

商用汽车电器件的工作特点及防护途径分析

周瑞阳 金 茜 蔺小庆

陕西重型汽车有限公司 陕西 西安 710200

摘要：随着商用车向智能化、电动化、网联化方向的加速演进，其电气系统日益复杂，承载的功能愈发关键。作为车辆运行的“神经中枢”，商用汽车电器件在严苛的工况下必须保持高度的可靠性与稳定性。本文旨在系统地剖析商用汽车电器件区别于乘用车的独特工作特点，并深入探讨与之相匹配的综合性防护策略。文章首先从供电体系、电压标准、网络架构等维度，详细阐述了商用汽车电器件在高负载、长周期、强干扰环境下的运行特性；其次，聚焦于温度、湿度、振动、电磁兼容性（EMC）等核心环境应力，揭示了这些因素对电器件性能与寿命的深刻影响；再次，本文构建了一个涵盖元器件选型、电路设计、线束保护、系统冗余及软件安全等层面的多层次防护体系；最后，前瞻性地指出，未来商用汽车电器件的防护将更加依赖于新材料、新工艺的应用以及功能安全（如ISO 26262）理念的深度融入，以应对日益严峻的可靠性挑战。

关键词：商用汽车；电器件；工作特点；环境应力；防护途径；功能安全

引言

在全球物流与运输业蓬勃发展的背景下，商用汽车——包括重型卡车、客车、专用车辆等——作为国民经济的大动脉，其技术性能直接关系到运输效率、运营成本与道路安全。现代商用汽车已不再是简单的机械运载工具，而是集成了动力控制、车身管理、信息娱乐、高级驾驶辅助系统（ADAS）乃至自动驾驶功能的移动智能终端。这一转变的核心驱动力，正是其背后庞大而精密的电气与电子（E/E）系统。然而，商用汽车独特的使用场景——如长时间连续运行、频繁启停、重载爬坡、极端气候适应以及遍布全球的复杂路况——为其电器件的可靠工作带来了前所未有的挑战。相较于乘用车，商用汽车的电器件往往需要承受更高的功率负荷、更剧烈的机械冲击、更宽泛的温湿度变化以及更为复杂的电磁环境。任何单个电器件的失效，都可能引发连锁反应，导致车辆抛锚、功能降级甚至安全事故，造成巨大的经济损失和声誉损害。因此，深入理解商用汽车电器件的工作特点，并据此制定科学、有效的防护途径，不仅是保障车辆正常运行的基础，更是提升产品核心竞争力、赢得客户信赖的关键所在。本文将围绕这一核心议题，展开全面而深入的理论分析。

1 商用汽车电器件的核心工作特点

商用汽车电器件的设计与应用，深深植根于其特定的车辆平台和作业需求，形成了若干鲜明的特点。

1.1 高电压、大电流的供电体系

为满足启动大排量柴油发动机、驱动众多高功率用电器（如空气压缩机、电动液压泵、大功率照明系统、

驻车空调等）的需求，商用汽车普遍采用24V（或由两个12V蓄电池串联构成）的直流供电系统，这显著区别于乘用车主流的12V系统。在启动瞬间，启动电机的电流可高达数千安培；在满载运行时，整车的持续电流负载也远高于乘用车^[1]。这种高电压、大电流的工作模式，对电器件的电气间隙、爬电距离、触点材料、导线截面积以及连接器的载流能力都提出了极为严苛的要求。同时，发电机在高转速下的输出电压波动范围也更大，要求下游电器件具备更强的电源适应性和抗浪涌能力。

1.2 复杂且高可靠的网络通信架构

现代商用汽车的E/E架构正从传统的分布式向域集中式乃至中央计算式演进，但其内部依然存在着多种车载网络协议共存的局面。除了广泛应用的CAN（Controller Area Network）总线外，LIN（Local Interconnect Network）、FlexRay，甚至以太网（Ethernet）都在不同功能域中扮演着重要角色。例如，动力总成域可能采用高速CAN FD，而车身舒适域则使用低成本的LIN总线。这种异构网络的集成，要求作为网络节点的电器件（如ECU）必须具备多协议兼容能力和强大的网关功能。更重要的是，商用车对网络通信的实时性和可靠性要求极高，任何关键报文的丢失或延迟都可能导致严重的功能安全问题，因此，网络管理、错误帧处理和故障容错机制是商用汽车电器件设计中的重中之重。

