

南京航空航天大学 论文集

(二〇〇〇年)

第7册

二院

南京航空航天大学科技部编

二〇〇一年六月

目 录

序号	姓名	职称	单位	论文题目	刊物、会议名称	年、卷、期	类别
186	漆文凯 高德平	工程师	021	干摩擦阻尼及其在航空发动机减振设计上的应用	第十届航空发动机结构强度与振动会议	2000	
187	崔海涛 温卫东	副教授	021	工程结构优化的遗传算法	第十届航空发动机结构强度与振动会议	2000	
188	崔海涛 温卫东	副教授	021	复合材料双盖板结构的有限元分析	第十届航空发动机结构强度与振动会议	2000	
189	崔海涛 温卫东	副教授	021	随机有限元法及其工程应用	南京航空航天大学学报	003201	J
190	李先军 宋迎东 高德平	硕士	021	夹杂物对粉末冶金涡轮盘应力分布的影响	第十届航空发动机结构强度与振动会议	2000	
191	高德平 宋迎东	教授	021	粉末高温合金低周疲劳寿命预测的理论模型	第十届航空发动机结构强度与振动会议	2000	
192	雷友锋 宋迎东 高德平	博士	021	航空发动机燃烧室蠕变屈面研究	第十届航空发动机结构强度与振动会议	2000	
193	宋迎东 雷友锋 高德平	副教授	021	通用单细胞模型预测纤维增强钛基复合材料弹性性能	第十届航空发动机结构强度与振动会议	2000	
194	宋迎东 雷友锋 高德平	副教授	021	金属基复合材料本构模型及结构应力分析技术研究综述	第十届航空发动机结构强度与振动会议	2000	
195	宋迎东 张 勇 温卫东 高德平	副教授	021	航空发动机多参数载荷谱编制软件设计	第十届航空发动机结构强度与振动会议	2000	
196	宋迎东 高德平	副教授	021	发动机航线类综合载荷谱研究	推进技术	002104	J
197	宋迎东 王 舸 高德平	副教授	021	一种弹-粘塑性本构模型材料常数的估计方法	固体力学学报	002102	H
198	宋迎东 高德平	副教授	021	发动机持久蠕变载荷谱的编制	南京航空航天大学学报	003204	J
199	宋迎东 张 勇 温卫东 高德平	副教授	021	多参数载荷谱编制的概率分布法研究	第十届航空发动机结构强度与振动会议	2000	
200	李秋红 冯正平	助教	021	某型涡喷发动机的拟合法建模	南京市第三届青年学术年会	2000	
201	黄金泉 蒋衍君	教授	021	航空发动机神经网络 PID 控制	动力与控制	001701	
202	黄金泉 F.L.Lew is K.Liu	教授	021	A Neural Ner Predictive Control for Telerobots with Time Delay	Journal of Intelligent and Robotic Systems	002900	H

序号	姓名	职称	单位	论文题目	刊物、会议名称	年、卷、期	类别
203	蒋衍君 黄金泉	硕士	021	航空发动机自适应神经网络 PID 控制	航空动力学报	001503	H
204	张天宏 李旋君 辛季龄	讲师	021	基于后驱动技术的 BIT 测试适配器	计算机自动测量与控制	000806	J
205	张天宏 黄向华	讲师	021	航空小型动力装置试验台测试系统	第十届发动机自动控制专业学术交流会	2000	
206	黄向华 孙健国 詹友庚 周剑波	讲师	021	发动机数控系统智能容错技术的半物理仿真研究	南京航空航天大学学报	003202	J
207	黄向华	讲师	021	模糊逻辑在发动机传感器故障诊断中的应用	第十届发动机自动控制专业学术交流会	2000	
208	孙健国	教授	021	21 世纪航空动力控制展望	第十届发动机自动控制专业学术交流会	2000	
209	杨蔚华 孙健国	博士	021	竞争型神经网络用于气路部件故障诊断	第十届发动机自动控制专业学术交流会	2000	
210	冯正平 孙健国 李秋红	博士	021	ZP/LTR Control for Turbofan Engines	ASME Turbo Expo Land, Sea & Air 2000	2000	

第十届航空发动机结构强度与振动会议

干摩擦阻尼及其在航空发动机减振设计上的应用

漆文凯 高德平

(南京航空航天大学动力工程系, 南京 210016)

摘 要 采用干摩擦阻尼可以有效的限制构件的共振应力水平, 本文从干摩擦阻尼的减振机理、在结构减振设计上的应用以及叶片干摩擦阻尼减振求解分析方法等方面进行了论述, 总结了国内外的研究方法, 对我国开展该方面的研究具有一定的借鉴。

主题词 干摩擦阻尼 减振设计 数值分析

1. 引言

在结构动态工作环境中, 最令人注意和担心的是共振现象, 它往往会导致结构破坏、使用寿命降低等的主要根源。因此, 希望最大限度地抑制共振水平就成为推动减振技术研究开发的直接动因。

早期欲借助于改变结构形状、尺寸等来调整结构的质量和刚度分布, 以便避开共振现象。但这种措施对大多数结构而言并不适用, 尤其对于发动机叶片来说就更不可取了, 这主要是因为航空发动机中激励源频带非常宽, 无法通过单纯的刚度、质量的调节避开共振; 而且航空发动机叶片设计要求尽可能降低叶片重量, 以便使整个发动机重量降低, 提高推重比。

因此, 60 年代初期, 开始转向研究金属内耗^[1], 希望以此来增加阻尼控制振动, 但成效不大。随着宇航和潜艇的发展, 60 年代研制出大阻尼的粘弹性材料和提出约束阻尼减振技术^[2], 但这些减振方法成本昂贵, 而且粘弹性材料是一种高分子材料, 易受温度变化影响。在环境温度变化超过 60℃ 的地方, 减振效果就不理想。因此, 在上述情况, 干摩擦阻尼研究作为一种新的减振方法开始受到重视, 并逐步应用于交通运输^[3]、机械^[4]、建筑工程^[5]、核工业^[6]、航空航天^[7]等方面的结构减振设计上来。

