

新一代运载火箭附加系统温度测试台过压保护设计

金豹¹, 汪灏¹, 徐玮², 徐昕^{3,4}

(1. 上海宇航系统工程研究所, 上海 201100; 2. 上海航天电子技术研究所, 上海 201100;

3. 中国航天科技集团商业火箭有限公司, 上海 201100;

4. 南京航空航天大学 航天学院, 南京 210016)

摘要: 针对某型号运载火箭附加系统温度测试台因外部 28 V 高压误输入导致 ADS1220 模数转换芯片烧毁的故障, 对过压保护设计与可靠性提升方法进行了研究; 通过故障复现与机理分析, 明确了原设计在输入端异常电压防护方面的不足; 提出了两种过压保护方案: 采用超低漏电流肖特基二极管构建钳位限压电路, 将输入电压钳位在 $-0.4 \sim 3.7$ V 安全区间; 基于高耐压器件 LM134 恒流源与 INA188 仪表放大器重构信号调理链路, 实现 40 V 耐压能力; 实验验证了两种方案对测量精度、线性度及稳定性的影响; 结果表明: 钳位限压方案可实现快速低成本防护, 引入约 ± 0.35 K 测量误差 (满足 $\leq \pm 0.5$ K 指标) 及千分之二线性度损失; 高耐压方案在承受高压冲击的同时保持测量误差 $\leq \pm 0.18$ K、线性度达万分之五, 具备无损自恢复能力; 基于“分类施策、纵深防御”原则, 制定了在役设备采用方案一的模块化返修策略, 以及面向新型号以方案二为核心融合多级防护的设计改进指南, 并提出了覆盖设计评审、过程控制、测试验证及使用维护的全流程可靠性提升措施; 为航天地面测试设备应对复杂电磁环境及人为误操作风险提供了技术途径与工程实践参考。

关键词: 运载火箭; 温度测试台; 过压保护; 钳位限压; 高耐压器件; 可靠性

Design of Overvoltage Protection for the Temperature Testing Platform of New-Generation Launch Vehicle Auxiliary Systems

JIN Bao¹, WANG Hao¹, XU Wei², XU Xin^{3,4}

(1. Shanghai Institute of Aerospace System Engineering, Shanghai 201100, China;

2. Shanghai Institute of Aerospace Computer Technology, Shanghai 201100, China;

3. China Aerospace Science and Technology Corporation Commercial Rocket Co., Ltd., Shanghai 201100, China;

4. School of Astronautics, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: To address the failure of the A/D converter chip ADS1220 burning out caused by the accidental input of an external 28 V high voltage in the temperature test bench of a certain type of carrier rocket's auxiliary system, research on the overvoltage protection design and reliability improvement method is conducted. Through fault reproduction and mechanism analysis, it identifies the deficiency of the original design in abnormal voltage protection at the input stage. Two overvoltage protection schemes are proposed. one utilizes an ultra-low leakage Schottky diode to construct a clamping voltage-limiting circuit, restricting the input voltage within a safe range of $-0.4 \sim 3.7$ V; The other reconstructs the signal demodulation chain based on the high-voltage device LM134 as the constant current resource and the instrumentation amplifier INA188, achieving a withstand voltage capability of 40 V. Experiments verify the impacts of both schemes on the measurement accuracy, linearity, and stability. The results show that the clamping scheme enables rapid and low-cost protection, with a measurement error of approximately ± 0.35 K (meeting a requirement of less than ± 0.5 K) and a linearity degradation of 0.2%. The high-withstand-voltage scheme maintains superior performance under high-voltage impacts, with a measurement error of less than ± 0.18 K and a linearity of 0.05%, featuring non-destructive self-recovery. Based on the principle of “differentia-

收稿日期:2026-01-12; 修回日期:2026-03-11。

作者简介:金豹(1989-),男,硕士,工程师。

引用格式:金豹,汪灏,徐玮,等. 新一代运载火箭附加系统温度测试台过压保护设计[J]. 计算机测量与控制, 2026, 34(6):10-17, 26.

ted strategies and defense-in-depth”, the first scheme is employed to formulate modular retrofit strategy for in-service equipment, along with design improvement guidelines integrating the second scheme with multi-level protection for new models. This paper proposes a comprehensive reliability enhancement strategy covering design review, process control, testing validation, and operational maintenance, which provides technical approaches and engineering references for aerospace ground test equipment to address risks from complex electromagnetic environments and human operational errors.

Keywords: launch vehicle; temperature test bench; overvoltage protection; clamping voltage limiting; high-withstand-voltage device; reliability

0 引言

新一代运载火箭是我国航天运输系统的重要组成部分,其可靠性直接关系到国家安全与航天事业的发展。地面测试设备作为火箭发射前状态确认的关键环节,必须具有极高的可靠性与环境适应性。某型号附加系统温度测试台是用于测量火箭各部位加注相关温度参数的关键地面设备,其性能直接影响对火箭热环境状态的判断。在实际使用中,由于火箭点火后直接扯断脱拔电缆并烧毁电缆,曾发生因 28 V 高压误接入温度信号线导致测试台内部 AD 采集芯片烧毁、输出异常的严重故障。此类过压故障不仅造成设备损坏,更影响高密度发射任务的进度。因此,开展温度测试台的过压保护设计研究,提升其抗干扰与容错能力,具有重要的工程实际意义与理论价值^[1]。