1.3 严苛的物理与化学环境适应性

商用汽车的运行环境堪称“地狱级”。在物理层面，电器件需长期承受高强度的随机振动与冲击，尤其是在非铺装路面行驶时，这种机械应力极易导致焊点疲

劳、元器件松动、连接器退针等故障。在化学层面，车辆可能暴露于高盐雾（沿海地区）、高粉尘（矿区、工地）、油污、防冻液、制动液等多种腐蚀性介质中。此外，商用汽车的发动机舱和底盘区域空间紧凑，热源密集，使得电器件的工作环境温度范围极宽，通常要求能在-40℃至+125℃甚至更高的温度下正常工作。这种极端的温变循环会加速材料老化，引发热应力失效^[2]。上述种种严苛条件，共同构成了对商用汽车电器件环境适应性的终极考验。

1.4 长生命周期与高可用性要求

商用汽车作为生产资料，其设计使用寿命通常长达10年甚至更久，累计行驶里程可达百万公里级别。在此期间，车辆期望能够实现“出勤即可靠”的高可用性，最大限度地减少因故障导致的停驶时间。这就要求其电器件不仅要在初始状态下性能优异，更要具备卓越的长期耐久性和老化稳定性。制造商在设计阶段就必须进行充分的寿命预测和加速老化试验，确保电器件在整个生命周期内都能维持其功能完整性。这种对长寿命和高可用性的执着追求，是商用汽车电器件区别于消费类电子产品最本质的特征之一。

2 影响商用汽车电器件可靠性的主要环境应力

上述工作特点的背后，是多种环境应力的综合作用，它们是导致电器件性能退化和失效的根本原因。

2.1 热应力

热应力主要来源于两个方面：一是外部环境温度的变化，二是电器件自身工作时产生的焦耳热。在高温环境下，半导体器件的漏电流增大，电解电容的寿命急剧缩短，塑料外壳可能发生蠕变变形。在低温环境下，电池容量下降，液晶显示屏响应迟缓，某些材料会变脆。而反复的热胀冷缩循环，则会在不同热膨胀系数的材料界面处产生机械应力，最终导致焊点开裂、芯片分层等失效模式。对于安装在发动机舱附近的电器件，热管理（如散热片、导热硅脂的应用）是设计的关键。

2.2 机械应力

振动和冲击是商用汽车电器件面临的另一大威胁。持续的振动能量会通过共振放大，作用于PCB板上的元器件，特别是质量较大的元件（如变压器、继电器、电解电容），容易造成引脚断裂、焊盘剥离。强烈的冲击则可能直接损坏脆弱的部件或导致连接松动。为了抵御这些机械应力，通常需要在结构设计上采取加固措施，如增加PCB支撑柱、使用灌封胶固定元器件、选用抗震性能更好的连接器等。

2.3 湿气与化学腐蚀

湿气侵入是导致电器件短路、漏电、金属腐蚀和霉菌滋生的主要原因。在高湿环境中，水汽会沿着材料表面或内部微孔渗透，在电场作用下形成电解通道，引起电化学迁移（ECM），最终导致绝缘失效。盐雾、酸雨、油污等化学物质则会直接侵蚀金属触点、引线框架和PCB铜箔，破坏其导电性和可焊性。因此，电器件的密封防护等级（IP等级）至关重要，通常要达到IP6K9K（防高压热水喷射）等高等级防护。

2.4 电磁干扰（EMI）与电磁敏感度（EMS）

商用汽车内部是一个复杂的电磁环境。大功率的电机、继电器、开关电源在工作时会产生强烈的传导和辐射干扰，而外部环境中的广播信号、雷达、其他车辆的点火系统等也是潜在的干扰源。商用汽车电器件不仅要自身产生的电磁发射（EMI）符合法规限值，不干扰其他设备，更要具备足够的电磁敏感度（EMS），即在规定的干扰强度下仍能正常工作而不发生误动作或功能丧失。这要求在电路设计中广泛采用滤波、屏蔽、接地等EMC技术。

3 商用汽车电器件的系统性防护途径

针对上述工作特点和环境应力，必须构建一个覆盖硬件、软件、结构和系统层面的全方位防护体系。

3.1 元器件级防护：严苛的选型与认证

防护的第一道防线在于元器件本身。商用汽车电器件必须选用符合AEC-Q100（集成电路）、AEC-Q200（无源器件）等汽车级可靠性标准的元器件。这些元器件在设计和制造过程中就经过了比工业级或消费级产品更为严酷的应力测试，如高温工作寿命（HTOL）、温度循环（TC）、高加速应力测试（HAST）等。此外，对于关键的安全相关部件，还需满足功能安全标准（如ISO 26262）中对硬件架构指标（如SPFM, LFM）的要求^[3]。例如，在ADAS雷达的电源管理芯片选型中，必须确保其能承受ISO 7637-2标准定义的200V抛负载冲击。

