

鮑 引 年編著

中 華 工 業
學 術 出 版 社

35

汽輪機軸承的油膜

水 利 電 力 出 版 社

內 容 提 要

本書闡述了軸承潤滑的原理，影响汽輪機組軸承油膜穩定性的各種因素，由于軸承油膜破壞而引起的振動特點（包括實例），以及在檢修中和運行中如何保證軸承油膜的穩定性等。

本書文字通俗，內容淺顯，可供發電廠汽輪機車間技術工人、技術干部、旋轉機司機及有關專業學員閱讀。

汽輪機軸承的油膜

鮑 引 年編著

*

1421R297

水利電力出版社出版（北京西郊科學路二里溝）

北京市書刊出版業營業許可證出字第100號

水利電力出版社印刷廠排印 新華書店發行

*

787×1092 $\frac{1}{32}$ 開本 * 1 $\frac{1}{2}$ 印張 * 35千字

1958年11月北京第1版

1958年11月北京第1次印刷(0001—6,100冊)

統一書號：15143·1131 定價(第9類)0.18元

目 录

第一章 摩擦概論	2
1. 从“摩擦”說起	2
2. 摩擦的类型	3
3. 干摩擦	4
4. 干摩擦的定律	5
第二章 潤滑油膜是怎样形成的	7
1. 液体摩擦的秘密	7
2. 潤滑油的两种重要特性	8
3. 液体摩擦的损失	10
4. 油楔的形成	11
5. 軸承油膜的厚度	15
6. 潤滑油的冷却作用	17
7. 半干摩擦、半液体摩擦和临界摩擦	18
第三章 影响汽輪机軸承油膜稳定性的因素	20
1. 保証汽輪机軸承油膜的稳定性	20
2. 軸承間隙和进油方式	21
3. 軸承的接触角和修刮余量	24
4. 球形軸承的研磨和紧力的測定	28
5. 推力軸承的油膜	32
6. 透平油的粘度	39
7. 影响油膜稳定性的外界因素	42
第四章 由于軸承油膜不穩或破坏所引起的	
振动特点和几个实例	44

第一章 摩擦概論

1. 从“摩擦”說起

在研究汽輪机的軸承油膜問題以前，我們首先来討論一下物体的摩擦現象。

當我們將一个物体沿着另一个物体的表面上移动时，这两个物体的接触表面之間，便产生摩擦。我們要使前一个物体移动，必須要用一定的力量来克服两个物体間的摩擦力。由此可見，摩擦力就是妨碍物体运动的力量。

在我們人类的生活中，摩擦起着巨大的作用。火車在鉄軌上行駛，汽車在公路上奔馳，輪舶在江海中航行，都是由于摩擦的作用才能实现。火車、汽車等停止时所使用的制动力械（俗語叫刹車），也是基于摩擦理論創造出来的。我們冬天在冰上走路，往往容易跌倒，这就是摩擦力不足的緣故。試想一下：在这个世界里，如果不存在着摩擦这种現象，便真会“寸步难行”了。

摩擦虽然对人类生活有着积极的意义，可是在某些場合，它却是不受欢迎的。当一种能轉化为另一种能的过程中（例如汽輪机將热能轉換为机械能），往往发生摩擦（例如軸頸和軸承的摩擦），为了克服摩擦，必須要消耗一部分能量，所消耗的能量随着摩擦的类型而大小不等。由于摩擦而消耗掉的这部分能量，并不作功，而是变成热量損失掉了。因此，人們經常在設法使这种摩擦損失尽量减小。

