

动力控制压缩机策略对蒸发器结霜影响浅析

童润民

神龙汽车有限公司

【摘要】 蒸发器结霜将直接导致风道堵塞，空调无法吹出冷风，对空调的制冷性能产生很大的影响。本文从汽车空调系统蒸发器结霜机理出发，分析结霜原理，通过实车验证改进策略得出，压缩机控制策略变化对蒸发器结霜存在影响。在设计阶段，应充分考虑动力控制压缩机策略对蒸发器结霜的影响，降低汽车空调制冷故障，提高用户满意度。本文可为类似的开发提供参考。

【关键词】 汽车空调，控制策略，蒸发器，结霜

Influence of Power Control Compressor Strategy on Evaporator Frosting

Tong Runmin

Dongfeng Peugeot and Citroen Automobile Co., Ltd.

Abstract: Evaporator frost will directly lead to air duct blockage, i.e., air conditioning can not blow out cold air, which has a great impact on the refrigeration performance of air conditioning. Based on the frosting mechanism of the evaporator in the automobile air conditioning system, this paper analyzes the frosting principle. Through the improvement strategy of real vehicle verification, the influence of compressor control strategy change on evaporator frosting is concluded. In the design stage, the influence of the power control compressor strategy on the frost formation of the evaporator should be fully considered, to reduce the failure of automobile air conditioning and refrigeration and improve user satisfaction. This paper provides reference for similar developments.

Key words: automobile air conditioning, control strategy, evaporator, frosting

引言

随着人们对汽车舒适性的要求越来越高，作为汽车制冷担当的空调系统，不仅会成为整车系统的必需品，而且人们会对其降温性能提出更高要求。在夏季空调系统正常工作时，会将车内的环境调节到乘员最舒适的状态，创造良好的驾乘环境，提高驾乘效率和减少交通意外事故。但是当空调系统出现故障时，如蒸发器表面结霜，会导致出风口风量减少，车内温度升高，无法提供良好的驾乘环境，将会增加驾乘风险。如何有效控制汽车空调蒸发器的结霜现象成为制冷领域及汽车领域亟须共同解决的棘手问题。

汽车空调系统在制冷过程中，经过冷凝器和节流膨胀后的液态制冷剂，温度可能达到0℃甚至更低的状态，如果控制不当，则很容易引起蒸发器表面冷凝水结霜。结霜问题一直是空调系统匹配中的难题，也是售后返修中较为严重的故障^[1]。如何较好地控制空调系统的过冷度，避免结霜，获得最佳的整车空调系统性能是设计阶段需要重点考虑的问题，本文从整车动力控制压缩机工作状态的策略着手，分析蒸发器结霜及解决方法，解决蒸发器结霜问题。

本文首先对空调系统结霜的原理进行讲解，然后针对案例车结霜表现进行原因分析，对可能造成的原因逐一测试排除，最终找到问题根本所在，针对问题点提出永久改进方案并进行实车验证。验证结果表明，蒸发器结霜现象消失，空调系统工作正常，降温性能满足乘客需求。

1 汽车空调系统蒸发器结霜机理

1.1 汽车空调系统工作原理

空调系统的制冷循环，如图1所示。空调制冷循环系统主要部件有空调压缩机、冷凝器、冷却风扇、膨胀阀、蒸发器、鼓风机。空调压缩机由发动机通过附件传动带驱动压缩机离合器，离合器接合，空调压缩机运行，离合器断开，压缩机停止。冷却风扇为2速风扇（停止、低速、高速）。空调鼓风机由电动机驱动，并根据驾驶员的要求进行控制。空调压缩机主要是增加气态制冷剂流体压力，气态制冷剂流体在冷凝器中冷却下来。冷凝器输出的流体温度仍高于外部空气温度，通过节流膨胀阀节流降压，自动调节进入蒸发器的制冷剂流量，满足制冷循环所要求的合适程度，制冷剂在蒸发器中气化吸收空气中的热量，降低进入座舱的空气温度，气化后的制冷剂，回到压缩机重新开始循环。

1.2 蒸发器结霜机理

汽车空调工作的气候范围甚为广泛，一般制冷的环境温度为15~50℃，相对湿度为5%~80%，以图2中状态A（温度：40℃，相对湿度：45%）为例，空调降温析水过程分为两个步骤，状态A到状态B阶段，湿空气（状态A）遇到流通低温制冷剂的蒸发器，析水前，单位质量干空气的含水量不变，温度降低，直到湿度达到100%（状态B）；若此时温度继续降低，则保持湿度100%不变从状态B再到状态C，此过程单位质量干空气的含水量下降，析水，此现象为湿空气的物理特性，因此总有水从空气中析出^[1]。正常情况下，

