

电子电工产品低气压试验方法优化研究

张唯*

(北京铁路信号有限公司, 北京 102600)

摘要: 目的 探讨电子电工产品低气压试验方法的局限性, 提出优化和改进试验方法的途径。**方法** 分析低气压环境对电子产品性能、可靠性和寿命的影响, 总结低气压试验在电子产品可靠性评估中的重要作用。从试验设备、试验条件、测试点布置和数据处理方法四个方面, 提出改进低气压试验方法的建议。**结果** 针对试验设备, 提出采用新型真空泵、高真空腔体材料, 优化密封结构, 引入精密温控算法; 针对试验条件, 提出根据产品使用环境, 合理选取气压值、变化速率, 匹配温度条件, 兼顾试验效率和失效激励; 针对测试点布置, 提出重点关注关键器件和薄弱结构, 采用合适的布线材料和走向设计; 针对数据处理方法, 建议引入机器学习、信号处理等新方法, 挖掘失效规律和性能趋势, 注重分析结果的可视化呈现。**结论** 加强低气压试验方法研究, 对提升电子产品可靠性, 推动其在轨道交通、航空航天等领域应用具有重要意义, 需要产学研界共同努力。

关键词: 低气压试验; 可靠性; 试验优化; 适应性

Study on optimization of low pressure test methods for electronic and electrical products

ZHANG Wei*

(Beijing Railway Signal Co., Ltd., Beijing 102600, China)

ABSTRACT: Objective To explore the limitations of the low air pressure test methods for electronic and electrical products, and to propose ways to optimize and improve the test methods. **Methods** To analyze the influence of low air pressure environment on the performance, reliability and life of electronic products, and to summarize the important role of low air pressure test in the reliability assessment of electronic products. From the four aspects of test equipment, test conditions, test point arrangement and data processing methods, suggestions are made to improve the low air pressure test methods. **Results** For the test equipment, it is proposed to adopt new vacuum pumps, high vacuum chamber materials, optimize the sealing structure, and introduce precise temperature control algorithms; for the test conditions, it is proposed to reasonably select the air pressure value and rate of change according to the product environment, match the temperature conditions, and take into account the test efficiency and failure incentives; for the test point layout, it is proposed to focus on the key devices and weak structures, and adopt suitable wiring materials and direction design; for the data processing method, it is proposed to improve the low air pressure test method. For the data processing method, it is suggested to introduce new methods such as machine learning and signal processing to explore the failure law and performance trend, and focus on the visualization of the analysis results. **Conclusion** Strengthening the research on low air pressure test methods is of great significance to enhance the reliability of electronic products and promote their application in rail transportation, aerospace and other fields, which requires the joint efforts of industry, academia and research institutes.

KEY WORDS: hypobaric test; reliability; test optimization; adaptation

*通信作者: 张唯, 工程师, 研究方向: 实验检测。E-mail: zwCRSC@qq.com

*Corresponding author: ZHANG Wei, Engineer, Beijing Railway Signal Co., Ltd., Beijing 102600, China. E-mail: zwCRSC@qq.com

0 引言

随着电子技术的快速发展和应用领域的不断拓展,电子产品在航空航天、高原等特殊环境中的应用日益广泛。在这些环境中,电子产品常常面临着低气压的挑战。低气压环境会对电子产品的性能、可靠性和寿命产生显著影响,因此,对电子产品进行低气压试验评估就显得尤为重要。目前,我国电子产品的低气压试验主要依据相关标准进行。然而,随着电子产品的不断更新换代,现有的低气压试验方法也暴露出一些局限性,难以完全满足当前电子产品可靠性评估的需求^[1-3]。因此,有必要在现有试验方法的基础上,对低气压试验方法进行优化和改进,以提高试验的效率、精度和实用性,更好地服务于电子产品的可靠性评估和质量提升^[4-6]。

