

# 特种车辆车载制氧装置环境适应性设计及应用

王博, 刘晓峰, 刘文佳, 吴亚楠, 李毅, 崔淑洁, 张伟, 李平

(兵器工业卫生研究所人-机-环重点实验室, 西安 710065)

**摘要:** **目的** 通过对特种车辆车载制氧装置进行环境适应性设计, 确保在高原环境、复杂电磁环境以及特殊环境下其功能、性能满足要求。**方法** 通过车载制氧装置工作要求和环境影响因素分析, 采用空气压缩泵质量排气量补偿、高效散热降温、综合减振、电磁兼容等关键技术, 对车载制氧装置低气压、高低温、湿热、振动冲击、复杂电磁环境进行综合化环境适应性设计, 并进行试验验证。**结果** 车载制氧装置模拟海拔 4 500 m 环境下的制氧量为 3.41 L/min、氧气质量分数为 56.7%, 在 5 200 m 高原环境下的制氧量为 3.30 L/min、氧气质量分数为 51.8%。在高低温环境下能正常工作, 有氧气输出。在湿热、振动冲击环境下, 表面无破裂, 功能正常, 制氧量>3 L/min, 氧气质量分数>90%。其电磁兼容性符合 GJB 151B—2013《军用设备和分系统电磁发射和敏感度要求与测量》对陆军地面设备的规定, 满足实车电磁兼容要求。**结论** 该车载制氧装置采取的环境适应性设计方法有效, 能够满足相关标准。

**关键词:** 车载制氧装置; 环境适应性; 低气压; 高低温; 湿热; 振动冲击; 电磁兼容; 试验验证

中图分类号: TJ819

文献标志码: A

文章编号: 1672-9242(2024)12-0042-09

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2024.12.006

## Design and Application of Environmental Worthiness of Onboard Oxygen Generator for Special Vehicles

WANG Bo, LIU Xiaofeng, LIU Wenjia, WU Yanan, LI Yi, CUI Shujie, ZHANG Wei, LI Ping

(Key Laboratory of Human-Machine-Environment, Hygiene Research Institute of Ordnance Industry, Xi'an 710065, China)

**ABSTRACT:** The work aims to conduct environmental worthiness design to the onboard oxygen generator of special vehicles, so that the generator can meet the function and performance requirements in the plateau environment, complex electromagnetic and special environment. Based on the analysis of the working requirements and the environmental impact factors of the onboard oxygen generator, the comprehensive environmental worthiness design of the onboard oxygen generator in low pressure, high and low temperature, wet and hot, vibration and shock, and complex electromagnetic environment was carried out by adopting the key technologies of air compression pump mass displacement compensation, efficient heat dissipation and cooling, comprehensive shock absorption and electromagnetic compatibility and then verified by the test. The onboard oxygen generator had an oxygen production of 3.41 L/min and an oxygen concentration of 56.7% at a simulated altitude of 4 500 m and an oxygen production of 3.30 L/min and an oxygen concentration of 51.8% in the plateau environment of 5 200 m. The generator could work normally in high and low temperature environment, with oxygen output. The surface was not damaged, the function was normal, the oxygen production was greater than 3 L/min, the oxygen concentration was more than 90% in wet and hot and

收稿日期: 2024-07-10; 修订日期: 2024-09-14

Received: 2024-07-10; Revised: 2024-09-14

引文格式: 王博, 刘晓峰, 刘文佳, 等. 特种车辆车载制氧装置环境适应性设计及应用[J]. 装备环境工程, 2024, 21(12): 42-50.

WANG Bo, LIU Xiaofeng, LIU Wenjia, et al. Design and Application of Environmental Worthiness of Onboard Oxygen Generator for Special Vehicles[J]. Equipment Environmental Engineering, 2024, 21(12): 42-50.

vibration and shock environment. The electromagnetic compatibility met the requirements of GJB 151B—2013 “Requirements and Measurement of Electromagnetic Emission and Sensitivity of Military Equipment and Subsystems” for army ground equipment and satisfied the requirements of electromagnetic compatibility for real vehicles. The environmental worthiness design method for the onboard oxygen generator is effective and can meet the relevant standards.

**KEY WORDS:** onboard oxygen generator; environmental worthiness; low pressure; high and low temperature; wet and hot; vibration and shock; electromagnetic compatibility; verification by test

我国作为世界上高原地区较为辽阔的国家之一, 其独特的高原地理环境带来了诸多挑战。特别是大气压力降低、昼夜温差的剧烈变化, 均对人体产生了显著影响, 其中缺氧问题尤为严重。众多研究证实, 氧疗是应对高原缺氧问题的有效手段。在现有的制氧技术中, 变压吸附技术以成熟度高、产氧浓度高、能耗低的特点脱颖而出, 目前变压吸附制氧设备在高原地区得到广泛应用, 但现有制氧设备较多采用余量设计, 通过选型大排量的空气压缩泵和装填更多的分子筛料来满足制氧装置高原环境下的制氧性能, 导致设备质量、体积、功耗偏大。

同时, 现代特种车辆在高原环境下作训或执行任务时, 面临各种气候、机械、电磁等复杂环境, 受此类环境的影响, 造成车载设备故障的比例较高。GJB 4239—2001《装备环境工程通用要求》中规定: 环境适应性是指装备(产品)在其寿命期内可能遇到的各种环境的作用下能实现其能所预定功能、性能和(或)不被破坏的能力<sup>[1]</sup>。车载制氧装置作为高原环境下车辆乘载员生命保障的重要系统, 其功能、性能直接影响乘载员的作业能力, 质量体积直接影响装车适应性。因此, 进行车载制氧装置环境适应性设计是保证制氧装置可靠运行、持续保障用氧需求的必要手段。本文以车载制氧装置为例, 分析车载制氧装置工作要求和面临的工作环境, 采用综合化的设计措施提高制氧装置的环境适应能力, 并通过试验, 验证车载制氧装置环境适应性设计措施的可行性, 同时为车载设备的环境适应性设计提供参考。

