文章编号：1671-6612（2026）05-774-04

低温环境下纯电动汽车热泵压缩机能耗分析及优化

马　骞

（江苏经贸职业技术学院　南京　211168）

【摘　要】　低温环境下，电动汽车热泵系统 COP 下降、单位制热能耗增加，主要原因是压缩机的压缩比升高，偏离了高效运行区。围绕降低压缩比、减轻运行负荷和提高运行效率，提出以压缩机为核心的一体化优化思路，将结构优化、循环优化、余热利用和智能控制协同集成，实现系统能效提升。该方案可有效拆分压缩负荷、抑制排气温度升高，并有助于提升极寒工况下热泵系统的 COP，为高寒地区纯电动汽车热泵系统节能设计提供参考。

【关键词】　电动汽车；热泵压缩机；低温工况；补气增焓；能效优化

中图分类号　TB61+5/U463.851　　文献标志码　A

Energy Consumption Analysis and Optimization of Heat Pump Compressors for Battery Electric Vehicles under Low-Temperature Conditions

Ma Qian

(Jiangsu Vocational Institute of Commerce, Nanjing, 211168)

【**Abstract**】　Under low-temperature conditions, the coefficient of performance (COP) of heat pump systems in battery electric vehicles (BEVs) decreases, while the energy consumption per unit of heating capacity increases. This is mainly attributed to the increased compression ratio of the compressor, which causes it to operate outside its high-efficiency range. Focusing on reducing the compression ratio, alleviating compressor load, and improving operating efficiency, this paper proposes an integrated optimization strategy centered on the compressor by coordinating structural optimization, cycle optimization, waste heat recovery, and intelligent control to enhance the overall energy efficiency of the system. The proposed strategy can effectively distribute the compression load, suppress excessive discharge temperatures, and improve the COP of heat pump systems under extremely cold conditions, providing a reference for the energy-efficient design of heat pump systems for battery electric vehicles operating in cold regions.

【**Keywords**】　Battery electric vehicle; Heat pump compressor; Low-temperature operation; Vapor injection; Energy efficiency optimization

0　引言

用户关注新能源汽车的核心参数是续航里程，而尽可能地降低电耗是提升续航里程的关键。与燃油车可利用发动机余热来采暖不同，纯电动汽车没有稳定的高温热源，冬季车厢制热只能依靠热泵系统或者 PTC 电加热装置。

PTC 利用电能直接转化为热量，等效 COP 约等于 1，在-10℃严寒工况下，采暖能耗约占整车总耗电的 30%～50%，会大幅缩短车辆实际行驶里程[1,2]。热泵依靠制冷循环搬运空气中的低位热能，

作者（通讯作者）简介：马　骞（1978.10-），男，硕士研究生，讲师，E-mail：mqvega@163.com
收稿日期：2026-07-24

常温工况 COP 可达 2.7 以上，节能优势明显，是新能源汽车主流配置的热管理方案。但环境温度降至 0℃以下后，其制热效果会出现明显下降。实测数据显示，环境温度从 5℃降至-15℃时，普通单级热泵系统的制热量衰减可达 40%～60%，系统 COP 会由 3.5 左右下滑至 1.5 以下，制热输出不足时车辆只能启动 PTC 辅助补热，双重耗电叠加进一步加剧冬季续航衰减[3]。

低温环境下，室外空气可利用热量减少，蒸发器吸热能力下降。低温带来的制冷剂物性变化及结霜进一步降低蒸发压力，使热泵系统压缩比增大，进而导致 COP 下降和制热能力衰减。当前针对换热器强化传热、抑霜除霜等方面的研究已取得较多成果，但受环境热源条件的限制，仅依靠换热器优化的性能提升有限。上述低温工况带来的负面效应，最终都会表现为更高的压缩比与运行负荷。因此，在持续优化换热器性能的同时，以降低压缩比、减轻运行负荷和提高运行效率为目标进行压缩机优化，已成为提升低温热泵系统性能的重要研究方向。

1　低温环境下热泵压缩机能耗分析

1.1　低温工况压缩比升高对热泵性能的影响

热泵制热时，室外环境温度下降会直接降低蒸发器蒸发压力，而车内采暖需要维持恒定冷凝压力，这就使压缩机的压缩比显著抬升。结合试验数据可知，当环境温度由 5℃逐步降至-20℃区间，热泵系统的压缩比可由 3.0 左右提升至 6.0 以上[4]，高压缩比会从功耗、冷媒循环流量两个方面劣化压缩机的工作状态，最终拉低热泵系统 COP 值。

