

# 旋转活塞发动机

1

1974

陕西省农业机械研究所  
西安地区内燃机科技情报站  
西安东风车辆厂

专题讨论

三角活塞行星旋转式发动机的  
缸体震纹问题

王应宗

工业学院图书馆  
藏书章

一九七三年八月

# 目 录

## 专题讨论

三角活塞行星旋转发动机的缸体震纹问题 ----- 1

## 试验报告

翼片活塞差动式转子发动机试制报告 ----- 48

## 设 计

三角活塞油泵 ----- 58

## 译 文

余摆线真空泵的研究和初步试用情况 ----- 67

转子发动机的排气特性及其净化装置 ----- 73

转子发动机点火装置 ----- 91

## 新书介绍

旋转活塞发动机 1973年德文版 ----- 96

# 目 录

- 一、三角活塞行星旋转式发动机缸体型面的特殊磨损现象
- 二、缸体震纹是高频振动现象的结果
- 三、摩擦面出现波状磨损的条件
  1. 磨损与压力及速度的关系
  2. 接触线度、速度及振动周期条件
  3. 一般摩擦面引起运动物体振动的几种情况
- 四、三角活塞行星旋转式发动机的振源
  1. 径向密封片
  2. 活塞和主轴
  3. 齿轮机构
  4. 发动机机壳
- 五、三角活塞行星旋转式发动机缸体磨损分析
  1. 气压形变对缸体磨损的影响
  2. 其它构件的振动在震纹现象中的作用
  3. 燃烧状况对发动机寿命的影响
  4. 热变形对缸体型面磨损的影响

5. 润滑条件对缸体型面磨损的影响

6. 发动机工况对耐久寿命的影响

7. 缸体磨损情况的测量结果

8. 结论

## 六、关于克服缸体震纹现象的几点意见

1. 提高活塞强度

2. 改进气体密封系统

3. 改善发动机的燃烧过程

4. 克服不均匀热变形

5. 增强润滑作用

6. 选择适当的摩擦付

7. 提高工艺水平

8. 采用小排量多缸组合

## 一、三角活塞行星旋转式发动机缸体型面的特殊磨损现象

以双弧长短幅外旋轮线为缸体型线的三角活塞行星旋转式发动机在其发展过程中已显示了广阔的前途，目前已进入实用阶段。为了有可能使这类发动机在更广泛的领域内作为有效的动力机器，必须保证其在各种工况下具有足够的耐久寿命。

缸体是发动机最主要的磨损件之一，使其寿命达到实用要求是摆在我们面前的一个首要课题。由于外旋轮线加工工艺较为复杂，这类发动机对结构的严密性的要求大大超过往复式发动机，因而至少在目前还不能用往复式发动机更换缸筒的办法来解决这一问题。如所周知，这类发动机缸体型面的工作条件是十分恶劣的：径向密封片沿型线的滑动速度超过一般机械动配合件的相对滑动速度；同时缸体还要承受工作室内的高温高压负荷，这就使得缸体型面的耐久寿命问题表现得很尖锐。

国内外对三角活塞行星旋转式发动机的研制实践表明，该类发动机运行一定时间后，缸体上即出现一种特殊的磨损现象即缸体震纹现象。所谓震纹，是指缸体上出现的周期性如洗衣板状的波状磨损，其间距很密。在震纹出现的初期，发动机密封性能变劣，功率下降，油耗上升，运行稳定性大大降低。随后，震纹程度很快加剧，以致密封性能失效而完全不能工作。缸体震纹现象已成为当前影响发动机寿命的关键问题。

国外如西德 NSU 公司等，迄今尚未对缸体震纹现象有深刻地研究和作出令人信服的分析。他们目前主要着眼于径向密封片与缸体间摩擦付的选配问题。所采取的措施就是借助钼、铬、镍等稀有金属的耐磨性，来推迟震纹的出现。可见国外尚未真正摸清缸体震纹产生的原因与发展规律的本质联系。由于他们并不

