

# 高温熔盐压力变送器设计与热仿真分析

秦 军,马艳平,孔祥剑,杨 梅

(西仪股份有限公司,陕西 西安 710082)

**摘要:**压力变送器是工业应用中最为常用的一种压力传感器,广泛用于流量、液位和压力的测量。目前国内外耐高温的远传压力变送器极端工作温度条件为 370 °C,耐高温熔盐压力变送器测量介质是熔点为 580 °C 的具有一定腐蚀性的 NaCl 熔盐,传统的远传式高温压力变送器在耐高温方面不能满足测量要求。本高温熔盐压力变送器在传统远传式压力变送器的基础上,进行结构优化设计,包括变送器本体设计和远传装置设计,以及电路可靠性设计,利用热仿真分析验证此方案设计的可行性。经过仿真分析,验证本方案结构设计可行,达到了较好的耐热和散热效果,可应用于高温熔盐的压力测量。

**关键词:**高温熔盐;压力变送器;传感器;远传装置;热仿真分析

中图分类号:TH865

文章编号:1000-0682(2024)06-0119-04

文献标识码:A

DOI: 10.19950/j.cnki.CN61-1121/TH.2024.06.023

## Design and thermal simulation analysis of high temperature molten salt pressure transmitter

QIN Jun, MA Yanping, KONG Xiangjian, YANG Mei

(XI YI Co., Ltd., Shaanxi Xi'an 710082, China)

**Abstract:** Pressure transmitters are one of the most commonly used pressure sensors in industrial applications and are widely used for flow, level, and pressure measurements. At present, the extreme working temperature condition of the high-temperature resistant remote pressure transmitter at home and abroad is 370 °C, and the measurement medium of the high-temperature molten salt pressure transmitter is NaCl molten salt with a certain corrosiveness with a melting point of 580 °C. On the basis of the traditional remote pressure transmitter, the structure of this high-temperature molten salt pressure transmitter is optimized, including the design of the transmitter body and the design of the remote transmission device, as well as the circuit reliability design, and the feasibility of the design of this scheme is verified by thermal simulation analysis. Through simulation analysis, it is verified that the structural design of the scheme is feasible, and the heat resistance and heat dissipation effects are good, and it can be applied to the pressure measurement of high-temperature molten salt.

**Keywords:** high-temperature molten salt; pressure transmitters; sensor; remote transmission device; thermal simulation analysis

## 0 引言

随着工业场景越来越复杂,对仪器仪表的要求也不只是功能、性能、精度指标了,而是同样注重其抗温度冲击、抗氧化腐蚀、抗振动、抗电磁辐射等可

靠性及稳定性指标。压力变送器在工业测量应用中,若测量的介质具有腐蚀性、温度高、有固体颗粒或粘稠性、易结晶等特点时,需要利用远传密封装置将压力变送器与介质隔离开,将过程压力间接传递到变送器,组成远传压力变送器。远传压力变送器由压力或差压变送器、隔膜密封件、毛细管及灌充液组成,常用的硅油灌充液极限工作温度为 370 °C,不能满足高温熔盐的测量工况条件。

收稿日期:2024-06-20

第一作者:秦军(1984—),男,本科,高级工程师,研究方向为仪器仪表嵌入式电路及软件设计。E-mail: qinjungoon@163.com

## 1 压力变送器工作原理

压力变送器用于测量液体、气体或蒸汽的压力、差压、液位、流量、密度。其构成图 1 所示,变送器主要工作原理为压力信号通过隔离膜片和灌充液作用在传感器中心膜片上,中心膜片发生位移,使电容极板间距发生变化,从而改变电容量,电容信号在 C/F 转换器中被转换为数字信号,微处理器将温度和压力信号经过拟合计算后发送给 D/A 转换器,D/A 转换器把信号转换为模拟电流信号输出,并将 HART 通信信号叠加在 4 ~ 20 mA 输出信号上进行数据交互。