## 1 环境适应性要求与分析

### 1.1 工作要求

车载制氧装置采用过渡板的方式安装于特种车辆内部, 氧气质量分数在标准大气压环境下 $\geq 90\%$ , 在海拔高度4 500 m环境下 $\geq 50\%$ , 制氧量 $\geq 3$  L/min, 能够在车辆振动冲击条件下正常使用, 在高低温环境下能够开机工作(有氧气输出), 正常工作时, 不影响车内其他电气设备正常工作。

### 1.2 工作环境影响分析

根据车载制氧装置的组成特点和工作剖面, 其面临的工作环境影响主要包括气候环境、机械环境和电

磁环境<sup>[2-10]</sup>。

1) 气候环境。高原地区气压下降, 制氧装置主要部件空气压缩泵排气量下降, 制氧所需的空气量不足, 降低了产氧浓度和产氧流量。同时, 制氧装置分子筛吸附塔的最佳吸附温度 $15\sim 25$  °C, 高原地区室外温度较低, 低温会导致制氧装置内部元器件的物理损伤, 引起性能下降, 造成材料强度降低, 管线路发脆。夏季作训时, 车辆内部温度过热问题突出, 会造成分子筛吸附塔吸附性能降低, 从而影响制氧性能。

2) 机械环境。制氧装置采用过渡板的形式安装于车体内部, 在车辆运行、工作过程中常会受到各种颠簸、倾斜、冲击等机械力影响, 长时间的振动和冲击可能造成制氧装置机械应力疲劳、内部结构失效、电路连接断裂、管路或电子插接件牢靠性降低。

3) 电磁环境。制氧装置内部包含空气压缩泵、控制器、电磁阀等电子电器部件, 在工作过程中可能会产生电磁波。外界电磁波也可能影响制氧装置的正常工作。

### 1.3 组成及工作原理

车载制氧装置主要由空气压缩泵、分子筛吸附塔、风扇、冷却器、电磁阀、控制器、流量计、电连接器、调压阀、壳体、减振器等组成, 如图1所示。

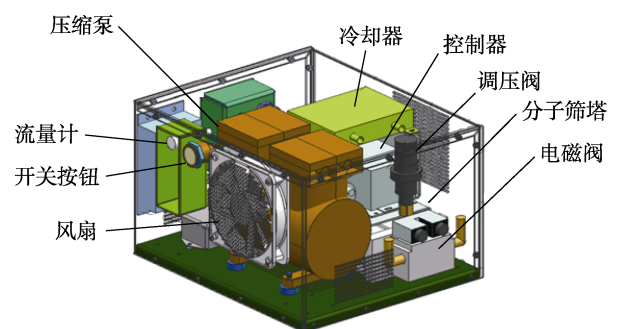


图1 车载制氧装置内部结构  
Fig.1 Internal structure diagram of onboard oxygen generator

制氧装置通过压缩泵吸入空气, 加压降温后的压缩空气由电磁阀控制进入分子筛吸附塔, 分子筛将空气中的氮气与氧气进行分离。当分子筛吸附氮气接近饱和时, 通过电磁阀控制气路切换, 吸附塔停止制氧进行排氮。同时, 另一吸附塔进入制氧状态, 通过2个吸附塔的交替工作, 完成连续的氧气连续输出。

## 2 环境适应性设计措施与方法

环境适应性设计主要分为2个方面,其一是基于改善环境或缓解环境影响采取措施;其二是通过选用耐环境能力强的元器件、材料、工艺和结构等,提高整机的环境适应性<sup>[11-12]</sup>。通过对车载制氧装置工作环境的影响因素进行分析,为提高制氧装置环境适应能力,使其满足特种车辆乘载员用氧保障需求,进行环境适应性设计。

### 2.1 高海拔低气压环境适应性设计

根据制氧装置工作原理和空气压缩泵的性能特

征,随着海拔高度升高,环境压力下降,空气压缩泵的质量排气量下降。一般海拔高度每升高1 000 m,空气压缩泵的质量排气量减少11%~12%。结合分子筛吸附塔最佳吸附压力0.15~0.2 MPa,为满足高原地区制氧量和氧气浓度,选择输出压力为0.2 MPa、质量排气量为58 L/min的空气压缩泵。

为了满足不同海拔下制氧装置的制氧性能,采用空气压缩泵质量排气量补偿技术,在空气压缩泵驱动模块中,加装了转速控制电路,根据气压传感器的信号控制压缩泵的转速。空气压缩泵采用随海拔高度自适应分档控制,从气源角度解决低气压下制氧效率降低的问题。分档控制的主要参数见表1。

表1 制氧装置随海拔高度分档控制主要参数

Tab.1 Main parameters of classification control of oxygen generator with altitude

序号	工作状态	大气压/kPa	对应海拔高度/m	压缩泵转速/(r·min <sup>-1</sup> )	输出压力/MPa	排气量/(L·min <sup>-1</sup> )
1	转速一	101.3~70.11	0~3000	700		
2	转速二	70.11~57.7	3000~4500	1200	0.20~0.25	20~58
3	转速三	57.7以下	4500~6000	1500		

