

附加粘弹性阻尼齿轮结构的阻尼计算

西北工业大学 孙 涛* 邵长健 沈允文

【摘要】 本文结合模态应变能理论与 20 节点有限元方法, 提出了一种附加粘弹性阻尼结构损耗因子的计算模型和方法。以某实际齿轮附加阻尼结构为例, 进行阻尼计算, 研究了如何提高阻尼处理的效率, 并得到相应实验的验证。该方法克服了已有粘弹性阻尼结构计算方法只能对简单理想结构建模的局限性, 能够简便有效地应用于实际粘弹性阻尼结构的阻尼预测和优化。这对阻尼的工程应用具有较大的理论和应用价值。

主题词: 模态分析 有限元 粘弹性 阻尼 齿轮

分类号: TH132.41

1 引言

近二十几年来, 用附加粘弹性阻尼的方法来控制弹性结构(尤其是薄壁型构件)的谐振响应已得到了广泛认可。有关粘弹性附加阻尼结构计算方法的文献很多^[1], 这些方法都是基于一些典型的理想结构进行分析如梁、板等规范结构, 所采用的边界条件也基本上是理想简单边界^[2, 3]。成功的计算实际结构的阻尼损耗因子还没有成熟的方法。同时, 对于航空薄辐板式齿轮这种具有严格质量要求的结构, 在有限质量代价下寻求最佳阻尼效果也是非常现实的问题, 即要解决阻尼优化问题。为此, 本文依据模态应变能理论, 采用有限元方法对齿轮附加阻尼结构建模, 提出了有效的计算和优化方法, 适应了实际工程结构的需要和现有计算条件的限制。

2 阻尼理论和计算方法

阻尼是结构或材料在受循环变时将动能转变为热能的一种耗散能量的性质。通常有两种表达方式: (1) 每振动一周耗散的能量; (2) 每振动一周耗散能与应变能之比。常用的阻尼的度量是: 损耗因子 $\eta = D_0 / 2\pi V$ (V —试件为最大存储能; D_0 —试件振动一周耗散的能量)。

由于阻尼损耗因子的定义直接反映了阻尼的耗能本质, 即表徵了阻尼的大小, 又可转化为阻尼系数进行动态分析, 因而本文的阻尼计算和优化都是借助损耗因子的分析来进行的。由于工程上常用的金属材料在设计应力水平下, 阻尼很小, 其损耗因子比粘弹性材料的损因子要小 2~3 个数量级以上^[4], 因此在附加阻尼结构的分析中, 通常将金属材料本身的阻尼忽略。

依据模态应变能理论^[5]: 特定模态下复合结构的损耗因子与粘弹性材料的损耗因子的比值, 可以由粘弹材料的应变能与该模态下整个结构的总弹性应变能比值来表达。即:

$$\eta_b^{(r)} / \eta_v = V_v^{(r)} / V_s^{(r)} \quad (1)$$

式中: $\eta_s^{(r)}$ 为复合结构的第 r 阶模态损耗因子; η 为粘弹性材料的损耗因子; $V_v^{(r)}$ 为复合结构以第 r 阶无阻尼模态振动时存储于粘弹性材料中的弹性应变能; $V_s^{(r)}$ 为复合结构以第 r 阶模态振动时存储于整个结构中的弹性应变能。上式表明, 当用有限元法计算时, 只需将粘弹性阻尼材料当作具有实刚度模量的纯弹性体, 就可以简单的计算复合结构的无阻尼主振型, 从而避免了复杂的非线性复特征值问题。此时(1)式变成:

$$\frac{\eta_s^{(r)}}{\eta_v} = \left[\sum_{e=1}^m \Phi^{(r)T} [K]_e \Phi^{(r)} \right] \backslash \left[\sum_{i=1}^n \Phi^{(r)T} i e [K]_i \Phi^{(r)} \right]$$

(2)

