热式质量流量计改造

张志华

淄博齐翔腾达化工股份有限公司

摘要：本文旨在探讨和解决某化工企业加氢反应器氢气进料流量测量及调节系统中存在的问题。原有的热式质量流量计在频繁的开停车及调节过程中表现出测量值不稳定，导致反应器床层温度波动，影响产品质量，并造成物料和能源的浪费。通过对现场故障原因的深入分析，提出了针对性的改造措施，包括更换管道材质、优化工艺条件和改进管道过滤器。改造后，选用的 CMFS010M 质量流量计和 501T-5221LARN 调节阀显著提高了测量和调节精度，消除了管道和介质特性对测量的影响，降低了故障率，提高了仪表的稳定性，从而改善了控制品质，提高了装置的经济效益。

关键词：热式质量流量计；改造；测量精度；调节阀；经济效益

在现代工业生产中，精确的流量测量和调节对于确保产品质量、提高生产效率和降低成本至关重要。特别是在化工行业中，流量测量的准确性直接影响到化学反应的控制和产品的最终质量。我公司在生产过程中，使用的加氢反应器氢气进料流量测量及调节系统，由于其关键性，对整个生产流程的稳定性和经济效益有着深远的影响。

在实际运行中发现，原有的热式质量流量计如图 1 所示，在频繁的开停车及调节过程中，出现了测量值不稳定的问题如图 2 所示。这一问题不仅导致了反应器床层温度的波动，影响了产品质量，还造成了物料和能源的浪费，增加了生产成本。因此，对现有的流量测量及调节系统进行改造升级，以提高其测量和调节的准确性和稳定性，成为了企业亟待解决的技术难题。

本文将详细分析某化工企业加氢反应器氢气进料流量测量及调节系统中存在的问题，并提出相应的改造措施。通过对现场故障原因的深入分析，结合工艺条件和设备特性，本文将探讨如何通过技术改造来提高测量和调节系统的稳定性和准确性，从而提升整个生产过程的经济效益。

1　存在问题原因分析

1.1　管道材质使用错误

某化工企业内部最初为节约成本，采用了碳钢管线，长期使用后发现管道内部铁末类物质增多。经过研究发现氢气管线由于长时间接触高温、高压氢气，若材质选择不当，则容易发生“氢脆”现象。

“氢脆”是指高压氢气环境中，氢原子进入管线钢，引起钢的脆性增加、裂纹引发等氢致失效现象。氢原子可以在晶体点阵中扩散，也可以被非金属夹杂物、空穴、晶界、位错以及第二相颗粒等缺陷捕获，从而产生局部氢富集，产生裂纹或氢鼓泡，以及导致管线钢力学性能的改变。

碳钢管线长时间使用易发生“氢脆”及腐蚀情况，因此 316ss（316 不锈钢）是氢气管线的一个最佳选择。管线中的杂质在高流速情况下冲击仪表，对测量及调节系统造成不同程度的损坏。

1.2　工艺条件对仪表造成影响

选择加氢装置近几年时间因生产平衡及物料采购等诸多原因，工艺人员需要根据公司要求经常性开停车。部分工艺人员在操作流程中随意性较大，在“先关后阀再停车”这一错误操作的情况下，反应器内部碳四无法与仪表有效隔离，导致碳四回流至表体内部，造成传感器失效或损坏。

1.3　管道过滤器使用故障率高

根据要求，上游管线应使用不锈钢材质、100 ~ 200 目的 Y 式管道过滤器，以便净化管道气体，确保装置正常运行。然而在实际生产中，工艺人员为简化流程，擅自使用不达标的 180 目尼龙布材质。此外，由于过滤器位置贴近地面，不便更换，工艺人员往往严重拖延，导致清理周期严重滞后。仅当仪表出现问题后，维护人员明确提出需要清理过滤器时，工艺人员才会进行清理更

图 1　原有的热式质量流量计

图 2　开停车及调节过程中，测量值波动情况

换。工艺管理中的各种不确定操作难以有效避免杂质进入仪表内部，因此造成仪表人员反复拆卸修理，严重影响了正常生产。

2　仪表选型依据

针对仪表存在的问题开展攻关。加氢反应器处理的物料种类较多，导致瞬时量数值波动较大。有时稳定在 10 Nm^3/h 以下，有时则在 50 Nm^3/h 以上，具体根据处理物料情况而定。

