

防尘防水型传感器密封结构与性能优化研究

张琬晴¹, 李 梁², 苏前周², 张旭辉²

¹ 中国石油大学(华东) 山东青岛

² 中兵无人机研究院有限公司 北京

【摘要】 本文系统介绍了 IP 防护等级标准及密封原理, 分别从材料、结构、工艺等方面介绍传感器主要部件密封设计方法。提出了包括是否满足相关标准、定量测量气密性的密封性能评估方案, 并着重对利用有限元仿真进行密封件结构参数灵敏度研究以及优化设计进行了讨论。并进行了试验验证, 证明该方案改进效果明显。

【关键词】 防尘防水型; 传感器; 密封结构设计

【收稿日期】 2026 年 2 月 17 日 **【出刊日期】** 2026 年 3 月 18 日 **【DOI】** 10.12208/j.sdr.20260037

Research on the design and performance optimization of dustproof and waterproof sensor sealing structures

Wanqing Zhang¹, Liang Li², Qianzhou Su², Xuhui Zhang²

¹China University of Petroleum (East China), Qingdao, Shandong

²Zhongbing Unmanned Aerial Vehicle Research Institute Co., Ltd., Beijing

【Abstract】 This paper systematically introduces the IP protection rating standards and sealing principles, detailing the sealing design methods for key sensor components from aspects such as materials, structure, and processes. It proposes a sealing performance evaluation scheme, including whether relevant standards are met and quantitative measurements of airtightness, and focuses on discussing the use of finite element simulation for studying the sensitivity of sealing component structural parameters and optimizing design. Experimental validation demonstrates the scheme's significant improvement effects.

【Keywords】 Dustproof and waterproof type; Sensor; Sealed structural design

引言

传感器是进行信息感知及采集的关键器件, 它的可靠性直接影响到整个系统的可靠性和寿命。户外检测、工厂车间、汽车底盘、水下探测等工作环境都存在粉尘、水汽、盐雾、油污等腐蚀性物质, 在密封失效的情况下, 水分或者尘埃进入传感器内, 会导致电路短路、信号漂移、元件腐蚀乃至发生故障事故及安全事故。为此, 设计具有优良性能的防尘防水密封机构是传感技术发展的主要课题之一。

1 传感器防尘防水密封结构设计

1.1 材料选择策略

密封材料的性能直接决定密封结构的可靠性与寿命。选择时需综合考虑以下因素:

(1) 弹性与回弹性: 硅橡胶 (VMQ)、氟橡胶 (FKM)、三元乙丙橡胶 (EPDM) 是常用的密封圈材料, 它们具有良好的弹性和耐压缩永久变形性能。

硅胶耐高低温范围广 (-60°C~200°C), 氟橡胶耐油和化学品性能优异。

(2) 耐环境性能: 考虑材料对于应用环境下温湿度变化、日光辐射、臭氧、盐雾以及特定化学品的耐受程度, 如户外传感器应当采用 UV 老化适应性的材料等。

(3) 机械性能: 包括硬度、拉伸强度、撕裂强度等, 需与接触压力、摩擦工况相匹配。

(4) 工艺兼容性: 灌封胶需具有良好的流动性、固化收缩率低、与 PCB 及元器件粘接性好, 且不影响电气性能^[1]。

1.2 关键部位结构设计

传感器密封是一个系统工程, 需对各个潜在侵入路径进行针对性设计。

(1) 壳体接合面密封: 这是主要的密封面。一般采用 O 形圈装入沟槽或矩形密封圈的形式。沟槽

应按尺寸计算确定, 保证密封圈有合适的压缩率(一般为 15%~30%), 以便产生必要的接触应力; 当需要经常开启的壳体, 则用带有凸缘的垫片。

(2) 线缆/接插件出头处密封: 此处为薄弱点。可以用过盈橡胶塞, 也可以用注塑电缆密封套(Gland), 或者用环氧树脂、聚氨酯灌封胶填充密封。更好的方案是使用防水连接器^[2]。

(3) 传感探头/窗口密封: 对于光学、声学等需要与环境介质接触的传感器, 需使用透光、透声的密封材料, 如光学玻璃加环形密封圈, 或专用的防水透气膜(ePTFE 膜)。防水透气膜能平衡壳体内外气压, 防止结露, 同时阻挡液态水和粉尘。

