

系 一



目 录

一〇四教研室(24 篇)

加快教学改革,提高学生智能	史治宇
由模态应变能法诊断结构破损的实验研究	史治宇等 H
柔性模薄板成形的数值模拟	贾德财等 H
A general Solution for the plane problem in Piezoelectric media with Collinear Cracks	高存法等 H
Exact Solutions for thd plane problem in piezoelectric materials with an elliptic or a crack	高存法等 H
Analytical Solutions for Mode III Crack in Piezoelectric Materials	高存法等 H
An Exact Solution of Crack Problems in Piezoelectric Materials	高存法等 H
含共线刚性线夹杂各向异性体的平面问题	高存法等 H
压电介质平面问题的基本解	高存法等 H
关于非局部场论的几个新观点及其在断裂力学中的应用(III) ——重论线性非局部弹性理论	黄再兴 H
New Points of View on the Nonlocal Field Theory and Their Applications to the Fracture Mechanics(III)	黄再兴
New Points of View on the Nonlocal Field Theory and Their Applications to the Fracture Mechanics(II)	黄再兴 H
具有面内剪切非线性复合材料层板的 1/4 亚谐共振	黄再兴等 H
面内剪切非线性对复合材料层合板参数共振的影响	黄再兴等 H
关于非局部场论的几个新观点及其在断裂力学中的应用(II) ——重论非线性非局部热弹性本构方程	黄再兴
Free Vibration Analysis of Truncated Conical Shells by The Differential Quadrature Method	王永亮等 H



Fuzzy Coordination And Force/Position Control of Robotic Manipulator	乔 兵等 H
Learning Force Control for Position Controlled Robotic Manipulator	乔 兵等 H
面向位控机器人的力/位混合控制	乔 兵等 H
Mathematical Simulation of Transient Thermal Process of Aircraft Cabins	方贤德
Modeling and analysis of gas coolers	方贤德
A Study of the U - factor of the Window with a Highreflectivity Ve netian Blind	方贤德 H
复合材料内多处横向冲击损伤的光纤图像检测	徐宁光等 H
Stress analysis of finite composite laminates with elliptical inclusion	郑晓光等 H

一〇五教研室(3 篇)

竖壁膜状凝结扩展方程理论研究	葛海燕
加强实践教学基础建设,提高学生工程素质	童明波等
建立面向 21 世纪“飞行器设计与工程”专业教学体系	昂海松等

加快教学改革 提高学生智能

史治宇

当今时代被称为是知识和信息爆炸的时代,传统的以老师详尽、细致地向学生传授知识为主,而学生的独立思考、自学和自己动手解决问题的机会甚少的高校教学模式已不能适应时代的发展需要。有关资料表明,我国高校毕业生在几个月内胜任工作的只占 10%,在一年内胜任的占 13%,在 1~2 年胜任的占 72%,还有 5% 长期不能胜任工作。其主要原因在于知识与能力的严重脱节。如何提高学生智能已是高校迫切需要解决的问题。笔者通过近几年的教学实践探索,参照国外成功的教学经验,认为加快教学改革是提高智能的必由之路。

一、牢固树立提高学生智能是整个教学中心的观念

所谓智能是指智力和能力。智力是人认识客观事物并作出反应的一种心理能力,一般指注意力、观察力、记忆力、思维力和想象力的总和。能力是指在智力基础上掌握知识、应用知识的本领,如自学能力、表达能力、动手能力、组织能力、创造能力等等。而知识是人对于客观世界认识的结果,是人类经验、思想、智慧赖以存在的形式。

掌握知识是高校学生的主要任务之一。学生习得知识主要是掌握前人的认识成果,变前人的知识为自己的知识的认识过程。同样传授知识也是教师教学的基本职能,教师以最简捷形式向学生传授知识,避免学生重蹈开拓者发现定理、方法过程中所走过的弯路,使学生在有限的学习时间内掌握更多的知识。然而高校教学仅以传授知识是远远不够的,更主要的是提高学生的智能,它是整个教学的中心,也是高校教学的最终目标之一。当今科学技术迅速发展,知识迅猛增长,与此同时知识更新也越来越快。有人估计,四年制大学生所学的知识仅是今后 10 年内工作所需要的 10% 左右,还有 90% 的知识要靠他们自己不断地获取。面对这一现实,高校教学必须把提高学生智能放在首位,让学生在学校中获得的不仅是“鱼”,更多的是“渔鱼”的本领。

其实传授知识和发展智能是辩证统一,相互依赖、相互促进的,知识是智能的基础和必要条件,智能以知识和经验为前提,有了必要的知识,人们才能进行分析、判断、推理、创新。没有知识,智能就无从谈起。另一方面智能又是获取知识的强有力的工具,人的智能发展了,才能更多、更快、更好地掌握知识和运用知识。为此必须牢固树立提高学生智能是整个教学的中心观念,并以此为目标改革现今教学过程中一切不合理的因素。

二、加快教学内容和教学方式的改革

培养和发展学生的智能是高校教学的中心,为此必须改变传统的“灌输式”教学方法,摆脱

学生对教师过多的依赖,根据高校学生的不同阶段和不同类别课堂的特点,逐步完成由教师讲授为主到学生自学为主的教学模式的过渡。

一二年级的学生处在学习基础课程的阶段。基础课的特点是理论性强、概念抽象、内容丰富、时间紧迫。而学生又刚跨入大学,要使学生适应从(中学阶段)少信息、直观性知识被动吸收到大信息量、抽象理论知识吸收的飞跃。这一时期应采用以教师讲授为主,学生自学为辅并逐步加大自学比重的教学方式。而高年级的学生已具备了一定的基础知识、分析方法和自学能力,面对知识面广量大的理论与实践并重的专业基础课程时,应以讲授与自学相结合,逐步以自学为主的教学方式。让学生有更多的时间阅读教科书及其它各种参考资料,提高自身的各种能力,从而为毕业走向社会打好基础。

