文章编号：1003-1480（2025）05-0078-07

直列式点火系统低气压击穿防护与可靠性加固技术研究

马宏玲，陈悦悦，乌日娜，侯文国，殷 睿

（上海航天动力技术研究所，上海，201108）

摘 要：为增强直列式点火系统在低气压环境中的工作可靠性，对特定型号的直列式点火产品在低气压条件下的点火性能进行了深入探讨。基于低气压放电理论，发现以空气作为介质时，气体击穿电压的最小阈值约为 300 V，与之对应的气压与极板间距乘积约为 0.066 kPa·cm。进一步分析了工作高度、导体间距、温度和介质种类对低气压击穿电压的影响，确定了低气压击穿的极限条件：在导体间距为 3 mm 的情况下，0~30 km 高度范围内，30 km（1.197 kPa）处的击穿风险最高；而在 0~60 km 范围内，42.5 km（0.206 kPa）处为风险极值点。针对上述分析结果，本研究从电路冗余设计、结构密封技术、PCB 布局优化、灌封工艺改进以及筛选试验等 5 个方面提出了优化措施。实际飞行试验验证了优化措施的有效性，表明其显著提升了直列式点火系统在低气压环境下的可靠性。

关键词：直列式点火系统；低气压；可靠性；帕邢曲线；电气击穿

中图分类号：TJ450.2 **文献标识码**：A **DOI**：10.3969/j.issn.1003-1480.2025.05.010

Research on Low-Pressure Breakdown Protection and Reliability Reinforcement for In-Line Ignition Systems

MA Hong-ling，CHEN Yue-yue，WU Ri-na，HOU Wen-guo，YIN Rui

(Shanghai Space Propulsion Technology Research Institute, Shanghai, 201108)

Abstract：In order to boost the operational reliability of in-line ignition systems in low-pressure environments, the ignition performance of a specific in-line ignition product under low-pressure condition was studied deeply. Based on low-pressure discharge theory, it is found that in airmedium environment, the minimum gas breakdown voltage is roughly 300 V, with the pressure-plate spacing product being about 0.066 kPa · cm. Furthermore, the influences of working height, conductor spacing, temperature, and dielectric type on low-pressure breakdown voltage were analyzed, the extreme conditions for low-pressure breakdown voltage were determined, which are at a conductor spacing of 3 mm, the breakdown risk peak is at 30 km (1.197 kPa) within the 0~30 km height range; within the 0~60 km range, the risk maximum is at 42.5 km (0.206 kPa). In light of these findings, this study proposes optimal measures in five areas: circuit redundancy design, structural sealing technology, PCB layout optimization, potting process improvement, and screening tests. The effectiveness of these measures have been verified through actual flight tests, which show they considerably enhance the in-line ignition system's reliability in low-pressure environments.

Key words： In-line ignition system；Low pressure；Reliability；Paschen curve；Electric breakdown

在机载战术武器领域，固体火箭发动机或多脉冲固体火箭发动机通常面临空中点火的工况，这一过程往往伴随着低气压环境。低气压环境会对武器系统产生显著的环境效应，进而可能引发一系列负面且具有

收稿日期：2025-04-30

作者简介：马宏玲（1993-），女，工程师，主要从事固体推进技术研究。

引用本文：马宏玲，陈悦悦，乌日娜，等. 直列式点火系统低气压击穿防护与可靠性加固技术研究[J]. 火工品, 2025(5): 78-84.

