

自动化技术助力绿氢安全高效生产

文 /Veronica Constantin

自动化技术在推动向清洁燃料经济转型的过程中扮演着至关重要的角色，本文讲述了自动化技术是如何促进更安全且高效的绿氢生产。

绿氢生产目前正处于其发展的初级阶段，伴随着行业的逐步探索与成长，短期内确实可能面临更为复杂的安全挑战。氢作为一种能源载体，如同所有可燃物质一样，具有相应的潜在危险。其高度易燃的特性意味着即使氢气与空气的混合比例很低——低至空气中氢气含量达到4%时，就足以构成爆炸风险。因此要想安全有效地生产、处理及利用氢气，需要实施严密的控制措施、采用高精度的管理系统，并建立详尽的操作规范与安全指南，通过这些综合措施，可以在推进

绿氢产业发展的同时，最大限度地降低安全风险。

在电解水制氢过程中，确保安全性与效率至关重要，这要求极高的精确度来测量和调控各个环节。首先，需要精密控制高压下水流的稳定性，以防任何过热情况触发氢气的意外点燃。其次，电解槽中的隔膜完整性是监控的重点，因为任何破损都可能引发火灾甚至爆炸，同时，必须严密监测，防止氧气与氢气不当混合，以及避免水蒸气在系统内的不当累积。此外，对供给电解单元的水质及其电导率进行严格把关，以确保电解效率和产出气体的纯度。分离器的管理同样不容忽视，保持其填充水平的均衡极为重要，既不能过满导致溢流，也

要防止因水位不当导致氧气系统受到污染。

1 控制和安全系统

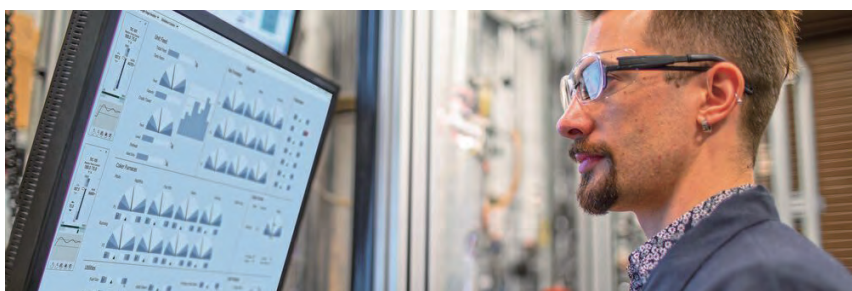
绿氢工厂的工艺安全是可以实现的，但制造商必须仔细遵守最佳实践和国际安全标准。国际电工委员会标准 IEC 61508 和 IEC 61511 定义了工艺安全要求，涵盖了自动化系统设备的全生命周期管理，包括设计、实施、运营及维护等多个环节。这些标准为制造商提供了明确指导，帮助他们在绿氢生产过程中实现最高级别的安全控制，从而有效降低风险，保障生产过程中的平稳与可靠。

确保新的绿色生产系统在整个工厂的安全可能是一个挑战。关键设备

本文作者系艾默生全球可持续发展副总裁。



HydrogenPro 公司世界知名电解槽产品提供商，其在挪威 Herøya 测试基地拥有目前世界上最大的单堆高压碱性电解槽



作为集成的控制和安全系统，艾默生的 Delta-V 和 Delta-V SIS 为工程设计、维护和操作提供了一个统一的平台

如电解槽、压缩机以及消防和燃气输送基础设施，通常由不同的制造商提供。尽管每一个单独的设备都内置了一定程度的安全机制，但这些原始设备制造商（OEMs）往往难以全面把握整个生产流程中的安全视角或深入理解。因此，通常情况下，工厂运营方并不会将整个流程的安全责任完全寄托于单一的 OEM。这就要求运营方自身或借助第三方专家，来整合各个系统，实施全面的安全管理策略，确保各部分协同工作，共同维护工厂的安全运行环境。

在大型生产工厂中，这些系统已经在 100 MW 的工厂中使用，在 20 MW 及以上的工厂中越来越多地使用。工厂范围内的 ICSS 作为电解工厂的“大脑”，有助于简化操作和提高生产效率，同时为工厂提供可靠的保护。ICSS 允许运行几个大型相互连接的电解槽。ICSS 软件与经过验证的仪器相结合，包括压力、温度和液位传感器、流量传感器、执行器和气体检测传感器，可以持续监测系统的性能和状态。当出现问题时，安全系统能够使操作进入安全状态。