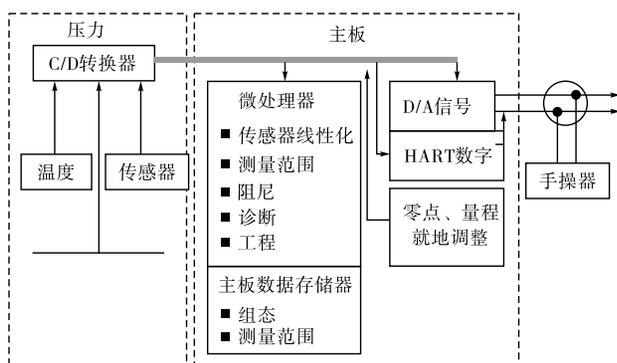


图 1 压力变送器工作示意图

## 2 高温熔盐压力变送器结构设计

耐高温熔盐压力变送器设计主要包括两个部分,一是变送器本体设计,二是远传装置设计。变送器本体设计包括电路及其防护设计、传感器设计以及引压部件设计;远传装置设计主要包括法兰连接方式、耐腐蚀接液材质设计、耐高温灌充液设计以及整体远传装置的连接方式设计等,主要对传统的远传式压力变送器进行特殊的耐高温、耐熔盐腐蚀设计,并且通过试验验证,能够实现在 300 ~ 580 °C 温度范围内,测量范围能到 0 ~ 7 MPa,测量精度可达 0.5 级,平均无故障工作时间 MTBF ≥ 8000 h。总体结构方案见图 2。

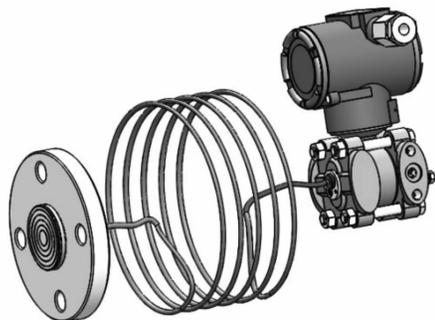


图 2 高温熔盐压力变送器外部结构图

### 2.1 传感器

高温熔盐压力变送器中的传感器采用双电容设计方案,整个传感器的外部封装采用精密氩弧焊接,并通过氦质谱探漏仪进行泄漏检测,保证传感器的整体密封性;整个传感器可动件只有测量中心膜片够减少压力传动带来的测量误差,提高传感器的可靠性。

### 2.2 电子壳体

采用铝合金电子壳体微弧氧化方案,在电子壳体表面镀上陶瓷涂层,该涂层具有表面硬度高、耐磨、绝缘、成本低等特点,能够使铝合金电子壳体与不锈钢传感器壳体避免直接接触,进而产生原电池腐蚀。壳体设计中,对常规变送器电子壳体较薄部位进行了加厚设计,并将喷塑厚度加厚,可有效避免电子壳体被腐蚀。

### 2.3 引压部件

在高温熔盐变送器引压部件设计时,采用全密封结构和高强度结构法兰,并将原镀锌螺栓更换为不锈钢高强度螺栓,避免了法兰产生泄露。

### 2.4 远传装置

为满足 580 °C 的测量要求,该方案采用钾钠合金作为远传装置的灌充液,在高温熔盐变送器远传装置设计时,采用耐腐蚀性较好的 316L 不锈钢法兰,法兰厚度增加为 20 mm,降低法兰被腐蚀坏的可能性,避免了泄露情况发生。

## 3 电路可靠性设计

在研发过程中考虑在工业现场使用时会面临复杂的电磁环境,导致仪表的精度超出可接受范围,因此在电路设计中加入了一块抗干扰板,如图 3 所示。抗干扰板主要由共模电感、电容、陶瓷放电管等器件组成,能够实现外部电源进入变送器电路系统后进行浪涌和电磁保护,同时对输出信号进行电磁衰减保护。抗干扰板从功能划分共分为四级。

第一级共模防护采用压敏电阻,差模采用 TVS 管进行 33 V 限压泄放。低压电源系统中,压敏电阻的漏电流较小,不易老化。第二级采用电感 T2 和电容 C<sub>1</sub> 组成 T 型衰减。第三级退耦电路采用共模电感 L<sub>1</sub> 和 L<sub>2</sub>,可以有效的抑制 EMI。第四级利用电容 C<sub>2</sub> 和 C<sub>3</sub> 进行共模衰减。

