

层状球面弹性轴承刚度设计、仿真与试验

陈高升¹, 杨 岩²

(1. 中国航空工业集团公司 北京航空材料研究院

减振降噪材料及应用技术航空科技重点实验室, 北京 100095;

2. 中国人民解放军总参谋部 陆航部 驻北京地区军事代表室, 北京 100083)

摘 要: 从理论上推导了层状球面弹性轴承各橡胶层的压缩刚度和扭转刚度计算公式,通过具体算例,将层状球面弹性轴承各橡胶层压缩刚度和扭转刚度的理论计算结果与仿真结果进行了对比分析.结果表明:各橡胶层压缩刚度的理论计算结果与仿真结果基本吻合,最大误差为 3.98%.各橡胶层扭转刚度的仿真结果与理论计算结果存在一定偏差,从小接头开始的前半部分橡胶层扭转刚度的仿真结果大于理论计算结果,最大误差为 33.3%;后半部分橡胶层扭转刚度仿真结果小于理论计算结果,最大误差为 32.8%.压缩刚度对压力变化表现的非线性不明显,扭转刚度则随扭转角的增大,其非线性变得越显著.但通过理论方法、有限元仿真方法得到的层状球面弹性轴承总的压缩刚度和扭转刚度与试验结果吻合良好.

关 键 词: 弹性轴承; 压缩刚度; 扭转刚度; 球面; 橡胶

中图分类号: V214.1; V257; V229⁺7; V255⁺3

文献标志码: A

Stiffness design, simulation and test of laminated spherical elastomeric bearing

CHEN Gao-sheng¹, YANG Yan²

(1. Aviation Key Laboratory of Science and Technology on Materials and Application Research for Vibration and Noise Reduction, Beijing Institute of Aeronautical

Materials, Aviation Industry Corporation of China, Beijing 100095, China;

2. Military Representative Office in Beijing Region,

Army Aviation Department, General Staff Headquarters,

Chinese People's Liberation Army, Beijing 100083, China)

Abstract: The formulations of compression stiffness and torsion stiffness of rubber of laminated spherical elastomeric bearing were deduced in theory, and the theoretical results and simulated results of compression stiffness and torsion stiffness of every rubber layer of laminated spherical elastomeric bearing were compared through examples. The results show that the theoretical result of compression stiffness is basically in accord with the simulated result, the maximum error is 3.98%. There are some differences from simulated result and theoretical result for torsion stiffness in every rubber layer; the simulated result of torsion stiffness is bigger than theoretical result for the first half of all the rubber layers from the little end, the maximum error is 33.3%; the simulated result of torsion stiffness is smaller than theoretical result for the second half of all the rubber layers, the maximum error is 32.8%. The nonlinear characteristic of compression stiffness is not evident for the alterable pressure, and that of torsion stiffness is more evident with the increase of the torsion angle.

But the total compression stiffness and total torsion stiffness got from theoretical method and finite element simulation method are in good agreement with the test results.

Key words: elastomeric bearing; compression stiffness; torsion stiffness; spherical; rubber

层状球面弹性轴承(下文简称弹性轴承)作为直升机旋翼系统的重要构件,在桨毂和中央件之间起柔性连接作用,通常在一定的压力、扭转及弯曲载荷下使用,减小桨叶旋转过程中对桨毂产生的扭转、挥舞、摆振载荷,弹性轴承的各向刚度性能指标对直升机旋翼系统的动态特性有重要影响. 因此,对弹性轴承进行设计时,其各向刚度的先期准确计算就十分重要. 国外从 20 世纪 60 年代开始就对弹性轴承进行了大量研究,主要集中在弹性轴承的结构设计^[1-6],弹性轴承动态特性分析^[7],弹性轴承的材料及性能试验方法^[8],弹性轴承在不同载荷条件下的力学特性^[9-11]及寿命预测^[12]等方面,并总结出了一套弹性轴承的设计方法及经验公式,在此期间形成了大量的相关专利^[13-17],国外对弹性轴承的研究已十分深入,目前已很成熟,能根据给定的刚度技术指标及载荷条件准确地进行构型设计及寿命预测,其中最具有代表性的是美国的 LORD 公司和法国的 PAULSTRA 公司,其开发的各型产品已在直升机上得到了广泛应用,如美国的黑鹰直升机、欧洲的 NH90 直升机等. 国内对弹性轴承的研究则起步较晚,从 20 世纪 80 年代才开始研究,由于国外长期的技术封锁,有关弹性轴承的研究成果公开的文献很少,导致国内弹性轴承的研究水平与国外存在较大的差距,在弹性轴承理论方面的研究成果较少^[18-22],主要集中在结构设计方面,没有形成系统成熟的理论,最近的研究也主要以弹性轴承的失效分析^[23-24]、弹性轴承的试验方法^[25]及成型工艺设计^[26]为主. 本文研究内容主要从理论上推导了层状球面弹性轴承的压缩刚度和扭转刚度计算公式,通过具体算例从理论、有限元仿真、试验 3 个角度对层状球面弹性轴承的压缩刚度和扭转刚度进行了对比研究,验证刚度计算理论及有限元法在弹性轴承刚度计算方面的有效性和可靠性.

