始静止状态下受强正弦基础激励后为运动方程难以有解析或半解析解, 为此我们引入状态变量

$$\begin{cases} z_1(t) = z(t) \\ z_2(t) = \dot{z}(t) \end{cases} \quad (4)$$

将其转换为便于数值分析的一阶非线性微分方程组的

初值问题

$$\begin{cases} z_1(t) = z_2(t), \\ \dot{z}_2(t) = -[p(z_1(t))/m + 2\xi\omega_n z_2(t) + Y_0 \sin \omega t], \end{cases} \quad (5.a)$$

$$\begin{cases} z_1(0) = 0, \\ z_2(0) = 0, \end{cases} \quad (5.b)$$

其中

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}}, \quad \xi = \frac{c}{2\sqrt{mk}} \quad (6)$$

是由系统线性微振动所定义的固有频率及阻尼比.

为适应卵形板这样较刚硬的弹性限位引起的系统加速度突变分析, 我们采用了变步长 RKF 数值积分方法求解方程(5), 计算过程在 DSNS-1.0 非线性隔振缓冲系统动态仿真软件 [3] 基础上改造后进行.

### 三. 计算条件及参数

根据航空航工业部 602 研究所提供的下述参数

$$\begin{cases} m = 36 \text{ kg}, \\ k = 1.8 \text{ kg/mm} = 17640 \text{ N/m}, \\ k_1 = 26.6 \text{ kg/mm} = 260680 \text{ N/m}, \\ d_1 = 5 \text{ mm} = 0.005 \text{ m}, \end{cases} \quad (7)$$

# 南京航空学院

$$l_{d2} = 6 \text{ mm} = 0.006 \text{ m},$$

及双方协议的卵形板刚度估计值

$$k_2 = 10k_1 = 2606800 \text{ N/m}, \quad (8)$$

我们对以下几种状态和参数条件的全部组合进行了动力学数值分析

1. 限位条件: 无限位, 仅橡胶块限位, 双侧均限位;
2. 阻尼取值:  $\xi = 0.0, 0.02, 0.05, 0.10$ ;
3. 激励条件:  $Y_0 = 0.19, 0.29, 0.39, 0.49, 0.59, 0.69, 0.79$  为 6Hz 正弦波。

总计有 168 次动力学计算历程, 部分典型的稳瞄口绝对加速度、相对位移和支承恢复力的滞后回线示于图 3 - 图 16 中, 采用单位为 ISO 制, 数字后缀 m 代表  $\times 10^{-3}$ 。

## 四. 结果分析与讨论

### 1. 无限位条件下动力学

当不计橡胶块及卵形板的限位作用时, 方程(5)成为线性隔振系统, 图 3 给出了激励为 0.19 时不同阻尼条件下的稳瞄口绝对加速度和相对位移, 至于其它激励水平下的动力学自然与图 3 中的结果成比例。

# 南京航空学院

表 1. 无限位条件下的稳瞄口相对位移最大值 (mm)

$\xi \backslash Y_0$	0.19	0.29	0.39	0.49	0.59	0.69	0.79
0	2.838	5.676	8.514	11.35	14.19	17.03	19.87
0.02	2.678	5.356	8.034	10.71	13.39	16.07	18.75
0.05	2.462	4.924	7.386	9.848	12.31	14.77	17.23

表 2. 无限位条件下的稳瞄口绝对加速度最大值 (g)

$\xi \backslash Y_0$	0.19	0.29	0.39	0.49	0.59	0.69	0.79
0	0.142	0.284	0.456	0.568	0.710	0.852	0.994
0.02	0.134	0.268	0.402	0.536	0.670	0.804	0.939
0.05	0.124	0.248	0.373	0.497	0.621	0.746	0.870

根据图 3, 稳瞄口的相对位移总在瞬态响应的第一个波就达到最大值, 由此可推导出不同阻尼情况隔振系统进入限位区的激励水平, 对于我们比较关心的双侧限位情况, 是橡胶块还是卵形板首先起限位作用取决于卵形板的初加速度  $\ddot{y}(0+)$  的方向。

- (1) 若  $\ddot{y}(0+) > 0$ , 则系统首先受到橡胶块限位, 临界激励加速度幅值为

# 南京航空学院

$$\begin{cases} \xi = 0, & Y_0 = 0.1769, \\ \xi = 0.02, & Y_0 = 0.1879, \\ \xi = 0.05, & Y_0 = 0.2039. \end{cases} \quad (9)$$

(2) 若  $\ddot{y}(0^-) < 0$ , 则系统首先受到矩形板限位, 临界激励加速度幅值为

$$\begin{cases} \xi = 0, & Y_0 = 0.2119, \\ \xi = 0.02, & Y_0 = 0.2249, \\ \xi = 0.05, & Y_0 = 0.2439. \end{cases} \quad (10)$$

显然阻尼比的变化对系统是否进入限位状态有影响, 但以  $\xi = 0$  和  $\xi = 0.05$  这两种较为极端的情况来看, 临界激励加速度幅值相差不超过 15%。

## 2. 双侧限位条件下的响应

表3. 双侧限位,  $\ddot{y}(0^+) > 0$  时总瞄口最大相对位移值 (mm)