大部分冷凝水会随着排水管流出车外，但若蒸发器温度控制不当，局部或全面出现长时间低于0°C的情况，冷凝水就有可能聚集在蒸发器翅片表面，出现结霜。蒸发器表面结霜后，空气通过蒸发器进入车辆座舱的阻力会增大，致使出风口出风量减少，车辆座舱内温度升高。

蒸发器翅片结霜后，由于蒸发器芯体的翅片间隙被冰霜覆盖，使得风在吹过蒸发器芯体时受阻，整个车内温度无法降低，难以达到整车降温的效果。因此，空调结霜时一般的

具体体现就是出风口风速明显降低，整车温度明显上升；冷凝水出口水量明显减少或不出水；同时打开前机舱盖，可观察到空调低压管路表面有明显的结霜，如图3a所示。这是由于制冷剂从蒸发器流出后，没有经过充分换热即流出膨胀阀，流入低压管的制冷剂温度仍然很低，若经过机舱换热后仍然低于0°C，机舱中的湿热空气，便会在低压管路表面析水结冰。而蒸发器本身位于空调总成壳体内，其结冰现象可通过内窥镜进行观测，蒸发器表面结霜现象如图3b所示。

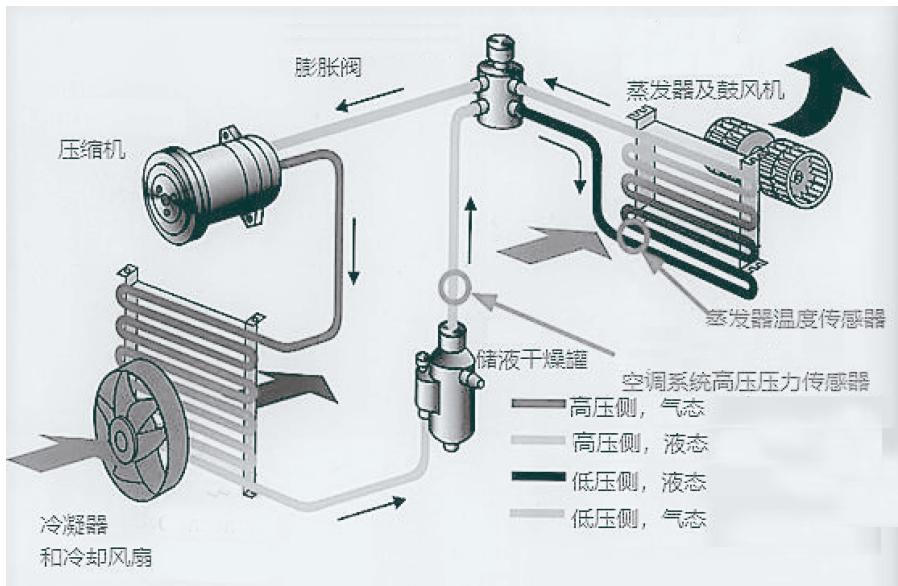


图1 空调制冷循环系统

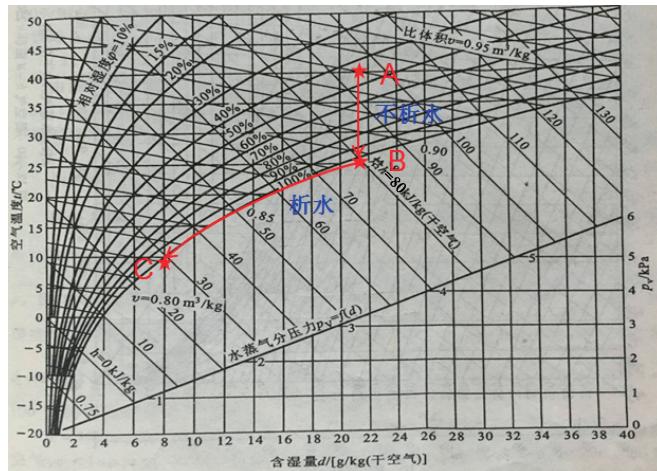


图2 空气焓湿图



图3 空调管路及蒸发器结霜实物图

2 实验过程

2.1 蒸发器结霜原因分析

以某款中期改型乘用车为例，空调系统完全沿用原车的系统和零部件，在项目开发阶段，正常路试过程中，车辆发生仪表板出风口风量衰减，直到无风输出的故障，驾乘人员

感觉座舱温度升高明显。路试人员反馈，空调管路上有霜，如图 3a 所示。根据以往经验，初步判定空调蒸发器结霜。查前期路试时的情况，出现过该类故障模式：驾驶员长时间使用空调系统（约 120min），高速状态下，反馈制冷效果变差。列出造成蒸发器结霜的原因，针对主要原因进行逐一排查，见表 1。