干摩擦阻尼器是按照在结构结合面上利用干摩擦消耗能量的原理设计的。采用干摩擦减振, 不必对原结构的质量、刚度做任何修改, 只要在结构适当部位加上干摩擦付, 使其消耗能量, 从而达到抑制共振的效果。对能量的消耗程度可通过改变结合面正压力水平等来控制。且干摩擦减振对温度变化及其它外部环境不敏感, 因而有很大优越性和广阔的应用前景。

2. 干摩擦阻尼器减振的机理

摩擦是相互接触物体在外力作用下, 有相对运动趋势或作相对运动时, 在接触面上产生阻碍相对运动的作用力的现象; 这种阻碍相对运动的力称为摩擦力。所谓干摩擦是指在固体接触面上无附着液体介质条件下所产生的摩擦力。摩擦作用的最明显的后果之一是使物体振动的机械能转变为热能扩散于周围介质中, 即产生能量转换, 因而可达到减振的目的。但要想准确地揭示干摩擦阻尼的减振规律, 必须正确地提出描述干摩擦规律的数学模型。整体滑动与部分滑动是表示干摩擦接触面滑动状态的两个不同的数学模型, 它们是根据接触面内变形分布特点来描述接触面摩擦机理的。

2.1 整体滑动模型

最简单的描述干摩擦现象的数学模型是经典的库仑模型, 即接触点相对不移动, 除非摩擦力超过一定极限。Den Hartog 首先采用经典库仑模型研究振动控制问题, 并把这个模型用于单自由度振动系统, 按照耗散能量相等的原则求出与干摩擦等效的粘滞阻尼力^[8], 但 Den Hartog 所采用的经典库仑干摩擦模型没有考虑接触面的弹性变形, 接触面的相对滑动是突然发生的, 因而他所得出的结果是有限制的。Oden 等人^[9]在总结已有实验结果基础上, 建立了积分形式的非局部库仑摩擦定律, 即引入接触点在发生相对滑动之前所存在的弹性变形, 并认为接触点上的正应力带有局部特性, 建议通过加权计算, 把接触点周围变形对其法向应力的影响效果考虑进去。Srinivasan 等采用各向异性权函数对上述非局部摩擦库仑定律做了进一步修正。上述方法都是建立在整体滑动模型上的。整体滑动模型假定接触面上的应力、应变场是均匀分布的, 在外力作用下, 整个接触区域内各点沿切向或者产生相同的弹性应变,

或者同时发生滑动,所以整个接触区域内的接触状态可以当量地通过一个点的变形情况来描述。整体滑动模型是针对某些特殊接触条件提出的简化模型,它适用于接触面尺寸较小或所受法向载荷不大的情形。

2.2 局部滑动模型

在实际情况下,当受到外力作用时,接触面上各点不可能有完全相同的应力、应变状态,当外力增加时,在某些区域内,接触点的切向应变超过相应的临界值而产生相对滑动,而在其余区域内接触点的切向应变还没有超过对应的临界值,这些点在切向仍然维持弹性变形;当外力进一步增加时,必然会使整个接触区域内所有点的切向应变都大于它们各自对应的临界值,此时,整个区域开始滑动。一般来讲,弹性体的干摩擦接触都必须按部分滑动模型分析。

采用部分滑动模型分析干摩擦系统特性通常需要借助于接触面数学模型的有限元离散来做数值计算,如果问题所涉及到的接触点很多,会给求解工作带来困难。为了克服计算上的困难,设想对于部分滑动模型,如果能够用一个点的接触状态当量的代替整个接触面的接触状态,必然会给计算工作带来极大的方便。

twan^[10]在假定接触面存在部分滑动状态的前提下,给出一个接触面串——并参数模型,用它描述接触面部分滑动所表现出的总的力学效果,随后 Menq 等^[11]研究了接触面上各点都沿直线做一维运动的情形,提出了剪切层的概念,导出这种情况下接触面部分滑动模型的当量表示的数学关系式,并将此模型推广到弹性棒的连续参数系统上。

3. 干摩擦阻尼在结构减振上的应用

早期的带干摩擦阻尼系统的研究主要侧重于对单自由度或者至多是二自由度系统非线性微分方程求解的数学方面,后来开始出现具体构件的干摩擦阻尼设计方面的研究,主要包括悬臂梁、复合材料梁、连续梁、矩形平板、圆板、柔性转子等含干摩擦的结构元件的研究。

而在航空发动机方面,最典型的干摩擦阻尼减振设计结构是在叶片上。叶片是构成发动机的重要零件,也是出现故障较多的零件,据资料统计,叶片振动故障大约占发动机总结构故障的三分之一,因此,很有必要采用有效的阻尼设计方法,降低叶片的共振应力水平。目前常用的阻尼设计方法是采用叶片干摩擦阻尼器,其构型有两种,一种称之为 B-G 型干摩擦付,另一种称之为 B-B 型干摩擦付,B-B 型干摩擦付是指相邻叶片之间由一干摩擦付连接的情形;B-G 型干摩擦付则是指叶片上的某一振动点与另一相对刚硬结构(如罩板、围板)之间有接触滑动的情形。在上述两种构型的干摩擦付中,接合面上的正压力是由叶片的离心载荷引起的,当接触面发生滑动时,摩擦力则消耗叶片振动能量。

目前普遍采用的叶片干摩擦阻尼器有叶片带减振凸台(或带冠),而对于带有中间叶根的涡轮叶片,为了减少气动损失和提高强度,则采用无凸肩(或带冠)设计,为了控制其振动,往往在其中间叶根处加装阻尼块,构成干摩擦阻尼器,从而可能大幅度地降低其振动水平,延长其寿命。

在一九七五年以前,航空发动机叶片的干摩擦减振设计主要是凭借经验和简单的数学模型^[12],到 80 年代初期,在航空推进系统干摩擦阻尼器研究方面已获得某些优化阻尼设计方法^[13-14],但由于干摩擦阻尼的非线性特性机理复杂,接合面摩擦生成规律难以正确描述,这些方法在理论和实验方面都还很很不完善,仍有许多问题有待进一步解决。