是以消除震纹为出发点，因而亦未真正解决缸体与经向密封片的磨损问题。

我国广大工人阶级和工程技术人员在毛主席赶超世界先进水平的伟大号召鼓舞下，发扬自力更生，艰苦奋斗的革命精神，在旋转活塞发动机的研制工作中取得了很大成就，其中三角活塞行星旋转发动机也已接近实用阶段，因此也迫切需要解决发动机的耐久寿命问题。显然，根据我国国情，借助稀有贵重金属来推迟缸体震纹的早期出现决不能成为我们的方向。因此，这方面摆在我们面前的任务是：

1. 积极进行各种单项试验，为摸清震纹的产生及发展规律提供直接的资料，进一步暴露影响震纹程度的因素；

2. 认真开展理论研究。国内外实践所提供的资料已经暴露了缸体震纹产生的过程与影响震纹程度的某些因素。认真分析这些资料，找出影响震纹程度诸因素的内在联系，抓住主要的矛盾方面，确定从根本上消除震纹的主要方向。

我们将在本文中就此做初步的尝试，并就用普通材料为摩擦付时而达到实用发动机耐久寿命的问题谈一些极不成熟的意见。

## 二. 缸体震纹是高频振动现象的结果

三角活塞行星旋转式发动机缸体的波状磨损现象是由这种发动机特殊结构下的特殊工作状态所决定的。由于磨损呈现着明显的周期性，因此可以断定与此波状磨损面相接触的运动件必然存在着相应的振动过程。

目前，缸体型面的加工方法有多种，如刨成法，靠模法及拉

削法等。按不同方法加工出的缸体运行过程中均出现震纹。而且目前靠模法加工中使用的靠模是严格用刨成法校正的。这就使我们不能简单地将这种振动过程完全归结为缸体型面加工中留下的原始波纹所引起。这就使我们想到，径向密封片沿缸体型面滑动中可能产生了某种振动过程，于是在缸体型面上引起了与该振动过程相吻合的周期性震痕。然而此震痕出现后，密封片振动的阻尼相应减小，振动振幅增大，持续时间延长，从而使震痕很快发展。三角活塞行星旋转式发动机震纹的发展正是这样。例如在一些采用了贵重耐磨金属镀层的缸体上，其震纹出现较晚。但震纹一经出现，若发动机仍在原工况下继续运行，则震纹将急速加剧，导致缸体报废。

据国内外一些资料表明，此种震纹间距很密，但相邻震纹的间距不一定相等；另外在此震纹上面还有一种间距较宽，纹痕较粗的周期性波纹。关于这种情况可以做下面两点解释：

① 它们是由不同的振动过程所引起；

② 由于径向密封片沿外旋转线的滑动速度是变化的，因而在一个振动周期内对缸体上不同部位扫过的弧长不等。测量出震纹的间距，并求出径向密封片在该位置时沿外旋转线的滑动速度，即可求出引起该震纹的振动之频率。

径向密封片沿外旋转线的滑动速度由下式给出：

$$V = \frac{\omega e}{3} \sqrt{9 + K^2 + 6K \cos \frac{2}{3} \alpha} \quad (1)$$

式中： $\omega$  —— 偏心轴角速度；

$e$  —— 偏心距；

$K$  —— 形状参数；

$\alpha$  —— 偏心轴转角。



在测定某处震纹时，确定该处相对于缸体型线长轴的夹角  $\theta$  较为便利，因此需要将 (1) 式中的  $\alpha$  与  $\theta$  间的联系表达出来。

