

某电动客车空调压力传感器失效分析及优化

戴 勇, 周文杰, 肖 帆

(比亚迪汽车工业有限公司, 广东 深圳 518118)

摘 要:针对某电动客车空调系统压力传感器失效的问题,通过详细分析及测试验证,确定了引起传感器失效的根本原因,提出了对应的优化措施,并进行优化措施试验验证。结果表明,传感器失效问题得到彻底解决。

关键词:电动客车; 空调系统; 压力传感器; 失效分析

中图分类号:U463.85⁺1

文献标志码:A

DOI:10.15917/j.cnki.1006-3331.2025.01.006

Analysis and Optimization of Pressure Sensor Failure of Air Conditioning System for an Electric Bus

DAI Yong, ZHOU Wenjie, XIAO Fan

(BYD Automobile Industry Co., Ltd., Shenzhen 518118, China)

Abstract: Aiming at the problem of air conditioning system pressure sensor failure for an electric bus, the root cause of the sensor failure is determined through detailed analysis and test verification. The corresponding optimization measures are put forward and verified by the test. The results show that the sensor failure problem is completely solved.

Key words: electric bus; air conditioning system; pressure sensor; failure analysis

某电动客车研发样机测试过程中空调冷媒管路压力传感器故障,导致整车空调功能失效。本文以此问题为例,从压力传感器工作原理、故障件拆解、故障原因分析、测试验证以及优化整改等方面着手,先确定传感器失效的原因,然后提出可行的解决措施,可为后续的设计工作提供参考。

1 空调压力传感器介绍

1.1 压力传感器分类

压力传感器是空调系统中常见的一种传感器,其可将测量到的压力信息转化为电信号输出^[1-3]。压力传感器主要包括敏感元件和信号处理两个部分。目前在汽车空调上使用的压力传感器根据敏感元件的类型,主要分为电容式压力传感器、电阻式压力传感器和应变式压力传感器^[4]。

1.2 压力传感器工作原理

当压力传感器的敏感元件受到外力作用产生形变时,信号处理单元便将敏感元件的输出量转化为电压信号输出,同时对信号进行放大、滤波以及校准等一系列处理,以保证传感器输出的精度及可靠性^[5]。

本文涉及的压力传感器为电容式,采用陶瓷膜片作为压敏元件,将陶瓷膜片和陶瓷基体分别制作成电容的两极。在外界压力作用下,陶瓷膜片发生变形,使得两极之间的距离发生改变,从而导致电容量改变。然后再通过特定的电路处理将电容量信号转化成标准的电压信号输出^[6-11]。该空调冷媒管路压力传感器的输出电压信号用于判定和控制空调系统工作状态。其输出电压特性只与空调冷媒管路的压力有关,与环境温度无关,如图1所示。

收稿日期:2024-07-15。

第一作者:戴 勇(1984—),男,硕士,工程师,主要从事车辆空调系统设计和整车热管理设计工作。E-mail:dai.yong5@byd.com。

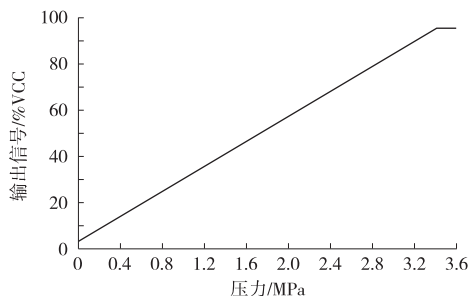


图1 压力传感器输出电压特性

该传感器的主要技术参数如下:供电电压(直流电)4.75~5.25 V;供电电流 10 mA;工作压力 0.1~3.5 MPa;输出电压范围(10%~90%) VCC(VCC 为供电电压,额定为 5 V 直流电);安全压力 6.0 MPa;破坏压力 10.2 MPa。

2 某电动客车空调失效案例分析

某电动客车研发样机在测试过程中多次出现空调不能制冷现象。通过对比故障时的空调系统信息,确认故障原因均为空调系统长期处于低压力异常状态,系统进入了低压保护逻辑,执行了保护性停机功能。