4. 叶片干摩擦减振分析的求解方法

叶片干摩擦减振分析的求解方法,根据其特点通常有在时间域上求解和在频率域上求解两种类型。时域法是通过系统的振动微分方程进行时间数值积分确定系统的响应特性。常用的时间积分法包括 Newmark 法、wilson- θ 法和 Runge-kutta 法。时间积分法的优点是:只要时间步长选择适当,总可以保证计算结果有较高精度,且对问题所涉及到的非线性程度以及施加激振力的复杂程度不加限制。缺点是:通过数值积分获得系统稳态解,需花费相当多的计算时间。因此在大多数情况下,仅仅是以时间积分法的计算结果为基准,检验其它方法的精确性。因此,一些学者提出了改进方法,文献^[15]提出了一种 FET 法,该法根据 Hamilton 原理建立了只含位移变量的摩擦动力方程,然后采用有限元法把模型在时间和空间上进行离

散, 得出系统各节点在各时刻的位移方程组, 通过求解位移方程组, 就可同时得到所有节点在所有离散时间点上的位移值, 这对充分利用计算资源, 提高计算速度提供了基础, 该算法采用 MATLAB 实现。

在实际工程计算中, 常借助于频率域上的方法求稳态响应。频域法中, 用得最多的是谐波平衡法 (HBM) [16], 该法假设阻尼系统响应以外激励力频率基频为主。实际使用中常用的一次谐波平衡法。对于一般的工程应用来说, 只保留摩擦力的付立叶级数中的基频成分, 忽略高次谐波的影响已有足够精度。这通常称为摩擦力的等效线性化过程[17], 由等效线性化所获得的摩擦力的等效刚度系数和等效阻尼系数是位移幅值的非线性函数。

5. 小结

干摩擦阻尼及其在结构减振设计上的应用方面的研究内容很多, 也是一项崭新的研究课题, 这项研究在保证航空发动机结构完整性, 进一步改善和提高发动机工作性能等方面具有十分重要的意义。我国在这项工作上的研究才刚刚开始, 还需进一步开展多方面的研究, 对干摩擦阻尼减振机理等情况要做更深入的研究分析, 为我国的航空事业的发展提供必要的技术支持。

参考文献

- [1] Lazan B.J., Damping of Materials and Members in Structural Mechanics, Pergamon press, (1968)
- [2] Torvik P.J., Damping application for vibration control, ASME/ADM No.38 (1980)
- [3] Huleahy L. N., Bridge response with factor-trailer vechide loading, Earthq. Engng&struct, Dyn., Vol. 11, 1983, pp649-665
- [4] Ito.y., Masakom., Bul.Jap.Soc.Mech.Eng., 18(1975).17.
- [5] Pall A.S., Marsh C., Fazio P., J. prestressed cocrete insitute, 25,6(198):38.
- [6] Greravd R., etal. Seimic Bolation using sliding-elastomer bearing pads, Nuclear Engineering and Design, 84(1985), pp363-377
- [7] Jones D.I.G., Cannon C.M., AIAA. Aircraft, 12(1975).226.
- [8] Den Harton J.P., Mechanical vibrations, McGraw-Hill, pp373(1956).
- [9] Oden J.T., Pires E.B., Nonlocal and nonlinear friction laws and variational principles for control problems in elasticity, ASME J. APP Mech., Vol.50. 1983.
- [10] Iwan W.D., On a class of models for yielding behavior of continuous and composite systems, ASME Journal of applied mechanics, Vol.89(1967), pp 612-617
- [11] Menq C. H., Bidak J., Griffin J. H., The influence if microslip on vibration response, part 1: A new microslip model, Sound and vibration, (1986),107(2),279-293
- [12] Kielb R.E., Griffin J.H., Chai-Hsiang Menq, Evaluation of a turbine blade damper using an intergal approach, AIAA/ASME/ASCE/AHS, 29th Structures. Structural Dynamics and Materials Conference, April. 1988. No.88-2400.
- [13] Griffin J.H., Friction damping of resonant stresses in gas turbine engine airfoils, ASME Journal of Engineering for power, vol.107, 1980, pp. 329-333.
- [14] Plunkett R., Friction Damping, in Damping Application for Vibration Control, AMD vol. 38, edited by Torvik P.J. ASME, NEWYORK.
- [15] Yu. Wang., Stick-slip Motion of Frictionally Damped Turbine Airfoils: A Finite Element in Time (FET) Approach, vol.119, Apr.1997. pp236-241
- [16] K.Y.Sanlitürk., M.Imregun., D.J.Ewins, Harmonic Balance Vibration Analysis of Turbine Blades with Friction Damper, vol. 119. Jan,1997,pp96-103.

工程结构优化的遗传算法

崔海涛 温卫东

(南京航空航天大学动力工程系 南京 210016)

摘要 遗传算法应用于优化设计中较其他经典的优化算法有许多优点。在介绍遗传算法编码方法和采用遗传算法进行结构优化设计的基本步骤的基础上,分别用两种编码方式对桁架结构和高速旋转轴进行了优化设计,计算结果表明精度较好,计算效率较高。

关键词 遗传算法 优化设计

1 引言

遗传算法简称 GA, 是美国密执安大学的 John Holland 教授于七十年代中期提出的一种新的优化方法。八十年代中期得到了迅速的发展。现在, 其应用范围已涉及到图象处理、企业经营、生产管理、土木工程、和电力工程等领域, 并广泛应用于科学研究和工程实际中的各种搜索过程和优化问题。

与其他一些优化算法相比, 遗传算法具有下述几个特点:

1) 遗传算法以决策变量的编码作为运算对象。这种对决策变量的编码处理方式, 使我们在优化计算过程中可以借鉴生物学中染色体和基因等概念, 可以模仿自然界中生物的遗传和进化等机理, 也使得我们可以方便的应用遗传操作算子。特别是对一些无数值概念或很难有数值概念, 而只有代码概念的优化问题, 编码处理方式更显示出了其独特的优越性。

2) 遗传算法直接以目标函数值作为搜索信息。传统的优化算法不仅需要利用目标值, 而且往往需要目标函数的导数值等其他一些辅助信息才能确定搜索方向。而遗传算法仅使用由目标函数值变换来的适应度函数值, 就可确定进一步的搜索方向和搜索范围, 无需目标函数的导数值等其他一些辅助信息。对于无法或很难求导数的函数, 或导数不存在的函数的优化问题, 以及组合优化问题等, 应用遗传算法就显得比较方便。再者, 直接利用目标函数值或个体适应度, 也可使得我们可以把搜索范围集中到适应度较高的部分搜索空间中, 从而提高了搜索效率。