破坏性的后果。例如，空气密度的降低会影响电气设备的电性能，而压力差则可能导致密封损坏，进而引发附加的不良效应[1]。这些效应轻则影响产品的性能与功能，重则可能导致整个飞行任务的失败。随着战场电磁环境的日益复杂化，对武器装备的电子对抗能力和安全性提出了更为严格的要求。直列式安全点火技术因其满足在 500 V 以下不发生误点火，同时取消了起爆药的使用，桥箔与点火药不直接接触，从而提高了安全性和可靠性，因此逐渐被应用于固体火箭发动机的点火系统中[2]。该类型产品内部电路的放电电压较高（1 250~2 200 V）[3]，远超过弹上常用产品的常规工作电压。为确保电路间的绝缘性能，通常采用密封胶灌封产品内腔的方式，但这种方法对灌封工艺的要求较高，并且无法直观检查灌封胶中是否存在气泡、裂缝等问题。而这些问题可能在点火时导致意外击穿，损耗点火能量，从而导致产品无法正常点火[4]，尤其在低气压环境下更为敏感，容易发生电气击穿，导致发动机意外点火，存在较大的安全风险[5-6]。因此，本研究针对直列式点火系统在低气压环境下的工作失效问题，深入探究其原因，并提出相应的加固技术，旨在为未来该类产品的设计提供理论参考。

1　直列式点火系统工作原理

直列式点火系统的核心构成包括安保逻辑单元、脉冲功率单元和点火单元，其组成框图如图 1 所示。

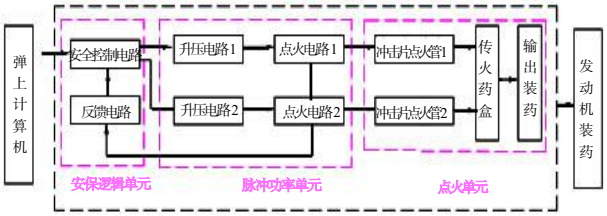


图 1　直列式点火系统组成框图

Fig. 1　Block diagram of the in-line ignition system

该系统的工作流程如下：首先，安保逻辑单元接收弹上指令，分级解除保险装置。随后，在接收到升压指令后，脉冲功率单元开始进行能量的蓄积与升压。在此过程中，反馈电路实时将电压值反馈至弹上计算机，确保电压监控的准确性。升压达标并稳定后，系统接收弹上点火指令，脉冲功率单元释放高压电脉冲。高压电脉冲作用于冲击片点火管，引发金属桥箔发生电爆炸，瞬间产生等离子体。等离子体驱动飞片撞击钝感药剂（BPN 或 HNS-IV），产生足够能量依次点燃传火药盒、输出装药，最终引燃发动机装药[7-9]。为提升系统的可靠性，升压电路与冲击片点火管均采用冗余设计[10-11]。

脉冲功率单元作为涉及高压技术的关键部分，其放电回路设计如图 2 所示。在升压电路的作用下，高压电容被充电至规定电压并保持稳定状态；一旦接收到点火信号，MOS 管导通，触发电容负极产生负脉冲信号。该脉冲信号经过触发变压器放大后，驱动触发管的触发极使触发管导通，进而实现高压电容向冲击片点火管的放电[12-13]。为确保高电压在低气压条件下的环境适应性，在产品中灌封了硅橡胶以保证高压的绝缘性，灌封后的照片如图 3 所示。