开展电子产品低气压试验方法优化研究,具有重要的理论意义和实践价值。从理论意义上看,通过对现有低气压试验方法的分析和改进,可以深化对低气压环境对电子产品影响机理的认识,拓展低气压试验技术的理论基础,为后续的研究奠定基础^[7-8]。同时,优化后的试验方法能够更加全面、精准地评估电子产品在低气压环境下的性能和可靠性,为电子产品的设计、制造和应用提供更加科学的依据。从实践价值上看,优化后的低气压试验方法能够有效提高试验效率,缩短试验周期,降低试验成本,为电子产品的可靠性评估和质量控制提供更加便捷、高效的手段^[9-10]。这将大大促进电子产品在航空航天、高原等特殊环境中的应用,提高其在恶劣条件下的工作稳定性和可靠性,推动相关领域的技术进步^[11]。

1 电子产品低气压试验的重要性

1.1 低气压环境对电子产品的影响

低气压环境对电子产品的影响主要体现在以下几个方面:

首先,低气压会导致空气绝缘强度降低。在标准大气压下,空气的绝缘强度约为 30 kV/cm,但随着气压的降低,这一数值会显著下降。例如,在海拔 5000 米(对应气压约 54 kPa)时,空气绝缘强度可降低至 18 kV/cm 左右。这意味着电子产品内部的电气间隙更容易发生放电现象,尤其是在高电压、尖锐结构等因素共同作用下,极易引发绝缘失效,导致产品损坏。

其次,低气压条件下,空气的热传导和对流能力下降,使得电子产品的散热性能恶化。以海拔 5000 米为例,此时空气密度仅为海平面的 63%,热传导系数下降到 80% 左右,对流换热系数也降低到 70% 左右。这导致电子元器件的工作温度升高,加速绝缘材料老化,引线键合疲劳失效等,降低产品可靠性。散热不良还可能引发热失控,造成局部过热烧毁^[12]。

第三,气压的骤降骤升过程会对电子产品的结构完整性产生影响。如果产品内部存在封装不良、气密性差等缺陷,在外界气压快速变化时,内外压差可能引起机械应力,导致器件封装开裂、

变形,衬底翘曲,焊点断裂,进而引发功能失效。此外,大气压变化引起的空气湿度变化也可能对电子产品产生负面影响。

1.2 低气压试验在电子产品可靠性评估中的作用

低气压试验是电子产品可靠性评估的重要手段,主要作用体现在以下几个方面:

首先,低气压试验可以帮助识别电子产品设计和制造中的缺陷。通过模拟产品实际使用过程中可能遇到的低气压环境,并对其功能性能进行监测,可以及时发现因绝缘间隙不足、散热措施不当、气密封装不完善等原因引发的各类问题。这为优化产品设计、完善生产工艺提供了重要依据,有助于从源头上提升其低气压环境适应性。其次,低气压试验数据是量化电子产品可靠性水平的重要指标。通过对产品在不同低气压条件下的性能参数进行测试,可以获得失效时间、失效模式等统计数据,从而计算平均无故障时间、失效率等可靠性指标^[13]。此外,定期开展低气压试验还可以监控电子产品在生产和使用全周期内的可靠性变化趋势。通过对不同批次、不同时期的产品进行抽样试验,并对试验数据进行统计分析,可以及时发现因生产工艺波动、元器件质量下降、环境应力加剧等原因引发的可靠性下降风险,从而采取针对性的纠正措施,实现可靠性水平的持续改进和提升^[14-15]。

1.3 案例分析

下面以某轨道交通信号电子设备的低气压试验为例,说明低气压试验在产品可靠性评估中的重要作用。

该设备是一款正在研发的用于信号控制的电子产品,需要在海拔 0 至 3000 米的环境下连续可靠工作。为了验证其低气压环境适应性,研制单位按照《GB/T 2423.21-2008》标准,对其进行了低气压试验。试验在一台非标低气压试验箱中进行(如图 1 所示),试验箱可提供 20 kPa 至 101 kPa 的连续可调气压范围,气压偏差不得超过 ± 0.5 kPa,同时配备了精密温度控制系统,温度波动小于 $\pm 2^{\circ}\text{C}$ 。

