

基于螺钉连接接触问题有限元分析的探讨

王忠素¹, 张洪玲²

(1.中科院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春, 130033; 2.吉林大学, 吉林 长春, 130021)

摘要: 螺钉连接是典型的机械连接方式, 连接面的接触问题是机械连接最常面临的问题。由于接触面的应力状态很难测定, 属于接触非线性问题。本文利用有限元软件建立了两块螺钉连接的板结构有限元模型。基于所建立的有限元模型, 本文运用 Partran2003 进行线性分析和 ABAQUS6.4 进行非线性分析, 计算两块螺钉连接板的受重力变形情况。计算结果表明, 用非线性方法分析得到的结果更合理、准确。提出对典型连接的接触问题, 用非线性有限元分析的方法。

关键词: 螺钉连接; 接触; 非线性; 有限元

中图分类号: TB115

文献标识码: A

文章编号: 1006-0316(2006)02-0004-04

The discussion of finite element analysis on the contact of connecting with bolt

WANG Zhong-su¹, ZHANG Hong-ling²

(1.Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics And Physics Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China; 2.Jilin University, Changchun 130021, China)

Abstract: The connecting with bolt is a representative contact means. The contact of the connection-surface is a major problem of machine connection. An FEA(Finite Element Analysis) model for two boards connecting with bolt is built and based on the model the deformation of it is calculated and analyzed by FEA software. In order to getting an exactitude result, linear analysis with Partran2003 and nonlinear analysis with Abaqus6.4 are used in the paper. Comparison two results, nonlinear analysis is more reasonable and accurate.

Key words: connection with bolt; contact; nonlinear; finite element analysis

在机械工程实践中普遍采用螺钉连接, 通过螺钉传递力和扭矩。在接触表面的相互作用包括两个部分: 一是垂直于接触面方向, 另一是沿接触面的切向方向。两个相配合的接触面之间的应力状态很难进行测定。由于不同的安装人员安装螺钉的预紧力不同, 使这种连接方式往往承受着交变载荷的作用。接触面间可能发生相对滑动, 这一滑动形式是随着应力的变化而变化的, 因而, 配合面的接触状态和应力状态也是随着应力的交变而变化的。从力学角度来看, 这些问题属于接触非线性问题。

许多工程问题含有两个或多个部件间的接触问题, 在这类问题中, 当两个物体接触时, 存在沿接触面的法向且作用到接触面上的力。如果接触面间存在摩擦力, 可能会产生抵抗物体间切向运动(滑动)的剪力。接触模拟的一般目的就是确定接触面积及计算所产生的接触压力。

在通常的有限元分析工作中, 绝大多数是采用线性的方法进行分析的。虽然可以比较接近实际情况, 但是当计算中出现接触问题时, 局部的结果会产生较大的偏差。在有限元中, 接触条件是一类特殊的不连续的约束, 它允许力从模型的一部分传输到另一部分。因为仅当两个表面接触时, 才应用接触条件, 所以这种约束是不连续的。当两个表面分开时, 没有约束作用在上面。因此, 分析方法必须能够判断什么时候两个表面是接触的, 并且应用相应的接触约束。类似地, 分析方法也必须能判断什么时候两个表面分开并解除约束。所以这里要引进接触非线性的计算方法。

本文利用非线性有限元软件 ABAQUS6.4, 对螺钉连接的接触问题进行了分析。并与线性分析进行了对比。

收稿日期: 2005-10-26

作者简介: 王忠素(1977-), 女, 黑龙江省双城市人, 2000年毕业于吉林大学机械科学与工程学院, 获学士学位, 现在中国科学院长春光学精密机械与物理研究所读在职研究生, 主要研究方向空间遥传感器的结构分析, 三维模型建立, 机构运动仿真的研究。

1 传统的接触连接线性分析方法

用有限元法求解接触问题以往常采用的物理模型是节点对模型^[1],即将两接触物体的接触面划分成相同的网格,组成一一对应的节点对,并假定两接触体的接触力通过节点对传递,这种模型需预先知道接触发生的确切部位,以便施加边界单元,对于结构复杂问题和考虑摩擦的动态接触问题,点对模型将给结构离散和方程求解带来极大困难,从而难以解决。