式中: $\Phi^{(r)}$ 为结构第 i 个单的第 r 阶模态矢量; $\Phi^{(r)}$ 为第 e 个粘弹性材料单元的第 r 阶模态矢量; $[K]_i$ 为结构第 i 个单元的刚度矩阵; $[K]_e$ 为第 e 个粘弹性单元的刚度矩阵; m 为复合结构中划分的粘弹性单元的数目; n 为复合结构划分单元的总数。

(2) 式中, 分母记为: $C^{(r)} = \sum_{i=1}^n \Phi^{(r)T} [K]_i \Phi^{(r)}$, 由于在 r 阶模态下 $C^{(r)}$ 对于每一阻尼单元都为同一定值, 故可以将 $C^{(r)}$ 移进式(2)分子的求得符号里面, 则该式变为:

$$\eta_s^{(r)} = \eta \sum_{e=1}^m \frac{1}{C^{(r)}} \Phi^{(r)T} [K]_e \Phi^{(r)} = \sum_{e=1}^m \eta_e^{(r)}$$

(3)

其中, $\eta_e^{(r)} = \eta_v (1/C^{(r)}) \Phi^{(r)T} [K]_e \Phi^{(r)}$, 相当于第 e 个粘弹性单元所贡献的结构损耗因子, (3) 式表明: 在任一给定模态下, 结构的损耗因子等于各阻尼单元损耗因子的总和。不同位置处单元的 $\eta_e^{(r)}$ 值的大小反映了结构第 r 阶振动时各处不同的阻尼效果。借助结构损耗因子 $\eta_s^{(r)}$, 可以对附加粘弹性阻尼的阻尼效果进行简便的预测。

3 计算模型

本文以某航空发动机减速器齿轮附加阻尼结构为例进行计算与优化分析。由于附加阻尼是由辐板振动引起粘弹材料变形而产生的, 因此, 这里假想将齿齿抹平以简化计算模型(图 1(a) 所示)。这样并不影响辐板的阻尼效果。基体材料为钢, 粘弹性阻尼材料为粘弹材料 ZN 33,

表 1 齿轮附加阻尼结构材料参数

	密 度	弹性模量	泊松比
基 体	0.78×10^4	0.206×10^{12}	0.3
阻尼层	0.093×10^4	7.8×10^6	0.47
约束层	0.27×10^4	0.068×10^{12}	0.32

约束层为铝片。对该模型用 20 节点有限元进行划分, 先沿圆周方向等分 N 份, 每份再划分为 M 个单元。模型中的单元总数为 $M \times N$ 个。图 1(b) 是其中一个扇形条的单元划分示意图。其中各层材料的物理参数见表 1, 表中单位均为国际单位制标准单位。

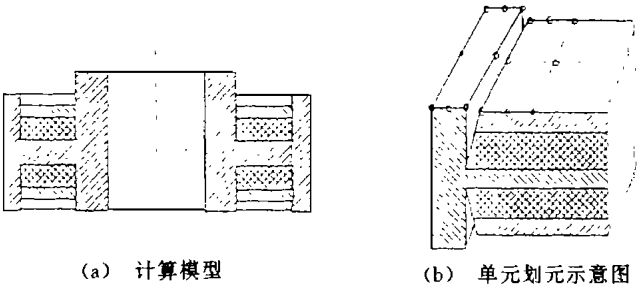


图 1 齿轮附加阻尼(a) 计算模型和(b) 单元划分示意图

4 齿轮附加阻尼分析

4.1 损耗因子计算及实验对比

依据前述计算方法和模型, 计算了该齿轮附加阻尼结构前五阶模态对应的损耗因子。为检

验计算结果的可靠性,又利用 CF- 350 双通道快速傅立叶变换分析仪,采用测量对数衰减率的自由振动法来测量阻尼。计算与实验对比于表 2,从表中观察到:

表 2 阻尼结果对比(m 为节圆数, n 为节径数)