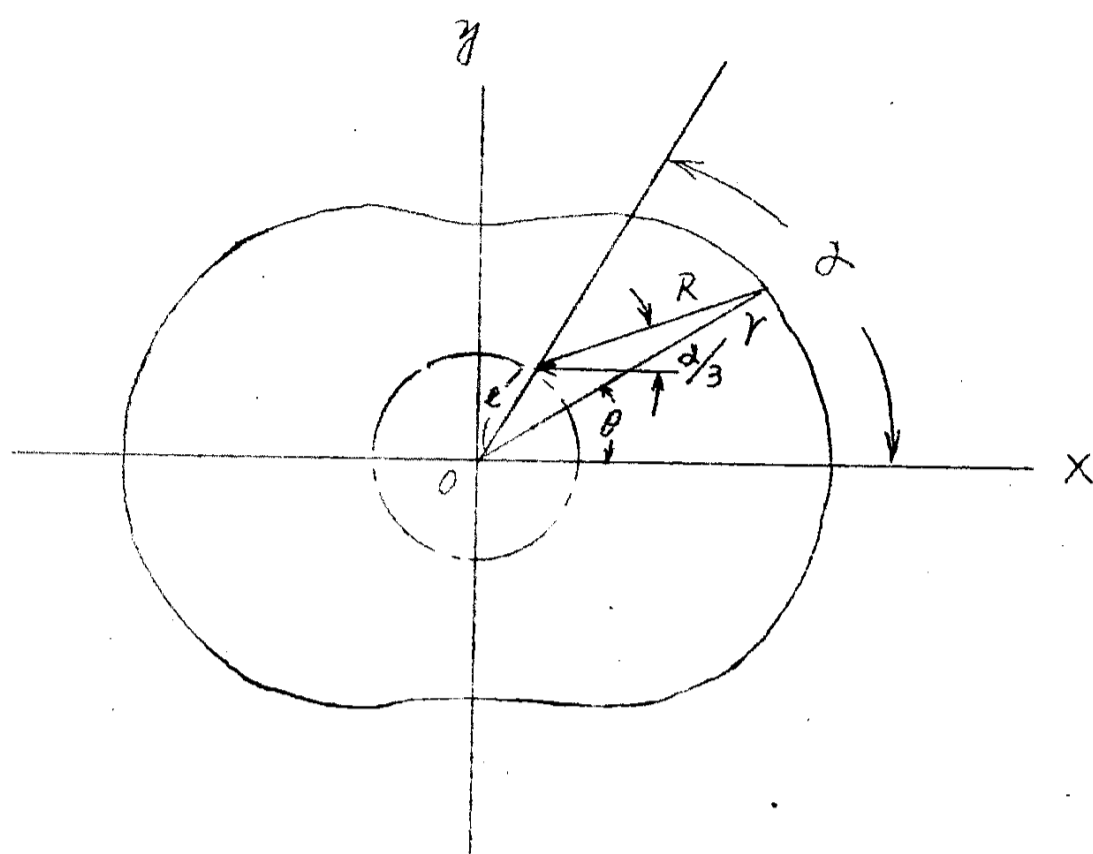


图 1. 缸体型线的几何关系

借助图 (1) 应用余弦定理即有：

$$r = \sqrt{R^2 + e^2 + 2Re \cos \frac{2}{3} \alpha} \quad (2)$$

式中  $r$  表示外旋轮线上某点相对于偏心轴中心的矢径。因此 (2) 式实际上就是缸体型线矢径的参数方程。其极角  $\theta$  由主轴转角  $\alpha$  确定。应用正弦定理，我们显然有：

$$\frac{r}{\sin(\pi - \alpha + \frac{2}{3})} = \frac{R}{\sin(\alpha - \theta)}$$

将 (2) 式代入整理得：

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{k \sin \frac{\alpha}{3} + \sin \alpha}{k \cos \frac{\alpha}{3} + \cos \alpha} \quad (3)$$

设某发动机以  $n$  转/分的转速稳定运行，在缸体上  $\alpha$  角处测得震纹间距为  $\tau$ ，于是可从 (3) 式求出  $\alpha$ ，代入 (1) 式求出径向密封片在该位置的滑动速度  $v$ ，则引起此震纹的振动之周期和频率为：

$$\left. \begin{aligned} T &= \frac{\tau}{v} \\ f &= \frac{v}{\tau} \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

据对某些经常处于某稳定转速的发动机缸体震纹的测量计算表明，引起震纹的振动之频率很高，大约在  $12 - 17 \text{ KH}_z$  范围内。因此认为缸体震纹是高频振动现象的结果。