1 弹性轴承刚度计算理论

1.1 基本假设

为了从理论上计算弹性轴承的压缩刚度和扭转刚度,对弹性轴承作以下基本假设:

- 1) 忽略金属件的变形,金属隔片和橡胶层在变形过程中始终保持球形形状不变;
 - 2) 橡胶层材料均匀,各向同性;
 - 3) 橡胶层与金属隔片黏接牢固,无滑移现象;
 - 4) 橡胶层受到扭转变形时,忽略厚度和承载面积变化;
 - 5) 橡胶层的压缩及剪切变形符合胡克定律;
- 典型的球形弹性轴承的截面示意图如图 1 所示.

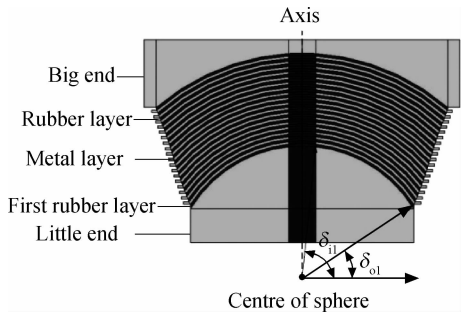


图 1 弹性轴承截面示意图

Fig. 1 Schematic of the cross section for elastomeric bearing

1.2 压缩刚度理论

由于构成弹性轴承的橡胶层属于不可压缩材料,其轴向压缩刚度为

$$K_{ci} = \frac{E_{ci}A_i}{t_{ri}}$$

式中 K_{ci} 为第 i 层橡胶层的压缩刚度; E_{ci} 为第 i 层橡胶层的压缩模量; A_i 为第 i 层橡胶层的承压面积; t_{ri} 为第 i 层橡胶层的厚度.

橡胶层的压缩模量 E_{ci} 与橡胶的弹性模量 E_0 有以下关系:

$$E_{ci} = E_0 (1 + 2.65kS_{fi}^2) \tag{1}$$

式中 S_{fi} 为第 i 层橡胶层的形状系数; k 为碳黑修正系数.

S_{fi} 可通过以下公式计算得到

$$S_{fi} = \frac{R_{si}(\sin \delta_{li} - \sin \delta_{oi})}{t_{ri}(\cos \delta_{li} + \cos \delta_{oi})} \tag{2}$$

式中 R_{si} 为第 i 层橡胶层的平均球面半径(mm); δ_{oi} 为第 i 层橡胶层的平均球面半径外缘角度(°);

δ_{li} 为第 i 层橡胶层的平均球面半径内缘角度($^{\circ}$).
各参数的表示如图 2 所示.

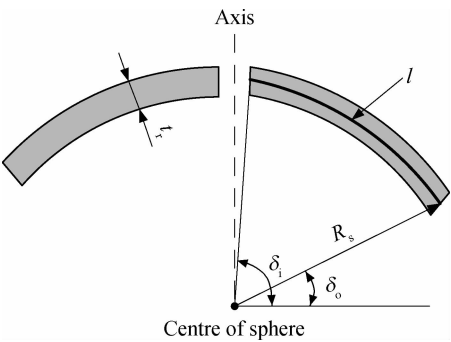


图 2 橡胶层截面示意图
Fig. 2 Schematic of the rubber layer

冠形球面橡胶层截面如图 2 所示,中截面曲线 l 如图 3 所示, Y 轴表示弹性轴承的中心轴线.
曲线 l 的方程为

$$y = \sqrt{r^2 - x^2} \quad (x \in [x_1, x_2])$$
$$x_1 = -r \sin \delta_1 \quad x_2 = -r \sin \delta_0$$

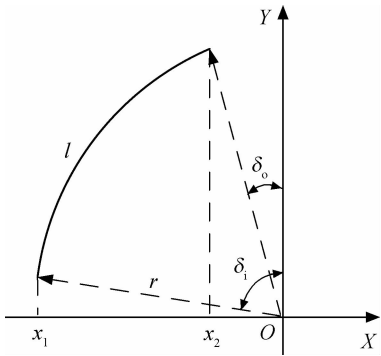


图 3 橡胶层中截面曲线示意图
Fig. 3 Schematic of mid-cross of the rubber layer section curve

式中 r 为橡胶层厚度方面中截面的球面半径,等效为橡胶层的平均球面半径.