笔者在近几年的“结构力学”、“弹性力学”、“有限元基础”等飞机设计专业的基础课教学实践中,通过对教学方法的学习、比较和研究,以及在教学中的一些探索,觉得需把上述三门课程从内容上进行整合,使其成为一个完整的体系。弹性力学的基本理论是结构力学和有限元方法的基础。结构力学的求解方法主要建立在经典的“力法”基础上,而有限元(位移元)法则是“位移法”的应用。学生通过学习、比较能更深刻地、统一地理解和掌握这几部分的知识,提高他们灵活运用所学知识,解决实际问题的能力。

整合的教学内容需要有相应的教学方法与之相适应。笔者设想这些教学内容可分四个阶段进行教学。第一阶段以教师讲授的方式介绍教材内容及主要思想。但这并不是一、二节课的简单介绍,而是教师把一本厚厚的教材提取精华变为一本薄薄的讲义,并以简单的例子(如杆系结构)向学生讲授。其目的是促使学生完整地理解整个教学内容,并掌握各部分的重点及相互间的联系与区别。第二阶段是分别讲授各部分的内容。采用的教学方式是教师讲授和学生自学相结合,教师突出讲授概念、基本原理和难点,而让学生自学教材的其他内容,阅读参考书并写出学习报告,完成课堂作业。第三阶段综合运用知识,消化知识。教师根据教学内容,联系实际工程结构给出一些大作业,让学生分组独立运用弹性力学、结构力学和有限元法中各部分的知识来完成大作业。在这阶段学生要独立分析问题、钻研教材、提出方法、并要分工协作、自己动手来完成。从部分教学实践看来,学生们学习积极性极高,教学效果很好。这对提高学生多方面的能力,为毕业设计及今后的独立工作打好基础作用很大。第四阶段是由教师和学生共同来总结所学的教学内容,并组织学生讨论,发现问题,进一步巩固和加深理解、掌握所学的知识。

三、教书育人、改进学风是提高学生智能的前提

教学过程是师生双方共同完成教学内容的过程。在这一过程中,教师处在教育者的地位,起着主导作用。学生是受教育者,是教学的主体。教师的主导是对主体的主导,在教师和学生共同参与的教学中,只有教师和学生有机地结合、密切地配合,才能有好的教学效果。所以教学改革不仅是教学内容和教学方法的改革,同时也应包括教师本身知识更新及思想方法的改革,学生管理和组织的改革。

教学改革的关键在教师。在教学活动中,教师的思想、观点、方法时时刻刻地影响着学生。教师应为人师表,加强学习和修养,扩大知识面,钻研业务,把一份爱心献给学生,真正做到一心扑在教学上。在当今知识爆炸的时代,加快知识更新步伐,加紧科研与教学的结合,把新的知识,新的方法和新的思维融进教学中去。

同样,教学过程中一切提高学生智能的措施,都需要学生的积极参与,充分发挥学生的主观能动性,这是保证教学效果的前提和关键,为此对学生需在思想上、组织和管理上狠下功夫,变要学生学习为学生要学习,这是学生管理改革的一个重要研究课题。

四、明确考核标准,保证学生智能的提高

考核既是对学生学习的评定,也是检查整个教学质量的一种手段。考核犹如一根指挥棒,在某种程度上,考核的形式、内容决定了学生的学习态度和学习方法。明确考核标准,客观地、科学地评定学生成绩是提高学生智能的有力保证。

笔者在专业基础课的教学实践中体会到,首先要向学生明确学习成绩的评定标准,使学生在整个学习过程中做到心中有数。专业课程的学习成绩评定分为三部分:第一部分是平时的作业、自学报告及教学实验的完成情况;第二部分是对综合、灵活运用知识解决问题的大作业训练的考评,着重于学生独立分析问题、解决问题的能力培养;第三部分是试卷考核,其中一部分考查学生对所学知识的全面掌握情况,试题范围广而难度小。另一部分考核学生运用知识的能力。这样成绩的考核贯穿于整个教学的全过程,促使学生积极、主动地投入学习,并在学习过程中培养他们阅读资料、自学教材、分析问题、提出解决方案和组织实施等多方面的能力。

(作者单位:南京航空航天大学飞行器工程系,210016)

(责任编辑 江山)

(上接第 16 页)

新的实验体系体现了实验的系列性,强调了学生独立设计、独立制作能力。例如,在模拟电路实验中,每个学生人手一块实验板,自己保管,本次实验结果将是下次实验的基础,全部实验完成以后构成一个适当规模的电子系统。

4. 注重创新意识和创新能力的培养。通过多种途径,培养学生的创新意识和创新能力。在课内,优化教学内容,引入多媒体教学,启迪学生的思维,发展同学们的个性,培养他们的创造力。在课外,组织电子协会,开展丰富多彩的课外科技活动,激发同学们对信息技术的兴趣。组织学生参加小制作竞赛和全国大学生电子设计、数学建模竞赛,提高学生的竞争能力和创新能力。

5. 自由选择专业方向,促进个性发展。自 1995 年开始,我系就以电子与信息技术为专业名称进行大类招生大类培养,通过 1 届学生的培养,效果良好。目前我系由电子工程、信息工程、通信工程和民航通信工程等 4 个专业方向,把专业方向课程分组,学生可根据自己的能力和兴趣,自由选择 1~4 个专业方向,以达到拓宽知识面,促进个性发展的目的。

(作者单位:南京航空航天大学电子工程系,210016)

(责任编辑 张辉)

由模态应变能法诊断结构破损的实验研究*

史治宇¹ 吕令毅²

(¹南京航空航天大学飞行器系, 南京 210016)

(²东南大学土木工程学院, 南京 210096)

摘要 提出了基于单元模态应变能变化的结构破损诊断方法, 该方法仅以结构破损前后的模态振型和单元刚度矩阵为诊断信息. 实验研究表明, 用有噪声影响的不完整测试模态振型数据时, 此方法仍能得到较好的破损诊断结果, 并且方法简便, 便于实际应用.

