

电容薄膜真空计用金属膜片电容传感器设计

侯少毅 胡强 卫红 陈浩

(季华实验室, 广东 佛山 528251)

摘要: 金属膜片电容传感器是高精度电容薄膜真空计的关键部分。为满足其国产化需求, 以国内研发的某镍基合金膜片材料为基础, 研究电容薄膜真空计用金属膜片电容传感器。首先, 基于通用有限元分析软件, 建立金属膜片电容传感器中感应膜片的计算模型; 然后, 采用非线性大挠度理论对不同预应力下的感应膜片变形进行计算, 并与理论计算结果进行对比, 对比结果表明, 该计算模型具有较高精度; 最后, 分析预应力与感应膜片非线性误差关系, 并对影响电容薄膜真空计测量特性的预应力、感应膜片与固定极板的初始极距等关键参数进行设计, 以满足高精度真空测量的要求。

关键词: 电容薄膜真空计; 感应膜片; 预应力; 初始极距

中图分类号: TB771

文献标识码: A

文章编号: 1674-2605(2021)03-0007-05

DOI: 10.3969/j.issn.1674-2605.2021.03.007

0 引言

电容薄膜真空计作为一种直接测量式、全压型的真空计, 具有灵敏度高、功耗低、稳定性好、精度高等特点^[1], 且测量结果与气体成分和种类无关, 在真空行业应用广泛, 已成为半导体、航天、核工业等领域的重要仪表。由感应膜片、固定极板及电信号处理电路等组成的金属膜片电容传感器是电容薄膜真空计的核心部件。其中感应膜片的非线性误差、感应膜片与固定极板的极距, 直接关系到真空计测量的准确性和灵敏度等性能参数。

高精度电容薄膜真空计长期被国外垄断, 感应膜片关键材料主要依赖进口。为助其国产化, 本文以国内研发的某镍基合金膜片材料为基础, 根据金属膜片电容传感器感应膜片的厚度和直径参数, 采用通用有限元分析软件对其变形及应力进行仿真计算, 研究不同预应力下感应膜片的线性度误差, 设计感应膜片预应力; 综合分析该预应力下感应膜片的变形及应力强度, 针对影响真空计测量特性的金属膜片电容传感器的感应膜片与固定极板的初始极距等关键参数进行优化设计, 以满足测量范围为 1.13 Pa ~1300 Pa 的电容薄膜真空计需求。

1 电容薄膜真空计结构

电容薄膜真空计主要由接管、入口挡板、感应膜片(动电极)、腔体、固定极板以及电容信号处理电路等部分组成, 如图 1 所示。其中腔体被感应膜片分成 2 个密闭腔室, 固定极板所在的腔室为参考腔室, 通过吸气泵长期维持在高真空状态。固定极板与感应膜片组成一个可变的平行板式电容器。在测量真空度时, 外部压力作用在感应膜片上, 引起感应膜片与固定极板的极距发生变化, 进而引起电容值变化。因此, 感应膜片由于压力而产生的挠度被感知转换成电容值变化, 通过检测电容值变化可获得相应的压力值。

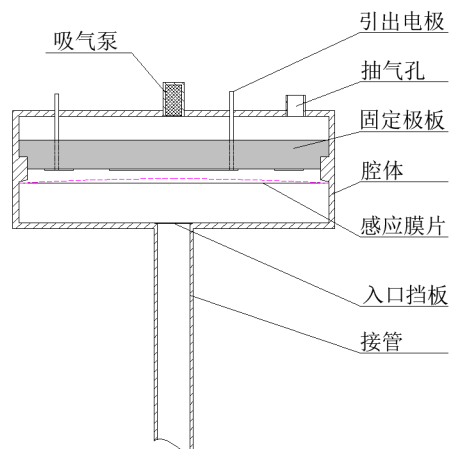


图 1 电容薄膜真空计结构示意图

2 感应膜片有限元计算分析与设计

2.1 有限元建模与计算

以 10Torr 电容薄膜真空计（测量范围 1.13 Pa ~ 1300 Pa）为研究对象，选取感应膜片直径为 50 mm，厚度为 0.025 mm，腔体和感应膜片材料均采用国内研发的某镍基合金材料，材料属性如表 1 所示。

