

doi:10.16576/j.ISSN.1007-4414.2024.05.010

## 基于有限元的波纹膜片初始缺陷分析\*

武 晔<sup>1,2</sup>,张春光<sup>1,2</sup>,李上青<sup>1,2</sup>,安 磊<sup>1,2</sup>,于晓晨<sup>1,2</sup>

(1.沈阳仪表科学研究院有限公司,辽宁 沈阳 110043;2.国机传感科技有限公司,辽宁 沈阳 110043)

摘要:波纹膜片作为压力传感器中重要的弹性敏感元件,其物理性能直接影响压力传感器的线性度、灵敏度及稳定性等性能。文章基于 ANSYS 有限元分析软件,对波纹膜片进行特征值屈曲分析,取其一阶屈曲模态作为初始几何缺陷,并对是否考虑初始缺陷的波纹膜片模型进行静力分析。有限元分析结果表明,与未引入初始缺陷相比,采用一阶屈曲模态作为初始缺陷可得到更小的位移量和最大应力值,这对波纹膜片的设计分析具有重要意义。

关键词:波纹膜片;初始缺陷;屈曲分析;ANSYS

中图分类号:TP212

文献标识码:A

文章编号:1007-4414(2024)05-0040-03

## Research on Initial Imperfections in Corrugated Diaphragm based on Finite Element Method

WU Ye<sup>1,2</sup>, ZHANG Chun-guang<sup>1,2</sup>, LI Shang-qing<sup>1,2</sup>, AN Lei<sup>1,2</sup>, YU Xiao-chen<sup>1,2</sup>

(1. Shenyang Academy of Instrumentation Science Co., Ltd, Shenyang 110043, Liaoning, China;

2. SINOMACH Sensing Technology Co., Ltd, Shenyang 110043, Liaoning, China)

**Abstract:** As an important elastic sensitive component in pressure sensors, the physical performance of corrugated diaphragm will directly affect the linearity, sensitivity, and stability of pressure sensors. In this article, based on the ANSYS finite element analysis software, the eigenvalue buckling analysis is performed on the corrugated diaphragm. Taking their first-order buckling mode as the initial geometric imperfection, static analysis is conducted on the corrugated diaphragm model with or without considering the initial imperfection. The finite element analysis results show that compared to not introducing initial imperfections, using the first-order buckling mode as the initial imperfection can obtain smaller displacement and maximum stress value, which is of great significance for the design and analysis of corrugated diaphragm.

**Key words:** corrugated diaphragm; initial imperfection; buckling analysis; ANSYS

## 0 引言

压力传感器作为工程行业中常用的传感器类别,具有灵敏度高、成本低、稳定性强等优点,它已广泛应用于航空航天、工业控制及汽车电子等领域<sup>[1]</sup>。压力传感器通常由弹性敏感元件和位移敏感元件组成<sup>[2]</sup>,波纹膜片作为压力传感器中最重要的弹性敏感元件,可起到传递压力和隔离介质的作用,其性能对压力传感器的线性度、灵敏度及稳定性等性能具有重要影响。

波纹膜片厚度一般在几十到几百微米范围内<sup>[3]</sup>,在实际中由于加工工艺等原因使膜片存在不可避免的几何缺陷,若要使膜片无损耗地传递压力,则必须消除自身残余应力的影响<sup>[4]</sup>,而初始几何缺陷是影响压力传感器稳定性的重要因素。在对波纹膜片进行分析时,最理想的状况是引入真实几何缺陷,但缺陷具有随机性和不确定性<sup>[5]</sup>。因此,引入初始几何缺陷来分析膜片屈曲特性十分重要。

笔者基于 ANSYS 有限元分析软件对波纹膜片进行特征值屈曲分析,但由于初始缺陷未知,因此需将

特征值屈曲分析的一阶屈曲模态形状乘上一定的比例系数作为初始缺陷引入分析,此分析对波纹膜片的设计及研究具有重要参考意义。

## 1 特征值屈曲分析理论

屈曲模态分析本质上为线性求解过程,其主要用于分析结构在一定载荷大小下的稳定性以及确定结构发生失稳的临界载荷。

特征值屈曲分析也可称为线性屈曲分析,这种分析方法可预测理想弹性结构的理论屈曲强度。通过约束条件和载荷计算得出结构特征值,然后推导出屈曲载荷,屈曲载荷的大小与结构屈曲模态形状相关,可分析出结构在屈曲条件下假设的形状。在 ANSYS 中特征值屈曲分析原理如下。

