

压力变送器在长输管道中损坏原因分析及对策

杨 征（国家管网集团北方巡察中心，河北 廊坊 065000）

摘要：压力变送器作为长输管道运输的核心感知元件，其可靠性直接关系到运输效率。本文系统分析了导致压力变送器损坏的多方面原因，针对这些原因，本文提出了相应的系统性对策，优化设计与制造工艺，规范安装与使用流程，强化环境适应性防护，完善维护管理机制，显著降低变送器故障率，延长其使用寿命，为保障长输管道运输的连续性与安全性提供有力支撑。

关键词：压力变送器；损坏；故障；对策

中图分类号：TH17

文献标识码：A

文章编号：1674-5167（2025）030-0100-03

Analysis and Countermeasures for Pressure Transmitter Damage in Long-Distance Pipelines

Yang Zheng (Northern Inspection Center of the National Pipeline Network Group, Langfang, Hebei 065000, China)

Abstract: As the core sensing element in long-distance pipeline transportation, the reliability of pressure transmitters directly affects transportation efficiency. This paper systematically analyzes the multiple causes of pressure transmitter damage and presents corresponding systematic countermeasures, including optimizing design and manufacturing processes, standardizing installation and usage procedures, strengthening environmental adaptability protection, and improving maintenance management mechanisms. These measures significantly reduce the failure rate of transmitters and extend their service life, providing strong support for ensuring the continuity and safety of long-distance pipeline transportation.

Keywords: Pressure transmitter; Damage; Failure; Countermeasures

在现代化长输管道运输自动化控制系统中，压力变送器是实现精准测控、确保流程安全的关键仪表。其长期稳定运行对提升产品质量、保障设备安全及实现高效生产具有重要意义。然而，在实际运输现场，变送器常处于高温、高压、腐蚀、振动等复杂恶劣环境中，不可避免地面临各种挑战，导致其性能下降甚至彻底损坏，进而可能引发非计划停机，造成经济损失和安全风险。

深入系统地分析压力变送器的损坏根源，并据此制定科学有效的预防与应对策略，已成为长输管道运输领域亟待关注和解决的现实课题。

1 压力变送器工作原理

压力变送器是将物理压力参数转换为标准化电信号的精密测量仪表，其工作原理基于“感知 – 转换 – 处理 – 输出”的协同过程。外部压力通过过程接口作用于敏感元件（如金属膜片或陶瓷电容板），使其产生与压力成正比的微小形变；该形变通过特定物理效应被转换为电参数变化——压阻式利用半导体压阻效应使电阻值改变，电容式通过电极间距变化引起电容值波动，压电式则依赖压电材料生成电荷量；专用集成电路（ASIC）对原始电信号进行放大、线性化、温度补偿和归一化处理，以消除误差并确保精度；最终，处理后的信号被转换为工业标准化的4-20mA模拟信号或数字协议信号，实现压力的远传、显示与控

制，成为工业自动化系统高可靠性感知的基础。压力变送器通过敏感元件感知压力并产生形变，利用物理效应将形变转换为电参数变化，再经专用电路进行精密处理与补偿，最终输出标准化信号。

2 压力变送器常见类型

2.1 压阻式变送器

压阻式变送器是目前长输管道中最常见、应用最广泛的压力测量仪表之一。其核心原理是利用半导体材料的压阻效应——即当材料受到机械应力时，其电阻率会发生显著变化。变送器的核心部件是一个采用微机械加工技术制成的硅压阻式敏感芯体。当外部压力作用于芯体表面的隔离膜片时，压力通过内部填充的硅油传导至硅芯片，使其产生微小的形变。此形变导致直接扩散在硅芯片上的惠斯通电桥的桥臂电阻值发生改变，从而输出与所受压力成线性比例关系的高灵敏度毫伏级电信号，随后被变送器内部的高精度集成电路放大，并转换为标准的4-20mA电流信号或数字信号输出。其主要特点包括精度高、体积小巧、响应频率高、性能稳定可靠。

2.2 压电式变送器

压电式压力变送器的工作原理基于压电效应。其核心传感元件由石英晶体、压电陶瓷等压电材料构成，当这些材料受到外部动态压力作用时，会发生机械变形，从而在其表面产生与所受压力成正比的电荷信号。

该电荷量极其微弱，需连接专用的高输入阻抗电荷放大器进行信号转换与放大，最终输出可测量的电压或标准电流信号。

由于其工作原理依赖于压力的动态变化，该型变送器本质上是一种动态压力传感器，非常适合测量快速变化的压力、瞬时冲击或振动，例如广泛应用于发动机燃烧分析、航空航天试验、爆炸压力监测等领域。然而，它无法用于测量绝对静态或变化极其缓慢的压力，因为产生的电荷会通过测量电路的内部阻抗迅速泄漏，无法保持稳定的信号输出。

