



法-珀型航空气压传感器设计 与制备虚拟仿真实验指 导书

(修订第三版)

南京航空航天大学
自动化学院 测试工程系
二〇二三年十二月



南京航空航天大学
NANJING UNIVERSITY OF AERONAUTICS AND ASTRONAUTICS

自动化学院

目 录

目 录	I
第一章 法-珀型航空气压传感器设计与制备虚拟仿真实验	2
1.1 实验目的	2
1.2 实验仪器及设备	2
1.3 实验原理	2
1.3.1 法布里-珀罗干涉仪基本原理	2
1.3.2 光纤法-珀气压传感器原理	4
1.4 实验步骤	4
1.5 实验数据处理	6
1.6 实验报告要求	8

第一章 法-珀型航空气压传感器设计与制备虚拟仿真实验

1.1 实验目的

- 1、掌握法-珀干涉原理及压力测量原理，在此基础上完成法-珀式光纤压力传感器的结构设计；
- 2、掌握法-珀干涉信号解调的原理，能够根据具体要求选择并构建合适的解调系统；
- 3、掌握传感器标定及校准方法，通过静态特性实验分析传感器灵敏度、线性度、重复性等性能指标；
- 4、了解仪器仪表及传感器技术在航空航天、智能制造等领域的重要作用，进一步分析传感器的性能优化需求及解决方案。

1.2 实验仪器及设备

- 1、虚拟仿真实验软件 1 套。

1.3 实验原理

1.3.1 法布里-珀罗干涉仪基本原理

光纤法-珀压力传感器通过光学法布里-珀罗干涉仪进行信号检测，法布里-珀罗干涉仪由两块镀有高反射率薄膜的光学平行板构成，如图 4.1 所示。光纤法布里-珀罗传感器的 F-P 谐振腔中会发生多光束干涉现象，光束入射到腔体后，在两个平行面中进行多次反射。其中入射光与透射光保持平行关系，且光程差恒定，形成光学谐振。反射时会有部分光束透射过两块玻璃板，同时每束透射光束的相位差一致。

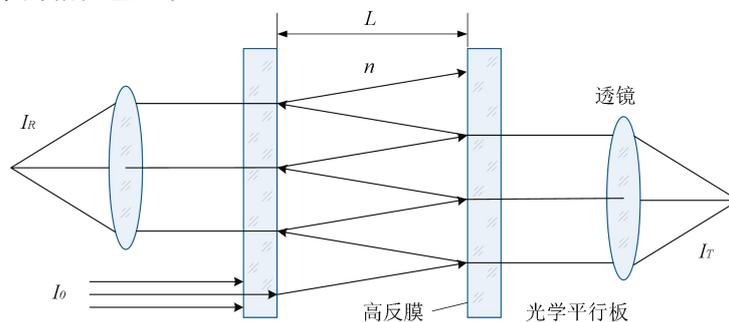


图 1.1 法布里-珀罗多光束干涉模型

利用数学模型对法布里-珀罗谐振腔进行分析。设两光学平行平板两端的反射率分别为 R_1 和 R_2 。由于散射等光的损耗较小，因此可以忽略不计。光程相位差为：

$$\varphi = \frac{4\pi nL}{\lambda} \quad (1.1)$$

式中两光学平行板之间的折射率为 n ，入射光波长为 λ ，两光学平行板之间的距离为 L 。

法布里-珀罗谐振腔的反射率及透射率可以表示为：

$$R_{\text{FP}} = \frac{R_1 + R_2 + 2\sqrt{R_1 R_2} \cos \varphi}{1 + R_1 R_2 + 2\sqrt{R_1 R_2} \cos \varphi} \quad (1.2)$$

$$T_{\text{FP}} = \frac{T_1 T_2}{1 + R_1 + R_2 + 2\sqrt{R_1 R_2} \cos \varphi} \quad (1.3)$$

