

局部放电光纤检测的梁支撑膜结构光纤 F-P 传感器设计与仿真

肖 春¹, 张海燕², 张建民¹, 卢建生¹, 杨艳芳¹

(1. 国网山西省电力公司 营销服务中心, 太原 030032; 2. 中北大学 电气与控制工程学院, 太原 030051)

摘要: 为了提高局部放电光纤检测的灵敏性, 提出了一种用于局部放电检测的梁支撑膜结构光纤法布里-珀罗(F-P)传感器的设计方案, 在不同的几何参数下对传感器的响应频率、灵敏度、线性范围及平坦度进行了仿真分析。仿真结果表明: 与圆膜结构的光纤 F-P 传感器相比, 梁支撑膜结构光纤 F-P 传感器不仅显示出较高的灵敏度(在某些情况下灵敏度提高了将近 3 倍)和更宽的频率工作范围, 而且改善了传感器的线性范围和平坦度。

关键词: 光纤传感; 法布里-珀罗干涉仪; 梁支撑膜; 局部放电; 仿真分析

中图分类号: TN256 文献标志码: A 文章编号: 1002-5561(2021)07-0028-05

DOI: 10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2021.07.007

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Design and simulation of optical fiber F-P sensor with beam supported membrane structure for partial discharge fiber detection

XIAO Chun¹, ZHANG Haiyan², ZHANG Jianmin¹, LU Jiansheng¹, YANG Yanfang¹

(1. Marketing Service Center, State Grid Shanxi Electric Power Company, Taiyuan 030032, China;

2. School of Electrical and Control Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, China)

Abstract: In order to improve the sensitivity of optical fiber partial discharge detection, a design scheme of optical fiber Fabry Perot (F-P) sensor with beam supported membrane structure for partial discharge detection is proposed. The response frequency, sensitivity, linear range and flatness of the sensor are simulated and analyzed under different geometric parameters. The simulation results show that, compared with the optical fiber F-P sensor with circular membrane structure, the optical fiber F-P sensor with beam supported membrane structure not only shows higher sensitivity (nearly three times higher sensitivity in some cases) and wider frequency working range, but also improves the linear range and flatness of the sensor.

Key words: optical fiber sensing; Fabry-Perot interferometer; beam supporting membrane; partial discharge; simulation analysis

0 引言

电力变压器内部局部放电容易导致绝缘击穿, 造成人员伤亡和巨大经济损失^[1]。局部放电检测为监测变压器的工作状态和防止潜在的绝缘击穿提供了重要的途径^[2]。

局部放电检测主要包括脉冲电流法、光学检测法

等方法^[3]。其中, 脉冲电流法是一种检测放电电流强度和确定局部放电具体类型的简单方法。然而, 这种方法很难确定局部放电的位置, 不适合用于运行中的变压器^[4], 存在灵敏度低和响应速度慢等缺点。光学检测方法难以检测到非常微弱的光信号, 因此不经常使用^[5]。光纤法布里-珀罗(F-P)传感器具有体积小、重量轻、高频响应、电绝缘和抗电磁干扰噪声等优点, 这些优点使光纤 F-P 传感器满足局部放电检测所需的大多数条件。与此同时, 光纤 F-P 传感器在变压器内部运行可靠, 甚至在变压器内部深处也能够检测到局部放电产生的声信号, 同时安全且易于安装^[6]。然而, 与其它检测方法相比, 该传感器的灵敏度相对较低, 导致微弱局部放电信号不易被检测到^[7]。

本文基于理论分析和有限元数值模拟, 提出并分析一种新型梁支撑膜结构的光纤 F-P 传感器。

收稿日期: 2021-05-15。

基金项目: 山西省应用基础研究计划(No.201701D121162)资助。

作者简介: 肖春(1987—), 女, 汉族, 山西永济人, 硕士, 工程师, 毕业于太原理工大学电气与动力工程学院, 现就职于国网山西省电力公司营销服务中心, 主要研究方向为电力营销技术、电力设备安全监测评估和电力电缆击穿、老化及故障诊断技术等。