### 2.2 抗高低温环境适应性设计

高原地区常伴有高寒环境,为了提高制氧装置在低温环境下的工作可靠性,在元器件选择方面,采用低温型二位四通电磁阀,管路线路在安装过程中预留一定冗余度。夏季高原作业时,车辆舱室空气温度较高,再者空气压缩泵压缩后的空气温度较高,不利于空气压缩泵散热,有可能因热保护而自动关机。同时,分子筛吸附塔吸附效率受温度的影响较为敏感,为提高高温条件下的散热效率,制氧装置壳体开散热孔形成通风气道。散热孔采用3 mm圆孔形式,在确保散热的情况下保障电磁兼容要求。

内部采用抗热疲劳长、力学性能好的紫铜U形盘管+散热翅片的散热器,结合输出风量100 cfm散热风扇,对空气压缩泵和压缩后的高温气体实现高效散热。同时,为了避免车辆内部高温位置对制氧性能的影响,制氧装置在安装过程中尽量避开车内高温位置。

### 2.3 抗湿热环境适应性设计

抗湿热性能的好坏在一定程度上决定了制氧装置环境适应性水平和可靠性的高低。针对车载制氧装置抗湿热环境,从材料、工艺和结构等方面进行耐环境设计。

1) 材料和元器件选型。制氧装置控制器部分所用电子元器件及电路航空插头选用具备水密能力和耐腐蚀等级较高的电子器件,安装紧固件选用耐腐蚀性好的不锈钢材质,壳体采用防锈性能好的5052合金铝。

2) 工艺防护措施。在工艺上,采用密封及表面

处理的形式提高制氧装置环境适应性。对控制电路板表面喷涂CRC2043三防漆,对主要部件空气压缩泵、分子筛吸附塔外表面进行钝化处理,对壳体内部进行表面阳极化处理、外表面喷涂GY04-60丙烯酸聚氨酯半光磁漆面,采用底、中、外三层喷涂工艺,提高制氧装置耐腐蚀性能。

3) 结构设计。在结构设计上采用多重防滑措施,对于制氧装置控制电路板,采用外壳包装,并对连接处进行橡胶密封设计,使得制氧装置控制系统具有可靠的防潮防水性能。制氧装置电连接器与壳体连接处,采用导电橡胶进行密封处理。

### 2.4 车载制氧装置抗振动冲击设计

为满足车载使用的防振动与抗冲击要求,从部件选型、装置结构、紧固件选择、减振方式等方面对制氧装置进行抗冲击减振设计。对制氧装置内部的零部件进行了加固,同时在制氧装置底部设计采用缓冲方式,并通过ANSYS力学仿真软件进行振动、冲击模态分析,以指导、验证加固、缓冲系统的设计,确保制氧装置具有防振动冲击能力。加固设计主要采取以下措施:

1) 制氧装置内部采用模块化、一体化设计,对分子筛塔及电磁阀进行一体化集成设计。

2) 对空气压缩泵采用增加微型减振设计、压缩泵与底板采用放松螺母紧固提高制氧装置抗振动冲击性能。在装置壳体底板安装4个减振器,如图2所示。

3) 对壳体、内部结构做加强处理。

4) 选择高强度、带弹簧垫片的紧固件,选择带

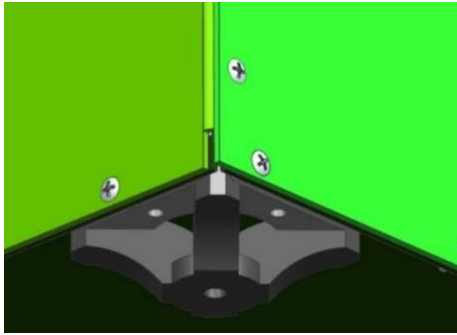


图 2 减振器安装  
Fig.2 Installation of shock absorber

自动锁紧功能的气路、电路快插件,并在制氧装置装配时用扭矩扳手对螺栓紧固状态进行确认。

### 2.5 车载制氧装置电磁兼容设计

车载制氧装置在电磁环境下主要受到传导干扰和辐射干扰,其中传导干扰主要来自电源线和信号线差模干扰以及信号线、电源线和大地间的共模干扰;辐射干扰主要来源于控制器内部电压转换模块、控制模块、电磁阀切换耦合等快速电压电流变化的位置,根据整机电路结构,其电磁兼容传播途径主要包括印制板走线、电缆、缝隙传播。为了有效解决车载制氧装置电磁兼容问题,在电子元件选型过程中采用带屏蔽的继电器和变压器,内部采用屏蔽信号线防线路之间的干扰耦合,电磁阀采用带屏蔽的金属阀块<sup>[13-19]</sup>。除此之外,依据车载制氧装置控制关系及电磁兼容干扰源和干扰途径,对其进行以下设计。

1) 滤波器设计。车载制氧装置采用电源信号组

合滤波器(如图 3 所示)减小线缆传输过程中的电磁干扰。该滤波器采用双绞线,消除高频信号。安装于内部,与支架面接触,可靠接地。滤波器输入线输出线保持一定距离,防止效能受损。安装位置接近电源入口,较小输入线缆长度降低线缆辐射。



图 3 电源信号组合滤波器  
Fig.3 Power signal combination filter

2) 控制电路电磁兼容设计。车载制氧装置控制系统运用接地和屏蔽方法,防止构成地环路和耦合无用信号。采用由电容、电感和电阻组成的滤波电路,使信号中特定的频率成分通过,而极大地衰减其他频率成分。通过电连接器进入制氧装置的供电首先进行滤波,机壳内部的供电线采用屏蔽线缆,可有效降低传导发射导致的电磁辐射强度,电源输入输出线与内部其他控制线隔离包扎,且制氧装置内部线缆尽量远离散热孔及壳体缝隙处。电连接器与制氧装置壳体搭接,在连接处去除喷漆,并增加导电衬垫,确保电连接器与制氧装置壳体的阻抗最小(如图 4 所示)。对电源接线端子使用导电铝箔纸包扎,可有效屏蔽电源产生的电磁场。