关键词 结构振动; 模态分析; 故障诊断; 模态应变能

分类号 O327; TU311.3

承载结构的破损是不可避免的, 这种破损一般表现为结构局部刚度的损失, 从而导致结构模态频率和振型等的变化. 近年来, 基于模态参数来诊断结构(尤其是桥梁结构)破损的研究不断深入^[1,2]. 本文基于单元模态应变能的概念, 导出了结构破损定位和破损大小确定的诊断方法, 该方法仅以结构破损前后的模态振型和单元刚度矩阵为诊断信息, 简便易行.

1 预备知识

结构破损通常是结构局部刚度的损失, 而与质量无关, 即 $[\Delta M] = 0$. 结构破损前后的刚度和振型有如下关系:

$$[K^d] = [K] + [\Delta K] = [K] + \sum_{j=1}^L \alpha_j [K_j] \quad -1 < \alpha_j < 0 \quad (1)$$

$$\{\Phi_i^d\} = \{\Phi_i\} + \{\Delta\Phi_i\} = \{\Phi_i\} + \sum_{j=1}^n c_{ij} \{\Phi_j\} \quad (2)$$

式中, $[K]$ 和 $\{\Phi_i\}$ 分别为结构的刚度矩阵和第 i 阶模态振型, 上标 d 表示结构破损后的情况; L 和 n 为结构的单元总数和模态阶数; α_j 和 c_{ij} 是待定系数.

由模态法并考虑到 $[\Delta M] = 0$, 可求得式(2)中的待定系数 c_{ij} , 式(3)中 λ_i 是结构第 i 阶的特征值.

$$\{\Delta\Phi_i\} = \sum_{\substack{r=1 \\ r \neq i}}^n \frac{-\{\Phi_r\}^T [\Delta K] \{\Phi_i\}}{\lambda_r - \lambda_i} \{\Phi_r\} \quad (3)$$

* 国家自然科学基金资助项目(59708008), 航空科学基金资助项目(98B52015).

收稿日期: 1998-06-10. 第一作者: 男, 1964年生, 博士, 讲师.

2 结构破损的定位方法

定义结构破损前后第 j 个单元关于第 i 阶模态的单元模态应变能(E)如下:

$$E_{ij} = \{\Phi_i\}^T [K_j] \{\Phi_i\}, \quad E_{ij}^d = \{\Phi_i^d\}^T [K_j] \{\Phi_i^d\} \quad (4)$$

针对结构破损通常是结构局部刚度损失的特点,从结构的局部入手来研究结构破损前后第 j 个单元关于第 i 阶模态的单元模态应变能的变化(C).

$$C_{ij} = \{\Phi_i^d\}^T [K_j] \{\Phi_i^d\} - \{\Phi_i\}^T [K_j] \{\Phi_i\} \quad (5)$$

将式(1)~(3)代入式(5),并略去高阶项,则 C_{ij} 为

$$C_{ij} = 2\{\Phi_i\}^T [K_j] \left(\sum_{\substack{r=1 \\ r \neq i}}^n \frac{-\{\Phi_r\}^T [\Delta K] \{\Phi_i\}}{\lambda_r - \lambda_i} \{\Phi_r\} \right) \quad (6)$$

为了说明单元模态应变能变化的性质,现作如下分析.假设结构第 p 个单元破损,将式(1)代入式(6),则

$$C_{ij} = -2\alpha_p \sum_{\substack{r=1 \\ r \neq i}}^n \frac{1}{\lambda_r - \lambda_i} \{\Phi_r\}^T [K_p] \{\Phi_i\} \{\Phi_i\}^T [K_j] \{\Phi_r\} \quad (7)$$

这里, $\{\Phi_r\}^T [K_p]$ 和 $[K_j] \{\Phi_r\}$ 是2个向量,其非零元素分别与第 p 个和第 j 个单元刚度矩阵的自由度相对应.如图1所示,式(7)有以下性质:

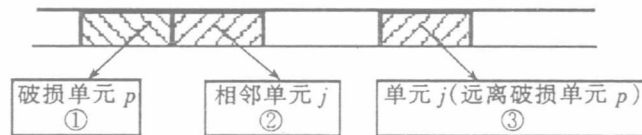


图1 破损单元 p 和目标单元 j 间的关系

1) 如果 $j = p$,所选单元即为破损单元如图1中①所示,两向量 $\{\Phi_r\}^T [K_p]$ 和 $[K_j] \{\Phi_r\}$ 的非零元素一一对应,单元的模态应变能变化显著.

2) 如果 $j \neq p$,所选单元与破损单元相邻如图1中②所示,两向量的非零元素部分相对应,单元的模态应变能变化较小.

3) 如果 $j \neq p$,所选单元远离破损单元如图1中③所示,两向量的非零元素不对应,单元的模态应变能变化很小.