1 光纤 F-P 传感器结构与原理

光纤 F-P 传感器由传感器探头、光纤耦合器、光纤激光器和光电探测器组成,传感器探头是由单模光纤端面与聚苯基硫醚(PPS)膜构成的 F-P 腔,如图 1 所示。激光器发出的光通过光纤耦合器和单模光纤到达反射膜结构,光束达到传感探头后被声信号调制,产生的干涉光再通过单模光纤和光纤耦合器传输到光电探测器。当局部放电产生时,产生的声振动引起膜结构的变形,从而导致 F-P 传感器的腔长发生变化,相应地改变由光电探测器接收到的干涉光强。因此,在一定的局部放电电压下,传感膜对光纤传感器的整体性能起着至关重要的作用,例如灵敏度和线性范围等^[8]。本文介绍了 2 种传感膜结构,即圆膜结构和梁支撑膜结构。

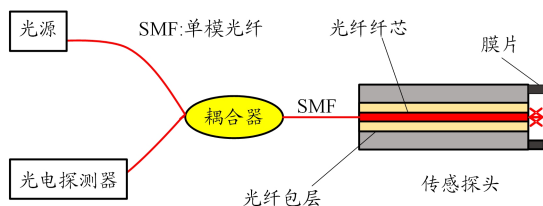


图 1 光纤 F-P 传感器原理图

1.1 圆膜传感探头的机构及原理

传感器的圆膜由厚度为几十微米的单晶硅制成^[7-9],在此结构设计中只涉及 2 个几何参数,即膜厚 h 和半径 R 。圆膜的基频 $f^{[10]}$ 可以表示为:

$$f = \frac{ah}{4\pi R^2} \sqrt{\frac{E}{3\rho(1-\mu^2)}} = \alpha \frac{h}{R^2} \quad (1)$$

其中, a 为振动模式系数, E 、 μ 和 ρ 分别为膜材料的弹性模量、泊松比和密度, α 为等效系数。考虑到变压器中的噪声频率分布和高频超声波在油中的衰减的影响,膜的基频一般选择 70~180 kHz^[1,3,4,7,8,9]。

当施加声压 p 时,膜的中心形变量 $y(p)^{[11]}$ 为:

$$y(p) = \frac{3(1-\mu^2)p}{16Eh^3} R^4 = \beta p \frac{R^4}{h^3} \quad (2)$$

其中, β 是等效系数。 $y(p)$ 越大,响应灵敏度越高。为了获得最大 $y(p)$,在膜的基频 f 已经确定的条件下,由式(1)可知 R 和 h 必须同时增加或减少。但由式(2)可得,当 R 和 h 同时增大或减小时, $y(p)$ 的变化仍然是不确定的。为了解决该问题,将式(1)和式(2)相乘可得:

$$y(p)f = \alpha \frac{h}{R^2} \beta p \frac{R^4}{h^3} = \beta \alpha p \left(\frac{R}{h} \right)^2 \quad (3)$$

由式(3)可知,当膜的基频 f 确定时, R/h 越大,传感器膜的中心形变量 $y(p)$ 将在相同的声压 p 下越大。

为了保持基频恒定,半径变化 ΔR 和厚度变化 Δh 之间的关系可以表示为:

$$\frac{h+\Delta h}{(R+\Delta R)^2} = \frac{h}{R^2} \quad (4)$$

经过变换可得:

$$\frac{R+\Delta R}{h+\Delta h} = \frac{R}{h} \frac{R^2+R\Delta R}{R^2+2R\Delta R+(\Delta R)^2} < \frac{R}{h} \quad (5)$$

由式(5)可知, R/h 随着 ΔR 和 Δh 的增加而逐渐减小,即 R 和 h 越小, R/h 就会越大。因此,当基频确定时,更薄的膜和更小的半径将会引起膜的形变更大。

一般地,由于微加工工艺的限制,圆膜结构的厚度 h 远大于 20 μm ^[7]。为了提高膜的灵敏度,本文将使用微机电加工技术和厚度远小于 20 μm 的绝缘体上硅晶片用于制造膜结构。

