

析与应用的全链条解决方案。在数据采集层面，部署高精度多模态传感网络是基础，通过集成振动传感器、温度传感器、视觉传感器等异构采集设备，实现制造全过程数据的实时捕获。特别是在精密加工场景中，需要采用微秒级采样频率的高速采集系统，确保能够捕捉到瞬态工艺参数波动。

数据治理环节需建立分层分类存储架构，对不同类型数据实施差异化存储策略。采用“数据湖”技术构建企业级数据底座，兼顾结构化与非结构化数据处理需求。在机械装备预测性维护中，基于时序数据库的存储方案提升了振动数据查询与分析效率。数据分析层面要构建多尺度挖掘框架，结合机器学习算法与领域知识提取有价值信息。在智能质量控制方面，用深度学习算法提取产品表面缺陷数据特征，建立关联模型以分析质量问题根因。更深入挖掘数据价值可构建“数字孪生”系统，以虚拟映射物理实体，支持工艺优化与预测决策。数据安全贯穿管理体系，需建立分级授权机制和加密传输方案，确保核心工艺数据安全可控。

4.4 完善多层次政策支持与产业引导机制

强化政策支持引导需要构建系统性的政策保障体系。产业政策层面应当突出精准性和导向性，设立“智能制造转型升级专项资金”，重点支持人工智能在高端装备、机器人等领域的创新应用。采用“揭榜挂帅”机制组织行业关键技术攻关，激发各类创新主体的积极性。对率先开展智能化改造的示范企业给予研发费用加计扣除等政策激励，形成良好的示范效应。基础设施建设是政策发力的重点领域，需要加快推进工业互联网标识解析体系覆盖，建设行业级工业大数据中心。

特别是在区域层面规划建设“智能制造特色园区”，集聚技术、人才、资本等创新要素，为中小企业提供技术支持服务（如图2）。市场监管与标准规范建设需要把握发展与安全的平衡，加快制定人工智能在机械电子工程领域的产品认证、数据安全、系统可靠性等标准规范。建立“创新产品绿色通道”，对新技术新产品实施包容审慎监管。在产融结合方面，鼓励设立产业发展基金，引导社会资本投向人工智能与机械电子工程融合的重点领域。开展知识产权证券化试点，帮助科技型企业盘活无形资产。这些政策举措需要形成合力，既关注短期突破，也注重长效机制建设，通过政策引导和市场驱动相结合，营造有利于技术创新和产业升级的良好生态。



图2 智能制造特色园区鸟瞰图

5 结语

人工智能技术赋能机械电子工程的过程是一个系统性工程，需要技术、人才、数据、政策等多重要素的协同推进。在实践层面，既要注重突破关键技术瓶颈，又要构建可持续发展的创新生态。通过建立产学研用深度融合机制，形成技术突破、人才培养与产业应用的良性循环。未来，随着人工智能技术的持续演进和应用场景的不断拓展，机械电子工程将实现从单点智能向系统智能的跨越，最终构建起具有自感知、自决策、自执行能力的智能生产体系。这一转型过程不仅需要技术创新突破，更需要各方主体的协同参与，共同推动机械电子工程迈向智能化发展新阶段。

参考文献

- [1] 李震.人工智能赋能中职汽车电子技术专业教学资源智能化建设研究[J].汽车测试报告, 2024(22):143-145.
- [2] 李照.人工智能赋能农业机械化的探索与实践[J].江苏农机化, 2024(6):32-34.
- [3] 赵大虎,苗启广,王泉.西安电子科技大学:人工智能赋能高等教育的探索[J].陕西教育(综合版), 2025(3).
- [4] 王俊伟.人工智能赋能智慧健康养老:养老服务智能化升级路径探讨[J].社会与公益, 2025.
- [5] 张夏恒,马妍.生成式人工智能技术赋能新质生产力涌现:价值意蕴,运行机理与实践路径[J].电子政务, 2024(4).
- [6] 陈梅,潘明华.人工智能技术赋能中职汽修专业教学改革[J].汽车维护与修理, 2024(20):41-43.

Application of stepless air volume regulation system in reciprocating compressor to hydrogen production from wind and solar power

Lingxiao Wei Lin Xiang

China Chengda Engineering Co., Ltd., Chengdu, Sichuan, 610000, China

Abstract

This study introduces the application concept of the continuously variable air volume regulation system for reciprocating compressors in hydrogen cylinder external gas supply operations, and proposes a calculation formula for the indicator power of variable inlet pressure in hydrogen compressors under cylinder gas supply conditions. Based on a domestic project, energy consumption analyses were conducted for two compression schemes: hydrogen pre-decompression followed by compression, and direct compression without pre-decompression using the continuously variable air volume regulation system. The application of this system demonstrates significant energy-saving effects. The paper summarizes key considerations for implementing the continuously variable air volume regulation system, highlighting potential issues such as increased compressor costs, reduced reliability, and insufficient reverse angle.

