

双碳背景下 我国空压站房系统节能方案研究

潘丰

阿特拉斯·科普柯（上海）贸易有限公司

摘要：压缩空气具有清洁、便捷等特点，广泛应用于我国各行各业的工业企业，是工业的第四大能源。碳中和背景下，传统空压站房具有较大的能效提升空间，是我国工业企业在国家“双碳”政策下实现节能降碳的重要目标。本文从全生命周期的角度出发进行分析，针对我国传统工业企业压缩空气系统等能效现状，从技术、标准、理念和管理等方面，给出系统化的节能改进方案。

关键词：压缩空气；系统节能；绿色制造；能效提升；全生命周期；碳减排

压缩空气作为一种动力源，广泛应用于机械、纺织、化工、水泥、装备以及钢铁等行业。对于工业企业而言，压缩空气站是工业企业的耗能大户，拥有巨大节能降碳空间。根据2023年的统计资料显示，2023年全国社会总用电量为92 241亿kW·h，工业用电占社会总用电量的65%，年用电量达60 000亿kW·h。我国压缩空气系统总耗电量约占工业总用电量的15%，年耗电量9 000亿kW·h，潜在节约最大能耗超过3 600亿kW·h，直接经济效益超过3 000亿元^[1]。

在“十四五”规划和“双碳”国家大战略中，国家对工业企业的支持政策，从继续加强研发项目到深入实施智能、绿色化制造，发展新服务型的制造模式，推动高端化的制造业。在压缩空气系统节能领域，工业企业在关注安全和可靠的基础上，需要更加关注压缩空气的工业节能特性，这将为我国工业企业实现节能降碳发挥重要作用^[2]。

因此，更好地关注和理解压缩空

气系统的创新性解决方案和实际应用，在压缩空气的制造、输送和应用中，实现节能与降碳。深入研究压缩空气能源供应系统，可以为工业用户提供更多的技术选项和支撑，赋能工业企业绿色低碳转型和高质量发展。

1 压缩空气系统能效现状和问题分析

压缩空气供应是一个综合系统，它在生产应用过程中，通过空压机与干燥机、储气罐以及净化过滤装置等组成空压站提供气源，并通过输气管网将压缩空气输送至末端用气设备。一个典型空压机站通常包括空压机、储气罐、气水分离器、干燥机、过滤器、管道以及智能监控系统等，这些设备往往由不同的制造商生产，而整个压缩空气站的设计与安装工作则通常由专业的空压机公司或节能服务公司来负责完成。

如图1所示，压缩空气系统的总能耗不仅受空压机等设备自身要素的影响外，还取决于系统的整体设计、控制调

节以及使用维护等诸多因素。因此，一个高效低碳的压缩空气系统在建设初期，不仅需要关注设备选型的能效，同时在整个系统的方案设计时，还要考虑生产运行和设备维护等客观条件，才能使空压机等设备在最优效率范围内进行高效、节能的生产^[2]。

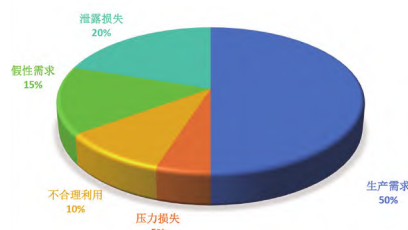


图1 压缩空气系统生命周期成本分布

2000年以后，我国经济迎来高速发展期，尤其是政府加大了对基础和能源设施及国民经济各领域的建设投资，极大地促进了压缩机制造企业的迅速发展。在这快节奏的投资发展阶段，设备采购和使用企业由于经济、技术和管理等多方面的原因，往往更多地关注设备初始采购成本、企业如何快速生产等经济因素，忽视了压缩空气系统的能耗对企业可持续生产和社会环境的影响。虽然我

国压缩机产业整体技术水平、装备能力已经得到全面的提升，但整体压缩空气系统能耗和企业低碳化生产方面还是存在很大的改善和提升空间，需要各方人士、专业机构和政府有关部门共同努力推进。