1.2 梁支撑膜结构

由于圆膜结构是完全密封的 F-P 腔,传感器工作环境中发生的温度变化会在膜结构的内外表面之间产生不平衡的气压,导致传感器灵敏度的变化。因此,实际应用时需要在圆膜结构的 F-P 腔中钻一个额外的通气孔,以保持压强平衡^[8,11]。为了避免额外钻孔并进一步增加灵敏度,本文提出用梁支撑膜结构代替圆膜结构,2 种膜结构如图 2 所示。梁支撑膜结构有 2 个额外的参数,即支撑梁的长度 L 和宽度 w ,同时梁支撑膜结构可以提供更大的线性范围和更好的抗温度干扰性。

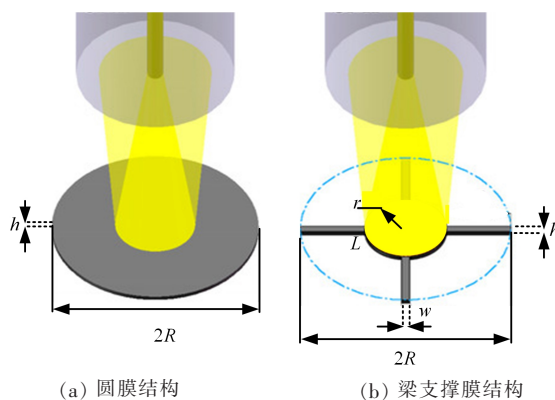


图 2 膜结构示意图

2 仿真实验分析

为了证明这种梁支撑膜结构具有更好的灵敏度和设计灵活性,本文对圆膜结构和梁支撑膜结构进行了比较。

假定相应圆膜结构的基频为 180 kHz 左右,2 种传感结构的膜厚度 h 分别设置为 5 μm 、10 μm 、15 μm 和 20 μm ,根据式(1)可以计算出每种膜厚度 h 下的梁支撑膜的半径 R 。对于相同半径 R 的梁支撑膜结构,当确定了支撑梁的长度 L 时,中心膜的半径 r 就变成已知。此外,设计的支撑梁的宽度 w 具有最大值为 $\sqrt{2}r$ 。2 种膜结构都是由单晶硅制成的,膜结构周边被固定,分别对圆膜结构和梁支撑膜结构进行网格划分,最小边长约为 1.25 μm 。

2.1 传感器的基频

较高的基频可以保证传感器的鲁棒性,因此,本文在圆膜结构基频为 180 kHz 时与梁支撑膜进行了仿真对比。仿真结果表明:当长度 L 减小时,可以观察到梁支撑膜基频略微增加,宽度 w 对基频的影响较大;梁支撑膜结构实现的基频覆盖了 70~150 kHz 的范围,比圆膜结构具有更灵活的设计性和更大的应用潜力。

2.2 传感器的灵敏度

2 种膜结构的灵敏度 $S^{[1]}$ 定义为:

$$S = \frac{y(p)}{p} \quad (6)$$

其中,声压 p 的幅度由局部放电的量级及其距传感器

的距离和位置决定。对于圆膜结构,通过有限元分析计算并确定其灵敏度;对于梁支撑膜结构,建立了有限元模型并推导出支撑梁的长度 L 和宽度 w 不同情况时传感器的灵敏度。为了模拟由局部放电引起的膜形变量,2 种结构都被施加了从 1 Pa~10 kPa 范围的声压^[2],然后记录膜中心位移量,通过计算压力-位移量的斜率推导出灵敏度 S 。

2 种膜结构的灵敏度如图 3 所示。可以看出,所有的梁支撑膜结构都比相应的圆膜结构具有更高的灵敏度。在某些情况下,灵敏度几乎增加了 4 倍;当宽度 w 小于 100 μm 时,宽度越窄灵敏度就越大,而长度 L 对灵敏度的影响较小。随着膜厚度 h 的增加,2 种膜的灵敏度都显著下降,这与 1.1 节中对圆膜结构的理论分析一致。因此,在传感器的制造过程中应该很好地控制膜结构的厚度。

2.3 传感器的线性范围

从实际应用来看,膜较大的形变线性范围有利于局部放电检测的实用性。通过在不同声压下的模拟,圆膜和梁支撑膜结构的膜形变情况如图 4 所示。当找到斜率变化点时,梁支撑膜和圆膜结构的形变线性范围可以通过最大线性位移除以膜厚度得到。从图 4 可