3) 遗传算法同时使用多个搜索点的搜索信息。遗传算法从多个个体组成的初始群体开始最优解的搜索过程, 对这个群体进行选择、交叉、变异等运算, 产生出新一代群体, 在这之中包括了很多群体信息。这些信息可以避免搜索一些不必搜索的点, 所以实际上相当于搜索了更多的点, 这是遗传算法所特有的隐含并行性。

4) 遗传算法使用概率搜索技术。遗传算法属于一种自适应概率搜索技术, 其选择、交叉、变异等运算都是以概率的方式来进行的, 从而增加了搜索的灵活性。虽然这种概率特性也会产生一些适应度不高的个体, 但随着进化过程的进行, 新的群体中总会更多的产生出许多优良的个体, 实践和理论都已证明了在一定条件下遗传算法总是以概率 1 收敛于问题的最优解。当然, 交叉概率和变异概率等参数也会影响算法的搜索效果和搜索效率, 所以如何选择遗传算法的参数在其应用中是一个比较重要的问题。而另一方面, 与其它一些算法相比, 遗传算法的鲁棒性又会使得参数对其搜索效果的影响尽可能地低。

本文主要介绍了遗传算法的基本步骤, 并以桁架结构和高速旋转轴的优化设计为例进行了分析和计算。最后, 概述了遗传算法的发展和应用。

2 遗传算法的编码方法

在遗传算法的运行过程中, 常用的编码方法有以下两种:

1) 二进制编码方法 它使用的编码符号集是由二进制符号 0 和 1 所组成的二值符号集 {0, 1}, 它所构成的个体基因型是一个二进制编码符号串。每个变量的二进制编码符号串的长度与问题所要求的求解精度有关。一个染色体的二进制编码符号串的长度为每个变量的长度之和。

2) 浮点数编码方法 浮点数编码方法是指个体的每个基因值用某一范围内的浮点数来表

示, 个体编码的长度等于其决策变量的个数。

3. 遗传算法的基本步骤

1) 产生初始群体 首先, 在区间[a, b]上产生均匀分布的随机数, 形成一个染色体, 并检验其可行性, 如果可行则保留。这样, 经过有限次抽样以后, 在可行域内得到一定数量 (popsize) 的染色体, 形成种群。

2) 按照适应度对染色体排序。

3) 交叉操作 首先以赌轮形式选择一定数量的染色体, 组成新的种群以进行交叉操作。然后定义参数 p_c 作为交叉操作的概率, 对种群中 $P_c \cdot \text{popsize}$ 个染色体来进行交叉操作。

4) 变异操作 定义变异概率参数 p_m , 对总体 $p_m \cdot \text{popsize}$ 个染色体用来进行变异操作, 得到新的染色体, 并在可行域内。

5) 重复步骤 2) 至 4), 直到满足终止条件为止, 得出最优解, 遗传算法结束。

4. 遗传算法在桁架结构优化问题^[3]中的应用

该问题的数学模型参见文献[3], 即取杆的截面面积为设计变量, 在满足应力要求的条件下, 使桁架重量为最小 (已知精确解为: $W_{\min}=2.639$)。

表 1 桁架的优化结果

种群规模	二进制编码	浮点数编码
20	2.640	2.830
40	2.639	2.643
60	2.639	2.639
80	2.639	2.641
100	2.639	2.648
120	2.639	2.639
140	2.640	2.639
160	2.639	2.646

由表 1 的可见, 计算误差较小, 遗传算法所得的结果是足够满意的。

5. 遗传算法在高速旋转轴优化问题中^[2]的应用

该优化问题的数学模型如下:

1) 设计变量 $X = [D \quad d \quad L]^T = [x_1 \quad x_2 \quad x_3]^T$ 。式中, D 为轴的外径, d 为轴的内径, L 为轴的长度。

2) 目标函数 要求所设计的轴质量越轻越好, 即以质量 M 最小为目标函数。

$$\min F(x) = \min M(x)$$

式中, $M(x) = L\rho\pi(D^2 - d^2)/4$, ρ 为所用材料的密度, $\rho = 7800\text{kg/m}^3$ 。

3) 约束条件 由于影响传动轴可靠工作的主要因素为扭转强度、扭转刚度及临界转速, 所以取以下三种性能约束:

(1) 根据扭转强度, 要求扭转应力

$$\tau = T/W \leq [\tau]$$

式中: τ —扭转应力; T —轴所传递的最大扭矩, $T=9807\text{N.m}$; W —抗扭截面系数;

$[\tau]$ —许用扭转应力, $[\tau]=392\text{N/mm}^2$

因此扭转强度所决定的约束条件为:

$$g_1(x) = \frac{16DT}{\pi(D^4 - d^4)} - [\tau] \leq 0$$

(2) 根据扭转刚度, 要求扭转变形

$$\varphi = \frac{TL}{GI_p} \leq [\varphi]$$

式中: φ —扭转角; G —材料的剪切弹性模量, $G=7.9 \times 10^4 \text{N/mm}^2$;

I_p —极惯性矩, 对空心轴 $I_p = \frac{\pi}{32}(D^4 - d^4)$; $[\varphi]$ —允许的扭转角。

因此扭转刚度所决定的约束条件为:

$$g_2(x) = \frac{32TL}{\pi G(D^4 - d^4)} - [\varphi] \leq 0$$

(3) 动力稳定性要求, 一般根据设计的轴为刚轴或柔轴来决定。现将其设计为刚轴, 即轴的最大转速应低于轴的一阶临界转速:

$$n_{\max} \leq 0.75N_{cr}$$

$$N_{cr} = \frac{30\omega_{cr}}{\pi} = \frac{30\pi}{L^2} \sqrt{\frac{EI_a}{A\rho}}$$

式中: N_{cr} —轴的第一阶临界转速; E —材料的弹性模量, $E=2.0 \times 10^5 \text{N/mm}^2$; A —轴的横截面积;

