

苏联化学工业部

橡胶工业科学研究所

第二集

(内部资料·注意保存)

化学工业出版社

蘇聯化学工業部

橡膠工業科學研究院報告彙編

第二集

化学工業部橡膠工業研究設計院 譯

化学工業出版社

目 录

作为结构材料之橡胶的某些特性.....	Б.М. 郭里林科.....	1
橡胶金属缓冲器的应用振动计算.....	Б.М. 高列利克.....	12
在伸张和压缩下橡胶高弹性系数测定法和某些实际测定结果	Л.А. 維施尼茨卡娅等.....	26
测定橡胶平衡和静力定伸强力的简单仪器.....	Ю.С. 朱也夫.....	34
在潤滑和不潤滑时橡胶的滑动摩擦性质... ..	Л.Е. 別列古多娃等.....	47
用于气体介质的橡胶衬垫的计算和密封作用历程.....	Г.М. 巴尔捷涅夫等.....	55
吸引胶管的液压特征.....	А.А. 波辛等.....	73
检查蓄电池分离器的仪器.....	Г.К. 捷敏舍夫.....	100
用氯化电解液电镀的黄铜层使橡胶与金属密着.....	Н.В. 斯捷宾科.....	106
关于拟订耐热橡胶配方的问题.....	К.Ф. 卡露日宁娜等.....	120
再生胶中生胶物质的分子结构.....	И.А. 邵辛等.....	132
再生胶工艺性能的研究.....	И.А. 邵辛.....	141
含有再生胶的胶料配方的基本原则.....	Е.Я. 尼芬多娃等.....	159
未硫化橡胶和硫化橡胶中二苯胍的光比色测定法.....	В.Б. 斯季巴诺娃.....	183
测定生胶胶料和硫化胶中秋兰姆的光比色法.....	В.Б. 斯季巴诺娃.....	187

作为结构材料之橡胶的某些特性

技术科学副博士 B.M. 郭里林科

橡胶按其本身的性能，不同于其它的结构材料，橡胶由于具有弹性(高弹性)变形的特性，而近似固体。橡胶的可逆变形极限实际上比钢大20~30倍。如果在结晶体内，物质的粒子位于空间晶格的格点处，同时变形是由于粒子间距离的变化，那么硫化胶高度的变形能力使人想到，它具有柔韧性极大的结构。

在橡胶结构内具有少量稳定的键，它们保持材料的结合力和塑性流动。这些键在极大变形时(在扯断前)，在高频率($10^4 - 10^6$ 赫芝)下，以及在出现结晶类弹性的低温下，都可清楚观察到。此时橡胶弹性系数可以达到 $4 \cdot 10^4$ 公斤/厘米。在这种情况下，橡胶的应力只用虎克定律测定，即可写成如下的方程式：

$$\sigma = E_0 \varepsilon_{ynp}$$

式中： σ ——应力，公斤/平方厘米；

E_0 ——弹性系数，公斤/平方厘米；

ε_{ynp} ——相对弹性变形。

但是，人所共知，在标准温度时，橡胶受很小的力作用能引起显著的变形，而弹性系数是用 20~40 公斤/平方厘米的数值来测定。

这说明，除上述原子和分子之间相互的作用力之外，橡胶内还有另一种结合作用，克服这种结合力能引起高弹性变形¹。

根据现代物理学的概念，橡胶高弹性变形是生胶分子在橡胶内排成长链状，由于其组成基团的相互位置之间存有某些空间，所以链能够改变本身的形状。这些分子最可能有的状态是卷曲状。在橡胶的每一部分，长链分子的链节以一定的方式定向，并且互相之间具有一定的(可变的)形式¹。矢量场的存在能够破坏这种定向，同时由于保证动平衡需要新的条件，而使链节的形状也改变了。