表 1 国产某镍基合金材料属性

弹性模量/MPa	泊松比	屈服强度/MPa	抗拉强度/MPa
221000	0.29	700	1200

采用有限元分析软件建立二维轴对称模型，并利用该软件的非线性计算能力，对感应膜片变形进行大挠度分析计算。为提高模拟精度，减少边界效应的影响，建立包括感应膜片、腔体、接管等部件的完整模型。接管底部施加固定约束，感应膜片下侧施加载测压力，上侧视为绝对真空，同时对感应膜片的预应力进行定义。由于整个腔体设计的刚度较大，分析时不考虑外部压强的影响，并忽略腔体内壁小凸台和抽气孔、吸气泵等结构的影响，以简化模型。为提高计算精度，有限元模型采用四边形轴对称网格单元，

并对其网格单元进行局部细化处理，在感应膜片厚度方向划分为 3 层网格，有限元分析模型如图 2 所示。

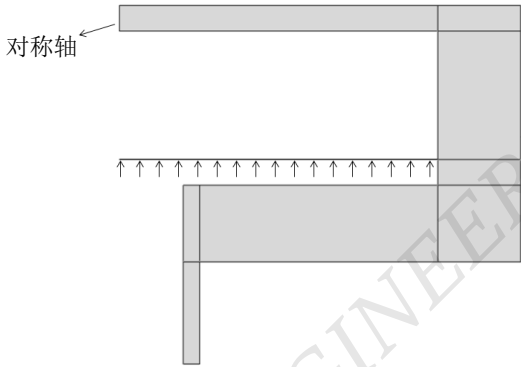


图 2 感应膜片有限元分析模型

感应膜片的预应力直接关系其变形特性，因此，需对预应力进行分析。本文对 5 种预应力（0 Mpa，10 Mpa，45 Mpa，100 Mpa 和 150 Mpa）感应膜片分别在 1.33 Pa，100 Pa，300 Pa，500 Pa，700 Pa，900 Pa，1100 Pa 和 1300 Pa 压力作用下的应力及变形进行计算。为验证模型的正确性，同时采用冯·卡门方程和 Beams 方程^[2]分别对无预应力感应膜片和有预应力感应膜片的中心挠度进行计算，感应膜片中心位移如表 2 所示。

表 2 不同预应力下感应膜片中心位移（单位：mm）

压力/Pa	有限元分析法					理论值				
	0 MPa	10 MPa	45 MPa	100 MPa	150 MPa	0 MPa	10 MPa	45 MPa	100 MPa	150 MPa
1.33	0.02050	0.00078	0.00021	0.00024	0.00016	0.01953	0.00083	0.00018	0.00008	0.00006
100	0.12290	0.05348	0.01348	0.00621	0.00422	0.12880	0.05651	0.01387	0.00625	0.00417
300	0.17900	0.12230	0.04001	0.01848	0.01245	0.18799	0.12408	0.04115	0.01873	0.01250
500	0.21290	0.16430	0.06556	0.03070	0.02067	0.22359	0.16456	0.06720	0.03115	0.02081
700	0.23860	0.19510	0.08971	0.04285	0.02887	0.25052	0.19423	0.09156	0.04348	0.02911
900	0.25970	0.21980	0.11220	0.05488	0.03706	0.27267	0.21809	0.11405	0.05568	0.03738
1100	0.27790	0.24060	0.13320	0.06679	0.04521	0.29172	0.23829	0.13473	0.06772	0.04562
1300	0.29400	0.25880	0.15250	0.07854	0.05333	0.30858	0.25593	0.15374	0.07958	0.05382

由表 2 可见，有限元分析法计算结果与理论值接近，其最大偏差在 6%以内（除受计算机精度、网格数量有限等带来的误差累积影响导致的小位移相对

误差较大外），表明有限元计算模型合理。

2.2 感应膜片变形线性分析

感应膜片压力-挠度特性表现为近似线性^[2]，减小

非线性误差对简化数据处理、提高测量精度具有重要意义，因此，需对感应膜片的线性度进行分析。由表 2 的计算结果可得到感应膜片在不同预应力下的压力-位移曲线，如图 3 所示。由图 3 可知，感应膜片的线性度随预应力的增加而提高。