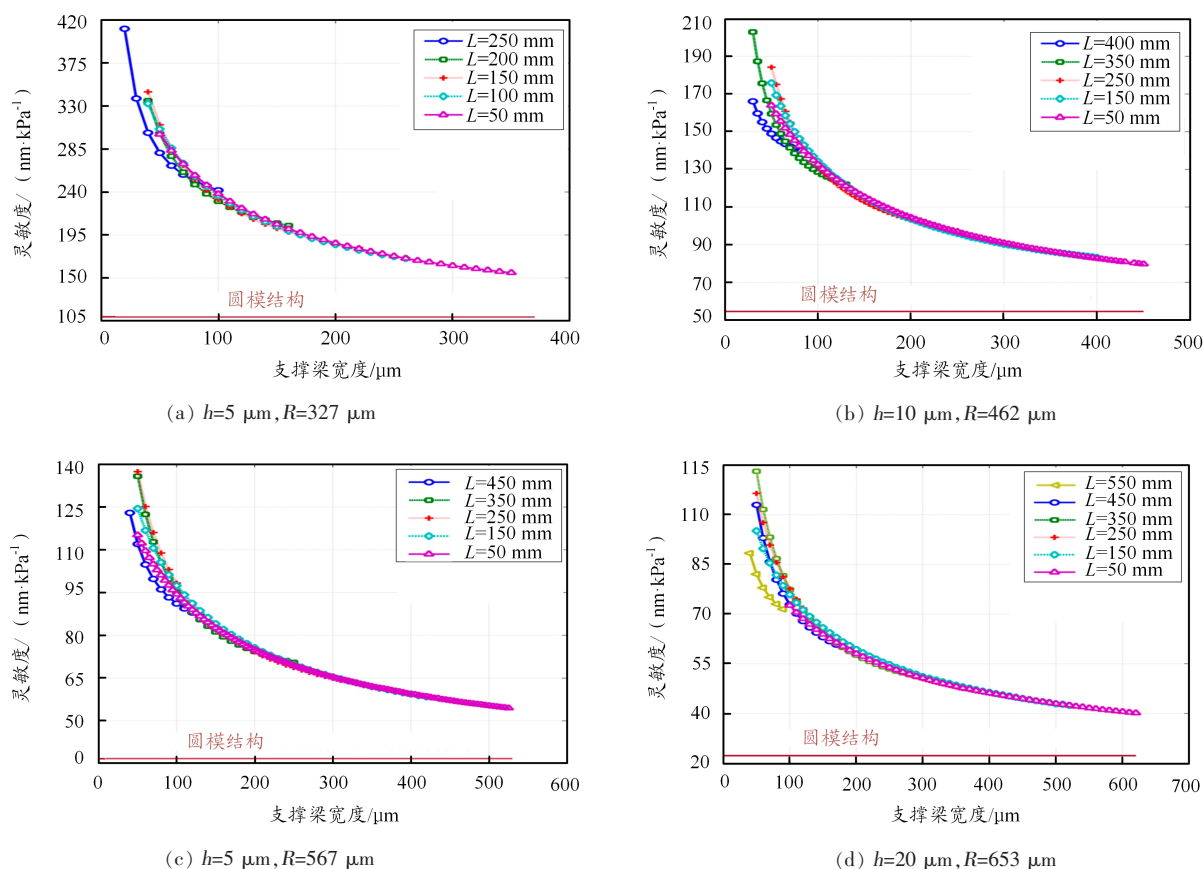


图 3 不同几何尺寸梁支撑膜结构与圆膜结构的传感器灵敏度

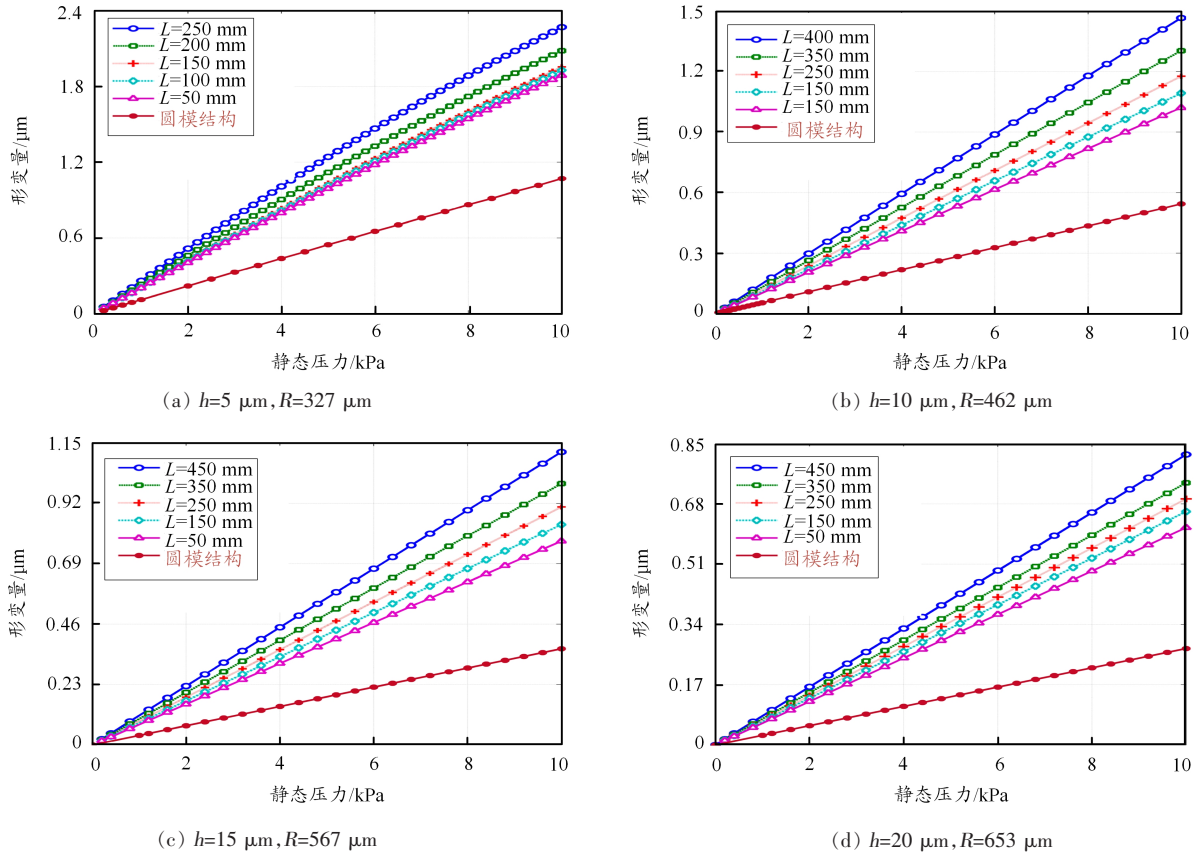


图4 一定声压下不同几何尺寸的梁支撑膜结构和圆膜结构的线性响应

以看出,在一定的声压下,梁支撑膜结构呈现出较大的变形;在本文的所有实验情况下,梁支撑膜结构比圆膜结构具有更大的线性范围。

2.4 传感膜的平坦度

局部放电声压引起传感膜的形变可能导致膜表面的不平整,从而使 F-P 腔长不一致。为了获得更高的信噪比和反射光强,传感膜中心反射区的平整度至关重要。图 5 为光纤与膜端面之间的 F-P 腔示意图。角度 θ 表示膜反射区的形变程度,较小的 θ 可以保证能够反射足够光强和具有高的 F-P 腔反射率。单模光纤的纤芯直径为 $9\ \mu\text{m}$,在垂直入射情况下,允许的最大 $\theta_{\max}$ 表示为:

$$\theta_{\max} = \frac{1}{2} \arctan \frac{4.5-x}{d} \quad (7)$$

其中, d 为腔长, x 表示当光纤出射的光能够重新进入单模光纤时到纤芯中间的距离。如果 $x=4.3\ \mu\text{m}$, $d=30\ \mu\text{m}$, $\theta_{\max}$ 应小于 0.19° ,以确保 95% 的反射光重新进入单模光纤。