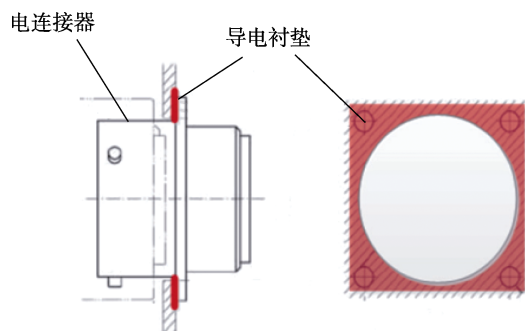


图 4 电连接器与制氧装置壳体搭接  
Fig.4 Electrical connector connected to the oxygen generator

3) 接地处理电磁兼容设计。接地可以在很大程度上阻碍甚至是消除设备的电磁干扰源,车载制氧装置内部结构件除压缩泵外,均通过螺钉有效、可靠地紧固在底座、支架或前壳体上,导通性能良好。压缩泵通过 V 形减振器安装于底板,对压缩泵进行接地处理(如图 5 所示),同时考虑整机接地,在底部安装处做接地处理(如图 6 所示)。

### 3 车载制氧装置环境适应性试验与应用验证

通过对车载制氧装置工作要求、面临的环境因素分析,开展了制氧装置环境适应性设计,为了确保制氧装置在复杂环境下,能够正常工作。按 GJB 150A—2009《军用装备实验室环境试验方法》中第 2 部分低

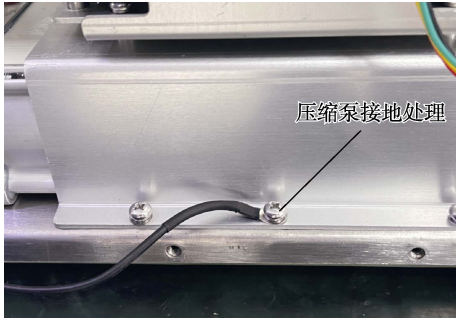


图5 压缩泵接地处理  
Fig.5 Compression pump grounding

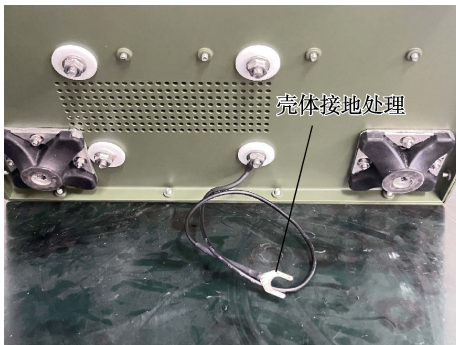


图6 壳体接地处理  
Fig.6 Shell grounding

气压(高度)试验、第3部分高温试验、第4部分低温试验、第9部分湿热试验、第16部分振动试验、第18部分冲击试验对制氧装置环境适应性进行验证。按GJB 151B—2013《军用设备和分系统电磁发射和敏感度要求与测量》,针对制氧装置进行电源线传导试验CE102、电源线传导敏感度CS101、电缆束注入传导敏感度CS114、电缆束注入脉冲激励传导敏感度CS115、电缆和电源线阻尼正弦瞬态出传导敏感度CS116、电场辐射发射试验RE102、电场辐射敏感度RS103等7项试验验证<sup>[20-26]</sup>。同时,在实车环境下,采用过渡板形式将制氧装置安装于某型车辆进行了电磁兼容性测试、车辆持续行驶适应性测试。

### 3.1 车载制氧装置实验室环境试验验证

1) 高海拔低气压环境适应性验证。按照 GJB 150.2A—2009《军用装备实验室环境试验方法第2部分:低气压(高度)试验》要求,选用程序II——工作/机外挂飞进行试验,低气压箱变化速率设置为10 m/s,进行低气压工作试验。当试验箱压力稳定在57.7 kPa(等效海拔4500 m)后(如图7所示),对其进行性能测试,测试结果制氧量为3.41 L/min、氧气质量分数为56.7%,满足高海拔低气压下性能指标要求。表明采用空气压缩泵质量排气量补偿技术能够依据海拔高度通过改变空气压缩泵转速提高压缩泵进气量,从环境气源角度解决高原环境下制氧装置效率低的技术问题,克服低气压环境对制氧效率的影响。

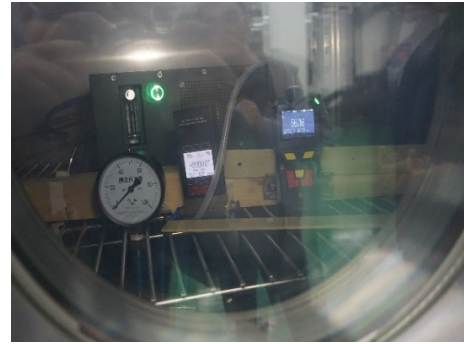


图7 高海拔低气压环境适应性验证  
Fig.7 High-altitude and low-pressure environment worthiness verification

2) 耐高、低温环境适应性验证。按照 GJB 150.3A—2009《军用装备实验室环境试验方法第3部分:高温试验》程序II中规定,将非工作状态的制氧装置按照正常安装使用状态置于温控箱,试验箱内温度变化速率设置为3 °C/min,试验箱温度达到-43 °C和+46 °C,分别保持2 h后,开启制氧装置,制氧装置均能够正常工作(工作指示灯亮,有氧气输出),如图8所示。关闭制氧装置,温度稳定至大气条件后,对制氧量和氧气质量分数进行测试。高温试验结束后,制氧量为3.44 L/min、氧气质量分数为94.4%;低温试验结束后,制氧量为3.47 L/min,氧气质量分数为94.7%。高温、低温试验结果表明,在高温+46 °C、低温-43 °C条件下,制氧装置开机工作,有氧气输出,恢复至大气条件后,制氧量>3 L/min、氧气质量分数>90%。