在航天测控领域,过压保护设计一直是可靠性工程的重点。国外如 NASA、ESA 等机构在其地面测试设备中普遍采用多级防护策略,包括前端滤波、瞬态电压抑制器(TVS)、钳位电路、隔离放大等,并强调故障安全(Fail-Safe)设计理念^[2]。国内相关院所虽然在设备可靠性设计方面积累了丰富的经验,但在针对复杂电磁环境与人为误操作导致的过压冲击防护方面,仍存在方案单一、防护余量不足等问题^[3-4]。现有研究多聚焦于元器件级的降额设计或单点防护^[5-6],缺乏系统性的、覆盖全生命周期的过压防护设计方法,尤其在面对“外部异常能量侵入”这一故障模式时,设计规范和验证手段均有明显欠缺^[7-8]。

本文以实际发生的 28 V 高压误输入故障为切入点,开展系统性过压保护设计研究。与现有研究相比,本文的主要创新点与贡献体现在以下 4 个方面:

1) 问题驱动的系统性防护设计方法:不同于传统的以元器件失效率为中心的可靠性分析,本文从真实故障案例出发,将“外部异常输入”导致的过压威胁正式纳入航天地面测试设备的可靠性设计框架,填补了 FMEA 分析中对外部能量侵入模式识别的空白,提出了从危险源识别、机理分析、方案设计到试验验证的完整技术路线。

2) “分类施策、纵深防御”的混合策略:针对在役设备与新型号的不同需求,创新性地提出两种保护方案

并系统对比。方案一(钳位限压)采用超低漏电流肖特基二极管构建快速钳位电路,在确保保护有效性的前提下,最小化对原系统的改动;方案二(高耐压重构)基于 LM134 恒流源与 INA188 仪表放大器,实现了信号前端的“本质安全”设计。两种方案既可独立应用,也可在“纵深防御”体系中协同工作,形成多级防护,这一策略在国内航天测试设备领域尚属首次系统论述。

3) 量化评估与多维验证体系:现有研究对保护电路引入的精度损失、噪声特性及环境影响多为定性分析或简单测试^[9]。本文构建了涵盖基本功能、环境应力(高低温、湿热)、长期稳定性(72 h 连续运行)及电磁兼容性(ESD、辐射抗扰度、传导抗扰度)的全面验证体系,通过高精度测试量化了两种方案对测量误差、线性度、漂移等关键指标的影响,为工程决策提供了详实的数据支撑^[10]。

4) 全流程可靠性提升闭环:本文不仅提出了技术方案,更将改进延伸至设计评审、FMEA 更新、入厂检验、验收试验等质量管理环节,形成了从设计源头到使用维护的闭环可靠性提升路径。这一系统性思维在我国航天地面测试设备领域具有示范意义,可推广至其他类型的地面测试设备。

综上所述,本文旨在通过理论分析、方案设计与试验验证,形成一套适用于我国航天地面测试设备的过压保护设计规范,为应对复杂电磁环境及人为误操作风险提供技术途径与工程实践参考。

1 某型号附加系统温度测试台原设计方案分析

某型号附加系统温度测试台原设计方案以 16 路独立温度变换模块为核心,主要用于将铂电阻温度传感器(Pt100)的电阻信号转换为 0.2~4.8 V 的标准电压信号,供 PXI 数据综合处理系统采集。整机由电源单元、温度变换单元及结构件组成,遵循 GJB/Z 35-93《元器件降额准则》等标准进行可靠性设计。

电源单元采用两级隔离架构:前端为尖诺电源 JEC30-220S15-J 型 AC/DC 模块,将 220 V 交流转换为 +15 V 直流,为 16 路温度变换电路供电;后端为天水天悦(J) TY10-24S05A 型 DC/DC 模块,将 +15 V 隔离转换为 +5 V,为箭上阀门传感器提供独立电源,实现 +5 V 与 ±15 V 电源地隔离。

如图 1 所示, 温度变换电路由 6 部分构成: 电阻电压转换网络、24 位 ADC (ADS1220)、单片机 (STM32-G431KBT6)、电压基准源 (ADR4533ARZ)、放大滤波电路 (运放 JLD223369) 及供电电路。其工作原理为: 单片机控制精密恒流源 (0.5 mA) 激励 Pt100 传感器 (四线制接法), 传感器两端差分电压与基准电阻 (3.3 k Ω) 上电压由 ADS1220 同步采集; 单片机通过查表法与分段线性拟合将电阻值映射为温度, 内置 DAC 输出对应模拟电压; 该电压经运放构成的二阶低通滤波及幅度调整电路, 输出符合量程要求的电压信号。输出级设有二极管 (D2) 限幅及保护电阻 (R16 等), 以满足正向限幅 ≤ 6 V、负向限幅 ≥ -1 V 及输出阻抗 ≤ 3 k Ω 的指标。

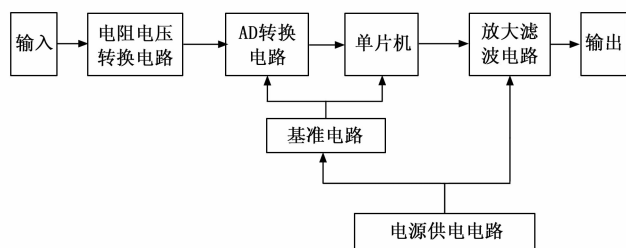


图 1 温度变换器电路框图

原方案的核心脆弱环节在于信号输入前端: 16 路温度信号直接接入 ADS1220 的模拟输入引脚, 该芯片的绝对最大额定输入电压为 $-0.3 \sim 5.5$ V (相对于电源地)。然而, 输入端仅设置了磁珠 (BL1~BL3) 和滤波电容 (C19~C24) 用于抑制高频干扰, 并未配置任何电压钳位或隔离器件。当外部 28 V 高压 (如误接入箭上电源或电缆短路) 施加于信号线时, 高压将直接作用于 ADC 引脚, 导致芯片击穿烧毁, 进而使整条测量通道失效。