为对感应膜片变形的非线性度误差进行定量分析，利用最小二乘法求出感应膜片在各预应力下压力

-位移的拟合直线，通过式(1)^[3]可得到不同预应力下感应膜片变形的非线性误差指标，结果如表 3 所示。

$$\gamma_L = \pm \frac{\Delta L_{\max}}{Y_{FS}} \times 100\% \quad (1)$$

式中， γ_L 为非线性误差（线性度指标）； $\Delta L_{\max}$ 为最大非线性绝对误差； Y_{FS} 为输出满量程。

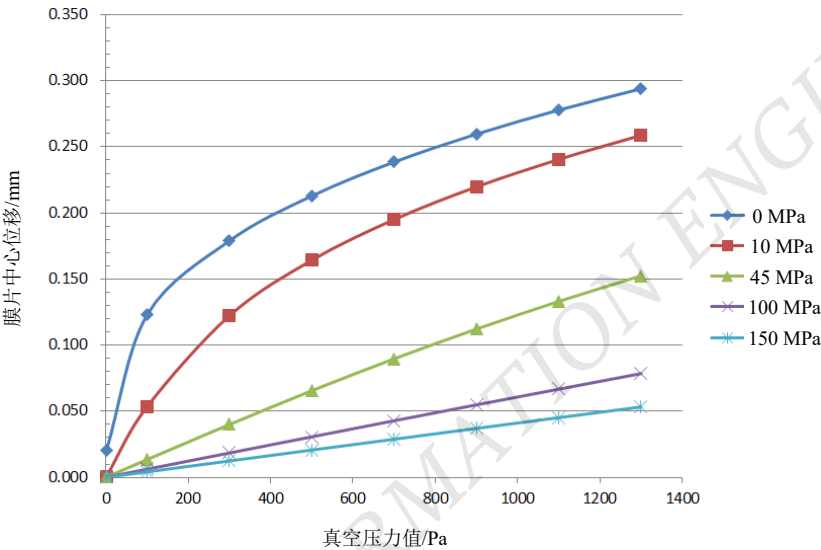


图 3 不同预应力下的压力-位移曲线

表 3 感应膜片变形非线性误差

压力/Pa	预应力/MPa				
	0	10	45	100	150
1.33	24.00%	15.94%	2.22%	0.20%	0.08%
100	4.82%	2.74%	1.17%	0.19%	0.05%
300	11.70%	9.33%	0.73%	0.04%	0.02%
500	11.03%	11.04%	1.98%	0.22%	0.07%
700	7.57%	8.42%	2.31%	0.30%	0.09%
900	2.54%	3.45%	1.56%	0.23%	0.08%
1100	3.47%	3.04 %	0.17%	0.01%	0.00%
1300	10.19%	10.52%	3.02%	0.41%	0.14%

由表 3 可知：在无预应力情况下，感应膜片中心位移在测量范围内的非线性误差达到 24%，灵敏度为 0.178 $\mu\text{m}/\text{Pa}$ ；当预应力为 150 MPa 时，测量范围内

非线性误差减小到 0.14%（优于文献[4]膜片非线性度误差 0.3%的要求），灵敏度为 0.041 $\mu\text{m}/\text{Pa}$ （文献[4]灵敏度 0.0035 $\mu\text{m}/\text{Pa}$ ）。综合考虑精度和灵敏度，本设计取感应膜片预应力为 150 MPa。

3 感应膜片与固定极板初始极距设计

感应膜片与固定极板的初始极距需综合考虑测量范围、灵敏度、感应膜片强度等因素。根据无压力时极距与电容值的关系：初始极距减小，基础电容值增加，灵敏度提高^[3]，但初始极距过小会减小测量范围；初始极距过大将导致感应膜片承受过大的压力，固定极板无法提供过载保护，导致感应膜片屈服失效。因此，为满足电容传感器测量范围、灵敏度以及抗过载能力要求，需对感应膜片与固定极板的初始极距进行合理设计。

针对测量范围为 1.13 Pa~1300 Pa，感应膜片直径为 50 mm，厚度为 0.025 mm，感应膜片预应力为 150 MPa 的电容薄膜真空计传感器，采用前述有限元