2 关注设备初始采购成本，忽略全生命周期使用成本

空压机的应用涉及众多工业行业，在企业的生产中起着重要作用。在我国工业企业的发展初期，由于产业技术水平和追求利益等多方面原因，企业秉持着“少花多赚”的原则，把重点放在了设备初始的采购价格方面，往往忽略了空压机的性能指标。但在设备的长期运营中，其总成本（TCO）不只是采购价格所能概括的。这种一概而论的选购不仅无法充分解决每个业务的独特需求，而且更容易在使用过程中产生严重的资源浪费，从而导致更高的总成本。

如图2所示，在空压机的10年使用成本构成中，设备初期投资仅占10%~20%，使用期间的维护、管理成本分别占5%~10%，70%~80%的成本来源于能源消耗。显而易见，空压机的能耗成本远大于初期的设备采购成本，是企业长期运营成本的重要组成部分，长远来看会对企业的产品竞争力、可持续发展等产生影响。节能型的空压机不仅符合可持续发展的目标，而且能够节省大量运营成本，为企业创造长期节能效益。随着工业化的快速发展，能源危机和环境污染已成为我们面临的重要问题，空压站的节能减排不仅可以减少企业的生产成本，也能为我国节能减排的事业作出贡献^[2]。

2.1 设备选型不当，使用效率低

由于空压机的种类繁多、型号不一，加之各行业对空压机性能和应用的具体要求存在较大差异。因此企业在采购空压机时，需要根据生产企业

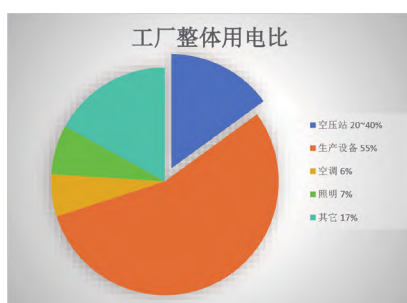
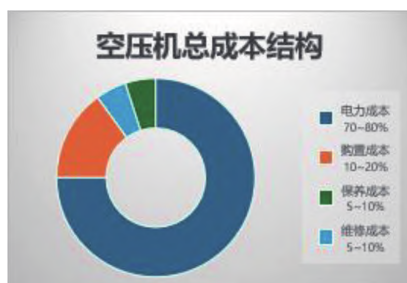


图2 工厂整体用电比例和空压机总成本结构

的需求工况和参数，选择合适的机型和数量。有些企业由于设备选型和实际需求不匹配，导致所选空压机的压力和气量超出实际需要，进而造成设备运行效率下降，引发不必要的能源浪费。因此，合理评估并满足实际需求是避免此类问题的关键。

如图3所示，我国空压机的整体负荷率和世界发达国家相比差距较大，远低于世界平均79%的负荷率。另外，对低负载状态下各国空压机的资源利用情况进行比较，我国在空压机资源的利用率上明显偏低。由此可见，我国在空压机的选型和利用上有着巨大的改进空间。因此提升空压机的能效、减少能源浪费是我国工业企业当前阶段下势在必行的工作，对我国实现碳中和的目标有着显著的意义。

2.2 关注设备理论节能，忽略实际使用效果

随着节能减排意识的日益增强，越来越多的企业意识到空压机能耗在其总能耗中占据较大比例这一现象，合理的能量管理对于降低企业生产成本具有重要意义。因此，在空压机的使用和新设备采购过程中，企业管理

