

临近空间超低气压原位感知系统

袁杰, 韩立静, 毛雯婧, 郑金雄, 屈天驰, 胡纯*

(北京理工大学, 北京 100081)

摘要: 临近空间飞行器的气动外形、轨道设计等严重依赖于临近空间气压参数。目前临近空间气压探测一般利用高度、温度测量值, 采用反算公式来获得不同高度上的气压值, 这种方法误差范围较大、准确度较差。因此, 本文提出了一种临近空间超低气压原位感知系统, 采用皮拉尼真空传感器直接气压探测。基于 MEMS 加工材料、测量范围和灵敏度等因素, 对皮拉尼真空传感器进行了尺寸参数的设计, 并对其进行了理论研究和仿真分析。通过对比皮拉尼真空传感器的理论数值计算与仿真模型数据, 发现实时电阻随气压的变化具有高度一致性, 且该传感器在 1Pa~1000Pa 的气压范围内表现出良好的敏感特性, 其精度值可达 9.25%。

关键词: 超低量程;皮拉尼真空传感器;散热模型

Theoretical and Simulation Analysis of Ultra-Low Range Pirani Vacuum Gauge

Jie Yuan, Lijing Han, Wenjing Mao, Jinxiong Zheng, Tianchi Qu, Chun Hu*

(Beijing Institute of Technology)

Abstract: The aerodynamic configuration and orbit design of near space vehicles depend heavily on the atmospheric pressure parameters in near space. At present, the atmospheric pressure in the adjacent space is generally measured by height and temperature, and the atmospheric pressure at different heights is obtained by inverse calculation formula. This method has a large error range and poor accuracy. Therefore, this paper proposes an in-situ sensing system of ultra-low atmospheric pressure in the adjacent space, which uses a Pirani vacuum sensor to detect the direct atmospheric pressure. Based on the MEMS processing materials, measurement range and sensitivity, the dimensional parameters of the Pirani vacuum sensor are designed, and the theoretical research and simulation analysis are carried out. By comparing the theoretical numerical calculation and simulation model data of Pirani vacuum sensor, it is found that the real-time resistance is highly consistent with the change of air pressure, and the sensor shows good

sensitivity in the air pressure range of 1 Pa~1000 Pa, with an accuracy of 9.25%.

Keywords: Ultra-low range; Pirani vacuum Gauge; Heat dissipation model

1 传感器设计背景和应用价值

1.1 设计背景

随着科技的发展,人类对空间环境的探测需求日益迫切。能够设计留空时间长、视距范围大、抗干扰能力强且能够测量高精度大气环境参数的临近空间飞行器日益重要。临近空间飞行器的气动外形、轨道设计等严重依赖于临近空间气压参数。目前,在 20km 以上高度的大气参数探测中,常采用气压火箭探空系统。对于气压测量,常用的气压传感器受量程限制,无法满足火箭探空对于高空气压测量的需求^[1-2]。因而,在 20km 以上高空,一般利用高度、温度测量值,采用反算公式来获得不同高度上的气压值。对于采用雷达定位技术体制的探空系统,受高空大风、不同天气状况和不同温湿层结状况的影响,雷达测高反算气压的误差范围较大、准确度较差,无法满足高空气象探测标准规范和工程应用的要求。因此,本文提出了一种临近空间超低气压原位感知系统,采用皮拉尼真空传感器直接气压探测,其具备精度高、结构简单、环境适应性强等优点,从而实现临近空间气压高精度探测^[3-6]。

1.2 应用价值

本文所设计的临近空间超低气压原位感知系统突破了临近空间低温、高速、大过载、强干扰极端环境下超低气压原位探测的技术瓶颈,其为临近空间的军事应用提供了重要基础,还可广泛应用于电子、航空航天、化工等领域^[7]。例如其可应用于气象火箭中,气象火箭是了解空间环境的有效工具和良好载体,其所获得的高空资料数据可以用于气候变化和天气预报的研究^[8-9]。