图8 高低温环境适应性验证  
Fig.8 High and low temperature environment worthiness verification

3) 抗湿热环境适应性验证。按照 GJB 150.9A—2009《军用装备实验室环境试验方法第9部分:湿热试验》中图1规定的方法进行湿热循环控制,试验周期为10个周期(24 h为1个循环周期),试验结束后制氧装置表面无裂缝、脱皮、气泡等缺陷(如图9所示),且制氧量为3.45 L/min、氧气质量分数为93.3%。湿热试验结果表明,经过连续10个周期的湿热循环,装置表面未出现任何裂纹或腐蚀迹象。



图 9 湿热环境适应性验证

Fig.9 Wet and hot environment worthiness verification

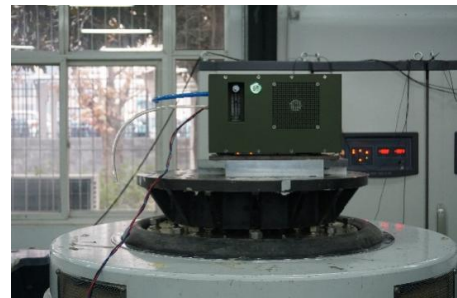


图 10 振动环境适应性验证图

Fig.10 Vibration environment worthiness verification diagram

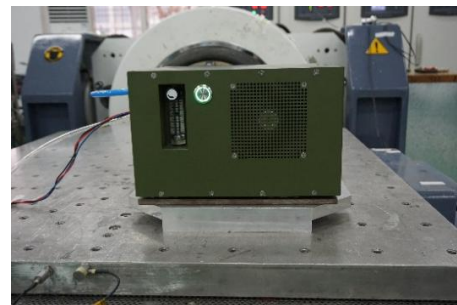


图 11 冲击环境适应性验证

Fig.11 Shock environment worthiness verification diagram

4) 车载制氧装置抗振动冲击环境适应性验证。按照 GJB 150.16A—2009《军用设备实验室环境试验方法第 16 部分: 振动试验》中的 A.2.3.10.4 款要求, 按附录表 D.1 的要求, 进行 3 个轴向 ( $x$ 、 $y$ 、 $z$  轴向) 试验。试验结束后, 制氧装置外观无损坏、制氧量为 3.52 L/min、氧气质量分数为 94.8%, 如图 10 所示。按照 GJB 150.18A—2009《军用装备实验室环境试验方法第 18 部分: 冲击试验》中的相关规定执行, 按程序 I (40g, 11 ms 后峰锯齿波,  $x$ 、 $y$ 、 $z$  轴向正负方向各施加 3 次, 共 18 次) 进行试验, 如图 11 所示。试验结束后, 制氧装置外观无损坏开裂等现象, 制氧量为 3.28 L/min、氧气质量分数为 94.6%。根据振动、冲击环境适应性验证表明, 从部件选型、装置结构、紧固件选择、减振方式等方面对制氧装置进行抗冲击减振环境适应性设计方法能够保证制氧装置抗振动冲击性能。

5) 车载制氧装置电磁兼容环境适应性验证。按 GJB 151B—2013《军用设备和分系统电磁发射和敏感度要求与测量》对陆军地面设备的相关规定<sup>[27]</sup>, 车载制氧装置电磁兼容验证主要分为电源线传导试验 CE102 验证、电场辐射发射试验 RE102 验证和敏感度验证。为了测量制氧装置工作时, 从电源线上耦合出来的干扰信号, 对制氧装置进行电源线传导试验 CE102。CE102 测试布置如图 12 所示。

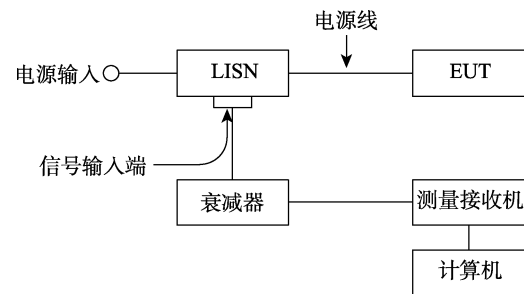
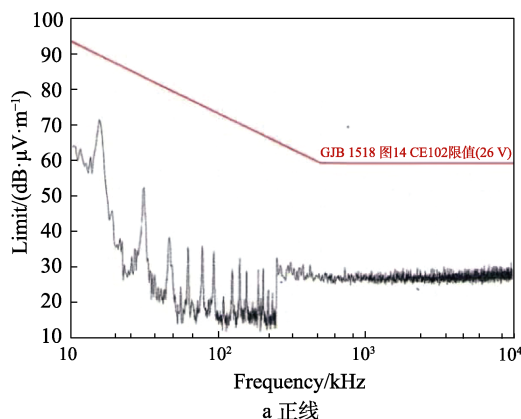


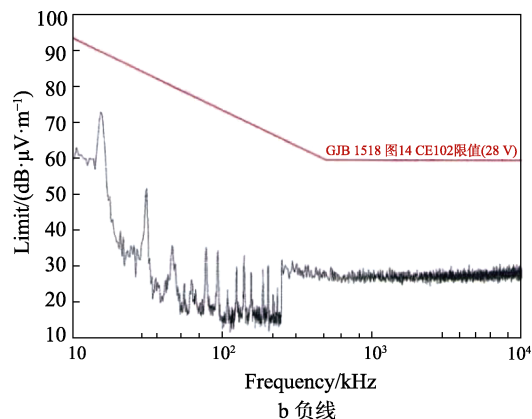
图 12 CE102 测试布置

Fig.12 CE102 test layout diagram

制氧装置由直流 26 V 供电, 分别对其电源线正线、负线进行传导发射测试, 传导发射电平平均未超过 GJB 151B—2013 中图 14 的 28 V 基本曲线, 满足标准要求。测试结果如图 13 所示。



a 正线



b 负线

图 13 CE102 电源线传导发射测试数据

Fig.13 CE102 power line conduction emission test data: a) positive line; b) negative line