在大规模的工业生产场景中，通过集成控制和安全系统（ICSS）对工厂中的所有过程安全功能进行审查和管理是一种常见的做法，尤其在 100 MW 级别的工厂中已广泛应用，并且日益普及于 20 MW 及以上规模的设施中。这类系统堪比电解工厂的中枢“大脑”，不仅优化了操作流程，提升

了生产效率，还为工厂构筑了坚实的防护网。通过 ICSS，能够高效管理多台大型电解槽的协同运作，实现工厂层面的统一调度与监控。该系统集成了经过严格验证的仪表设备，包括压力温度和液位传感器、流量计、执行机构，以及气体探测传感器等，这些设备不间断地监督系统运行状态与性能表现，确保每一环节运作精准无误。一旦检测到异常状况，ICSS 立即启动预设的安全协议，引导系统平稳过渡至安全模式，有效遏制潜在风险，防止事故扩大。

2 稳定决策

稳定的过程控制至关重要。一个控制良好的系统，甚至可能是自主调节的系统，相较于那些频繁经历过程变动、依赖人工干预调节控制回路的系统来说，显然更加安全可靠。尤其是当电解制氢的电力直接来源于风力发电等可再生能源时，挑战尤为显著。由于这些能源供应的不稳定性，可能会对生产工艺的稳定性造成干扰。在此情境下，集成控制与安全系统（ICSS）的作用尤为关键，它必须展现出高度的灵活性与韧性，即使面对能源输入的波动，也要确保工厂运行的高效与安全。

北海的 PosHYdon 项目是探索海上绿氢生产可行性的一个标志性案例。该项目展示了如何在海上环境中高效整合资源，利用可再生能源生产氢气。艾默生的集成控制和安全系统（ICSS）

在此扮演了核心角色，它不仅监管着电解槽单元的高效运行，还负责监控海水淡化流程，以确保持续的淡水供应用于电解。

数字孪生技术使用物理生产设施和制造过程的虚拟复制，为分析各种“假设”场景提供了宝贵的工具，例如能够评估使用不同整流器或水处理系统的效果，促进工厂设计的优化，包括通过集成数字孪生来验证经过改进的控制策略与安全方案，以及扩展的控制模型和启动/停止程序。该技术还可以进一步延伸至确保法规符合性，以及对提议安全措施的有效性验证，为实现合规与安全目标开辟了新途径。

将电解装置无缝融入现存工业体系中，凸显了数字孪生技术的重要性。它从根本上支持了一种成本效益型方法，即在虚拟环境中预先验证法规遵从性、优化过程控制体系及操作规程，从而在实际部署前确保系统运行的稳健与高效。这样一来，企业在实施数字化转型与绿色升级的过程中，能够更加自信地做出决策，减少风险，加速技术落地与产业升级。

3 温度和流量监测

监测进入电解槽的水流是极其重要的，因为水流不足会导致温度上升，从而点燃易燃气体。通常这种应用需要几个流量计，一个用于控制，一个用于支持安全断开系统。考虑到小型电解槽的紧凑设计，另一个挑战可能是测量设备的可用空间。最新的涡街流量计在仪表外壳中提供两个独立的流量测量，并且只需要非常短的直线测量距离就可以实现精确测量。这些解决了空间有限的问题，同时保证了电解槽的安全运行。

此外，精确可靠的温度测量也很重要：传统的热电偶侵入式测温法，尽管能满足高精度要求，但其应用往往会增加系统设计的复杂度，并可能引

入泄漏风险。因此，追求非侵入式的测温方法成为理想的解决方案。

一种折中的方案是表面温度测量，即在管道外部进行测量，但这通常难以达到生产过程中所必需的准确度和可靠性标准。为解决这一难题，创新的温度监测技术应运而生，该技术结合了环境温度与管道表面温度的测量，并运用先进的热导率算法进行数据处理，以此来进行精确的温度补偿计算。这种方法不仅实现了非侵入式的温度测量，保证了极高的精确度，同时也简化了实施过程，降低了潜在的安全隐患，是提升工艺控制质量和效率的理想选择。