橡胶层厚度方向中截面的面积为

$$A = 2\pi \int_{x_1}^{x_2} y dl = 2\pi \int_{x_1}^{x_2} y \sqrt{1 + y_x^2} dx = 2\pi r^2 (\sin \delta_1 - \sin \delta_0)$$

式中 A 为橡胶层厚度方向中截面的面积,等效为承压面积.则第 i 层橡胶层的压缩刚度:

$$K_{ci} = \frac{E_{ci} A}{t_{ri}} = \frac{2\pi E_{ci} R_{si}^2 (\sin \delta_{li} - \sin \delta_{oi})}{t_{ri}} \quad (3)$$

由于各橡胶层之间可以认为是串联关系,弹性轴承的等效压缩刚度 K_c 为

$$K_c = \left(\sum_{i=1}^n \frac{1}{K_{ci}} \right)^{-1} \quad (4)$$

1.3 扭转刚度理论

橡胶层的扭转刚度

$$K_{ti} = \frac{GI_{pi}}{t_{ri}}$$

式中 K_{ti} 为第 i 层橡胶层的扭转刚度; G 为橡胶材料的切变模量; I_{pi} 为第 i 层橡胶层相对于中心轴线的惯性矩.为了得到橡胶层的扭转刚度,先推导冠形球面橡胶层的惯性矩,如图 4 所示.

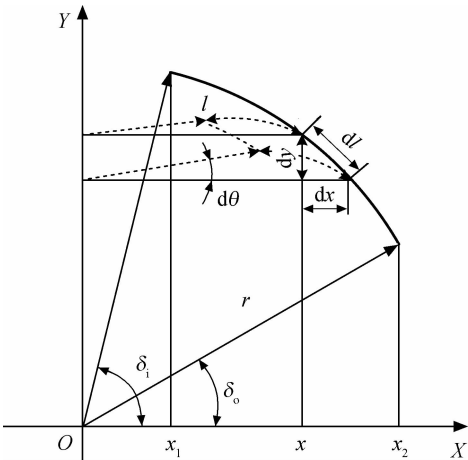


图 4 冠形球面极惯性矩计算示意图
Fig. 4 Schematic of inertia moment calculation for sphere-shaped crown

设构成冠形球面橡胶层中截面的曲线 l 的方程为

$$y = \sqrt{r^2 - x^2} \quad (x \in [x_1, x_2])$$
$$x_1 = r \cos \delta_1 \quad x_2 = r \cos \delta_0$$

冠形球面的惯性矩 I_p 为

$$I_p = \int_A x^2 dA = \int_0^{2\pi} \int_l x^2 x d\theta dl = \int_0^{2\pi} \int_{x_1}^{x_2} x^3 \sqrt{1 + y_x^2} dx d\theta = 2\pi r \int_{x_1}^{x_2} x^3 \frac{1}{\sqrt{r^2 - x^2}} dx \quad \text{令 } x = r \sin \phi$$
$$2\pi r \int_a^\beta r^3 \sin^3 \phi \frac{1}{\sqrt{r^2 - r^2 \sin^2 \phi}} d(r \sin \phi) = 2\pi r^4 \int_a^\beta \sin^3 \phi d\phi = 2\pi r^4 \left(-\cos \phi + \frac{\cos^3 \phi}{3} \right) \Big|_a^\beta$$

令 $x_1 = r \cos \delta_1 = r \sin \alpha$, 则

$$\alpha = \sin(\cos \delta_1) = \frac{\pi}{2} - \delta_1$$

同理可得 $\beta = \frac{\pi}{2} - \delta_0$. 将 α, β 代入上式可得

$$I_p = 2\pi r^4 \cdot \left(\sin \delta_1 - \sin \delta_0 + \frac{1}{3} \sin^3 \delta_0 - \frac{1}{3} \sin^3 \delta_1 \right) \quad (5)$$

故第 i 层橡胶层的扭转刚度为

$$K_{ti} = \frac{GI_{pi}}{t_{ri}} = \frac{2\pi r_i^4 G}{t_{ri}} \left(\sin \delta_{li} - \sin \delta_{oi} + \frac{1}{3} \sin^3 \delta_{oi} - \frac{1}{3} \sin^3 \delta_{li} \right) \tag{6}$$

考虑橡胶层形状系数的影响,第 i 层橡胶层的扭转刚度为

$$K_{ti} = \frac{G\pi R_{si}^4}{28.5 t_{ri}} \left(\sin \delta_{li} - \sin \delta_{oi} + \frac{1}{3} \sin^3 \delta_{oi} - \frac{1}{3} \sin^3 \delta_{li} \right) \tag{7}$$