2. 摩擦的类型

物体在开始运动时所需要克服的摩擦力，叫做静摩擦；在移动中所需要克服的摩擦力，叫做动摩擦。在任何情况下，静摩擦的力总比动摩擦大。

一个固体在另一固体上滑动，这样产生的摩擦，叫做滑动摩擦，也叫做第一类摩擦。例如，汽轮机轴颈在轴承中的摩擦，蒸汽机活塞在汽缸中的摩擦，都属于滑动摩擦。

如果一个球形或者圆柱形物体在另一个物体表面上滚动，并且这两个物体在一点或者在一条线上接触，这样产生的摩擦叫做滚动摩擦，或者叫做第二类摩擦。例如，火车轮在轨道上转动时的摩擦，滚柱轴承或者滚珠轴承中滚柱或者滚珠的摩擦，都是滚动摩擦。

滚动摩擦要比滑动摩擦小得多，一般来说，前者只有后者的十分之一甚至百分之一。人类几千年来的劳动实践，已经在很大范围内应用滚动摩擦来代替滑动摩擦，车辆都装着轮子，就是一个经常见到的例子。又如，在搬运笨重的机器时，常常在机器下面垫上滚木，这样可以省很多力气。

要减少摩擦损失，除了使用滚动摩擦来代替滑动摩擦以外，还可以在两个滑动表面之间使用润滑剂，例如，在汽轮机的轴承中，就使用透平油作为润滑剂。这样，滑动摩擦所造成的损失可以大为减小，甚至可能比滚动摩擦还要小一些。

一个固体在另一固体表面上滑动时，例如汽轮机轴颈和轴承间的滑动，如果二者之间没有润滑油存在着，这样产生的摩擦叫做干摩擦。如果两滑动面之间始终存在着一层润滑油膜，这样的摩擦叫做液体摩擦。在干摩擦和液体摩擦之间的，还有边界摩擦、半液摩擦和临界摩擦。

以下我們來分別討論這几种类型的摩擦。

3. 干 摩 擦

我們在前面談到，干摩擦乃是兩個摩擦表面間沒有潤滑時所發生的摩擦。為什麼會產生干摩擦呢？我們來分析一下。

兩個經過機械加工的摩擦表面，例如汽輪機的軸頸和軸承，用肉眼看來，似乎很光滑；但是，如果用顯微鏡觀察，就會發現這些表面是凸凹不平的，如圖1所示。在這些起伏不平的表面上，凸凹程度的大小是用凸起的頂部和凹下的底部二者之間的最大高度差來表示的，我們稱之為顯微不平度或者顯微粗糙度。



圖1 加工面上的顯微不平度

顯微不平度或者顯微粗糙度的衡量單位系採用百萬分之一公尺，我們稱之為微米或公忽，通常用 MK 來作為它的代號。

根據機械加工的光潔度（我們通常用一個箭頭 ∇ 或幾個箭頭來表示加工的光潔度），普通鋼制軸頸的顯微不平度大致如下：

一般鏟削	16~40微米，
精細鏟削	6~16微米，
經過研磨	3~6微米，
淬火并精細研磨	0.6~1.6微米，
特精研磨	0.1~0.16微米。

對於澆鑄白合金（俗稱烏金）的軸承，其顯微不平度大致如下：

精細加工	15微米，
------	-------

精細加工并用滾子輾壓^① 3微米。

由于加工表面上存在着显微不平度，我們可以認為，軸頸和軸承的接觸面并不是全部接觸，而只是個別微小的凸起部分互相接觸。這些微小的凸起部分，叫做显微凸起部分。當軸頸在軸承表面上滑動的時候，這些显微凸起部分彼此接觸，相互嵌入，并阻碍軸頸轉動，就造成干摩擦。

此外，造成干摩擦還有第二個原因。兩個滑動表面上個別點互相接觸，在接觸的地方產生相互作用的分子吸引力，這也使摩擦力加大。我們可以用一個簡單的試驗來證明這一點。

將兩塊經過精細研磨的金屬薄片重疊在一起，同時略微加熱，除去它們之間存在着的空氣，使它們真正作到金屬間的直接接觸。這時，如果要使它們互相滑動，就要花費很大的氣力。這就說明，分子間相互的吸引力可以加大摩擦力。