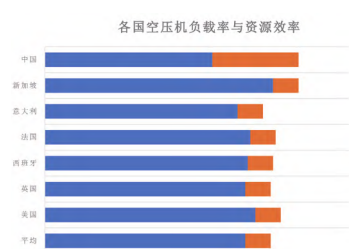


图3 各国空压机的负载率与资源效率

层越来越重视设备的节能特性，积极引入诸如变频控制、永磁电动机、双级压缩及无负载自动停机节能技术，以实现更加高效、环保的生产运营。

压缩机单机的节能技术专注于单机比功率的降低，是提高压缩空气系统能效的重要手段之一。单一设备节能在一定程度上可以实现节能效果，但需要在一定的使用范围内才能发挥出有效的节能作用，否则无法实现整体系统的能效提升。如变频控制、永磁电动机都是当下主流的节能技术，但如果想发挥出其应有的节能作用，则需要考虑相应的使用条件和范围对效率的影响。在实际的应用过程中，因受到不同使用工况、应用环境和客观条件等因素的影响，这些单一的节能设备往往无法发挥出应有的技术水平，达到预期的节能效果。

变频控制器通过控制压缩机的转速来实现压缩机的调节能够根据实际工况需求进行灵活调节，实现节能效果。但无论是空压机主机效率还是电动机效率，都有其额定转数（最佳转数），如图4所示，偏离了最佳转数，其效率都会降低。

永磁电动机虽然在额定电压的

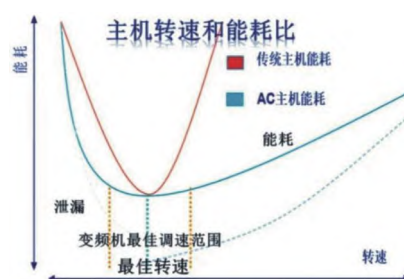


图4 空压机主机转速和能耗

时候有很好的节能效果,但是在实际电压偏离额定电压的时候,电流都会急剧增大,功率因数变小,节能效果大幅度减弱。由图5可以看出:偏差在 $\pm 3\%$ 电压范围内时,电动机功率因数 ≥ 0.9 ,否则功率因数较低。另外,对于常规结构的永磁电动机,在不同负载下的运行特性差别很大,负载率低于25%,也会导致功率因数降低。

2.3 依赖人为经验和操作,缺乏系统节能管理

传统的空压站通常依赖人工值守,利用集中控制系统来协调多台空压机的工作,以此防止因参数设置不当而导致的多台空压机出口压力逐级升高,避免由此引起的额外能耗增加。尽管这种集中控制系统能够有效地联动控制空压站内的后处理设备,并对供气系统的各项参数(如流量、温度和压力等)进行实时监控,及时识别并解决运行中的问题,从而提升系统的整体可靠性,但其智能化水平相对较低。特别是在面对生产需求变化时,仍需值班人员根据调度指令手动执行空压机的启动、切换或停止等操作。

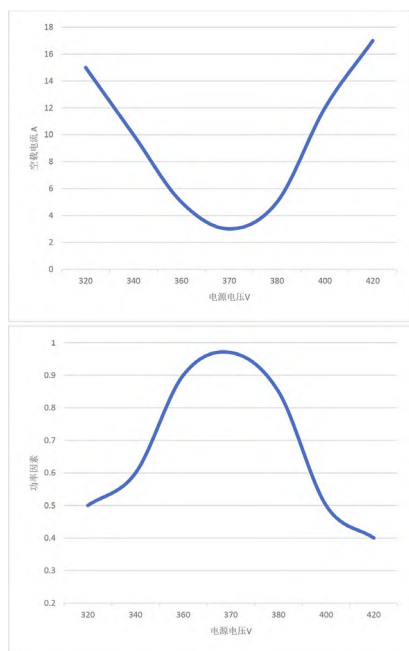


图5 22 kW 永磁电动机不同电压下的空载电流与功率因素

但这种控制方式很大程度上依赖专家的经验 and 判断,在准确率、智能保护、控制方式和灵活调动性等方面无法实现完全的智能化,需要人工值守操作。而压缩空气系统整体能耗的降低要比单机更为复杂,依赖于专家经验的系统节能只是局部,在许多应用场景下并未实现全系统节能,这将