### 三. 摩擦面出现波状磨损的条件

震纹现象不唯三角活塞行星旋转式发动机所独有，在处于类似的工作条件下，摩擦面也会出现相似的波状磨损现象，例如某些高速轴承上发现有类似的波状震影；齿轮加工中齿面上也存在着显然不属于加工刀纹的振纹；更明显地，在某些汽车路面上也出现有规律的起伏等。现就这类现象进行一般性的研究，这对深刻认识缸体震纹现象显然是必要和有益的。

#### 1. 磨损与压力及速度的关系：

接触面的磨损程度是取决于摩擦力的大小。摩擦力愈大，则造成的磨损就愈严重。摩擦力的大小与运动件所施于摩擦面的正压力有关，一般近似地有：

$$f_{\text{摩}} = \lambda N \quad (5)$$

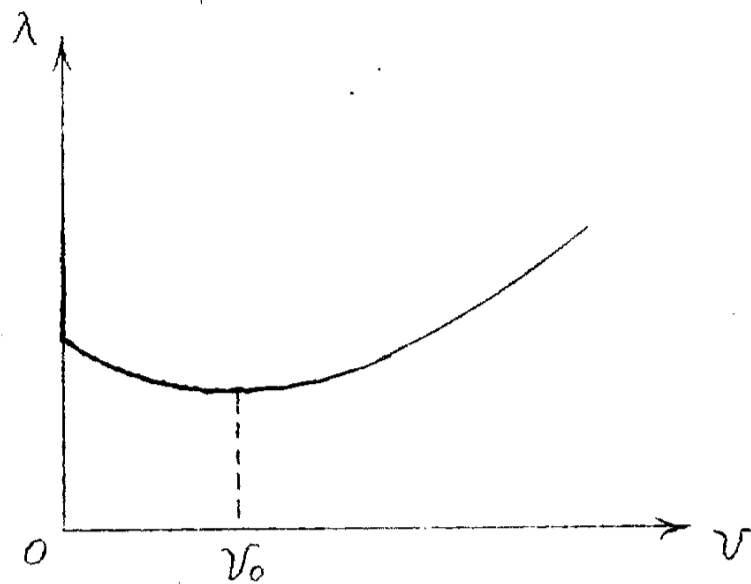


图 2. 摩擦系数与相对速度的关系

式中：

$f_{\text{摩}}$  —— 摩擦力；

$N$  —— 正压力；

$\lambda$  —— 摩擦系数。

摩擦系数  $\lambda$  一方面取决于摩擦面的性质，另一方面与相对运动的速度有关。图 2 是表示摩擦系数与相对速度的关系的曲线。从曲线上看到，当速度较小时，摩擦系数随速度的增加而减小，若速度超过  $v_0$  后， $\lambda$  则随速度的增加而增加。

对于不同性质的摩擦面， $v_0$  的值一般不同，不过  $v_0$  的值通常不很大。

## 2. 接触线度、速度及振动周期条件

很多运动件运动中存在着振动现象，但摩擦面上并没有留下波状磨损的痕迹。原来，这一特殊的磨损现象之是否出现不能仅由运动件的振动情况决定，还要有一定的其它条件，下面就此粗

略地加以探讨。

设物体A沿物体B以速度 $V$ 运动，A与B在运动方向的接触长度为 $L$ ，并且A在运动速度 $V$ 的垂直方向上存在着振动过程，振动周期为 $T$ ，在该周期 $T$ 内，物体A在 $V$ 方向运动的距离为 $\Delta S$ ，则