因此，造成干摩擦的原因，一方面是由于滑動表面上的显微凸起部分的機械作用，另一方面則是由于在滑動表面上個別接觸點的分子的相互吸引作用。

4. 干摩擦的定律

十八世紀末葉，科學家庫倫曾經對物體的滑動摩擦進行研究，并且提出了有關干摩擦的定律。一百五十多年來，經過各國科學家們孜孜不倦地從事干摩擦的研究，對庫倫定律作了部分修正和補充。對於這個複雜的理論問題，我們不準備詳細討論，只簡單地介紹下面幾點結論：

(1) 干摩擦和摩擦零件上的負荷大小成正比。

^①最簡單的輾壓軸承窪窩的方法系在車床上旋好軸承窪窩以後，在車刀杆上裝一外徑約50公厘的滾珠軸承，開動車床并走刀，利用滾珠軸承來壓緊白金面。
詳見人民電業1955年第8期“15,000瓩汽輪發電機主軸瓦的焊補”一文。

摩擦物体彼此间的压力愈大，则摩擦力愈大。例如，当载重10公斤的薄板在另一物体表面上滑动时，如果需要3公斤的力，那么同一薄板若是载重30公斤在同一表面上滑动，则所产生的摩擦力就等于9公斤。

(2) 干摩擦和摩擦表面的粗糙程度有关。

摩擦表面愈粗糙，摩擦力就愈大。

(3) 干摩擦和摩擦表面的材料有关。

滑动时所产生的摩擦力，对于由相同材料制成的二摩擦面来说，要比由不同材料制成的二摩擦面大一些。

(4) 干摩擦和摩擦物的实际接触面积有关。

由于滑动表面上存在着显微不平度，显微凸起部分相互嵌入时就发生摩擦。因此摩擦表面的实际面积愈大，摩擦力也愈大。

(5) 干摩擦和滑动速度有关。

摩擦表面的滑动速度增大时，摩擦力起初随着滑动速度增加，到一定的程度后，速度再增加，摩擦力反而减小。

在这里，我们还应当介绍摩擦系数这个术语，因为摩擦在数量上的特性是用摩擦系数来表示的。

摩擦系数是摩擦力和摩擦零件上所承受的负荷二者之间的比值，即

$$\text{摩擦系数} = \frac{\text{摩擦力}}{\text{摩擦零件上的负荷}}$$

在一般情况下，摩擦力始终小于摩擦零件所承受的负荷，

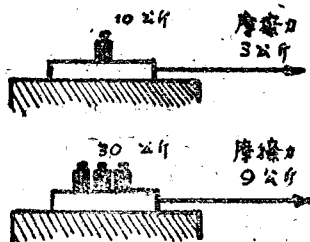


图2 摩擦力和负荷大小成正比

因此摩擦系数小于1。机械制造中所用金属的干摩擦系数通常在0.1~0.5的范围内，在个别的情况下还要高一些。粗糙表面的摩擦系数要比光滑表面的摩擦系数大一些；而较硬表面的摩擦系数就要比较软表面的摩擦系数小一些。

摩擦系数愈小，摩擦中损耗的能量愈少，摩擦表面的工作条件当然也就愈好。

关于液体摩擦和其他介乎干摩擦与液体摩擦间的几种摩擦，我们将在第二章中讨论。

第二章 润滑油膜是怎样形成的

1. 液体摩擦的秘密

我们在前一章中曾经说过，在两个滑动表面间，如果有一层润滑油膜把它们彼此分开，就造成液体摩擦。这时，二摩擦表面间已经没有直接接触，因此它们之间的摩擦，也不是金属间的干摩擦，而是润滑油膜之间的摩擦，或者更确切一点说，是润滑油膜分子间的摩擦。

摩擦面的金属分子和润滑油膜的分子相互作用的情况如图3所示。在润滑油和摩擦面接触的部分，油膜分子牢固地和金属分子结合，油分子间的吸引力使这个影响扩展到两三层分子，使润滑油膜中心的油层相互滑动。这样就造成液体摩