1.1.1 压缩比和电耗的关系

压缩机绝热压缩理论功方程为：

$$w=\frac{k}{k-1}R_gT_1\left[\in^{\frac{k-1}{k}}-1\right] \tag{1}$$

式中：w 为单位质量冷媒压缩功；k 为冷媒绝热指数；ε为压缩比，即压缩机排气压力与吸气压力之比；T_1 为压缩机吸气的热力学温度；R_g 为气体常数。

由式（1）可见，在吸气温度保持稳定的条件下，压缩耗功随压缩比呈幂次增长关系。当室外气温降低时，压缩比ε增大，压缩机单位冷媒的压缩耗功 w 增加。上述分析基于理想绝热压缩过程，实际运行中还受机械摩擦、内部泄漏、电机效率及变频控制等因素影响，因此实际压缩机能耗通常高于理论分析结果。

热泵性能系数 COP 表示单位压缩机功能产生多少制热量，当室外气温下降时，压缩功增加，而冷凝侧的制热量 提升幅度远跟不上压缩功的涨幅，所以 COP 持续走低，单位制热量需要消耗的压缩功则会增加。这意味着热泵系统每产出 1kW 制热量，需要投入更多的电功率。文献显示，-20℃工况下，常规 R134a 单级热泵在 4000r/min 额定转速下制热量仅 1.93kW，系统 COP 低至 1.5；相比 5℃常温工况 COP 降低 50%以上，整车采暖电耗大幅上涨。环境温度每降低 5℃，系统平均 COP 会下降 7%～11%[5]。

1.1.2 压缩比和压缩机容积效率的关系

压缩机的容积效率定义为压缩机的实际输气量与理论输气量之比。压缩比较高时，会使压缩机的容积效率下降。主要原因有：

（1）余隙回流。压缩结束后腔体内部留存高压余隙气体，吸气阶段余隙气体膨胀，挤占吸气容积，使冷媒进气量变少。压缩比越大，余隙气体膨胀体积越大，冷媒进气量越少。

（2）内部泄漏。高低压腔之间的压差随压缩比升高而变大，气体经涡旋齿间隙、密封部位由高压侧向低压侧回流，进一步减少有效输气量。

（3）吸气受热膨胀。低温吸气被缸体高温壁面加热，冷媒比容变大，同等腔体容积下，实际冷媒进气量降低。

由此可见，高压缩比不仅增加压缩功，还会导致压缩机容积效率下降，吸气量减少，冷媒循环流量不足。要维持一定的制热量，只能提升压缩机转速，造成机械耗功同步上涨，最终单位制热量耗电增加。

1.2　压缩机结构及循环特性对系统能耗的影响

低温工况下，压缩机自身结构、润滑条件的变化也会进一步加剧压缩机的功率损耗。首先是低温环境中，润滑油黏度升高，各运动副润滑效果变差，加上变工况下冷媒流量波动，易出现润滑油供给不足，整机运行效率进一步下滑。其次是现阶段变频调速能力有限，仅能小幅调整负荷变动区间，面对极寒工况大幅上升的压缩比，调节能力有限，无法

从根本上降低压差损耗。第三是传统补气增焓方案也存在短板，例如管路排布繁杂、冷媒补气流量分配不均匀，低温工况下补气降温、提流量的增益效果大打折扣。有数据显示，-20℃无补气工况下压缩机排气温度可达 104.2℃，长期超温会加速冷冻油变质，缩短部件使用寿命。

综上所述，低温会直接降低蒸发器吸气压力，使压缩比显著上升。这时压缩机脱离高效工作区间运行，单位制热量对应的电耗上涨。0℃以下室外换热器结霜会进一步压低蒸发温度，属于外部因素，压缩比升高是热泵系统 COP 大幅下降、整车电耗增加的重要原因。因此，同步改良压缩机构造与热泵循环是削减低温采暖电耗的核心路径。

2　以压缩机为核心的一体化优化策略

针对低温工况下热泵系统 COP 下降、电耗增加的问题，传统单一优化措施（如强化换热、防结霜等）只能改善低压侧吸热不足，而提升系统整体性能应以压缩机为核心，围绕降低压缩比，通过结构、循环、负荷及整车自适应控制协同优化，实现系统能效提升。