2.1　流量表

1）若选择孔板流量计，仅能采用内藏式微量孔板，但其所需量程比过大，孔板自身具有局限性，因此计算出的精度无法达到工艺要求。

2）若选用质量流量计，其精度符合工艺要求。当最大流量按 50 Nm^3/h 设计时，选用的口径相对较小，且低流量区段的测量精度较高；但若按 70 ~ 80 Nm^3/h 作为最大流量进行设计，虽然整体性能仍在可接受范围内，但其最大流速偏高，同时低流量段的测量精度将有所下降。

2.2　调节阀

从工艺参数可以看出，此工况阀门有如下特殊性：1）介质为氢气，分子量低，极易出现泄漏，且流速过快极易产生静电，发生危险；2）流量较低，需要选择合适的阀型才能够精确稳定控制。

针对以上工况选型，以下几点问题需引起注意：1）针对泄漏问题，采用工装日本原装聚四氟乙烯碳纤维 (P6528+P4519) 填料，杜绝阀盖处的泄漏问题；2）选择工装小流量阀型，501T 单座调节阀的 CV 值可达 0.28，因小流量阀内件冲涮严重，为兼顾最佳调节性能及保证阀门使用寿命，阀内件均作加硬处理；3）为达到精确控制选用山武 AVP-100 智能阀门定位器，阀门流量特性选用等百分比特性，选型开度放置到 70% 左右。确保了阀门的稳定控制和精确调节性能。

3　改造实施方案

3.1　CMFS010M 质量流量计

工作原理：CMFS010M 质量流量计由传感器、变送器和显示仪表组成。首先，激励线圈使测量管产生振动，流动的流体在测量管内产生科氏力，由于测量管进出侧所受科氏力方向相反，测量管会产生与每个振荡周期流过测量管的质量流量成比例的扭曲，再通过电磁检测器将测量管的扭曲转变成电信号，然后进入变送器转换成 4 ~ 20mA 或频率信号输出。由于温度影响了测量管的刚性，科氏力所产生的扭曲总量也将受到温度的影响，所以，变送器也将检测安装在测量管外面的铂热电阻的输出，不断地调节所测到的流量，进行温度补偿。压力变送器可将检测到的介质压力信号接到质量流量计以实现压力补偿。

特点：1）可直接测量质量流量，不受温度、压力、黏度和密度等因素的影响；2）精度高，没有可动的机械部件，可靠性高，线性输出，测量精度可达 0.1% ~ 0.2%；3）响应时间高，小于 1s；4）测量范围 0.1 ~ 100 Nm^3/h，可调量程比较大；5）安装不需要前后直管段，不受工况影响，还可测量双向流体。管道内无障碍物，可通过含有固体颗粒的介质，并易于清洗。

3.2　501T-5221LARN 调节阀

1）结构特点。501T-5221LARN 调节阀是一种顶部导向型单座调节阀，具有体积小、结构简单的特点，能够适应苛刻的工况条件。这种调节阀的设计使其能够在高压、低温或含有杂质的介质中稳定工作。

2）特殊工况适应性。低分子量介质：由于介质为氢气，分子量低，极易出现泄漏，且流速过快极易产生静电，发生危险。该调节阀针对泄漏问题，填料采用工装日本原装聚四氟乙烯碳纤维 (P6528+P4519) 填料，有效杜绝从阀盖处的泄漏问题。

3）精确控制。流量较低时需要选择合适的阀型才能精确稳定控制，501T 单座调节阀可以将 CV 值做到 0.28，适合小流量的精确控制；因小流量阀内件冲涮严重，为兼顾最佳调节性能及保证阀门使用寿命，阀内件均作加硬处理；为达到精确控制选用山武 AVP-100 智能阀门定位器，阀门流量特性选用等百

特性，选型开度放置到 70% 左右，确保了阀门的稳定控制和精确调节性能。

4）性能参数。公称通径为 25 ～ 100 mm，适用于不同流量的需求；流量系数 (CV) 为 0.28 ～ 280，能够满足不同流量的控制要求；泄漏率小于 0.01%，确保了阀门的密封性能；工作温度 − 200 ～ 450℃，适用于广泛的工业应用温度范围；工作压力 0 ～ 42 bar，能够承受较高的工作压力。