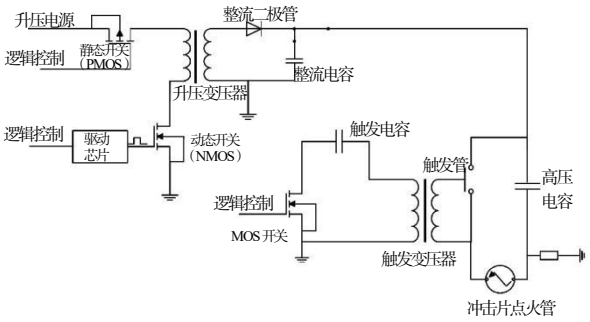


图 2　脉冲功率单元电路示意图

Fig.2　Circuit diagram of the pulse power unit

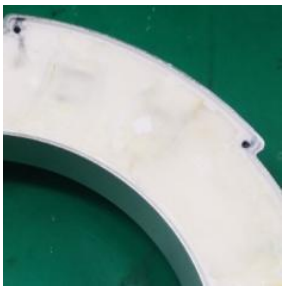


图 3　产品灌封效果图

Fig.3　Display of product potting effect

2　直列式点火系统低气压点火问题分析

对上述设计状态下的产品进行了低气压试验（海

拔 15 km，气压 12.111 kPa），升压过程中出现了 1 次意外的放电现象。具体而言，B 路在升压至约 2 000 V 时，电压突然下降至约 700 V，随后出现周期性的充放电循环，电压波形呈现出锯齿状变化。同样，A 路在升压至 2 100 V 后维持 117 ms，随后电压骤降至 700 V 左右，随后出现周期性的充放电循环，波形同样呈现锯齿状特征，如图 4 所示。

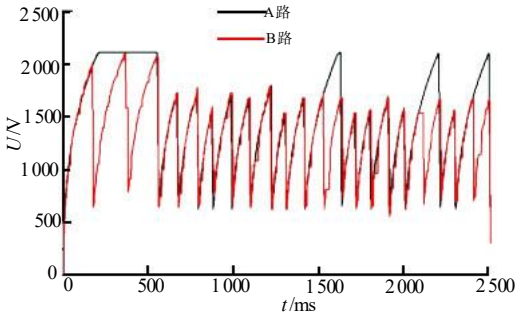


图 4　异常放电电压波动曲线

Fig.4　Curve of abnormal discharge voltage fluctuation

经排查，发现原因在于产品中的灌封胶与电路板分层，如图 5 所示。在低气压环境下，原灌封胶覆盖区域的电压击穿强度降低，导致升压时驱动电路的 MOS 管被击穿，进而导致高压电容异常放电，如图 6 所示。

图 5　灌封胶与 PCB 基板界面分层形貌图

Fig.5　Delamination of potting compound from PCB

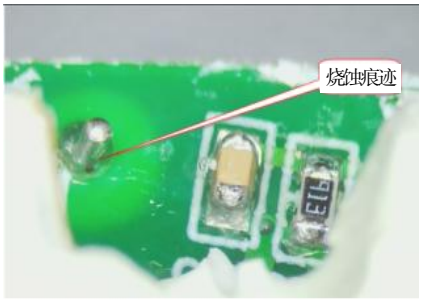


图 6　击穿烧蚀痕迹

Fig.6　Distinct breakdown and ablation marks

由此可知，当前直列式点火系统设计存在单点失效风险：升压开始后，若驱动电路 MOS 管失效，或灌封胶在低气压环境下失效，都会导致产品异常放电。这两种情况均可能致使固体火箭发动机点火应用出现严重安全隐患。因此，需进一步开展针对低气压环境的单点失效防护设计，以提升直列式点火系统的可靠性和安全性。

3　低气压工况分析

3.1　低气压放电机理

低气压放电是在较低气压（10^{-3} ~10^{5} Pa）环境中发生的。在这种环境下，气体中的带电粒子在外部射频场的作用下，与中性粒子发生碰撞，或者在金属表面引发二次电子发射。这会导致空间中的电子数量呈雪崩式增长，进而形成气体击穿效应[14]，如图 7 所示。

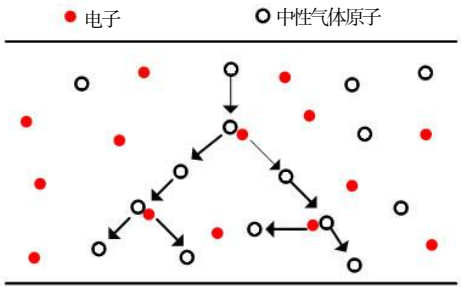


图 7　低气压放电的电子雪崩示意图

Fig.7　Schematic diagram of electron avalanche in low-pressure discharge

在常压条件下，气体分子密度较大，气体电离后产生的带电离子在电场作用下受到的阻力也大，因此气体击穿所需的电压较高。随着气压的降低，气体密度减少，气体击穿电压随之降低。气体击穿一般遵循帕邢曲线，该曲线与气压和极板间距都有关系，如图 8 所示。