$$\Delta S = TV$$

a) 若 $L > \Delta S$ ，则A在垂直方向振动过程中对接触面的不同强度的压力将相互叠加起来。对B来说，所承受的是振动冲击

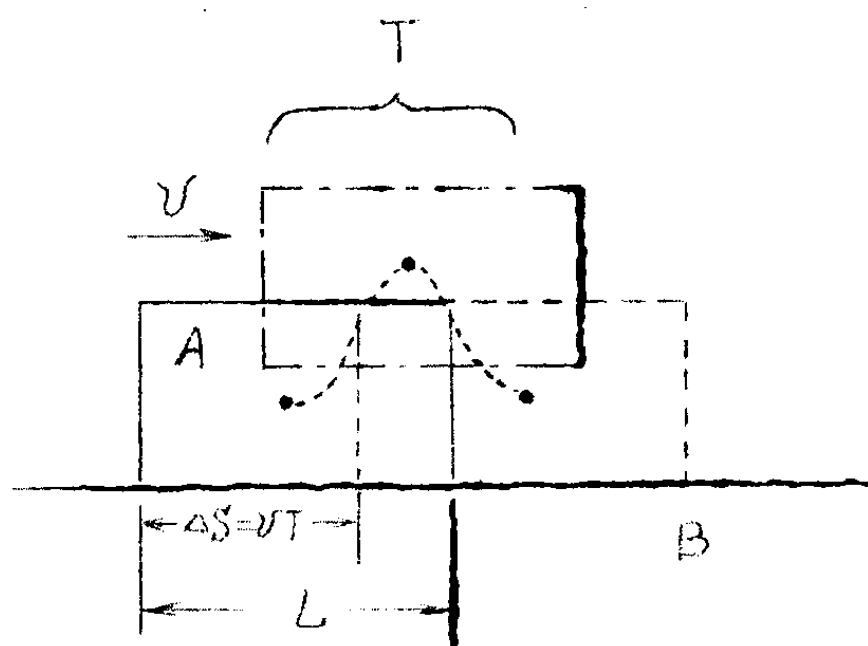


图3  $L > \Delta S$  磨损不易呈现波状痕迹

的平均效果。摩擦面的磨损情况近乎于承受恒定压力时的状态，故振动过程不易在磨损痕迹中表现出来。

b) 若 $L < \Delta S$ 时，则B上将承受明显的周期性冲击压力，因而摩擦面上很易出现与物体A振动过程相吻合的波状磨损痕迹。

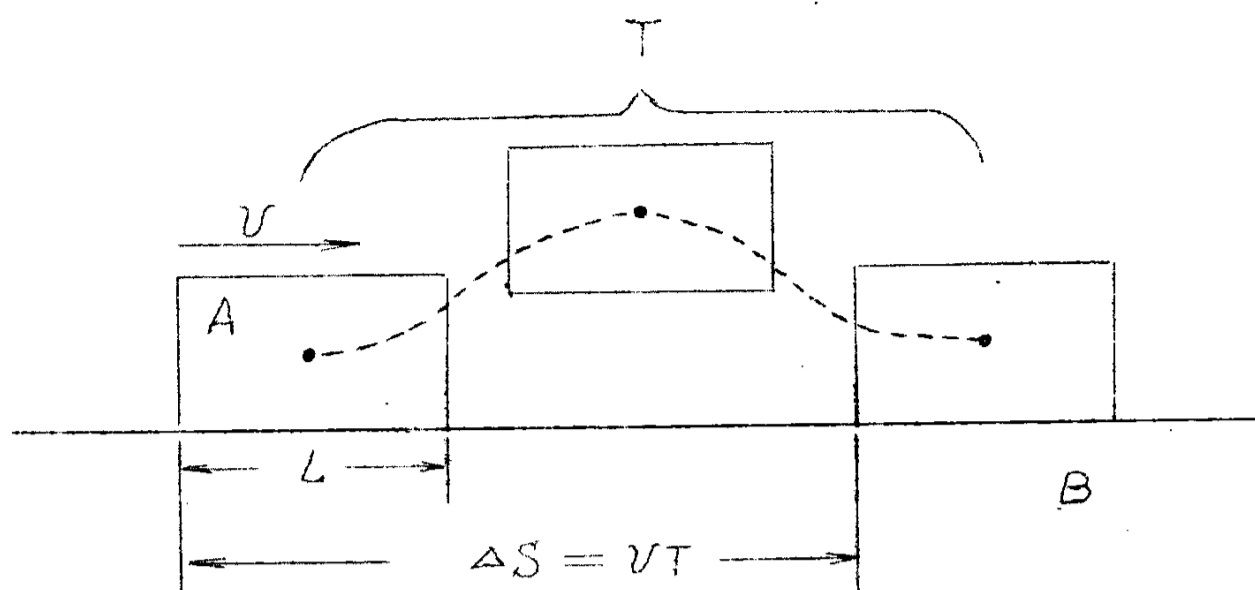


图4.  $L < \Delta S$  摩擦面易呈波状磨损

可见，摩擦面呈现波状磨损必须满足条件

$$\text{或} \quad \left. \begin{array}{l} L < TV \\ L < \frac{U}{f} \end{array} \right\} \quad (6)$$

