

# 工程机械空调制冷系统设计的要点

郭家庆

丹佛斯(天津)有限公司 天津 301700

**摘要:** 工程机械空调制冷系统需适配高温粉尘、剧烈振动等极端工况,其设计围绕制冷量匹配、部件选型、制冷剂选择及抗振密封展开。需精准计算极端环境热负荷,匹配压缩机、蒸发器等核心部件并优化布局;兼顾制冷剂热力学特性与环保性,强化系统抗振与密封性能。针对制冷效果差、部件易损、能耗过高等问题,可通过优化热交换、强化防护、采用智能控制等策略解决,以实现系统与主机性能的协同优化。

**关键词:** 工程机械; 空调制冷系统; 设计要点

## 引言

工程机械作业环境严苛,高温、振动等因素对空调制冷系统提出特殊要求。其不仅需保障驾驶室舒适,更要适应动力源波动以维持设备高效运转。当前系统设计存在制冷量匹配失衡、部件损耗快、能耗偏高等问题。本文围绕制冷系统设计要点,分析制冷量匹配、部件选型布局、制冷剂选择及抗振密封设计,探讨常见问题及解决策略,为提升系统可靠性与能效提供参考。

## 1 工程机械空调制冷系统概述

工程机械空调制冷系统作为保障设备持续高效运转的关键辅助单元,其设计需充分适配极端工况下的复杂需求,既要应对高温粉尘、剧烈振动等严苛环境,又要兼顾动力源波动带来的能效稳定性。系统通过闭环循环实现热量转移,压缩机作为核心动力部件,将低温低压的制冷剂蒸气压缩为高温高压状态,经冷凝器与外界环境进行热交换后,制冷剂冷凝为液态并释放热量,随后通过节流装置的减压节流作用,液态制冷剂进入蒸发器并迅速蒸发吸热,降低驾驶室或设备关键区域的空气温度,完成制冷循环的核心流程。制冷系统的性能表现与部件协同性密切相关,蒸发器的结构设计需优化空气流通路径以提升换热效率,同时配备高效过滤装置减少粉尘堵塞风险,确保长期运行中的稳定性;冷凝器的散热面积与风扇匹配度直接影响热交换速率,在狭小空间内的布局需平衡散热效果与设备整体结构兼容性。针对工程机械作业时的动力波动,系统需具备动态调节能力,通过压力传感器与温度控制器的实时反馈,自动调整压缩机运行状态,避免因动力源瞬时过载导致的制冷中断,同时减少非必要能耗。制冷系统的密封性能与抗振动设计是适应工程机械作业环境的重要考量,管路连接采用耐疲劳的柔性接口,减少长期颠簸造成的泄漏风险,制冷剂的选择需兼顾环保性与热力学特性,在满足

低温性能要求的同时,降低对系统部件的腐蚀性。系统控制逻辑融入智能调节算法,根据环境温度变化与设备运行模式自动切换运行参数,在保障制冷效果的前提下,最大限度降低对主机动力输出的影响,实现辅助功能与主设备性能的协同优化。

## 2 工程机械空调制冷系统设计要点分析

### 2.1 制冷量的合理匹配

(1) 需精准考量工程机械作业环境的极端性,如高温区域作业时,太阳辐射强度大且设备自身产热多,要依据此复杂热环境准确计算制冷量需求,确保制冷系统能迅速降低温度至适宜区间,保障操作人员舒适度与设备运行稳定性。对于长时间处于沙漠等高热环境的工程机械设备,制冷量需大幅提升,以抵御外界持续的高热量输入。(2) 深入分析驾驶室的结构特征,其容积大小决定了空气总量,密封性影响热量交换速率,玻璃面积关乎太阳辐射吸收量,这些因素综合影响制冷量匹配。大容积且密封性欠佳的驾驶室,制冷系统需具备更强制冷能力,才能有效克服热量渗透,维持稳定低温环境。(3) 关注设备运行时的动态热负荷变化,不同工况下设备产热不同,制冷量应能灵活适配。例如挖掘作业时,设备功率大、产热高,制冷系统需及时提升制冷量;在设备待机或轻载运行时,适当降低制冷量,避免能源浪费,实现制冷量与实际热负荷的精准动态匹配。

### 2.2 部件选型与布局优化

(1) 压缩机选型至关重要,需依据工程机械的动力特性与制冷需求确定类型与规格。若设备动力输出波动大,宜选变排量压缩机,它能依据吸气腔压力自动调节输出功率,在动力不稳定时仍可维持制冷效果,减少对主机动力的过度消耗;在动力输出平稳且对成本敏感的场景,可考虑定排量压缩机,但要注意配套蒸发器与冷凝器的合理选型。(2) 蒸发器结构类型多样,管带式、

