

文章编号: 1673-3193(XXXX)XX-0001-10

武器发射强冲击下数据记录仪的抗过载技术

郭涛¹, 商梓维¹, 林昊¹, 李威²

(1. 中北大学 仪器与电子学院, 山西 太原 030051; 2. 航空工业上海航空电器有限公司, 上海 201100)

摘要: 针对武器发射过程中超过 100 000 g 高冲击环境的测试需求, 本文开展了高冲击记录仪的抗过载技术研究。为了解决强冲击下记录仪易损毁与信号失效的问题, 提出了一套结合结构与电路的综合抗过载方案。结构方面, 设计了“刚性固封+柔性减振”三级防护体系, 内壳采用高比强度铝合金以降低惯性载荷, 并通过引入芳纶增强复合导线与芯片级底部填充工艺, 提高了系统在高冲击载荷下的结构稳定性与电连接可靠性。电路方面, 采用高集成轻量化双板布局, 结合 FPGA 控制的高速数据采集与精细电源管理策略, 提升了强冲击环境下信号采集的稳定性, 并兼顾了系统低功耗需求。经 XG-L-10000 高过载平台验证, 该记录仪在近 100 000 g 冲击条件下, 获取了从气动加速至静态平衡过程中的响应数据, 并识别出 5 个动力学阶段。对原始数据进行 2 kHz 低通滤波处理后, 得到了峰值为 98 870 g、脉宽为 31 ms 的高冲击响应结果。研究结果表明, 该设计可在近 100 000 g 冲击条件下实现数据存储与回传, 证明所提抗过载方案可行, 可作为高冲击环境下参数测试装置设计的参考。

关键词: 武器; 数据记录仪; 高冲击; 结构设计; 数据处理

中图分类号: TH85⁺5 **文献标识码:** A **doi:** 10.62756/jnuc.issn.1673-3193.2026.03.0006

引用格式: 郭涛, 商梓维, 林昊等. 武器发射强冲击下数据记录仪的抗过载技术[J]. 中北大学学报(自然科学版), DOI:10.62756/jnuc.issn.1673-3193.2026.03.0006.

Guo Tao, Shang Ziwei, Lin Hao, et al. Anti-Overload Technology of Data Recorder under High-Intensity Launch Shock of Weapons[J]. Journal of North University of China(Natural Science Edition), DOI:10.62756/jnuc.issn.1673-3193.2026.03.0006.

Anti-Overload Technology of Data Recorder under High-Intensity Launch Shock of Weapons

Guo Tao¹, Shang Ziwei¹, Lin Hao¹, Li Wei²

(1. School of Instrument and Electronics, North University of China, Taiyuan 030051, China;

2. Avic Shanghai Aviation Electric Co. Ltd., Shanghai 201100, China)

Abstract: To meet the testing requirements encountered during weapon launch in high-shock environments exceeding 100 000 g, this study investigated overload-resistance technology for a high-shock recorder. To address the problems of device damage and signal acquisition failure under severe shock, an integrated anti-overload scheme combining structural and circuit-level design was proposed. In the structure, a three-level protection architecture based on rigid encapsulation and flexible vibration isolation was developed. The inner shell was made of a high-specific-strength aluminum alloy to reduce inertial loads,

收稿日期: 2026-03-13

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52375553)

作者简介: 郭涛(1971—), 男, 教授, 硕士, 从事微纳器件设计制造、微纳传感器集成应用方面的研究。E-mail: guotao6@nuc.edu.cn。

while aramid-reinforced composite wiring, and a chip-level underfill process were introduced to improve structural stability and electrical interconnection reliability under high-shock loading. In the circuit, a highly integrated and lightweight dual-board architecture was adopted, together with FPGA-controlled high-speed data acquisition and a refined power management strategy, thereby the stability of signal acquisition in severe shock environments was improved and the low power consumption was maintained. Experimental validation on the XG-L-10000 high-overload platform shows that the recorder successfully captures response data throughout the process from aerodynamic acceleration to static equilibrium under a shock level of nearly 100 000 g, and five stages of dynamic response are identified. After applying a 2 kHz low-pass filter to the raw data, a shock response with a peak acceleration of 98870 g and a pulse width of 31 ms was obtained. The results demonstrate that the proposed design enables data storage and readout under shock conditions approaching 100 000 g, verifies the feasibility of the proposed anti-overload scheme, and provides useful guidance for the design of parameter measurement devices for high-shock environments.