表 1 蒸发器结霜原因分析

问题(Issue)	失效原因分析(Factor)	验证项(Validation item)
蒸发器表面结霜 (Frost on the surface of the evaporator)	空调总成制冷异常 (HVAC cooling performance abnormal)	空调出风异常 (Air flow abnormal) 空调制冷异常，蒸发器温度均匀性异常 空调冷凝水排放异常 (Condensate water discharge abnormal) 空调泄漏(HVAC leakage)
	蒸发器制冷异常(Evaporator cooling performance abnormal)	蒸发器单体泄漏 (Evaporator unit leakage) 蒸发器单体制冷异常 (Evaporator unit cooling performance) 芯体 (core) 翅片焊接质量 (Fins welding quality) 翅片开窗角度 (Angle of fins louvers) 透光率(Light transmittance) TXV TXV堵塞(TXV blocked) TXV尺寸(TXV dimension) TXV不匹配(TXV not match)
	蒸发器温度传感器(EVAP temperature sensor)	温度传感器外形尺寸异常 (The size of evaporator temperature sensor) 温度传感器在0°C时的RT值异常 (The RT value) 大外壳上蒸发器与温度传感器装配位置异常 (Assembly position) 鼓风机电流异常(The current of GMV)
	空调出风小(HVAC air flow abnormal)	调速模块异常(VLCL abnormal)
	ON/OFF 值的定义 (ON/OFF value)	1. 故障件空调风量试验 (Air flow test) 2. 故障件空调制冷试验 (Cooling performance test) 3. 故障件空调冷凝水排放试验 (Condensate drain test) 4. 故障件空调密封性试验-蒸发器密封 (Leakage test) 5. 故障件蒸发器泄漏检测 (Evaporator leakage test) 6. 故障件蒸发器单体制冷试验 (Evaporator cooling test) 7. 故障件芯体翅片焊接率检查 (Fins welding quality check) 8. 翅片开窗角度检查 (Check the angle of fins louvers) 9. 翅片透光率检查 (Light transmittance check) 10. 故障件 TXV 检查 (Check the TXV) 11. 故障件 TXV 关键尺寸测量 (TXV dimension measurement) 12. TXV 设定点选择，系统匹配试验 (TXV match test) 13. 故障件传感器关键尺寸测量 (The size of evaporator temperature sensor check) 14. 故障件温度传感器0°C时RT值测试 (The RT value check) 15. 故障件传感器与蒸发器的位置距离尺寸测量 (Assembly position check) 16. 故障件鼓风机电流测试 (Check the current of GMV) 17. 故障件鼓风机各档位测试 (GMV check) 18. ON/OFF 值的定义是否合理 (ON/OFF value check)