首先对载荷-位移关系进行求解:

$$\{P\} = [K] \times \{u\} \quad (1)$$

式中: $P$ 为载荷; $K$ 为弹性刚度矩阵; $u$ 为位移。

假设特征值屈曲位移足够小,结构在外载荷作用下,任意状态时的增量平衡方程为:

$$\{\Delta P\} = \{[K] + [K_{\sigma}(\sigma)]\} \times \{\Delta u\} \quad (2)$$

\* 收稿日期:2023-12-26

作者简介:武 晔(1997-),女,辽宁沈阳人,助理工程师,研究方向:机械有限元仿真及力学研究。

式中: $K_0(\sigma)$ 为应力状态 $\sigma$ 下的初始应力矩阵。

假设载荷、位移、应力均和初始状态的载荷、位移、应力成正比,则增量平衡方程可写为:

$$\{\Delta P\} = \{[K] + \lambda[K_0(\sigma)]\} \times \{\Delta u\} \quad (3)$$

达到失稳状态时,结构失去进一步抵抗变形的能力,一个较小的载荷增量 $\Delta P$ 将会引起较大的变形 $\Delta u$ ,此时 $\Delta P \approx 0$ ,增量平衡方程可写为:

$$\{[K] + \lambda[K_0(\sigma)]\} \times \{\Delta u\} = 0 \quad (4)$$

上式即为特征值屈曲问题,其中 $\lambda$ 为特征值或屈曲因子<sup>[6]</sup>。

屈曲分析的主要任务即为求解该平衡方程,以此得到特征值及对应的特征向量。

## 2 波纹膜片分析

### 2.1 模型概述及有限元建模

基于ANSYS对压力传感器波纹膜片进行建模及分析,波纹膜片基本参数如表1所列。文中波纹膜片波形设计为正弦曲线,其原因是正弦曲线的灵敏度较好,且应力集中表现不明显<sup>[7]</sup>。

表1 波纹膜片参数

参数	数值	参数	数值
外径/mm	18.5	平中心直径/mm	3
厚度/mm	0.03	波数	6
波高/mm	0.15		

膜片材料选用316L不锈钢,弹性模量为 $2 \times 10^{11}$  Pa,泊松比为0.3,密度为 $7\ 800$  kg/m<sup>3</sup>。采用SOLID 45实体单元对波纹膜片进行建模,SOLID 45实体单元可用于构造三维固体结构,建立的波纹膜片模型如图1所示。采用四面体网格划分方法,指定网格划分尺寸后进行网格划分,网格划分的模型结果如图2所示,波纹膜片有限元模型节点数为59 734,单元数为177 795。

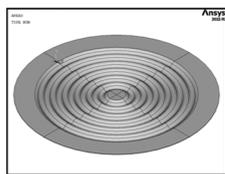


图1 波纹膜片模型



图2 网格划分后的模型

### 2.2 特征值屈曲分析

假设波纹膜片状态理想无缺陷,利用特征值屈曲分析方法对模型进行分析,获取其一阶屈曲模态形状作为初始缺陷。

首先对波纹膜片进行静力分析求解,在分析过程中应激活预应力效应(PSTRESO)。由于在实际的压力传感器中,波纹膜片的边缘余量与烧结座焊接接

合,除边缘余量外的区域均需承担油腔内硅油压力,因此对焊接区域的面设置全约束条件,并对除焊接区域外的面施加单位外压载荷,载荷大小为1 MPa,随后进行静力分析。需要注意的是,特征值屈曲分析只允许线性行为的发生,若定义了非线性单元,则按线性进行处理,因此在分析中必须要定义材料的弹性模量或刚度大小<sup>[8]</sup>。

静力分析完成后,进行特征值屈曲分析求解,求解得到的特征值即为屈曲因子,屈曲荷载的大小为屈曲因子和给定荷载的乘积。一般来说,在特征值屈曲分析中,对于后续分析提取第一阶特征值便已足够。由波纹膜片特征值屈曲分析可得到其一阶屈曲模态形状,如图3所示,一阶模态特征值为10.098,计算得到特征值屈曲分析预估的屈曲荷载大小为10.098 MPa。

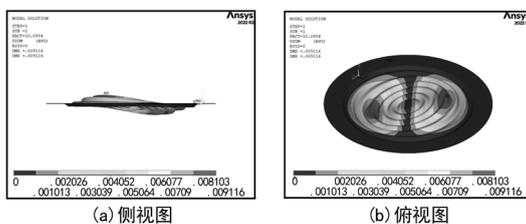


图3 一阶屈曲模态形状

### 2.3 引入初始缺陷

使用一致缺陷模态法引入初始缺陷,一致缺陷模态法是用最低阶屈曲模态来模拟结构的初始缺陷分布,结构在此模态变形状态下势能最小<sup>[9]</sup>。屈曲模态是结构屈曲时的位移倾向,是可能会发生的位移变化。因此在实际中,若结构的缺陷形式与一阶屈曲模态结果相符,将对波纹膜片受力性能产生最不利影响<sup>[10]</sup>。由特征值屈曲分析结果可知,波纹膜片一阶屈曲模态最大变形量为0.009 m,引入比例设置为1%,可得到引入初始缺陷的模型。引入一阶屈曲模态作为初始缺陷后,结构形态发生了变化,各阶的屈曲模态不再呈严格的对称或反对称分布。