由于每个分子是由数千个链节组成，所以分子链的形状也是极

其繁杂的。高弹性变形可以达到极大的尺寸，使人信服地证明了这一点。在力作用到橡胶时，在橡胶内产生弹性(结晶的)以及高弹性类型的可逆变形²。这种类型的总的平衡变形 D 可以作为弹性和高弹性变形的总和²：

$$D = D_{\text{B.Э.}} + D_{\text{y.n.p.}}$$

式中： D ——总变形；

$D_{\text{B.Э.}}$ ——高弹性变形；

$D_{\text{y.n.p.}}$ ——弹性变形。

弹性变形实际上是瞬间发生的，因此不决定于温度和时间。这种弹性变形是处于玻璃化状态下的橡胶的主要变形。

对设计人员来说，使用高弹性状态的橡胶具有实际的意义。这种状态的本质就是，高弹性变形决定于温度和时间。橡胶这种变形的特性，设计人必须加以考虑。例如，对牌号 2959* 硫化胶来说，考虑这种特性更为重要。

如果以这种橡胶在室温下的静弹性系数为一，则在零度时为 1.05；在 -20° 时为 1.43；而在 -40° 时为 6.7。如果以此种橡胶在室温和频率 1500 次/分时的动弹性系数为一，则在零度时为 1.4；而在 -20° 时为 6.7。上述资料令人信服地证明，在动力条件下，弹性系数显著地决定于温度。

同时橡胶除很小的形状弹性外(压缩系数 $E = 30 \sim 80$ 公斤/平方厘米)，又具有很高的容积弹性³(橡胶容积系数 $K \cong 27200$ 公斤/平方厘米)，所以橡胶又近似液体。与变形比较，橡胶容积压缩是非常小的，到 200~300% 的变形为止可以把橡胶看成是完全非压缩性的物体。

这一点可由下列理论见解⁴证明。

根据弹性理论

$$K = \lambda + \frac{2}{3} \mu \quad (1)$$

* 2959 胶成分(重量分)：天然胶—100；硫磺—3；促进剂 M —0.8；氧化锌—15；槽法碳黑—55；灯烟碳黑—30；羧基丁醛- α -萘胺—1；硬脂酸—1；矿质橡胶—2。

$$\lambda = -\frac{Em}{(1+m)(1-2m)} \quad (2)$$

$$\mu = \frac{E}{2(1+m)} \quad (3)$$

式中: K ——容积弹性系数, 公斤/平方厘米;

λ, μ ——梁明弹性常数;

E ——压缩系数, 公斤/平方厘米;

m ——波桑系数。

将式(2)和式(3)的 λ 和 μ 值代入式(1)中, 可求得:

$$K = \frac{E}{3(1-2m)} \quad (4)$$

因为切变系数 $G = \frac{E}{2(1+m)}$ 公斤/平方厘米

所以 $m = \frac{E}{2G} - 1 \quad (5)$

式(5)的 m 值代入式(4)中得:

$$m = \frac{3K - 2G}{2(3K - G)} \quad (6)$$

$$E = \frac{9KG}{3K + G} \quad (7)$$

由于橡胶容积系数 $K \approx 27200$ 公斤/平方厘米, 而结构橡胶的切变系数可能为 $3.5 \sim 20$ 公斤/平方厘米, 所以式(6)和式(7)中分子和分母 G 和 $2G$, 与 $3K$ 比较可以抛弃, 因而可写成误差为 0.03% 的两式:

$$m = 0.5 \quad (8)$$

$$E = 3G \quad (9)$$

由式(8)看出, 在各种工程计算中可将橡胶作为不压缩的物质。因此当橡胶在一个方向受压时, 必须考虑到橡胶在其它任两方向扩张的可能, 这点由橡胶零件(其中包括缓冲器)的设计观点来看是极为重要的。

图 1 为压缩下用之缓冲器正确和不正确的结构设计。

应该注意，方程式(9)表示纯压缩和切变变形是合理的。从上述，可以作出极重要的结论，如果材料的容积弹性系数 K 显著大于切变系数 G ，则这点在物理学上表明，材料易于受到切变应力的作用，而压缩性很小。