为了研究不同几何参数下的圆膜和梁支撑膜结构的平坦度,本文在线性弹性范围内进行了有限元分析,结果如图 6 所示。可以看出,大多数梁支撑膜结构

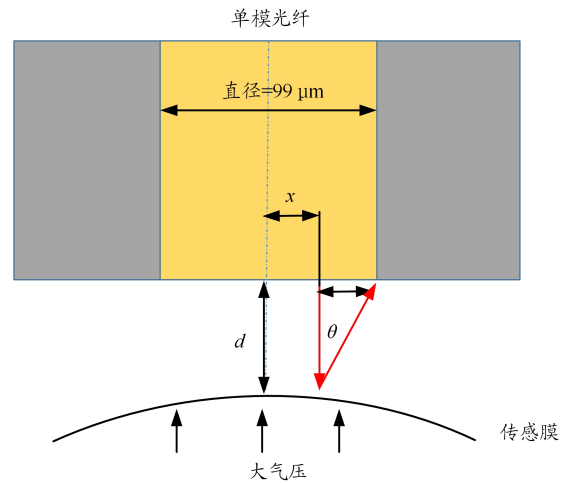


图5 光纤与膜端面之间的 F-P 腔示意图

比圆膜结构具有更好的平坦度。虽然计算出的角度存在一定的波动(可能是由于制作工艺引起的误差导致),但可以明显观察到所有曲线的主要趋势。当宽度 w 减小,长度 L 增大时,薄膜的变形角 θ 减小,实现了较好的平坦度。因此,梁支撑膜结构可以抑制膜的不平整,提高单模光纤的接收光强,并提供比圆膜结构更高的信噪比。