我们将(6)式称为摩擦面出现波状磨损的接触线度、速度及振动周期条件，简称为波状磨损条件。

车轮与路面，径向密封片与缸体端面，滚刀与齿面均可看作线接触，在运动方向上的接触线度极小，车轴与轴瓦的情况有时也是这样，一般较易满足波状磨损条件。

3. 一般摩擦面引起运动物体振动的几种情况：

从波状磨损条件可知，运动物体的振动是摩擦面波状磨损的必要条件。然而这种振动过程是如何发生的呢？它主要取决于什么因素？现就下面几种情况加以分析。

a) 运动物体的弹性形变

如图5所示，在A情况下，物体与支承面相对静止，则接触压力数值上等于支承面上物体所受的垂直方向的外力：

$$N = P$$

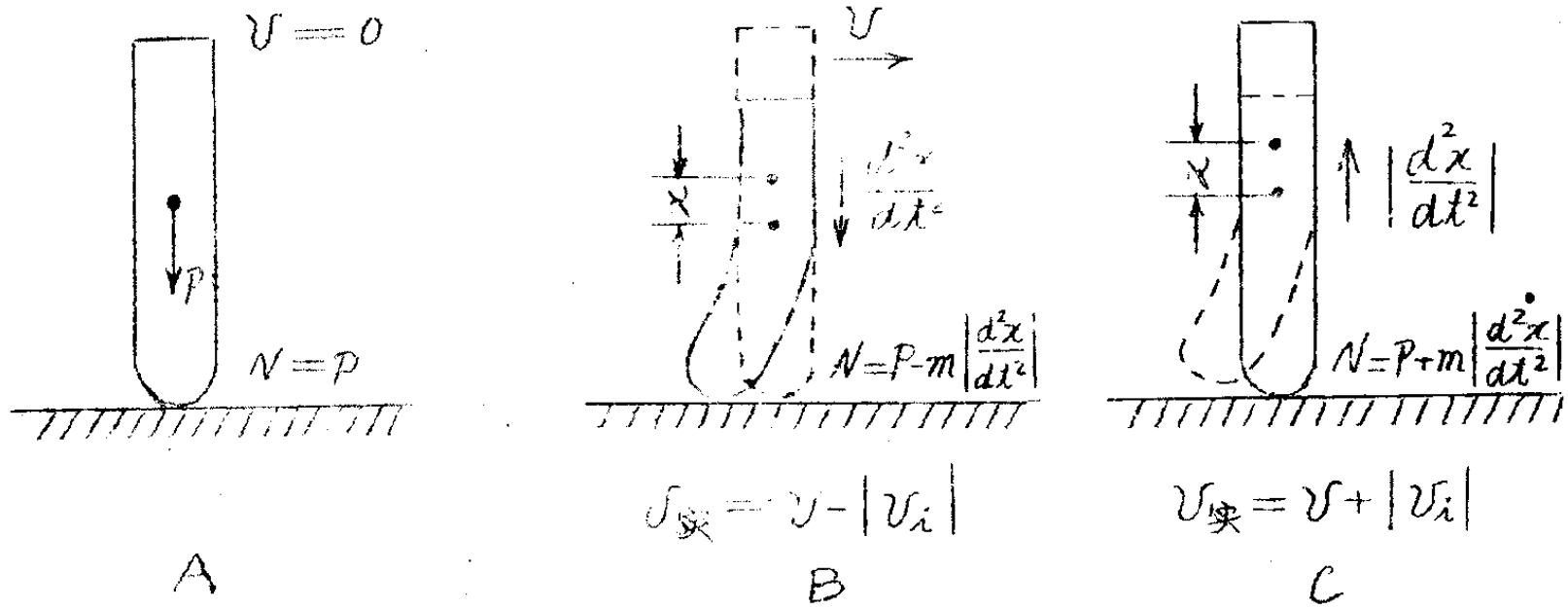


图 5. 运动物体的形变与恢复过程

在 B 情况下，物体以速度  $V$  相对于支承面运动。若物体与支承面间的摩擦力较大，物体本身的强度不足时，摩擦力即使物体发生弹性形变。由于物体在垂直方向受有外力  $P$ ，故向下做加速运动。设其质心的加速度为  $\frac{d^2x}{dt^2}$ ，则运动物体与支承面的接触压力将减小为：

$$N = P - m \left| \frac{d^2x}{dt^2} \right| \quad (7)$$

从而摩擦力减小  $\lambda_i \left| \frac{d^2x}{dt^2} \right| m$ 。但由于运动的惯性作用，弹性形变将继续下去，直到达到弯曲幅值。

然后，在 C 情况下，弹性恢复力使物体形变逐渐消失。在此过程开始时物体质心向上有一个加速度，从而使物体与支承面间的接触压力增大为：