Key words: weapon; data recorder; high impact; structural design; data processing

0 引 言

大威力武器发射时配套的数据记录仪不仅是武器系统的“数字化核心装备”,更是贯穿整个飞行任务周期的“信息感知中枢”^[1]。在导弹从离轨发射、稳定飞行直至最终高速侵彻目标的复杂任务中,它肩负着高保真、实时获取全流程飞行状态的关键使命^[2-3]。武器数据记录仪是深入剖析弹体弹道动力学特性、验证终端复杂环境效应及评估武器毁伤效能的物理支撑^[4]。然而在实际使用过程中,武器数据记录仪面临着极为严苛的工程挑战^[4]。特别是在硬目标侵彻或超高速穿甲瞬间,系统需要在微秒级时间内承受极高的瞬态冲击。目前,大多数研究集中在30 000 g到50 000 g量级,而当冲击峰值达到100 000 g时,极易引发元器件引脚剥离、电路板层间断裂甚至存储芯片的物理损毁,对存储模组的完整性和数据可恢复性构成了前所未有的考验^[5-7]。

目前,针对武器记录仪高冲击过载防护的相关研究已逐渐向多尺度与精细化方向演进。郑智贞等^[7]通过剖析高冲击工况下的动态响应规律,设计了基于内外防护壳与环氧树脂灌封的新型架构,有效提升了系统的抗变形能力;王艳等^[8]针对存储模块提出了椭圆形优化防护结构,为复杂力学环境下数据的完整性提供了理论支撑。上述工作主要停留在仿真层面,缺乏实测数据的验证,且测试条件大多集中在50 000 g以内^[9]。然而,100 000 g量级冲击与30 000 g、50 000 g条件相比,对结构强度、连接可靠性和失效模式提出了

更高要求,在更高量级的冲击下,部分适用于50 000 g工况的防护方案,在100 000 g量级冲击下可能难以满足可靠性需求^[6,10]。

综上,本研究构建了一套多级梯度化的应力衰减与综合防护体系:在系统架构层面,利用有限元拓扑优化技术,采用高比强度铝合金壳体并结合“刚性密封+柔性减振”协同的三级防护方案,提升了结构的整体受力刚度;在关键单元层面,采用PCB高集成轻量化设计并优化板间互连布局,同时引入CUF109特种环氧树脂底部填充工艺与特殊的传感器抗拉芳纶复合导线设计。UF109底部填充工艺通过毛细渗透实现芯片、焊点与PCB板的刚性耦合,将焊点集中载荷分散为均匀应力,抑制冲击瞬态下的芯片撕裂与电连接失效;芳纶复合导线则以芳纶纤维增强外层与镀银铜合金绞线内芯的协同承载能力,保证高冲击下信号传输的连续性。该体系通过宏观结构与内部组件协同,实现了100 000 g冲击环境下的多层防护。经XG-L-10000宽脉冲高过载试验台验证表明,该记录仪在100 000 g峰值冲击下结构稳固,未见整体及其内部组件损伤,所获得的存储数据曲线平滑无断连,解析逻辑完整准确。实验结果证明了该综合防护方案在武器超过100 000 g这一高冲击动态力学环境下的良好测试能力与工程应用可靠性。

1 武器数据记录仪设计

1.1 记录仪总体设计

武器数据记录仪采用模块化架构方案,主要

由模拟采集板与信号处理主控板两部分组成^[11]。数据记录仪的总体框图如图 1 所示。

1.2 模拟采集板设计

模拟采集板集成了高精度模拟通道,并配备了一套完整的信号调理链路,包含输入输出接口、电荷放大器、信号放大单元、多级滤波网络以及抗饱和限幅电路,并设有 2.5 V 基准电压源,用于实现传感器输出电荷信号至标准电压信号的线性转换与调理。该模拟电路的核心结构如图 2 所示。

