

机械制冷系统能效提升的关键技术路径

王 丽

丹佛斯（天津）有限公司 天津 301700

摘 要：机械制冷系统能效提升主要通过高效设备与系统优化、制冷剂选择与循环优化、换热器效率提升、可再生能源耦合与废热回收以及数字化与智能化管理等技术路径实现。这些关键技术包括应用高效压缩机、变频与智能控制技术，采用低GWP制冷剂，优化换热器结构，结合光储直柔系统与余热回收技术，并利用AI能效优化平台与数字孪生技术，以全面提升制冷系统能效。

关键词：机械制冷；系统能效提升；关键技术路径

引言：随着全球能源需求的不断增长和环境问题的日益严峻，提高机械制冷系统的能效已成为制冷行业的重要课题。机械制冷系统在各工业、商业及民用领域中广泛应用，但其能耗占比较大。因此，探索和实施能效提升的关键技术路径，对于促进能源节约、减少碳排放、推动制冷技术的可持续发展具有重要意义。本文将综述机械制冷系统能效提升的主要技术路径，以期对相关领域提供理论参考和实践指导。

1 机械制冷系统基本原理与能效评估方法

1.1 机械制冷系统基本原理

1.1.1 制冷循环过程

机械制冷系统是现代制冷技术的重要组成部分，其基本原理依赖于制冷剂的物理状态变化来吸收和释放热量。制冷循环是机械制冷系统的核心，该循环主要包括以下四个关键过程：（1）压缩。制冷剂在压缩机中被压缩，温度和压力随之上升。这一过程为后续的冷凝过程提供了足够的压力和温度条件。（2）冷凝。在冷凝器中，高压高温的制冷剂通过释放热量给外部环境而冷凝成高压液态。冷凝器通常使用冷却水或空气作为冷却介质。（3）节流。液态制冷剂经过节流装置（如膨胀阀或毛细管）时，压力和温度迅速下降，部分制冷剂开始蒸发，形成气液混合物。（4）蒸发。在蒸发器中，制冷剂吸收被冷却物体的热量而蒸发，实现制冷效果。蒸发器内的制冷剂温度较低，能够有效地吸收周围环境的热量。

1.1.2 主要部件及其功能

（1）压缩机：提供制冷剂循环所需的动力和压力差，是整个制冷系统的核心部件。（2）冷凝器：用于释放制冷剂中的热量，使其冷凝成液态。（3）蒸发器：制冷剂在蒸发器内蒸发，吸收周围环境的热量，达到制冷目的。（4）节流装置：控制制冷剂的流量和压力，保证制冷循环的稳定进行。

1.2 能效评估方法

1.2.1 能耗比、能效比（COP）等常用指标

（1）能耗比：指制冷系统消耗的能量与提供的制冷量之比，反映了系统的能源消耗效率。（2）能效比（COP）：在特定工况下，制冷量与输入功率之比。COP值越高，表示制冷系统在消耗同等电能的情况下能提供更多的制冷量，能效表现越好。

1.2.2 热力学原理与能效分析方法

基于热力学原理，可以对机械制冷系统的能效进行深入分析。热力学第一定律和第二定律为能效评估提供了理论基础。通过热力学循环分析法，可以评估制冷循环系统的卡诺效率和热力学参数，从而了解系统的理论性能上限并指导优化设计。此外，利用热力学分析软件模拟法，可以建立制冷循环系统的热力学数值模型，模拟不同工况下的性能变化，为能效优化提供有力支持。

2 机械制冷系统能效提升的关键技术路径

2.1 高效设备与系统优化

（1）高效压缩机技术。压缩机是机械制冷系统中的核心部件，其效率直接影响整个系统的能耗。高效压缩机技术，如螺杆式、涡旋式和磁悬浮离心机，通过优化压缩过程、减少摩擦损耗和提高电机效率，显著降低了能耗。螺杆式压缩机以其运行平稳、压缩效率高而著称；涡旋式压缩机则因其结构紧凑、振动小、噪音低而备受青睐；磁悬浮离心机则通过消除机械摩擦，实现了更高的能效和更长的使用寿命。这些技术的应用，不仅提高了制冷系统的整体能效，还减少了维护成本和故障率^[1]。（2）变频与智能控制技术。变频压缩机和智能调节系统的应用，使得制冷系统能够根据实际需求灵活调整运行状态，从而实现能耗的最小化。变频压缩机通过改变电机转速来调制冷量，避免了传统定频压缩机在部分负荷时的高能耗。智能调节系统则通过传感器、控