模型，分别对真空压力大于量程的压力载荷：1.3 kPa，4 kPa，8 kPa，12 kPa，16 kPa 和 20 kPa 进行计算，其变形及应力分布分别如图 4、图 5 所示。

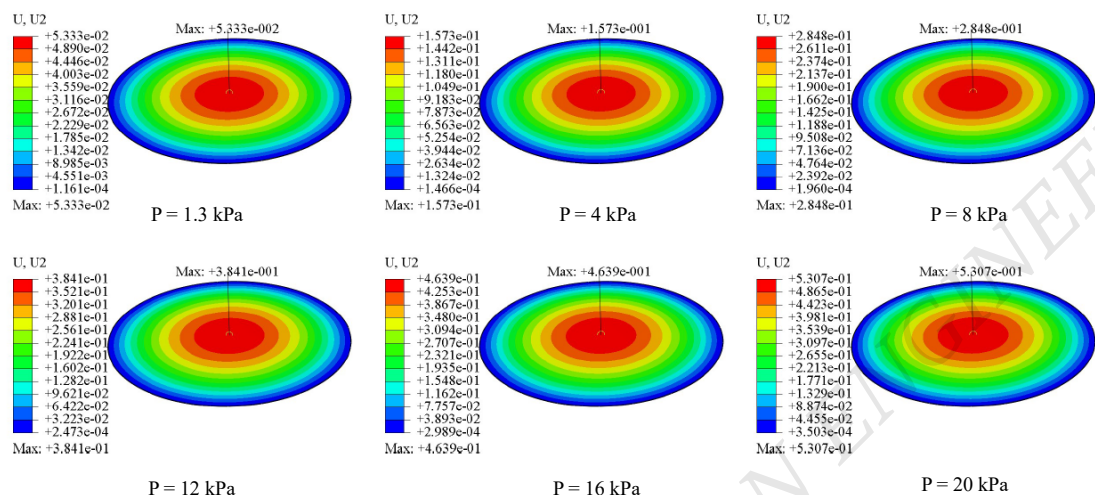


图 4 150 MPa 预应力感应膜片在不同压力下的变形

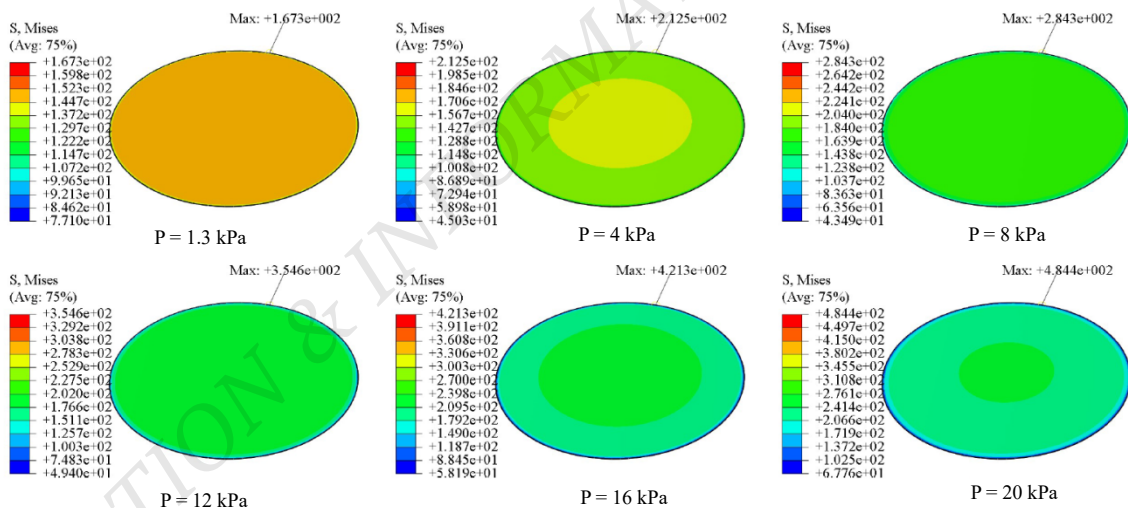


图 5 150 MPa 预应力感应膜片在不同压力下的 Mises 应力分布

由图 4 和图 5 可知：感应膜片在 1.3 kPa 压力时，挠度为 0.053 mm，感应膜片最大 Mises 为 167.3 MPa，分布在边缘，小于材料的许用强度 350 MPa（安全系数取 2），为满足测量范围要求，极距需大于 0.06 mm；感应膜片在 12 kPa 压力时，挠度为 0.38 mm，感应膜片最大 Mises 为 354.6 MPa，分布在边缘，超过材料的许用强度 350 MPa，为满足感应膜片的抗过载能力，