由以上的性质可知,单元的模态应变能变化是对结构破损敏感的一个诊断指数,详细的分析研究见文[2].将结构破损的定位指数定义为单元的模态应变能变化率(R)

$$R_{ij} = \frac{|E_{ij}^d - E_{ij}|}{E_{ij}} \quad (8)$$

其中, R_{ij} 为第 j 个单元关于第 i 阶模态的单元模态应变能变化率.为降低试验模态振型随机噪声的影响,可同时用多阶模态振型来诊断结构的破损位置,第 j 个单元用 m 阶模态振型计算的单元模态应变能变化率为

$$R_j = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \frac{R_{ij}}{R_{i,\max}} \quad (9)$$

式中, $R_{i,\max}$ 是第 i 阶向量中的最大元素.

3 结构破损大小的确定

通过结构破损的定位分析,可定性地确定结构中可能的破损单元,为在上述定性分析基础上进一步确定破损的程度,可导出结构破损大小的确定办法.假定由破损定位已定性确定结构中可能的破损单元有 q 个,将式(1)代入式(6)有

$$C_{ij} = \sum_{p=1}^q -2\alpha_p \{\Phi_i\}^T [K_j] \sum_{\substack{r=1 \\ r \neq i}}^n \frac{\{\Phi_r\}^T [K_p] \{\Phi_i\}}{\lambda_r - \lambda_i} \{\Phi_r\} \quad (10)$$

对于第 i 阶模态,如果选择 J 个单元的模态应变能变化值(一般 $J \geq q$),那么对于 q 个破损单元可得到以下的线性方程组:

$$\begin{Bmatrix} C_{i1} \\ C_{i2} \\ \vdots \\ C_{iJ} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \beta_{11} & \beta_{12} & \cdots & \beta_{1q} \\ \beta_{21} & \beta_{22} & \cdots & \beta_{2q} \\ \vdots & & & \vdots \\ \beta_{J1} & \beta_{J2} & \cdots & \beta_{Jq} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \alpha_1 \\ \alpha_2 \\ \vdots \\ \alpha_q \end{Bmatrix} \quad (11)$$

式(11)中的元素 β_{st} 由下面公式给出

$$\beta_{st} = -2 \{\Phi_i\}^T [K_s] \sum_{\substack{r=1 \\ r \neq i}}^n \frac{\{\Phi_r\}^T [K_t] \{\Phi_i\}}{\lambda_r - \lambda_i} \{\Phi_r\} \quad (12)$$

求解方程组(11),便可得到用第 i 阶模态确定的一组结构破损系数值,由这组结构破损系数也可再次验证破损定位的结果.

4 实施步骤

现对上述结构破损诊断方法的实施步骤作如下小结:

① 由振动试验和模态分析,获取破损结构的模态频率和振型.测试振型不完整时,用振型扩充方法扩充见文献[3].

② 未破损结构的有限元建模与分析,获取结构的模态频率、振型及各单元的刚度矩阵信息.(当有限元模型与实际结构存在较大误差时,可进行模型修正.)

③ 结构破损的定位,由单元模态应变能变化率法定性地确定结构中可能的破损单元,见式(9).

④ 结构破损大小的确定,由式(5)计算选定单元的模态应变能变化值,由式(12)求得式(11)矩阵中的各系数 β_{st} 值,再由方程组式(11)可解得破损单元的破损系数 α_p ($p = 1, 2, \dots, q$).

⑤ 为了得到更好的结果,可采用迭代的方法,重复步骤②~④.

5 实验验证

图2是二层平面刚架结构(2.82 m × 1.41 m)的有限元模型和接头示意图.有限元模型含18个等长的平面梁元,结构的横向和纵向梁由上、下和中间三组角钢相联,各接头的抗弯刚度由静力试验测得为 3.0 MN · m/rad. 试验研究了2种破损情况:①节点7处的接头破损;②节点7和11两处的接头破损.接头破损在实验中用去除上、下两组角钢的联接来模拟.测试振型

自由度是节点2~7及节点9~14的水平方向自由度和节点15~18的竖立方向自由度,不完整的测试振型按文[3]的方法加以扩充.

采用测试的前两阶振型,由式(9)计算所得的结构破损定位结果见图3和图4.图3是结构节点7处的接头破损时的定位结果,可见与接头相连的第16单元的模态应变能变化率最大,其规一化的 R 值为1,而其它单元的 R 值均小于0.4;结构节点7和11两处接头同时破损时的诊断结果如图4所示,与接头相连的单元15和16的规一化的 R 值分别是0.64和1,而其他单元的 R 值要小得多.