对压缩空气系统节能的长期效果产生影响。因此需要采用全自动化改善设备控制,提升整体系统的智能调控,尽量降低压缩空气系统的整体能耗。

3 压缩空气系统节能降碳改进方案

压缩空气系统具有普遍性、复杂性、系统性以及高耗能等特性,通过深入研究系统创新性解决方案和实际应用的理论,关注压缩空气系统的能源属性,在压缩空气的制造、输送和应用中,实现节能与降碳。

随着系统节能理念的不断普及,客户越来越多地关注和理解压缩空气系统的能源属性,深入研究压缩空气能源供应系统,通过各种先进技术选项和支撑,赋能企业绿色低碳转型和高质量发展。

3.1 响应国家政策和行业要求

工业节能改造在当前具有极其重要的意义和紧迫性,随着环境保护、可持续发展等问题受到更多的社会关注,工业作为能源消耗的大户,其节能改造势在必行。国家政策层面先后推出了《工业领域碳达峰实施方案》等行

流程工业

流程工业投稿通道正式开启

机械工业信息研究院期刊管理数字化平台



<https://manuscript.jgcm.ac.cn/lcgy>



广告

动计划和方案，从政策上引导企业积极落实国家双碳政策和行业减碳要求，并设立各类专项节能补贴促进行业整体健康、可持续的发展。

同时，空压机行业协会也积极落实国家节能减碳的倡导，推出了《绿色设计产品评价技术规范一般用喷油回转空气压缩机》《压缩机行业绿色工厂评价要求》等绿色制造标准。为了使企业能够有效对压缩空气系统进行评估，推出了GB/T 19153—2019《容积式空气压缩机能效限定值及能效等级》、GB/T 16665—2017《空气压缩机组及供气系统节能监测》、GB 50029—2003《压缩空气站设计规范》和 T/CGMA033001—2018《压缩空气站能效分级指南》等标准和参考依据，有效推进了压缩空气系统的节能、高效发展^[3]。

生产企业在落实国家双碳政策和行业减碳要求的时候，不仅可以通过选用高效节能的空压机设备打造能效领先行业水平的压缩空气系统，还可以积极申报工信部“高效节能装备”、行业“能效领跑者”国家级和省级“节能技术、设备（产品）推荐目录”“零碳工厂”等，将节能成果的转化落地。

3.2 选用高效节能技术和设备

随着工业科技的不断进步和发展，空压机行业也持续涌现出各种新的高效节能技术和应用，除了传统的螺杆式空压机取代活塞机以外，近年来涌现的高效节能技术有永磁同步电动机、智能变频、二级压缩、轴向磁悬浮等。这些技术的成功应用极大地推动了空压机的能效发展，目前螺杆机一级能效空压机比二级和三级的同类产品分别节能 15% 和 30% 左右。

在压缩空气系统中，与空压机配套的干燥机技术不断取得突破和广泛应用。除了传统的冷冻式干燥机、无热及微热再生干燥机之外，一些更加节能高效的吸附式干燥机如图 6 所示，例如鼓风热吸附干燥机和压缩热吸附干燥

机，正逐渐成为节能应用的新趋势。这些新型干燥机主要通过优化变压吸附技术和结合高温再生方法来达到节能效果。传统无热和有热吸附干燥机在再生过程中大约需要消耗相当于空压机能耗 15% ~ 20% 的能量，相比之下，鼓风热和压缩热吸附干燥机通过改进流程和加热方式显著减少了能源消耗。特别是压缩热吸附干燥机，它能够有效利用空压机产生的压缩余热来进行干燥剂的再生过程，极大地降低了系统的整体能耗，已成为现代压缩空气系统中实现节能减排的重要手段之一^[4]。

因此，企业在进行空压站的设计和选型时，不仅需要根据用气需求对空压机、后处理设备、管道等进行合适的配置与选型。在条件允许的情况下，还需要优先考虑选用高效、节能的机组，并淘汰能效低的技术和机组。