2 创新点与优势

本文所设计的皮拉尼真空传感器使用光敏聚酰亚胺(PSPI)作为悬浮平板材料以减少导热,并且具有一定的抗过载能力。此外,通过对其 PSPI 材料进行刻蚀处理,设计了隔热槽以降低固体导热在整个系统散热中的比重。从而实现了 1-1000Pa 的超宽量程的气压测量,其精度可达到 9.25%。

3 实现方案简介

3.1 设计原理

皮拉尼真空传感器是利用通过低气压下气体对流散热与压强的对应关系来进行的气压测量。传感器的发热电阻产生的热量会以固体基底导热、气体对流散热和气体热辐射的形式对外进行热交换，但压强仅影响气体对流散热。因此为提高热敏电阻对周围压强变化的感知能力，就必须减少另外两种形式的热扩散。

3.2 设计方法

皮拉尼真空传感器属于热传导性传感器，本文所设计的皮拉尼真空传感器主要由三部分组成：基底层、悬浮平板和发热电阻层。如图 1 所示，其中发热电阻附着在悬浮平板上。

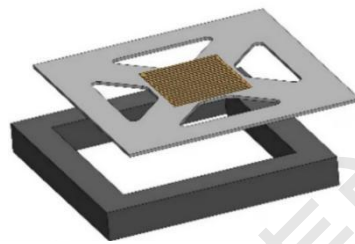


图 1 皮拉尼真空传感器结构示意图

3.2.1 电阻层

由于金 (Au) 具有较小的电阻率，在相同的形状时，金所铺设的电阻相对其他几种常规金属要小，在相同的阻值下，使用金可以铺设较长的电阻以尽量铺满悬浮平板，且可以保证电阻值不会太大导致失效。因此本文选用金属金 (Au) 作为加热电阻丝材料。

根据皮拉尼真空计的原理，如图 2 所示为在初始电阻分别为 $1000\Omega\sim 1200\Omega$ 时实时电阻和实时温度随电压的变化曲线。

在设计皮拉尼真空传感器电阻层时，需要考虑两方面的问题，一方面是保证真空传感器的灵敏度，另一方面需要防止悬浮平板上的温度过高导致热应力过大。最后综合考虑之后选择的阻值为 1100Ω 。其最高温度为 390K 左右。

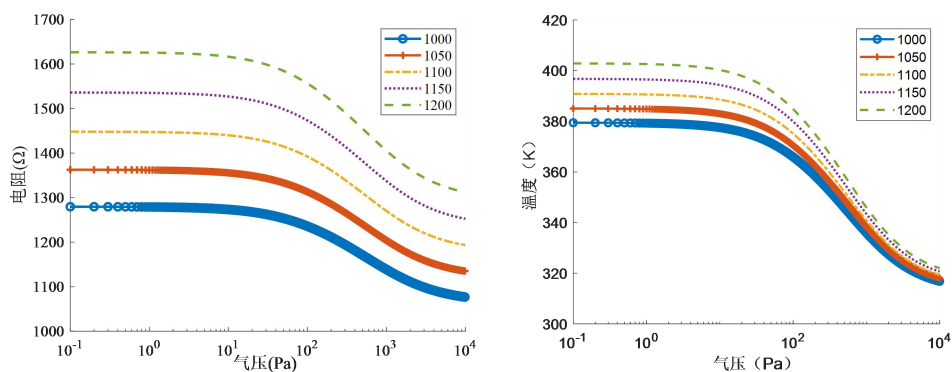


图 2 不同初始电阻 (1000Ω~1200Ω) 实时电阻及实时温度随气压的变化曲线

所设计的电阻丝之间的间隙为 10μm，具体的铺设思路如图 3 所示。

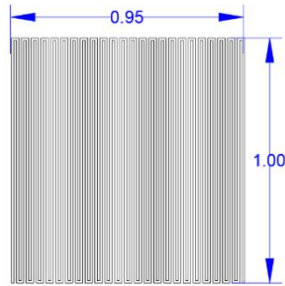


图 3 电阻层铺设图 (单位 mm)