$$N = P + m \left| \frac{d^2x}{dt^2} \right| \quad (8)$$

故摩擦力增大  $\lambda_i \left| \frac{d^2x}{dt^2} \right| m$ ，同样由于运动的惯性，形变恢复过程

将继续下去。

接着，摩擦力又至新使物体发生形变，如此反复不断。这样运动物体就不断地处于振动过程，并对摩擦面施以周期性的冲击压力。

与此同时，我们还注意到，在上述过程中运动物体的振动现象之存在引起了实际滑动速度的变化。设物体振动中与摩擦面接触处相对于平衡位置的瞬时速度为  $v_i$ 。在形变进行过程中  $v_i$  与物体原来的运动速度  $v$  方向相反，因而实际滑动速度减小：

$$v_{\text{实}} = v - |v_i| \quad (9)$$

在形变恢复过程中  $v_i$  与物体运动速度方向相同，因而实际滑动速度增大。

$$v_{\text{实}} = v + |v_i| \quad (10)$$

可见，物体的滑动速度实际上随振动过程发生周期性变化。这样，摩擦系数亦发生周期性变化。若物体的运动速度范围在图3曲线上  $v_0$  左侧，则这一效应对摩擦力的影响与接触压力的变化对摩擦力的影响相位相反，互相削弱。若物体运动的速度较高，在图3曲线上  $v_0$  右侧工作，则这一效应对摩擦力的影响与接触压力的周期性变化对摩擦力的影响作用同步，容易形成波状磨损。

本小节讨论的现象是常见的。例如金属加工中常会发生这种情况，同时也不难用金属片沿某摩擦面刮滑前进的实验来演示。为了观察明显起见，可在摩擦面上撒上一层均匀的细粉，当金属片刮滑过后，即可看到细粉呈规律性波状起伏。