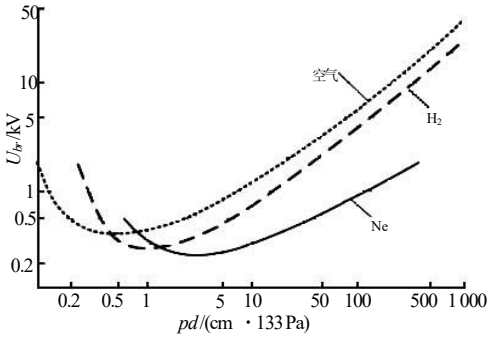


图 8　帕邢曲线

Fig.8　Paschen curve

图 8 给出了在典型绝缘结构下，气体放电击穿电

压 U 与电极距离 d 和气体压力 p 的关系。由图 8 可见，在以空气为介质的环境中，气体击穿电压的最小值约为 300 V，对应的气压与极板间距乘积约为 0.066 kPa·cm[15]。

3.2　低气压放电影响因素

3.2.1　工作高度

常规战术武器导弹通常在高空进行点火，而直列式点火装置作为高压组件，在其点火过程中不可避免地会经历低气压环境。基于高空点火特性以及参照 GJB 365.1-87 北半球标准大气（-2~80 公里），本研究分析了战术武器的点火高度及其对应的气压曲线，结果如图 9 所示。对于常规机载武器，其初始点火高度范围为 0~30 km，相应的气压环境为 1.197~101.3 kPa；对于多脉冲发动机，空中点火高度通常在 0~60 km，相应的气压环境为 0.022 ~101.3 kPa。当产品的导体间距固定时，不同气压条件下的击穿电压存在差异，其变化规律遵循图 8 所示的帕邢曲线。

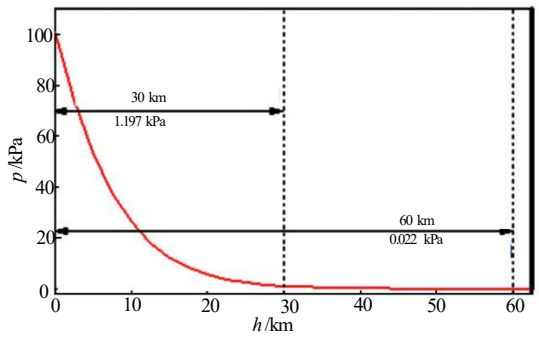


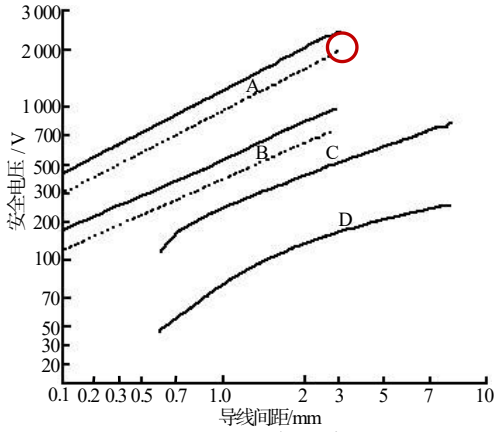
图 9　高度——气压变化关系曲线

Fig.9　Change curve of height *vs* pressure

3.2.2　导体间距

在综合考量设计裕度的基础上，本研究将直列式点火系统的额定耐压值设定为 2 000 V，电路板的外层涂覆了三防漆。根据 QJ 3103 A-2011 印制电路板设计要求[16]，对于外层有永久涂层的导体，在常温常压环境下，允许工作电压为 500 V 时，最小导体间距为 0.8 mm；超过 500 V 时，每增加 1 V，最小导体间距相应增加 0.003 mm。因此，本设计中导体间的最小间距应为 5.3 mm。对于无明确允许工作电压的情况下，应参照图 10 所示的曲线（实线为海拔 1 000 m 以下室内测得数据，虚线为室外测得的数据），当局部放电电压为 2 000 V 时，导线的极限间距为 3 mm。