整个低气压试验分为两个阶段:第一阶段,在常温(25 $^{\circ}\text{C}$)条件下,以 1 kPa/min 的速率将气压从 101 kPa 降至 70 kPa,保持 1 小时后,再以同样速率升至 101 kPa,重复 3 次。监测设备各项功能性能参数,并记录其变化情况。第二阶段,在气压为 54 kPa 的条件下恒定 16 小时,同时设备通电工作,监测其功能性能参数,并记录其变化情况。

试验过程中发现,该设备的某些指标出现了异常情况:在第一阶段试验中,当气压降至 70 kPa 左右时,设备的工作电流突然增大 10%,而器件温度也快速上升 5 $^{\circ}\text{C}$,某些敏感器件的输出信号出现失真。在第二阶段试验的第 5 小时,设备突然出现工作中断,重启后一切正常,但 10 小时后再次出现同样故障。随后的 6 小时内,共出现 2 次工作中断现象。对出现异常的器件进行了仔细排查,发现主要问题出在电源模块上。第一阶段试验中电流异常上升,是由于在临界气压下,电源变压器

引线的局部放电引起的。放电发生时，空气被击穿形成等离子体，产生大量高能粒子轰击引线表面，导致瞬时短路电流增加。放电伴随的高温也引起局部过热，同时气压下降导致空气稀薄，影响了散热效率。第二阶段试验中的工作中断，则是由于电源控制电路可靠性下降导致的。在长时间低气压环境下，电路基板膨胀，引起细小焊点开裂，连接断续不良，造成控制信号失真，使电源频繁异常关断。



图1 低气压试验箱

Fig 1 Low pressure test chamber

通过低气压试验及后续的失效分析，研制单位及时识别出了设计和工艺上的缺陷：一是电源变压器初级绕组的引线布局不合理，间距过小，在低气压条件下极易发生局部放电；二是电源散热能力不足；三是控制电路的防潮措施不到位，PCB (Printed Circuit Board) 板材料选用不当，器件封装存在渗漏风险。

针对这些问题，研制单位进行了设计优化：采用氮气封装的变压器取代原有结构，有效消除了局部放电风险；加装电源散热风扇，提高散热效率；选用吸潮率更低的PCB基板，优化电路布线，提高封装等级，从而大幅提升了控制电路的可靠性。经过改进，该设备顺利通过了低气压试验，并在后续的实际应用中表现良好，发挥了重要作用。

2 低气压试验方法的优化

2.1 试验设备的改进

为了提高低气压试验的精度和效率，试验设备需要不断改进。首先，可以采用新型的真空泵技术，如新型扩散泵、涡轮分子泵等，以获得更高的抽气速率和极限真空度。这有助于缩短试验时间，同时能模拟更加苛刻的低气压环境。其次，在试验箱体设计上，应采用高真空腔体材料，增加壁厚，优化密封结构，最大限度地降低漏气率（如图2所示）。箱体内壁还应进行特殊处理，减少气体吸附释放，提高真空环境稳定性。

该法兰盘由两个半圆组成，两个半圆接缝处安装密封条，

法兰盘两个半圆上分别安装一个上下可活动的弧形挡板，两个半圆一头由铰链连接可自由转动，另一头安装卡扣，可将上下两部分固定在一起。使用时，可将线缆先从箱体内部穿出，再将法兰盘固定在出线孔处，调节适合的挡板间距，最后再用真空封泥将小缝隙堵死。

