

层式橡胶弹性轴承

保定螺旋桨制造厂 赵启元

飞机上采用橡胶弹性轴承的主张,首先是由美国人在本世纪 60 年代中期提出来的,60 年代末期投入研制,经过 10 多年的摸索、试验,70 年代末期才正式装机使用。今天法国宇航公司批生产的 SA-365N 海豚直升机就用了这种轴承,见图 1。

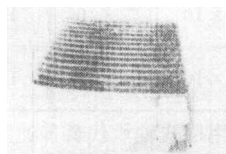


图 1 海豚直升机用的层式橡胶弹性轴承

一、什么是层式橡胶弹性轴承

层式橡胶弹性轴承(以下简称层式轴承)是在橡胶衬套中加入金属薄片改进研制而成的。橡胶衬套(图 2)只能承受很小的径向载荷,只能扭转几度的角度。为了使之象轴承那样扭转角度大,必须增加橡胶用量。这样,虽然衬套的扭转角度增加到 ± 30 度,但是承受径向载荷的能力却下降(图 3)。经过研究和实践,用多层金属薄片限制橡胶,由于橡胶量不变,因此扭转角度也不变;而金属薄片的嵌入,则使承受载荷的能力大大增加。这样,橡胶衬套就变成 4 层式轴承(图 4)。

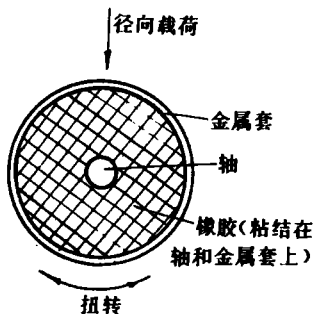


图 2 橡胶衬套

二、层式轴承的种类与应用

目前已研制出 6 种用于静态和动态运动的层式轴承:

(1) 轴向轴承 如图 5 所示,能承受较高的轴向

载荷,径向刚度高,可旋转 ± 30 度。

(2) 径向轴承 如图 6 所示,能承受很高的径向压缩载荷,径向刚度高。

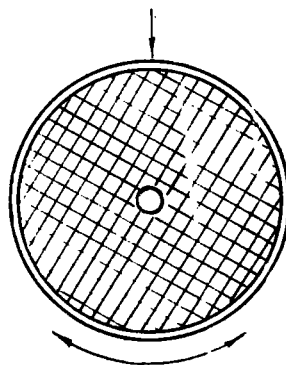


图 3 增加了橡胶量的橡胶衬套

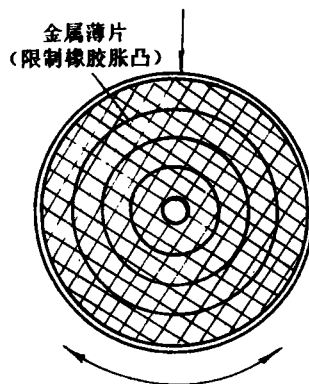


图 4 层式橡胶弹性轴承

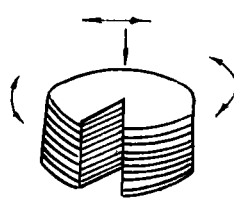


图 5 轴向轴承

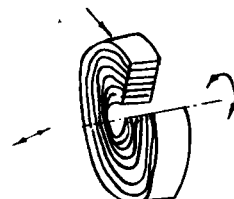


图 6 径向轴承

(3) 球状轴承 如图 7 所示,承受轴向压缩载荷时,通过橡胶剪切,可使轴承绕 X、Y、Z 三轴方向运动,可取代 3 个或多个单独的普通轴承,扭转摆振

可达 $\pm 45^\circ$ 度， α 翘曲可达 $\pm 20^\circ$ 度， β 翘曲可达 $\pm 15^\circ$ 度，压缩离心力可达 292500 牛顿。图 7 所示就是这种轴承。