核实排查与空调蒸发器结霜相关联的因素，详见图 4，先对零件符合性进行核查，包括蒸发器温度传感器、位置、蒸发器翅片等，核查没有发现问题。该车型空调系统为量产

车沿用，零部件出现问题和差异导致出现故障的可能性很小，根据逻辑分析，核查重点将问题分析放在控制信号这部分。

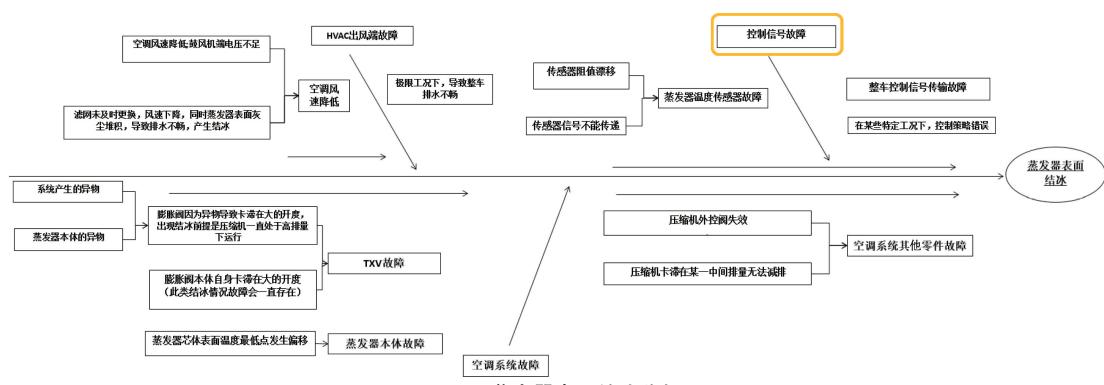


图 4 蒸发器表面结冰分析

在空调系统设计时，为了防止蒸发器结冰，有蒸发器温

度传感器，装在蒸发器出口，监测冷却后空气温度，如果蒸

发器温度传感器测量到的空气温度接近 0℃，整车智能控制盒（BSI）发出指令断开压缩机离合器，让经过蒸发器的空气增加流体温度，蒸发器温度传感器检测到高于 3℃ 时，再次接合压缩机离合器。压缩机离合器的断开/接合是直接根据蒸发器气流温度控制的。具体控制策略需要进行专项试验进行标定。

本文分析的这款中期改型乘用车，配置的是定排量带离合器压缩机，压缩机控制由离合器线圈吸合/断开实现功能。定排量压缩机的排气量随着发动机转速的提高而成比例地提高，它不能根据制冷的需求而自动改变功率输出，压缩机的控制一般通过直接采集蒸发器出风口的温度信号，当温度达到设定的温度，压缩机电磁离合器松开，压缩机停止工作。当温度升高后，电磁离合器接合，压缩机开始工作。定排量压缩机也受空调系统压力的控制，当管路内压力过高时，压缩机停止工作。每一个工作循环，排量都是固定的。对于定排量压缩机来说，只有切断温度和吸合温度，没有目标温度，而且持续时间通常很短，因此，一般不会因为切断与吸合温度的设置而导致蒸发器表面出现 0℃ 的情况。

空调压缩机一直运行，鼓风机风量低，蒸发器进气温度可降至 0℃ 以下。特别是在高温高湿地区，车外的高湿热空气中的水，先冷凝，然后在蒸发器中结冰。蒸发器中的冰，会慢慢地堵塞蒸发器。当蒸发器堵塞时，蒸发器中不再有制冷剂蒸发，液体流体有可能进入压缩机，有液击破坏压缩机的危险。需要核实整车动力控制空调压缩机，让压缩机到达切断点而不会断开，持续保持压缩机工作，导致蒸发器结霜。整车动力控制空调压缩机导致蒸发器结霜是我们需要重点控制的问题。

2.2 实车分析验证

研发人员对可能出现的结霜进行排查，布置相关设备对

车辆和空调信号进行采集，分析路试监控数据。将车辆路试设置为出现蒸发器结霜工况，空调设置为外循环，湿度 > 80% 天气，空调出风口设置为一档风，0.29MPa 热力膨胀阀进口压力，这个基本上是行业公认的最易出现结霜的工况，在路试中尽可能选择接近的工况，去模拟路试，再现空调蒸发器结霜，布置采集相关的数据。核查路试采集数据记录，可以看到图 5 的光标 1，空调压缩机保持吸合很长时间，空调蒸发器已报告结霜在光标 2 位置，我们聚焦在压缩机离合器长时间吸合之前的区域，可以看到图 5 中，从光标 1 左右，空调压缩机离合器吸合/断开频率慢慢下降，直到压缩机离合器长吸合光标 2 位置，可以猜测蒸发器在光标 1 之前已经结冰了，在这之前出现了一长段压缩机吸合/断开频次密集不规律的情况。

在控制逻辑分析中发现，发动机控制单元（CMM）可以向整车智能控制盒（BSI）请求空调压缩机离合器断开或压缩机离合器状态冻结。CMM 的请求对 BSI 内部压缩机离合器控制具有较高的优先级，CMM 压缩机控制指令优先级 > BSI 对空调压缩机控制请求。逻辑分析如图 6 所示。

空调压缩机离合器断开不会导致蒸发器结冰，但如果 CMM 要求在蒸发器气流温度已经接近 0℃ 时保持空调压缩机离合器吸合，空调压缩机离合器冻结状态可能会导致蒸发器结冰。如图 7 所示，CMM 请求空调压缩机在左侧紫色光标处已处于吸合状态，且一直持续保持吸合状态不断开。