式中 R_{FP} 是反射光强与入射光强的比值， T_{FP} 是透射光强与入射光强的比值。

光纤法布里-珀罗传感器的两端的光纤为光密介质，中间空隙部分的空气为光疏介质，因此光束从光纤端面反射至空气隙时会产生相位偏移 $\pi/2$ ，即半波损失。假设两光学平行板的反射率相同，均为 R ，根据多光束反射原理，可以得到反射光强及透射光强为：

$$I_{\text{R}} = \frac{2R \left(1 - \cos \frac{4\pi nL}{\lambda} \right)}{1 + R^2 - 2R \cos \frac{4\pi nL}{\lambda}} I_i \quad (1.4)$$

$$I_{\text{T}} = \frac{(1 - R)^2}{1 + R^2 - 2R \cos \frac{4\pi nL}{\lambda}} I_i \quad (1.5)$$

若反射率 $R \approx 1$ ，根据式(4.3)可得：满足 $\cos \varphi = -1$ 或 $\varphi = (2m + 1)\pi, m \in Z$ 条件时， T_{FP} 为最大值。又因为 $\cos \varphi$ 的周期为 2π ，因此 T_{FP} 的周期也为 2π 。设参数 Δ 为：

$$\Delta = \varphi - (2m + 1)\pi \quad (1.6)$$

T_{FP} 为最大值时可以得到：

$$\cos \varphi \approx -\left(1 + \Delta^2 / 2\right), \Delta \ll 1 \quad (1.7)$$

当两光学平行板的反射系数趋近于 1 时，可以得到：

$$T_{\text{FP}} = \frac{T^2}{(1 - R)^2 + R\Delta^2} \quad (1.8)$$

式中 $R = R_1 = R_2, T = 1 - R$ 。当 $\Delta = 0$ 时，法布里-珀罗谐振腔的透射率最高。

当有相关物理量作用于法布里-珀罗谐振腔时，腔长会发生改变，通过干涉光谱波峰的波长变化进行解调，就可以获取需要测量的物理量。

当反射率 $R \ll 1$ ，设两光学平行板反射率一致，即 $R = R_1 = R_2$ 。对式(1.4)进行化简：

$$I_{\text{R}} = 2R \left(1 - \cos \frac{4\pi L}{\lambda} \right) I_i \quad (1.9)$$

因此可以得出, 当入射光强 I_i 不变时, 法布里-珀罗腔长 L 以及波长 λ 决定了出射光强 I_R 的大小, 即 $I_R = f(L, \lambda)$ 。

1.3.2 光纤法-珀气压传感器原理

由公式可以看出, 光学干涉信号是法布里珀罗干涉仪腔体长度 L 的函数。当干涉仪用作气压传感时, 所测得的物理量均需改变腔体长度, 而腔体长度可以根据干涉信号的特征 (例如相位, 能量和频率) 计算得出。