由于各橡胶层之间可以认为是串联关系,弹性轴承的等效扭转刚度 K_t 为

$$K_t = \left(\sum_{i=1}^n \frac{1}{K_{ti}} \right)^{-1} \tag{8}$$

2 试验与仿真

为了对 1.2 节、1.3 节得到的理论压缩刚度公式和扭转刚度公式进行验证,下面以 18 层金属层 19 层橡胶层的弹性轴承为例,将其压缩刚度和扭转刚度的理论计算结果、仿真结果和试验结果进行对比分析,弹性轴承的截面示意图如图 1 所示.从小接头起前 11 层橡胶层的厚度为 0.8 mm,12 层~19 层橡胶层的厚度为 0.9 mm.

2.1 压缩刚度和扭转刚度的理论计算结果与仿真结果对比研究

对压缩刚度进行理论计算时,将各橡胶层的已知参数代入式(3)中便可求出各橡胶层的压缩刚度,将各橡胶层的压缩刚度代入式(4)中便可求得弹性轴承的等效压缩刚度.同理,将各已知参数代入式(7)、式(8)中,便可求得各橡胶层的扭转刚度和弹性轴承的等效扭转刚度.

对弹性轴承刚度的仿真分析采用有限元法,有限元模型如图 5 所示,橡胶材料本构模型选用 Mooney-Rivlin 二参数本构模型,材料常数为 $C_1=0.162, C_2=0.0223$. 由于弹性轴承经常处在一定的压力(即离心力)下工作,所以计算其压缩刚度时,是指在特定压力下的压缩刚度.对压缩刚度进行仿真时,将小接头的下表面节点全约束,在大接头的上表面施加总共 200 kN 的压力,输出最后载荷步的结果,计算结束后提取各橡胶层的上下表面节点在压力方向上的平均相对位移,各橡胶层间的压力视为等量传递,通过压力和各橡胶层在压力方向上的相对位移便可得到各橡胶层在

200 kN 压力下的压缩刚度,将各橡胶层的压缩刚度代入式(4)中便得到弹性轴承的总的压缩刚度.

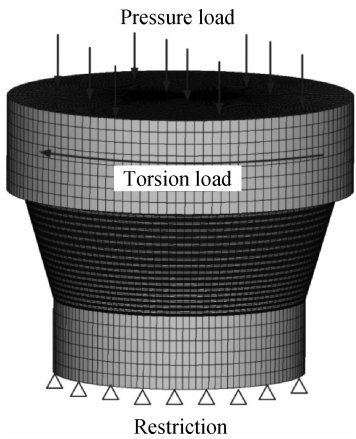


图 5 弹性轴承刚度仿真有限元模型
Fig. 5 Finite element model of stiffness simulation for elastomeric bearing

图 6 是弹性轴承各橡胶层压缩刚度的理论计算结果和仿真结果的比较,将各橡胶层压缩刚度的理论计算结果代入式(4)中得到总的压缩刚度为 237.88 kN/mm,应用同样的方法由仿真计算得到 200 kN 压力时总的压缩刚度为 234.41 kN/mm.由图 6 可知,第 5 层至第 19 层,各橡胶层压缩刚度的仿真结果均大于理论计算结果,第 1 层至第 11 层橡胶层的压缩刚度逐渐增加,其中压缩刚度的仿真结果比理论公式计算结果增加的幅度更大,第 12 层至第 19 层压缩刚度逐渐呈线性增加,理论公式计算结果与仿真结果趋势基本

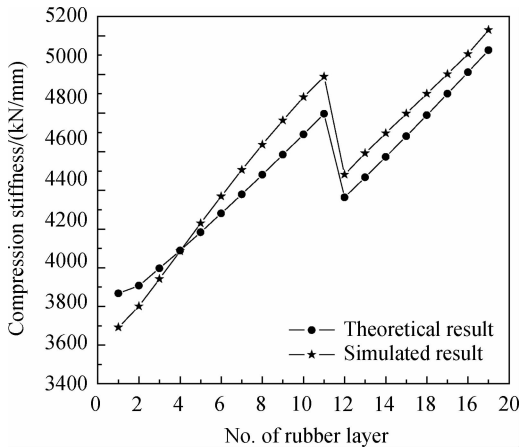


图 6 各橡胶层压缩刚度理论计算结果与仿真结果的比较
Fig. 6 Comparison of theoretical result and simulated result of compression stiffness in every rubber layer

一致,第 11 层和第 12 层之间由于橡胶层厚度的变化导致压缩刚度出现骤降,第 12 层橡胶较第 11 层橡胶刚度下降幅度达 10%,橡胶层厚度对压缩刚度有显著影响.