2.1　优化压缩机本身结构

从压缩机本身结构出发，为改善低温工况下的性能，可从以下五个方面进行优化。

（1）涡旋型线优化，改善压缩泄漏损失，提高压缩机容积效率。传统涡旋齿在低温高压缩比工况下内部泄漏较大，采用渐变曲率齿型缩小齿顶间隙，可减少高压气体回流损失，稳定冷媒输送效率，缓解容积效率下降问题[6]。

（2）排气结构优化，改善排气损失，提高高压缩比工况运行可靠性。原有排气口较小，易造成节流损失和热量积聚。通过扩大排气截面、优化导流结构，可降低排气阻力和整机温升，缓解-20℃工况排气温度超过 100℃的运行风险。

（3）匹配宽域永磁同步电机，改善驱动损失，提高压缩机运行效率。普通异步电机在低温低负荷工况效率较低，采用宽域永磁同步电机可拓宽 1000～8500r/min 高效工作区间，减少铜损、铁损及低速附加功耗。

（4）内置高效油气分离结构，改善机械摩擦损失，提高低温运行稳定性。低温下冷冻油黏度升高，易随冷媒进入循环管路，影响换热并加剧压缩机磨损。在压缩腔出口集成油气分离结构，可保证持续润滑，减少运动部件磨损。

（5）适配低温专用冷冻油，改善低温润滑损失，降低机械损耗。常规润滑油在-10℃以下黏度较高、流动性差。采用低温低黏度合成冷冻油，可改善启动润滑性能，降低摩擦损耗，并兼顾高温工况下油膜稳定性。

以上优化措施分别针对压缩过程、排气过程、驱动系统及润滑系统等不同环节，通过减少泄漏损失、机械损失和驱动损失，协同提升压缩机运行效率。

2.2　多热源耦合降低压缩机运行负荷

纯电动汽车的热泵系统依靠室外空气作为热泵的热源，当环境气温较低时，室外换热器（蒸发器）侧的吸气温度偏低，在冷凝压力不变的情况下，压缩比升高，压缩机长期处于高负荷运转状态。在保证冷凝压力不变的情况下，要降低压缩比，就应该提高蒸发压力，而提高蒸发器的吸气温度可以有效提高蒸发压力。

纯电动汽车在行驶时，电机、电控系统会持续产生稳定的中温余热，动力电池充放电阶段同样存在可回收热量。因此，可将“三电”（电机、电控、动力电池）系统与热泵系统耦合。其中，驱动电机和电控系统余热温度 60～85℃，搭配热导率 190W/(m·K)的高导热壁面换热，可直接作为蒸发侧辅助热源；动力电池余热温度 15～35℃，可用于预热循环工质或改善电池热管理。采用冷媒并行支路实现余热耦合，将热量汇入压缩机吸气端以提高吸气温度。在-20℃严苛环境下，仅依靠三电余热对吸气温度的提升幅度有限，可搭配集成 45～65℃相变储热模块的双级高效回热器（配套紧凑型板式换热器），实现系统 COP 提升 18%～25%[7]。

2.3　补气增焓循环优化设计

补气增焓的原理是在热泵循环中增加经济器，低温时对冷媒分流换热，通过经济器将中压气态冷媒通入压缩机中间压缩腔，把单段压缩拆分为低压、高压两段过程，能够直接降低单级压缩的压差。其优点是一方面减少单位冷媒压缩耗功，另一方面借助补气冷媒对压缩腔进行冷却，抑制排气温度超限问题。例如-20℃、压缩机 4000r/min 工况下，传统单级热泵系统 COP 仅 1.5，而开启基础补气增焓后系统 COP 可提升至 1.88，制热量增幅可达 33%，

排气温度从 104.2℃下降至 72.6℃[4]，大幅缓解低温下压缩机过热、效率衰减难题。

对于补气增焓回路的设计，可进一步进行优化。常规补气增焓回路常有管路分散、分液失衡两大核心缺陷[8]。可采用集成式闪蒸补气模块对循环优化，将经济器、分流阀、补气电磁阀整合为一体化组件，缩短各支路管路长度，减少弯头、接头带来的流阻损失，同时配套可动态调节的补气电子膨胀阀，依据环境温度、压缩机排气温度联动调整补气支路的冷媒流量，实现全温区精准分液。对比常规分散补气结构，采用此类集成化回路可稳定维持8%～22%的合理相对补气量，在-20～-5℃低温区间充分发挥补气增焓的增效优势，同时在 0℃以上常温制热工况自动降低补气比例，规避补气过量带来的制热损耗[5,9]。