3.2 电路与PCB设计级防护：稳健的电气架构

在电路设计层面，应采用多重防护策略。电源入口处需配置TVS二极管、压敏电阻（MOV）、瞬态抑制二极管阵列等瞬态抑制器件，以吸收来自电源线的浪涌和脉冲干扰。信号线上应加入RC滤波、磁珠、共模扼流圈等，抑制高频噪声。对于模拟信号，应采用差分传输和良好的屏蔽措施。在PCB布局布线时，要遵循严格的EMC设计规则，如缩短高频信号走线、增大电源/地平面面积、合理分割模拟/数字区域、避免平行走线等。此外，关键信号线应采用冗余设计，以提高系统的容错能力。PCB板材也应选用高Tg（玻璃化转变温度）、低Z轴

热膨胀系数的材料,以增强抗热应力能力。

3.3 结构与封装级防护:坚固的物理屏障

电器件的外壳和内部结构是抵御外部环境侵蚀的物理屏障。外壳材料通常选用高强度、耐候性好的工程塑料(如PA66+GF30)或金属(如铝合金),并通过超声波焊接、激光焊接或密封圈等方式实现高等级的IP防护。内部PCB板常采用三防漆(Conformal Coating)喷涂,形成一层透明的保护膜,有效隔绝湿气、灰尘和化学污染物。对于特别恶劣的应用场景,还可采用整体灌封(Potting)技术,用环氧树脂或硅胶将整个电路板包裹起来,提供极致的机械和环境防护。灌封不仅能防潮、防尘、防震,还能改善散热,但需注意其对维修性和重量的影响。

3.4 线束与连接系统防护:可靠的信号与能量通道

线束是车辆的“血管”和“神经”,其可靠性直接关系到电器件的性能发挥。商用汽车线束普遍采用双层保护,内层为耐磨的编织物或胶带,外层为抗紫外线、耐油污的波纹管或蛇皮管。在穿过车身钣金孔、与其他部件接触摩擦的区域,需加装耐磨护套或橡胶过线圈。连接器的选择尤为关键,必须选用具有二次锁止(TPA/CPA)、防误插、高插拔次数和良好密封性能的汽车级连接器,并确保端子压接和超声波焊接的质量^[4]。国际标准ISO 4009:2026对牵引车与挂车间的连接器布局进行了强制规定,凸显了其在系统安全中的核心地位。

3.5 系统与软件级防护:智能的健康管理

在系统层面,可通过设计冗余架构来提升整体可靠性。例如,对于关键的传感器信号,可采用双路采集并进行交叉校验。在软件层面,应嵌入完善的自诊断(Self-Diagnosis)和故障处理(Fail-Safe/Fail-Operational)逻辑。ECU能够实时监控自身的电源电压、时钟频率、内存状态以及关键输入信号的有效性,一旦检测到异常,能立即进入预设的安全状态(如关闭高边驱动、点亮故障灯、发送错误报文),并向驾驶员或远

程监控中心报告故障信息,为预防性维护提供依据。功能安全标准ISO 26262为此提供了完整的开发流程和验证方法论。

4 结语

商用汽车电器件作为现代智能商用车辆的核心组成部分,其工作环境之严苛、性能要求之高、生命周期之长,均对设计与制造提出了极致的挑战。本文系统地分析了其高电压大电流、复杂网络、强环境适应性及长寿命高可用性等核心工作特点,并深入剖析了热、机械、湿气、电磁等主要环境应力对器件可靠性的深刻影响。在此基础上,构建了一个从元器件选型、电路设计、结构封装、线束连接到系统软件的多层次、立体化防护体系。展望未来,随着电动化(如800V高压平台)和智能化(如L3级以上自动驾驶)的深入推进,商用汽车电器件将面临更高电压、更大算力、更严苛功能安全要求的新挑战。防护技术的发展也将与时俱进,更多地融合新材料(如纳米涂层、先进复合材料)、新工艺(如3D-MID、SiP封装)以及基于大数据和人工智能的预测性健康管理系统。唯有持续创新,将可靠性与安全理念深植于产品开发的每一个环节,才能确保商用汽车电器件在未来的激烈竞争中,始终成为值得信赖的“幕后英雄”,为全球物流与运输业的安全高效运行保驾护航。

参考文献

- [1]何文兵,王金,何玉龙,等.商用车电器件可靠性提升技术及应用[J].汽车电器,2025,(07):104-108.
- [2]刘甘霖,张辉.基于西门子PLC的商用车驾驶室电器检测系统设计[J].湖北工业职业技术学院学报,2024,37(03):72-75+79.
- [3]潘旭.M商用车电子零部件公司再制造业务战略研究[D].中南财经政法大学,2024.
- [4]张婷婷,朱仰智,张依依,等.商用汽车防腐性能研究及应用[J].汽车实用技术,2025,50(23):109-113.