对 应 模 态	$m= 0$ $n= 1$	$m= 1$ $n= 0$	扭 转	$m= 1$ $n= 1$	伞 形
实验频率/ $H z$	1150	1235	1425	1575	1612
计算频率/ $H z$	1215	1226	1382	1400	1426
实验损耗因子	0. 0119	0. 0107	0. 0104	0. 0098	0. 0157
计算损耗因子	0. 0110	0. 00975	0. 098	0. 0088	0. 0135

(1) 计算和实验结果吻合得较好,说明本文计算方法是可靠的。其计算结果完全可以用来估计实际附加粘弹性阻尼结构的阻尼效果。

(2) 与实验相比,计算所得损耗因子偏小一些。这主要是计算中只包括阻尼材料的应变耗能所产生的阻尼,实验所测为具体条件下的

的所有阻尼,包含了实验本身带来的附加阻尼(譬如锤击的脉冲力存在一定持续时间,以及试件的悬挂没有达到完全自由,都会引入非线性因素并损耗能量传输,使得测试结构偏大)。

(3) 计算和实验所得共振频率有一定的差别,这是合理的。因为模态应变能理论是从耗能比例的角度来计算损耗因子,符合阻尼的机理和损耗因子的定义,所以在计算损耗因子方面是可行的。但是,用定值的实模量来取代随温度和频率非线性变化的复模量,自然不可能完全准确地反映出结构的固有频率。因此,在模态应变能法中得到的频率并不能与实际结构的频率完全一致。不过,在附加阻尼动特性计算时,可以用模态应变能理论得到的频率作为迭代初始值,这样能够明显加速频率计算的收敛过程^[3]。

4. 2 齿轮附加阻尼效率的提高

弹性体的振动呈一定的模态时,在不同位置上设置附加阻尼层耗散振动能量的能力是不同的,在全面积上进行阻尼处理不仅有时造成不必要的浪费,而且,对于航空薄辐板式齿轮这种具有严格质量要求的结构,在有限附加质量代价下如何提高阻尼效果也将直接影响着齿轮的设计功能的实现。

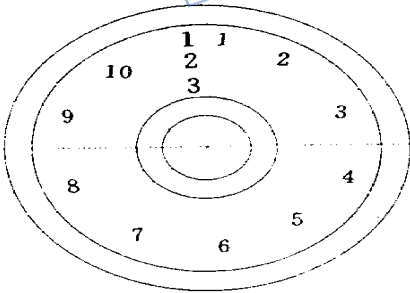


图 2 阻尼单元分布图

(1) 阻尼处理的分布位置: 为考察在辐板上不同位置阻尼层的耗能效果,计算了不同位置上单元阻尼耗散效果(图 2)。图 3 是齿轮和转振动时沿辐板半径方向的阻尼损耗因子分布曲线,横坐标表示辐板上相应单元,纵坐标表示各单元损耗因子由上到下的 3 条曲线对应于辐板上由外到内的 3 圈单元。通过不同部位阻尼耗能分布曲线,可以一目了然地观察出各阶模态的最佳阻尼分布位置。

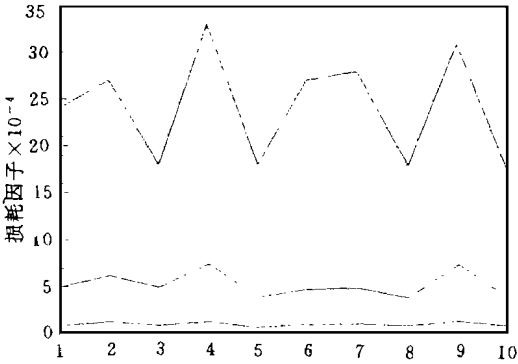


图 3 损耗因子分布图

从图 3 可以看出: 对该齿轮而言, 扭转振动最大耗能位置在辐板外侧靠近轮缘的部位, 图 3 中, 在 4, 9 号位置处对应的损耗因子值有两个突起, 这是因为在特征向量的计算中, 扭转振型可能夹带了相邻的一节径振型致使模态不完全正交。需要指出一点: 因为我们这里计算的齿轮扭转振动振型节圆数是 0, 辐板阻尼的最佳效果是粘贴在辐板的外圈。随着节圆数的增多, 辐板阻尼的最佳耗能位置也会出现若干个, 而不再是单一的。