在低气压条件下，若以空气为介质，为满足帕邢曲线击穿电压要求，导体间距远大于 50 mm。然而，过大的导体间距会增加产品体积，影响其适用性。因此，在设计类似高压部件时，通常采用灌封方式来确保密封性。同时，考虑到地面电路板检测需求，一般建议导体间距应不小于 5.3 mm。对小型化要求较高的产品，导体间距可选择不小于 3 mm，以确保裸电路板在常温常压下检测时的放电安全性。但在低气压条件下，若工作电压高于帕邢最小或临界电压，需要对电路进行全面密封（灌封），以保证击穿电压不受气压影响。然而，若灌封胶失效，在低气压条件下，仍会发生帕邢击穿，导致产品在升压过程中或升压结束后发生低气压放电，进而影响产品正常工作。



注：A 为局部放电电压；B 为工作电压减至局部电压的 40%；C 为海拔高度 3 050 m 以上，工作电压减至局部放电电压的 20%；D 为海拔高度 15 000 m 以上，工作电压减至局部放电电压的 9%。

图 10　电压与导线间距的关系曲线[16]

Fig.10　Curve of voltage and wire spacing relationship

3.2.3　温度影响

Elyse Sili[17]对帕邢击穿电压的温度特性进行了试验研究。试验中以温度为参变量，采用 Rogowski 平面电极结构，间隙距离 d=1 mm，气压范围为 1×10^{-3} ~101 kPa，电压为 50 Hz 的交流电。测量结果如图 11 所示。

结果显示，温度对击穿电压的影响具有离散性。帕邢击穿电压的理论最小值及其左侧的击穿电压随温度升高而增加；在曲线右侧，温度对击穿电压的影响则随 pd（压力与电极间距的乘积）的变化而出现较大差异[6]。

3.2.4 介质种类

介质材料对低气压下的击穿性能有显著影响。几种典型绝缘材料的击穿强度如表 1 所示。

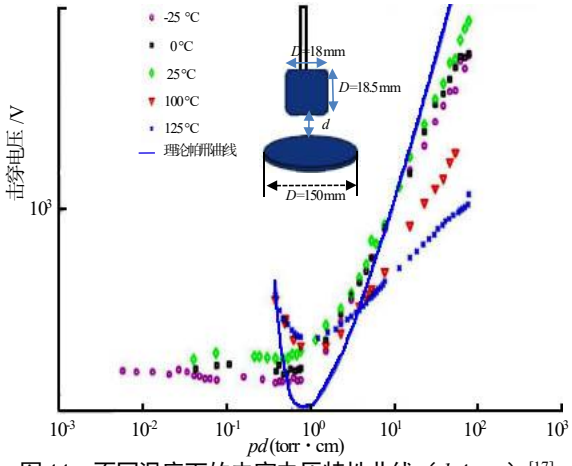


图 11　不同温度下的击穿电压特性曲线（d=1 mm）[17]

Fig.11　Breakdown voltage curve at different temperatures（d=1 mm）

表 1　典型绝缘材料的击穿强度

Tab.1　The breakdown strength of typical insulation materials

材料名称	击穿强度 /(kV · mm^{-1})	材料	击穿强度 /(kV · mm^{-1})
空气	3.2	环氧树脂	15
氮气	3.3	聚氨酯	15
氢气	1.9	硅橡胶	20
C 二氧化碳	2.9	聚四氟乙烯	25
六氟化硫	8.9	聚碳酸酯	35

由表 1 可见，气体介质的击穿强度较低，击穿电压容易受气压影响，且使用时需确保产品密封；固体材料分子排列紧密，击穿强度较高，且不受气压影响。但作为电路板灌封材料时，需考虑胶体固化后在力学和温度环境条件下对电路板上元器件的潜在损伤，建议选用弹性较好的固相绝缘材料。