b) 摩擦面的原始起伏：

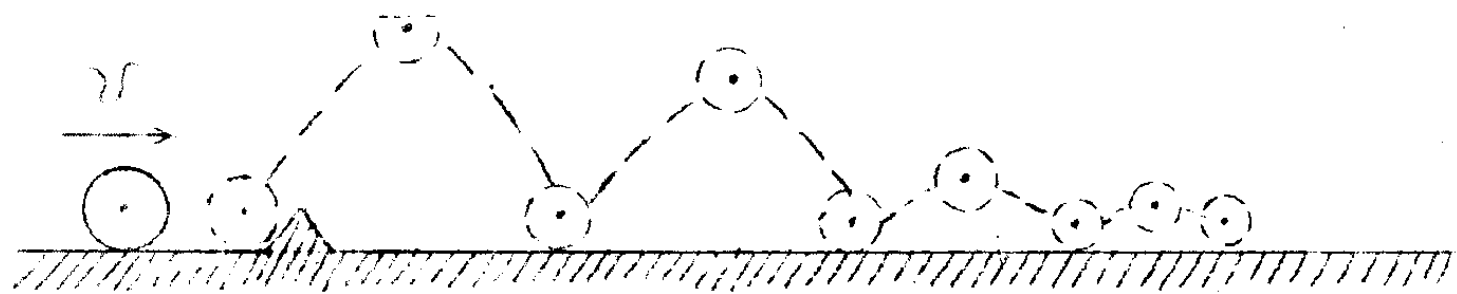


图 6 摩擦面的原始起伏引起的  
振动现象

实际上，物体运动中的相互摩擦面并非绝对光滑，而是存在着一些原始的起伏。此起伏与运动物体的摩擦面之接触线度可以比较时，常会引起该物体的振动过程，这时发生一种类似于碰撞的过程，与上述由于摩擦力造成物体弹性形变而引起的振动不同。由于振动的衰减，这一振动过程开始时只局限在原始起伏附近，好像一个小球以较大的速度通过某一起伏时被弹起而跳动一样，随后振动很快衰减。这一振动过程所引起的波状磨损一开始仅局限在原始起伏前方很小的范围内。若同一物体多次重复通过此起伏，则振纹沿运动方向逐渐扩展。

### C. 摩擦面硬度的变化：

由于运动物体与支承面间存在着接触压力，因而支承面和物体在力的方向上均发生一定程度的弹性形变。这样，支承面上硬度大的地方就象原始起伏一样会将物体向上弹起而发生振动。例如在普通公路某处表层下潜埋入“猴头石”，令载重汽车高速行驶。汽车驶经该处时即发生剧烈振动。

另外，摩擦面的耐磨程度与其硬度有很大关系。若摩擦面的硬度不均匀，则硬度大的地方磨损小而形成突起，硬度低的地方磨损严重而形成纹沟。如前所述，这些起伏更易引起运动物体的振动现象。

通过上面的分析，我们知道运动物体在摩擦面上发生振动过



程是必然的。这种振动剧烈的程度主要取决于摩擦面的性质和运动物体的机械性能及接触压力、速度等。这种振动是否在摩擦面上形成波状磨损，则取决于它是否满足波状磨损条件。

#### 四、三角活塞行星旋转式发动机的振源

既然缸体震纹是由振动过程所引起，因此就必须认真研究一下发动机存在的振动现象，才有可能揭示缸体震纹产生的特殊根据，从而提出克服震纹现象的有效可行的办法。发动机的振动过程是很复杂的，构成这一复合振动的振源主要有活塞、偏心轴、径向密封片、齿轮机构、缸体等。

目前一般只注意到径向密封片的振动对震纹的影响。毫无疑问，这是完全应该给予重视的。但我们认为，上述这些振源的某些振动对缸体震纹的产生和发展也是有决定意义的。

##### 1. 径向密封片

径向密封片是活塞与缸体型面摩擦的运动件，它对发动机的性能起着决定性影响，因此研究径向密封片的工作状态对认识缸体震纹现象的意义是很显然的。

发动机其它机构的振动现象都最后通过密封片来表现其对缸体磨损的影响，因此径向密封片的运动状态是十分复杂的。本节中为了讨论的简洁起见，我们将其它振动的传递效果暂不予以考虑。

##### a) 径向密封片的工作条件：

###### ① 径向密封片与缸体型面的接触状况：

理论上，径向密封片顶端圆弧与缸体型线相切，构成一种线接触。在运动方向上接触线度为零。这说明径向密封片对缸体型面的压强很大，而且只要有运动，就会满足波状磨损件L

$$L < \frac{U}{f}。$$