该缺陷的深层成因可归纳为以下 3 点:

1) 危险源识别遗漏: 设计初期基于传统可靠性思维, 重点关注元器件自身在额定工况下的失效率 (如采用应力分析法预计 MTBF), 而忽略了使用环境中可能出现的异常电压输入。FMEA 分析虽系统梳理了内部元器件失效模式, 但未将“外部高压误输入”作为潜在故障源纳入分析范围, 导致防护设计缺失。

2) 防护环节设计局限: 安全性分析仅关注了输出端过流保护及短路保护, 强调“输出端有限幅二极管和保护电阻, 防止输出电流过高影响系统输入接口”, 但对输入端的过压风险未作针对性设计。输入端仅依赖磁珠的微弱阻抗 (高频下约 150 Ω), 无法对直流高压形成有效阻断或钳位。

3) 测试覆盖不足: 验收试验项目包含常温老化、运输试验及高低温贮存, 但未纳入异常电压注入下的安

全性验证, 无法暴露输入端过压防护的缺失。

综上, 原设计方案虽在额定工况下具备较高的测量精度与可靠性, 但其设计思路固守于设备内部失效模式, 对复杂使用环境中由外部因素诱发的异常工况考虑不足, 体现了系统安全性与使用保障性设计的薄弱环节^[11]。

2 过压故障机理分析与复现

2.1 故障初步分析

某次试验中, 两台温度测试台在试验中出现多路通道输出异常。异常通道输出固定在某个低电压值 (如 45、5、32 mV 等), 不再随输入电阻变化, 表现出典型的“卡滞”现象。正常通道数据则完全符合精度要求。故障发生时, 现场人员报告测试电缆在火箭发射时会被烧断, 可能伴有 28 V 高压意外灌入温度测试台的输入电缆。

对故障测试台进行开盖检测, 拆除 PCB 后, 根据原理图测量关键点电压。正常工作时, 恒流源输出 0.5 mA, 基准电阻 R_s (3.3 k Ω) 两端电压应为 1.65 V。实测故障通道的 R_s 电压严重偏离 (0~0.3 V 不等), 而 R_s 阻值本身正常, 因此判断 AD 采集芯片 ADS1220 内部损坏, 更换故障通道的 ADS1220 芯片后, 重新进行输入输出测试, 通道功能恢复正常, 确认故障原因为 AD 芯片损坏。

ADS1220 的电源电压为 3.3 V, 其模拟输入引脚的绝对最大额定电压为 -0.3 V 至 $AVDD + 0.3$ V (即 $-0.3 \sim 3.6$ V)。28 V 电压远超此极限, 必然导致芯片内部输入级 ESD 保护二极管击穿。具体损坏过程可分为以下几个阶段: $t = 0 \sim 1$ μ s: 28 V 高压加至输入引脚, 正向偏置连接至 AVDD 的 ESD 二极管, 大电流从输入引脚流向 AVDD 电源轨。AVDD 电压瞬间被抬升 (实测可达 5 V 以上), 超出芯片内部其他模块 (如基准源、数字逻辑) 的耐压范围。 $t = 1 \sim 10$ μ s: AVDD 过压引发多处 PN 结击穿, 产生额外的低阻抗通路。同时, 反向偏置连接至 GND 的 ESD 二极管也可能发生雪崩击穿, 形成从输入到地的短路路径。 $t = 10 \sim 100$ μ s: 大电流导致局部焦耳热急剧升高, 金属化层熔断、氧化层破裂, 芯片功能丧失。若电流引发寄生 PNP 结构导通, 可能触发闩锁效应 (latch-up), 即使撤去高压, 芯片仍保持低阻态, 无法恢复。 $t > 100$ μ s: 电缆因过流烧断, 高压中断, 但芯片内部已造成不可逆损坏。故障通道的基准电压异常 (偏离 1.65 V) 正是由于内部基准电路损坏所致。

2.2 故障复现与全面监测

为验证上述机理, 在实验室进行了故障复现试验。试验中搭建了与原电路一致的温度变换模块, 并使用直

流稳压电源模拟 28 V 高压灌入。为量化分析损坏过程, 可对高压灌入瞬间的关键电气参数进行估算:

1) 输入峰值电流: 线路电阻+芯片导通电阻合计约 10 Ω, 则 28 V 高压下的峰值电流可达 2.8 A, 远超过 ADS1220 输入引脚 ESD 二极管的额定浪涌电流 (通常为 ±10 mA~±100 mA)。

2) AVDD 过冲电压: 若无外部钳位, AVDD 引脚上的去耦电容 (如 0.1 μF) 将在数微秒内被充电至接近输入电压, 导致 AVDD 电压超过芯片最大额定值 (3.6 V)。

3) 芯片结温升: 若大电流持续 10 μs, 假设等效热阻为 100 ℃/W, 瞬时功耗约 28 V×2.8 A=78.4 W, 则结温可在 10 μs 内上升数百摄氏度, 超过硅的熔点 (约 1 410 ℃), 造成物理烧毁。