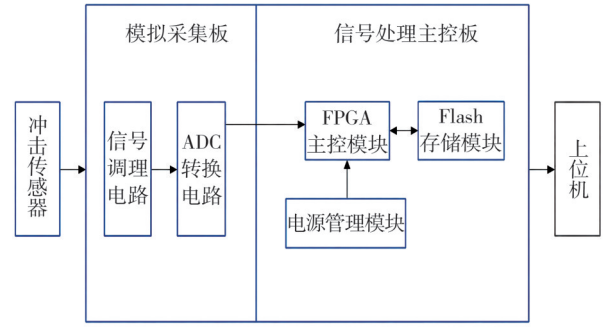


图 1 数据记录仪的总体框图

Fig. 1 Overall block diagram of the data recorder

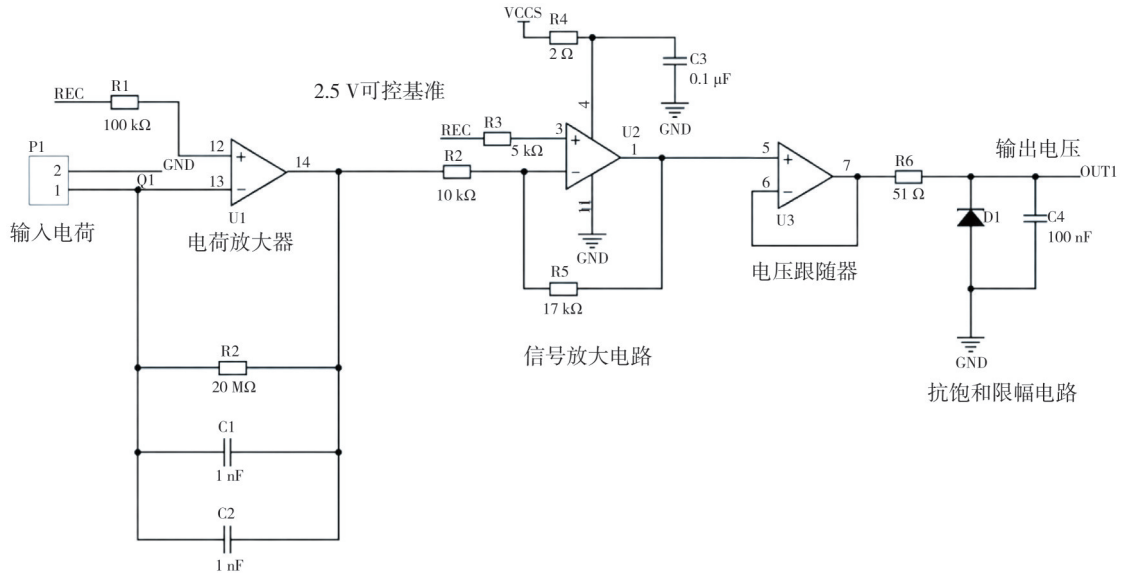


图 2 模拟电路设计图

Fig. 2 Analogue circuit design diagram

在图 2 中, Q_1 表示输入的电荷量, OUT_1 为最终输出的电压信号。前端芯片 U_1 构成电荷放大器电路, 中间级 U_2 实现信号放大, 后级 U_3 为电压跟随器。REC 为 2.5 V 可控基准输入端, 其工作机制为当输出电压过低时开启基准, 当输出超过 2.5 V 时关闭基准, 以维持输出信号在合理的范围内。

前端电荷放大器由 U_1 及外围元件 R_1 、 R_2 、 C_1 、 C_2 构成, 用于将压电传感器输出的电荷信号转换为电压信号。根据电荷放大器的基本传递关系, 输出电压可表示为

$$V_{OUT} = \frac{Q}{C_F}, \quad (1)$$

式中: Q 为传感器输出的电荷量; C_F 为反馈电容。

实验中选用 CJ-001 型冲击传感器, 其灵敏度 $S_q = 0.0473 \text{ pC/g}$ 。传感器产生的电荷量为

$$Q = S_q \cdot a, \quad (2)$$

在冲击加速度 $a = 100\,000 \text{ g}$ 的条件下, $Q = 4\,730 \text{ pC}$ 。

最后可得电荷放大器输出电压为

$$V_{OUT} = \frac{Q}{C_1 + C_2} = \frac{4.73 \times 10^{-9}}{2 \times 10^{-9}} = 2.365 \text{ V}。 \quad (3)$$

经参数匹配后, 该电压进入由 U_2 构成的同相放大级进行增益调节。放大倍数 A_{inv} 由反馈电阻 R_2 与 R_5 的比值决定, 即

$$A_{inv} = \frac{R_5}{R_2} = \frac{17 \text{ k}\Omega}{10 \text{ k}\Omega} = 1.7。 \quad (4)$$

据此计算, 模拟电路最终的最大输出电压可达 4.020 5 V。

第三级为 U_3 电压跟随器, 利用单位增益、高输入阻抗和低输出阻抗来隔离前后级, 即后级负载的变化不会影响到前面的精密放大电路, 同时数字噪声也不会通过电源或地回路串到前级。跟随器的输出经过 R_6 输出到 OUT_1 , 同时 D_1 提供对地钳位保护。 R_6 的作用是限制钳位电流, 防止运

放输出级被瞬态过流损坏; D_1 则把超出电源轨的过压尖峰输出到地端, 避免后级 ADC 输入端过压受损。 R_6 和 C_4 还组成了一阶 RC 低通滤波器, 截止频率设在信号带宽之上、高频噪声频段之内, 能有效抑制冲击瞬态激发的高频谐振分量和电磁耦合毛刺, 使信号更平滑, 抗干扰能力更强。

1.3 信号处理主控板设计

信号处理主控板作为系统的控制中枢, 以 Artix-7 系列 FPGA 为核心逻辑单元, 用于全局配置与动态任务调度^[12-13]。当冲击环境达到预设触发阈值后, 主控模块精准驱动 AD7606 高性能模数转换电路开启同步记录, 实现传感器信号的瞬态数字化。在数据处理流程上, FPGA 利用内部构建的高速 FIFO 缓存区对原始采样量化数据进行实时缓冲, 并在完成协议成帧与封装后, 将其大规模无损转存至 NAND Flash 存储阵列^[14]。