制器和执行机构,实时监测和调整系统参数,如温度、湿度和压力,以确保系统在最优状态下运行。这些技术的结合,不仅提高了系统的能效,还增强了系统的稳定性和可靠性。(3)热泵技术替代传统供热。热泵技术是一种高效的热能转换技术,能够将低温热源中的热能转移到高温环境中,从而实现供热或制冷。空气源、地源和水源热泵是热泵技术的三种主要形式。这些热泵系统能够利用自然界中的免费能源,如空气、土壤和水中的热能,替代传统的燃油或燃气供热方式,从而显著降低能耗和碳排放。此外,热泵系统还具有运行稳定、维护成本低和环境友好等优点。

2.2 制冷剂选择与循环优化

(1)低GWP制冷剂替代。随着全球对环境保护意识的增强,低全球变暖潜能值(GWP)制冷剂的开发和应用成为制冷行业的重要趋势。 CO_2 、氨、丙烷及第四代低GWP合成制冷剂等新型制冷剂,以其环保、高效和安全的特性,逐渐替代了传统的氟利昂等高GWP制冷剂。这些新型制冷剂的应用,不仅减少了制冷系统对臭氧层的破坏和全球变暖的贡献,还提高了系统的能效和稳定性。(2)制冷剂循环方式优化。制冷剂循环方式的优化也是提高制冷系统能效的关键途径之一。多级循环和回热循环是两种常用的优化方式。多级循环通过将制冷剂在多个压缩级中逐步升压,减少了压缩过程中的能耗和温升;回热循环则通过利用制冷剂在膨胀过程中的冷量来预热进入蒸发器的制冷剂,从而提高蒸发器的热效率和系统的整体能效。

2.3 换热器效率提升

(1)高效换热器设计与选择。换热器是制冷系统中的另一个关键部件,其效率直接影响系统的热交换性能和能耗。高效换热器,如板式换热器和壳管换热器等,通过优化传热面积、提高传热系数和减少热损失,显著提高了系统的热交换效率和能效。板式换热器以其结构紧凑、传热效率高而广泛应用于小型和中型制冷系统;壳管换热器则因其承压能力强、运行稳定而适用于大型制冷系统。(2)换热器结构传热面积优化与相变过程利用。除了选择合适的换热器类型外,还可以通过优化换热器的结构和传热面积来提高其效率。例如,通过增加传热翅片、采用波纹管或螺旋管等结构来增加传热面积;通过优化换热器的流道设计和相变过程利用来提高传热系数和热效率。这些措施的实施,不仅提高了换热器的性能,还降低了系统的能耗和成本^[2]。

2.4 可再生能源耦合与废热回收

(1)光储直柔系统与离网/微电网运行。将可再生能

源与制冷系统相结合,是实现系统能效提升和能源可持续利用的重要途径。光储直柔系统是一种集光伏发电、储能、直流配电和柔性控制于一体的新型能源系统,能够与制冷系统无缝对接,实现能源的高效利用和灵活调度。离网/微电网运行则允许制冷系统在电网故障或不稳定时,依靠自身的可再生能源和储能设备独立运行,确保制冷供应的连续性和可靠性。这种耦合方式不仅提高了系统的能效和自给自足能力,还增强了其对外部能源市场的适应性和灵活性。(2)余热回收与梯级利用技术。在制冷过程中,会产生大量的余热,这些余热通常被排放到环境中,造成了能源的浪费。余热回收与梯级利用技术则能够将这些余热收集起来,用于其他需要热能的工艺或设备中,如热水供应、空间加热或工业预热等。通过这种梯级利用方式,不仅提高了能源的利用效率,还减少了对传统能源的依赖和碳排放。在实际应用中,可以利用热泵、热交换器或吸收式制冷机等设备来实现余热的回收和转换。

2.5 数字化与智能化管理

(1)AI能效优化平台与物联网(IoT)监测。随着大数据、人工智能和物联网技术的快速发展,数字化和智能化管理已成为提高制冷系统能效的重要手段。AI能效优化平台能够实时监测和分析制冷系统的运行状态和能耗数据,通过机器学习算法预测和优化系统的运行策略,以实现能耗的最小化和能效的最大化。物联网技术则将制冷系统中的各个设备连接起来,形成一个智能的网络,使得系统能够实时监测、控制和管理。这种数字化和智能化的管理方式,不仅提高了系统的能效和稳定性,还降低了运维成本和故障率^[3]。(2)数字孪生技术与模拟优化。数字孪生技术是一种基于物理模型和数据分析的虚拟仿真技术,它能够为制冷系统创建一个与实体系统高度相似的数字模型。通过这个数字模型,可以对制冷系统进行模拟分析和优化,预测不同工况下的能耗和性能表现,为实际系统的设计和运行提供科学依据。这种技术不仅能够提高系统设计的准确性和可靠性,还能够降低试错成本和时间成本。同时,数字孪生技术还能够与AI能效优化平台相结合,实现系统的实时监控和优化调整,进一步提高系统的能效和稳定性。