I_a —轴的截面惯性矩; $n_{\max}$ —压气机试验台最大工作转速, $n_{\max}=14000 \text{r/min}$

所以临界转速所决定的约束条件为:

$$g_3(x) = n_{\max} - 0.75N_{cr}$$

除性能约束外, 根据结构限制, 还有轴尺寸的边界条件

$$D_l \leq D \leq D_u, d_l \leq d \leq d_u, L_l \leq L \leq L_u$$

式中, 上标“l”表示尺寸下界; “u”表示尺寸上界。

下面分别给出了用二进制编码的计算结果和用浮点数编码的计算结果。计算结果如表 2 所示。表 3 给出了分别采用混合罚函数法、Powell 法、BFGS 法及 DFP 法在相同停机精度情况下的计算结果。

表 2 轴的优化结果

种群规模	二进制编码	浮点数编码
20	31.988	40.843
40	32.479	40.843
60	32.572	38.583
80	32.668	34.738
100	32.070	37.499
120	32.507	34.070
140	32.182	36.739
160	32.182	34.905

表 3 轴的优化结果

方 法	混合罚函数	Powell 法	BFGS 法	DFP 法
最佳目标值	43.670	31.575	31.574	31.574

由表 2 和表 3 可见, GA 的计算结果与其它方案的计算结果比较一致, 采用二进制编码的计算结果, 其最大的相对误差为 3.46%; 采用浮点数编码时, 计算结果的相对误差较大一些, 但仍介于混合罚函数与 Powell 法等方法的计算结果之间。这主要是由于二进制编码中每个变量的长度为 10, 每个染色体的长度为 30, 搜索空间较大, 故计算的精度较高。为改善浮点数编码的计算精度, 可以将浮点数编码的遗传算法与经典的优化方法相结合, 以达到提高计算精度的目的。

6. 结论与展望

从以上的分析中可以看出, 二进制编码具有编码和解码操作易行、交叉和变异操作便于实现以及便于利用模式定理对算法进行理论分析等优点, 但是存在连续函数离散化时的映射误差, 编码串长度短达不到精度要求, 而编码串长度长则会增大搜索空间, 降低效率。相反, 浮点数编码适合于在遗传算法中表示范围较大的数, 便于在较大的空间进行遗传搜索, 提高效率。

由于遗传算法可以有效地应用于工程结构的优化设计中, 而且可以将其与经典的优化方法相结合, 以达到优势互补, 提高计算精度和计算效率的目的。如果进一步与其他数值分析技术的结合, 必将给工程结构的分析带来新的曙光。

参 考 文 献

1. 刘宝碇, 赵瑞清。随机规划与模糊规划。北京: 清华大学出版社, 1998
2. 肖陵, 林秀荣, 马枚。航空发动机结构优化。北京: 北京航空航天大学出版社, 1991
3. 朱伯芳, 黎展眉, 张壁城。结构优化设计原理与应用。北京: 水利电力出版社, 1984
4. 孙艳丰, 郝江凌。大型复杂结构优化问题的遗传算法。北方交通大学学报, 1997, 21(6): 616—620
5. 武广号, 文毅, 乐美峰。遗传算法及应用。应力力学学报, 1996, 13(2): 93—97
6. 马光文, 王黎。遗传算法在桁架结构设计中的应用。工程力学, 1998, 15(2): 38—44
7. 樊重俊, 王浣尘。遗传算法的改进与应用。上海交通大学学报, 1998, 32(12): 128—131
8. 吴志远, 邵惠鹤, 吴新余。新的进化过程遗传算法。上海交通大学学报, 1997, 31(12): 66—68

复合材料双盖板结构的有限元分析

崔海涛,温卫东

(南京航空航天大学动力工程系,南京,210016)

摘要 复合材料双盖板螺栓接头结构又是复合材料结构连接设计的主要环节。但是对于这方面的理论和试验研究有许多问题亟待解决。对T800H/3900-2体系的复合材料双盖板螺栓接头结构进行了理论分析计算,并与试验结果进行对比。以此模型为基础,对T300/KH304体系的双盖板接头的应力进行了计算。

关键词 复合材料,双盖板,接头,有限元

1 引言

由于先进复合材料具有比强度和比刚度高、可设计性强等许多优异特性,因而一经问世便广泛应用于工程实际中,目前已成为航空航天四大结构材料之一。另一方面,由于复合材料的各向异性以及多模式的缺陷或损伤形式,复杂的损伤扩展特点等与金属材料有很大的差别。因此,有必要对其做进一步深入的研究。

随着复合材料在工程的应用范围的不断扩大,复合材料结构的连接问题已成为研究的重点。在复合材料的连接中,由于机械连接可以传递较大的载荷、可靠性较高,而且受环境影响较小、没有残余应力问题及其可拆卸等众多优点,所以在复合材料的连接中多采用机械连接。但是复合材料的连接部位的应力集中比金属结构的连接部位的应力集中严重,所以连接部位通常是复合材料结构静强度的薄弱环节。为此,应首先从含孔层合板的强度分析开始。对于含孔的复合材料层合板而言,应力集中现象会使损伤的发展复杂化。损伤的存在对复合材料的机械特性会产生影响,进而影响到复合材料的响应。因此准确地预测累积损伤及确定这种损伤对结构响应和破坏的影响,对于复合材料层合板的强度分析以及复合材料结构的应用是非常重要的。分析和预测复合材料层合板的强度有许多方法^[1-3]。

对于复合材料来说,由于沿厚度方向缺乏增强的纤维,因此分层是一种最主要的破坏模式,而这种损伤采用三维模型才能精确地建立。采用三维模型分析和预测复合材料层合板强度的研究工作进展较缓慢^[4,5]。而且由于复合材料的延性较小,在连接部位存在着较大的应力集中以及开孔破坏了纤维的连续性,使得连接区成为整个结构的薄弱环节。