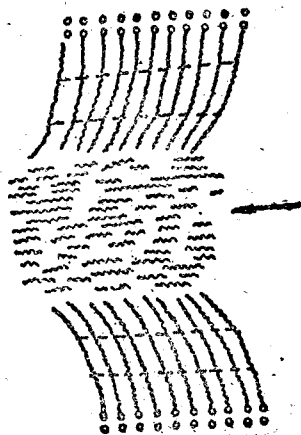


图3 金属分子和油膜分子互相作用的情况

擦。

液体分子之間的摩擦所消耗的能量要比干摩擦小得多。我們在日常生活中經常可以碰到这样的例証。例如，當我們在海边划船时，把小船由沙灘推到水中，往往要兩三个人的力量才能推动，而当船进入水中后，只要一个人就能輕易地把船推动了。在前一种情况下，我們需要克服的是沙和船底間的干摩擦，而在后一种情况下，我們需要克服的是水分子間的液体摩擦。

液体摩擦和干摩擦比較起来，不仅消耗的能量少，并且零件磨損的程度也大大減輕。显然，这样在摩擦表面間就能承受較重的負荷，而摩擦零件的工作可靠性和使用期限也可以显著地增加。因此，各种机器的摩擦面間，都使用着潤滑油，以便实现液体摩擦。汽輪机使用透平油来潤滑軸承，也是基于上述理由。

汽輪机使用透平油来潤滑时，軸頸和軸承并不直接接触，中間隔着一层潤滑油膜，軸頸如同躺在“油枕”上一样。現在看来，这一切都好象很簡單明显。但是，在二百年前，科学家們还不知道在干摩擦和液体摩擦当中存在着这种本質上的区别。甚至当1882年，俄罗斯的偉大的科学家H.П.彼得罗夫第一次提出这种說法的时候，許多科学家还不同意。

有一門研究液体运动的学問，叫做流体动力学。彼得罗夫在試驗室裝設了旋轉的車軸，进行了約15,000次各种不同的試驗，終于証實了潤滑油在軸承里的运动完全符合流体动力学的規律，創立了液体潤滑的理論。經過許多科学家們的进一步研究，近百年来這一門科学大大地发展了。

2. 潤滑油的兩種重要特性

作为摩擦表面之間的潤滑油，不是任何一种液体都能适用

的。良好的潤滑油应当具备一些特性，这里我們只討論其中最重要的两种特性。

首先，潤滑油应当具有良好的粘附性。对于潤滑油的这种特性，还没有統一的名稱，有的書中叫它做油性，有的書中則称之为潤滑性。

我們在前一节研究图 3 时，曾經提到，潤滑油膜分子牢固地和金屬分子相接合。潤滑油的这种特性就叫做粘附性。換句話說，具有优良的粘附性的潤滑油能够很好地流散在金屬的表面上，滲入到間隙中，并且牢固地附着在金屬的表面上。反之，粘附性不好的液体，就无法順利地散布在金屬的表面上并滲入到間隙中，这样的液体不可能实现液体摩擦，当然，也就不能用作潤滑油了。

其次，作为潤滑油的液体，其本身分子間应当具备一定的凝聚力。

我們如果取几种同量但不同性的液体，例如水、汽油和透平油，讓它們分別从同一小孔中流出去，就可以看出汽油比水流得快，而透平油比水流得慢。这个現象說明：各种液体分子間的凝聚力各不相同。凝聚力愈大，液体分子間互相运动时的摩擦力也就愈大。液体的这种内部摩擦力大小的程度，叫做粘度。在上面举出的例子中，汽油的粘度最小，而透平油的粘度最大，也就是液体愈濃稠，它的粘度就愈大。