为全面记录故障过程, 增设了以下监测点与记录设备。

如表 1 所示, 施加 28 V 高压后, 相应通道立即输出异常, 且异常状态不可恢复。更换 ADS1220 芯片后, 通道功能恢复正常。监测到的电压、电流、温度变化与理论分析高度吻合, 成功复现了现场故障。

表 1 故障复现监测结果

监测项目	监测位置	记录设备	采样率/精度	观察结果
输入电压	输入连接器前端	高压差分探头+示波器	200 MS/s	电压从 0 V 陡升至 28 V, 上升时间<2 μs, 持续约 500 μs 后因电源内阻下降而衰减
输入电流	输入回路串联电流探头	电流探头+示波器	100 MHz	电流峰值达 2.5 A, 波形与电压同步, 呈指数衰减
AVDD 电源电压	ADS1220 的 AVDD 引脚	单端探头+示波器	200 MS/s	正常 3.3 V, 高压施加后瞬间抬升至 5.2 V, 持续约 20 μs 后跌落至 0 V (芯片短路)
基准电压	ADS1220 的 VREF 引脚	高精度万用表+示波器	1 MS/s	正常 1.65 V, 高压施加后立即跳变至 0.2 V 并保持, 不再恢复
输出通道电压	对应通道输出端	数据采集卡	100 kS/s	正常随输入变化, 高压施加后 100 μs 内跌至 32 mV 并“卡滞”
芯片表面温度	ADS1220 外壳顶部	红外热成像仪	热灵敏度 0.1 ℃	高压施加后 1 s 内温度由 25 ℃升至 120 ℃ (热点位于输入引脚附近)
电缆状态	输入电缆全线	绝缘电阻测试仪	500 V	试验后电缆绝缘电阻由 >100 MΩ 降至 <1 MΩ, 外观可见局部烧焦

通过上述分析与复现试验, 可得出以下结论:

1) 直接原因: 28 V 高压意外灌入温度测试台输入电缆, 直接施加于 ADS1220 模拟输入引脚, 导致芯片内部 ESD 二极管击穿、电源轨过压、闩锁效应及热烧毁, 造成永久性损坏。

2) 损坏机理: 高压引发的大电流和过压破坏了芯片的输入级结构、基准源电路及电源分配网络, 最终使 ADC 功能丧失, 输出“卡滞”在低电平。

3) 关键影响因素: 高压入侵路径为输入连接器→模拟输入引脚; 缺乏输入过压保护是设计上的薄弱环节。

3 过压保护方案设计与理论分析

本章旨在设计有效的过压保护方案, 确保温度测试台在遭受异常高压 (如 28 V) 冲击时, 核心敏感器件 (ADC) 不被损坏, 且系统功能可快速恢复或保持正常。设计需在保护有效性、对测量精度的影响、实现的复杂性、成本与周期之间取得平衡。

3.1 方案一: 基于肖特基二极管的钳位限压保护设计

方案一的核心思想是在不改变原有信号调理主通道的前提下, 在前端增加一个无源/有源的电压钳位网络, 将异常高压“钳制”在安全范围内。此方案属于“治标”型防护, 重点在于快速限压和最小化对正常信号的影响^[12-13]。

3.1.1 电路拓扑与工作原理

针对四线制 Pt100 测量, 需要保护四条信号线: 激励正 (I+)、激励负 (I-)、传感正 (V+)、传感负 (V-)。保护电路需安装在输入接插件之后, ADC 差分输入放大器之前。

采用如图 2 所示的经典二极管钳位结合串联电阻的拓扑。每条信号线通过一个串联限流电阻 (R_s) 后, 连接至一个由两个肖特基二极管 (D1, D2) 构成的钳位对。钳位对的另一端分别接至一个精密的钳位参考电压源 (V_{CLAMP}) 和地 (GND_A , 即 ADC 的模拟地)。

1) 正常工作时: Pt100 上的差分信号电压很小 (毫伏级), 且四条线对 GND_A 的共模电压位于 V_{CLAMP} 与 GND_A 之间 (通常设计在 ~1.65 V)。此时, 所有肖特基二极管反偏, 漏电流极小, 对测量电路影响甚微。信号主要通过串联电阻 R_s 无衰减地 (因为信号电流极微小, 在 R_s 上压降可忽略) 传递至后端。

2) 过压发生时: 若某条线电压高于 $V_{CLAMP} + V_f$ (V_f 为肖特基二极管正向导通压降, 约 0.3~0.4 V), 则上钳位二极管 (D1) 正偏导通, 将该线电压钳位在约 $V_{CLAMP} + V_f$ 。

若某条线电压低于 $GND_A - V_f$, 则下钳位二极管 (D2) 正偏导通, 将该线电压钳位在约 $GND_A - V_f$ 。

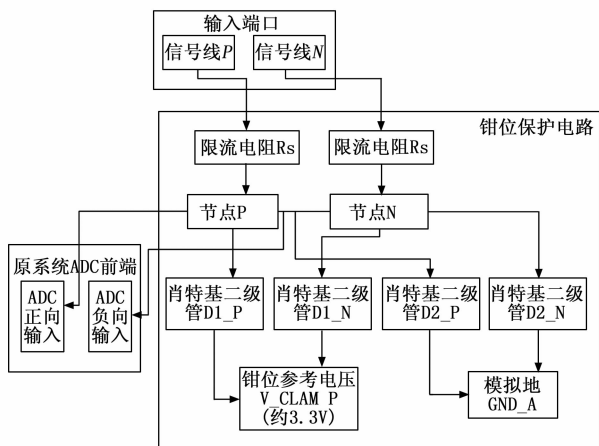


图 2 方案一电路框图

串联电阻 R_s 在此过程中起到限流作用^[14], 防止过大的电流流经导通的二极管而造成功耗损坏。同时, 它和 ADC 输入阻抗、线路寄生电容构成低通滤波, 有助于抑制高压瞬态的边沿。