所有元器件均选用低功耗器件,同时开展了热仿真分析,降低电路总体发热对仪表性能的影响。部分无源器件、单片机选用耐温 105 °C 的技术指标,比正常最高工作温度高 20 °C,部分电容正常耐压值

为 25 V 选用耐压值 50 V,通过降额的设计方法提升电路的可靠性。电路完全在环氧树脂内封装,并在专用壳体内固定放置,适合在冲击、振动、潮湿、高低温、盐雾、霉菌等恶劣环境下工作。在软件开发过程中,采用自顶向下的设计方法,同时采用结构化、模块化程序设计方法,将软件根据完成任务情况设

计成若干个独立的软件模块,分别画出每个模块的详细流程图,按照流程图标示的功能分别编写程序源代码,每个模块源代码进行单独调试和检查,待无问题后,再将所有模块联成一个整体进行调试和检查,确保软件具有较高的可靠性水平。

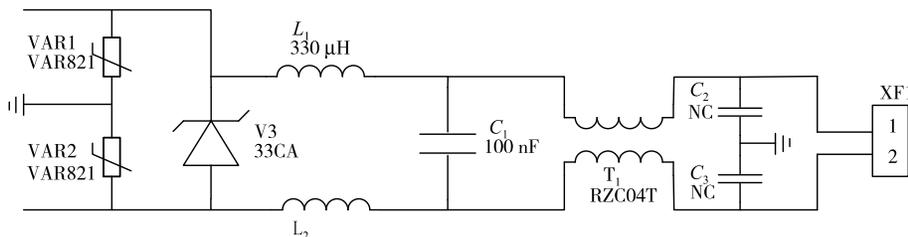


图3 抗干扰板电路图

## 4 高温熔盐压力变送器热仿真分析

### 4.1 数字样机建模

根据产品设计文件,经过适当简化建立的产品 CAD,数字样件如图 4 所示。

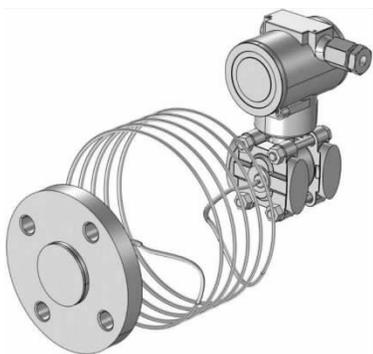


图4 CAD 样件

### 4.2 COMSOL 数字样机

结合产品 CAD 数字样机,并根据设计信息建立高温熔盐变送器 COMSOL 数字样件如图 5 所示。

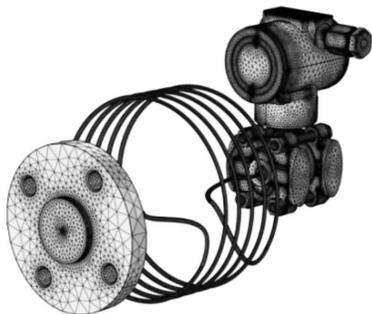


图5 COMSOL 数字样件

### 4.3 建模方法

在不影响产品结构特性的前提下,在 COMSOL 中对受试产品 CAD 数字样机进行必要的简化,具体简化原则如下:

(1)保留所有散热部件;

(2)不考虑所有与热传导影响较小的结构,如连接件(如螺钉、电缆等);

(3)尺寸较小的孔(如镀通孔、螺钉孔等)、凸台、尺寸较小的倒角等。

### 4.4 网格划分

采用四面体单元对高温熔盐变送器进行网格划分,最终 COMSOL 模型包含 815 621 个域单元、203 899 个边界元和 32 540 个边单元。网格质量检验采用 COMSOL 中自带算法。

### 4.5 应力分析

采用瑞典 COMSOL AB 公司的 COMSOL 软件对产品 COMSOL 数字样机进行分析计算。受试产品热仿真初始状态设定见表 1,受试产品的结构及材质见表 2,仿真结果如图 6 所示。

表1 试验初始状态记录单

文件名称	高温熔盐变送器	
版本号	V6	
建模软件/版本	COMSOL	
温度应力分析全局参数设置		
分析软件/版本	COMSOL	
计算域大小	/	
网格总数量	815621	
重力方向	/	
环境条件/边界条件/初始条件		
环境条件	流体子域环控条件	
环境温度	50 °C	流体名称 空气
环境空气压力	标准大气压	流体温度 50 °C
环境空气流速	0	流量/流速 /
底部热源	580 °C	