2 接触连接的接触非线性求解方法

接触问题是一种边界条件高度非线性的复杂问题,其特点是在接触问题中某些边界条件不是在计算开始就可以给出,两接触体间的接触面积和压力分布随外载荷的变化而变化,同时还包括正确模拟接触面间的摩擦行为和可能存在的接触传热。近年来提出的面接触模型^[2]是把两接触体分为主动体和被动体,在分析时研究主动体的节点与被动体接触表面上相接触的自由度关系及变形的一致关系,从而确定接触边界条件,然后从边界变形协调的变分原理出发,建立整个接触系统的控制方程。这种模型能有效处理复杂接触表面和动态接触问题。

接触问题中产生接触的两物体须满足边界不穿透约束条件,在接触边界施加不穿透约束的方法主要有拉格朗日乘子法、罚函数法和基于求解器的直接约束法,前两种方法处理时都具有局限性,直接约束法处理接触问题是追踪物体的运动轨迹。一旦探测出发生接触,便将接触所需的运动约束和节点力作为边界条件直接施加在产生接触的节点上。对接触的描述精度高,具有普遍适应性^[3]。接触面上的摩擦行为机理十分复杂,常用滑动库仑模型、剪切摩擦模型和粘滑摩擦模型等理想模型来加以模拟。

3 接触非线性有限元分析的基本思路

对于两个接触介质A和B(如图1所示),介质B上有固定的边界,外力F作用在介质A上。介质A

的接触力是 \bar{P}_j ,介质B上的接触力是 \bar{P}_j^t ,对于二维情况,它们可以表示成

$$\bar{P}_j = \begin{bmatrix} P_j^t \\ P_j^n \end{bmatrix} \text{ 和 } \bar{P}_j^t = \begin{bmatrix} P_j^t \\ P_j^m \end{bmatrix} \quad (1)$$

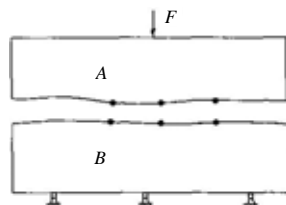


图1 接触介质示意图

介质A和B在接触点上的柔度方程可分别表示为

$$\left. \begin{aligned} \bar{\delta}_{ib} &= \sum_{j=1}^m C_{ij}^B \bar{P}_j^t \\ \bar{\delta}_{ia} &= \sum_{j=1}^m C_{ij}^A \bar{P}_j + \sum_{k=1}^e C_{ik}^A \bar{f}_k \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式中: m 为接触点对数目; $j=1, 2, \dots, m$ 为接触点对编号; $\bar{\delta}_{ia}$ 和 $\bar{\delta}_{ib}$ 为介质A和B在接触点*i*的位移; C_{ij}^A 和 C_{ij}^B 分别为介质A和B在结点*i*由结点*j*作用力引起的柔度字矩阵; \bar{f}_k 为第*k*个载荷点的外力向量; e 为外荷点数。若接触点对是连续的,接触面上的相容方程表示为

$$\bar{\delta}_{ia} = \bar{\delta}_{ib} + \bar{\delta}_{io} \quad (3)$$

式中: $\bar{\delta}_{io}$ 是第*i*个接触点对应的初始间隙向量,在接触点上,作用在两个物体上的接触力必须是作用力与反作用力的关系,即

$$\bar{P}_j = -\bar{P}_j^t \quad (4)$$

将式(1)和式(3)代入式(2),可得连续状态点的相容方程

$$\sum_{j=1}^m (C_{ij}^A + C_{ij}^B) \bar{P}_j = -\sum_{k=1}^e C_{ik}^A \bar{f}_k + \bar{\delta}_{io} \quad (5)$$

对于滑动状态,假设满足库仑摩擦定律,则有

$$P_j^t = \mu P_j^n \quad (6)$$

每次迭代求解只需根据接触点的接触状态,用式(6)替代式(5)就可以了。

4 有限元分析

本文模拟结构为螺钉连接两块板,用有限元方法计算结构在重力作用下的弯曲变形。

4.1 基本假设

(1) 两块板之间的接触为弹性接触；(2) 板是线弹性体，满足小变形假定；(3) 接触面满足库仑定律；(4) 接触表面是连续和平滑的。

4.2 有限元基本方程

对于两个介质 A 和 B 组成的接触问题如图 2 所示，它们的有限元基本方程为

$$\begin{cases} K_a \mu_a = R_a + P_a \\ K_b \mu_b = R_b + P_b \end{cases} \quad (7)$$