由破损定位结果可确定,2种破损情况下,结构中可能的破损单元分别是

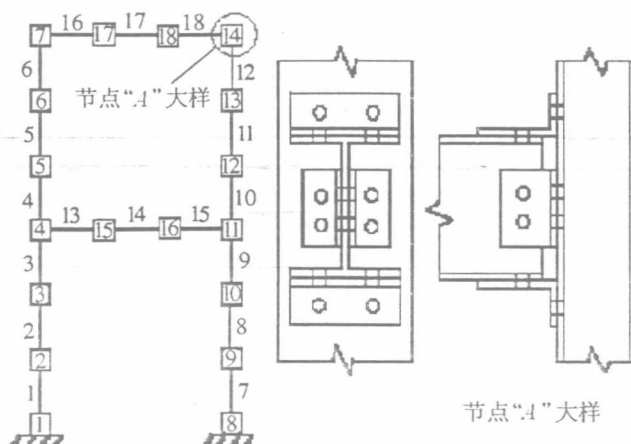


图2 二层刚架结构的有限元模型

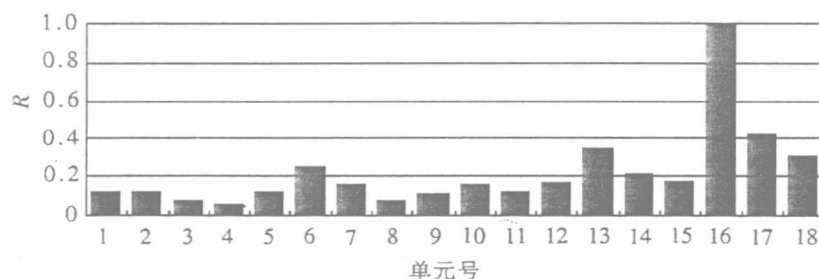


图3 节点7处的接头破损(单元16)(前两阶模态)

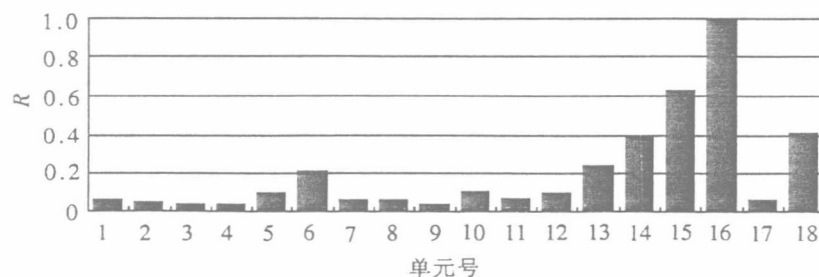


图4 节点7,11两处的接头破损(单元15和16)(前两阶模态)

与节点7处的接头相连的第16单元和与节点7和11两处接头相连的第16与15单元.选择第15,16,17三个单元的模态应变能变化值($J=3$),应用式(11)建立确定结构破损系数的线性方程组,在运用式(12)计算各元素 β_{it} 时,式中 K_i 由破损单元的刚度矩阵对接头抗弯刚度的灵敏度分析求得,并且式中的 n 取前五阶的分析振型.2种破损情况下,接头抗弯刚度破损系数的确定结果如表1和表2所示.

表 1 结构节点 7 处接头破损大小的确定结果

迭 代 次 数	1	2	3	4	5
节点 7 处接头破损大小 /%	- 60.755	- 55.510	- 54.621	- 53.943	- 53.797

表 2 结构节点 7, 11 两处接头破损大小的确定结果

迭 代 次 数	1	2	3	4	5
节点 7 处接头破损大小 /%	- 62.111	- 59.507	- 58.020	- 57.283	- 56.941
节点 11 处接头破损大小 /%	- 32.377	- 37.989	- 39.866	- 40.859	- 41.091

6 结 论

- 1) 基于单元模态应变能变化的结构破损诊断方法简便有效, 便于实际应用.
- 2) 振型的不完整性和测试振型的随机噪声都对结构破损定位和破损大小的确定有较大影响, 采用多阶模态叠加的方法, 能较好地改善结构破损诊断的结果.
- 3) 在实际应用中, 结构刚度的破损多种多样, 如何模拟刚度的各种破损情况将直接影响破损大小的确定, 为此有待于进一步的研究.

参 考 文 献

- 1 史治宇, 罗绍湘, 张令弥等. 由试验模态数据检测结构破损的位置和大小. 南京航空航天大学学报, 1997, 29(1): 71 ~ 78
- 2 史治宇, 罗绍湘, 张令弥. 结构破损定位的单元模态应变能变化率法. 振动工程学报, 1998, 11(3): 356 ~ 360
- 3 Shi Z Y, Ding X H, Gu H Z. A new model reduction and expansion method. In: Zhu D M, Ko J M, eds. Proceedings of International Conference on Structural Dynamics, Vibration, Noise and Control. Hong Kong: Chinese Society for Vibration Engineering, 1995. 847 ~ 852

A Test Research of Structural Damage Detection by Using Model Strain Energy

Shi Zhiyu¹ Lu Lingyi²

(¹ Department of Aircraft Engineering, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing 210016)

(² College of Civil Engineering, Southeast University, Nanjing 210096)

Abstract: A method based on elemental modal strain energy change is presented for detecting damage in a structure. This method only makes use of mode shapes before and after the occurrence of damage and elemental stiffness matrix as damage detection information. Experimental results illustrate that this method is robust to detect damage from the noisy and incomplete measured modes.

Key words: structural vibration; model analysis; damage detection; modal strain energy

柔性模薄板成形的数值模拟

贾德财 王鑫伟

(南京航空航天大学飞行器系 南京 210016)

摘 要 柔性模薄板成形在工程应用中常称为橡皮垫成形,这种成形工艺由于生产周期短、成形质量高而被广泛用于飞机、汽车以及其它工业的板件的生产。目前,对于这种成形过程的研究主要集中在试验研究,数值方面的研究非常少,本文用三维动态有限元方法对柔性模薄板成形过程的模拟,通过在计算机上反复模拟成形过程,得到比较合理的各种工艺参数、刚性模具尺寸以及柔性橡皮垫的类型。为了完整性,文中首先给出了三维有限元理论的基本方程,然后分析了一个典型零件的模拟过程,同时还对橡皮硬度对成形的影响进行了分析,最后给出了典型零件厚度的计算结果与试验结果比较。