3.3　低气压极限击穿条件

根据前期分析，典型导体间距下的 pd（压力与电极间距的乘积）值如图 12 所示。结合图 8 的帕邢曲线进行分析，在整个点火高度范围内，可以确定最严苛的点火条件。图 12 中临界线为以空气为间隙条件下的最小击穿点（0.066 kPa · cm）。曲线分析表明：当导线间距为 3 mm 时，帕邢曲线中的最低点对应高度为 42.5 km（0.206 kPa）；当导线间距为 5.3 mm 时，帕邢曲线中最低点对应高度为 46.4 km（0.125 kPa）。

基于以上分析，可根据导体间距确定帕邢击穿点对应的高度。例如：当导体间距为 3 mm 时，且点火高度范围为 0 ~30 km 时，该范围均位于帕邢曲线最低点的右侧。随着点火高度的增加，气压逐渐降低，对应的帕邢击穿电压降低，在 30 km（1.197 kPa）处的击穿风险最高；针对多脉冲武器系统，当点火高度范围为 0~60 km 时，在 42.5 km（0.206 kPa）处的击穿电压最低。

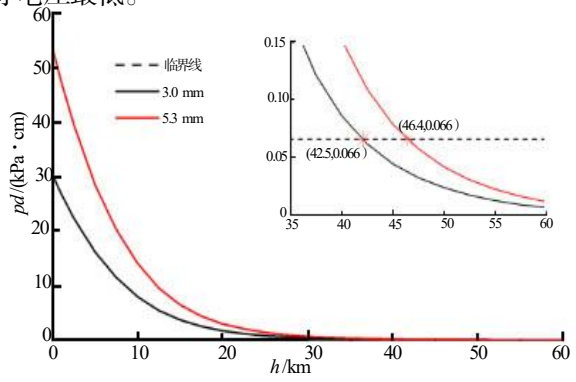


图 12　不同高度的 pd 值分布图

Fig.12　Distruibution of pd values at different heights

4　低气压环境下的点火可靠性优化设计及验证

针对产品在低气压环境下的点火问题，通过综合运用多种分析方法及对低气压环境特性进行分析，提出了高压电路盒产品的可靠性优化设计。通过电路板布局优化、壳体密封结构设计、壳体灌封工艺、PCB 设计以及低气压筛选试验等多方面优化设计，以提升产品在低气压环境下的工作可靠性。

4.1　电路优化

优化措施：基于对点火问题的深入分析，本研究对点火电路进行了改进。具体而言，将驱动电路的单一开关控制改进为双开关控制，并确保这两个开关在电路板上的布局位置保持最大间距，如图 13 所示。这一设计旨在确保在低气压击穿条件下，两个开关也不会同时失效，从而避免电路盒发生意外点火的风险。

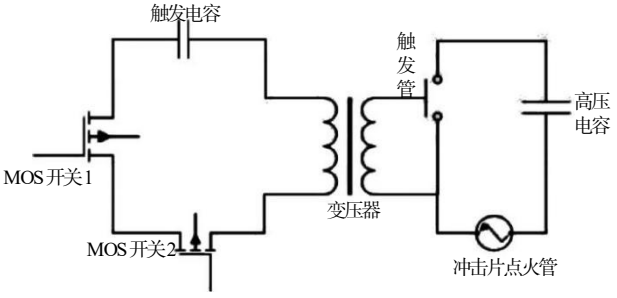


图 13　优化后的高压触发放电方案

Fig.13　Scheme of optimized high voltage trigger discharge

实验验证：将故障的 MOS 开关 1（导通状态）集成至电路系统中，完成产品升压后，在未收到点火指令的情况下，电压维持稳定，未出现意外放电，证明增加 MOS 开关数量能有效消除开关器件带来的单点失效风险。

4.2　结构优化

为应对导体间距及低气压工况的挑战，本研究提出增加产品外形尺寸，确保高压区域器件间距不少于 3 mm。同时，在产品电路板设计中，除了采用灌封技术以确保器件间的绝缘密封性外，还增加了壳体密封设计，以维持壳体内部气压的稳定。通过电气击穿试验和壳体内部气压检测试验验证壳体密封设计的有效性。