(4) 活动部件(如按钮、转轴)密封: 可采用多层唇形密封圈、波纹管密封或柔性防水膜来实现动态密封, 在保证活动自由度的同时防止介质侵入。

2 基于有限元分析的密封结构优化策略

2.1 有限元分析在密封设计中的实施流程与关键技术

O 型圈等密封结构的有限元仿真涉及到多种物理现象之间的相互作用, 在常规情况下, 该过程主要包含以下环节: 建立 O 型圈、沟槽、配合面等密封结构的几何模型并进行参数化设计; 建立 O 型圈、沟槽、配合面等密封结构所用材料的本构方程; 建立密封结构各部分间的接触关系以及约束边界条件; 对密封结构模型进行数值求解; 对求解结果进行可视化显示。具体来说, 先对密封件(即 O 型圈)和密封槽以及被密封表面等构建三维实体模型, 并对相关尺寸进行参数化。例如 O 型圈的截面直径、沟槽宽深以及压缩率等等方便后期优化迭代使用。

对于具有轴对称性质的结构可以化简成一个轴对称模型大大减少了计算量^[3]。其次是材料模型的定义很重要, 橡胶类密封材料是具有超弹、不压缩、大变形的材料特点, 一般用 Mooney-Rivlin 模型、Yeoh 或 Ogden 的本构模型模拟这种材料的大变形非线性应力应变关系。模型参数由单轴/双轴拉伸、压缩试验得到, 如针对 60HD 硬度橡胶, 可以通过弹性模量与硬度的关系曲线图查询出弹性模量, 并以此计算 Mooney-Rivlin 模型常数 $C1=0.762, C2=0.038$ (取 $C2/C1=0.05$)。第三, 接触设定是密封分析的关键, 需要建立密封圈与沟槽、壳体间的接触对, 并且设定合适的摩擦系数(一般取值范围是 0.1~0.3)。

模型的边界条件主要有阀板或壳体的约束条件,

施加装配载荷(模拟压缩位移) 和工作载荷(模拟内部压力、温度场), 然后进行求解, 并针对所得到的结果着重分析密封圈的等效应力(VonMises 应力)分布、接触压力大小及均匀性、变形情况等, 其中接触压力的大小和均匀性是评价密封性能的直接指标, 均匀而足够大的接触压强才能保证密封的有效性, 在高温高压条件下还要开展热—结构耦合分析, 考虑材料热膨胀系数、导热系数等属性影响到密封的效果^[4]。

2.2 基于参数敏感性分析的密封结构优化方法

参数敏感性分析是确定密封结构关键设计参数影响程度、指导优化方向的有效方法。传统密封设计变量参数较多, 大多依靠经验选取, 结果不一定合理。通过多因素敏感性分析, 可以利用虚拟实验仿真 DOE(实验设计)迭代更新法, 在 Ansys Workbench 等平台中对参数进行系统仿真, 根据结果挑选出对密封性能影响最为敏感的参数, 从而提升设计的针对性和可靠性。

针对传感器常用 O 型圈密封的研究发现, 压缩率对密封性的影响相对较小, 而橡胶硬度以及摩擦系数是重要的影响因素。聚氨酯蕾形密封圈有限元分析表明, 增大压缩率可提高密封性, 但压缩率过大易造成密封圈内应力过大而开裂; 工作压力对密封圈等效应力影响不大, 但会使接触压力变大, 而且最大的接触压力总是大于介质工作压力才能保证密封^[5]。通过对各因素进行敏感度分析, 可获得设计参数及性能指标间的响应面方程, 为后续优化设计提供数学依据^[6]。

3 实验验证与结果分析

被测样品为两台外形尺寸及内部结构完全相同的压力传感器, 其中一台按照以往经验进行密封结构设计(即 O 型圈压缩率为 18%、密封沟槽直角形式), 另一台利用本文所提方法对密封结构进行设计(即 O 型圈压缩率为 22%、密封沟槽带 R0.3mm 圆角); 两者除密封结构外其余部件包括外壳材料均为铝合金 ADC12、密封圈材质均为 FKM 氟橡胶(硬度(70 HD)及装合工艺; 试验室条件: 恒温室中, 23±2 °C 温度, 50%±10% 的相对湿度)。

由表 1 可知, 在基本漏率方面, 改进前为 $5.2 \times 10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$, 改进后为 $8.7 \times 10^{-4} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$, 漏率减小了两个数量级; 说明采用有限元仿真辅助设计的真空阀门比经验设计的漏率更低, 静密封效果更好。

IP68 浸水测试中, 两组传感器均通过了功能测试(浸水后电气性能正常), 但拆解检查发现, 优化前设计的传感器内部有轻微凝露现象, 而优化后设计的传感器内部完全干燥, 说明优化结构不仅防止了液态水侵入, 还有效阻隔了水汽渗透, 这对于长期户外使用的传感器至关重要^[7]。

环境可靠性试验结果差距更大, 在完成 100 次高低温交变循环之后, 优化之前设计的漏率为 $1.8 \times 10^{-2} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$, 增加近 3 倍之多, 而优化之后的设计漏率只略有增大为 $9.1 \times 10^{-4} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$, 几乎保持不变, 说明优化设计有更好防温度疲劳的能力, 密封机构对热膨胀冷收缩力的作用更加稳定。经振动试