3 机械制冷系统能效提升的挑战与对策

3.1 技术成本压力与规模化生产策略

(1)成本降低途径。机械制冷系统能效提升的关键技术往往伴随着较高的初期投资成本,这对于许多企业和用户来说是一个不小的负担。为了降低这些成本,规模化生产成为了一个有效的途径。通过扩大生产规模,

企业可以降低单位产品的生产成本,包括原材料采购、生产线建设、人工费用等。此外,政府补贴也是推动高效制冷技术普及的重要手段。政府可以通过提供财政补贴、税收减免等优惠政策,激励企业和用户采用高效制冷技术和设备。(2)技术应用的经济性分析。在进行技术选择和应用时,经济性分析是不可或缺的一环。这包括对技术的投资成本、运行成本、维护成本以及节能效益进行综合评估。通过对比不同技术的经济性指标,企业可以做出更加明智的决策,选择那些既高效又经济的制冷技术。同时,政府和社会各界也应加强对高效制冷技术的宣传和推广,提高公众对节能重要性的认识,从而形成良好的市场氛围。

3.2 制冷剂替代的安全性法规要求

(1)制冷剂选择与使用的安全标准。随着环保意识的增强,低GWP制冷剂的替代成为了一个必然趋势。然而,新制冷剂的物理化学性质与传统制冷剂存在显著差异,这可能会对制冷系统的设计和运行带来挑战。因此,在选择和使用新制冷剂时,必须严格遵守相关的安全标准。这包括对新制冷剂的毒性、可燃性、爆炸极限等进行全面评估,确保其在系统中的安全运行。此外,企业还应加强员工的安全培训,提高他们的安全意识和操作技能。(2)国内外相关法规与标准解读。为了推动制冷行业的绿色发展,国内外政府和相关机构制定了一系列法规和标准。这些法规和标准对制冷剂的GWP值、系统的能效比、安全保护措施等方面提出了明确要求。企业和用户在选择制冷技术和设备时,必须充分了解并遵守这些法规和标准。同时,政府和相关机构也应加强对市场的监管力度,确保高效制冷技术的合法合规应用^[4]。

3.3 技术创新与人才培养

(1)关键技术研发与创新能力建设。技术创新是推动机械制冷系统能效提升的关键动力。为了加快技术创

新步伐,企业需要加强研发投入,建立完善的研发体系和创新机制。这包括设立专项研发基金、组建跨学科研发团队、开展产学研合作等。通过不断攻克关键技术难题,推动制冷技术的持续进步和升级。同时,政府也应加大对制冷技术研发的支持力度,为企业提供政策指导和资金支持。(2)行业人才培养与技术交流机制。人才是技术创新的核心要素。为了培养更多具备制冷专业知识和技能复合型人才,企业需要加强与高校和职业院校的合作,共同开展人才培养工作。此外,企业还可以通过举办技术培训班、召开技术研讨会等方式,提高员工的技术水平和创新能力。同时,建立行业内的技术交流机制也至关重要。这可以促进不同企业之间的技术共享和经验交流,推动整个制冷行业的共同进步和发展。

结束语

综上所述,机械制冷系统能效提升的关键技术路径涵盖了高效设备与系统优化、制冷剂选择与循环优化、换热器效率提升、可再生能源耦合与废热回收以及数字化与智能化管理等多个方面。这些技术的综合应用,不仅显著提高了制冷系统的能效,还促进了制冷技术的绿色发展和可持续发展。未来,随着技术的不断创新和政策的持续推动,机械制冷系统的能效将进一步提升,为能源节约和环境保护作出更大贡献。

参考文献

- [1]黄翔宇.浅谈高效制冷机房系统在节能改造中的应用[J].安装,2024,(02):26-27.
- [2]李璐,刘云,张晓梅.关于制冷空调产品性能检测的研究[J].设备管理与维修,2023,(10):110-111.
- [3]张明杰,徐丽娟,刘杰,戴元双.超市制冷系统制冷循环的能源节约优化研究[J].能源学报,2020,(04):40-41.
- [4]吴志伟.基于自适应运行策略和模型预测控制的制冷暖通空调系统节能优化[J].应用能源,2020,(11):114-115.