3.2.2 悬浮平板

新型材料有机聚合物光敏聚酰亚胺 (PSPI) 具有导热系数较低与工艺易实现等优点。同时其涂层固化后力学性能、耐热性与耐药性优良，基材附着力强，具有极高的应用可靠性。因此悬浮平板的选材选择 PSPI 材料。

有原理可知悬浮平板的面积大小会影响气体散热的大小。因此可以通过设计 PSPI 层的薄膜面积 A_s 的大小来提高气体散热在总散热中的比重。

如图 4 所示为 A_s 的大小为 4mm×4mm—8mm×8mm 情况下电阻与气压之间的曲线图。

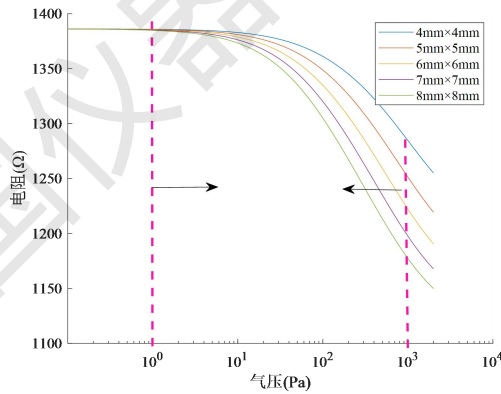


图 4 不同的 PSPI 薄膜面积时电阻随压强的变化曲线

由图 4 可知随着 A_s 的增大器件灵敏度越来越大。本文主要制作的为 MEMS 器件，因此面积不可过大。综合考虑，本文选择 PSPI 薄膜层面积为 6mm×6mm。