在壳体内设置了两个间隔为 1.5 mm 的电极，验证实验具体布局如图 14 所示。在低气压箱内模拟 4 kPa/2 h 的低气压条件进行耐压测试，壳体密封性验证结果如表 2 所示。

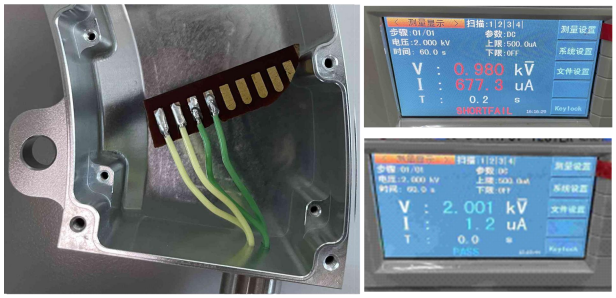


图 14　壳体密封性能验证实验

Fig.14　Test of shell sealing performance verification

表 2　壳体密封性验证结果

Tab.2　The verification results of shell sealing performance

序号	电极间距/mm	壳体是否密封	壳体是否灌封	施加电压/V	漏电流/μA
1	1.5	否	否	980	677.3
2	1.5	是	是	2 000	1.2

由表 2 可见，在壳体未密封且未灌封的状态下，施加 980 V 电压时，两点间漏电流达到 677.3 μA，导致产品发生击穿；而在壳体密封状态下，施加 2 000 V 电压时，漏电流仅为 1.2 μA，未出现击穿现象。

在壳体密封状态下，本研究在壳体内部安装了压力传感器，并将产品置于低气压箱中，经过 4 kPa/4 h 的保压处理后，内部气压维持在 97.3 kPa，未发生任何变化，从而证明了壳体密封设计的有效性。

4.3　PCB 设计优化研究

在针对焊点的实验验证中发现，在相同的实验条件下，球形焊点面焊盘的起晕电压高于普通焊点面焊盘；涂覆三防漆的焊盘起晕电压显著高于未涂漆的焊盘，且其提升幅度随焊盘间距的增大而增加[18]。因此，建议电路板导体间距应大于 3 mm，以确保焊盘表面光滑、焊点饱满。同时，三防漆的涂覆次数至少应为 3 遍。此外，通过采用空间走线设计，将平面爬电距离转换为电气间隙，从而有效提高击穿电压[19]。

4.4　灌封工艺优化

原灌封工艺采用手工涂覆硅橡胶，固化后将电路板装入壳体，再用发泡聚氨酯整体灌封，该方式存在手工涂胶一致性差的问题。针对该问题，对灌封胶和灌封工艺进行优化，将灌封胶更换为流动性更强的硅橡胶，将电路板放入腔体内，采用真空设备对高压腔体进行整体灌封，提高了灌封质量的一致性。

4.5　增加筛选试验

为增强产品的可靠性，本研究采取了 100%筛选的方式以提升产品在低气压环境下的工作可靠性。基于对低气压极限击穿条件及温度影响的深入分析，研究发现，当产品点火高度为 0~30 km 时，筛选试验条件应设定为气压 1.197 kPa，温度为最低工作温度，以及根据产品特定需求定制的低气压暴露时间与气压升降速率。当产品点火高度范围扩展至 0~60 km 时，气压范围为 0.022~101.3 kPa，在 0.206 kPa 处产品的击穿电压达到最低值（导体间距为 3 mm）。因此，建议在该高度范围内的产品筛选低气压条件应为 0.206 kPa 和 0.022 kPa，同时维持最低工作温度，并根据产品需求设定低气压暴露时间与气压升降速率。