验后发现, 优化前设计 O 型圈略有偏移, 并在密封面上有磨损痕迹, 但优化后设计没有发生明显变化, 无明显磨损及偏移, 这是由于沟槽圆角的设计使得应力更加均匀地分布在 O 型圈上, 不会因应力集中而导致 O 型圈磨损; 经盐雾试验后发现, 优化前设计铝合金外壳上有轻微的腐蚀斑点, 而改进后由于表面处理工艺改进, 腐蚀程度大大降低^[8]。

老化实验表明: 优化前设计在 500h 老化实验中, 泄漏率逐渐增加, 最后达到 $3.5 \times 10^{-2} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$; 优化后设计在 500h 老化实验中, 泄漏率基本不变, 最后达到 $9.5 \times 10^{-4} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$, 说明优化后的密封结构具有较好的耐高温潮湿性能。

表 1 优化前后传感器密封性能综合测试结果对比

测试项目	测试条件与标准	优化前设计 (传统经验)	优化后设计 (有限元优化)	性能改善幅度
基础气密性	差压法, 0.5MPa, 1 分钟	$5.2 \times 10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$	$8.7 \times 10^{-4} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$	降低 83.3%
IP68 浸水测试	2 米水深, 1 小时, IEC 60529	通过 (内部轻微凝露)	通过 (内部完全干燥)	消除凝露现象
温度循环后气密性	$-40^\circ\text{C} \leftrightarrow 85^\circ\text{C}$, 100 次循环	$1.8 \times 10^{-2} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$	$9.1 \times 10^{-4} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$	改善 94.9%
振动测试后状态	10-500Hz, 5g, 3 轴向各 1h	O 型圈偏移, 密封面磨损	结构完好, 无磨损偏移	显著改善
盐雾腐蚀测试	5% NaCl, 48 小时, GB/T 10125	表面轻微腐蚀斑点	腐蚀程度明显减轻	改善 60%以上
长期湿热老化	$85^\circ\text{C}/85\% \text{RH}$, 500 小时	泄漏率增至 $3.5 \times 10^{-2} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$	泄漏率保持 $9.5 \times 10^{-4} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$	长期稳定性大幅提升
装配工艺窗口	力矩范围测试	13.5-14.5 N·m	12.0-15.0 N·m	窗口扩大 66.7%
综合成本评估	材料、加工、装配、售后	基准成本 (100%)	增加 5%制造成本, 降低 30%售后成本	全生命周期成本降低 15%

4 结语

总而言之, 在本论文中完成了防尘防水类传感器的密封结构设计、试验及改进方法的研究。确定了基于 IP 防护标准进行整体考虑、选材、结构设计以及新工艺的应用; 形成了包含 IP 整体性能评估、密封性泄漏量评估以及加速老化模拟自然环境评估在内的完整评估方案。综合运用有限元仿真和试验方法对设计进行了验证, 证明了以参数灵敏度分析为基础进行多目标优化设计可有效提高密封效果, 在基本密封能力、抗环境载荷能力和耐久可靠性方面都有明显提升, “轻载高能化”和加工公差扩大得到实现。

参考文献

- [1] 王振廷, 齐娜, 贺天昊, 等. 高可靠密封结构的高温温度传感器设计 [J]. 传感器与微系统, 2021, 40 (05): 88-90.
- [2] 张晓飞, 王新杰, 吕中虎, 等. 基于压电传感器的地质灾害监测系统设计 [J]. 自动化与仪表, 2022(003):037.
- [3] 单刘毫, 李怡昕, 姚远基, 等. 水下仿生侧线传感器阵列优

化设计及试验研究 [J]. 机械工程学报, 2025(8).

- [4] 刘涛, 蒋健波, 张奇峰, 等. 深海六维力传感器的结构设计 [J]. 今日制造与升级, 2024(11):84-86.
- [5] Zhenting W, Na Q, Tianhao Z. A high temperature sensor with highly reliable sealing structure [C]// The 49th Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation (China), 2022:
- [6] 张书和. 防尘罩式轮位传感器表面铁粉清理装置的设计 [J]. 铁道运营技术, 2013, 19 (03): 73-76.
- [7] 宋庆斗, 张艳昆. 防尘过滤器对湿敏电容传感器低温使用的影响 [J]. 气象水文海洋仪器, 2001, (02): 17-20.
- [8] 谢天羽, 庞波. 亚微粒子烟雾传感器防尘机构的探讨 [J]. 煤矿自动化, 1995, (03): 19-22.

版权声明: ©2026 作者与开放获取期刊研究中心(OAJRC)所有。本文章按照知识共享署名许可条款发表。

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



OPEN ACCESS