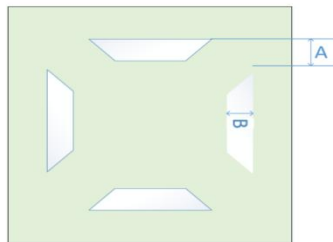


图 5 微热板悬浮平板的参数示意图

为了延长皮拉尼真空传感器使用寿命，本文针对 PSPI 层进行热应力仿真。通过研究调查，PSPI 材料的最大受力在 200MPa^[8]。

假设热应力与 PSPI 层的梁宽（与参数 A 相关），隔热槽的宽度即（参数 B ）有关，如图 5 所示。

首先对梁宽进行仿真分析的结果如图 6 所示：

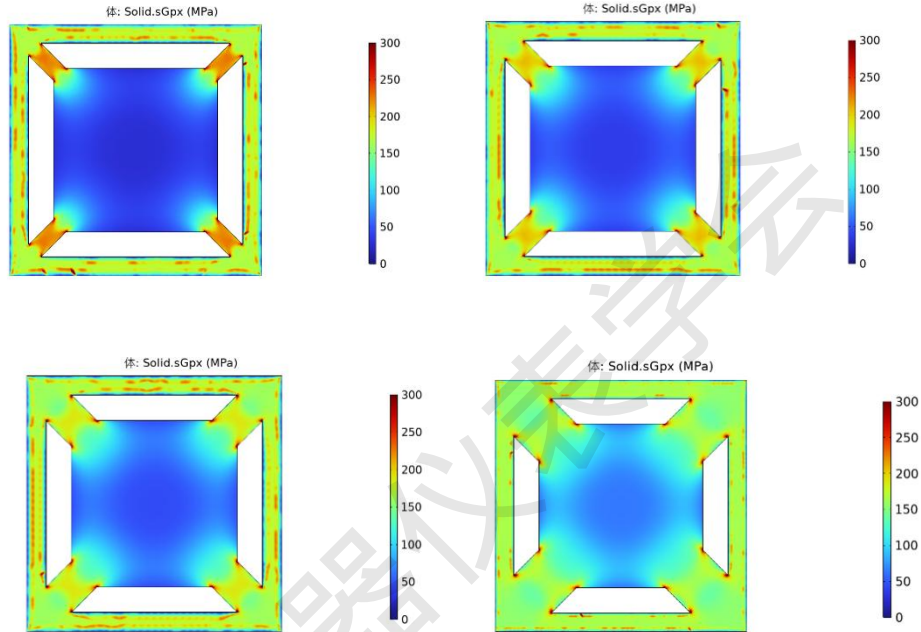


图 6 由上至下分别为梁宽为 212 μm 、282 μm 、354 μm 和 424 μm 的热应力仿真图形

从上图中可以看出，梁宽对于热应力的影响较大。对隔热槽宽度进行仿真分析的结果如图 7 所示：

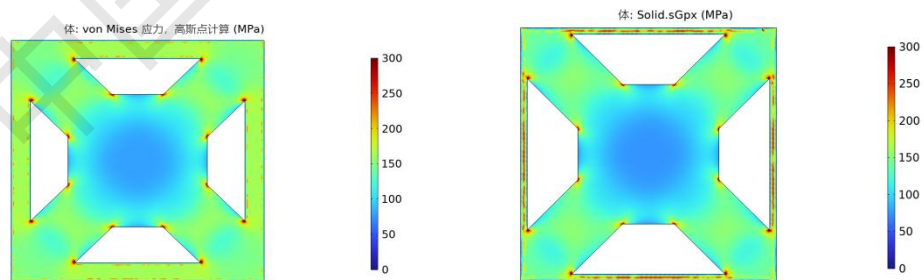


图 7 当隔热槽宽度分别为 300 μm 和 400 μm 时的热应力仿真结果

隔热槽宽度对于悬臂梁上的热应力有一定的影响，但是影响较小。

在隔热槽尽量大且热应力能够满足 200MPa 以下尽量小的条件下。最后选择梁宽为 424 μm 、隔热槽宽度为 400 μm 。

在进行仿真时发现在 PSPI 层隔热槽拐点处的热应力远远大于周围热应力值的大小。因此对其进行倒角处理，以缓冲拐角处热应力值的大小。

如图 8 为进行倒角处理之后的热应力比较图:

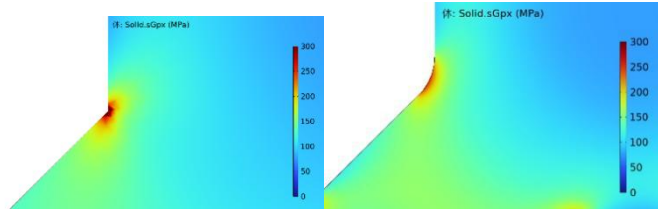


图 8 进行倒角处理后的 PSPi 层的热应力细比较图

如图 9 所示为皮拉尼真空传感器的最终尺寸图。

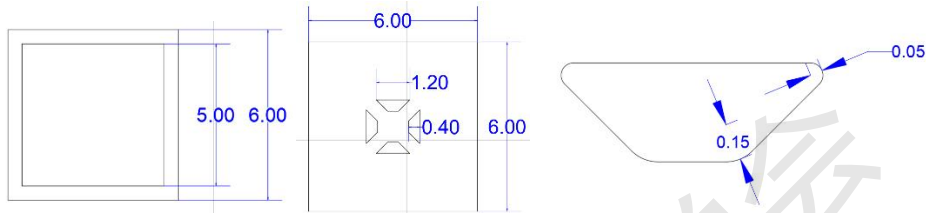


图 9 皮拉尼真空传感器设计尺寸图

(由左至右由上至下分别为硅基底、PSPi 层薄膜、隔热槽倒角尺寸)