梳理出控制逻辑中所有的 CMM 发出请求，可能要求的空调压缩机离合器状态保持的请求，如图 8 所示。

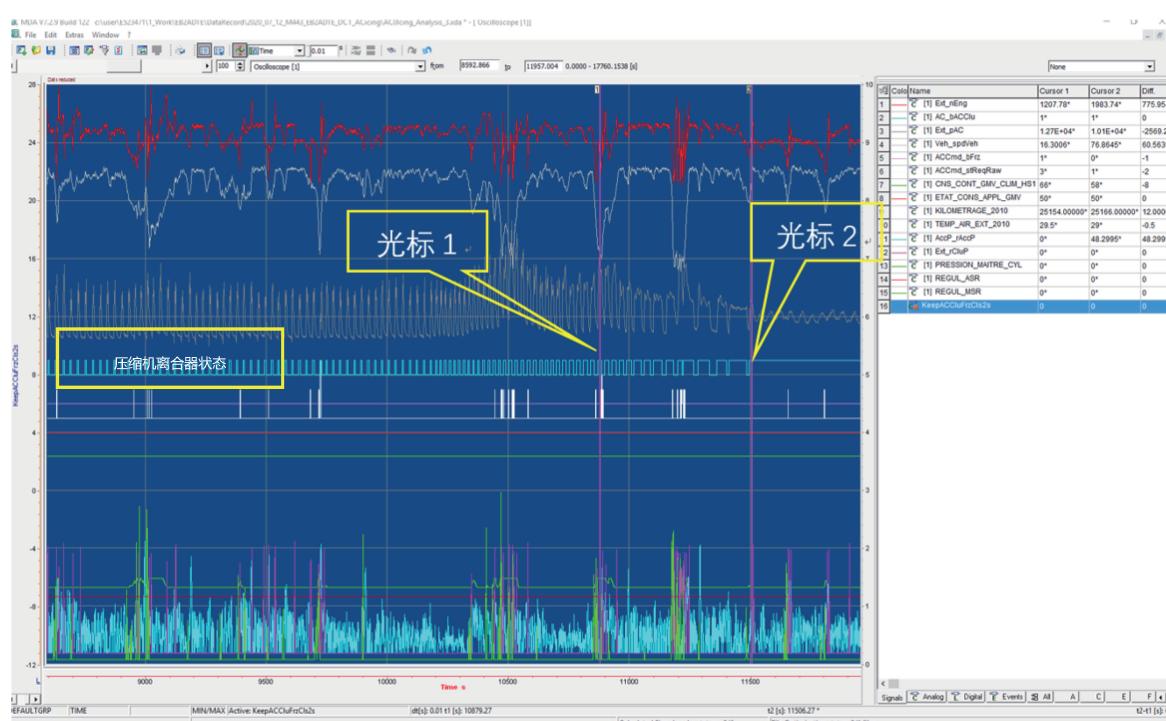


图 5 路试采集数据记录（压缩机吸合/断开状态）

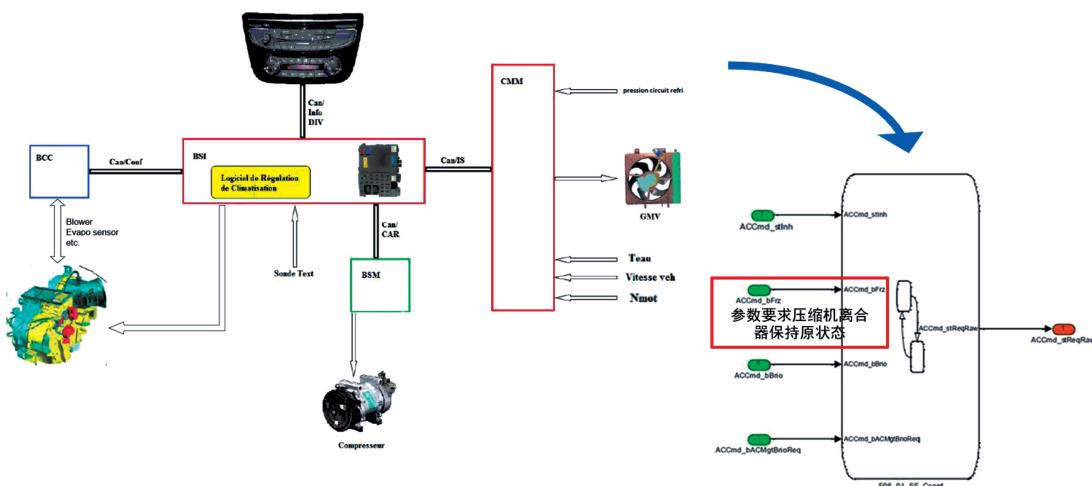


图 6 压缩机控制优先级逻辑分析

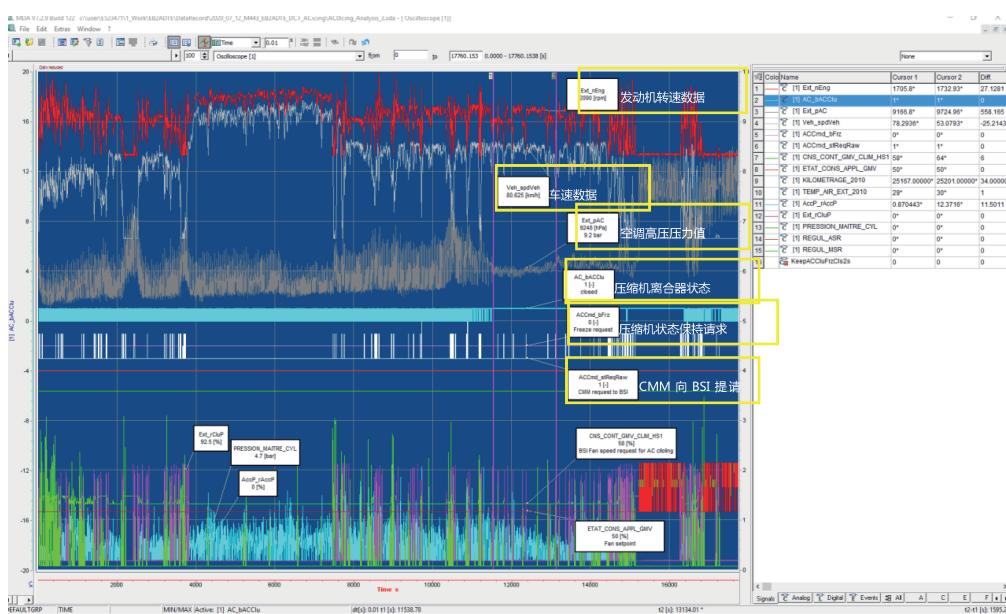


图 7 路试采集数据记录 (影响压缩机吸合/断开状态整车关联逻辑数据状态)