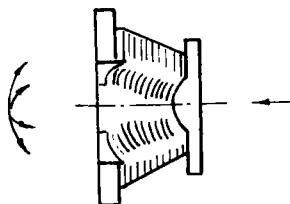


图 7 球状轴承

(4) 球形径向轴承 如图 8 所示，轴承截面为球形，可绕 X、Y、Z 三轴方向运动，以调节扭转和翘曲，径向压缩刚度高。

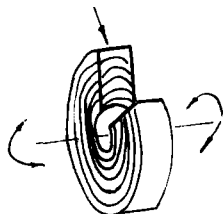


图 8 球形径向轴承

(5) 圆锥状轴承 如图 9 所示，其轴向和径向可承受较高的压缩载荷，也可承受翘曲载荷。

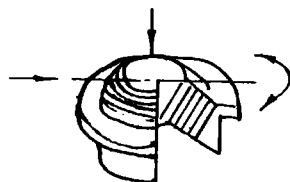


图 9 圆锥状轴承

(6) 复合式轴承 如图 10 所示，能承受轴向和径向载荷。

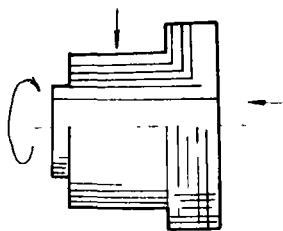


图 10 复合式轴承

一般说来，层式轴承的承载能力是刚性的直接函数，运动能力则是刚性的间接函数。下表列出上述 6 种轴承的刚度值。

层式轴承的典型刚度值

序号	种类	图号	径向 N/mm	轴向 N/mm	扭转 m·N/度	翘曲 m·N/度
1	轴向轴承	5	5.4×10^3	90×10^3	572	114
2	径向轴承	6	72×10^3	0.72×10^3	857	160
3	球状轴承	7	9×10^3	72×10^3	1143	17
4	球形径向轴承	8	7×10^3	1.44×10^3	1143	21
5	圆锥状轴承	9	36×10^3	72×10^3	1143	160
6	复合式轴承	10	72×10^3	90×10^3	1143	228

实践证明，用层式轴承代替普通滚珠或滚针轴承后，不使用滚动与滑动元件，因此没有摩擦和磨损问题，不需要润滑和维护，而且寿命长，也不需要密封圈、保护罩和防尘盖。

层式轴承已广泛用于直升机旋翼毂，图 7 的球状轴承可用于多叶片的铰接式旋翼。图 9 的圆锥状轴承可用在双叶片的跷跷板式旋翼上。Sikorsky 公司的 CH-53 型直升机上的层式轴承能承受 $418.5 \times 10^3 \text{ N}$ 离心力。CH-53D 型直升机上就采用了 6 个层式轴承的旋翼毂。此外，波音 CH-47、HLH、贝尔 222 及 AH-1、UH-1 型等直升机都采用了层式轴承。这种轴承还可用作飞机减振器、Nodel 梁式结构和着陆装置等。

在民用方面，可用在火车、汽车、船只、风力发电和振动疲劳装置上。

直升机旋翼毂用层式轴承的直径一般为 6.34~25.4cm；地面设施及军舰上的层式轴承的直径有的达 140cm；直径 2.54~7.62cm 的层式轴承可用于旋翼系统以外的其他装置上。

三、轴承设计原理及程序

1. 轴承的主体材料

众所周知，润滑剂是一种内部分子相对运动时阻力比较小的材料，普通的润滑剂如油、水、气体、脂及肥皂等都具有这个特点。橡胶是高弹体，既具有液体性能，也具有固体性能。就其液体性能来说，由于其特殊的分子结构，分子链段极易活动，具有类似于液体润滑剂的特征。就其固体性能来说，橡胶分子交联而成网状结构。橡胶具有极好的弹性，适合作弹簧用，因此可作为一种新型“润滑剂”。

另外，橡胶可和钢、不锈钢、铝、钛以及其他多

种有色金属材料粘结。按照轴承设计原理,将轴承的金属件(外层附件及金属薄片)按规定间隔安放在模具中,然后将橡胶胶料喷注进层间空隙中,硫化并粘结成型。成型后的轴承,由于结构的整体性,保证了结构的稳定性。虽然为满足高温、严寒及各种特殊恶劣环境下的工作需要曾使用过数种特殊性能的合成橡胶制造层式轴承,但是直升机上大量的层式轴承还是使用天然橡胶。这是由于天然橡胶的下述特点所决定的:

- (1) 具有优异的耐疲劳性能,疲劳寿命长;
- (2) 适用刚度范围大;
- (3) 对应力集中或表面缺陷不敏感;
- (4) 动态刚度与静态刚度之比小,很少超过1.5;
- (5) 在低、中等刚度范围内,阻尼小(能量吸收少);
- (6) 使用温度范围较宽($-54\sim+71^{\circ}\text{C}$)。

天然橡胶的低温动态刚度是广泛研究的课题之一。一般认为天然橡胶的脆性温度是 -65°C 。然而在层式轴承中,首次循环的刚度值更为重要。天然橡胶的刚化因子(即低温动态刚性与室温动态刚性之比)与循环次数的关系曲线如图11所示。层式轴承在 -54°C 下冷浸后首次循环的刚度值几乎是室温预定刚度值的50倍;然而,在一定扭矩下,循环1000次(约3分钟)后,刚度值大约下降到室温刚度的3倍。

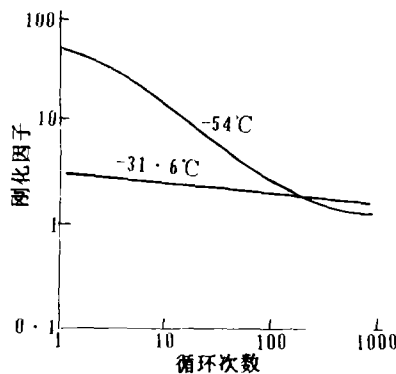


图11 天然橡胶的低温刚化

2. 轴承的设计原理

层式轴承的总刚度按下式计算:

$$\text{扭转刚度 } Rt = \frac{\pi G r^4}{114.6 T} (\text{m} \cdot \text{N} / \text{度}) \quad (1)$$

$$\text{压缩刚度 } K = \frac{S \cdot E}{T} = \frac{S \cdot E}{n \cdot t} (\text{N} / \text{mm}) \quad (2)$$

材料工程

各层橡胶的压缩刚度按下式计算:

$$k = \alpha \cdot S \cdot E / t (\text{N} / \text{mm}) \quad (3)$$

式中 S —橡胶承受压缩载荷的总面积(cm^2);

E —橡胶压缩模量(N / mm^2)(大致在 $2.1 \sim 700 \text{N} / \text{mm}^2$ 范围内变化);

G —橡胶剪切模量(N / mm^2)(天然橡胶剪切模量为 $0.525 \sim 1.75 \text{N} / \text{mm}^2$);

α —几何系数;

r —层式轴承的半径(cm);

T —橡胶累计总厚度(不包括金属薄片的厚度)(cm);

t —每层橡胶厚度(cm);

n —橡胶层数。

计算时,几何系数依具体情况而定,橡胶的压缩模量 E 则由橡胶的形状因子所决定。某天然橡胶的压缩模量与形状因子的关系如图12所示。众所周知,橡胶基本上是不可压缩的,但可横向膨胀或鼓胀,橡胶的“形状因子”就是橡胶承受压缩载荷的面积除以自由鼓胀或膨胀面积之商。橡胶的承载能力则随形状因子的增大而提高。

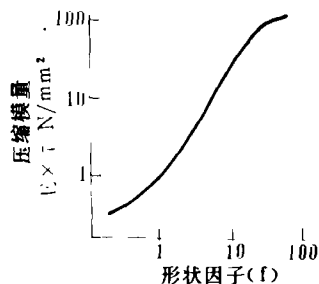


图12 某天然橡胶的压缩模量与形状因子的关系

图13所示为长方形层式轴向轴承。

(1) 计算时首先计算两个轴承的形状因子(f):

$$f_1 = \frac{S_{\text{压(受压面积)}}}{S_{\text{鼓(鼓胀面积)}}} = \frac{L \cdot W}{2t(L + W)} = 3.3 \quad f_2 = 20$$

(2) 计算两个轴承的压缩应力 $\delta = \varepsilon \cdot E$

(ε —压缩应变, $\text{cm} / \text{cm}\%$) (4)

从图12中,由 f_1 、 f_2 分别查出:

$$E_1 = 42 \quad E_2 = 644$$

设 $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = 5\% = 0.05$

所以 $\delta_1 = \varepsilon_1 \cdot E_1 = 2.1 (\text{N} / \text{mm}^2)$

$$\delta_2 = 32.2 (\text{N} / \text{mm}^2)$$

(3) 计算两个轴承每层橡胶压缩刚度:

设几何系数 $\alpha = 1$

$$k_1 = \alpha \cdot S_1 \cdot E_1 / t = 14 \times 10^3 (\text{N/mm})$$

$$k_2 = 1288 \times 10^3 (\text{N/mm})$$

(4) 计算两个轴承总压缩刚度:

$$K_1 = \frac{S_1 \cdot E_1}{t \cdot n} = 14 \times 10^3 (\text{N/mm})$$

$$K_2 = 215 \times 10^3 (\text{N/mm})$$

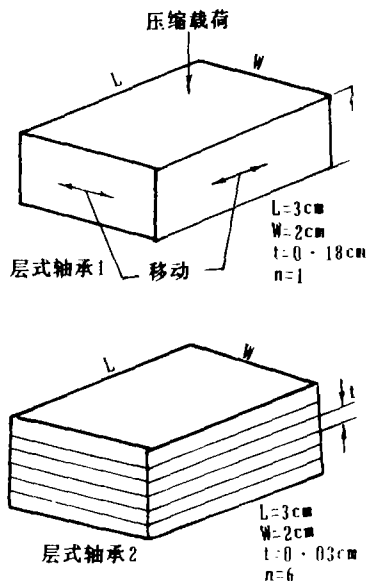


图 13 长方形轴向轴承

计算说明, 高度相同的两个轴承, 由于轴承 2 中加入多层金属薄片, 其承受压缩载荷 (压缩应力) 的能力和压缩刚度都提高了若干倍。

3. 轴承的设计程序

初步设计: (1) 先按 35 N/mm^2 的允许压缩应力确定层式轴承的初始直径。其典型应力—应变曲线如图 14 所示。(2) 当最大扭转剪切偏移值一定时, 就可确定橡胶和金属薄片的总厚度。通常设层式轴承的初始总厚度为最大剪切偏移值的 8 倍。橡胶的疲劳

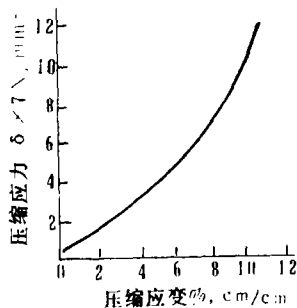


图 14 压缩应力—应变曲线

寿命在很大程度上取决于橡胶上所施加的动态 (扭转) 剪切应变值, 如图 15 所示, 理论寿命作为 5 次方函数受运动的影响很大, 但这种关系仅适用于循环次数较多的情况。同时也可看到形状因子对层式轴承寿命的影响。(3) 层式轴承的应力和刚度按 (1) (2) (3) (4) 式计算。

定型设计: 层式轴承的设计是一个反复的过程, 有赖于直观和经验的积累。

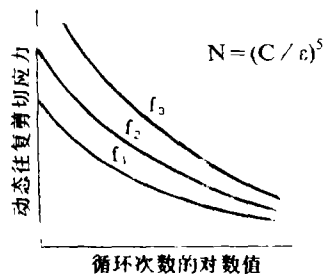


图 15 橡胶疲劳寿命与剪切应变的关系

f—形状因子; C—常数; ε—剪切应变

按 Lord 运动学进行定型设计时, 用计算机对初步设计进行计算, 并按结果进行改进。在各个谱线状态下将轴承加载运动, 计算各层橡胶各个位置的剪切应变、压缩应变及综合疲劳寿命, 这就是有限元分析法。它考虑了橡胶和金属件之间的相互作用, 使设计更加准确。图 16 所示为有限元分析法的实例之一。另外还应确定轴承的临界断裂载荷, 因为断裂会使轴承刚度大幅度下降。轴承的这种断裂呈“C”形, 完全不同于通常的“S”形柱状压缩 (曲)。