3.3 数值模拟验证过程

3.3.1 灵敏度分析

为了计算其不同范围内的灵敏度，因此将其划分为四个区域，如图 10（左）所示。则称可测范围的下限为拟合直线 LL 和直 LH 的交接点，可测范围的上限为拟合直线 HH 和 HL 的交界点。LL 区域灵敏度大小为 $3.1\Omega/\log(P)$ ，LH 区域灵敏度大小为 $84.12\Omega/\log(P)$ ，HH 区域其灵敏度大小为 $120.89\Omega/\log(P)$ ，HL 区域的灵敏度大小为 $18.66\Omega/\log(P)$ 。由于低压区域内范围较小，认为只要其灵敏度达到 $4\Omega/\log(P)$ 即可达到既定范围，观察图 3-3 可知在 $10^{-1}\sim 10^0\text{Pa}$ 范围内，其变化非常缓慢，而在其后变化较大一些，因此需要将 LL 区域进行二次划分，这里命名为 LLL 和 LLH 区域，如图 10（右）所示：

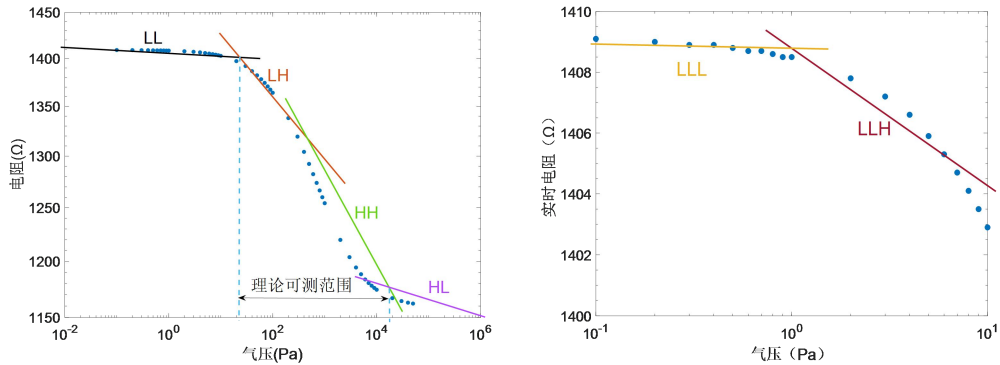


图 10 皮拉尼真空传感器可测范围区域划分示意图

LLL 区域的灵敏度范围为 $0.50\Omega/\log(P)$ ，LLH 的灵敏度范围为 $4.75\Omega/\log(P)$ 。对于高压来说，因为单位 $\log(P)$ 的变化范围较大，因此规定其灵敏度范围至少为 $50\Omega/\log(P)$ 以上才可测。综上所述，此皮拉尼真空传感器的测量范围为 $0.93\text{Pa}\sim 4978\text{Pa}$ 。

3.3.2 精度分析

本文主要针对 $1\sim 1000\text{Pa}$ 的压强范围进行研究。当 A_s 、参数 A 、参数 B 以及电阻测量同时出现误差并都为最大误差时，总误差最大，假设 A_s 的误差为 -1.5% ，参数 B 的误差为 1.5% ，参数 A 的误差为 -1% ，电阻误差为 2Ω 为 $1\sim 1000\text{Pa}$ 如图 11 所示。

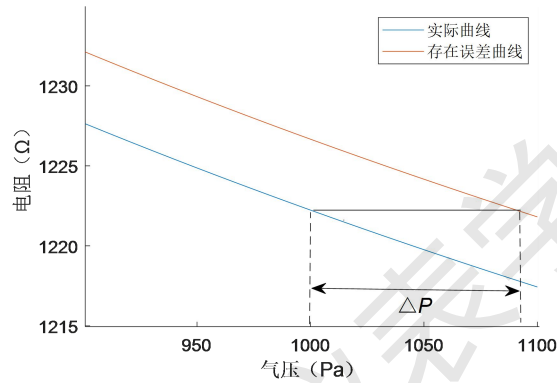


图 11 最大误差时的误差分析曲线图

计算可得 $\Delta P=92.47\text{Pa}$ ，误差为 9.25% 。综上所述，当本文所设计的皮拉尼真空传感器测量范围为 $1\sim 1000\text{Pa}$ 时其精度值为 9.25% 。