### 2.4 波纹膜片静力分析

有限元分析手段不仅可以直观地反映波纹膜片在均布压力载荷下最大位移量发生的区域,还可以清晰地反映出波纹膜片承受最大应力的区域。工程中,波纹膜片实际承受的压力为压力传感器工作压力与硅油承担压力的差值,即膜片自身变形压力损耗。根据实际工况对波纹膜片预先进行含有硅油的受力分析,可以得到,压力传感器量程为1 MPa时,波纹膜片承担压力为393.009 Pa。因此在引入初始缺陷后的模型中对波纹膜片施加393.009 Pa大小载荷,边界条件保持不变,静力分析完成后得到的波纹膜片形态如图4所示,波纹膜片最大位移量为 $6.17 \times 10^{-7}$  m,

发生在波纹膜片的中心区域;最大应力值为 1.55 MPa,在波纹膜片靠近边缘余量的第一个波的正弦曲线处。

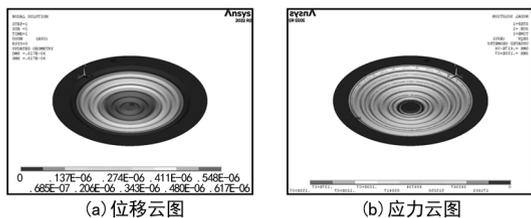


图4 静力分析结果

将是否引入初始缺陷的两种分析结果进行对比,未引入初始缺陷时,波纹膜片的最大位移量为  $2.03 \times 10^{-6}$  m,最大应力值为 3.62 MPa,对比结果如表 2 所列。由表 2 可知,引入初始缺陷后比未引入初始缺陷得到的波纹膜片最大位移量和最大应力值更低,表明初始缺陷对波纹膜片稳定性影响较大,在实际工程中必须对初始几何缺陷加以考虑。

表 2 对比分析

量 程 /MPa	未引入初始缺陷		引入初始缺陷	
	位移/m	应力/MPa	位移/m	应力/MPa
1	$2.03 \times 10^{-6}$	3.62	$6.17 \times 10^{-7}$	1.55

### 3 结 语

文章基于 ANSYS 有限元分析软件对压力传感器

波纹膜片进行了特征值屈曲分析,并将一阶屈曲模态作为初始缺陷引入到静力分析中。结果表明,引入初始缺陷后波纹膜片最大位移量为  $6.17 \times 10^{-7}$  m,最大应力为 1.55 MPa,与未引入初始缺陷相比,其最大位移量与最大应力值更低,初始缺陷对波纹膜片稳定性具有较大影响,对膜片的设计分析具有重要意义。

### 参考文献:

- [1] 杜晓辉,陈凡红,刘 帅,等.压力传感器波纹膜片低应力激光焊接工艺[J].光学精密工程,2023,31(11):1652-1659.
- [2] 黎浩松,黄 斌,伍土庆.结构压力传感器的应用进展[J].集成电路应用,2023,40(1):318-320.
- [3] 叶军红.压力传感器在汽车行业的应用现状[J].汽车电器,2020(8):59-61.
- [4] 张展智,赵国伟,黄 海,等.轴压开口圆柱薄壳屈曲分析与试验[J].北京航空航天大学学报,2012,38(4):557-562.
- [5] 罗 昱.改进的一致缺陷模态法在单层网壳稳定分析中的应用研究[D].天津:天津大学,2007.
- [6] 付兴铭,谭六喜,姚 媛,等.压力传感器封装中波纹膜片的结构优化[J].传感器与微系统,2007(7):80-81+84.
- [7] 陈 昕,沈世钊.网壳结构的几何非线性分析[J].土木工程学报,1990(3):47-57.
- [8] 屠凤莲,范顺成,罗文龙.基于 ANSYS 的支撑架特征值屈曲分析[J].河北工业大学学报,2010,39(3):6-10.
- [9] 李科杰.新编传感器技术手册[M].北京:国防工业出版社,2002.
- [10] 郑 晖.折板网壳结构整体稳定分析中最不利初始几何缺陷的探讨[J].特种结构,2015,32(6):7-10.

(上接第 39 页)

- [3] 韩荣第,于启勋.难加工材料切削加工[M].北京:机械工业出版社,1996.
- [4] 张桂木,杨玉海,赵树国,等.钛合金薄壁件车削加工的研究[J].机械设计与制造,2006(1):140-141.
- [5] Tamin M N, Sudin I, Mon T T. Thermal-mechanical responses of Ti-6Al-4V during orthogonal cutting process[J]. Diffusion and Defect Data A, 2008(273):673-678.
- [6] Molinari A, Musquar C, Sutter G. Adiabatic shear banding in high

speed machining of Ti-6Al-4V[J]. International Journal of Plasticity, 2002(18):443-459.

- [7] 杜国臣.硬质合金刀具车削 Ti6Al4V 钛合金试验研究[J].组合机床与自动化加工技术,2013(5):36-38.
- [8] 苏文瑛,刘玲玲,夏升旺.钛合金芯轴车削加工工艺的改进[J].组合机床与自动化加工技术,2018(1):135-136.
- [9] 易湘斌,芮执元,贺 璠,等.不同冷却润滑条件下 TB6 钛合金高速铣削切屑形态研究[J].制造技术与机床,2019(7):85-88.