关键词 橡皮成形;有限元;薄板成形;柔性成形

中图分类号 O242.21

柔性模薄板成形是指用一个橡胶垫代替传统落压成形中的两个模具中的一个,在工程应用中常被称为橡皮成形,如图 1 所示。目前,很多成形工艺中的一个发展趋势是用聚氨脂橡胶代替刚性模具,如在滚压成形中的柔性滚压。这种成形方法的主要优点是:在成形中只需要一个金属模具,由橡胶垫作为通用模具;成形后的零件具有很好的表面质量;同一个模具可以成形不同厚度的板料。这种成形工艺已被广泛地用于飞机、汽车等制造业。同其它板成形一样,板在成形过程中经过拉伸和压缩后成为构件,这个过程与很多因素有关,如模具形状,冲压力与速度大小,橡皮硬度与厚度,各个接触部分的磨擦等,这些因素都会影响成形件质量,特别是如果模具设计、橡皮选择、成形压力等一些因素不当会导致零件出现起皱和开裂等缺陷^[1]。对于一些形状简单的零件成形,一般会根据成形极限手册和经验进行设计选择,但对于复杂形状的成形由于成形过程中板的流动及橡皮的变形极其复杂,只有手册与经验是不够的,需要进一步进行有限元模拟分析。对于这类成形过程的研究过去一直集中在试验研究,数值方面的研究非常少^[2]。本文用有限元对柔性模薄板成形过程进行模拟,为达到合理选取工艺参数,缩短生产周期和提高工作质量提供一种手段。

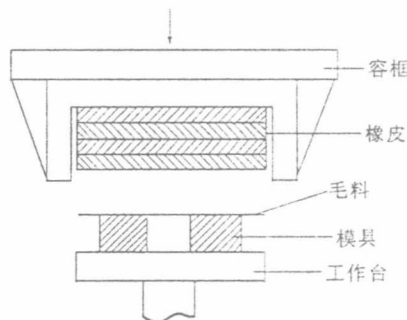


图 1 橡皮成形示意图

Fig.1 Rubber pad forming

1 有限元基本方程

设一个运动系统在时刻 t_n 占据的空间域为 Ω ,作用有力的边界为 Γ_f ,利用虚功原理可以导出运动系统在时刻 t_n 的平衡方程,即

$$\int_{\Omega} [\delta \epsilon_n]^T \sigma_n d\Omega - \int_{\Omega} [\delta u_n]^T [b_n - \rho_n \ddot{u}_n - c_n \dot{u}_n] d\Omega - \int_{\Gamma_f} [\delta u_n]^T f_n d\Gamma = 0 \quad (1)$$

式中: δu_n ——虚位移; $\delta \epsilon_n$ ——与虚位移相对应的虚应变; b_n ——作用的体力; f_n ——面力; σ_n ——应力; ρ_n ——质量密度; c_n ——阻尼参数; 符号 $\cdot$ 表示对时间的微分。

通过形函数可以将位移与应变用结点位移矢量来表示,最终的有限元方程为

$$M \ddot{d}_n + C \dot{d}_n + p_n = f_n \quad (2)$$

式中: M ——质量矩阵; p_n ——内阻结点力; f_n ——作用的体力和面力组合在一起而形成的一致结点力; $\ddot{d}_n$ ——结点加速度; $\dot{d}_n$ ——结点的速度.

时间积分采用显式中心差分法, 这种算法在计算每一时间步时, 将不涉及到求解联立方程组, 它的算式是

$$\ddot{d}_n = a_n = (d_{n+1} - 2d_n + d_{n-1})/(\Delta t)^2 \quad (3)$$

$$\dot{d}_n = v_n = (d_{n+1} - d_{n-1})/(2\Delta t) \quad (4)$$

将(3)与(4)式代入(2)式得

$$d_{n+1} = g(d_n, d_{n-1}) \quad (5)$$

由式(5)可以看出, 在时刻 t_{n+1} 的位移可以用时刻 t_n 和时刻 t_{n-1} 的位移显式地表示, 若式(2)中 M 采用集中质量矩阵, 运动方程的求解是非耦合的, 不需要组集成总体矩阵, 因此可以大大节省存贮空间和求解用的机时.

在采用中心差分法时, 在求解 t_{n+1} 的位移时需要用到时刻 t_n 和时刻 t_{n-1} 的位移, 因此有必要计算初值以便从初始条件求得 $d(0 - \Delta t)$ 值, 由式(4)可以得到

$$\dot{d}(0) \approx v_n(0) = \frac{d(0 + \Delta t) - d(0 - \Delta t)}{2\Delta t} \quad (6)$$

由式(6)可知, 通过初始速度求得 $d(0 - \Delta t)$, 与 $d(0)$ 一起可以得到 $d(0 + \Delta t)$.

2 成形过程的模拟

橡皮垫成形的模型, 可分成橡皮容腔、橡皮、模具、金属板料、成形时所用的工作台等几部分, 如图1所示. 在有限元建模时, 模具与橡皮容腔由于刚度非常大可以忽略它们的变形, 所以我们采用刚性材料的壳单元或实体单元来建模. 板料在成形过程中产生大位移和大应变的弹塑性变形, 用薄壳单元^[3]来模拟, 其本构关系采用弹性线性强化材料模型, 即认为强化过程仍是线性的. 变形的屈服准则是 Von Mises 随动强化屈服准则. 工作台与橡皮容腔的四周采用刚性墙的处理方法^[4]. 与其它的钣金成形模拟相比, 橡皮垫成形模拟多了一个对橡皮垫的建模(材料模型, 几何模型, 接触罚参数等), 这使得橡皮成形的数值模拟与一般落压成形的模拟相比难度大得很多. 对于本文中的算例, 橡皮选用八节点体单元, 其本构模型选用参数比较简单的 Compressible Mooney-Rivlin Rubber 模型, 其应变能函数定义

$$W = A(I_1 - 3) + B(I_2 - 3) + C(I_3 - 1) + D(I_3 - 1) \quad (7)$$

$$\text{式中} \quad C = \frac{1}{2}A + B \quad (8)$$

$$D = \frac{A(5\nu - 2) + B(11\nu - 5)}{2(1 - 2\nu)} \quad (9)$$

I_1, I_2 与 I_3 为右柯西-格林应变张量 C 不变量^[4].