本设计选用工业级 Flash 芯片 MT29F4G08, 其容量为 4 Gbit, 具备非易失存储和较低功耗特性, 有利于提高高过载工况下数据存储的完整性; 同时, 原生 Flash 接口允许 FPGA 绕过复杂协议控制直接对存储阵列进行底层操作, 简化了控制流程, 并提高了系统响应的一致性。待测试任务闭环后, 用户可通过上位机软件配合 USB 高速接口, 实现实测数据的快速回传与处理。

为了平衡武器续航能力与瞬态高性能采样的需求, 信号处理主控板设计并集成了精细化的电源管理系统。该系统支持 3.7 V 锂电池与 USB 接口的双供电模式, 兼顾了弹上自主工作的持久性与实验室调试的便捷性。

在待机预唤醒阶段, 系统强制进入深度休眠模式, 通过关断微控制器冗余外设及非关键逻辑单元, 将静态电流控制在微安级, 仅保留触发监

测与电源感知逻辑以维持基本响应。一旦监测到有效触发信号, 系统将按预设时序依次启动核心控制、模拟前端和存储模块: 首先, 驱动核心控制单元由低功耗态转入全性能工作模式, 并同步激活模拟前端采集链路; 随后, 按照预设逻辑准则依次接通 NAND Flash 存储模块与相关外围电路, 确保全系统有序启动并规避浪涌冲击^[15]。在任务执行期内, 系统基于高精度定时窗口严格控制采样时长; 待数据记录与非易失性转存任务结束后, 主控模块下达隔离指令, 切断高能耗电路回路, 引导系统速度回退至低功耗静态模式^[16]。

2 典型设计

2.1 高比强度铝合金结构与三级防护设计

武器数据记录仪在冲击高达 100 000 g 的弹体发射过程中处于高过载、强冲击与剧烈振动的复合应力环境。由于内部集成的微元器件对惯性载荷高度敏感, 结构性的机械损伤往往导致整体电性能失效。目前, 已有的针对记录仪的抗冲击过载防护主要从“刚性支撑+整体灌封”机制入手达成传统的二级防护。这些方法在提高硬件抗震防冲击强度方面具有良好的效果。

本设计同样在系统外壳采用高强度铝合金作为一级物理防护, 但内壳则选用高比强度铝合金, 且根据波阻抗失配原理在内外壳间隙填充泡沫棉、毛毡或聚氨酯等缓冲材料, 形成更加高效的应力波衰减层作为二级防护。同时模拟采集板、信号处理主控板与供电电池周围通过环氧树脂灌封加固实施三级防护, 经 16 h 静置固化后形成整体封装, 提高了结构稳定性, 并与柔性减振层来协同优化内部应力分布。本设计所用的高强度铝合金、高比强度铝合金及环氧树脂的材料参数如表 1 所示。

表 1 材料参数
Tab. 1 Material parameters

材料	弹性模量/GPa	密度/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	泊松比	屈服应力/MPa
高强度铝合金	70	2 700	0.33	265
高比强度铝合金	72	2 800	0.33	550
环氧树脂	3	1 200	0.35	60

高比强度铝合金是该结构方案中的关键材料之一, 与高强度铝合金相比, 其屈服应力明显提高, 有助于增强结构的抗冲击能力。高比强度铝合金较高的强度密度比在维持结构刚性的同时实

现了轻量化, 从而降低了由结构自重引起的惯性载荷, 降低了内应力破坏风险。同时, 该材料通过提升系统基频增强了抗共振能力, 并凭借良好的导热与加工性能, 确保了复杂动态环境下系统

的高功能密度与运行可靠性。使用 Matlab 制作高比强度铝合金与高强度铝合金的应力-应变曲线如图 3 所示。

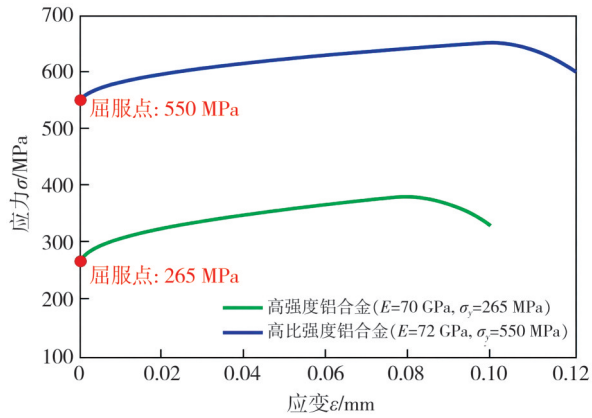
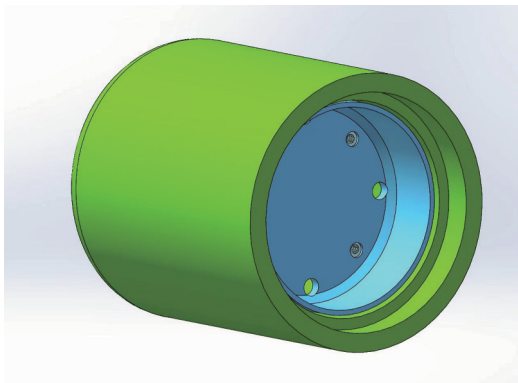