5　结论

本文针对直列式点火系统在低气压环境下的工作可靠性问题，从理论分析、实验验证到工程应用，进行了系统性的研究和优化。通过对低气压放电机理的深入探讨，明确了气体击穿电压的影响因素，并结合帕邢曲线分析确定了低气压击穿的极限条件。基于

这些分析结果，从电路优化、结构优化、PCB 设计、灌封工艺改进以及增加筛选试验等 5 个方面提出了具体的可靠性提升措施。电路优化通过增加冗余开关设计，有效消除了单点失效风险；结构优化则通过增大导体间距和加强壳体密封性，显著提高了产品的环境适应性。同时，改进后的灌封工艺和优化的 PCB 设计，进一步增强了产品的绝缘性能和耐压能力。此外，增加的低气压筛选试验为产品的可靠性提供了额外的保障。这些优化措施已在多型战术武器的固体火箭发动机点火技术中得到应用，并通过了实际飞行试验的验证，显著提高了直列式点火系统在低气压环境下的工作可靠性，为后续相关产品的设计提供了宝贵的参考和借鉴。

参考文献：

[1] 宋小燕, 翟波. 低气压试验标准及试验技术分析[J]. 标准应用与解读, 2014(6): 94-97.

[2] 王端, 李帅, 高一隆. 强电磁环境下火箭发动机直列式安全点火系统[J]. 探测与控制学报, 2020, 42(4): 85-91.

[3] 王峰, 郭留金,胡晓峰,等.低压发火环境下爆炸箔电爆炸性能测试[J]. 科学技术与工程, 2024, 24(23): 9 848-9 857.

[4] 程翔, 黄少波,邢国强,等.某直列式点火器双路瞎火故障分析与改进[J].火工品, 2024(1): 38-42.

[5] 周鹏伟,瞿浩洁,朱景春,等.有机硅胶在高压产品中真空灌封工艺应用[J].环境技术, 2023(10): 107-110.

[6] 尹进南, 王孝利, 论灌封工艺对高压电连接器的重要性[J]. 机电元件, 2020, 40(4): 33-34.

[7] 施长军,周涛,郑松,等. 直列式安全起爆系统电磁兼容性改善及安全性分析[J]. 火工品, 2014(3): 23-26.

[8] 宁政, 鲍立荣, 陈楷,等. 集成化直列式多点同步起爆系统设计及性能研究[J].火工品, 2025(5): 1-7.

[9] 张腾, 张玉若, 梁生平. 基于 MCT 集成封装的低电感爆炸箔掐波系统[J].火工品, 2025(3): 1-5.

[10] 汪柯,施长军,郭莎,等. 低成本全电子安全与保险装置研究现状[J].火工品, 2024(3): 1-5.

[11] 简昊天,汪柯, 高峰,等. 直列式爆炸箔点火及相关技术研究进展[J].含能材料, 2022, 30(4): 396-411.

[12] 张旭,孙国先.基于 FPGA 的改进型电子安全与解除保险系统[J]. 电脑与电信,2023(5):65-68.

[13] 白卓.导弹直列式安保系统起爆电路设计与分析[D].太原: 中北大学, 2020.

[14] 王瑞, 张娜, 李韵,等. 低气压放电效应研究进展[J].空间电子技术, 2015(1): 1-6.

[15] 吴须大, 杨军. 腔体滤波器与低气压放电[J]. 空间电子技术, 2001(4): 55-60.

[16] QJ 3103A-2011 印制电路板设计要求[S]. 北京: 中国航天标准化研究所,2011.

[17] Elyse S L，Jean P C，Flavien K. Temperature dependence of electrical breakdown mechanismon the left of the paschen minimum[J].IEEE Transaction On Plasma Science, 2011, 39 (11): 1 123-1 130.

[18] 王志浩, 冯伟泉, 周岭,等. 航天器单机内 PCB 焊点低气压放电试验研究[J]. 航天器环境工程, 2013, 30(3): 292-295.

[19] 李卓成. 帕邢击穿特性及在空间高电压设计中的应用[J]. 空间电子技术, 2015(6): 8-16.