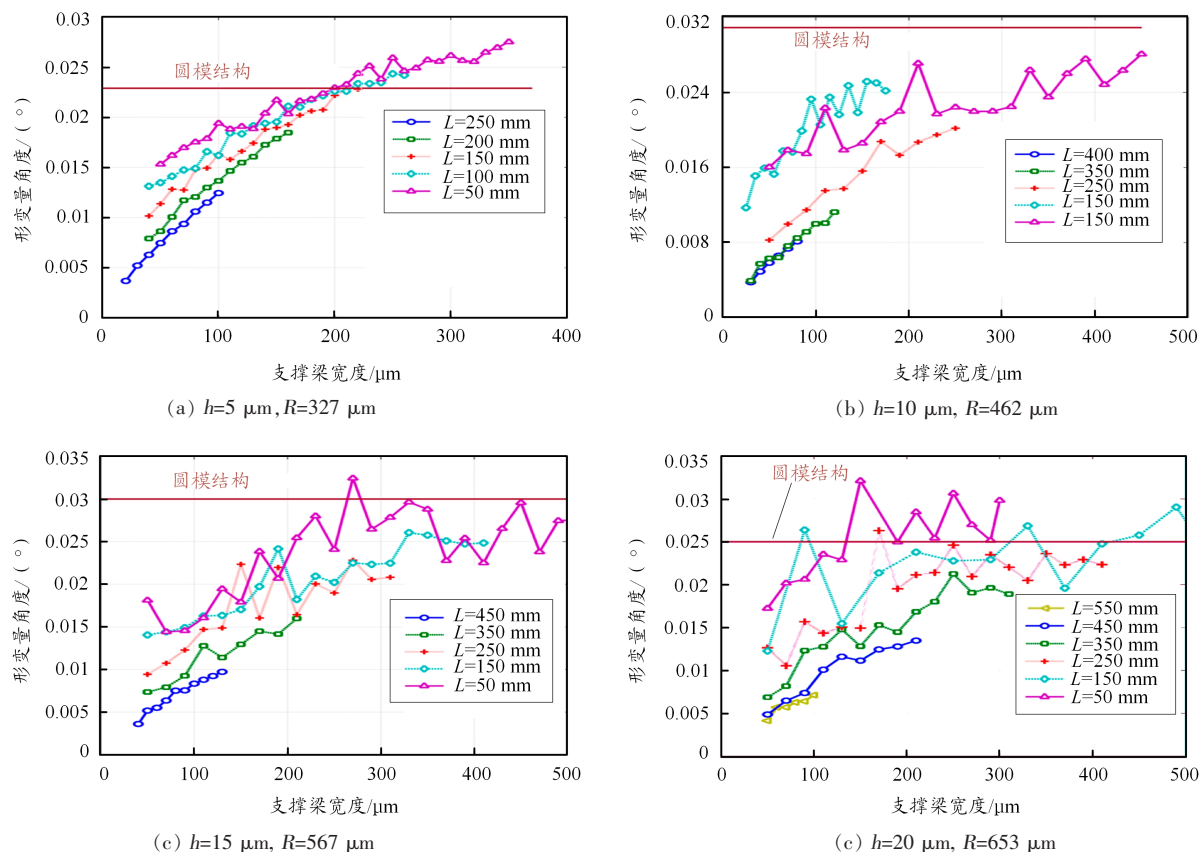


图 6 不同几何尺寸的梁支撑膜结构的平坦度

3 结束语

本文提出了一种性能更好、抗温度变化能力更强的新型光纤 F-P 传感器梁支撑膜结构的设计方案,对其固有频率、传感器的灵敏度和线性范围等性能进行了详细仿真研究,并与圆膜结构进行了比较。结果表明:梁支撑膜结构提供了额外的几何参数,当整个结构尺寸和膜厚度保持不变时,覆盖了可能用于实际应用的更宽的频率范围,这表明设计灵活性显著增强。此外,在一定的局部放电声压下,梁支撑膜结构不仅将响应灵敏度提高到圆膜结构的 4 倍,而且还提高了膜形变量的线性范围及膜平坦度。本文的研究工作对光纤 F-P 传感器的设计有着极大的参考作用,该系统能够监测电力变压器局部放电活动的微弱信号和其它声学信号。

参考文献:

- [1] 杨景刚,张珂,陈武,等. 大功率中频变压器研究综述[J]. 电源学报, 2020, 18(1): 4-17.
- [2] WANG Y, GONG S, GRZYBOWSKI S. Reliability evaluation method for oil-paper insulation in power transformers [J]. Energies, 2011, 4 (9): 1362-1375.
- [3] 郭少朋,韩立,徐鲁宁,等. 光纤传感器在局部放电检测中的研究进

展综述[J]. 电工电能新技术, 2016, 35(3): 47-53.

- [4] YI H, TAO J, XU H. Research progress on F-P interference-based fiber-optic sensors [J]. Sensors, 2016, 16(9): 14-24.
- [5] LUNDGAARD L E. Partial discharge-XIII: acoustic partial discharge detection-fundamental considerations[J]. IEEE Electrical Insulation Magazine, 1992, 8(4): 25-31.
- [6] 王文华. 基于膜片形变的非本征法布里-珀罗干涉光纤低压传感器的研究[D]. 大连:大连理工大学, 2016.
- [7] 赵付,刘径舟. 两路微振动信号的光纤 F-P 腔干涉测量[J]. 激光与红外, 2021, 51(3): 353-357.
- [8] LI X, SHAO Y, YUAN Y, et al. A highly sensitive fiber-optic Fabry-Perot interferometer based on internal reflection mirrors for refractive index measurement [J]. Sensors, 2016, 16(6): 794-902.
- [9] 符浩. F-P 声压传感器的 PGC 解调及复用技术研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2018.
- [10] DI G. Flat and corrugated diaphragm design handbook [J]. Mechanical Engineering New York Basel Marcel Dekker, 1982, 2(8): 93-94.
- [11] WANG W, YU Q, JIANG X. High sensitivity diaphragm-based extrinsic Fabry-Perot interferometric optical fiber underwater ultrasonic sensor[J]. Optoelectronics and Advanced Materials-rapid Communications, 2012, 6(7): 697-702.
- [12] POSADA-ROMAN J, GARCIA-SOUTO J A, RUBIO-SERRANO J. Fiber optic sensor for acoustic detection of partial discharges in oil-paper insulated electrical systems [J]. Sensors, 2012, 12(4): 4793-4802.