3.4 系统实现方案

探测系统软件主要由两部分组成：探测组件发射系统和地面接收系统。发射系统主要由主控制器、超低气压传感器、低噪声高精度信号调理电路、发射模块等组成；接收系统主要由功率放大模块、接收机和上位机组成，如图 12 所示。探测组件在临近空间指定区域抛出，在降落伞的控制下缓慢下降，在下降过程中探测组件利用皮拉尼传感器，测量气压参数。处理器将探测数据打包编码，经发射模块发送到地面接收系统，进行数据解析、存储及显示。图 13 为传感器测试系统及原位感知系统实物图。

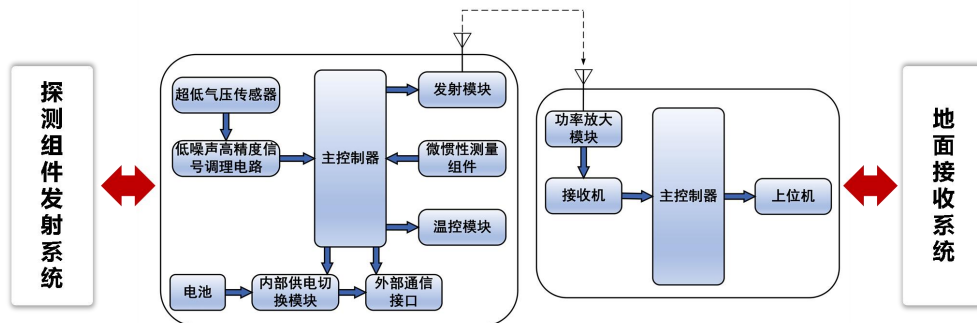


图 12 原位感知系统软件组成图



图 13 传感器测试系统及原位感知系统实物图；a. 传感器后端数据采集系统；b. 传感器测试系统；c. 天线；
d. 接收机；e. 探空仪。

参考文献：

- [1] Z. -W. Lin, K. Bhosale and S. -S. Li, "A CMOS-MEMS Thermal-Piezoresistive Oscillator Implemented for Wide-Range Pressure Sensing Applications," 2021 21st International Conference on Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems (Transducers), 2021, pp. 74-77.
- [2] P. Šváb, M. Spodniak, P. Korba, M. Hovanec and S. A. S. Al-Rabeei, "Meteorological satellites and their impact on transport systems in the field of weather forecasting," 2020 New Trends in Aviation Development (NTAD), 2020, pp. 225-228.
- [3] J. Romijn et al., "A Miniaturized Low Power Pirani Pressure Sensor Based on Suspended Graphene," 2018 IEEE 13th Annual International Conference on Nano/Micro Engineered and Molecular Systems (NEMS), 2018, pp. 11-14.
- [4] S. Lecler, O. Marconot and L. G. Fréchette, "SiO₂/SiN membranes as MEMS Pirani gauges for wide pressure measurement range," 2019 IEEE SENSORS, 2019, pp. 1-4, doi: 10.1109/SENSORS43011.2019.8956864.
- [5] M. Garg et al., "Highly Responsive Metal Oxide (V₂O₅)-Based NEMS Pirani Gauge for In-Situ Hermeticity Monitoring," in Journal of Microelectromechanical Systems, vol. 30, no.

3, pp. 340-342, June 2021.

- [6] Y. Kong, B. Jiao, L. Zhang, S. Yun and D. Chen, "Design and fabrication of wafer-level packaged MEMS Pirani gauge with surrounded heat sinks," 2017 19th International Conference on Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems (TRANSDUCERS), 2017, pp. 950-953.
- [7] 张煜. 物理尺寸对 MEMS 皮拉尼真空计性能的影响[D].中北大学,2014.
- [8] 宋平. 基于卫星、火箭和气球探测资料的我国临近空间大气环境特征分析[D].国防科技大学,2020.
- [9] P. Šváb, M. Spodniak, P. Korba, M. Hovanec and S. A. S. Al-Rabeei, "Meteorological satellites and their impact on transport systems in the field of weather forecasting," 2020 New Trends in Aviation Development (NTAD), 2020, pp. 225-228.

中国仪器仪表表字学