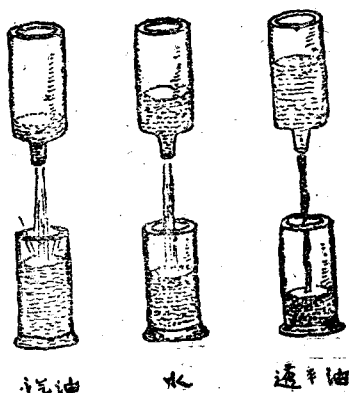


图 4 不同液体的粘度也不相同

一种液体只有同时具备适当的粘附性和粘度，才能作为润滑油，同时，润滑油对于摩擦表面的附着力还必须大于润滑油本身分子间的摩擦力。这样，二摩擦表面在相互滑动时，每一表面上都带动着一层附着油膜。如果润滑油的粘附性不好，也就是润滑油对摩擦面的附着力不够，油膜就不可能随着摩擦面滑动，甚至被挤出去，这时液体摩擦就被破坏了。如果润滑油的粘附性很好，则不论何时，二摩擦表面间始终存在着润滑油膜，不致发生金属的直接摩擦。

了解了润滑油的粘附性和粘度以后，我们便可以在以下几节来进一步阐述液体润滑的理论。

3. 液体摩擦的损失

我们先来讨论液体摩擦的损失。

根据液体润滑的理论，我们可以认为：在液体润滑时，摩擦损失决定于润滑油的粘度、轴颈滑动的速度、摩擦面积和轴承间隙，而与轴或轴承的材料无关。

我们已经在上面提过，液体摩擦是润滑油膜分子间的摩擦。如果润滑油的粘度愈大，那末润滑油膜分子间的摩擦力也就愈大。因此粘度大的油，摩擦损失也就大了。

轴颈滑动的速度愈大，润滑油膜分子间的摩擦力也愈大，因此摩擦损失也愈大。

轴承和轴颈的接触面积愈大，轴颈在滑动时带动的润滑油愈多，因此液体摩擦的损失也愈大。

如果上述其他因素都不改变，只将轴承的间隙减小，那末润滑油从间隙中流出较难，因此油膜中的摩擦损失增大。

由此可见，我们要减少轴承中的液体摩擦损失，应当从以

下几点着手：

1. 减小潤滑油的粘度。
2. 减低軸頸的滑动速度。对于轉速已經固定的机組，只有將軸的直径减小。
3. 减少軸頸和軸承的实际接触面积。
4. 增加軸承間隙。

4. 油楔的形成

現在我們来討論一下，在怎样的条件下才能在軸承中形成油楔。

首先，我們假設在两个平行面 A 和 B 之間，有一层潤滑油將它們隔开。 A 固定不动，而 B 用速度 V 自右向左滑动，同时 A 、 B 面之間不加压力，即 $P=0$ 。

由于潤滑油具有良好的粘附性，我們可以認為：粘附在 A 面上的一薄层油膜并不产生滑动，其速度为零。同样，我們也可以認為粘附在 B 面上的一薄层油膜随着 B 面以速度 V 滑动。此外，我們并且假設潤滑油在 A 面和 B 面之間滑动时，好似若干层极薄的油流平行地向前移动，彼此間沒有乱流的現象（这种現象在流体力学上称为层流）。这样，介乎 A 、 B 面之間的各层油流，由于油分子間存在着摩擦力，就被依次地帶动着自右向左移动，移动的速度系从 A 到 B 逐渐增大，增大的程度和各油层对 A 面的距离成正比，如图 5 所示。

其次，假設 A 、 B 面都靜止不动，这时候，介乎二者之間的油层当然也不流动。如果我們在两个面上加压力 P ，使 A 、 B 面靠近，这时，处在两个面中間的潤滑油將要从兩側挤出来。由于粘附性的作用，我們可以設想附着在兩表面上的油膜，其向外挤出的速度为零，而在 A 、 B 面中央，油的流速最大，如

图 6 所示。

如果綜合上述兩種情况，即 A 、 B 面間既有相对滑动，同时又有压力使 A 、 B 面靠攏，那末油流的情况就将如图 7 所示。

从图 7 中可以看出，从 A 、 B 面中向外流出的油多于流入的油，因此油膜中的压力等于零，处在 A 、 B 面之間的潤滑油將被挤出，直到 A 、 B 面直接接触为止。