式中： K_a 和 K_b 分别为介质 A 、 B 的刚度矩阵； μ_a 和 μ_b 分别为介质 A 、 B 结点位移向量； R_a 和 R_b 分别为介质 A 、 B 接触力向量； P_a 和 P_b 是作用在介质 A 、 B 上的外力向量，给定 R_a 和 R_b ，即可按典型的有限元位移法求解。

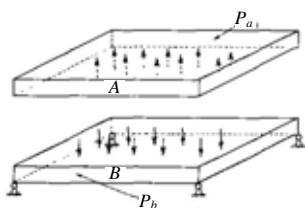


图 2 接触介质相互作用示意图

5 算例

5.1 有限元模型的建立

两块板的尺寸均为：长*宽*高=100mm*20mm*5mm，连接孔直径为 $\phi 10$ mm，用 $\phi 10$ 螺钉连接。材料参数如表 1 所示。实体模型如图 3 所示，有限元模型如图 4 所示。

表 1 材料参数

name	Material	Density $10^{-6}/(\text{kg} \cdot \text{mm}^3)$	Elastic module Kg/mm^2	Thermal expansion coefficient α $10^{-6}/^\circ\text{C}$	Poisson's ratio μ
板	4345	8.18	15000	7.5	0.25
螺钉	45	7.81	20010	11.59	0.26

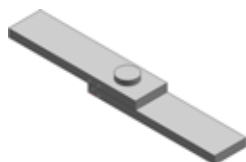


图 3 结构物理模型

5.2 有限元分析结果

5.2.1 线性分析

在运用传统的线性分析方法时，利用 MPC 来模拟螺钉连接，而忽略接触面的作用。这种算法除相互连接的节点外，其他的节点并没有搜寻与其相互作用的节点。因而无从考虑接触应力问题，更无从考虑螺钉预紧问题。在重力作用下结构的弯曲变形云图如图 5 所示。

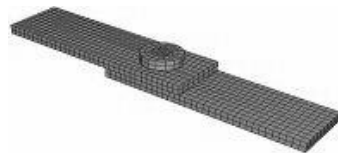


图 4 结构有限元模型

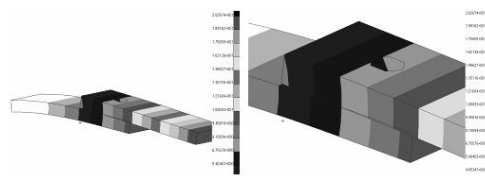


图 5 结构在重力作用下线性分析变形云图

5.2.2 非线性分析

用非线性方法分析，定义螺钉为变形体，零件间的配合面为接触面。在有限元分析中，接触条件允许力从模拟的一部分传输到另一部分。在两个表面相互分开时，没有相互作用的力。因而，在重力作用下，按着接触算法计算两个板的变形结果，正、负两个矢量方向上的变形结果并不一致。变形云图如图 6 和图 7 所示。

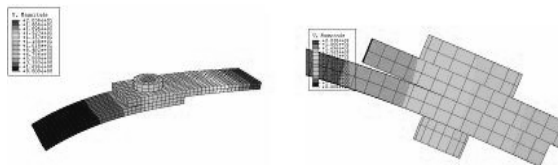


图 6 结构在重力作用下非线性分析变形云图

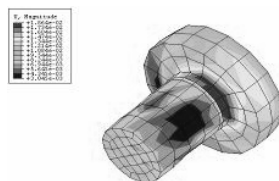


图 7 螺钉在重力作用下非线性分析变形云图

其运行状态进行监测,进而反馈信息,再由模糊逻辑系统进行故障诊断,寻找出故障部位及其原因。

在工作过程中,液压系统的故障因素不外乎由压力不足 (x_1),流量不足 (x_2),爬行 (x_3),发热 (x_4),噪声 (x_5),振动 (x_6),泄露 (x_7) 等 m 个组成^[5]。由此我们可确定因素集 X ;并可把各子系统作为对象集 Y ,它由供油子系统 (y_1)、调压子系统 (y_2)、控制子系统 (y_3)、执行与反馈子系统 (y_4) 等几个元素组成。对于对象集 Y ,其着眼点在于故障的位置。对象集 Y 与因素集 X 之间构成的模糊关系矩阵 R ,由液压系统机理分析和专家经验及资料确定,表1给定模糊关系矩阵 R 中液压系统故障症状和各子系统之间的模糊关系。