表2 产品结构及材质

结构大类	部件名称	材质
上方仪表	电子壳体	钢 AISI 316 退火不锈钢条
	法兰	钢 AISI 316 退火不锈钢条
	敏感元件	钢 AISI 316 退火不锈钢条
	电路板	FR4 circuit board
软管	软管	钢 AISI 316 退火不锈钢条
底部	DN50 法兰	钢 AISI 316 退火不锈钢条
	压力变送器传感器	钽

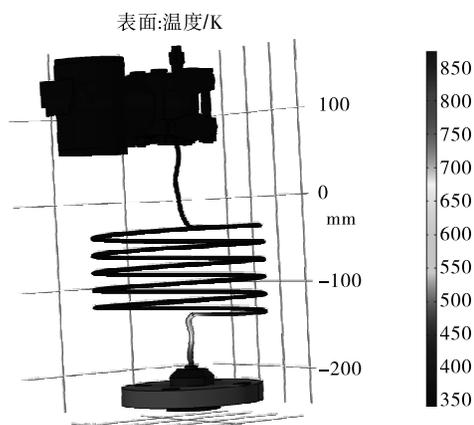


图6 仪表温度分布

从图6中可以看到在进入稳态后,底部法兰的温度上升至近 $580\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,已经接近压力变送器传感器的工况温度。随着软管距离的增大温度也在逐步的下降,在上方仪表及其内部电路板的部分,其工作温度比较稳定,在 $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右,与环境温度接近,不会影响到仪表电路系统的使用,说明其软管散热设计达到了较好的效果。

## 5 结论

该研究设计的压力变送器,耐高温、耐腐蚀,解决了高温熔盐压力测量的难题。根据热仿真软件分析结果可知,该方案高温熔盐压力变送器的优化设计起到了较好的效果,提高了高温熔盐压力变送器的可靠性水平,对其他仪表的技术研究也具有推广普及的借鉴意义。

### 参考文献:

- [1] 陶小利,高嵩,黄宏伟,等. 耐高温压力变送器在特殊场合应用的分析[J]. 工业仪表与自动化装置, 2021(6):112-113.
- [2] 黄宏伟,郭文来,孔祥剑,等. 一种具有压力远传功能的一体式压力传感器: ZL202020600540.4[P]. 2020-04-21.
- [3] 陈昱伦,关敏仪,梁佩博,等. 基于FMEA的某型高温熔盐压力变送器可靠性分析[J]. 电子产品可靠性与环境试验, 2023(02):33-39.
- [4] 李广,付一川,喇培清,等. 光热发电用不锈钢的熔盐腐蚀评价及机理[J/OL]. 材料工程, 1-18[2024-08-07]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1800.TB.20240408.1031.002.html>.
- [5] 高彬彬,顾庆生. 压力变送器研究现状及发展趋势[J]. 自动化仪表, 2024(01):1-7.
- [6] 褚卫华,刘展,顾正华,等. 多通道温度测量整体校准系统仿真分析[J]. 计量与测试技术, 2024(02):32-37.

(上接第118页)

- [7] 匡博,王颖,李杰,等. 无线传感网中基于半定规划的定位修正算法[J]. 现代电子技术, 2018, 41(16):84-87.
- [8] Maróti M, Völgyesi P, Dóra S, et al. Radio interferometric geolocation[C]// Proceedings of the 3rd international conference on Embedded networked sensor systems. ACM, 2005: 1-12.
- [9] BETAILE D F, CROSS P A, EULER H J. Assessment

and improvement of the capabilities of a window correlator to model GPS multipath phase errors[J]. Aerospace and Electronic Systems, IEEE Transactions on, 2006, 42(2):705-717.

- [10] CHENG Y, WANG X, CAELLI T, et al. Optimal nonlinear estimation for localization of wireless sensor networks[J]. Signal Processing, IEEE Transactions on, 2011, 59(12):5674-5685.

**欢迎投稿！ 欢迎订阅！ 欢迎刊登广告！**