管片式、层叠式和平行流式各有优劣。在空间紧凑且对制冷效率要求高的工程机械中，层叠式或平行流式蒸发器更为适用，其紧凑结构能适配狭小空间，高效的换热设计可快速吸收空气热量；蒸发器布局应确保驾驶室热风顺畅回流，增强换热循环效率。（3）冷凝器布局要兼顾散热效果与设备空间限制。对于工程机械，可采用内部悬挂式并确保吸排风区有足够散热孔，保证空气流通；若空间允许，将冷凝器设置在外部并加盖罩体，既能保护冷凝器免受恶劣环境影响，又能避免与其他散热部件相互干扰，优化整体散热布局，提升冷凝器散热性能。

### 2.3 制冷剂的选择

（1）综合评估制冷剂的热力学特性，其沸点、临界温度等参数决定了在不同工况下的制冷性能。在高温环境作业的工程机械，需选用沸点低、临界温度适宜的制冷剂，以便在高温下仍能高效蒸发吸热，实现良好制冷效果；在低温工况，制冷剂应具备合适的凝固点，防止在低温下失去流动性影响制冷循环。（2）着重考量制冷剂的环保性，随着环保要求日益严格，优先选择全球变暖潜值（GWP）低、对臭氧层无破坏的制冷剂。如某些新型环保制冷剂，在满足制冷性能的同时，能显著降低对环境的负面影响，助力工程机械行业实现绿色发展目标，减少温室气体排放与环境危害。（3）关注制冷剂与系统部件的兼容性，不同制冷剂对金属材料的腐蚀性不同<sup>[1]</sup>。选择腐蚀性低的制冷剂，可延长压缩机、冷凝器、蒸发器等关键部件的使用寿命，降低设备维护成本与故障风险，确保制冷系统长期稳定运行，提升设备整体可靠性。

### 2.4 系统的抗振动与密封性能设计

（1）工程机械作业时振动剧烈，系统管路连接需采用耐疲劳的柔性接口。此类接口凭借自身弹性，能灵活适应振动产生的位移变化，有效缓冲振动传递，减少管路松动、破裂等问题，保障制冷剂在系统内稳定循环，避免泄漏造成制冷效果下降与设备损坏风险。（2）优化系统的密封结构设计，选用高性能密封材料，增强系统整体密封性。在高温、高压、高振动的复杂工况下，优质密封材料能维持良好密封性能，防止制冷剂泄漏，确保制冷循环的完整性与高效性，减少能源浪费与环境污染隐患。（3）对系统进行抗振动加固设计，通过增加稳固支架、优化部件安装位置等措施，提升系统整体抗振能力。合理布局与加固可使系统在振动环境中保持稳定，减少部件因振动产生的位移与磨损，延长系统使用寿命，保障制冷系统在恶劣振动条件下可靠运行。

## 3 工程机械空调制冷系统设计中的常见问题与解决策略

### 3.1 常见问题

#### 3.1.1 制冷效果不佳

制冷效果不佳往往源于热交换过程中的效率损耗与气流组织紊乱，高温环境下冷凝器表面易积累粉尘油污，形成热阻层阻碍热量散发，导致制冷剂冷凝温度升高，蒸发压力随之上升，使蒸发器吸热能力下降。驾驶室内部空气循环路径设计不合理时，冷空气在局部区域形成滞留，而热源附近仍存在热空气堆积，出现温度分布不均现象，即使整体制冷量达标，也会造成局部体感温度偏高。制冷剂在循环过程中若存在微量泄漏，会导致系统内工质不足，压缩机吸气压力降低，制冷剂流量减少，蒸发器无法充分发挥换热效能，尤其在长管路系统中，泄漏点隐蔽性强，易形成慢性制冷衰减。节流装置的流量调节精度不足，会使进入蒸发器的制冷剂流量与热负荷不匹配，当流量过大时易引发蒸发器结霜，流量过小时则无法满足吸热需求，两种情况均会导致制冷效果波动。

#### 3.1.2 系统部件易损坏

系统部件的损坏多与极端工况下的应力集中和材质疲劳相关，压缩机在动力源波动时承受瞬时过载压力，曲轴与活塞组件在高频冲击载荷作用下产生微观裂纹，长期运行后易出现机械失效。蒸发器翅片在粉尘与湿度的共同作用下发生电化学腐蚀，尤其是在含尘量高的作业环境中，细小颗粒附着在翅片间隙形成电化学电池，加速金属材料的锈蚀进程，导致换热面积逐步缩减。冷凝器风扇电机在高温环境下持续运行，绕组绝缘层因热老化失去弹性，电机轴承在粉尘侵入后润滑失效，引发异响与振动加剧，最终导致电机烧毁<sup>[2]</sup>。管路接口处的密封件在长期振动中出现弹性衰减，尤其是在高低温交替环境下，橡胶材质的收缩膨胀频率加快，密封面贴合度下降，逐渐产生制冷剂泄漏通道。