复合材料结构机械连接接头的破坏模式有:被连接件的挤压破坏、拉伸破坏、剪切破坏和劈裂破坏,以及紧固件的剪切破坏等。净拉伸破坏一般发生在较高的载荷水平,而挤压破坏一般发生于较低的载荷状态下。另外,拉伸和剪切破坏会导致结构的突然失效,挤压破坏则是一个逐渐损伤过程,不会导致结构整体承载能力的衰减。因此,挤压破坏常常被认为是复合材料结构中螺栓连接接头的主要破坏形式。当然,对于挤压破坏来说,螺栓的材料和性能以及夹紧参数(如夹紧面积、初始的夹紧力等)与复合材料螺栓连接接头强度密切相关的。由于端部约束的复合材料连接接头是一个三维问题,而目前现有的大部分研究工作是侧重于接头的二维的应力分析,有关的三维问题的研究成果较少。本文对T800H/3900-2和T300/KH304两种复合材料体系的双盖板螺栓接头结构进行有限元分析,以建立相应的设计准则,为进一步建立接头强度的逐渐损伤分析模型打下了良好的基础。

2 复合材料双盖板问题的有限元分析

复合材料双盖板连接是复合材料连接接头的一种形式,如图1所示。连接形式中,中间的板为复合材料板,而两侧的板为金属板(如钢或铝等)。在双盖板连接结构中,所考察的复合材料层板接头主要受单向的拉伸载荷作用,以便了解螺栓连接接头的失效载荷。

2.1 计算模型的建立和试验验证

复合材料双盖板问题的试验模型如图2所示。该分析模型的边界条件(为了分析方便,仅取二分之一)如图3所示。

例1 T800H/3900-2材料体系双盖板螺栓接头的应力分析

螺栓和盖板材料为调质钢,其材料常数为:弹性模量207GPa,泊松比为0.3。螺栓直径为 $d=0.635\text{cm}$,长度为3.0cm,钢板的厚度为 $t=0.4\text{cm}$ 。螺栓孔直径为 $d=0.635\text{cm}$,复合材料板的铺层顺序为 $[(0/\pm 45/90)_3]_s$,端距与孔径之比为 $e/d=6$,板宽与孔径之比为 $w/d=8$ 。

分析中,对金属板和螺栓采用8节点三维实体单元,对复合材料板采用常厚度壳单元。整个模型分为225个壳单元,4212个实体单元。

采用前述分析模型,自由端受1.0512MPa均布拉伸载荷作用下的计算结果如图4~6所示。图4给出了双盖板接头结构拉伸方向应力分布图。从图中可以看出,复合材料板的应力较大,其位移沿拉伸方向逐渐增大。在螺栓附近,结构的应力和位移均较小。图5和图6分别给出了双盖板接头结构中复合材料板在拉伸方向的应力和位移的分布图。由图可见,复合材料板的应力分布沿拉伸方向逐渐增大,在金属板与复合材料板的衔接处出现挤压现象,其最大应力和位移分别为661MPa和0.739mm。

为验证计算结果的正确性,表1给出了自由端位移的计算值与文献[6]给出的试验值。从表中可以看出,计算值可信、有效,计算模型合理、正确。

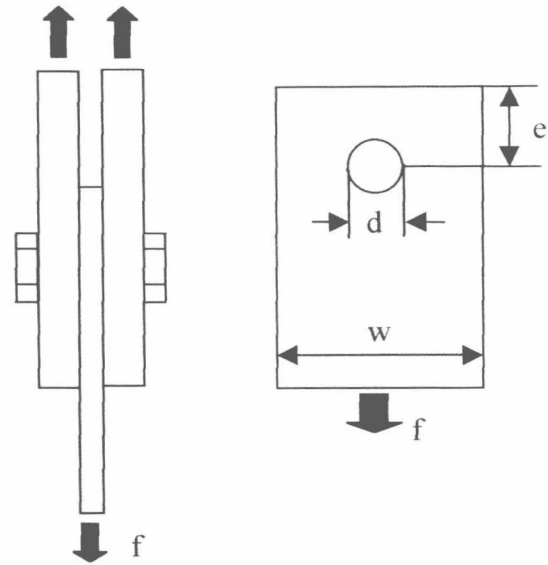


图1 复合材料双盖板连接接头示意图

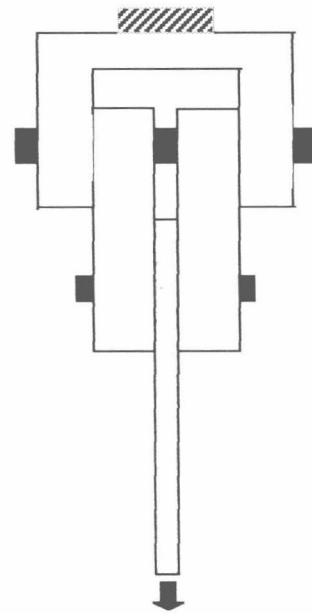


图2 复合材料双盖板问题的试验模型

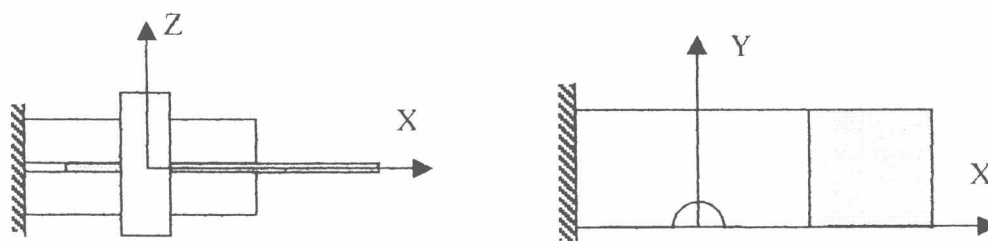


图3 有限元分析模型的边界条件(取二分之一)

表1 自由端位移对比表

均布载荷/MPa	计算的位移值/mm	试验的位移值 ^[6] /mm
0.1314	0.9237	0.9053
0.2628	0.1847	0.1811
0.3942	0.2771	0.2716
0.5256	0.3695	0.3621
0.6570	0.4618	0.4526
0.7884	0.5542	0.5432
0.9198	0.6466	0.6337
1.0512	0.7390	0.7242