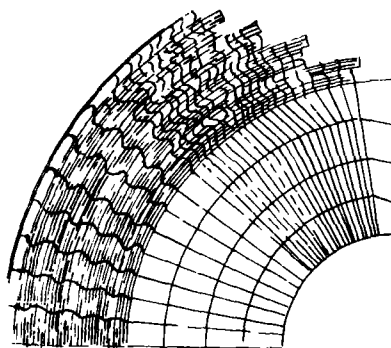


图 16 有限元分析图

四、轴承的成本—效果分析

在确定轴承的成本—效果时, 可采用图 17 所示的比较图或盈亏平衡图。由图可见, 层式弹性轴承优

于普通轴承。

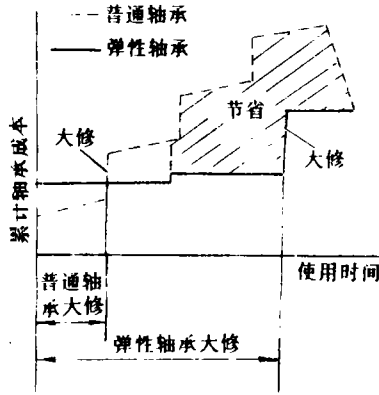


图 17 弹性轴承成本一效果

五、轴承的试验和寿命

一般说来，轴承的试验包括两个部分：设计评价

试验和动态耐用试验。设计评价试验包括层式轴承的全部质量检查，静、动态刚度试验，额定及极限强度试验，金属件的脆性件和应变仪试验等。动态耐用试验是按设计要求的时间谱进行层式轴承的各种载荷和运动试验。此外，还要进行模拟实际振动频率、载荷和运动的试验，橡胶的动态力学性能试验，橡胶和金属的粘接试验，等等。

试验证实，轴承的实验室寿命为 2500~3000 小时，实际使用寿命为实验寿命的 5 倍。也可用目视法观测轴承的寿命。

总之，各种用途的层式橡胶弹性轴承，经过多年的研制、试验和使用证实，其设计和制造技术的确是轴承技术上的一项重大突破，并日趋成熟。现在，美、法等国仍在继续研究，力求进一步改进质量并降低成本。

综上所述，层式橡胶弹性轴承，无论在军事工业还是民用工业上，都必然有其广阔的应用前景。

(参考资料略)

熔模精铸用的蜡模 激光焊接法

熔模精铸用的蜡模，由于不能一次成型，须先做成几块，然后焊接起来。组合模型的方法通常是先将这些模块置入夹具中，用加热的烙铁将模块焊好。为了使焊接部位表面平滑，焊后还要重新用铬铁和压勺压平。因此，既浪费时间又要求操作者要有熟练的技术。

最近，美国应用物理和电气工程公司与美国精铸件公司共同研究出用 CO₂ 激光机械焊接蜡模的技术。用这种方法进行焊接，焊接部位平滑、强度均匀，而且可实行完全自动化生产。由于焊接质量好，故可减少蜡模的检验时间和重新制作蜡模的时间。据称，选用这一技术可显著降低成本，节约工时。

CO₂ 激光焊接时，激光束垂直射向接合部位的蜡模表面，蜡模吸收激光束的能量而熔化。适当选择激光束的强度和焊接速度可获得良好的焊接效果。最大的焊接速度取决于蜡模组块的厚度和冷却时间。由于激光束只是直接加热蜡模的表面，内部的蜡料要靠热传导来溶解，而蜡的导热性差，因此，对于较厚的模块，焊接时间要长些。

用于焊接蜡模的激光束的强度是有限制的，若为了提高焊接速度而过度提高激光功率，蜡模表面就会很热，即使是中等强度的能量，蜡模表面也有起泡现象。此外，激光束能量太高还会使蜡料蒸发而造成焊缝表面明显凹陷，甚至使蜡点燃。因此，不能为增加焊接速度而随意增大激光功率。焊接时，能量的密度可通过改变焊接速度和激光功率以及激光束的直径来调节。此外，还可以在蜡模完全冷却前，对同一表面来回进行焊接。焊厚蜡模时，最好采用这一办法。

该公司研究的 CO₂ 激光自动焊机能将形状、厚度等蜡模的参数输入到计算机里，通过计算机控制焊接夹具和激光束的运动以及激光功率，由机械手进行焊接。由于 CO₂ 激光不能通过玻璃和塑料，故可以用普通的眼镜和防风镜保护眼睛。

本工艺的缺点是需用稍为复杂的夹具，以保持焊接及冷却时蜡模表面的水平度。另外，对蜡模组块的尺寸要求较高。

(东华 摘译)