如图所示, 使用如毛细玻璃管等器件连接入射光纤与反射光纤, 便可形成横膈膜式光纤法布里珀罗干涉仪压强传感器。

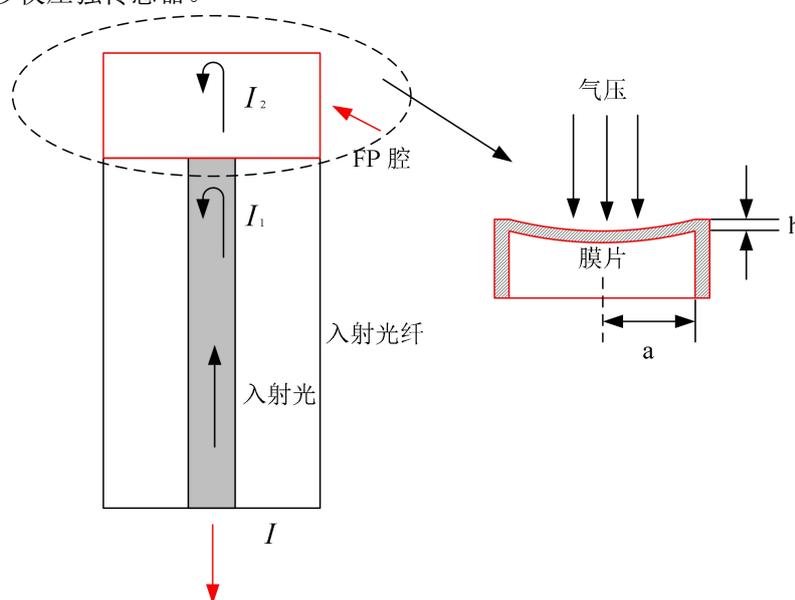


图 4.2 横膈膜式光纤法布里珀罗干涉仪压强传感器结构

压强灵敏度(S)定义为横膈膜的中心挠度与加载压强的比值, 其公式为

$$S = \frac{3(1-\mu^2)a^4}{16Eh^3} (\mu\text{m} / \text{Pa}) \quad (1.10)$$

其中 a 和 h 分别为横膈膜的半径与厚度, 单位是 μm 。 E 和 μ 分别为横膈膜材料的杨氏模量与泊松比。当挠度不低于横膈膜厚度的 30% 时 ($S_{c,\text{max}} < 0.3h$), 上述方程仅在横膈膜挠度的线性区域有效。可以得出横膈膜的压强灵敏度与最大极限压强与该膜的材料、厚度和半径密切相关。增大横膈膜的半径并减少其厚度, 可以增加压强灵敏度。反之, 增加横膈膜的厚度并减少其半径会增加极限压强值。