4　应用改造措施后对存在问题的解决

4.1　测量精度及调节精度大大提高

原流量调节系统为设计精密的热式质量流量计，因杂质及介质影响，往往导致流量计流量及阀位无规律变化。改造完成后，经过一段时间的实际运行测试表明：新安装的 CMFS010M 质量流量计显示出了极高的稳定性和准确性，即使是在频繁起动或停止的操作条件下也能提供可靠的数据支持；采用 501T-5221LARN 型调节阀后，氢气进料流量得到了更加精准和平稳的控制，显著减小了反应器床层温度波动范围；生产效率得到明显提升，产品合格率从原来的 75% 提高到了 90% 以上；物料消耗减少约 15%，能源成本下降近 20%，经济效益显著增加。

4.2　彻底消除了管道对测量的影响

由于工艺管线不定期使用，无法做到彻底吹扫，内部细微颗粒物较多。改造投用以来，无论是质量流量计还是调节阀均不受细微颗粒物影响，仪表指示波动保持在 1 Nm^3/h 左右，自动控制非常平稳，调节输出及时准确。在大大降低了维护量和劳动强度的同时，也有力保证了装置的长周期、高负荷运行，大大提高了调节品质。

4.3　消除了介质特性对测量的影响

装置经常性开停车造成反应器碳四往往串入到测量管内部，改为质量流量计后，测量管既可测气体也可测液体，无直接接触部件，不会损伤核心设备，不会对仪表精度及寿命造成影响，降低了备件资金占用情况。

5　实际应用效果

为了更直观地展示改造前后的实际应用效果，通过以下表格对比了热式质量流量计和 CMFS010M 质量流量计 +501T-5221LARN 调节阀在各个关键指标上的表现，见表 1。

表 1 可以看出，现场仪表改造后如图 3 所示，测量及调节精度提高，故障率显著降低。仪表的稳定性有了很大提高，使整个调节系统可自动运行，改善了控制品质，提高了装置的经济效益。

6　结论

通过对现场故障原因的深入分析，在无法全面更换氢气管线的前提下针对性地对测量调节系统进行了改造，基本消除了不利因素的影响。改造后的 CMFS010M 质量流量计和 501T-5221LARN 调节阀显著提高了测量和调节精度，消除了管道和介质特性对测量的影响，降低了故障率，提高了仪表的可靠性、稳定性。这些改进不仅改善了控制品质，还提高了装置的经济效益，为工艺人员的操作和仪表维护人员的维护及故障处理提供了极大的便利。

7　未来展望与改进建议

7.1　智能化控制系统的引入

随着工业 4.0 和智能制造技术的不断发展，建议在现有基础上进一步引入智能化控制系统。通过集成先进的传感器、数据采集系统和大数据分析平台，可以实现对加氢反应器及其相关设备的实时监控和自动调节。例如，采用预测性维护技术，通过对历史数据的分析来预测潜在故障，并提前进行维修或更换，从而减少非计划停机时间。此外，还可以利用机器学习算法优化工艺参数设置，提高生产效率和产品质量。

表 1　改造前后的指标对比

项目 \ 类别	热式质量流量计	CMFS010M 质量流量计 501T-5221LARN 调节阀
波动范围	50 Nm^3/h	1 Nm^3/h
自动控制	不能	能
故障率	1~2 次 / 月	无