极距设计应小于 0.38 mm。综合考虑传感器的测量范围、灵敏度和抗过载能力要求，将感应膜片与固定极板的初始极距设计为 0.1 mm。

4 结论

本文以国内研发的某镍基合金材料为基础，对测量范围为 1.13 Pa~1300 Pa，感应膜片直径为 50 mm，

厚度为 0.025 mm 的电容薄膜真空计关键部件金属膜片电容传感器结构参数(预应力和初始极距)进行研究。

本文采用有限元通用分析软件,对不同预应力下的感应膜片变形进行计算,研究预应力与感应膜片非线性误差的关系。研究表明:随着预应力的增加,感应膜片的非线性误差逐渐减小,但过大的预应力会降低灵敏度。此外,分析感应膜片与固定极板的初始极距对测量范围和过载能力的影响,初始极距过大会影响感应膜片的强度,过小则限制其测量范围。最后,通过分析,确定感应膜片的预应力值为 150 Mpa,初始极距为 0.1 mm,可满足电容薄膜真空计精度、灵

敏度、抗过载能力等特性参数要求。

参考文献

- [1] Shahiri Tabarestania M, Azizollah Ganji B. Analytical Analysis of Capacitive Pressure Sensor with Clamped Diaphragm[J]. IJE TRANSACTIONS C: Aspects, 2013,26(3): 297-302.
- [2] 孟岳,陈叔平,陈永军,等.预加张力对电容薄膜真空计感压膜片变形的影响[J].真空与低温,2020,26(1):1-36.
- [3] 胡向东,李锐,徐洋,等.传感器技术与检测技术[M].3 版.北京:机械工业出版社,2018.
- [4] 张炳武.基于 Havar 合金膜片的电容式压力传感器研制[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2016.

Design of Metal Diaphragm Capacitance Sensor for Capacitive Diaphragm Vacuum Gauge

Hou Shaoyi Hu Qiang Wei Hong Chen Hao
(Jihua Laboratory, Foshan 528251, China)

Abstract: Metal diaphragm capacitance sensor is the key part of high precision capacitance diaphragm vacuum gauge. In order to meet the domestic demand, a metal diaphragm capacitive sensor for capacitive diaphragm vacuum gauge was studied based on a nickel based alloy diaphragm material developed in China. Firstly, based on the general finite element analysis software, the calculation model of the induction diaphragm in the metal diaphragm capacitance sensor is established; Then, the nonlinear large deflection theory is used to calculate the deformation of the induction diaphragm under different pre-stressing forces, and the comparison with the theoretical results shows that the calculation model has high accuracy; Finally, the nonlinear error relationship between pre-stress and induction diaphragm is analyzed, and the key parameters such as pre-stress, initial electrode distance between induction diaphragm and fixed plate which affect the measurement characteristics of capacitive diaphragm vacuum gauge are designed to meet the requirements of high-precision vacuum measurement.

Key words: capacitive diaphragm vacuum gauge; induction diaphragm; pre-stress; initial polar distance

作者简介:

侯少毅,男,1983年生,硕士研究生,工程师,主要研究方向:真空设备。E-mail: housy@jihualab.com

胡强,男,1979年生,博士研究生,研究员,主要研究方向:半导体装备。E-mail: huqiang@jihualab.com

卫红,男,1970年生,本科,高级工程师,主要研究方向:真空技术与设备。E-mail: weihong@jihualab.com

陈浩,男,1992年生,硕士研究生,工程师,主要研究方向:控制工程。E-mail: chenhao@jihualab.com

(上接第8页)

作者简介:

余剑雄,男,1993年生,硕士研究生,主要研究方向:模式识别、嵌入式系统。E-mail: 1157247727@qq.com

文元美,女,1968年生,副教授,博士,主要研究方向:智能信息处理。E-mail: ym0218@gdut.edu.cn