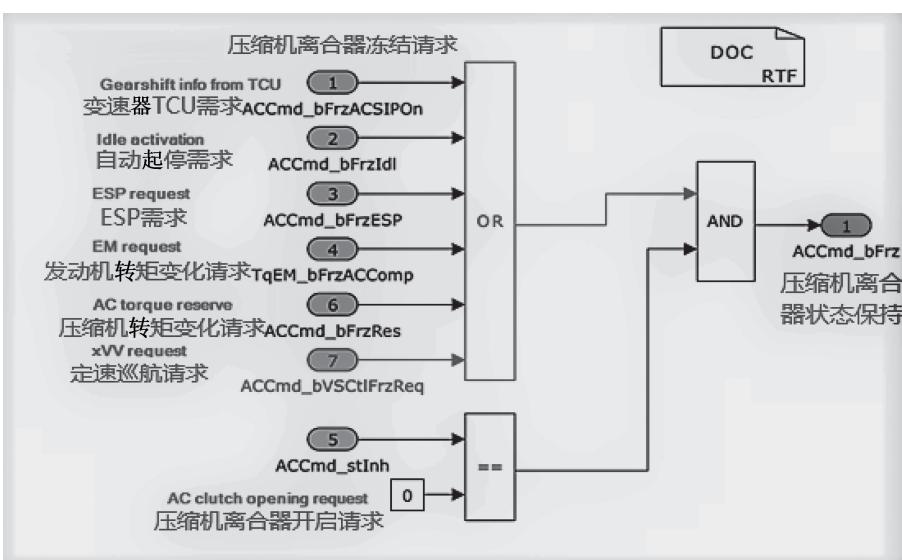


图 8 压缩机离合器冻结请求逻辑控制图

从数据中截取一段分析 CMM 请求压缩机保持吸合的例子，如图 9 所示，可以看到压缩机离合器定期吸合 5.8s，在一个周期 25s。有时，压缩机离合器冻结请求设置在 3s 和 3s 定时器结束前 5.8s 离合器吸合。在这种情况下，压缩机离

合器冻结要求没有影响。在其他情况下，如图 9 所示，压缩机离合器冻结请求可以延长离合器吸合时间，在光标 1 和 2 之间，离合器保持吸合 7.8s。离合器吸合时间比正常时间长 2s（紫色光标线所示）。