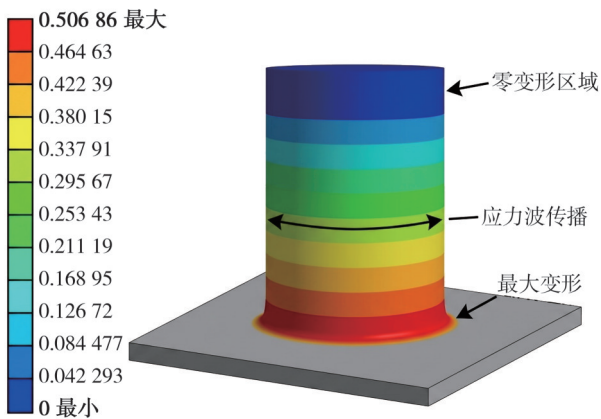
图 3 高比强度铝合金与高强度铝合金对比

Fig. 3 Comparison of high strength-to-weight ratio aluminium alloys and high strength aluminium alloys

使用 Solid work 制作高比强度铝合金内壳三维结构模型并用 Ansys 来仿真冲击结构, 结果如图 4 所示。



(a) 高比强度铝合金内壳三维结构模型



(b) 冲击变形仿真结果

图 4 高比强度铝合金内壳冲击仿真分析

Fig. 4 Impact simulation analysis of a high specific strength aluminum alloy inner shell

冲击仿真数据表明, 壳体在承受 100 000 g 载荷时, 最大瞬态位移小于 0.5 mm, 在仿真载荷条件下, 壳体整体未出现明显扭曲或失稳。应力云图显示, 载荷由冲击点向四周均匀传递, 无应力集中现象。仿真结果表明, 该材料在所设定冲击工况下具有较好的承载能力, 其高屈服强度与合理刚度确保了壳体在高冲击工况下的结构稳定性, 从而保障了内部电路模块的安全运行。

本研究所设计的数据记录仪内部结构如图 5 所示, 采用上下分体式结构, 中部螺纹密封盖实现物理隔离与气密连接。上部为中空气腔, 尺寸模拟实弹以适配弹载空间; 下部为硬件承载腔, 集成电子学单元与前端传感器。下部腔室采用壳中壳布局, 高比强度铝合金内壳作为安装骨架, 垂直布设模拟采集板、信号处理主控板及供电电池。模拟板与数字板呈双板叠层构型, 通过抗震排插电气互连。

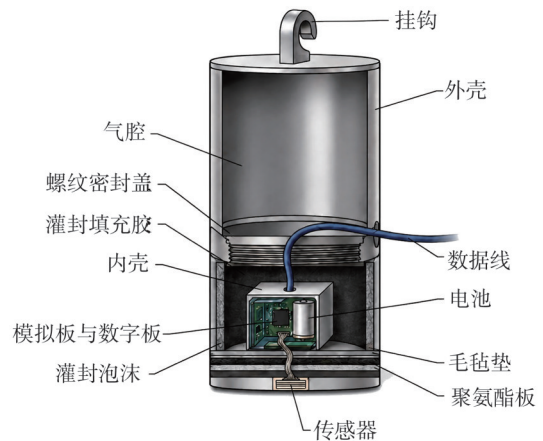


图 5 数据记录仪内部结构示意图

Fig. 5 Internal structural schematic of the data record

内壳两端设过线孔, 用于引入传感器信号与引出数据线缆。传感器经底部螺纹刚性固定于壳体, 其电荷信号通过芳纶增强复合导线传输至模拟板, 完成调理、数字化与存储。内外壳之间沿轴向叠放两层毛毡垫与两层聚氨酯板, 实现隔离支撑、冲击吸收与位移抑制。记录仪顶部设固定挂钩, 用于与冲击试验台刚性连接。

2.2 特殊工艺设计

在应对 100 000 g 量级高冲击环境的系统级防护设计中, 本研究在常规的防护思路基础上^[7,17], 采取了两项针对高冲击工况的工艺改进措施, 分别从导线抗拉设计和芯片焊接区加固两方面来提高系统的抗冲击能力。

在信号传输层面,采用了如图6所示的由高强度芳纶纤维编织增强的定制化复合导线,其内芯选用高线号多股超细镀银铜合金绞线,利用多丝结构优异的材料性能吸收瞬态冲击能量,而高模量芳纶外层则作为抗拉承载主体,确保了在强冲击激发的轴向瞬时拉伸下信号传输的连续性。