表1 液压系统故障症状和各子系统之间的模糊关系

	压力不足 (x_1)	流量不足 (x_2)	爬行 (x_3)	发热 (x_4)	噪声 (x_5)	振动 (x_6)	泄露 (x_7)
供油子系统 y_1	0.5	0.5	0.3	0.4	0.5	0.5	0.3
调压子系统 y_2	0.9	0.7	0.2	0.8	0.8	0.1	0.2
控制子系统 y_3	0.1	0.3	0.1	0.1	0.3	0.2	0.1
执行与反馈子系统 y_4	0.3	0.3	0.4	0.2	0.4	0.5	0.6

如果工作过程中出现压力不足(表现为推力或转矩不够)和发热两种故障现象。特征症状权向量的各分量模糊则转化为0或1,则 $x=[1001000]$,通过模糊关系矩阵故障向量 Y 为:

$$Y=RX^T=$$

$$\begin{bmatrix} 0.5 & 0.5 & 0.3 & 0.4 & 0.5 & 0.5 & 0.3 \\ 0.9 & 0.7 & 0.2 & 0.8 & 0.8 & 0.1 & 0.2 \\ 0.1 & 0.3 & 0.1 & 0.1 & 0.3 & 0.2 & 0.1 \\ 0.3 & 0.3 & 0.4 & 0.2 & 0.4 & 0.5 & 0.6 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.9 \\ 1.7 \\ 0.2 \\ 0.5 \end{bmatrix}$$

取最大值 $My_2=1.7$ 所对应的对象集 y_2 (调压子系统)为引起故障的主要原因,这与实际中液压系统操作故障发生原因完全吻合。

3 结束语

以上通过对模糊逻辑系统故障诊断方法的分析,由应用实例不难看出,将模糊逻辑系统应用于机械故障诊断是行之有效的。随着模糊逻辑系统和神经网络研究的层层深入,现今将这两种技术进行紧密结合所形成的模糊神经网络应用于故障诊断已成为新的技术手段,这也是机械故障诊断领域中正在探索的新课题,需要我们进一步去开拓和挖掘。

参考文献：

[1]周东华,叶银忠.现代故障诊断与容错控制[M].北京:清华大学出版社,2000.

[2]钟秉林,黄仁.机械故障诊断学[M].北京:机械工业出版社,2002.

[3]王华忠,张雪申,俞金寿.基于支持向量机的故障诊断方法[J].华东理工大学学报,2004,30(4):179—182.

[4]王士同.模糊系统、模糊神经网络及应用程序设计[M].上海:上海科学技术文献出版社,2001.

[5]张建华.液压系统故障诊断知识处理方法研究[J].机床与液压,1998(6):69—70.

(上接第6页)

从两种分析方法变形结果云图可以看出,用非线性方法可以更精确地对实际结构进行仿真分析。

6 结论

结构非线性问题是指结构刚度随其变形发生改变。所有的物理结构都为非线性问题,而线性分析只是相对的和近似的,这对大部分设计来说通常是足够的,但对某些光机结构来说是远远不够的。

在非线性分析中,结构的刚度在分析中必须经

过多次的集成和求逆,这时的非线性分析比现行分析昂贵的多。由于非线性的响应依赖于所加载荷的大小,因此不能通过叠加来获得不同载荷情形的结果,每种载荷情形都必须分为独立的分析进行分析和求解。

参考文献：

[1]许小强,赵洪伦.过盈配合应力的接触非线性有限元分析[J].机械设计与研究,2000.

[2]何君毅,林祥都.工程结构非线性问题的数值解法[M].北京:国防工业出版社,1993.

[3]ABAQUS.接触分析,2004.