1.4 实验步骤

本虚拟仿真实验围绕“光纤法-珀压力传感器”这一主题, 设计了 4 个递进的实验环节。

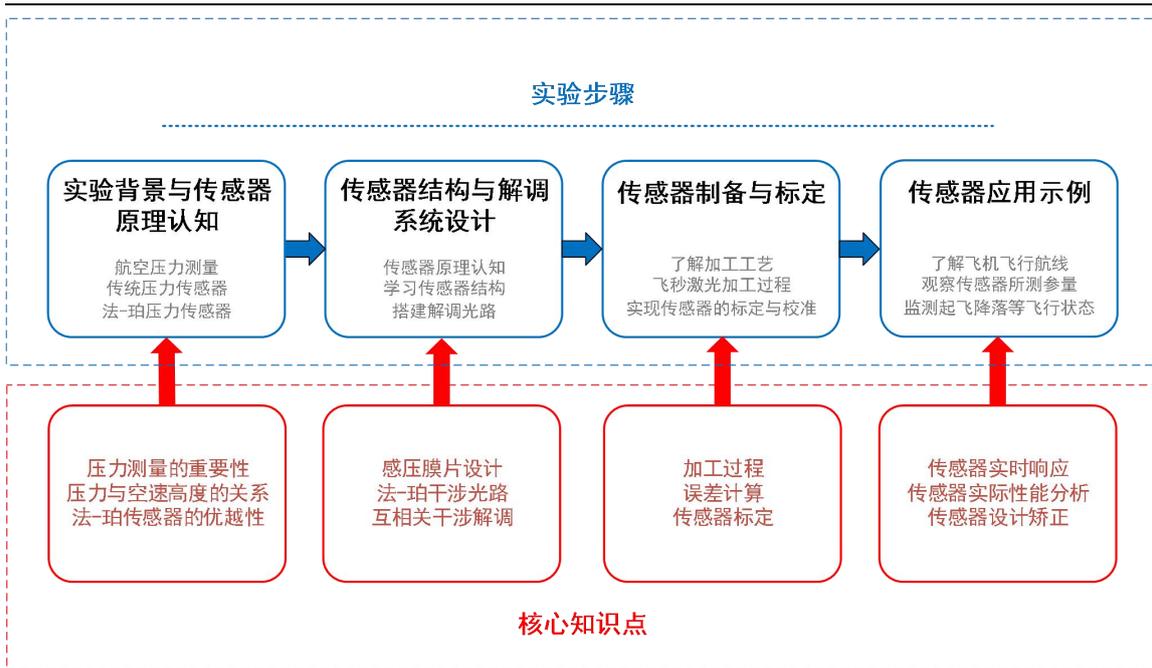


图 1.3 实验步骤图

1、实验背景与传感器原理认知环节。进入应用场景认知界面，点击不同的法珀传感器应用案例，认识法珀航空压力传感器的优越性能。然后在传感器结构原理认知界面中了解法珀干涉的概念，在此基础上实现法珀干涉基本光路的搭建，并学习光纤法珀传感器的压力传感机理。最后通过数理模型仿真的方式展现传感器关键参数对系统性能的影响。

2、传感器结构与解调系统设计环节。首先选择高度或速度作为测量目标并合理安排传感器放置部位，接着根据该目标下传感器所需的量程范围指标来计算并设置传感器结构参数，完成对敏感结构的设计。进入解调技术研究界面，学生需要学习光纤法珀传感器各种解调技术的原理、优缺点及应用条件，然后在解调系统元件库中拖动元件来搭建解调系统基本框架，学生共需搭建四种解调系统。

3、传感器制备与标定环节。在传感器加工界面，首先通过交互学习了解飞秒激光加工的工艺和优越性，同时要求对工艺流程进行排序，从而掌握飞秒激光加工的工艺流程。然后依次进入相应环节，在准备工作中正确固定光纤，在加工过程中完成三自由度精密平台的运行参数设置，在清理过程中对器件端面进行清洗，在膜片加工中正确设置膜片材料参数与尺寸并对其进行镀膜、切割和清洗，在静态压力测试环节掌握传感器的标定和校准方法，根据三组实验数据分别计算传感器灵敏度、重复性误差、回滞误差和标定，从而验证传感器性能。该环节通过实验教学的方式对飞秒激光加工的全工艺流程进行再现，并通过静态压力测试实验的方法验证传感器性能，使学生沉浸式地体会飞秒激光加工过程和传感器校准的重要性，并在实验过程中培养学生良好的操作规范。

4、传感器应用实例环节。通过互动学习的方法完成传感器的虚拟应用验证，将标定完成的

传感器安装至飞行器内，生成飞机飞行全过程的虚拟参数数据和传感器测量数据，利用测量值和理论值的差异对传感器的性能进行评价。最终针对本次设计形成完整的实验方案和优化意见。

1.5 实验数据处理

表 1.1 法-珀气压传感器标定实验数据记录表

测压点	气压值设置 (kPa)	稳定时间	第 1 次		第 2 次		第 3 次	
			传感器示值 (kPa)		传感器示值 (kPa)		传感器示值 (kPa)	
			正行程	反行程	正行程	反行程	正行程	反行程
1								
2								
3								
4								
5								
6								

表 1.2 法-珀气压传感器标定实验数据处理表

测压点	气压值设置 (kPa)	传感器示值 (kPa)			传感器测量误差 (kPa)		
		正行程平 均值	反行程平 均值	正反行程 平均值	绝对 误差	迟滞 误差	标准 偏差
1							
2							
3							
4							
5							
6							
灵敏度							
最大迟滞误差							
最大重复性误差							
标定							

1.6 实验报告要求

- 1、使用南航实验报告纸，手写，页数不够可以附南航稿纸（和实验报告纸固定好）。
- 2、填写 1.1 中的标定实验数据，完成表 1.2 中对传感器灵敏度、最大迟滞误差、最大重复性误差和静态精度性能指标的计算（请给出具体的计算过程）。
- 3、回答问题：
 - （1）法布里-珀罗干涉仪相较于其他干涉仪的特点，以及应用该特点在传感中会有哪些优势？
 - （2）光电探测器在几种解调方式中的作用有什么区别？
 - （3）飞秒激光加工的主要流程和特点有哪些？
 - （4）光纤法-珀压力传感器需要温度补偿吗，为什么？