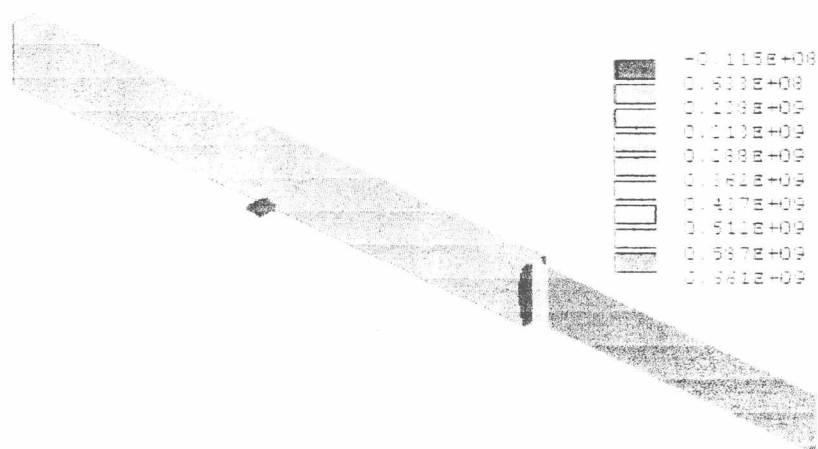


图4 双盖板接头结构拉伸方向应力的分布图

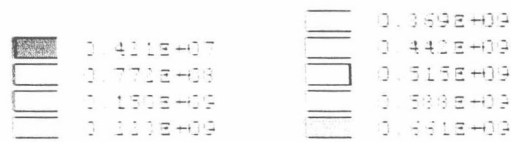


图5 复合材料板在拉伸方向应力的分布图

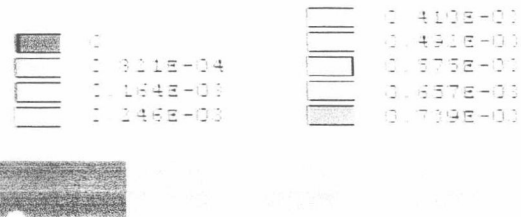


图6 复合材料板在拉伸方向位移的分布图

例2 T300/KH304材料体系双盖板螺栓接头的应力分析

双盖板结构的材料和尺寸参数如下：螺栓和盖板的材料常数为：弹性模量207GPa，泊松比为0.3。螺栓直径为 $d=0.635\text{cm}$ ，长度为2.0cm，钢板的厚度为 $t=0.4\text{cm}$ 。复合材料板的铺层顺序为 $[\pm 45/90/0/-45/0/45/0/90/0]_s$ 。螺栓孔直径为 $d=0.621\text{cm}$ ，端距与孔径之比为 $e/d=6$ ，板宽与孔径之比为 $w/d=4.2$ 。

在1.0MPa均布载荷的作用下计算出的结果如图7、图8所示。图7给出了双盖板接头结构拉伸方向位移的分布图。从图中可以看出，复合材料板的位移沿拉伸方向逐渐增大。在螺栓附近，结构位移较小。图8给出了复合材料板在拉伸方向的应力分布图。由图可见，复合材料板的应力分布沿拉伸方向逐渐增大，在金属板与复合材料板的衔接处出现挤压现象，其最大应力为308MPa。经多种工况的计算可知，复合材料板在拉伸方向的最大应力与外载荷成正比。亦即使复合材料板达到最大纵向拉伸强度的外载荷为5.21MPa。而实际上，由于复合材料板的损伤破坏是一个逐渐的累积过程，而在此期间，复合材料板会出现各种损伤类型而降低其刚度，所以该结构中复合材料板的最大承载能力要小于5.21MPa。

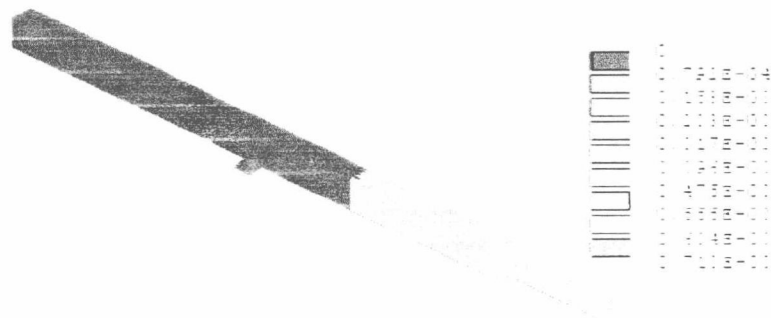


图7 T300/KH304双盖板接头结构拉伸方向位移的分布图

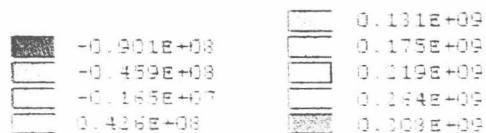


图8 T300/KH304复合材料板在拉伸方向应力的分布图

3 结论

(1) 对T800H/3900-2材料体系的两种铺层复合材料双盖板螺栓接头结构进行分析和计算,并与试验结果对比,验证了所采用的分析模型和计算方法的正确性。

(2) 采用前述分析模型和计算方法对T300/KH304材料体系复合材料双盖板螺栓接头结构进行计算。由计算结果可见,最大应力位于盖板与复合材料板的衔接处。

(3) 由于复合材料板的损伤破坏是一个逐渐的累积过程,所以易采用逐渐损伤分析方法对复合材料结构进行损伤分析。

参考文献

1. Whitney J M, Nuismer R J. Stress fracture criteria for laminated composites containing stress concentrations. *Journal of Composite Materials*, 1974, 8: 253~265
2. Nuismer R J, Labor J D. Applications of the average stress failure criterion: Part I-Tension. *Journal of Composite Materials*, 1979, 12: 238~249
3. Waddoups M E, Eisenmann J R, Kaminski B E. Macroscopic fracture mechanics of advanced composite materials. *Journal of Composite Materials*, 1971, 5: 446~454
4. 崔维成. 复合材料结构破坏过程的计算机模拟. *复合材料学报*, 1996, 13 (4): 102~111
5. Gamble K, Pilling M, Wilson A. An automated finite element analysis of the initiation and growth of damage in carbon-fiber composite materials. *Composite Structures*, 1995, 135: 265~274
6. Wang H S, Hung C L, Chang F K. Bearing failure of bolted composite joints. Part I: Experimental of characterization. *Journal of Composite Materials*, 1996, 30 (12): 1284~1313

随机有限元法及其工程应用

崔海涛 温卫东

(南京航空航天大学动力工程系 南京, 210016)