由此可見，如果 A 、 B 面系平行放置，那末处在二者之間的潤滑油并不能承受压力，因而不能造成液体摩擦。如果我們將 A 面傾斜放置，如图 8 所示，使油流出口处截面减小，从而流进 A 、 B 面中間的潤滑油可以等于流出的潤滑油，这样，油膜中便可产生足够的压力，来

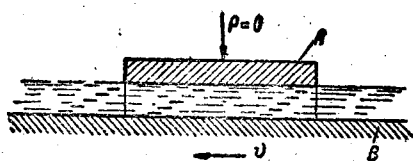


图 5 平行面間的油流情况

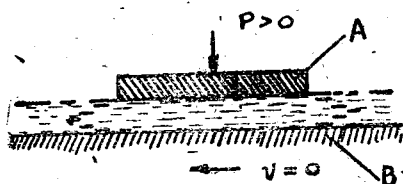


图 6 平行面間的油流情况

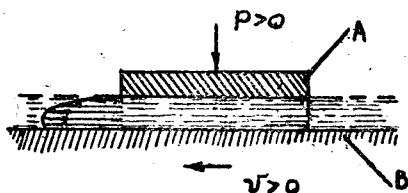


图 7 平行面間的油流情况

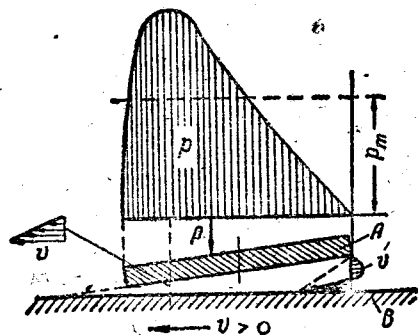


图 8 傾斜面間的油流情况

承受外界負荷，并保証A、B面之間經常存在着一層潤滑油膜。由于潤滑油膜成為楔形，所以稱為油楔。

圖8上面的壓力曲綫，表示出油楔中壓力分布的情況， P_m 表示油楔中的平均壓力。我們應當注意到，油楔中壓力最大的地點並不是油流出口處。

以上所討論的兩個滑動平面間油楔形成的原理，對於軸頸和軸承同樣可以適用。為了保証軸頸和軸承之間能形成油楔，軸承的直徑一定要比軸頸的直徑大一些，二者之差叫做軸承間隙（我們在下一章中將要談到：軸承間隙的數值，系隨着軸承的型式而不同）。當軸頸靜止時，它位於軸承的正下方，如圖9所示。這時，軸頸和軸承之間就形成楔形間隙。當軸頸在軸承中旋轉時，粘附在軸頸上的一層油膜就隨同軸頸轉動，並且帶動以後的各層油膜前進。這樣，軸頸在轉動時就將潤滑油從間隙大的地方帶到狹窄的地方，潤滑油聚集在這個狹小的間隙處，產生壓力，這個壓力超過轉動部分的重量，便將軸頸向上抬起；而在軸承下部形成油楔，從而保証軸頸和軸承之間經常存在着一層潤滑油膜。

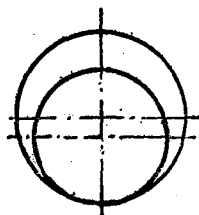


圖9 軸承的楔形間隙

當軸頸受到油膜中的壓力向上抬起時，軸心移動的軌跡並不是一根垂直向上的直綫，而是近似一個半圓形。當轉速 $n=0$ 時，軸頸處在軸承窩的正下部，軸頸的中心和軸承的中心位於同一垂直綫上。起動以後， $n>0$ ，軸頸就在軸承中發生偏轉。以後，隨着轉速的增加， $n>0$ ，軸頸受到油楔中壓力的影響，逐漸向上抬起，同時并向轉動的方向移動。轉速愈高，軸頸愈向上抬起，同時軸頸的中心也愈加接近軸承的中心。當轉速為無限大時， $n=\infty$ ，軸頸的中心就和軸承的中心重疊在一