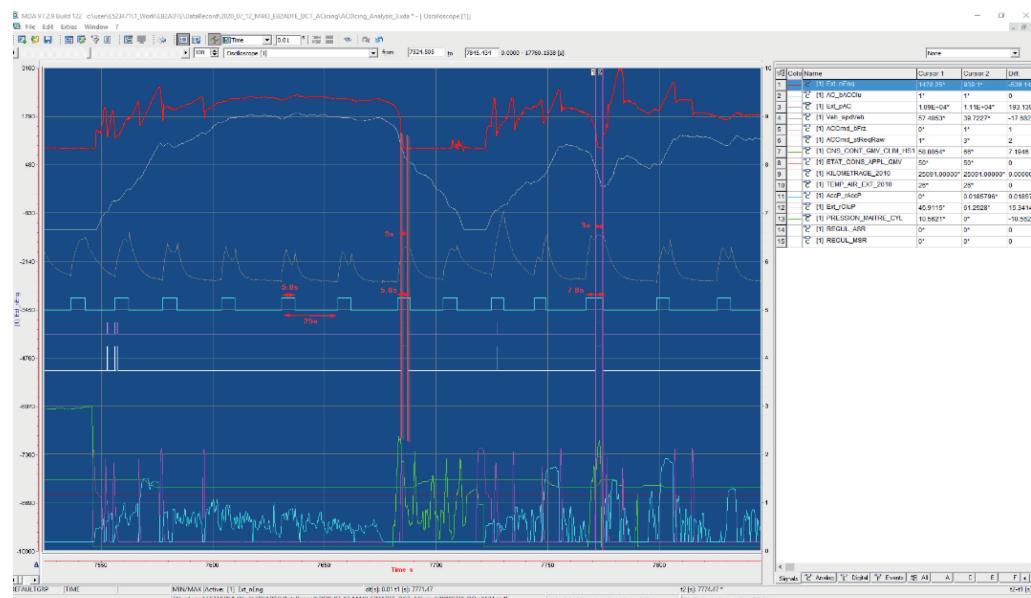


图 9 压缩机离合器吸合对比分析

以下试验验证尝试识别潜在的侵入式冻结请求，离合器冻结请求关闭超过 2s，离合器断开后，CMM 请求压缩机离合器释放计算信号（KeepACluFrzCls2sACluOp）。在一段时间内可识别出 4 个异常点，如图 10 所示。

在查看数据记录时，发现了非常异常的车辆节气门和档位控制情况。如图 11 所示，在高档位，发动机高转速行驶时，车辆切换到空挡，然后在踩离合器踏板的同时，车辆驾驶员依次踩下制动踏板和加速踏板，可以看到发动机转速在车辆小加速度的情况下有升有降。

数据观察分析：低速阶段注意到发动机转速高，驾驶行为：同时踩下发动机加速和离合器踏板，产生频繁的压缩机

离合器冻结请求+高转速导致结冰风险。以下是出现压缩机延长吸合时间的车辆状态分析，在触发压缩机离合器冻结请求时压缩机吸合时间就会延长 2~3s，短时间内多次触发，就会引起蒸发器表面结冰点触发。因为表面出现结霜后，通过蒸发器的冷空气被挡住，蒸发器表面温度场发生变化，蒸发器温度传感器读出的信号已经不是真实的实际温度。蒸发器出风面被冰堵住后，温度会上升，蒸发器温度传感器给出的温度反馈会高于让压缩机断开的温度，压缩机会一直处于工作状态，整个蒸发器表面结冰，座舱乘员会感觉无风，车内温度升高，增加驾乘风险。