为了测量制氧装置壳体及线缆对外部的电场强度，对制氧装置进行电场辐射发射试验 RE102，目的在于检测制氧装置正常工作时，对处于同一电磁环境中的其他设备不会因制氧装置的电场辐射，耦合干扰而产生异常的工作状态。RE102 测试布置如图 14 所示。

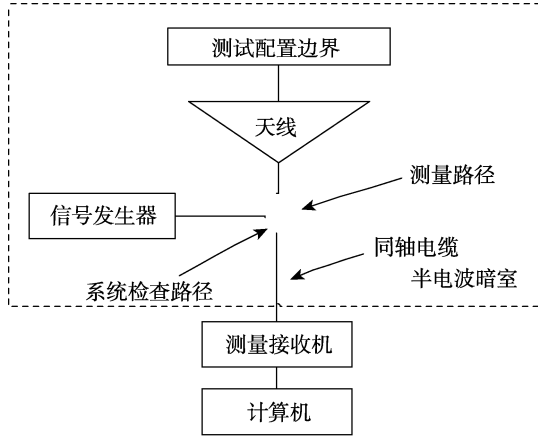


图 14 RE102 测试布置  
Fig.14 RE102 test layout diagram

依据 GJB 151B—2013 中图 58 陆军地面限制线，对受试产品的壳体和所有互联电缆在 2 MHz~18 GHz 频段电场辐射发射进行测试，电场辐射发射电平均未超过 GJB 151B—2013 中图 58 陆军地面限制线，满足标准要求。测试结果如图 15、图 16 所示。

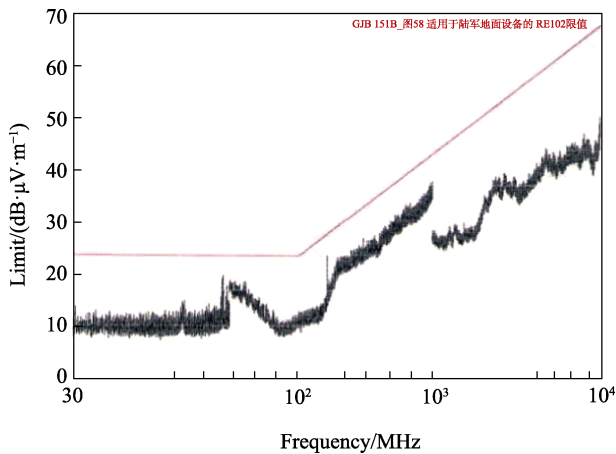


图 15 RE102 2 MHz~18 GHz 垂直极化辐射发射电平  
Fig.15 Vertical polarized radiation emission level of RE102 at 2 MHz~18 GHz

为了对制氧装置抗干扰能力、制氧装置对外界电磁波敏感性能的验证，按照 GJB 151B—2013 中图 21 曲线 2 所示的电平施加敏感度试验信号进行电源线传导敏感度 CS101 验证。按照 GJB 151B—2013 中图 39 极限值中的曲线 3 和 4 施加敏感度试验信号于制氧装置的电源电缆和高电位线，进行电缆束注入传导

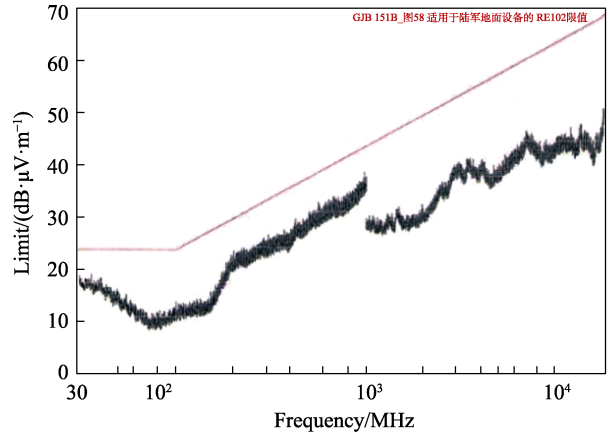


图 16 RE102 30 MHz~18 GHz 水平极化辐射发射电平  
Fig.16 Horizontal polarized radiation emission level of RE102 at 30 MHz~18 GHz

敏感度 CS114 验证。按照 GJB 151B—2013 施加敏感度试验信号电平于制氧装置完整的电源电缆和所有高电位线， $I=5A$ ，持续时间 1 min，进行电缆束注入脉冲激励传导敏感度 CS115 验证。按照 GJB 151B—2013 中图 48 所示极限线的要求，测试制氧装置包括电源线在内的完整的电源线缆和所有的单根高电位线施加敏感度测试信号，进行电缆和电源线阻尼正弦瞬态出传导敏感度 CS116 验证。按照 GJB 151B—2013 对陆军地面设备的要求，在不同频段时间、不同电场强度下，对制氧装置的壳体和互联电缆进行电场辐射敏感度 RS103 敏感度验证试验。敏感度的判断依据制氧装置工作状态而定。车载制氧装置敏感特征如下：制氧装置无法启动或自动停机；制氧装置压缩泵工作异常；制氧装置电磁阀切换异常；制氧装置异响；制氧装置性能降低。在敏感度试验中，制氧装置未出现上述敏感特性，敏感度试验前后对制氧装置制氧量分别为 3.52、3.53 L/min，氧气质量分数分别为 94.4%、94.6%，表明制氧装置敏感度性能良好。