对扭转刚度进行仿真时,将小接头下表面节点全约束,在大接头外缘周向节点上施加绕弹性轴承轴向的角位移,由于理论计算公式并没有考虑橡胶材料的非线性,为了尽量减小非线性的影响,将扭转刚度仿真结果与理论计算结果进行比较时,取仿真结果在小角度下得到的扭转刚度(如 1°),各橡胶层间的扭转力矩视为等量传递,有限元求解结束后,提取各橡胶层上下表面外缘节点绕弹性轴承轴向的平均相对角位移,通过小接头外缘节点提取绕轴向的扭转力矩,通过扭转力矩和平均相对角位移便可求得各橡胶层在该扭转角下的扭转刚度,将各橡胶层的扭转刚度代入式(7)中便得到弹性轴承总的扭转刚度.

图 7 是弹性轴承扭转刚度理论计算结果和仿真结果的比较,由图 7 可知,橡胶层厚度不变时,扭转刚度的仿真结果和理论计算结果随橡胶层序号的增加而增加,各橡胶层扭转刚度的仿真结果比理论计算结果表现得更为平缓,前 9 层橡胶层扭转刚度的仿真结果大于理论计算结果,第 10 层~第 19 层橡胶层扭转刚度的仿真结果小于理论计算结果,最大误差出现在第 1 层和第 19 层,第 1 层橡胶层扭转刚度仿真结果比理论计算结果大 33.3%,第 19 层扭转刚度仿真结果比理论计算结果小 32.8%,同时还可看出,由于橡胶层厚度的变化导致第 11 层和第 12 层橡胶层之间的扭转刚

度出现骤变,第 12 层橡胶层较第 11 层橡胶层的扭转刚度下降幅度达 9%,橡胶层厚度对扭转刚度也有显著影响.将各橡胶层的扭转刚度的理论计算结果代入式(7)中得到总的扭转刚度为 6.758 N·m/(°),应用同样的方法由仿真计算得到总的扭转刚度为 6.843 N·m/(°),由两种方法得到总的扭转刚度基本一致.

2.2 压缩刚度、扭转刚度的试验结果与仿真结果对比研究

弹性轴承刚度试验:弹性轴承的刚度试验如图 8 所示.测量弹性轴承的压缩刚度和扭转刚度均在专用动态试验机上进行,根据弹性轴承实际压缩刚度及扭转刚度的大小选择合适吨位的试验机及位移、扭矩传感器,以提高试验精度,根据弹性轴承及试验机的接口设计固定大小金属接头的夹具,将弹性轴承和夹具、夹具及试验机之间通过螺栓固定.



图 8 弹性轴承的压缩刚度试验和扭转刚度试验
Fig.8 Compression stiffness test and torsion stiffness test of elastomeric bearing

测量压缩刚度时,先将弹性轴承的大接头固定,在小接头上均匀施加向下的压力,控制位移加载速度为 3.0 kN/s,试验前先施加 500 N 的压力然后清零消除弹性轴承与夹具间的装配间隙,对弹性轴承进行 3 次预压缩,试验时施加的最大压力为 200 kN,每间隔 0.3 s 由程序自动记录一组压力和压缩位移,取最后一组数据作为试验数据,压缩刚度试验结果如图 9 所示,从图中看出,压缩刚度总体上呈现较好的线性,当压缩位移小 0.2 mm 时存在微弱的非线性现象,可能由于夹具间的装配间隙造成,当压缩位移大于 0.2 mm 时,线性较好,弹性轴承的压缩刚度对橡胶材料的非线性特性表现不明显.

测量扭转刚度时将弹性轴承的小接头固定,在大接头上均匀地施加扭转角,从平衡位置开始沿顺时针方向、逆时针方向连续扭转,第 2 次回到平衡位置为一个循环,记录数据前先对弹性轴承进行 3 次预扭转循环,预扭转的角速度可适当加

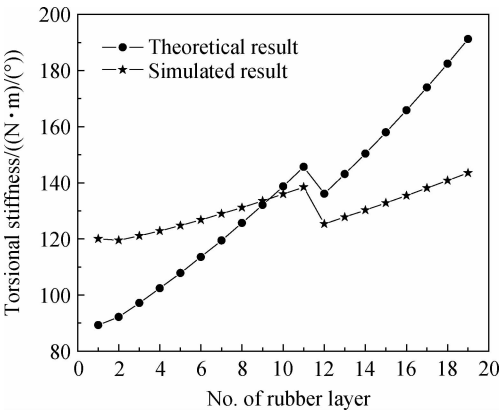


图 7 各橡胶层扭转刚度理论计算结果与仿真结果的比较
Fig.7 Comparison of theoretical result and simulated result of torsion stiffness in every rubber layer