3.1.2 对系统精度的影响分析

引入钳位保护电路对精度的影响主要来自漏电流, 漏电流会流入或流出测量节点, 影响恒流源的分配和传感节点的电位。由于漏电流的非线性、不对称性和温度漂移, 随温度和电压变化, 这会引入共模抑制比下降和额外的漂移误差。通过仿真和实验评估, 此影响可能导致系统整体精度从原有的 $\pm 0.2\text{ K}$ (优于指标) 退化至 $\pm 0.3 \sim 0.4\text{ K}$, 仍满足 $\leq \pm 0.5\text{ K}$ 的指标, 但余量减小。

该方案通过简单可靠的钳位电路, 将输入电压严格限制在安全范围, 能有效防护高压冲击。其对原系统改动小, 便于在役设备通过增加一块“保护转接板”的方式实现返修。主要代价是引入了由二极管漏电引起的微小精度损失和额外的校准复杂性, 且需要处理限流电阻的功率问题。

3.2 方案二: 基于高耐压器件的信号链重构设计

方案二的思路更为彻底, 即摒弃原有脆弱的 ADC 直接采集方案, 重新设计信号调理链路, 选用本身耐压值就远高于可能异常电压的器件, 构建一个“本质安全”的输入前端^[15]。此方案属于“治本”型防护。

3.2.1 恒流源与仪表放大器选型

新的信号链如下所示:

Pt100 传感器 → 四线连接 → 恒流源激励 → 差分电压信号 → 高耐压仪表放大器 → 放大、调零、滤波 → 输出电压 → ADC (或直接输出模拟量)

关键在于选择耐压足够高的恒流源和仪表放大器。选用 TI 的 LM134 系列可调恒流源。选用 TI 的 INA188 (或类似高共模电压仪表放大器)。特点: 极宽的输入电

压范围: 输入引脚可承受高达 $\pm 40\text{ V}$ 的电压 (相对于其电源地), 且无论电源是否接通。

INA188 的输入端直接与 Pt100 的传感线 ($V+$, $V-$) 相连。即使这两条线引入 28 V 高压, 只要在其电源电压范围内 (如 $\pm 15\text{ V}$ 供电), 放大器也不会损坏, 且能正常工作或至少不会永久失效。

3.2.2 电路重构与信号调理设计

前端滤波与保护: 尽管核心器件耐压高, 但仍在输入端加入简单的 RC 滤波 (如 $100\ \Omega + 0.1\ \mu\text{F}$) 和钳位二极管 (可选, 作为额外防护), 用于抑制高频干扰和极端瞬态 (如 EFT)。

仪表放大器电路: INA188 将 Pt100 上的微弱差分电压 (约几十毫伏至百毫伏) 进行高精度放大。其增益 G 需设计为将整个温度范围对应的电压变换到 $0.2 \sim 4.8\text{ V}$ 的输出范围。增益电阻需选用高精度、低温漂的薄膜电阻。

调零与输出级: 仪表放大器的输出通常需要叠加一个偏置电压 (0.2 V) 以实现 0.2 V 的起点。这可以通过一个由精密电压基准和运放构成的加法电路实现。同时, 输出级需包含低通滤波以抑制噪声, 以及由齐纳二极管或专用电压钳位芯片构成的输出限幅保护 (保护后端采集设备)。

电源设计: 为恒流源 LM134 和仪表放大器 INA188 提供稳定的 $\pm 15\text{ V}$ 或单电源 (如 $+24\text{ V}$) 供电。这些电源轨本身也应具备过流、过压保护^[16]。

3.2.3 系统耐压能力分析

激励回路 ($I+$, $I-$): 恒流源 LM134 耐压 40 V , 串联的小阻值滤波电阻也能承受一定功耗。即使 28 V 直接加在 $I+$ 和 $I-$ 之间, 大部分电压将落在 LM134 上, 在其安全范围内。Pt100 电阻本身无源, 不怕高压。

传感回路 ($V+$, $V-$): 仪表放大器 INA188 输入端耐压 $\pm 40\text{ V}$ 。 28 V 的共模或差模输入在其承受范围内。整个信号链的主要有源器件 (恒流源、仪表放大器) 的工作电压范围都覆盖了 28 V 异常电压, 因此系统对这类过压具有“免疫力”。

该方案通过选用高耐压器件重构信号链, 从根本上消除了因 28 V 高压灌入导致器件损坏的风险, 实现了“本质安全”。其测量精度主要取决于仪表放大器、电阻和基准的性能, 理论上可以达到甚至超过原方案的精度水平。但该方案需要完全重新设计 PCB, 更换大量元器件, 成本高, 开发与返修周期长, 且对原设备结构改动较大。