(2) 阻尼处理产生的附加质量: 设基层、阻尼层、约束层的厚度和密度分别为: $h_1, \rho_1, h_2, \rho_2, h_3, \rho_3$, 则由阻尼处理引起的附加质量可以由辐板的当量增加厚度 Δh 来衡量:

$$\Delta h = (1/\rho_1)(h_2\rho_2 + h_3\rho_3) \quad (4)$$

以本文的计算为例, 尽管阻尼层的厚度(每侧 6 mm)比辐板的厚度(3.2 mm)还要大, 但只相当于辐板厚度增加了 1.7 mm, 经实际发动机运转表明, 依此对齿轮进行阻尼处理, 可以基本不影响设计性能的前提下, 有效地降低发动机减速器振动。在要求更严格的情况下, 可以以(4)式作为约束方程, 损耗因子为目标函数进行优化设计从而获得最佳阻尼效果, 或反过来以(4)式为目标函数, 损耗因子为约束条件, 可以在满足阻尼要求的前提下使附加质量最小。

5 结 论

通过对实际齿轮附加阻尼结构的计算及实验对比, 证明该方法是可行的, 其结果比较可靠。不同模态频率下, 附加阻尼结构的损耗因子是不同的。齿轮在实际工作时, 往往只在某几阶频率发生共振, 通过计算的损耗因子, 可以有效地预测结构附加阻尼的各阶阻尼效果, 从而根据齿轮的实际共振情况采取相应的阻尼处理。此外, 利用该方法还可以简便地对工程中的实际附加阻尼结构进行阻尼预测和位置优化。更加有效地指导附加阻尼的实际工程应用。

参 考 文 献

- 1 戴德沛等. 使用大阻尼夹层结构提高机械结构的动态稳定性. 机械工程学报, 1983, 18(1):
- 2 Di Taranto R A. Theory of Vibratory Bending for Elastic and Viscoelastic Layered Finite Length Beams. Journal of Applied Mechanics, 1965, 32(12):
- 3 Cao Xisheng, Hans P M. Computational Predication and Redesign for Viscoelastically Damped Structures. Comput. Methods. Appl. Mech. Engrg., 1995(125):
- 4 振动与冲击手册》编委会. 振动与冲击手册(第三卷: 工程应用). 北京: 国防工业出版社, 1992
- 5 Johnson CD, Kienholz C A. Finite Element Predication of Damping in Beams with Constrained Viscoelastic Layer. The Shock and Vibration Bull Pt1, 1981, (51):

(责任编辑 王震华)

and transmission errors for the aligned and misaligned gear drives are obtained in an example of spiral bevel gears. Although the proposed method deals with the hypoid gear and spiral bevel gears, the basic idea is suitable for spur and helical gears.

Key Words Spiral bevel gears Edge Contact Drives Errors

KINETIC CHARACTERISTICS OF TRANSMISSION TEST EQUIPMENT FOR SPIRAL BEVEL GEARS

Zhao Ming, Yang Haiyan, Ren Pingzhen, Xu Lingzhi, Yang Bingyu

(7th Dept. Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072)

ABSTRACT The transfer matrix method of the lateral/torsional coupling is applied to calculation of kinetic characteristics of transmission test equipment for spiral bevel gears. The relationships of the kinetic characteristics for the test rotor are investigated in the engagement of the spiral bevel gears. The forces on the bearing and gear-box vibration are analyzed, all calculated results are consistent with the test data.