4 流量控制

精确的流量控制是必要的，但这可能是由于系统性能不佳。由于控制阀的设计或选择不正确以及磨损，控制阀可能受到影响。出于成本和员工安全的原因，应该避免定期维护。所有阀门和执行器必须能够在高振动和高压下可靠地工作，并且必须能够在没有泄漏的情况下运行。

与所有工艺应用一样，选择合适的阀门是至关重要的，阀门具有高调节比，以确保精确的流量控制，覆盖广泛的压力和温度范围，以及易于维



Incus 超声波气体泄漏检测系统非常适合监测通风良好的室外区域

护的设计。具有两级执行器、关闭和排放设计的特定应用场景高压阀需要符合严格的关闭要求，特别是在紧急情况下。为了满足排放标准，最大限度地减少产品损失，提高安全性，采用柔性膨胀石墨的精密阀门填料技术，在设计时达到可能的最高排放等级。

压力保护机制关键依赖于减压阀的正确运作，这些阀门负责在压力超限时释放多余介质，以防止系统过载。然而，若减压阀设定过大，则可能导致产生不必要的损耗。因此，设备上的减压阀必须具备优秀的阀座密封性能，用以有效阻止任何潜在的危险泄漏。最新的可调节安全阀设计，在保障安全的同时优化了系统性能，它们能够在非常接近预定压力值的条件下稳定工作。这样的设计不仅提升了系统的处理能力，还能确保减压排放过程更加精准可控。尤为重要的是，这些先进阀门提供了高达 98% 的阀座密封效率，极大增强了防止泄漏的能力，从而在确保安全操作的同时，也维护了生产效率和经济效益。

5 氢氧分离器

监测氢气和氧气分离器中的液位对于防止过量充填及确保氢气和氧气正确输入至关重要，同时避免这两种气体错误地渗入水系统，这是一个极具挑战性的任务。即使是能提供极高精确度与稳定测量的导波雷达设备，在此应用中也面临考验，因为所处理介质的介电常数极低。采用配备有探头端部投影技术的雷达测量仪器，能够有效应对这一挑战，实现此类低介电介质的精确测量。此外，雷达传感器若具备动态蒸汽补偿功能，则能进一步消除由蒸汽压力和温度波动引起的测量误差，这一特性对于维持测量的准确性与可靠性至关重要。通过这些高级技术手段，不仅能确保操作

的安全性和高效性，还优化了整体处理能力，防止因误操作导致的系统拥堵，从而在保证安全的同时，最大化生产效率。

除了提高过程可视性外，非侵入式无线传感器还可以可靠地确定氢-氧混合物，检测泄漏，并在关闭前指出可能的维护问题。同样，无线传感器可以在进入电解槽之前及早发现水质问题，从而防止对硬件造成不可逆转的损害。数字孪生解决方案允许使用实时仪表板过程模拟和虚拟测试新设计，以便更好地理解弱点和提高效率的机会，而不会威胁到生产。

6 检测泄漏

加氢过程中材料的脆性增加了泄漏的风险。因此，尽早发现氢气泄漏是非常重要的。然而，就像天然气一样，泄漏检测可能是困难的。一种选择是混合气味物质，但气味物质可能会污染燃料电池，所以这种方法并不适用于所有应用。一般来说，很少有泄漏是通过传统的解决方案发现的，如个人监测或内置气体检测。这些系统也容易受到误报的影响。气体泄漏检测与超声波，点和开路式气体探测器增加了检测的可能性，并提供准确的报警，即使在户外环境。

氢燃烧时发出的火焰几乎是肉眼看不见的，而光学火焰——传感器探测到火焰发出的电磁辐射。使用 UV / IR 火焰探测器可以看到火焰。多红外探测器的设计目的是在毫秒内探测到 90 m 范围内的火焰。

依托于先进的自动化技术，绿氢生产园区能够实现自主且安全地运营，这得益于集成的自动化安全功能及全厂范围内过程与机械设备状态的高度透明化。通过一个集中化的控制、维护、诊断及优化中心，生产园区能够统一协调管理，确保各环节高效协同，进而推进绿氢生产的可持续与智能化发展。