图6 100 000 g冲击传感器复合导线图

Fig. 6 Composite lead wire of 100 000 g shock sensor

在组件加固层面上,通过高模量、低粘度的CUF109特种环氧树脂执行底部填充工艺,利用毛细渗透效应实现芯片、焊点与PCB板间的刚性耦合。该工艺建立的坚硬支撑层将原本由微小焊点承担的集中载荷转化为全局平面的均匀分布应力,在受力面积实现量级提升的同时,有效抑制了冲击瞬态下PCB板因“弹力效应”引发的芯片撕裂与电连接失效,从而保障了电子模组在高冲击环境下的结构完整性与电气可靠性。

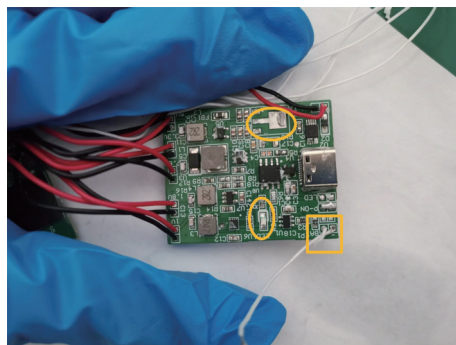
2.3 高集成轻量化PCB结构设计

在系统研制初期,采用传统三板叠层布局与引线焊接工艺进行了初步样机试制。在100 000 g冲击试验中,样机内部出现了严重的结构损伤:如图7(a)所示,将PCB板从测试系统内取出清理后可见圆圈所圈芯片已从PCB表面脱落,焊点处呈现明显疲劳裂纹;方框所圈地线在靠近焊盘处发生断裂,断口呈典型过载拉伸形貌。分析表明,高冲击工况下,引线和焊点承受了巨大的瞬时拉力,导致应力在此处高度集中。

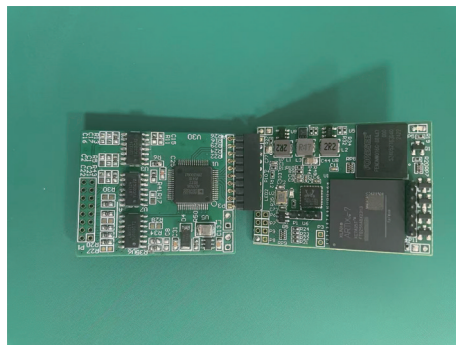
为了解决这一问题并实现系统轻量化以及提升其在高冲击环境下的结构稳健性,本研究对PCB布局进行了深度集成与拓扑优化,实际成果如图7(b)所示。

在架构方案上,优化后的高集成轻量化PCB通过功能模块的高度整合,将原有的电源管理、信号处理及模拟采集电路进行了模块化集成,实现了由传统三板叠层布局向轻量化双板架构的转

化。缩小了系统的物理体积并降低了整体受力重心,在100 000 g高冲击环境下,重心下移有效削减了系统受到的翻转力矩与惯性载荷。在互连方案上,系统采用紧凑型连接布局,以高可靠抗震板间排插取代传统的引线焊接工艺。该改进不仅有效抑制了长引线在高冲击下产生的振动噪声与产生分布电容的可能,同时降低了引线因惯性疲劳导致的断裂风险,提高了高冲击过载下信号的完整性与动态响应速度。



(a) 早期测试中脱落的芯片与断裂的导线



(b) 高集成轻量化PCB实物图

图7 PCB实物图

Fig. 7 Physical image of PCB

3 100 000 g高冲击实验过程

实验采用XG-L-10000型宽脉冲高过载冲击试验台构建高冲击环境。该设备通过高压气体驱动撞击体加速并与缓冲台碰撞,可产生峰值近100 000 g的冲击脉冲,实验严格按设备规程操作,以确保安全与数据有效性。

准备阶段,检查设备连接与气源,底部放置聚氨酯板缓冲,确认无人员滞留后启动系统。依次启动低压与高压气泵建立稳定气源,按预设量级将储气瓶充至0.8 MPa,缓冲座充至0.6 MPa。通过控制按钮将撞击体精确移动至试验位置,并通过显示屏实时监控状态。就位后解除机械保险,系统进入待击发状态。

击发时,按下启动按钮,撞击体释放并与缓冲台碰撞完成冲击加载。试验结束按下停止键切断动力源,依次关闭各气路与总电源,清理现场并回收撞击体。具体所用测试设备如图8所示。