2.3 应变式变送器

应变式变送器的核心传感元件是金属应变片。其工作原理是金属的电阻应变效应，即金属导体或半导体在受到外力作用而产生机械变形时，其电阻值会随之发生变化。将应变片通过特殊粘合剂牢固地粘贴在一个弹性敏感元件上。当被测压力作用于此弹性元件时，元件会产生形变，并传递给应变片，使其电阻值改变。这一微小的电阻变化通过惠斯通电桥电路检测并转换为不平衡的电信号输出，再经后续电路放大和处理，最终输出标准的压力信号。其主要特点是测量量程范围广、结构坚固、抗过载能力强、性能稳定且成本较低。

2.4 电容式变送器

电容式变送器的工作原理基于电容变化。其核心传感元件是一个差动电容室，由两侧固定的弧形电极和一个位于中间的金属感压膜片组成。当两侧的被测压力不同时，压力差会使感压膜片产生微小位移，从而改变其与两侧固定电极之间的距离。这个位移导致一对电容的容值发生变化。通过测量这个差动电容的变化量，并经过电路的转换与放大，即可得到与差压成线性比例的标准输出信号。电容式变送器测量精度极高、稳定性好、灵敏度高，并具有较强的抗干扰能力和过压保护特性，非常适合测量微小的压力、差压或真空度。

3 压力变送器使用过程中故障原因分析

3.1 设计制造缺陷

设计制造缺陷是压力变送器发生故障的根源性原因之一。这类问题通常源于产品研发和生产环节，主要包括：材料缺陷，如膜片材质不耐介质腐蚀或易疲劳开裂；结构设计不合理，如压力过载保护不足、密封结构存在薄弱点，或电气连接不可靠；制造工艺瑕疵，如传感器芯片粘贴不牢、焊接点存在虚焊、电路板清洗不彻底导致离子污染，或密封件安装不到位；以及质量管理疏漏，致使存在固有缺陷的产品流入市场。这些内在缺陷在严苛的工业现场环境中会逐渐暴

露，导致变送器出现零点漂移、输出不稳定、甚至早期失效等故障，为用户带来巨大风险。

3.2 安装与使用不当

安装操作不规范体现在三方面：取压点选择错误；导压管安装倾斜度不足，液体介质未充满导压管时形成气塞，气体介质积气导致测量偏差，同时气塞体积变化会反向冲击膜片；法兰连接时未对中，管道与变送器接口不同心，导致膜片受额外弯矩，局部应力集中加速裂纹扩展。超工况运行则包括超压使用实际压力超过量程上限，膜片承受过大压力发生塑性变形甚至破裂，介质温度超标，高温导致电子元件焊点熔化、芯片性能漂移，低温下润滑油凝固卡阻内部传动机构，影响信号传输精度。因安装不当导致的变送器故障占比达30%–40%，超工况运行则是加速设备老化的关键诱因。

3.3 环境因素

在长输管道输送中，腐蚀性介质会直接侵蚀壳体与膜片：不锈钢壳体在氯离子环境中易发生点蚀，膜片表面若未做防护处理，会被酸碱腐蚀形成微孔，导致介质泄漏或信号失真。振动与冲击主要来自设备运行或操作：机械振动会使内部元件松动接触不良，长期振动还会导致膜片疲劳断裂；剧烈冲击会产生瞬间高压，超出膜片承受极限时直接破裂。电磁干扰则来自管道附近高压设备产生的电磁噪声，其通过信号线耦合进入变送器，叠加到输出信号中导致数据漂移或误判，严重影响测量准确性。

3.4 维护管理缺失

未定期校准会导致敏感元件老化，长期运行后测量误差累积，最终引发控制误动作；清洁维护不足表现为导压管内介质结晶、杂质堵塞，导致压力传递受阻，同时堵塞物会腐蚀导压管内壁，间接影响变送器寿命。防护措施不到位包括未加装散热片、防水罩、防爆外壳，这些缺失会加速元件老化或直接引发安全事故。

4 压力变送器使用过程中故障处理方法

4.1 优化设计与制造工艺

材料选择上，针对不同工况环境精准匹配材质：腐蚀性介质场景优先选用哈氏合金、钛合金等耐蚀性能突出的材料制作敏感元件与壳体，替代传统不锈钢以降低化学侵蚀风险；长输管道运输高温高压场景采用高强度合金钢或表面强化处理（如渗碳、氮化）的弹性膜片，提升抗变形与抗疲劳能力。

工艺控制方面，改进焊接技术采用激光精密焊接替代传统弧焊，确保敏感元件与基底结合层的致密性与均匀性，避免虚焊导致的信号中断；密封工艺引入

真空环氧树脂灌封技术，替代普通O型圈密封，有效隔绝潮湿气体与腐蚀性介质侵入内部电路；校准环节建立全量程自动化校准系统，通过标准压力源与高精度传感器配合，实现对零点、线性度、回差等参数的精细化标定，确保出厂设备性能满足长期使用需求。结构设计优化借助有限元仿真技术，对取压口位置、膜片厚度、信号处理单元布局进行流体动力学与应力分布模拟，避免因流场扰动、应力集中引发的测量失真或元件失效，从设计源头减少潜在故障点。