根据制氧装置电源线传导试验 CE102，电场辐射发射试验 RE102 和敏感度试验验证结果，表明采取的电磁兼容设计策略有效地控制了电源线传导、电场辐射发射及电磁敏感度，确保了装置在复杂电磁环境下的稳定运行。

### 3.2 车载制氧装置实车环境验证

为了更好地验证车载制氧装置环境适应性设计方法是否可靠、有效，在海拔 5 200 m 某地进行了制氧装置实车试验，制氧装置通过过渡板安装于某车舱内。制氧装置工作时，车上电台、三防控制盒、驾驶员配电箱等设备均正常工作；车上电台、三防控制盒、驾驶员配电箱等设备工作时，制氧装置工作正常，能够满足电磁环境下环境适应性要求。车辆以道路及车辆技术状况允许的最大安全速度行驶，持续行驶时间 4 h，行驶期间制氧装置开机工作，停车后制氧装置

工作状况良好未发生开焊、松脱、掉落等现象,制氧量为 3.30 L/min,氧气质量分数为 51.8%,进一步证实制氧装置抗振动冲击设计方法能够满足实车环境下振动冲击环境适应性要求。

## 4 结语

本研究通过对特种车辆车载制氧装置工作要求、环境因素的分析,采用低气压条件下压缩泵质量补偿、高效散热降温、综合减振、电磁兼容等关键技术,对其高海拔低气压环境、高低温、湿热、振动冲击、复杂电磁环境进行了综合化环境适应性设计,参照相关标准验证了特种车辆车载制氧装置的环境适应性设计方法的有效性。同时为其他车载设备在极端环境下的可靠运行提供了设计思路。尽管本研究在车载制氧装置环境适应性上取得了积极的成果,但也存在局限性。例如,长期环境暴露对车载制氧装置性能的影响尚需进一步研究,电磁兼容测试的范围和深度也有待扩展,因此建议未来的研究继续探索车载制氧装置在更多样化的环境条件下的性能状况。

### 参考文献:

- [1] 中国人民解放军总装备部. 装备环境工程通用要求: GJB 4239—2022[S]. 北京: 总装备部军标出版发行部, 2022.  
General Armaments Department of the People's Liberation Army. General Requirements for Equipment Environmental Engineering: GJB 4239—2022[S]. Beijing: Military Standard Publishing and Distribution Department of the General Armaments Department, 2022.
- [2] 生建友, 关志强. 军用电子设备环境适应性设计有关问题探讨[J]. 装备环境工程, 2009, 6(3): 80-83.  
SHENG J Y, GUAN Z Q. Discussion on Environmental Worthiness Design of Military Electronic Equipment[J]. Equipment Environmental Engineering, 2009, 6(3): 80-83.
- [3] 杜彬, 于世杰, 张同升. 军用液冷源产品环境适应性设计和试验方法研究[J]. 环境技术, 2023, 41(9): 6-10.  
DU B, YU S J, ZHANG T S. The Design and Research of Environmental Adaptation on Military Liquid Cooling System[J]. Environmental Technology, 2023, 41(9): 6-10.
- [4] 张伦武, 周堃, 赵方超, 等. 装备环境适应性研究进展及展望[J]. 装备环境工程, 2024, 21(5): 1-12.  
ZHANG L W, ZHOU K, ZHAO F C, et al. Research Progress and Prospect of Materiel Environmental Worthiness[J]. Equipment Environmental Engineering, 2024, 21(5): 1-12.
- [5] 吴昊阳, 赵文哲, 常颖. 装甲车辆沙漠戈壁地区环境适应性试验设计[J]. 装备环境工程, 2023, 20(12): 95-101.  
WU H Y, ZHAO W Z, CHANG Y. Experimental Design of Environmental Adaptability of Armoured Vehicles in Desert Gobi Area[J]. Equipment Environmental Engineering, 2023, 20(12): 95-101.
- [6] 葛坤, 沈军霞. 开关电源可靠性设计研究[J]. 电子世界, 2016(12): 157.  
GE K, SHEN J X. Research on Reliability Design of Switching Power Supply[J]. Electronics World, 2016(12): 157.
- [7] 贾起浪, 汪业术. 船用电子设备可靠性设计研究[J]. 中国设备工程, 2020(15): 192-194.  
JIA Q L, WANG Y S. Research on Reliability Design of Marine Electronic Equipment[J]. China Plant Engineering, 2020(15): 192-194.
- [8] 丁连芬. 电子设备可靠性热设计手册[M]. 北京: 电子工业出版社, 1989.  
DING L F. Handbook of Reliability Design for Electronic Equipment[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 1989.
- [9] 祝耀昌. 产品环境工程概论[M]. 北京: 航空工业出版社, 2003.  
ZHU Y C. Introduction to Product Environmental Engineering[M]. Beijing: Aviation Industry Press, 2003.
- [10] 宣兆龙. 装备环境工程[M]. 2版. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2015.  
XUAN Z L. Equipment Environmental Engineering[M]. 2nd ed. Beijing: Beijing University of Aeronautics & Astronautics Press, 2015.
- [11] 冯珂, 黄卓. 车载产品集成设计中“六性”分析[J]. 内燃机与配件, 2022(19): 21-23.  
FENG K, HUANG Z. Analysis of “Six Principles” in Product Integration Design[J]. Internal Combustion Engine & Parts, 2022(19): 21-23.
- [12] 王连坡, 顾海峰. 电子设备环境适应性设计技术[J]. 舰船电子工程, 2019, 39(12): 210-214.  
WANG L P, GU H F. Environmental Adaptation Design for Electronic Equipment[J]. Ship Electronic Engineering, 2019, 39(12): 210-214.
- [13] 张保国. 车载电源的电磁兼容性(EMC)设计[J]. 通信电源技术, 2020, 37(12): 7-9.  
ZHANG B G. Electromagnetic Compatibility(EMC) Design of Vehicle Power Supply[J]. Telecom Power Technology, 2020, 37(12): 7-9.
- [14] 刘雅霖. 电子产品的电磁兼容性设计与实用经验探讨[J]. 通信电源技术, 2020, 37(12): 224-226.  
LIU Y L. Discussion on Electromagnetic Compatibility Design and Practical Experience of Electronic Products[J]. Telecom Power Technology, 2020, 37(12): 224-226.
- [15] 陈明中, 林天静, 阮翔. 机箱布线的电磁兼容研究[J]. 智能物联技术, 2018, 1(3): 20-24.  
CHEN M Z, LIN T J, RUAN X. Research on Electromagnetic Compatibility for Cable Routing in Chassis[J]. Technology of IoT & AI, 2018, 1(3): 20-24.
- [16] 徐鸣, 尹珑翔, 刘子龙. 舰载机发动机电磁兼容优化设计[J]. 航空动力, 2020(5): 45-47.  
XU M, YIN L X, LIU Z L. Optimization Design of Electromagnetic Compatibility of Carrier Aircraft Engine[J].