3.3 两种方案的对比分析

方案一和方案二代表了“局部加固”和“系统重构”两种不同的设计哲学。如表 2 所示, 方案一优势在

于快速、低成本、易于实施，适合在役设备的紧急返修和升级，以及对成本敏感、原系统性能已足够且只需防护特定威胁的场景。方案二优势在于高性能、高可靠性、本质安全，适合作为新一代产品或对可靠性要求极高的场合的从头设计。理想的策略可能是：短期内，对在役设备采用方案一进行改造，以快速消除风险、保障任务；中长期，在新一代温度测试台设计中，采纳方案二的思想，并可将方案一的钳位电路作为冗余备份或前级防护集成进去，形成多级防护体系。

表 2 方案对比表

对比维度	方案一：二极管钳位限压	方案二：高耐压器件重构
保护原理	被动钳位，限制电压至安全值	主动免疫，器件耐压覆盖威胁值
保护有效性	高，能有效防止 ADC 烧毁	极高，整个前端耐高压
对测量精度影响	有影响（漏电流导致），精度余量减小，需校准补偿	影响小，精度潜力高，取决于新器件性能
系统复杂性	增加前端钳位板，相对简单	完全重新设计信号链，复杂
对原系统改动	小，可做附加模块	大，需替换核心板卡
在役返修可行性	高，可作为“保护罩”模块加装	低，相当于重新生产，周期长
新型号设计适用性	适用，作为低成本防护方案	非常适用，作为高可靠性设计方案
成本	较低（新增二极管、电阻、小 PCB 等）	高（新芯片、新 PCB、可能的新结构件）
研制/返修周期	短（约 6~8 周）	长（约 15 周或更长）
长期可靠性	取决于二极管长期漏电流稳定性	高，基于成熟的高耐压器件

4 试验验证与性能评估

为全面验证两种过压保护设计方案的有效性，系统评估其对测量性能、环境适应性和长期可靠性的影响，本章构建了多维度试验验证平台，对两种方案的原型样机进行了包括基本功能、环境应力、长期稳定性及电磁兼容性在内的对比测试。

4.1 试验平台搭建

试验平台核心包括：被测对象：分别搭载方案一（钳位保护板）和方案二（重构信号链板）的温度测试台原型样机各两台。原机箱、电源、面板显示、接插件均保持不变，以确保测试结果的代表性。模拟信号源：高精度电阻箱（可模拟 77.7~138.5 Ω 的 Pt100 电阻值，分辨率 0.01 Ω）和高精度可编程电压/电流源（吉

时利 2450），用于产生标准温度信号。异常电压注入装置：可编程直流电源（Keysight N8937A）和高压脉冲发生器，用于模拟 28 V/33 V 异常高压及瞬态过压。数据采集与记录系统：8.5 位高精度数字万用表（Keysight 3458A）、数据采集卡（PXIe-4300，16 位，同步采样率 1 MS/s）及上位机软件，用于同步采集输入电阻、测试台输出电压、关键节点电压波形等。环境试验箱：温湿度可控试验箱（Espec SH-642），温度范围 -70~+150 ℃，湿度范围 20%RH~98%RH，用于进行高低温、湿热等环境试验^[17]。

电磁兼容测试设备：包括静电放电发生器（TESEQ NSG 438）、辐射抗扰度测试系统（R&S TS-EMF）、传导抗扰度测试系统（R&S ENV216），用于抗干扰能力测试。

4.2 方案一钳位保护效果验证

4.2.1 高压钳位能力测试

1）测试方法：将可编程直流电源依次连接到样机任意两个输入端子（模拟 12 种可能的短路组合），施加 33 V DC 电压，持续时间 1 s。使用示波器和高压差分探头监测保护电路后（即 ADC 输入引脚前）的电压。

2）结果：在所有测试组合下，ADC 输入端的电压均被迅速钳位在 -0.42~3.72 V 内，完全满足 ADS1220 的安全输入电压要求（-0.3~3.6 V）。撤去高压后，ADC 输入端电压立即恢复到正常偏置电位（约 1.65 V）。

3）分析：肖特基二极管 BAV199 响应时间极快（纳秒级），串联电阻（1 kΩ）与线路寄生电容形成的 RC 常数也较小，保证了钳位的快速性。限流电阻有效将二极管导通电流限制在约 30 mA，经过连续 10 次冲击测试，二极管温升小于 10 ℃，未出现性能退化。

4.2.2 正常工况下测量精度与稳定性测试

1）测试方法：在 25 ℃ 常温下，使用电阻箱模拟 Pt100 全量程标准阻值，记录方案一样机各通道的输出电压。计算非线性误差、重复性误差和短期稳定性（8 h）。

2）精度结果：方案一在 77~323 K 量程的最大误差为 ±0.35 K，在 233~373 K 量程的最大误差为 ±0.32 K。满足 ≤±0.5 K 的技术指标，但优于指标的程度从原方案的 ±0.2 K 有所下降。

3）电压波动（噪声）：观察到输出电压存在约 5~15 mVp-p、频率在 10~30 Hz 的低频波动（如图 3 所示），这与理论分析的二极管漏电流及其噪声特性相关。此波动折算为温度噪声约为 0.25~0.75 K，是导致精度余量减小的主要原因。

4）线性度：通过最小二乘法拟合，测得全量程线性度约为 0.2%（千分之二），较原方案的 0.02%（万

分之二)退化了一个数量级。

4.2.3 二极管漏电流影响专项测试

为量化漏电流影响,在恒流源输出端串联高灵敏度电流计,测量在不同环境温度($-40, 25, 60\text{ }^{\circ}\text{C}$)和不同输入共模电压下,流入/流出保护电路的净漏电流。