图 3　现场仪表改造后场景

（下转83页）

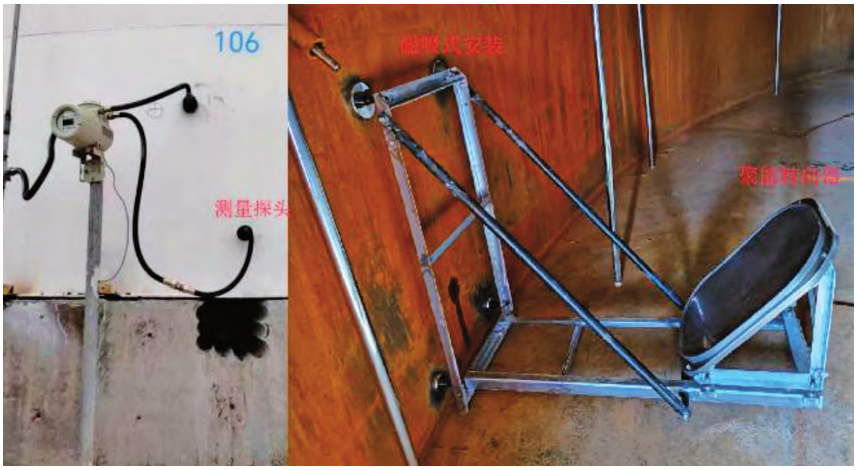

图 8　现场安装图

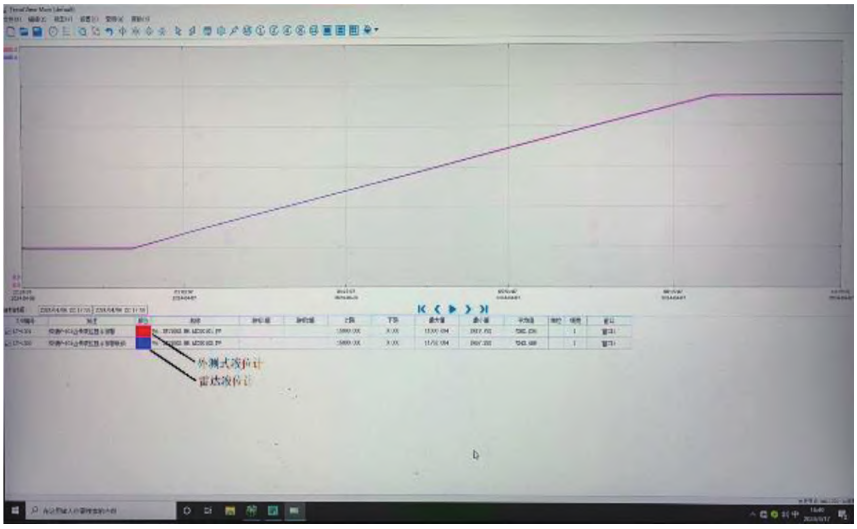

图 9　记录曲线图

比较少，液位测量既要求测量范围比较大、测量稳定性比较高，而且要保证安全可靠。ELL 声纳式外测液位计完美地解决了这些问题，其最小 0.1 ～ 3 m、最大 1 ～ 30 m 的可选测量范围基本满足地上储罐液位测量。非接触液位测量技术非常安全，快速安装调试，从而降低建设费用和维护成本。测量探头和主机中无机械运动部件，更可靠耐用。

参考文献：

[1] 中国石化工程建设有限公司 . 石油库设计规范：GB 50074—2014[S]. 北京：中国计划出版社 ,2014.

[2] 中国石油化工集团公司储运设计技术中心站 . 石油化工储运系统罐区设计规范：SH/T 3007—2014[S]. 北京：中国石化出版社 ,2014.

[3] 全国安全生产标准化技术委员会化学品安全分技术委员会 . 化工企业液化烃储罐区安全管理规范：AQ3059—2023[S]. 北京：应急管理出版社 ,2023.

[4] 陈珺 . 外测液位仪表在化工行业中的应用 [J]. 化工自动化及仪表，2019,46(06):503-505.

（上接79页）

7.2　员工培训与技能提升

为了确保新系统的高效运行，必须加强对操作人员和技术支持团队的专业培训。这包括但不限于：1）仪表与阀门的操作规范：详细讲解 CMFS010M 质量流量计及 501T-5221LARN 型调节阀的工作原理、日常维护要点以及常见故障处理方法；2）应急响应训练：定期组织模拟演练，增强员工面对突发事件时的快速反应能力和协同作战水平。

7.3　维护保养机制的完善

建立一套全面且高效的设备维护保养体系至关重要。具体措施如下：1）制定详细的维护计划。根据各部件的实际使用情况合理安排检查周期，比如每季度对所有关键部件进行全面检查一次；2）设立专门的维护记录档案。每次完成维护后都需详细记录所采取的行动及其结果，便于日后追溯问题根源；3）加强备件管理。对于易损件应保持适量库存，避免因等待替换零件而导致长时间停产。

7.4　环保与安全意识的强化

鉴于化工行业固有的高风险特性，在追求经济效益的同时绝不能忽视环境保护与安全生产。

7.5　技术创新与研发投入

鼓励和支持科研人员围绕当前生产工艺中的难点问题开展深入研究，寻找更加经济有效的解决方案。同时，积极寻求与其他高校或研究机构的合作机会，共同推动新技术的研发应用。例如，开发新型催化剂以降低能耗、提高转化率；或者研究更为先进的过滤材料，进一步净化原料气体，延长仪表使用寿命。

通过上述一系列举措，相信为能够在保障安全生产的基础上，不断提升自身竞争力，为实现可持续发展目标奠定坚实基础。希望本文提出的改造方案及相关建议能够为其他面临类似挑战的企业提供有益参考。