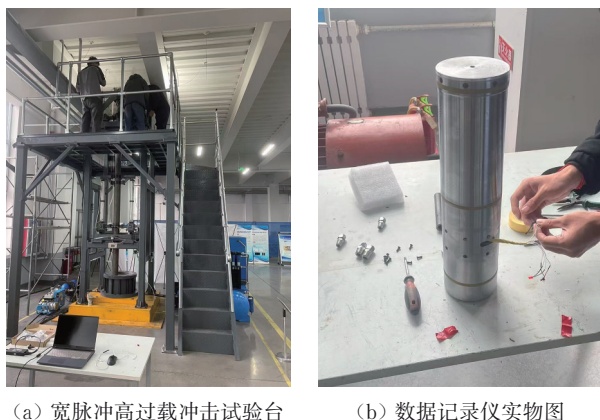


图8 测试装置图

Fig.8 Diagram of the test setup

试验完成后试验装载台的情况如图9所示。



图9 试验台在100 000 g冲击后实貌

Fig.9 Actual condition of the test bench after a 100 000 g impact

由图9可见,在100 000 g量级冲击试验中,多层聚氨酯缓冲板发生贯穿性破坏,瞬时剪切应力超过其极限抗剪强度,导致缓冲层未能通过有效形变耗散动能,而是被瞬间贯穿。这一现象表明,在高冲击环境下,常规柔性阻尼材料将失去缓冲作用,残余冲击能量直接刚性传递至被测对象。这印证了高冲击测试中记录仪采用高比强度铝合金结构与三级防护设计的重要性。

4 实验结果分析与性能验证

4.1 时域波形分析

冲击实验完成后,通过USB线路连接采集装置与设备,完成传感原始信号的实时传输,再借助专用解码应用软件接收传输信号,对数据进行

解码,将整理完毕的数据保存为TXT文本文件,最后把生成的文本数据导入Origin软件中完成数据录入与参数设置,绘制生成对应变化曲线图,实现传感数据从采集、传输、解析存储到可视化绘图的完整操作流程。原始数据波形如图10所示,主脉冲峰值达到98 870 g,起止时间为187.650 s至187.681 s,持续31 ms。

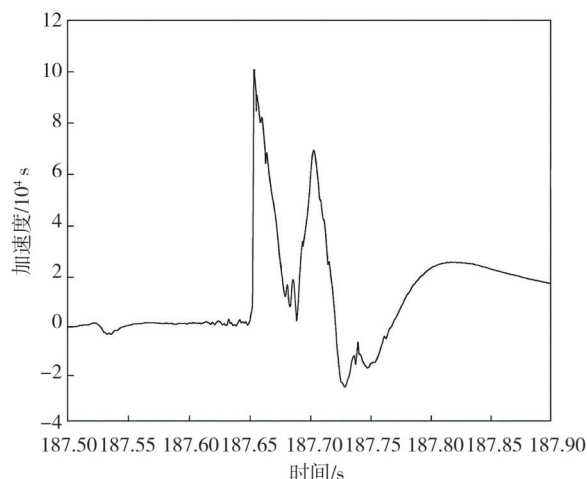


图10 冲击原始数据波形

Fig.10 Raw data waveform of the impact

针对冲击产生的宽脉冲、宽频带激励及伴随的大量离散数据与复杂高频噪声,采用Origin软件进行信号处理,生成电压-时间响应曲线,用以观察波形特征与数据完整性,揭示传感器在极限过载下的真实动力学响应规律。为了考察传感器在100 000 g冲击下的细节响应能力,对全时间过程的电压数据进一步具体分析,如图11所示,实验的电压基准设定为2.502 04 V,发射起始时间为187.548 54 s,结束时间为187.868 62 s,整个事件持续时间320.08 ms。

各典型阶段的局部波形分析如下:

图12展示了气体驱动加速阶段。该阶段起始时间为187.553 52 s,结束时间为187.586 34 s,脉宽为32.82 ms,电压峰值2.538 3 V,换算冲击幅值为2 469 g。标志着高压气体驱动传感器与测试系统完成了初始的动能加载,为后续高冲击过载碰撞提供了必要的物理速度。

图13展示了碰撞发生瞬间的局部放大波形。该冲击最大的波起始时间为187.651 9 s,结束时间为187.652 1 s,脉宽为0.2 ms,电压峰值为1.026 55 V,换算冲击幅值高达98 870 g。图中陡峭的脉冲前沿与极短的脉宽反映出冲击波前沿的剧烈变化特征,同时验证了传感器对瞬态激励具