1) 结果:在 $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,净漏电流小于 10 nA ;在 $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,最大可达 $80\sim 120\text{ nA}$,且在不同通道、不同极性间存在 $20\sim 50\text{ nA}$ 的不一致性。此不一致性漏电流会直接转化为差分测量误差。

2) 对策验证:通过软件校准(在正常信号范围内增加多点校准^[18],建立包含漏电流补偿的查表模型),可以将高温下的测量误差重新压缩至 $\pm 0.4\text{ K}$ 以内,但增加了校准的复杂性。

4.3 方案二全链耐压验证

4.3.1 高压耐受性测试

1) 测试方法:同 4.2.1,将 33 V DC 电压施加到方案二样机的输入端,持续时间延长至 1 分钟。监测恒流源输出电流、仪表放大器输出电压以及关键器件温度。

2) 结果:在施加高压期间,恒流源 LM134 输出电流保持稳定($0.5\text{ mA}\pm 0.1\%$),仪表放大器 INA188 输出饱和(接近正电源轨),但器件工作正常,壳体温度无异常升高。撤去高压后,系统输出在 100 ms 内恢复到与输入电阻对应的正确值。

3) 分析:LM134 和 INA188 的宽压工作特性得到了充分验证。高压被视为一个巨大的共模信号^[19],被 INA118 的高 CMRR 所抑制,虽然导致输出瞬时饱和,但未对器件造成任何损伤,实现了“自恢复”保护。

4.3.2 测量精度与线性度测试

1) 测试方法:同 4.2.2。

2) 精度结果:方案二在 $77\sim 323\text{ K}$ 量程的最大误差为 $\pm 0.18\text{ K}$,在 $233\sim 373\text{ K}$ 量程的最大误差为 $\pm 0.15\text{ K}$ 。优于原方案指标,且达到了与原优化方案($\pm 0.2\text{ K}$)相当的水平。

3) 噪声与稳定性:输出噪声小于 1 mVp-p ,主要为白噪声,无明显的低频波动。8 小时短期稳定性极佳,漂移小于 0.05 K 。

4) 线性度:全量程线性度达到 0.05% (万分之五),优于原方案。这主要得益于 INA188 的高线性度和精密电阻网络^[20]。

4.4 环境适应性验证

4.4.1 高低温循环测试

方案一:高温($60\text{ }^{\circ}\text{C}$)下测量误差增大至 $\pm 0.42\text{ K}$ (主要因漏电流增加),低温($-40\text{ }^{\circ}\text{C}$)下误差为 $\pm 0.30\text{ K}$,仍满足 $\leq \pm 0.5\text{ K}$ 指标。钳位功能在所有温度点均正常,限流电阻和二极管工作可靠。

方案二:全温度范围内测量误差变化很小,最大误

差 $\pm 0.20\text{ K}$,温漂系数约 $0.01\text{ K}/^{\circ}\text{C}$ 。高压耐受功能完全不受温度影响,撤去高压后均能自恢复。

4.4.2 湿热测试

两种方案在湿热环境下均未出现绝缘下降、参数漂移或功能失效。

方案一的精度最大变化为 $\pm 0.05\text{ K}$ 。

方案二为 $\pm 0.02\text{ K}$,均在可接受范围内。试验后检查 PCB 及元器件,无腐蚀或霉变现象。

4.4.3 长期稳定性测试

方案一:72 小时内最大漂移为 $\pm 0.15\text{ K}$,输出电压低频波动幅度与短期测试一致(约 10 mVp-p),无明显趋势性变化。

方案二:72 小时内最大漂移为 $\pm 0.03\text{ K}$,输出电压稳定,波动小于 1 mVp-p ,表现出优异的长期稳定性。

4.5 抗干扰能力测试

4.5.1 静电放电(ESD)抗扰度测试

1) 测试方法:按照 GJB151B-2013《军用设备和分系统电磁发射和敏感度要求》中 CS114(静电放电)方法,对两种样机的输入连接器外壳、机箱面板及附近金属部件进行接触放电和空气放电测试。放电电压: $\pm 4\text{ kV}$ (接触)、 $\pm 8\text{ kV}$ (空气),每个测试点正负极性各 10 次,间隔 1 s。测试过程中监测输出电压变化及功能状态。

2) 结果:两种方案在 ESD 干扰下均未出现输出跳变、复位或损坏。放电后立即恢复正常工作,表明防护设计(金属机箱接地、输入滤波)有效。

4.5.2 辐射抗扰度测试

1) 测试方法:按照 GJB151B-2013 中 RS103(电场辐射敏感度)方法,将样机置于电波暗室中,施加 10 V/m 的电场(频率范围 $80\text{ MHz}\sim 1\text{ GHz}$),调制方式为 1 kHz 正弦波调幅(80%)。测试过程中监测输出电压波动。

2) 结果:在辐射场强下,两种方案的输出电压波动均小于 2 mV (对应温度 0.1 K),未出现误码或功能异常。方案二由于采用仪表放大器,共模抑制能力更强,波动略小于方案一。

4.5.3 传导抗扰度测试

1) 测试方法:按照 GJB151B-2013 中 CS101(电源线传导敏感度)方法,在样机电源输入端注入 $30\text{ Hz}\sim 150\text{ kHz}$ 的干扰电压(幅度为电源电压的 10%)。同时,按照 CS114(电缆束注入传导敏感度)方法,在输入信号电缆上注入 $10\text{ kHz}\sim 200\text{ MHz}$ 的干扰电流(幅度按军标限值)。监测输出电压变化。