Key Words Gear drives Kinetic characteristics Bearings Radial forces Vibrations

A STUDY ON LUBRICATION OF SPIRAL BEVEL GEARS IN AEROENGINE

Wei Wenshan and Lin Jishu

(5th Dept. Shenyang Aeroengine Research Institute, Shenyang 110015)

Ding Jinyuan, Xia Yanqiu, Yang Wentong

(Mechanical Engineering Institute, Shenyang 110006)

ABSTRACT The vector method of the gear engagement theory is used to describe the manufacturing and meshing process of the spiral bevel gears in the aeroengine. The geometry and kinematic parameters of each contact point are considered, including the position, the curvature and the speed of each contact point on the tooth surface. The load on tooth in each contact position is determined with the help of Loaded Tooth Contact Analysis (LTCA) and the thickness of oil film on each contact position is obtained as theoretical foundation for judging the lubrication state. Meanwhile, 300 hours test of the gears has been made and the topographical feature of the tooth surface by means of scanning electron microscope is investigated. The results of calculation and experiment show that the gears are under boundary lubrication and partial elasto-hydrodynamic lubrication.

Key Words Aircraft engine Spiral bevel gears Lubrication Friction

COMPUTATION OF VISCOELASTICAL DAMPING STRUCTURE ATTACHED TO GEARS

Sun Tao, Shao Changjian, Shen Yunwen

(7th Dept. Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072)

ABSTRACT A computational method is developed to solve engineering prob-

lems for the viscoelastical damping structure attached to gears, and a simple model is setup by combining 20- node element technique according to the modal strain energy theory. Thus, a practical and simple approach for engineering application is provided to predict loss factors and optimal location of damping layer in the structure without the difficulty of solving complex eigenvalues. As an example, the loss factors and optimal damping location have been calculated for a real gear. The results are in a good agreement with its experimental data.

Key Words Modal analysis Finite elements Viscoelastic Damping Gears

A STUDY ON VIBRATION DEPRESSION OF GEAR SYSTEM BY MODIFICATION REANALYSIS OF STRUCTURAL DYNAMICS

Shao Changjian , Sun Tao , Shen Yunwen

(Mechanical Engineering Department, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072)

Zhang Xianmin

(Mechatronic Engineering Department, Shantou University, Shantou 515063)

ABSTRACT The complex Mode Theorem and Matrix Perturbation Method are applied to execution of the modal sensitivity analysis and the Fourier Series Method for calculation of the vibration responses. The dynamic characteristics of a complicated aerogear system, so-called star gear system, are elaborated thoroughly. The damping enhancement and modifications of other structural parameters for the vibration depression of the system are also considered in order to find the most efficient measures to minimize the vibration responses of the whole gear system. As a result, an accurate and efficient procedure for the dynamic analysis and redesign of viscously damped linear vibration system is developed, and some practically useful conclusions are drawn out.

Key Words Gear drives Dynamic structural analysis Modal theory
Vibration depression

AN EXPERIMENTAL RESEARCH OF PULSE- GEL PROPELLANT ROCKET MOTOR

Li Yuesen, Wang Desheng, Li Qihai

(The 41st Institute of the Fourth Academy of CASC, Xi'an 710000)

ABSTRACT Gel propellant rocket motor has been developed as a new advanced technique in rocket propulsion field since the late eighties. To a great extent, it overcomes respective disadvantages of liquid and solid rocket motors, and especially has flexible and simple controllability of the rocket energy. A kind of rheological composite propellant without curing agent is used as initial formulation of gel propellant, the extrusion adaptability and frictional security of gel propellant have been studied in an experimental motor, and the relations and effective factors of its viscosity and extrusion adaptability have been discussed and double-pulse combustion pressure-time curves have been obtained from its static firing test successfully. Thereby, the security and usability of the gel propellant and the feasibility