这种情况具有很大的实际意义。

比如为了得到比较柔软而有弹性的悬架，其零件结构中的橡胶的切变应具有所需的方向。

众所周知，固定在二个平行金属表面的橡胶在正常的方向下要比切线方向硬得多。

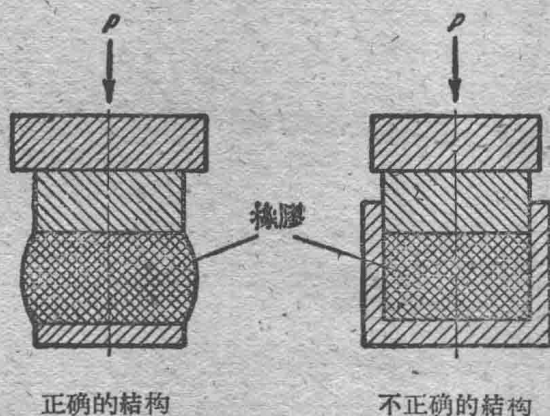


图 1 压缩下使用之缓冲器正确和不正确的结构图

橡胶的概念与非压缩性材料的概念一样，在物理学上可以理解试样形状和尺寸对压缩变形性能的影响。由于从流体静力学来看，橡胶实际上是不压缩的，因此，完全可以理解，橡胶的活动愈大，它的零件在该种负荷下的变形能力也愈大。

由此明确，橡胶试样愈厚(横断面相同)，试样就愈软，即在同样的负荷下变形能力大。

这些结论可由许多实验材料证明。

由于在压缩时，橡胶处于应力状态，端部磨擦影响着此种状态，所以在解决橡胶总的复杂问题之下，可以找出一个单一的解决方法。这种问题解决的复杂性引导某些试验者在同等条件下，即遵

守所规定的一定条件进行零件的試驗工作。如曾經确定，如果零件負荷表面与未負荷(形状因素)表面具有相同比例，則零件的变形性能亦相同^{5,6}。

这种結論对設計者特別重要。了解到一种规格零件的試驗資料后，應該制定出結構相同而规格不同的零件，并要保持零件的弹性性能。在此时應該保持設計出的零件負荷和未負荷表面原有的比例，而不需制定新的橡胶配方。这种概念在数学上对任何設計规格和形状都不是精确的。但是，这种概念几乎可以在各种情况下使用。

在热膨胀值方面，橡胶接近于液体。試驗确定，在 -70 到 $+85^{\circ}$ 的温度范围内，橡胶的单位体积与温度成直綫关系，而其单位体积的值决定于橡胶成分。在上述温度范围内，体积膨胀系数可以方程式来表示：

$$\frac{dv}{dT} = \beta + \alpha(T - 25) \quad (10)$$

式中： v ——橡胶体积；

β ——橡胶体积膨胀系数；

$$\beta = (2 \div 6.7) 10^{-4};$$

α ——系数： $\alpha = (3 \div 7) 10^{-7};$

T ——温度， $^{\circ}\text{C}$ 。

人所共知，橡胶的体积膨胀系数 $[(2 \div 6.7) 10^{-4}]$ 大于水的体积膨胀系数 $(2 \cdot 10^{-4})$ 的二倍，大約超过鋼的体积膨胀系数 $(3 \cdot 10^{-6})$ 的9~19倍。

橡胶和鋼的体积膨胀系数的这种差异，在橡胶金属制品升高温度时引起橡胶内应力的增长。

因此，为了最大地降低橡胶金属零件結構内的热应力，應該在 $+143^{\circ}$ (硫化温度)到室温条件下冷却时保証橡胶可能的收縮。为此目的，在制造圓筒衬套式緩冲器时(橡胶处于内外金属圓筒之間，并固定于其上)，外圓筒一般由二、三部分制成。

橡胶在热弹性性能方面接近气体。在固定变形下，应力与温度成正比例。橡胶的抗变形性能显著低于其它的材料。这一点从下列

材料弹性系数的比較中即可看出：(公斤/平方厘米)

鋼.....	$2.1 \cdot 10^6$
銅.....	$1.3 \cdot 10^6$
花崗石.....	$0.5 \cdot 10^6$
鉛.....	$0.07 \cdot 10^6$
皮革.....	$0.0012 \cdot 10^6$
結構橡胶	
(1)在玻璃状态下.....	$0.04 \cdot 10^6$
(2)在高弹性状态下.....	$(0.00003-0.0001) \cdot 10^6$