2) 结果:在传导干扰下,方案一输出最大 5 mV (0.25 K)的波动,方案二波动小于 2 mV (0.1 K),均

满足系统正常工作需求。干扰撤除后立即恢复。

4.6 综合评估

通过上述全面试验验证,可以得出以下结论:

1) 保护有效性:两种方案均能有效抵御 28 V/33 V 异常高压的冲击,保护核心电路不受损坏。方案二展现出“无损自恢复”的更高等级保护特性。

2) 环境适应性:两种方案均能通过高低温、湿热等环境试验,满足 GJB150 相关要求。方案二在全温度范围内性能一致性更优。

3) 长期稳定性:方案二在 72 小时连续运行中漂移极小(± 0.03 K),方案一虽有 ± 0.15 K 的漂移,但仍满足指标要求。

4) 抗干扰能力:两种方案对 ESD、辐射和传导干扰均具有良好抑制能力,方案二凭借仪表放大器的高 CMRR 表现出更优的抗扰性能。

5) 工程特性:方案一具有快速实施、改动小、成本低的优势,适合在役设备快速返修;方案二具有性能优、可靠性高、无需为保护而牺牲性能的优势,但成本高、周期长,是新型号设计的理想选择。

综合评估表明,两种方案均满足工程应用需求,可根据在役设备状态和新研型号要求灵活选用。

5 结论与展望

5.1 主要结论

本文针对某型号运载火箭附加系统温度测试台因外部 28 V 高压误输入导致的故障,开展了深入的过压保护设计研究,主要结论如下:

1) 故障根源明确:确认了 28 V 高压灌入是导致核心 ADC 芯片(ADS1220)烧毁的直接原因,根本原因在于原设计对输入端口异常电压侵入的危险识别不足,缺乏有效的前端防护电路。高压通过输入连接器直接作用于 ADC 引脚,引发 ESD 二极管击穿、电源轨过压、闩锁效应及热烧毁,造成永久性损坏。

2) 两种有效保护方案:提出了基于肖特基二极管钳位的“方案一”和基于高耐压器件重构信号链的“方案二”。试验证明,两者均能有效抵御 33 V 高压冲击,保护后续电路安全。方案一将输入电压钳位在 $-0.42 \sim 3.72$ V 安全区间;方案二实现了 40 V 耐压能力,且具备无损自恢复特性。

3) 性能与工程权衡的量化评估:方案一保护有效、改动小、成本低、实施快,适用于在役设备快速返修。但其引入二极管漏电流导致的测量精度下降(± 0.35 K,仍满足 $\leq \pm 0.5$ K 指标)、低频波动($5 \sim 15$ mV_{p-p})及线性度退化(0.2%),经试验量化评估,可通过软件校准将高温误差控制在 ± 0.4 K 以内。方案二实现了本质安全和高性能的统一,测量误差 $\leq \pm 0.18$ K、线性度

0.05%、72 小时漂移 ≤ 0.03 K、抗干扰能力优于方案一,是新型号设计的理想选择,但成本高、周期长。

5.2 与现有研究的对比及贡献

与国内外现有研究相比,本文的独特贡献在于:视角创新,从真实故障案例出发,关注“外部异常操作”这一传统可靠性分析中易被忽视的威胁,弥补了 FMEA 分析的盲区。1) 方法创新,提出的“混合策略”既解决了在役设备的燃眉之急,又为新型号提供了长远解决方案,避免了“一刀切”式设计;2) 验证创新,全面、量化的验证体系为工程决策提供了可靠依据,避免了定性分析的模糊性;3) 管理创新,将技术与管理措施有机结合,形成了可持续改进的闭环流程。

5.3 技术展望

1) 更广泛的威胁建模与防护库建设:未来可系统梳理地面测试设备可能面临的其他威胁,如交流串扰、雷击浪涌、静电放电(ESD)、负载短路等,建立标准化的“威胁库”和对应的“防护电路模块库”,实现快速选型设计^[20-21]。

2) 智能化与状态监测:在保护电路中集成简单的状态监测功能,如通过检测钳位二极管的微小导通电流来预警持续性过压事件,或记录异常事件次数,通过健康管理(PHM)系统上报,实现预测性维护。

3) 标准与规范制定:推动将本研究形成的过压保护设计要求、验证方法纳入相关行业或企业标准,如《运载火箭地面测试设备通用设计要求》,从顶层提升整个行业的地面设备可靠性水平。

4) 新材料与新器件的应用:关注宽禁带半导体(如 GaN)在保护电路中的应用,其更快的响应速度和更低的导通损耗可能带来保护性能的进一步提升。

6 结束语

通过本次研究与实践,不仅解决了具体型号温度测试台的问题,更为我国新一代运载火箭乃至其他航天型号的地面测试系统,提供了关于接口安全与可靠性设计的宝贵经验和理论方法,对保障航天发射任务的成功具有积极意义。

参考文献:

- [1] NASA-HDBK-4001. Electrical grounding architecture for unmanned spacecraft [S]. Washington, D. C.: NASA, 2021.
- [2] ECSS-E-ST-20-08C. Electrical and electronic engineering [S]. Noordwijk: European Cooperation for Space Standardization, 2022.
- [3] 刘伟,张伟民. 航天器电子设备环境适应性设计与试验 [M]. 北京:中国宇航出版社,2015.

(下转第 26 页)