**一 隔振系统的幅频特性**

为简化分析，将浮床、门组件、燃料组件等浮动结构简化为刚体，因此该浮动结构与减震器构成的系统仅包含六个自由度。不考虑耦合运动的情况下，隔振系统的各自由度运动微分方程为：

(1)

变换后得：

(2)

其中*u*为汽车、火车、船等运输设备的承载基础位移，*x*为浮动结构相对基础的位移，，。

两边作傅氏变换，得到系统的传递函数：

(4)

则浮动结构的相对位移传递率为其绝对值，取，有：

(5)

浮动结构的绝对位移表示为相对位移与承载基础位移之和，其传递函数为：

(6)

因此浮动结构的绝对位移传递率为：

(7)

分别绘制与如图1与图2所示。相对位移也表示浮动结构相对于容器内腔的位移，相对位移越大，减震器的变形也越大。图1与图2中，当基础振动频率远低于系统固有频率时，相对位移为0，绝对位移等于基础的位移，即浮动结构相对于容器静止；当系统固有频率远低于基础振动频率时，相对位移等于基础的位移，绝对位移为0；当时，<1，系统起减振效果。



**图1 相对位移幅频特性**



**图2 绝对位移的幅频特性**

新燃料运输容器的重心略微偏离减震器布置的对称中心，因此会出现耦合运动。以容器纵向为例，由于浮动结构的重心略高于减震器支撑点所在的平面，当容器的承载基础沿容器纵向振动时，浮动结构除了会沿纵向平动外，还会伴随着绕水平横轴的转动，此时耦合的运动方程为：

(8)

其中，为浮动结构的转角，为浮动结构重心与减震器的垂直高度差，*I*为浮动结构转动惯量，为各个减震器与过重心的水平横轴的距离，n为减震器个数，的大小描述了减震器分布相对于重心的距离。

取，对上式作傅氏变换后整理得：

(9)

取，，，可求得传递函数：

(10)

其中为相互独立时平动自由度的相对位移传递函数，同公式(4)。由上式可知，B/A与B/C的幅值描述了耦合程度的大小，其值分别为：

(11)

(12)

式中，分别为相互独立时平动自由度与转动自由度的绝对位移传递函数，同公式(6)。

由式(12)可知，浮动结构重心偏差*h*越小、越大即减震器分布距离重心越远，则越小，耦合程度越低。当重心偏差h趋近于0时，此时平动的传递函数为与相互独立时的相同。

对于沿纵向，垂向方向的运动，新燃料运输容器重心偏差较小，减震器分散，值非常小，可仍近似地按照相互独立的系统进行简化分析。

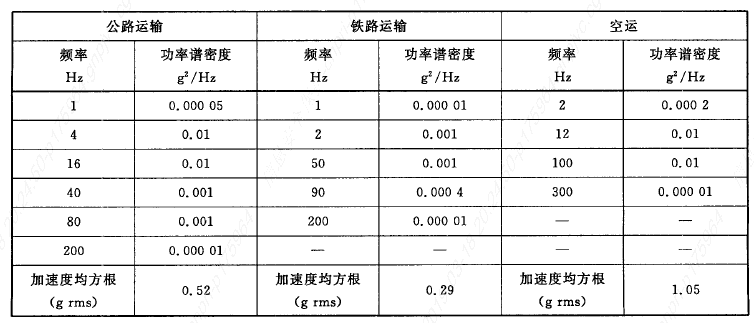
**二 隔振系统垂直方向的随机振动分析**

根据随机振动理论，对于单一输入的PSD值，系统的输出为:

则系统响应的均方根值为：

假设运输工具承载基础的随机振动服从高斯正太分布，对于均值为0的随机振动，其均方根值RMS即为其标准差，对应概率为68.27%。高偏差的振动发生的概率很低，因此，实际计算中一般取3 sigma为计算的上限，其对应概率为99.737%。

下表列举了ASTM D4728-06中不同运输方式的几种不同振动强度的加速度功率谱密度曲线。



不考虑空运时，公路运输的功率谱密度曲线包络铁路运输，其功率谱密度曲线如图3所示，该功率谱的加速度均方根值为0.52g。以固有频率为10Hz，阻尼比的隔振系统为例，在该功率谱密度曲线作为输入的情况下，系统的绝对加速度响应谱密度曲线为图4所示，其均方根值RSM=0.88g，3RMS=2.64g。



**图3 公路运输谱密度曲线**



**图4 系统加速度响应谱密度曲线**

为寻找系统合适的固有频率范围，将该公路运输谱密度曲线作为输入，施加在不同固有频率的隔振系统上，求其绝对加速度响应的均方根值，得到结果如图5所示。图5中，纵坐标表示绝对加速度响应的均方根值与输入谱密度的均方根之比。

图5中，对于阻尼比的系统，只有当固有频率小于4.1Hz时，其输出输入响应之比才会小于1，起减振效果。当固有频率很大时，输入输出之比逐渐接近1。系统的阻尼比越大，响应越小，减振效果越明显。若阻尼比，则固有频率小于6.8Hz时，其输出输入响应之比小于1。组件运输过程中，为保证组件安全，垂直方向加速度限值为6g，经计算，当系统阻尼比时，以该公路运输谱密度曲线作为输入，系统固有频率为任意值时，其加速度响应都满足3RSM<6g。



**图5 绝对加速度响应—系统固有频率**

**三 隔振系统的纵向冲击反应分析**

设计隔振系统的抗冲击性能时，使用的冲击输入是幅值*A*=10g，宽度=11ms的半正弦脉冲，即：

在该输入下，公式(2)可根据系统的脉冲反应函数按卷积求解表示为：

其中：

分别是位移、速度、加速度脉冲反应函数。在固定的冲击输入下，该响应为系统固有频率与阻尼比的函数。

为考察不同固有频率的隔振系统在该冲击下的峰值响应，采用数值求解方法求解运动方程，得到不同固有频率的隔振系统的绝对加速度响应峰值如图6所示。

图6中，在低频段，系统的固有频率越高，其响应的加速度峰值越大。当系统阻尼比时，为使系统峰值加速度小于4g，其纵向固有频率需低于10.4Hz。此外，在低频段，系统阻尼比越大，其加速度反应峰值反而越大，但在之间时变化并不明显。



**图6 冲击载荷加速度响应谱**