橡胶不同于鋼，它不具有物理的流动限度。人所共知，到扯断为止的大变形限度內，橡胶应力和变形的曲綫关系呈 S 形状 (图 2)。任何结构的橡胶金属零件变形太时，都保持着上面的曲綫关系。

从这点証明，橡胶弹性系数决定于变形程度。因此在选择结构的强度系数时，把它包括在一定程度的变形內。

但是，結構橡胶是用于有限的变形范围內，在此变形范围內，工程計算

可利用直綫关系 $\sigma - \epsilon$ 。如果以橡胶試样的真正横断面进行計算，则这点就更加正确。

在实际的結構工程計算中，可以認為在下述变形范围內硫化胶弹性不决定于变形程度：

1. 橡胶切变时相对变形 $\epsilon \leq 1$;
2. 硫化胶压縮时 $\epsilon \leq 0.25$;
3. 橡胶伸张时 $\epsilon \leq 0.5$ 。

这种結論完全符合橡胶工业科学研究所的試驗結果。

下述列举由相对切变变形程度所决定的圓筒衬套式緩冲器强度的軸向系数：

切变相对变形，毫米	0.2	0.6	1.0
强度軸向系数 公斤/平方毫米	263	252	238

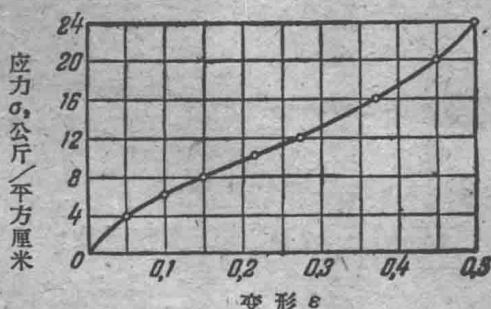


图 2 橡胶应力与变形的关系

如果結構物的橡胶部件在切变下工作，則实际上强度系数到相对变形 $\epsilon=1$ 止一直保持着不变的值。由此可见，橡胶切变系数在工作变形范围内不决定于变形程度。这一点就更适合于变形振幅为 0.5 毫米，即 $\epsilon=0.03\sim 0.05$ 的振动变形。

由于橡胶弹性具有极显著的松弛性能，則更加明确，在一次慢速加負荷时所测定的橡胶高弹性系数(称作靜力弹性系数)，不能作为循环动力負荷下評定橡胶性状的标志。

以测定冲击系数和以心軸內弹性波分布理論的推断为基础而进行的試驗(A. A 依里尤申等)証明，天然胶硫化胶动力弹性系数比靜力弹性系数(測定速度为 10 毫米/分)增加 28~30%¹。另外一些作者⁷在頻率為 500 次/分下也得到了不同硬度橡胶的动力和靜力弹性系数

类似的比例 $\left(\frac{E_d}{E_c}\right)$ 結果：

橡胶邵尔硬度 30 ± 3 45 ± 3 50 ± 4 60 ± 4 65 ± 4 70 ± 5

动力弹性系数与靜力系数的比例

$\frac{E_d}{E_c} \dots\dots\dots 1.50$ 1.32 1.22 1.18 1.21 1.30

动力弹性系数与靜力系数的比例

橡胶弹性在动力作用下的增长程度可以根据硫化胶松弛的一般数学理論測定。但是这种理論至今还没有。受到动力作用的硫化胶結構部件的工程計算可以正确地按下式进行：

$$\sigma = E_d \cdot \epsilon \quad (11)$$

式中 E_d ——动力弹性系数

設計者在設計橡胶零件时，應該利用这种重要的关系。

在結構橡胶分类方面，一般按硬度* 来区别。在硫化胶弹性系数和硬度之間沒有直接关系。如果橡胶是由同一生胶(天然胶)制成，并且种类相同的話(如結構橡胶)則此种关系是有一定的。

为了有一定方向，可以建議設計者利用下列不同硬度橡胶的靜

* 橡胶硬度的測定是根据金屬杆或球状体压入橡胶的 深度来測定(見 ГОСТ № 263-41 和 ГОСТ № 253-41)。

力切变系数值 G :