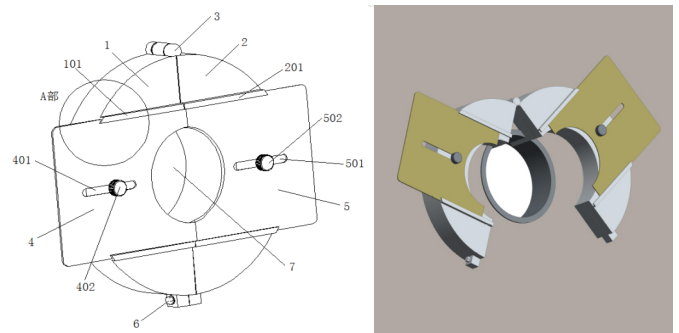


图2 一种新型低气压箱穿线法兰盘

Fig.2 A new type of threaded flange for low pressure test chamber

该法兰盘的优点为：

1. 优化密封结构，最大限度地降低漏气率；
2. 两个半圆的设计方便穿线，不会因为线缆插头过大而无法穿过穿线孔；
3. 可调间距挡板的设计通用性强；
4. 节省真空封泥，节省时间。

在温度控制方面，可引入精密的比例-积分-微分(Proportion Integration Differentiation, PID)控制算法，结合多点分布式测温，实现温度场的均匀性和恒定性控制。同时，采用大功率的加热器和制冷机，扩大可编程温度范围，以应对温度与低气压组合试验的需求。

在环境参数测量上，传感器的选型和布局也需要优化。采用高稳定度、低漂移的压力传感器和热电偶，并通过合理布局，减小测量误差。引入气体成分分析仪，实时监测试验箱内空气成分，确保其符合标准要求。

2.2 试验条件的优化

低气压试验的条件设置直接影响试验结果的有效性和可重复性，因此需要针对不同的产品特点和使用工况，优化试验条件。

首先是气压条件的选取。对于不同产品，需要根据其实际使用环境，选择更具针对性的气压值。例如，对于某些高原特种设备，可能需要验证其在更低气压如20 kPa以下的工作能力。气压变化速率也是一个关键参数。过高的变化速率可能加剧气压瞬变效应对产品的冲击，而过低的变化速率又会大幅延长试验时间。因此，需要在充分考虑产品结构特点和运输工况的基础上，选择最佳的气压变化速率。

对于温度条件，也需要与气压条件相匹配。试验温度的上下限应覆盖产品的存储和使用温度范围，同时还要考虑在低气压下，产品散热能力的变化，适当调整温度条件。在试验时间上，要兼顾试验效率和失效激励的充分性。对于结构件密封性检验，

可选择较短的低气压保持时间；而对于元器件可靠性试验，则需要更长时间的老练和失效累积。同时，在设计加速试验时，要注意气压、温度等加速因子的平衡，避免引入非目标失效模式。

2.3 测试点布置的优化

测试点的合理布置是低气压试验中获取有效数据的关键。测试点需要覆盖产品内部的关键器件和薄弱结构，并能够全面反映其性能状态。

首先，测试点的位置选择要有针对性。应重点布置在对低气压环境敏感的器件附近，如大功率元器件、密封结构件等。对于一些易发生局部放电的高压电路，还需在其附近增加电压和电流测试点。结构应力的测试点则应布置在应力集中区，如装配间隙、焊点等。其次，测试点数量要平衡充分性和可操作性。测试点过少，可能无法全面评估产品性能；而测试点过多，又会增加布线的复杂度，影响产品的正常工作。在保证必要测试点的基础上，可采用多路复用、无线传输等技术手段，简化测试点连接。测试点布置还要考虑与产品原有的监控测试点相配合，统一协议和接口，实现数据的融合处理。必要时，可在产品上预留测试点接口，方便低气压试验的开展。

2.4 数据处理方法的改进

低气压试验获得的原始数据往往量大且杂，需要采用合适的的数据处理方法，提取有效信息，并形成易于分析和决策的结果。

传统的数据处理方法，如统计分析、阈值判断等，在处理低气压试验数据时存在一定局限性。为了更好地挖掘数据中蕴含的失效规律和性能趋势，可引入一些新的数据处理方法。例如，机器学习算法如支持向量机（Support Vector Machine, SVM）、随机森林等，可用于建立产品性能退化模型，实现剩余寿命预测和失效预警。时频分析、小波变换等信号处理方法，可应用于低气压环境下的电磁信号和振动信号分析，识别出局部放电、结构松动等潜在失效模式。针对低气压试验时间跨度大、工况变化多的特点，还需采用自适应的数据分段和多模型融合策略。即根据试验工况的变化，自动划分数据处理的阶段，并针对不同阶段建立相应的数学模型，再综合各模型的结果，形成一致的分析结论。