4.2 规范安装与使用流程

建立标准化操作体系，严格把控设备全生命周期的关键环节。长输管道运输安装阶段重点规范取压点选择，遵循直管段前10倍管道直径、后5倍管道直径的原则，避开弯头、阀门、变径管等流体扰动区域，确保压力信号真实反映管道工况；导压管安装需保证合理倾斜度，液体介质管道导压管向上倾斜便于排气，气体介质管道导压管向下倾斜便于排液，长度控制在合理范围内以减少压降与信号延迟；法兰连接时使用专用对中工具辅助定位，确保变送器与管道接口同心，避免因受力不均导致膜片局部应力过大引发疲劳裂纹。

使用阶段严格限定期工况范围，选型时预留10%-20%的量程裕度，避免实际压力长期接近或超过量程上限导致膜片塑性变形；加装温度补偿模块应对环境温度波动，通过软件算法修正温度引起的测量误差，确保不同温度条件下的测量精度；定期检查安装状态，重点排查导压管堵塞、法兰连接松动、传感器线路老化等问题，及时清理堵塞物、紧固松动部件、更换老化线路，防止因安装松弛或堵塞引发的测量偏差与设备损坏。

4.3 强化环境适应性防护

腐蚀防护方面，根据介质腐蚀性等级选择防护方案：强酸碱管道运输环境采用表面喷涂聚四氟乙烯涂层或镀镍处理，形成致密防护膜阻隔介质与金属基材接触；盐雾环境对壳体进行阳极氧化处理，提升表面硬度与耐蚀性；潮湿环境在设备外部加装防水罩或密封胶条，防止水分渗入内部腐蚀电路板与电子元件。

振动与冲击防护通过在变送器与管道间加装橡胶减震垫，吸收机械振动能量降低传递至内部元件的振动幅值；设备底座增加弹簧减震器或阻尼器，缓冲阀门快关、泵体启停等操作引发的瞬时冲击，减少膜片因疲劳断裂的风险；电磁干扰防护采用双绞屏蔽电缆传输信号，屏蔽层单端可靠接地以阻断电磁噪声耦合；高压设备与变送器保持安全间距，避免强电磁场对信号采集与传输的干扰，确保输出信号的稳定性与准确

性。

4.4 完善维护管理机制

定期维护方面，制定详细的维护计划：每月对导压管进行专项检查，清理管内积液、杂质与结晶物，确保压力传递畅通；每季度使用标准压力校验仪对变送器进行校准，验证其零点、量程与线性度是否符合要求，误差超标的设备及时返厂维修或更换；每年对壳体厚度、膜片弹性系数进行检测，评估腐蚀程度与老化状态，必要时更换受损部件。

智能监测方面，在长输管道加装物联网传感器实时采集压力、温度、电流等运行参数，通过无线通信模块将数据上传至云平台；利用人工智能算法对历史数据进行分析建模，识别膜片形变、信号漂移、导压管堵塞等异常特征，提前发出预警信息；结合预测性维护策略，根据预警结果制定针对性的维护方案，如清洗导压管、更换老化元件等，避免设备突发故障导致的停机损失。

5 结语

综上所述，压力变送器的损坏是设计制造、安装应用、介质特性及环境因素共同作用的结果，而非单一原因所致。因此，其防护对策必须是系统性的工程，贯穿于选型、安装、维护和管理的全生命周期。企业应从源头把控，进行精准的选型与质量验收；在过程中规范安装，消除潜在隐患；并最终建立以预测性维护为核心的管理体系，通过定期校验、状态监测和及时干预，提升压力变送器的可靠性与耐久性，采取主动的综合策略，最大程度地减少故障发生，保障长输管道运输的稳定运行。

参考文献：

- [1] 林一杉,王旭,董隐,等.刍议压力变送器的选用、调试与安装[J].中国品牌与防伪,2023,(12):45-48.
- [2] 赵忠辉.石化企业压力变送器仪表检定维修关键点分析[J].中国质量监管,2023,(09):92-93.
- [3] 吕明.石化企业压力变送器仪表维修要点分析[J].设备管理与维修,2022,(18):57-58.
- [4] 邓海群.卫生型压力变送器故障维修与在线检测[J].轻工科技,2021,37(12):110-111,121.
- [5] 王闻.压力变送器的常见故障分析[J].中国石油和化工标准与质量,2021,41(21):14-15.
- [6] 焦寰宇.浅析压力变送器检定及使用中的问题和解决方法[J].中国设备工程,2021,(09):169-171.

作者简介：

杨征（1993-），男，汉族，黑龙江齐齐哈尔人，硕士研究生，研究方向：长输管道安全生产。