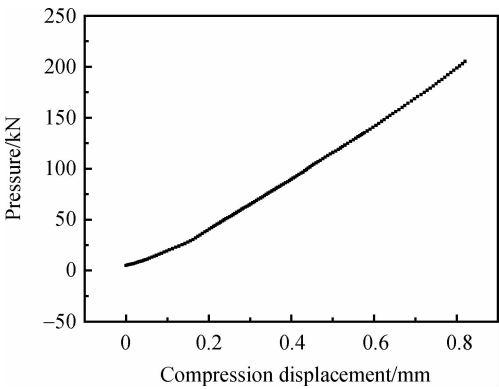


图 9 压缩刚度试验结果

Fig. 9 Test result of compression stiffness

大,如 $1^{\circ}/\text{s}$ 或 $2^{\circ}/\text{s}$,正式扭转试验时减小扭转角速度,如 $0.5^{\circ}/\text{s}$,扭转过程中每间隔 0.05 s 由系统自动记录一组扭转力矩和扭转角,将弹性轴承试样扭转至 60° 时截止,扭转刚度试验结果如图 10 所示,从图中可看出,总体上扭转刚度随扭转角的增大而增大,橡胶材料的非线性特性对扭转刚度的影响较明显,试验数据存在小的波动。

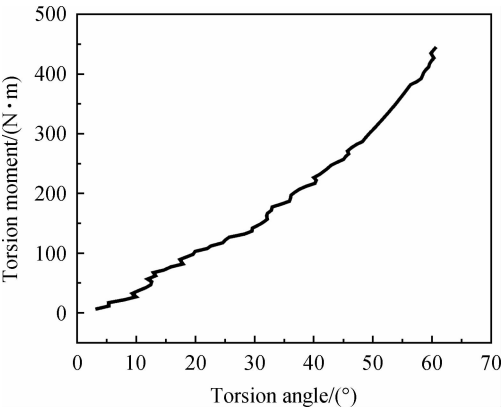


图 10 扭转刚度试验结果

Fig. 10 Test result of torsion stiffness

由于试验方法只能得到弹性轴承总的压缩刚度和扭转刚度,无法通过试验得到各橡胶层的压缩刚度和扭转刚度.为了将试验结果和仿真结果进行比较,进行压缩刚度的仿真时,将小接头的底部节点全约束,在大接头的顶部节点上施加向下大小为 250 kN 的压力,预先设定 20 个载荷步,计算时输出每个载荷步的结果,计算结束后提取每个载荷步下大接头上表面节点在压力方向上的平均压缩位移,提取每个载荷步下小接头下表面节点的反力,从而得到每个载荷步下施加在大接头顶部节点的压力,通过压力和压缩位移求得每个载荷步下弹性轴承总的压缩刚度.图 11 是弹性轴

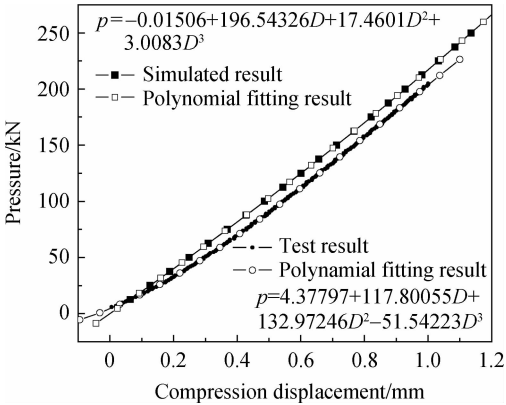


图 11 各橡胶层压缩刚度试验结果与仿真结果的比较

Fig. 11 Comparison of test result and simulated result of compression stiffness in every rubber layer

承压缩刚度试验结果与仿真结果的比较,从图中可以看出,当压缩位移大于 0.1 mm 时,压缩刚度的仿真结果大于试验结果,仿真结果比试验结果具有更好的线性关系,压缩位移小于 0.5 mm 时,试验压力-压缩位移呈弱非线性,当压缩位移大于 0.5 mm 时,试验压力-压缩位移与仿真压力-压缩位移之间几乎具有一致的线性关系。

因为弹性轴承的压缩刚度是指特定压力下的刚度,相对于压力-压缩位移曲线,是指压力-压缩位移所属曲线在特定压力下的斜率,为此对仿真结果和试验结果分别进行 3 次多项式拟合,以便求得弹性轴承在任意压力下的压缩刚度,拟合结果如图 11 所示.计算仿真结果的拟合多项式当压力 p 为 200 kN 时所对应的压缩位移 D 为 0.9288 mm ,对仿真结果的拟合多项式求导得到多项式

$$p' = 9.0249D^2 + 34.9202D + 196.5433$$

将 0.9288 代入多项式得到压力为 200 kN 时压缩刚度的仿真结果为 236.76 kN/mm .应用同样的方法对试验结果进行处理,求取试验结果的拟合多项式当压力为 200 kN 时所对应的压缩位移为 0.9843 mm ,对试验数据拟合多项式求导得

$$p' = -154.6267D^2 + 265.945D + 117.801$$

将 0.9843 代入多项式得到压力为 200 kN 时压缩刚度的试验值为 229.76 kN/mm .