2.1 故障初步分析

对报文进行分析,发现压力传感器的输出电压恒为 0.161 V,对比图 1 中的正常压力传感器的输出特性可知,对应的空调系统冷媒管路压力约恒为 0 MPa,导致压缩机进入了低压保护逻辑从而停止运行。空调系统冷媒管路压力为 0 MPa,可能原因如下:空调系统冷媒泄漏;压力传感器连接线路故障;压力传感器损坏。针对上述可能原因进行逐一排查。

2.1.1 空调系统冷媒泄漏

若空调系统出现泄漏,可能导致系统压力为 0 MPa。使用歧管压力表连接空调系统测试系统压力,表压显示系统压力约为 0.7 MPa,系统压力正常,可排除空调系统冷媒泄漏因素。

2.1.2 压力传感器连接线路故障

若压力传感器的连接线路出现故障,可能导致压力传感器无输出信号。根据传感器的电路接线原理(图 2),排查发现传感器的供电端口有 5 V 电压,Vout 与空调 ECU 的连接针脚为导通状态,GND 与车架搭铁为导通状态(蓄电池负极)。综上判定压力传

感器的连接线路无故障。

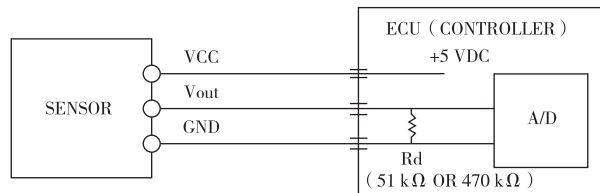


图2 压力传感器电路测试

2.1.3 压力传感器损坏分析

若压力传感器本身出现质量问题,也会出现该故障。对压力传感器进行逐项测试确认问题点。

1) 外观检查。压力传感器产品外观无明显损伤,接插件内无污染,插针无损坏情况。

2) 泄漏测试。将故障传感器连接到专业的传感器泄漏测试台,测试传感器内部泄漏情况,结果显示合格(如图 3 所示),排除传感器内部 O 型密封圈失效的情况。



图3 压力传感器泄漏测试

3) 输出特性确认。故障压力传感器的工作温度范围为-10~120 ℃,为查明环境温度与传感器失效是否有关系,分别在低温-10 ℃、常温 25 ℃以及高温 120 ℃条件下测试故障传感器的实际输出特性,测试结果如图 4 所示。

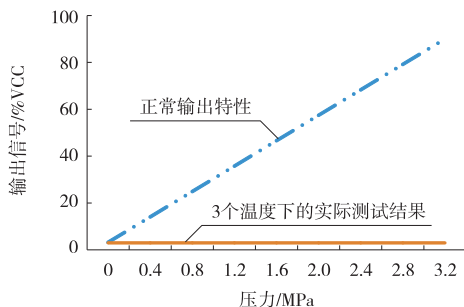


图4 压力传感器输出特性测试

从图 4 可知,当传感器的输入压力从 0 MPa 增加至 3.2 MPa 时,3 个温度下的输出电压一直都保持在

0.161 V 左右,而正常的输出特性是输出电压随着输入压力线性变化。由此确认传感器的失效与环境温度无关,是其本身有质量问题。

4) 故障件拆解。对故障传感器进行拆解,检查信号处理单元,未发现异常。

5) 电子元器件测试。首先对故障传感器的电阻及电容进行测试,并与设计资料对比,确认电阻及电容元件均正常。然后测试故障传感器的电路处理芯片的引脚输出电压,并与设计值进行对比(见表1),发现有多引脚输出异常,由此确认是电路处理芯片失效导致传感器功能失效。下面专门对此进行分析。

表 1 芯片引脚输出电压测试结果

引脚号	电压测试值/V	电压设计值/V	是否合格
1	2.09	2.66	不合格
2	0.05	0.23	不合格
3	5.07	5.05	合格
4	3.12	3.09	合格
5	2.38	2.37	合格
6	2.40	2.39	合格
7	2.39	2.37	合格
8	2.05	2.67	不合格
9	0.05	0.22	不合格
10	0.00	0.00	合格
11	0.00	1.00	不合格
12	0.14	1.00	不合格
13	0.13	0.36	不合格
14	0.92	0.99	不合格