图2描述了一个典型的双曲率零件成形过程模拟, 其中(a)~(c)为压力逐步增大时毛料的网格变化过程, 这时橡皮把压力传递给毛料使之发生大的塑性变形而贴模, 毛料的外缘受到环向压力而起皱, 如图2(c)所示, 毛料的内缘受到环向拉力而容易出现拉裂等缺陷. 图2(d)为在经过回弹计算后得到的零件的网格图以及塑性应变的分布图, 颜色深的区域塑性应变大.

3 不同硬度橡皮成形的模拟

在柔性成形工艺中, 容框里的橡皮选择也是一个重要的参数, 在橡皮成形凸曲率弯边零件时, 由于成形过程中是收的变形, 零件弯边部分出现皱纹. 我们通过取不同硬度的橡皮成形过程进行模拟, 可以确定最终所采用的橡皮. 图3给出了不同橡皮硬度模拟成形的最终零件形状. 图3(a)为橡皮硬度比较小时成形的零件形状, 有皱纹, 这是由于橡皮较软, 有较好的对皱纹形状的适应性, 即分布在皱纹处的压力比较均匀(通过模拟结果可以看得出来), 无法将皱纹压平. 随着橡皮硬度的增大, 它对皱纹形状的适应性也变差, 因此, 一旦出现皱纹, 各处分布的压力就出现差异, 皱纹顶部的力最高, 两侧依次降低, 容框中的平均压力越大, 这种压力

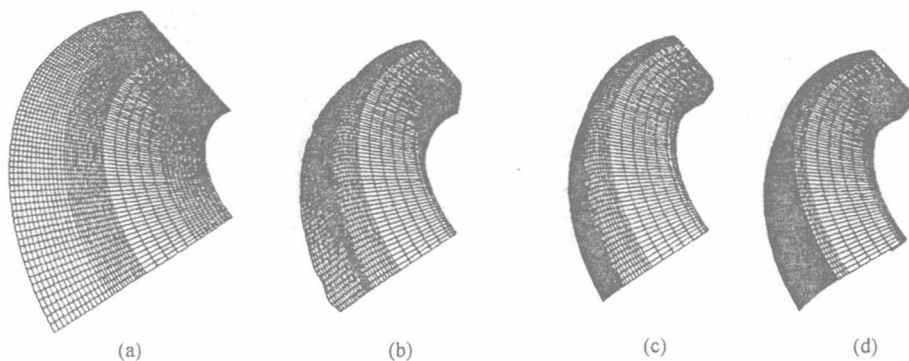


图2 典型零件成形过程模拟

Fig.2 Simulation of forming process for a typical part

差就越大,就越有利于将皱纹压平,获得贴模零件.图3(b)为橡皮硬度 60(邵氏)成形出来的零件,无皱纹.因此可以选用这种硬度的橡皮.图3(c)是橡皮硬度 80(邵氏)时成形出的零件,这时的零件也没有出现皱纹,但是由于橡皮太硬,要使橡皮表面形成与模一致的形状,以将毛料压得各处都和成形模相贴需消耗更大的压力,同时橡皮也容易磨损,故在实际生产中不宜采用.选用硬度为 60(邵氏)的橡皮最为合适.