橡胶邵尔硬度	40±3	50±4	60±4	70±4
切变系数 公斤/平方厘米	4.9	6.7	9.8	13.7

如前面指出, 橡胶压缩系数等于纯压缩和切变时三倍的切变系数(见公式 9)。但是在选择橡胶压缩系数时, 应该考虑到对制品的规格和形状的影响。

比如, 某些作者指出, 在使用固定在金属上的橡胶时, 当高度与宽度比例 ≤ 1 时, 压缩系数为 $6.5G^5$ 。

研究橡胶垫的压缩(其胶料成分如表 1), Г.М. 巴尔切也夫及其同事 6.8 提出了将橡胶(材料)和制品(结构物)的弹性系数值联结在一起的方程式:

$$E_{изд.} = E_M(1 + \alpha\Phi) \quad (12)$$

式中: $E_{изд.}$ ——制品假定弹性系数;

E_M ——橡胶弹性系数;

α ——由端部磨擦条件决定的系数;

Φ ——形状系数。

衬垫的胶料成分

表 1

胶 料 成 分	橡 胶 类 型		
	I	II	III
КСК-30	100	100	100
硫黄	3	3	3
硬脂酸锌	2	2	2
硫酸苯基噻唑	1	1	1
碳黑	0	25	70

直径为 D 和高为 h 的圆筒, 其 $\Phi = \frac{E}{4h}$ 。固定在金属上的橡胶,

其系数 $\alpha = \text{const}$, 即这种制品的 α 不决定于橡胶成分。

分析文章⁶的资料能够确定出制品压缩系数 $E_{изд.}$ 和橡胶切变系数 G (表 2)的比例与橡胶形状系数 Φ 的关系, 橡胶成分同表 1。

表 2 的数据表明, 随着形状系数的增长, 比例 $\frac{E_{изд.}}{G}$ 也在增

比例 $\frac{E_{H3A.}}{G}$ 与形状系数的关系

表 2

形 状 系 数 Φ	橡 胶 类 型		
	I	II	III
	比例 $\frac{E_{H3A.}}{G}$		
1.0	6.5	6.0	4.5
2.0	10.0	9.0	6.0
3.0	14.0	12.0	7.5

长，而随着胶料填料的增加，这种比例下降。

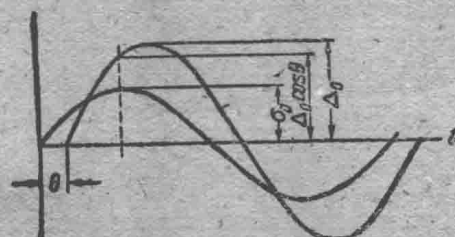


图 3 多次动力变形时橡胶应力
和变形的正弦曲线

对金属与橡胶相结合的结
构物来说，系数 $\alpha = \text{const}$ ，因
而制品的条件系数仅仅决定于
橡胶的弹性系数 E_M 、零件的
几何尺寸和形状。

在橡胶循环多次变形时，
结晶型的弹性变形实际上是瞬
间发生和瞬间消逝的，即在力
的作用相内，而高弹性变形在相上落后于负荷的作用。

图 3 为 τ 时间内多次动力变形下橡胶应力和变形的正弦曲线，
从正弦曲线看出，变形 Δ_0 在相上较应力 σ_0 滞后角 θ 。这是由于当橡
胶产生高弹性变形时弯曲键分子段发生了复杂的分配。自然，这种
分配不能瞬间发生，而是逐渐的。形成平衡的瞬间性质明显的决定
着橡胶变形的松弛性质。橡胶的这种特性，主要的表现是橡胶负荷
和去负荷的曲线不一致，即形成滞后环时。

滞后环的存在降低了橡胶缓冲器内摇摆系统共振的危险性，在
这方面来说它是好的。但是显著的滞后现象能引起橡胶在多次变形
时剧烈升温，从而，缩短了其使用期限。正确估计滞后损失作用的
正、负效应对橡胶金属结构物的良好工作有着决定性的意义。