2.2 芯片失效原因分析

电气过应力(electrical over stress,简称EOS),是电子元器件常见的损坏原因,其表现形式为过压或者过流产生大量的热能,使元器件内部温度过高从而损坏元器件(即常说的烧坏),是由电气系统中的脉冲电压导致的一种常见的损坏电子器件的方式。常见的影响因素有:①生产制程不规范,工人裸手接触到插针,静电造成EOS;②产品使用中带电插拔形成高压电弧,造成EOS;③产品工作电压不稳定超过耐压值,造成EOS。为确认芯片失效的原因,需对以上3种可能因素进行逐一排查。

2.2.1 生产制程确认

该传感器生产厂家对其生产流程制定了严格的防静电程序。员工需要穿戴防静电服、防静电鞋、防静电手环,车间门禁进行防静电检查,相关设备及周转物料架等进行接地,以保证生产过程中无EOS风险。且出厂前进行100%功能测试,保证产品无功能异常才可出厂。由此可基本排除厂家生产制程中静电造成EOS的可能。

2.2.2 带电插拔确认

通过故障调查,得知出现空调不制冷故障时,该车辆处于正常行驶状态,驾驶员及乘员未带电插拔空调压力传感器接插件。因此,可排除压力传感器正常工作过程中被人为带电插拔导致EOS的可能。

2.2.3 产品工作电压不稳

工作电压不稳定的因素一般有以下几种:①线路中可能因其他电器的工作产生干扰电压(如尖峰电压、浪涌电压);②线路因磁感效应产生干扰电压,常见的干扰电压有感应电压、反电动势(如电磁干扰EMI);③接地不良,接地电阻差异大,导致不同接地点间电位差大,从而形成干扰电压(地电位差)。

为验证其可能性,使用示波器按照表2中的步骤抓取压力传感器供电端口的电压情况。通过测试,发现雨刮器在低速和间歇挡位工作时,电路中的电流及电压出现异常,测得传感器供电电路多处峰值电流为7 A,峰值电压为38.46 V,雨刮器供电电路测得多处峰值电流为76.3 A,峰值电压为236.2 V。对于压力传感器5 V供电系统而言,38.46 V的供电电压属于严重干扰,大大超出了传感器规格书中所要求的16 V电压极限值。

表 2 电压波动采集步骤

序号	测试项目	目标
1	开关空调	考察鼓风机开关是否造成电压波动
2	开关大灯	考察大灯开关是否造成电压波动
3	使用雨刮器	考察雨刮电机开关是否造成电压波动
4	改变传感器的接地方式	考察接地方式是否造成电压波动

查看雨刮器供电电路原理图(图5),当雨刮器在低速挡或间歇挡工作时,雨刮开关继电器进行有规律的吸合和断开动作。感性负载(如继电器、电机、逆变

线圈等)在断开或停止工作时,会产生极高的反向尖峰电压,符合实际数据现象。因雨刮器供电电路与空调压力传感器供电电路有连接关系,从而导致此处的干扰电压直接施加到传感器的供电端,并将传感器中的芯片烧坏。

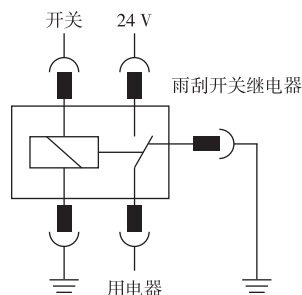


图 5 雨刮器供电电路原理图

3 解决方案验证

通过上述分析,已确认空调压力传感器损坏的原因是雨刮器供电电路中产生了尖峰电压。针对该原因制定了 4 种解决方案,并进行测试验证。4 种解决方案如下:①更换新品牌雨刮开关继电器;②更换电