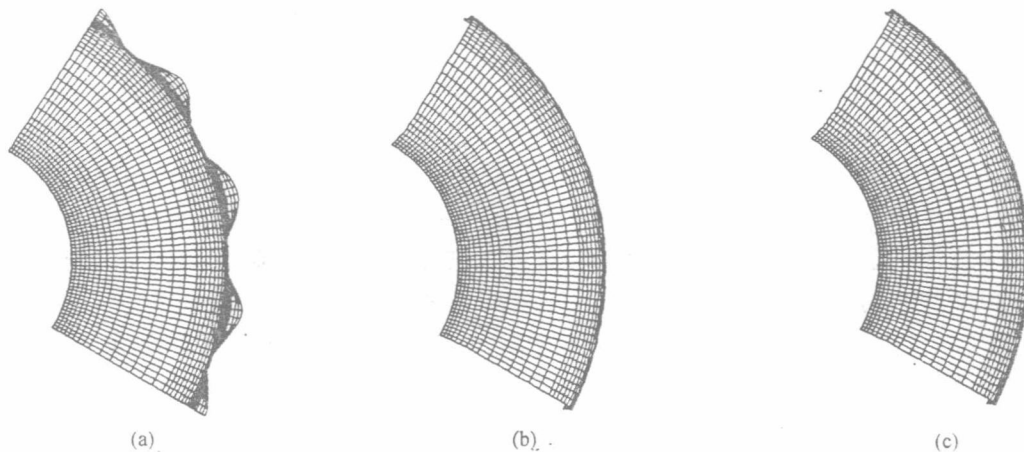


图3 采用不同硬度的橡皮对成形工件质量的影响

Fig.3 The effect of rubber with different stiffness on the part quality

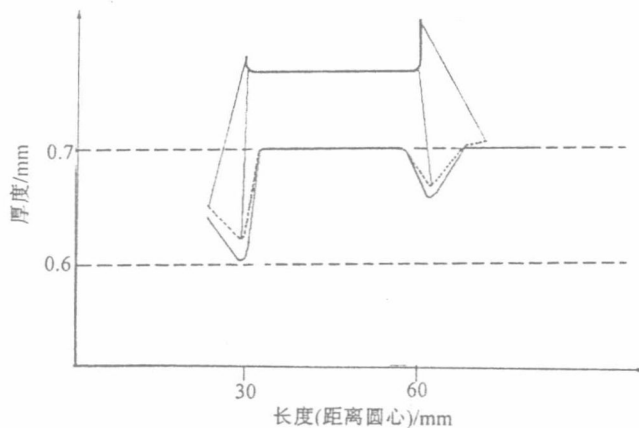


图4 典型零件沿径向的厚度分布计算值与试验值比较

Fig.4 Comparison of the computational and experimental results of thickness of the typical part along the radius

4 厚度分布

图 4 所示为图 3 成形的典型零件沿径向厚度分布图,其中实线为试验结果,虚线为计算结果.由图可以看出,用有限元法来模拟薄板成形得到的厚度值与试验值不仅变化趋势相同,而且得到的值也很相近,比试验值偏小.

图中厚度最小值 6.01 mm,就是厚度变化最大的区域,变化率 14.1%.由此可以看出,由这种柔性成形出来的板金零件的厚度变化是非常小的,分布也比较均匀,不易造成拉裂.

5 结 束 语

本文首次有限元法对采用柔性模的薄板成形过程进行了数值模拟.算例表明,可以通过数值模拟来合理选择工艺参数(如橡皮的硬度),厚度计算结果与试验结果也较为吻合.

参 考 文 献

- 1 霍同如,徐秉业,宋军.板材成形有限元数值模拟的研究进展.力学进展,1996,26(3):379~388
- 2 David J. Browne, Emil Battikha. Optimisation of aluminium sheet forming using a flexible die. Journal of Materials Processing Technology, 1995, 55: 218~223
- 3 蒋维城,丁刚毅,曹德青.板料冲压成形过程的数值模拟(ANSYS/LS-DYNA 程序的一种应用).98ANSYS 年会论文集, 89~95
- 4 Whirley R G, Engelmann B E. DYNA3D: a nonlinear, explicit, three-dimensional finite element code for solid and structural mechanics user manual. University of California, Lawrence Livermore National Laboratory, Rept UCRL-MA-107254, 1993. 23~24

Numerical Simulation of Sheet Forming Using a Flexible Die

Jia Decai Wang Xinwei

(Dept. of Aircraft Engineering, Nanjing University of Aero & Astro. Nanjing 210016)

Abstract Flexible forming is also named as rubber-pad forming, which is widely used to produce aerospace and automotive parts and sheet metal components in other industries due to its advantages of short production period and good quality. The research of the process is concentrated more on experimental work and less on numerical simulation. In the present study the forming process is simulated with the three dimensional, dynamic finite element method. By comparison of the simulation results of the forming process, the process parameter, the dimension of the die and the flexibility can be reasonably selected. Firstly the paper presents the theoretical principles of the three dimensional, dynamic finite element method for completeness. Then the simulation of a typical part is given and the effect of rubber stiffness on the process is analyzed. Finally the experimental and computational results of thickness are compared.

Key words rubber pad forming; FEM; sheet forming; flexible forming process



PERGAMON

International Journal of Engineering Science 37 (1999) 347–363

International
Journal of
Engineering
Science

A general solution for the plane problem in piezoelectric media with collinear cracks

Cun-Fa Gao*, Wei-Xun Fan

Department of Aircraft, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing 210016, People's Republic of China

Received 15 December 1997; accepted 28 April 1998

Abstract

The plane problem in a transversely isotropic piezoelectric medium with collinear cracks is studied, based on the exact electric boundary conditions on the crack faces. The complex potential method is used to reduce the problem to a Remmain–Hilbert problem. Explicit, closed-form solutions are obtained both in the piezoelectric medium and inside the cracks, when the medium is subjected to concentrated loads at an arbitrary point and uniform loads at infinity. It is shown in the case of uniform loads, that the stress intensity factors are the same as those in isotropic media, while the electric displacement intensity factor depends on material constants and the applied mechanical load, but not on the applied electric load. In other words, the uniform electric load has no influence on the field singularities. © 1998 Elsevier Science Ltd. All rights reserved.

1. Introduction

With an increasingly wide application of piezoelectric media in engineering, the study on the crack problem in piezoelectric media has received much interest. Based on an impermeable crack assumption that the normal component of electric displacement is assumed to be zero on crack faces, a number of theoretical results have been presented by Pak [1], Sosa and Pak [2], Pak [3], Suo et al. [4], Wang [5], Sosa [6, 7], Pak and Tobin [8], Park and Sun [9], Beom and Atluri [10], Gao and Barnett [11], Yu and Qin [12], Qin and Yu [13], Zhong and Meguid [14], and Zhao et al. [15, 16]. However, further investigation given by Pak and Tobin [8], Dunn [17], Hao and Shen [18], Zhang and Tong [19], Kogan et al. [20], and Sosa and Khutoryansky [21] show that the impermeable crack assumption may result in erroneous results. For example, the solutions obtained based on this assumption show that the electric displacement intensity

* Corresponding author.