$\xi \backslash Y_0$	0.19	0.29	0.39	0.49	0.59	0.69	0.79
0	2.838	8.876	9.322	8.947	8.994	10.31	9.685
0.02	2.678	5.290	8.998	8.572	9.022	9.674	9.160
0.05	2.462	4.925	8.398	8.195	8.780	9.312	9.033

# 南京航空学院

表4. 双侧限位,  $\ddot{y}(0^+) < 0$  时总瞄口最大相对位移值 (mm)

$\xi \backslash Y_0$	0.19	0.29	0.39	0.49	0.59	0.69	0.79
0	2.838	5.843	9.078	9.057	8.993	9.818	9.260
0.02	2.678	5.355	8.570	8.932	8.727	9.202	8.923
0.05	2.462	4.925	8.168	8.713	8.558	8.557	8.619

表5. 双侧限位,  $\ddot{y}(0^+) > 0$  时总瞄口最大绝对加速度值 (g)

$\xi \backslash Y_0$	0.19	0.29	0.39	0.49	0.59	0.69	0.79
0	0.142	9.274	10.07	11.36	11.32	14.85	11.62
0.02	0.134	0.479	10.27	10.96	10.66	10.26	11.26
0.05	0.124	0.248	10.00	10.28	10.17	9.79	9.24

表6. 双侧限位,  $\ddot{y}(0^+) < 0$  时总瞄口最大绝对加速度值 (g)

$\xi \backslash Y_0$	0.19	0.29	0.39	0.49	0.59	0.69	0.79
0	0.142	0.624	11.26	10.93	11.60	12.67	12.23
0.02	0.134	0.268	10.36	10.23	10.22	11.12	12.13
0.05	0.124	0.248	9.74	8.64	9.73	10.71	11.56

图4-图10 显示了一典型情况 ( $\xi = 0.02, \ddot{y}(0^+) > 0$ ) 下系统随激励水平增加而进入限位前后的响应变化。

表3-表6及动响左的时间历程表明:

- (1) 若激励幅值  $Y_0 \leq 0.19$ , 隔振系统呈线性. 这时稳态响左中加速度峰值  $\leq 0.1429$ , 稳态响左将因系统的隔振效果而保证加速度峰值  $< 0.19$ .
- (2) 当激励幅值  $Y_0 = 0.29$  左右时, 系统将由阻尼比及初始激励  $\dot{y}(0+)$  的方向决定是否进入限位状态. 一旦进入限位状态, 则稳态响左的绝对加速度将因撞击橡胶块或卵形板而剧增, 譬如表5中  $\xi=0$ ,  $Y_0=0.29$  的情况.
- (3) 当激励幅值  $Y_0 \geq 0.39$  后, 系统总要进入限位状态, 这时动响左呈复杂的非线性特性. 主要表现有:
  - (a) 稳态响左的绝对加速度高达  $10g$  左右, 即使是系统的稳态响左也远高于激励水平, 隔振功能被破坏.
  - (b) 在多数情况下稳态响左的绝对加速度随激励水平的提高或阻尼比的降低而增加, 但亦有个别例外. 绝对加速度值当  $Y_0$  由  $0.29$  增加到  $0.39$  突增到  $10g$  左右, 但  $Y_0$  继续增加时变化则不大.

- (c) 稳态响左相对位移随激励水平和阻尼比变化的趋势与绝对加速度的规律相似; 强激励下沿橡胶块方向 ( $z(t) > 0$ ) 的相对位移峰值在  $8\text{mm} - 10\text{mm}$  左右, 沿卵形板方向 ( $z(t) < 0$ ) 的相对位移峰值在  $6 \sim 7.5\text{mm}$ .
  - (d) 强正弦激励下系统的动响左谱成份极为复杂, 包含有各种亚谐和超谐成份. 随激励水平的提高并不明显使系统响左峰值增加, 但谱成份急剧增加, 乃至出现亚谐共振并分叉为混沌响左 (参见图11-图13).
3. 仅橡胶块限位条件下的动响应.
- 这是一种理想化后的情况, 图14-图16提供了系统进入限位状态后的动响应. 由于仅有下侧限位, 故稳态响左撞击橡胶块后引起的向上相对位移很大; 而绝对加速度峰值小于双侧限位的情况, 且随激励水平的提高逐渐增加.

## 五. 总结

1. 对于含弹性限位装置的稳瞄隔振系统, 只有当激励水平低于 (9)、(10) 式所给出之临界值时才有所设计的隔振效果。
2. 一旦上述条件不满足, 即外激励过大, 则隔振系统呈复杂的非线性动力学特性, 稳瞄口相对位移因橡胶块或卵形板的限位作用而在 6-10 mm 间, 但绝对加速度将高达 10g 左右, 这样的加速度峰值在激励幅值 0.39-0.79 间基本不变, 但谱成份极为复杂。
3. 若仅有橡胶块限位, 则稳瞄口撞击橡胶块后引起的反向位移很大, 绝对加速度峰值则不如双侧限位时恶劣。

## 参考文献

1. 顾仲权等, 小羚羊/HOT 与 Z9W/HJ8 稳瞄系统隔振模态测试报告, 南京航空学院隔振工程研究所, (1991)。
2. 胡海岩等, 小羚羊/HOT 与 Z9W/HJ8 稳瞄系统隔振设计分析, 南京航空学院隔振工程研究所, (1991)。
3. 胡海岩等, 非线性隔振缓冲系统的动态仿真软件 DSNS-1.0, 系统仿真学报, 4(2), (1991)。