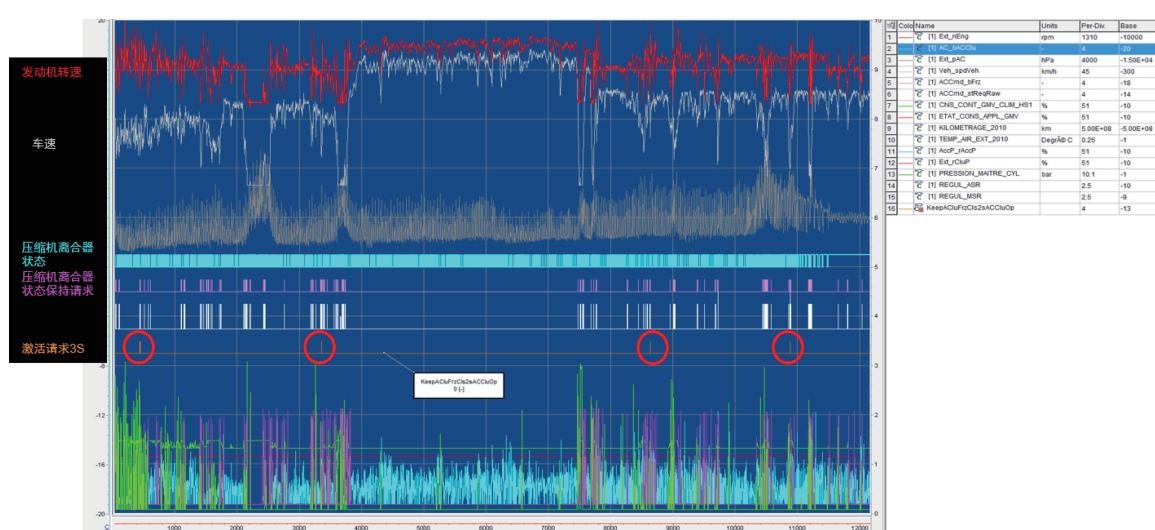


图 10 离合器冻结请求关闭延长异常点状态

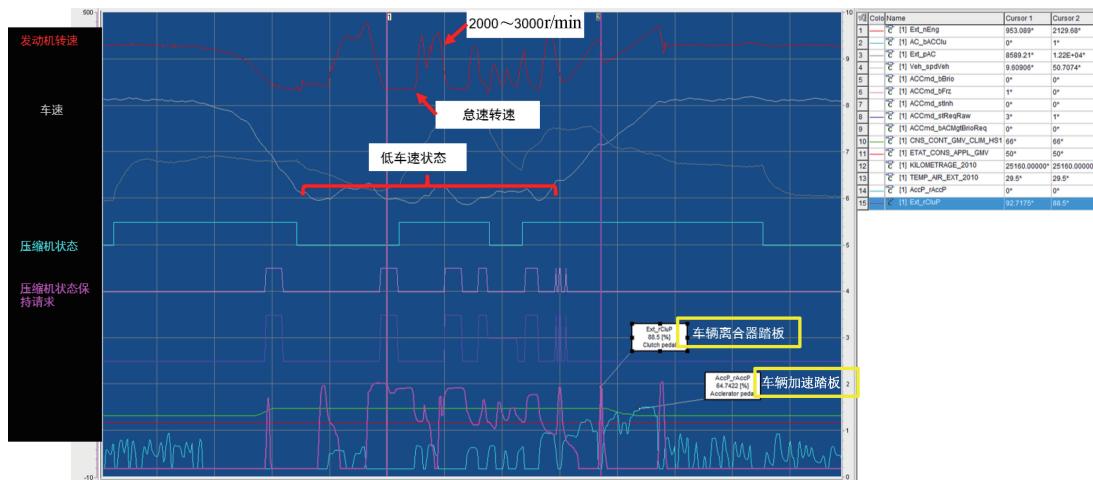


图 11 压缩机离合器延长吸合状态分析

3 效果验证

经过核实出现问题的车辆为手动变速器车辆，配置自动变速器的车辆，没有出现类似问题。配置双离合器自动变速器的车辆，进行路试分析后发现，相同工况下，压缩机保持吸合激活是由自动变速器控制单元（TCU）自动控制的，压缩机保持吸合激活发生率要低得多，同时核实压缩机保持吸合时间 $\leq 1s$ ，要比出现故障的手动变速器车辆逻辑设置要低。试验验证，在相同工况下，更改 CMM 软件控制压缩机保持状态时间由 3s 改为控制压缩机保持状态时间 $\leq 1s$ ，进行路试验证，分析检查路试数据，没有出现压缩机保持吸合状态比正常吸合时间 $>1s$ 的情况出现，未发现蒸发器结霜故障。正式更改 CMM 软件控制压缩机保持状态时间，降低了压缩机持续吸合出现蒸发器结霜的风险。

4 结论

通过改进发动机控制逻辑，有效地解决了压缩机控制策

略变化对空调蒸发器结霜问题影响，从分析过程中发现，动力控制策略影响空调性能的影响因素很多，主要原因是空调压缩机是发动机的重要附件，压缩机工作时会增加发动机负载，在设计中有可能更多地考虑发动机动力性能而忽略空调舒适性能，在发动机标定中动力性优先级高于舒适性。对于这类问题，在产品开发设计时，宜提前采取针对性策略，进行充分验证，做到整车动力性能和舒适性能的平衡。

除了本文介绍的蒸发器结霜，还有其他动力控制原因，会影响空调制冷性能。如环境温度低，发动机转速过高，发动机怠速转速过低起动困难，动力检测模块检测到转矩负荷过大等因素，都会考虑主动要求空调压缩机不工作，主动切断压缩机，影响空调制冷效果。在研发过程中，需要综合考虑整车和发动机的运行状况，对发动机控制单元（CMM）发出影响压缩机运行的相关变量进行相关的标定，以免影响制冷效果。

本文中所提供的解决方案，对于动力控制策略的标定改进和空调结霜问题分析，具有一定的指导意义。

参 考 文 献

- [1] 吴军省. 汽车空调系统稳定性研究 [D]. 北京: 北京理工大学, 2016.