摘要 随机有限元法是近年来发展起来的一种工程数值计算方法。由于它建立在有限元法的基础上, 并采用随机参数来描述工程实际问题, 因而具有更广阔的发展前景和重要的应用价值。随机有限元法的主要内容包括随机变分原理、随机有限元控制方程的建立及其求解。目前, 它已被广泛应用于计算结构的可靠度、动力问题、复合材料力学及非线性问题等方面。随着研究工作的不断深入, 随机有限元法可应用于可靠性设计和优化设计中, 形成基于随机有限元法的结构可靠性优化设计方法。文中最后从基本理论、应用乃至程序设计等方面展望了随机有限元法的发展趋势。

关键词: 有限元法; 随机有限元法; 可靠性设计; 优化设计

中图分类号: T101; O342

1 随机有限元法的起源及其发展

有限元法在本世纪 40 年代就已经有了初步的思想和萌芽^[1]。时至 60 年代, 电子计算机及计算技术的发展, 给有限元法付诸工程实际带来曙光。由于有限元法的应用简便、规范, 一扫过去采用材料力学、弹性力学和结构力学计算结构所带来的繁难, 所以有限元法在近年来得到了迅猛的发展。迄今为止, 有限元法除了发展其自身的理论和方法外, 还外延到其他领域。随机有限元法就是其中之一, 它是用有限元法分析结构随机强度的理论和方法。严格来讲, “随机有限元法”这一术语并不确切, 因为单元本身并不是随机的, 而是确定性的, 故称之为“随机问题的有限元法”更为确切。但由于该术语已经普遍被人们所接受, 所以一直沿用至今。

随机有限元法中所考虑的随机因素主要来自两个方面: (1) 环境或荷载——工程结构受到的地震、风、雪、洪水或温度变化等都具有较强的随机性。如飞机在飞行过程中所受的风载荷、海洋平台所受的海浪冲击等。(2) 结构性质——如由于铸造等工艺过程中产生的缺陷所导致的材料力学性质(屈服应力、弹性模量等)的随机性, 由于制造、加工而产生的构件尺

* 国家自然科学基金(编号: 59875037)和中国博士后基金资助项目。

收稿日期: 1999-02-26; 修改稿收到日期: 1999-04-23

第一作者: 崔海涛, 男, 讲师, 1971 年 12 月生。

寸的随机性等。

随机有限元法的雏形是 Monte-Carlo 模拟法^[2],即将 Monte-Carlo 法与有限元直接结合,对随机变量的样本使用有限元程序反复计算,再对结果进行统计。因此,随机有限元法可以看作是确定性有限元法与概率方法(如一次二阶矩法等)相结合的一种方法。Su 等^[3]利用随机激励的材料特性研究地下应力问题是随机有限元法的首次应用。而一次二阶矩法与有限元法相结合的思想则是在 70 年代初期由 Cornell^[4]在一次关于统计学与概率论在土壤与结构工程中应用讨论会上提出的。其后, Cambou^[5], Dendrou^[6], Baecher^[7], Handa^[8]等各自正式将随机有限元法应用于结构的静力分析,并考虑了材料特性、几何尺寸与(或)载荷的空间相关性。这期间逐渐形成了 Taylor 展开随机有限元法(TSFEM)。70 年代末与 80 年代初, Hisada 和 Nakagiri^[2,9~11]在考虑随机变量波动时采用一阶、二阶摄动技术,对随机有限元法作了较系统的研究,给出了二阶摄动有限元列式,提出了摄动随机有限元法(PSFEM),并将其成功地应用于各种复杂结构的应力、位移的随机性分析之中,包括静力分析、孤立特征值问题和含随机阻尼的结构动力分析。1985 年, Nakagiri 和 Hisada^[12]首先对随机有限元法进行了专门的论述。80 年代后期, Shinozuka^[13]和 Yamazaki^[14]创造性地将 Neumann 展开法与 Monte-Carlo 有限元相结合,提出了精度、效率均较高的 Neumann 展开随机有限元法(NSFEM),使 Monte-Carlo 法与有限元得以完美结合。90 年代初, Ghanem 和 Spanos^[15]以及 Kleiber 和 Hien^[16]等又分别出版了专著,对随机有限元法进行了较为详细的论述。从此以后, Ostojia-Starzewski^[17]等又发表了综述,从不同角度论述了随机有限元法。

在我国,随机有限元法的发展始于 80 年代,朱位秋等^[18,19]研究了基于随机场的局部平均的随机有限元法。刘更等^[20]概述了随机有限元法的基本理论及其发展。温卫东等^[21]对随机有限元方程一般式进行了推导。此后,随机有限元法便开始应用于计算结构强度的可靠度分析中^[22~25]。随机有限元法开始应用于结构动力问题是在 90 年代,吕泰仁等^[26]讨论了结构自振频率的统计特性,陈厚群等^[27]将随机有限元法用于重力坝动力可靠度分析之中。

迄今为止,随机有限元法在理论方面的研究还不够系统和完整。在应用方面还远不如确定性的有限元法那样普遍,主要应用于静力分析和随机特征问题,对随机结构的动力响应分析还正处于研究之中。

2 随机有限元法的主要内容及其应用

随机有限元法作为一种数值分析方法,主要有以下三个方面的内容:随机有限元法的变分原理、随机有限元方程的建立和求解方法。

随机有限元法的变分原理可分为静态和动态两部分。对于静态随机有限元法的能量变分原理,张汝清,高行山等^[28,29]分别在 1992 年和 1994 年初步进行了阐述。曹宏等^[30]在 1993 年给出了动力随机有限元法的计算公式。赵雷、陈虬等^[31]于 1998 年提出了分析结构动力问题的随机变分原理和随机有限元法。但是这些研究均没能清晰地表达出随机有限元法与确定性有限元法之间的关系,而且随机有限元控制方程的得出有一定的舍入误差。为改进这一不足,文^[32]给出了将随机参数直接代入到能量泛函中,而此前无须对随机参数进行摄动处理,从而得出随机有限元法控制方程的方法,该方法虽然能够明确地给出随机有限元法有确定性有限元法之间的关系,但是在计算误差上却没能有较大的改进。