Keywords

wind and solar power hydrogen production, green ammonia, green methanol, reciprocating compressor, stepless gas flow regulation system

往复压缩机无级气量调节系统在风光电制氢上的应用

魏凌霄 向林

中国成达工程有限公司, 中国·四川成都 610000

摘要

介绍了往复压缩机无级气量调节系统在氢气球罐向外供气工况, 氢气压缩机上的应用思路, 提出了氢气球罐供气工况, 压缩机变入口压力指示功的计算公式, 依据国内某项目, 对氢气先减压后压缩和应用无级气量调节系统无减压直接压缩的两种压缩方案进行了能耗分析, 应用无级气量调节系统节能效果显著。归纳了无级气量调节系统应用的注意事项, 应关注其造成的压缩机造价升高, 可靠性下降和反向角不足等问题。

关键词

风光电制氢; 绿氨; 绿甲醇; 往复式压缩机; 无级气量调节系统

1 引言

随着国内绿色能源的发展, 风光发电的装机容量越来越高, 发电成本逐年降低。为解决风光发电难以并网的问题, 以及受国内外对绿氨、绿甲醇的政策补贴影响^[1], 逐渐发展起来了采用风光发电电解水制绿氢, 并耦合合成氨工厂、合成甲醇工厂, 就地生产绿氨、绿甲醇的技术路线^[2]。

化工厂需要稳定的原料氢气供应, 而风光发电往往不稳定, 制氢生产负荷波动受环境影响有较大波动。化工厂和电解水制氢工厂之间, 往往需要设置氢气球罐作为缓冲罐。当制氢负荷降低无法满足化工厂生产时, 氢气球罐放出氢气, 通过氢气压缩机加压输送至化工厂。

2 氢气球罐后端氢气压缩机的工况特点

氢气球罐的供气过程压力是逐渐降低的, 对于后端的氢气压缩机来说, 压缩过程为入口压力逐渐下降, 出口压力保持不变(即压缩比逐渐增大), 化工厂端要求质量流量保持不变, 压缩机入口容积流量需逐渐增大。

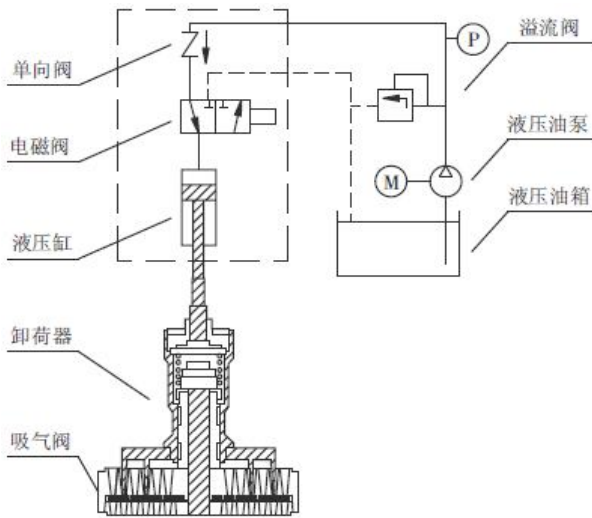
氢气压缩机通常采用往复式压缩机, 为满足球罐最低供气压力, 压缩机需按照最大压比进行设计选型, 通常采用2~3级压缩。往复压缩机多级压缩时, 存在内容积比, 无法应对入口压力大幅变化的工况, 为保证压缩机的稳定运行, 通常需要先将球罐中的氢气减压至球罐放气压力的下限, 再进入氢气压缩机增压。这种方式可以满足氢气压缩机入口压力保持恒定, 但对球罐气高压氢气的压力能造成了浪费, 不经济不节能。下面提出应用往复压缩机的无级气量调节系统, 使氢气无减压直接进入压缩机, 起到节能降耗的思路。