3 结束语

低气压环境对电子产品可靠性提出严峻挑战，而低气压试验是评估其适应性的有效手段。通过优化试验设备、条件、测试点布置和数据处理方法，可全面提升低气压试验的精度、效率和实用性，准确识别电子产品薄弱环节，指导可靠性改进。随着电子技术的发展和应用环境日趋极端化，加强低气压试验方法研究，建立健全相关标准，对促进电子产品可靠性进步，加速其在航空航天等领域应用，具有重要意义。这需要产学研各界共同努力，夯实基础研究，加强创新和标准制修订，为电子产品高质量发展提供坚实保障。

参考文献

- [1] 肖伟, 张泽文, 王珊, 等. 低气压(高度)试验新旧标准差异对比与分析[J]. 环境技术, 2023, 41(06): 166-169.
- [2] 杨世武, 扈瑞峰, 刘磊, 等. 高原铁路信号电气电子设备气候环境适应性试验分析[J]. 铁道技术监督, 2022, 50(07): 1-6.
- [3] 殷彦翔, 梅国刚. 1.5 MW 风力发电机组变流器的高原应用[J]. 通讯世界, 2017, (18): 115-117.
- [4] 文歆磊, 张金栋, 叶茂, 等. 仿真与试验结合的电子产品可靠性评估方法[J]. 机电产品开发与创新, 2023, 36(03): 19-21, 32.
- [5] 刘浩, 刘尚合, 曹鹤飞, 等. 高空低气压、低温环境下的电晕放电模拟试验系统[J]. 高电压技术, 2015, 41(02): 578-583.
- [6] 王威, 张伟. 高可靠性电子产品工艺设计及案例分析[M]. 电子工业出版社, 2019, 12: 275.
- [7] 张昭, 唐虎, 成竹. 军用飞机实验室气候环境试验项目分析[J]. 装备环境工程, 2017, 14(10): 87-91.
- [8] 赵斌, 郭赞洪, 唐其环, 等. 浅析低气压对装备及元器件的影响[J]. 装备环境工程, 2016, 13(05): 180-186.
- [9] 戴宜乐. 环境适应性试验项目的选择[J]. 环境技术, 2012, 30(03): 34-38.
- [10] 苏一鸣, 杨海生, 张琦, 等. 基于 ZigBee 的低气压试验设备校准装置设计[J]. 工业计量, 2023, 33(04): 58-61, 65.
- [11] 贺天远, 江露, 汪凯蔚, 等. 低气压-淋雨综合环境试验方法研究[J]. 电子产品可靠性与环境试验, 2023, 41(02): 40-43.
- [12] 徐金毅. 基于 SDBD 放电的吸气式电推力器低气压下推力性能研究[D]. 北京理工大学, 2017.
- [13] GALINDO J, NAVARRO R, TARÍ D, *et al.* Development of an experimental test bench and a psychrometric model for assessing condensation on a low-pressure exhaust gas recirculation cooler[J]. International Journal of Engine Research, 2021, 22(05): 1540-1550.
- [14] 骆明珠, 康锐, 刘法旺. 电子产品可靠性预计方法综述[J]. 电子科学技术, 2014, (02): 246-256.
- [15] WANG H, WANG YX, SUN Q. Research on Reliability Accelerated Growth Test and Evaluation Method of Electronic Product [C]. 2023 5th International Conference on System Reliability and Safety Engineering (SRSE). IEEE, 2023.

作者简介



张唯, 工程师, 研究方向: 实验检测。