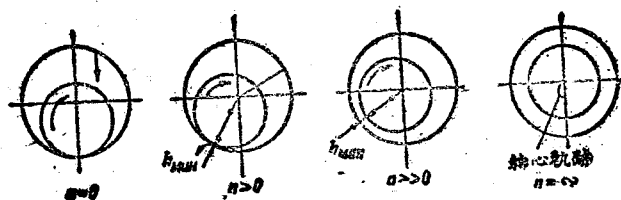


图 10 軸心在軸承中的位置

起。图10表示出在轉速增大过程中軸頸中心移动的情况，图中 h_{min} 表示間隙最小的地方。从图中可以看出，在液体摩擦的范围内，軸頸中心移动的軌迹近似一半圓形。

軸承油楔中压力的分布也和前述平面中同样，是沿着油楔的长度变化的。图11表示軸承油楔中压力分布的状况。在潤滑油进口处，压力为零，然后逐渐增大到某一最大值，又逐渐降低，而在潤滑油从油楔中流出的地方，也就是間隙最小的地方，压力又等于零。

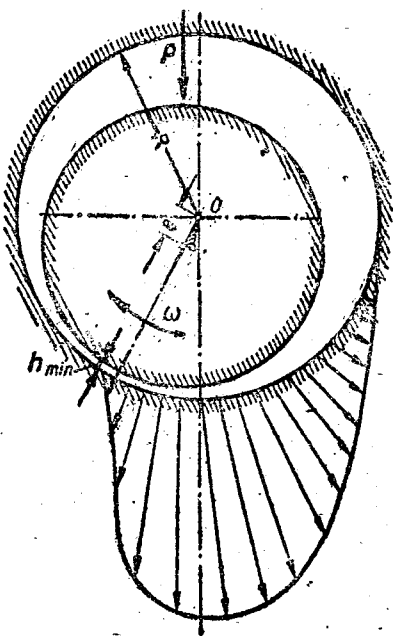


图 11 軸承油楔中压力的分布情况

- ① 按照試驗的結果，油楔中压力在間隙最小处稍大于零，但在实用上可以足够准确地認為間隙最大处压力为零

5. 軸承油膜的厚度

以上我們对油楔形成的理論作了一些簡單的說明，現在进一步来討論如何保證軸承中的液体摩擦不致破坏，也就是如何才能保證軸承中經常存留着厚度足够的油膜。

根据液体潤滑的理論，軸承中油膜的厚度受到下列各种因素的影响：

1. 軸頸的轉速；
2. 潤滑油的粘度；
3. 軸承間隙；
4. 軸承所承受的負荷；
5. 軸頸和軸承的尺寸。

轉速 从前面所述油楔形成的理論以及图10中，我們可以看出，滑动速度是造成潤滑油膜的主要条件；同时，軸頸的轉速愈高，油膜也就愈厚。为什么会有这样的現象呢？因为軸頸旋轉愈快，它所帶走的潤滑油愈多，并且由于高速的緣故，这些油被迅速地推向狹小的間隙中去，因而在油楔中产生的压力愈大，軸頸抬起愈高，油膜自然也就愈厚了。

軸頸在軸承中的滑动速度不仅决定于轉速的大小，并且和軸頸的直徑大小也有关系。如果轉速不变，那末直徑大的軸頸其滑动速度較大，因此油膜也較厚。

粘度 如果將潤滑油的粘度加大，那么油分子間的凝聚力也增大，軸頸在軸承中旋轉时就將帶走更多的油分子，也就是帶走較厚的油层。因此，潤滑油的粘度加大，油膜的厚度將增加。

軸承間隙 軸承間隙愈大，潤滑油愈容易从軸承中流出，因而在軸承中形成潤滑油膜也愈难。如果間隙过大，甚至会造