結 論

根据某些橡胶結構性能的研究可以做出如下的結論和建議：

1. 橡胶具有极其显著的松弛性能，因此橡胶的动力弹性系数大于靜力弹性系数。在設計橡胶零件时，必須考虑到这种性能，并根据橡胶动力性能計算受力强度，或者在計算中加入动力校正系数。

2. 在实际应用的多次变形条件下橡胶的工程計算法可按下式进行：

$$\sigma = E_{\text{дин.}} \epsilon$$

3. 不同輪廓和形状的橡胶結構物具有不同的强度。因此，选择圓筒式結構的弹性系数可按下式进行計算：

$$E_{\text{изд.}} = E(1 + \alpha\Phi)$$

4. 在形状系数 $\Phi \geq 1$ 时， $\frac{E_{\text{изд.}}}{E}$ 比例是不同的，可能求到 12~14。

5. 橡胶弹性系数决定于温度，因此它的值可能由 10^4 到 2×10 公斤/平方厘米。

6. 橡胶实际上是非压缩性的，为使橡胶朝一个方向而变形，必須考虑到在結構上使硫化胶在一个方向或者是二个其它方向扩展的可能。

7. 在同样断面下橡胶高度越小和在同样高度下断面的面积越大，結構物的强度也就越大。

8. 关于橡胶非压缩的概念証明，結構物强度的变化几乎可以达到1000倍，因为强度与高弹性系数成正比，在限度范围内可接近体积压缩的系数。

9. 在純压缩和切变时，下述压缩和切变系数之間的关系是合理的：

$$E = 3G$$

10. 为了制取比較“軟”的結構物，橡胶零件的設置应考虑到橡胶在切变条件下应用。但是，此时結構物的强力完全由橡胶与金属結合强力而决定。

11. 硫化胶热膨胀系数比鋼大 9~19 倍, 因此在結構物內应考虑减去橡胶从硫化温度冷却到正常温度时的热应力。

参考文献

1. Б. А. Догадкин, Химия и физика каучука, Госхимиздат, 1947.
2. А. В. Александров, Ю. С. Лавуркин, Каучук и резина, №10(1939)
3. П. Бриджмен, Физика высоких давлений, ОНТИ, 1935.
4. Б. М. Горелик, Исследование теплообразования при гармоническом скручивании резино-металлических шарниров, Канд. диссертация НИИРП, 1952.
5. Kimmich, I. R. W., 103, 3, 45(1940).
6. Г. М. Бартенев, В. А. Лепетов, В. И. Новиков, ДАН СССР, 93, №1, 15 (1953).
7. Springer, Kautschuk, №4(1940).
8. Г. М. Бартенев, В. И. Новиков, ДАН СССР, 91, №5, 1027(1953).

橡胶金屬緩冲器的应用振动計算

技术科学副博士 B.M. 高列利克

为了防止振动，设备安装在有弹性支架（緩冲器）上。近几年来，为此目的主要是使用各种形状的橡胶金屬緩冲器，因为橡胶具有特殊的性能，利用橡胶来防止設備振动是极其简单的，而不需要使用极复杂的設備。但是，常常发生設備弹性支架系統，以及橡胶金屬緩冲器結構选择不够正确的事实。这在极大程度上是因为，在設計上述緩冲器时往往不能考虑到橡胶的技术可能性之故。因此，在某些結構中，对橡胶設計了极其高的負荷，而結構的橡胶部件又置于非标准温度条件下的介质中。有时設計师将緩冲器用在妨碍緩冲器及整个設備良好工作的非常繁重的条件下。

在橡胶零件的实际設計中，常常遇到这样的情况，同一类的橡胶在一种結構上能良好工作，而却完全不适用于另外一种。应当注意，用金属弹簧緩冲器消除振动时，是使材料具有一定的形状，而用橡胶絕緣振动时，是利用材料的性能。因此在設計橡胶金屬緩冲器时，應該考虑到橡胶的性能，以及其与温度、時間和变形条件的关系。本文即是叙述橡胶金屬緩冲器减振性能与橡胶性能（弹性系数和滯后損失）的关系。