3.3 智慧高效节能的压缩空气站

压缩空气站主要糅合高效压缩机和干燥机设备、智慧控制系统、余热回收技术、低压损管道等达到智慧高效节能，从而减少碳排放。

3.3.1 智慧控制系统

空压站智慧控制系统通过先进的物联网技术连接空压站房的各种设备和仪器仪表等，如图 7 所示，对需要监控的数据全部进行实时采集、状态监控、模拟画面展示等，一目了然地呈现整个空压站的运行状态。并通过大数据

分析技术对工业企业空压站站房进行实时智能分析，根据实时用气量，采用节能优化模型自动匹配对应满足供气要求的设备运行，实现次序控制、均衡使用、安全稳定、无人值守全自动化管理。

基于人工智能及大数据技术，为空压站系统提供完全自主化的智能决策支持，帮助管理人员更方便地管理空压站，更节能地满足车间用气需求，更科学地进行设备管理维护。

3.3.2 余热回收技术

空压机将输入的电能通过压缩方式转换为势能，气体在压缩时会受到挤压后产生大量热能。空压机输入的电能中只有 15% 转变为压力能，而 85% 转

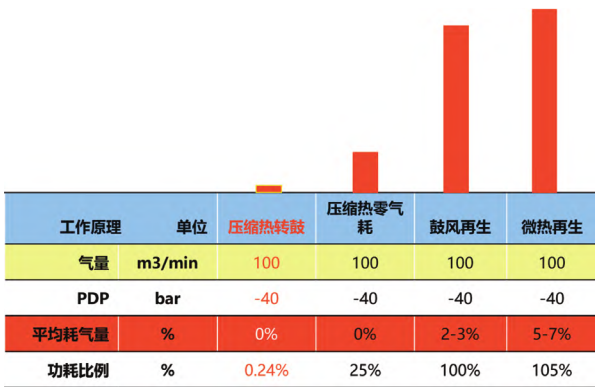


图 6 不同类型吸附干燥机能耗对比



图 7 智慧空压站控制系统功能介绍

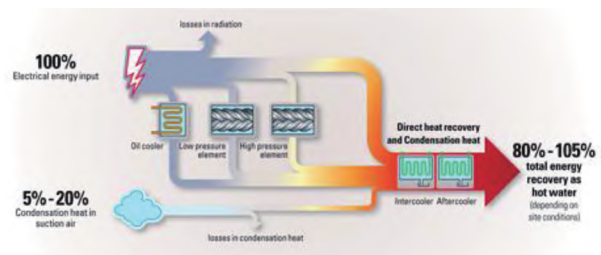


图 8 空压机余热回收原理

化为压缩热后通过循环冷却水系统或冷却风直接排放到大气中。余热回收技术可以有效将 70% ~ 80% 的热量回收产生 70 ~ 90℃ 的热水,不仅可以用于车间用热水、生活热水,还可以用热来干燥污泥和物料等,达到节能降碳和降低成本的双重目的。另外,通过结合热泵的技术,还能将回收的 70 ~ 90℃ 低品位热源转化成 120℃ 以上的热源,可以更广泛地应用到各种工业应用中^[5]。

空压机余热回收是非常高效的一种节能方式,其原理如图 8 所示,整个系统的能耗只有循环水泵的能耗,其余基本是零能耗,真正做到低碳环保节能效果,相当于系统一次性投入,持续收益。与其他能源相比,可持续为企业节省较大的能耗,为社会环保事业贡献极大。

3.3.3 降低管路系统压力和泄漏

空压机排气压力越高能耗越大、泄漏越多,这就是管路产生能耗的主要原因。管路每降低 0.1 MPa 的压力,压缩空气系统的能耗可以降低 7%,并且管网泄漏率也能够随之降低 13%。在同等管路条件下,降低并稳定系统供气压力,可以在保证系统生产顺利进行的前提下降低能源消耗。

压缩空气通过管道输送到各个用气端,在设计管网时应尽量布置环形管网,平衡各点用气压力。压缩空气管路示例如图 9 所示,通过流量、流速和管径的合理匹配减少流动阻力,并减少设备之间管道连接,达到降低管路压降的目的。同时,在管路支路上设立压力测点,详细检查各段的压降,有问题的管网段可以及时发现并检查维护。一般从空压机的排气口到末端的用气点,管路的压降不超过 1 bar,严格的甚至是不超过 10%。