为了便于扭转刚度的仿真结果与试验结果进行比较,进行扭转刚度的仿真时,将小接头下表面节点全约束,在大接头外缘周向节点上施加绕弹性轴承轴向的角位移,由于在大扭转角下,橡胶层的有限单元产生严重变形,导致计算无法收敛,进行扭转刚度的仿真计算时,大接头绕轴向的最大

角位移为 54° , 计算结束后, 提取每个载荷步下大接头外缘节点绕轴向的角位移, 提取每个载荷步下小接头外缘节点绕轴向的扭矩, 通过角位移和扭矩便可得到每个载荷步下弹性轴承的扭转刚度。为了便于比较, 试验数据只选取扭转角为 $2.5^\circ \sim 60^\circ$ 的数据。图 12 是弹性轴承扭转刚度试验结果与仿真结果的比较, 从图中可以看出, 扭转刚度的仿真结果大于试验结果, 当扭转角小于 30° 时, 扭转刚度的仿真结果与试验结果和扭转角之间均具有较好的线性关系, 随着扭转角的增加, 扭转刚度与扭转角之间的非线性关系逐渐增强, 并且仿真结果比试验结果表现得更为明显, 当扭转角大于 50° 时, 有限元仿真得到的扭转刚度与扭转角存在较为严重的非线性, 扭转刚度随扭转角的增大快速增加, 仿真结果与试验结果的误差也随之增加, 最大达到 25%。

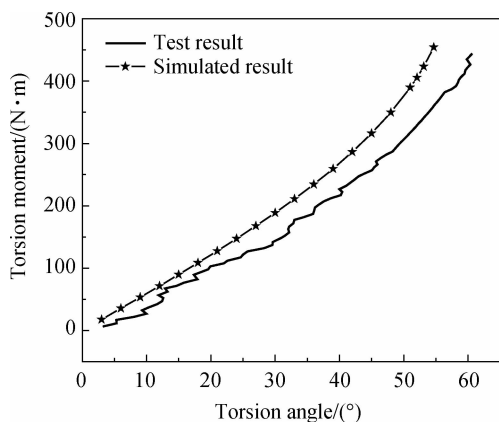


图 12 各橡胶层扭转刚度试验结果与仿真结果的比较
Fig. 12 Comparison of test result and simulated result of torsion stiffness in every rubber layer

3 结 论

1) 从理论上推导了弹性轴承橡胶层压缩刚度和扭转刚度的计算公式。

2) 压缩刚度的理论计算结果、仿真结果及试验结果均符合良好, 由于理论计算无法考虑材料的非线性特性, 各橡胶层扭转刚度的理论计算结果与仿真结果有一定偏差, 但弹性轴承总的扭转刚度的理论计算结果、仿真结果及试验结果三者基本一致。

3) 材料非线性对弹性轴承的压缩刚度影响不明显, 但对扭转刚度的影响较大, 且随扭转角的变大表现出越明显的非线性特性。

参考文献:

- [1] Donguy P. Development of a helicopter rotor hub elastomeric bering[J]. Journal of Aircraft, 1980, 17(5): 346-350.
- [2] Donguy P. Design and development of a helicopter rotor hub and elastomeric bearing[R]. AIAA 79-0985, 1979.
- [3] Stanton J F, Roeder C W. Elastomeric bearing designs, construction and materials[M]. Washington DC: Transportation Research Board, 1982.
- [4] Simo J C, Kelly J M. The analysis of multilayer elastomeric bearings[J]. Journal of Applied Mechanics, 1984, 51(2): 256-262.
- [5] Nicholson D W, Nelson N W, Lin B, et al. Finite element analysis of hyperelastic components[J]. Applied Mechanics Reviews, 1998, 51(5): 303-320.
- [6] Lejeunes S, Boukamel A, Cochelin B. Analysis of laminated rubber bearings with a numerical reduction model method [J]. Archive of Applied Mechanics, 2006, 76(5/6): 311-326.
- [7] Shabaneh N, Zu J W. Nonlinear dynamic analysis of a rotor shaft system with viscoelastically supported bearings[J]. Journal of Vibration and Acoustics, 2002, 125(3): 290-298.
- [8] Topkaya C, Yura J A. Test method for determining the shear modulus of elastomeric bearings [J]. Journal of Structural Engineering, 2002, 128(6): 797-805.
- [9] Abe M, Yoshida J, Fujino Y. Multiaxial behaviors of laminated rubber bearings and their modeling: I experimental study[J]. Journal of Structural Engineering, 2004, 130(8): 1119-1132.
- [10] Ravari A K, Othman I, Ibrahim Z, et al. Variations of horizontal stiffness of laminated rubber bearings using new boundary conditions[J]. Scientific Research and Essays, 2011, 6(14): 3065-3071.
- [11] Chen S C, Tian X K, Yan W M, et al. Modeling and analysis of laminated rubber bearings under axial tensile loading [J]. Materials and Structures, 2014, 47(6): 987-997.
- [12] Bauman J T. Fatigue, stress, and strain of rubber components a guide for design engineers[M]. Valley Avenue, Canada: Hanser Publications, 2003: 89-105.
- [13] Rybicki R C. Elastomeric bearing for a helicopter rotor: USA, US3782854[P]. 1974-01-01.
- [14] Finney R H. Laminated bearing with plural modulus layer: USA, US4105266[P]. 1977-08-01.
- [15] McCafferty H A, Darby U. Elastomeric bearing for helicopter rotor having lead-lag damping: USA, US4886419 [P]. 1989-12-12.
- [16] Balczun P J, Becotte P L. Spherical elastomeric bearing assembly: USA, US5902050A[P]. 1999-05-11.
- [17] Muyaert N W. Elastomeric bearing: USA, US6413048B1 [P]. 2002-07-02.
- [18] 赵启元. 层式橡胶弹性轴承[J]. 材料工程, 1982(2): 39-

43.
ZHAO Qiyuan. Laminated rubber elastomer bearing[J]. Journal of Materials Engineering,1982(2):39-43. (in Chinese)

[19] 张劲,刘玉琦. 橡胶球面弹性轴承的有限元分析[J]. 航空学报,1989,10(4):122-126.
ZHANG Jin,LIU Yuqi. Finite element analysis for rubber elastomer bearing [J]. Acta Aeronautic et Astronautica Sinica,1989,10(4):122-126. (in Chinese)

[20] 颀连元. 旋翼弹性轴承应用研究[J]. 直升机技术,2002(3):6-11.
XIE Lianyuan. Application research of rotor system spherical thrust bearing[J]. Helicopter Technique,2002(3):6-11. (in Chinese)

[21] 陈高升,张连宏,栗付平,等. 球面层状弹性轴承结构对其力学行为影响的有限元分析[J]. 材料工程,2009(10):15-19.
CHEN Gaosheng,ZHANG Lianhong,LI Fuping, et al. Finite element analysis for the influence of spherical layered elastomeric bearing structure on the mechanical behavior [J]. Journal of Materials Engineering,2009(10):15-19. (in Chinese)

[22] 覃海鹰,刘晓宁,王丁伟. 基于 ANSYS 的弹性轴承设计方法[J]. 直升机技术,2009(4):10-14.
QIN Haiying,LIU Xiaoning,WANG Dingwei,et al. The design method of spheric thrust bearing based on ANSYS [J]. Helicopter Technique,2009(7):10-14. (in Chinese)

[23] 王青龙,李满福,黄文俊,等. 某型机主桨球面弹性轴承故障分析[J]. 直升机技术,2011(2):45-48.
WANG Qinglong,LI Manfu,HUANG Wenjun,et al. Maf-function analysis of xx type helicopter main rotor spherical bearing[J]. Helicopter Technique,2011(2):45-48. (in Chinese)

[24] 覃海鹰,贾良现,杨华高. 直升机旋翼弹性轴承失效影响分析[J]. 直升机技术,2011(4):16-20.
QIN Haiying,JIA Liangxian,YANG Huagao. The failure influence analysis of helicopter rotor elastomeric spheric thrust bearing[J]. Helicopter Technique,2011(4):16-20. (in Chinese)

[25] 黄晓东,王卫卫,蒋伟光. 直升机旋翼系统弹性轴承刚度特性试验方法研究[J]. 机械强度,2012,34(2):270-273.
HUANG Xiaodong,WANG Weiwei,JIANG Weiguang. Research of stiffness characteristics test method for helicopter rotor system spherical thrust bearing[J]. Journal of Mechanical Strength,2012,34(2):270-273. (in Chinese)

[26] 陈中敢 陈建会. 弹性轴承及其制备方法: 中国, CN 101666359A[P]. 2010-03-10.