【作者简介】魏凌霄(1991-), 男, 硕士, 工程师, 从事石油化工装置动设备的相关设计选型研究。

3 无级气量调节系统在氢气压缩机上的应用思路

为了实现氢气无减压直接进入压缩机,充分利用氢气的压力能,压缩机需设置气量调节系统。往复压缩机气量的调节方式通常有旁路回流调节、变频调节、可变余隙容积调节、吸气阀卸荷调节、无级气量调节等方式。回流调节和变频调节无法改变压缩机内容积比,不适用于入口压力变化的工况。可变余隙容积调节,通过液压/气动装置调节气缸端盖位置,改变气缸余隙容积,进而影响气缸的有效容积,可以调节容积比。但可变余隙容积调节范围太小,不能满足氢气球罐放气压力大幅变化的工况,而且会增加气缸泄漏点。吸气阀卸荷调节,即在进气阀上设置强制顶开机构,使得进气阀无法关闭,进而改变气缸的有效容积,但卸荷器只有开启和关闭两个档位,如对每一级都是单个双作用气缸的压缩机来说,可实现0、50%、100%三档流量调节,精度不足,不能满足压力连续变化的工况。

无级气量调节系统,和吸气阀卸荷调节的原理相似,通过一套液压系统和高频开关电磁阀和控制系统,以电磁阀的开度控制油压和执行机构的动作,可以实现对压缩机各级进气阀阀位的精准控制,无级调节各级进气阀的关闭时间,各级气缸的进气量都可以实现0~100%的全程无级调节,可以适应球罐的整个气过程。无级气量调节系统调节精度高,响应速度快,节能效果最好。无级气量调节系统通常由卸荷器、液压缸、高速电磁阀、液压油泵、液压油箱、PLC控制系统等组成,如下图所示^[1]:



图一 无级气量调节系统组成

以国内某项目为例,氢气压缩机采用三级压缩,应用无级气量调节系统,氢气球罐气直接进入压缩机,其工作过程为:在球罐气初期,压缩机入口压力高于3级气缸设计入口压力,这时前两级气缸吸气阀强制顶开,3级气缸吸气阀根据入口压力变化无级调节,以满足出口压力和流量的稳定,这时压缩机前级都不做功;随着球罐压力下降,当压缩

机入口压力低于3级气缸设计入口压力,高于2级气缸设计入口压力时,1级气缸吸气阀强制顶开,2级气缸吸气阀根据入口压力变化无级调节,3级气缸吸气阀正常工作,这时压缩机第1级不做功;当压缩机入口压力低于2级气缸设计入口压力时,1级气缸吸气阀无级调节,2级和3级气缸吸气阀正常工作,直至氢气球罐压力达到气压力下限,压缩机停止工作。整个调节过程可以通过监测压缩机入口压力、级间压力、出口压力、出口流量等参数实现全自动控制,无需人工干预,自动化程度高。

4 氢气压缩机应用无级气量调节系统节能效果估算

以国内某项目为例,设置10台氢气球罐,单台容积为2000m³。氢气球罐放气压力为1.5MPaA(初始)至0.2MPaA(终了),按环境温度40℃计算,10台球罐总容积为258500Nm³,总气量为224000Nm³。设置1台氢气压缩机,额定流量为4000Nm³/h,出口压力为2.4MPaA,采用三级压缩。下面对氢气球罐一次完整放气过程消耗的总压缩指示功进行计算分析:

方案一:将氢气减压至球罐放气压力下限(0.2MPaA)后,进压缩机

往复压缩机单级指示功耗计算公式如下^[4]:

$$W_i = mRT_i \frac{k}{k-1} \left[\left(\frac{p_{out,i}}{p_{in,i}} \right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right] \quad (1)$$

式中,m为气体质量;R为气体常数;T为每级进气温度;k为绝热压缩指数;p_{in}为每级进口压力,p_{out}为每级出口压力。

则压缩机总指示功耗为:

$$W = \sum_{i=1}^3 W_i = mRT_i \frac{k}{k-1} \left[(\varepsilon_i)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right] \quad (2)$$

方案二:应用无级气量调节系统,氢气无减压直接进入压缩机

氢气球罐放气过程近似于等温等容过程,则有:

$$\frac{p_{out,i}}{p_{球罐}} = \frac{m - m_{放气}}{m} \quad (3)$$

变入口压力无级调节的气缸,其指示功可看出对放气质量m的积分,表示如下:

$$W = \int RT_i \frac{k}{k-1} \left[\left(\frac{p_{out,i}}{p_{in,i}} \cdot \frac{m_{总}}{m_{总} - m} \right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right] dm$$

压缩机运行分为三个阶段,1)当进气压力高于三级额定进气压力p_{m,3}时,球罐放气至p_{m,3}的放气量为m_{s1},此过程压缩机前两级不做功,第三级指示功耗为:

$$W_{s1,3} = \int_{m=0}^{m_{s1}} RT_3 \frac{k}{k-1} \left[\left(\frac{p_{out,3}}{p_{初始}} \cdot \frac{m_{总}}{m_{总} - m} \right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right] dm \quad (4)$$