机参数完全相同的新品牌雨刮器电机;③在原雨刮器供电电路中增加瞬态稳压二极管(TVS 管)抑制电压波动;④在原雨刮器供电电路中增加续流二极管抑制电压波动。

3.1 方案效果测试

1) 更换继电器。将雨刮开关继电器换成 A 厂产品并进行测试,此继电器具有反向电压抑制功能。通过测试可知,传感器供电电路峰值电流为 1.8 A,峰值电压为 18.26 V,对传感器的 5 V 供电电路上的电流和电压峰值均有抑制效果;雨刮器供电电路峰值电流为 68.16 A,峰值电压为 197.5 V,对雨刮电机 24 V 供电电路的抑制效果较差,且电压抖动次数更多。

2) 更换雨刮器电机。更换新品牌雨刮器电机后的测试结果如图 6 所示,测得传感器供电电路峰值电流为 2.91 A,峰值电压为 14.84 V;雨刮器供电电路峰值电流为 35.94 A,峰值电压为 85.4 V。尽管对传感器的 5 V 供电电路及雨刮电机 24 V 供电电路的抑制作用明显,各电路中电压波动有所减少,但干扰仍然较大。

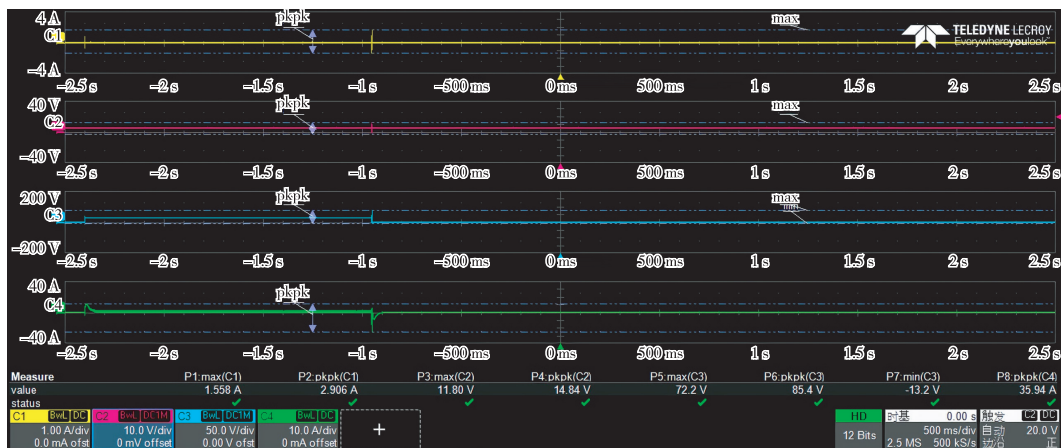


图 6 新雨刮电机测试结果

3) 增加 TVS 管。结合前面 2 个方案的测试情况以及故障机理,尝试在原雨刮器供电电路中增加 TVS 管抑制电压波动。通过测试可知,传感器供电电路峰值电流为 1.1 A,峰值电压为 9.3 V;雨刮器供电电路峰值电流为 57.6 A,峰值电压为 28.4 V。该方案的改善效果较为明显,但传感器的供电电压仍接近额定工作电压的 2 倍,且整体干扰段较多。

4) 增加续流二极管。在雨刮器供电电路中增加

续流二极管测试,将能量钳制在特定电路中。根据前期测得的电流、电压数据以及二极管选型依据,过电流和耐压能力不小于测试值,此处选择过流能力 40 A,耐压 200 V 的续流二极管。通过测试可知,传感器供电电路峰值电流为 0.22 A,峰值电压为 6.01 V;雨刮器供电电路峰值电流为 41.16 A,峰值电压为 24.84 V。该方案的供电电压几乎无异常波动,改善效果十分明显。其电路原理如图 7 所示。

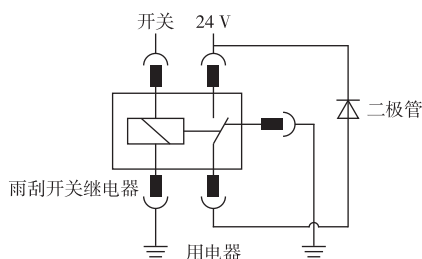


图7 增加二极管的电路原理图

3.2 解决方案实施

通过对比上述4个解决方案的效果可知,增加续流二极管的方案最好,且空调压力传感器供电电路的电流峰值和电压峰值最接近传感器的额定电流值和额定电压值,因此将此方案确定为最终解决方案,并在样车上实施。