补气增焓循环的性能受补气比例、中间压力、经济器换热效率共同制约。补气比例低时，对降低排气温度和提高制热量作用有限；补气比例过高会增加补气过程中的节流损失，并降低主循环制冷剂流量。因此，需要根据环境温度和负荷变化合理匹配最优中间压力及经济器换热效率，以实现制热能力与压缩机功耗之间的平衡。

补气增焓通过分段压缩的方式，减小了单级压缩比；经济器换热还能增加主回路冷媒过冷度，改善蒸发器低温吸热性能，提高蒸发压力，从冷媒循环层面改善了压缩机在低温恶劣工况下的性能。

2.4　压缩机自适应智能协同控制

传统的单参数阈值控制，对压缩机转速的调整具有滞后性，无法预判低温热负荷的波动，易造成压缩机维持高压缩比工作，功耗较高。而自适应智能协同控制，就是热泵系统实时感知整车冷热工况，依靠预测算法，自主调整各部件的运行状态，多机构协同配合，始终让压缩机工作在高效区间。

模型预测控制（MPC）是实现自适应协同控制的核心算法，其内涵是建立系统运行状态预测模型，根据环境温度、蒸发压力、排气温度、电池状态以及座舱负荷等参数预测未来运行趋势，并通过优化算法实时调整压缩机转速、电子膨胀阀开度以及补气参数，使压缩机保持在高效率运行区域。相比传统固定参数控制方式，预测控制能够减少频繁调节造成的能量损失，提高变工况条件下系统运行稳定性，可实现系统综合能耗降低 4%～22%[10]。

整套调控体系以压缩机负荷优化为核心，同步采集室外温度湿度、动力电池工况、电机运行温度、座舱空间实时温度等多维度状态参数，依托 MPC 算法提前预判采暖负荷，规避压缩机高压缩比工况。将压缩机、蒸发器和经济器的电子膨胀阀、室外换热风机、PTC 辅助加热单元统一纳入联动控制框架，所有部件调节指令均围绕压缩耗功最小化目标输出。环境温度较高时，优先匹配压缩机转速与膨胀阀开度、风机风量协同适配制热需求，尽可能降低压缩机功耗。极寒工况下，蒸发吸热量不足时，适度联动 PTC 分担制热需求，减少压缩机持续满负荷运转时长。同时建立压缩机与整车余热回收的联动匹配逻辑，配合多热源耦合提高蒸发压力，降低压缩比，与压缩机结构改良、补气增焓循环优化形成配套协同作用，规避高压缩比低效工作区间，降低低温采暖电能消耗。

3　结论

低温环境下，蒸发压力下降，压缩比升高，压缩机容积效率降低、机械磨损加剧、排气温度超限，多重因素叠加导致整车采暖电耗增加。构建压缩机结构改良、补气增焓、“三电”余热回收、智能协同控制一体化优化体系，可从部件结构、冷媒循环、热源利用、动态调控四维度同步改善压缩机低温运行工况，提升系统制热 COP，可为纯电动汽车低温热泵压缩机节能开发与整车热管理设计提供工程参考。

参考文献：

[1] 吴晓俊.新能源汽车空调热泵系统能效提升研究[J].汽车测试报告,2025,291(4):52-54.

[2] 蔡世春,陈聪,赵浩然.新能源汽车热泵空调系统对电池能耗与续航的影响[J].汽车电器,2025,448(12):39-41.

[3] 王时静.低温环境下电动汽车热泵空调换热器结构优化及能耗分析[J].大众汽车,2025,(7):55-57.

[4] 刘明康,苏林,方奕栋,等.电动汽车补气增焓型热泵系统低温制热性能研究[J].流体机械,2021,49(10):7-14.

[5] 李万勇,刘雨声,施骏业,等.电动汽车热泵空调系统低温制热性能及优化[J].制冷学报,2020,41(6):31-39.

[6] 王宏辉,史文豪,赵远扬.汽车空调用涡旋压缩机研究进展[J].压缩机技术,2025,(3):44-50.

（下转第782页）