- Aerospace Power, 2020(5): 45-47.
- [17] 张筱波, 魏健, 程俊. 某型车载武器系统电缆电磁兼容性设计[J]. 兵工自动化, 2013, 32(4): 89-90.  
ZHANG X B, WEI J, CHENG J. Cable Electromagnetic Compatibility Design of Certain Type Vehicle Weapon System[J]. Ordnance Industry Automation, 2013, 32(4): 89-90.
- [18] 任振兴, 彭泽清. 某型分系统电磁兼容优化设计[J]. 航空电子技术, 2020, 51(2): 65-70.  
REN Z X, PENG Z Q. Optimum EMC Design of Integrated Mission Processing System[J]. Avionics Technology, 2020, 51(2): 65-70.
- [19] 王晓东. 电磁兼容技术在某加固计算机中的应用[J]. 电子工艺技术, 2009, 30(2): 116-118.  
WANG X D. EMC Technology of Reinforcement Computer Application[J]. Electronics Process Technology, 2009, 30(2): 116-118.
- [20] 甄伟, 赵涛, 宗健, 等. 某型地面武器系统严寒地区保障问题与对策研究[J]. 装备环境工程, 2023, 20(7): 17-23.  
ZHEN W, ZHAO T, ZONG J, et al. Support Problems and Countermeasures of a Certain Ground Weapon System in Frosty Region[J]. Equipment Environmental Engineering, 2023, 20(7): 17-23.
- [21] 中国人民解放军总装备部. 军用设备实验室环境试验方法: GJB 150A—2009[S]. 北京: 总装备部军标出版发行部, 2009.  
General Armaments Department of the People's Liberation Army. Laboratory Environmental Test Methods for Military Equipment: GJB 150A—2009[S]. Beijing: Military Standard Publishing and Distribution Department of the General Armaments Department, 2009.
- [22] 刘元海, 张幸. 舰载机载设备腐蚀环境适应性要求的剪裁[J]. 装备环境工程, 2016, 13(5): 61-67.  
LIU Y H, ZHANG X. Tailoring of Corrosion Environmental Adaptability Requirement for the Shipboard Airborne Equipments[J]. Equipment Environmental Engineering, 2016, 13(5): 61-67.
- [23] 孙建勇. 机载成品环境适应性要求的剪裁[J]. 装备环境工程, 2008, 5(6): 20-24.  
SUN J Y. Tailoring of Environmental Worthiness Requirement for Airborne End Product[J]. Equipment Environmental Engineering, 2008, 5(6): 20-24.
- [24] 杨晓然, 张伦武, 秦晓洲, 等. 自然环境试验及评价技术的进展[J]. 装备环境工程, 2005, 2(4): 6-16.  
YANG X R, ZHANG L W, QIN X Z, et al. The Development of Natural Environmental Test and Evaluation Technologies[J]. Metal Forming Technology, 2005, 2(4): 6-16.
- [25] 欧阳江, 白琳, 杜祯, 等. 某型强声驱动头设备环境适应性试验设计方案[J]. 电视技术, 2022, 46(2): 94-96.  
OUYANG J, BAI L, DU Z, et al. Design Scheme of Environmental Adaptability Test for a Type of Strong Sound Driving Head Equipment[J]. Video Engineering, 2022, 46(2): 94-96.
- [26] 许翔, 刘瑞林, 董素荣, 等. 车辆高原环境模拟试验技术发展现状综述[J]. 装备环境工程, 2012, 9(6): 63-66.  
XU X, LIU R L, DONG S R, et al. On Development of Vehicle Simulated Plateau Environmental Test Technology[J]. Equipment Environmental Engineering, 2012, 9(6): 63-66.
- [27] 中国人民解放军总装备部. 军用设备和分系统电磁发射和敏感度要求与测量: GJB 151B—2013[S]. 北京: 总装备部军标出版发行部, 2009.  
General Armaments Department of the People's Liberation Army. Requirements and Measurements for Electromagnetic Emission and Susceptibility of Military Equipment and Subsystems: GJB 151B—2013[S]. Beijing: Military Standard Publishing and Distribution Department of the General Armaments Department, 2013.