#### 3.1.3 能耗过高

能耗过高的核心原因在于系统运行与实际负荷的动态匹配失衡，压缩机在固定排量模式下，即使热负荷降低仍保持额定功率运行，造成动力源能量的无效消耗，尤其在设备怠速阶段，制冷系统的能耗占比显著上升。冷凝器散热效率不足时，系统需通过提高风扇转速增强散热，而风扇电机的额外能耗会随转速提升呈指数级增长，形成“高能耗-低效率”的恶性循环。节流装置的过热度控制精度不足，导致制冷剂在蒸发器出口仍处于湿蒸汽状态，进入压缩机后引发液击现象，迫使系统增加回热环节消耗额外能量。控制系统的调节响应滞后于热负荷变化，当环境温度骤降时，制冷系统无法及时降低

输出功率,持续维持高能耗运行状态,造成能源浪费。

### 3.2 解决策略

#### 3.2.1 优化热交换过程与气流组织

采用仿生学设计的蒸发器翅片结构,模拟蜂巢的六边形排布提升空气扰动强度,同时在翅片表面覆盖纳米级疏油涂层,减少粉尘附着并降低清洗频率,通过强化湍流效应与抗污染能力提升换热效率。冷凝器采用错流换热布局,将散热管束设计为波浪形路径,延长制冷剂在冷凝区的停留时间,配合可变角度导风板,根据环境风速自动调整气流方向,避免热空气回流形成的局部热岛效应。驾驶室内部采用CFD仿真优化的气流循环路径,将送风口设置在热源附近形成局部冷气幕,回风口布局在热量聚集区域,通过空气动力学设计实现无死角温度均匀化,减少局部温差导致的无效制冷消耗。开发自适应节流技术,基于蒸发器出口过热度的实时监测,通过电子膨胀阀的脉冲宽度调制,精确控制制冷剂流量,使工质在蒸发器末端刚好完全蒸发,最大化吸热效率。

#### 3.2.2 强化部件防护与适应性设计

压缩机内部采用陶瓷涂层活塞与石墨轴承,陶瓷高硬度可承受瞬时冲击,石墨自润滑能减少摩擦损耗。曲轴箱内设油液缓冲腔,能吸收动力波动产生的压力脉冲,降低机械应力。蒸发器与冷凝器选用防腐合金材料,经真空钎焊工艺提升翅片与管路连接强度,翅片表面电泳涂装处理形成致密绝缘层,阻断电化学腐蚀路径,有效延长部件使用寿命。管路系统用金属波纹管与球形接头组合,波纹管柔性可吸收大量振动能量,球形接头能多角度自由转动,适应设备作业姿态变化,配合防松螺母楔形锁紧结构,确保长期振动下连接稳定<sup>[1]</sup>。风扇电机采用耐高温稀土永磁材料,绕组绝缘等级提升至H级,轴承配置迷宫式防尘盖,填充高温润滑脂,使电机高温环境仍保持额定输出效率。

#### 3.2.3 采用节能技术与智能控制

开发变频压缩机的无级调节技术,借助压力传感器采集系统高低压参数,结合环境温度与驾驶室设定温度构建动态负荷模型,实时调整压缩机输出频率,让输出冷量与热负荷线性匹配,部分负荷工况下能有效降低能耗。引入余热回收装置,利用发动机冷却液余热驱动吸附式制冷模块。在设备高负荷运行时,该模块可承担部分制冷任务,减少主压缩机的运行时长,达到节能目的。应用预测性控制算法,通过分析历史运行数据与环境温度变化趋势,提前调整系统运行参数。在环境温度骤升前预冷驾驶室,避免临时大功率运行出现能耗峰值。设计多模式运行逻辑,根据设备作业状态自动切换节能模式,如挖掘作业时优先保障制冷效果,设备转运时自动降低风量与压缩机功率,实现功能需求与能耗控制的动态平衡。

### 结语

综上所述,工程机械空凋制冷系统设计需综合考量极端工况适应性与能效稳定性。通过精准匹配置冷量、科学选型布局部件、选用适配制冷剂及强化抗振密封,可奠定系统可靠运行基础。针对常见问题,优化热交换、强化部件防护、应用智能控制等策略,能有效提升制冷效果、延长寿命、降低能耗。未来需持续推动技术创新,实现系统与工程机械的深度协同,助力行业高效绿色发展。

### 参考文献

- [1]罗杰俊.工程机械空凋制冷系统设计要点[J].电脑爱好者(电子刊),2021(12):4887-4888.
- [2]毛先友.空凋制冷系统设计的问题探讨[J].现代工业经济和信思化,2021,11(3):40-41.
- [3]胡新艳.空凋制冷系统设计的问题探讨[J].建筑工程技术与设计,2021(23):647.