一般，安装在弹性基座（緩冲器）上的物体具有 6 个自由度，因此，它受到沿坐标軸 x 、 y 、 z 的直綫振动，和对称軸 x 、 y 、 z （在笛卡尔坐标系内）的扭曲振动¹。

总的解决具有 6 个自由度的体系是非常复杂的，只有在部分情况下才能彻底解决。因此，常常单独的对每一自由度进行分析。这种簡單方法不能解决总的問題，但是非常有益于确定主要概况，和有助于緩冲器的振动計算¹。

自由振动的緩冲

固定在弹性支架（緩冲器）上的任何振动体系，在施以瞬間強力冲动时，要产生一定頻率的振动运动。如果沒有任何阻力，則此体

系将无限制的长久振动。这些振动的频率是内在的，因为振动的产生不受固定效应的力的影响。

弹簧缓冲器可以简单的认为是没有渐止损失的弹性基座。这种假设是十分正确的，它是在没有任何阻碍运动、即没有吸收振动体系动能的因素下进行振动的¹。可是，这些因素是经常存在的，比如利用弹簧缓冲器时，介质的阻力就是一例。

与没有渐止现象的理想弹簧不同，在橡胶金属缓冲器内，由于材料的内部摩擦（滞后现象），部分变形能量变成热。此时自由振动

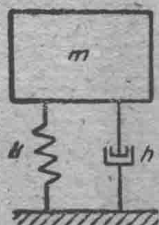


图 1 渐止振动缓冲器的振动体系图

没有外部能源，引起能量损失的原因是固定的。因此，振幅一定要随着时间逐渐减小，一直到完全停止（渐止振动）。这样，在实际的条件下，任何体系的自由振动都是渐止的，因为它受到了分散力的作用。

我们来看一下橡胶金属缓冲器内渐止振动的情况（图 1）；取内部摩擦力大致与运动速度成正比。

已知²，此种体系的运动微分方程式为¹：

$$mx'' + Kx + hx' = 0 \quad (1)$$

式中： m ——质量；

x'' ——加速度；

K ——缓冲器强度系数； $K = \frac{P_0}{x}$ ；

x ——位移；

Kx ——弹性力；

h ——体系摩擦系数；

x' ——速度；

hx' ——内摩擦力；

P_0 ——振动体系的重量。

解此式得： $x = \lambda e^{-\gamma t} \cos(\omega_1 t + \alpha) \quad (2)$

式中： x ——位移；

λ_1 ——渐止自由振动振幅； $\lambda_1 = \lambda e^{-\gamma t}$ ；

t ——時間；

ω_1 ——漸止自由振動的角頻率， $\omega_1 = \sqrt{\omega^2 - t^2}$ ；

ω ——非漸止自由振動的角頻率；

$$f = \frac{hg}{2P_0} \quad (3)$$

$$\omega = \sqrt{\frac{Kg}{P_0}} \quad (4)$$

g ——重力加速度。

当 $f = 0$ 时，得到具有振幅 λ 和頻率 ω 的非漸止自由振動公式，

即

$$x = \lambda \cos(\omega t + \alpha) \quad (5)$$

因为在時間增加 $\frac{2\pi}{\omega}$ 时，位移回到原值，因此运动是随時間循

环的：

$$T = \frac{2\pi}{\omega} = \text{const}$$

式中： T ——全部振動時間。

$$\text{振動的固有頻率 } n = \frac{1}{T} = \frac{\omega}{2\pi}$$

$$\text{如果 } \omega = \sqrt{\frac{Kg}{P_0}} = \pi n, \text{ 則}$$

$$n = 952 \sqrt{\frac{1}{x}} \quad (6)$$

式中： x ——位移，毫米。

这样，非漸止振動体系的固有頻率仅仅决定于緩冲器在标准負荷 P_0 下的位移。图 2 为非漸止体系的固有振動頻率与緩冲器弯曲的关系 ($\sin \varphi \approx 0$)。

如果 $f \neq 0$ ，即在橡胶金属緩冲器的情况下，体系的固有振動