采用增加续流二极管的解决方案对研发样机进行电路改进及测试验证。自该解决方案实施以来,原问题未再出现,说明该方案切实有效。将该方案作为雨刮器供电电路的标准化设计方案,推广应用于其他车辆开发,可降低设计风险,避免同类问题重复发生。

4 结束语

本文通过详细分析某电动客车空调压力传感器失效的原因,提出了多种解决方案,最终通过测试对比采取了增加续流二极管的措施。该解决方案能有效改善雨刮器供电电路上的电压波动,解决了空调压

力传感器因整车电压不稳而造成的EOS问题。

参考文献:

- [1] 吴建平,彭颖. 传感器原理及应用[M]. 北京:机械工业出版社,2021:10-58.
- [2] 许钦清. 纯电动汽车空调系统故障诊断方法研究[D]. 西安:长安大学,2019.
- [3] 叶军红. 压力传感器在汽车行业的应用现状[J]. 汽车电器,2020(8):59-61.
- [4] 郑浩,李延夫,孙礼,等. 基于可靠性强化试验的硅基压力传感器设计改进[J]. 仪表技术与传感器,2011(12):12-31.
- [5] 陈玲. 新型流量测量仪表的应用和发展[J]. 传感器与微系统,2007,26(6):8-11.
- [6] 杨守武. 关于压力传感器与注氟嘴配合密封失效原因分析与改进措施[J]. 电子产品世界,2018,25(6):44-46.
- [7] 迟玉华. 一种燃油压力传感器失效故障分析及整改[J]. 汽车实用技术,2020(8):199-201.
- [8] 崔宏敏,陈宝成,崔光浩,等. 振动环境下压力传感器失效机理分析[J]. 振动与冲击,2017,36(2):207-211.
- [9] 赵光亮,史家涛,杨英振,等. 柴油发动机共轨压力传感器失效分析与研究[J]. 内燃机与配件,2022(1):41-43.
- [10] 杜科. 温度和压力条件下SiC电容式压力传感器的失效机理研究[D]. 成都:电子科技大学,2021.
- [11] 罗天成. SiC电容式高温压力传感器结构设计及其失效机理研究[D]. 成都:电子科技大学,2020.

(上接第18页)

- [5] MCINTYRE M L, GHOTIKAR T J, VAHIDI A, et al. A Two-Stage Lyapunov-Based Estimator for Estimation of Vehicle Mass and Road Grade[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2009, 58(7):3177-3185.
- [6] 雷雨龙,付尧,刘科. 基于扩展卡尔曼滤波的车辆质量与道路坡度估计[J]. 农业机械学报,2014,45(11):9-13.
- [7] 任志英,沈亮量,黄伟,等. 基于AEKF的车辆质量与道路坡度实时估计[J]. 振动、测试与诊断,2020,40(4):758-764.
- [8] 陈鹏飞. 汽车动力学控制系统中的状态参数实时估计与工程应用[D]. 长春:吉林大学,2018.
- [9] 李传友,任宪丰,孙晓鹏,等. 基于最小二乘法的商用车整

车质量估计研究[J]. 汽车电器,2023(11):48-50.

- [10] 高林,吴青,贺宜. 复杂工况下货运车辆质量和道路坡度联合估计[J/OL]. 机械工程学报, [2024-06-07]. https://xueshu.baidu.com/usercenter/paper/show?paperid=1r2s0rs07p3n0jw00r700jc06q698991&site=xueshu_se.
- [11] 叶明,卢祥伟,张利杰,等. 双遗忘因子最小二乘法车辆质量和时变坡度估计[J]. 重庆理工大学学报,2023,37(11):1-9.
- [12] 隋新宇. 应用于重型载货车的车辆质量估计方法研究[D]. 西安:长安大学,2023.
- [13] 徐达伟,回春. 基于Cruise的纯电动客车仿真分析[J]. 武汉理工大学学报(信息与管理工程版),2015(2):183-186.