3.4 整体空压站房能效评估

高效空压机房强调的是整个空压机系统的运行能效,而不只是空压机单台设备的能效,包括了供气侧、输

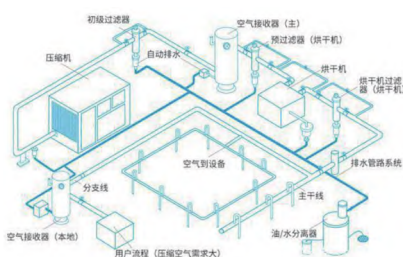


图 9 压缩空气管路示例

送管路系统和用气侧组成的系统。标准文件 CGMA033001—2018《压缩空气站能效分级指南》里面规定了工业压缩空气站设备和系统要求、运行要求、能效分级、监测方法及综合评价。

《压缩空气站能效分级指南》是我国第一个空压机行业的团体标准,响应国家绿色制造、节能减排政策的具体体现。该标准于 2018 年 10 月 1 日发布,由中国压缩机协会、制造企业 AC 公司、合肥通用所合作发起。自 2019 年 1 月 1 日正式实施后,帮助用户开源节流从系统节能综合利用中受益。

位于秦皇岛的中信戴卡工厂,是铝车轮行业的全球首家灯塔工厂,也是河北省的首家“灯塔工厂”。通过多项智能化科技项目的落地,实现生产成本降低 33%,设备综合效率提升 21.4%,能源使用效率提升 39%。为了提升汽车轮毂品质和节能减排效能,投资建设全新的压缩空气站,并打造成了全国第一个一级能效空压站房,如图 10 所示^[4]。

其全套压缩空气系统及后处理解决方案由 AC 公司的无油离心式空压机、变频无油螺杆空压机、零气耗压缩热转鼓式吸干机、热能回收系统和智慧集控系统等主要设备组成。投入运营后的新压缩空气站实现的节能收益非常显著,经过合肥通用所专家 24 h 的标准连续监测,新空压站的整体输功效率达到 55.74%,高于《压缩空气站能效分级指南》规定的一级指标 3% 以上(行业团标分为 5 个等级,每个等级相差 10%)。目前,每年帮助企业减少 200



图 10 一级能效空压站房方案系统示例

多万度的用电,节省资金 150 万元,和原来相比降低了 20% 以上的成本。

4 结语

为了实现压缩空气系统的节能降耗,必须从系统的整体角度出发,遵循“源头控制、过程管理、末端治理”的原则,运用智能化技术和方法,持续优化生产能耗。这就要求采取多维度的思考和管理模式,将适合的节能产品和技术应用于实际生产中,并建立系统的评估标准来实时监测和管理能效。通过全面评估压缩空气站的能效表现,不仅能帮助企业在降低能耗、减少碳排放和控制生产成本方面取得成效,同时也为推动全社会节能减排,助力我国实现碳中和目标作出重要贡献。

参考文献:

- [1] 袁开宇, 陈黎, 王翠, 等. 影响空压机能耗利用的关键因素分析[J]. 压缩机技术, 2023 (02): 53-56. DOI: 10.16051/j.cnki.ysjjs.2023.02.012.
- [2] 秦勇, 王荣华, 张振生. 空压机节能控制系统的数字与智能化应用研究[J]. 中国设备工程, 2021 (15): 36-37.
- [3] 田旭东, 任芳, 王乐, 等. “双碳”目标下压缩机标准体系的建设和发展[C]. 首届中国压缩机产学研融合学术年会论文集, 2023: 54-57, 47.
- [4] 中国通用机械工业协会压缩机分会. 国内首个“一级能效空压站”在秦皇岛挂牌[J]. 中国设备工程, 2019 (19): 3. DOI: 10.3969/j.issn.1671-0711.2019.19.003.