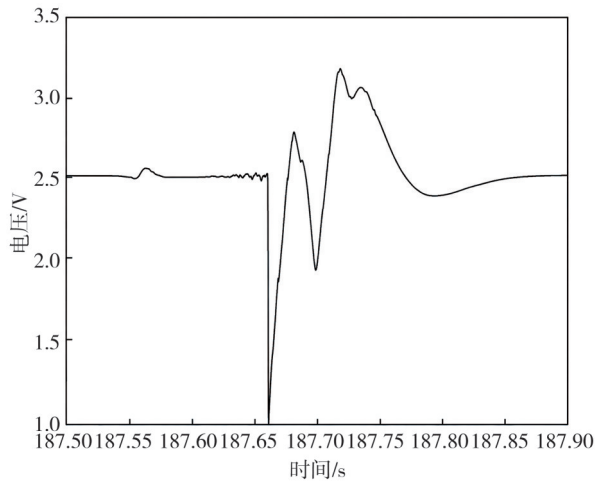


图 11 实验全过程

Fig. 11 The entire experiment process

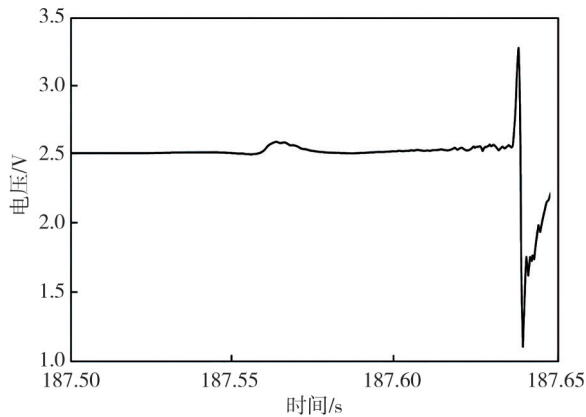


图 12 气体驱动加速阶段

Fig. 12 The gas-driven acceleration phase

有快速的响应能力。

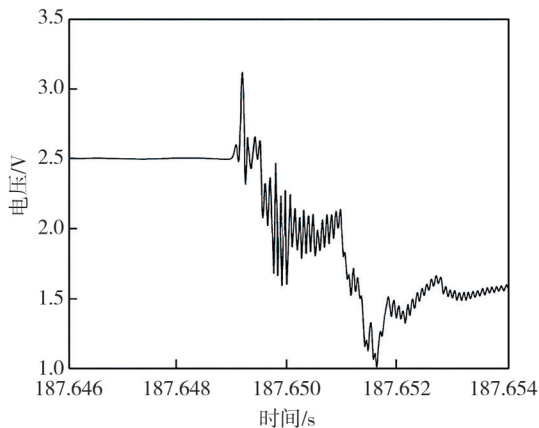


图 13 碰撞起始时刻局部放大

Fig. 13 The partial enlargement of initial collision phase

图 14 展示了余能衰减阶段反冲形成的最大波, 开始时间 187.710 9 s, 结束时间 187.804 94 s, 脉宽为 94.04 ms, 电压峰值为 3.123 29 V, 换算冲击幅值为 28 644 g。该阶段反映了传感器与目标发生高速碰撞后, 结构内部储存的弹性势能释放的过程。

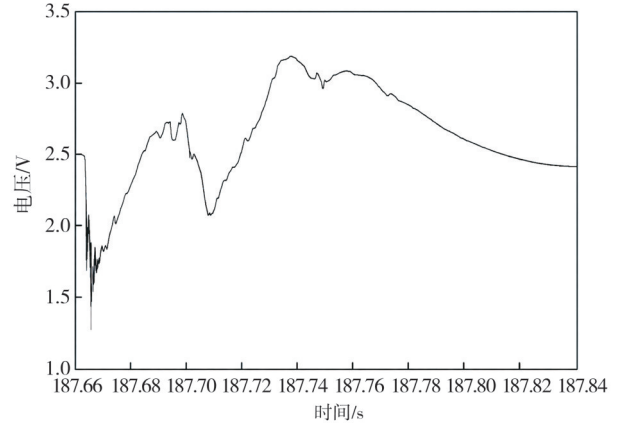


图 14 余能衰减阶段

Fig. 14 The residual energy attenuation phase

本次冲击实验成功模拟了 100 000 g 量级的冲击过载环境。完整覆盖了气体驱动加速、非弹性碰撞、弹性反冲、余能衰减及静态平衡五个动力学阶段。各阶段的动态响应特征如下:

气体驱动加速阶段特征。在高压气体驱动下, 传感器及数据记录仪整体向下加速运动, 惯性载荷逐步增大, 输出信号相对于初始基线呈正向偏移。

非弹性碰撞阶段特征。当运动部件与缓冲台发生碰撞时, 系统在短时间内承受峰值冲击载荷, 输出信号发生突变, 并形成主冲击峰值响应。

弹性反冲阶段特征。碰撞后, 多层聚氨酯缓冲板发生回弹, 传感器受到反向作用力, 输出信号出现明显的反向超调。

余能衰减阶段特征。随着缓冲结构变形、摩擦及阻尼作用持续耗散剩余机械能, 系统动态响应逐步衰减, 输出信号幅值随时间减小并趋于平稳。

静态平衡阶段特征。当动态扰动基本消失后, 系统恢复至稳定平衡状态, 输出信号收敛于稳定值。

试验结果表明, 传感器能够完整记录冲击过程中的主要响应特征, 测试过程中未出现明显的信号丢失或异常畸变现象。

4.2 频域特征分析

时域波形仅反映了信号的整体幅值变化, 无法揭示冲击能量在不同频率上的分布特征, 也无法评估传感器结构在共振条件下的响应潜力。为此, 进一步对冲击实验开展频域特征分析。对冲击的时域数据进行 FFT 分析得到其对应的傅里叶

频谱,结果如图 15 所示。

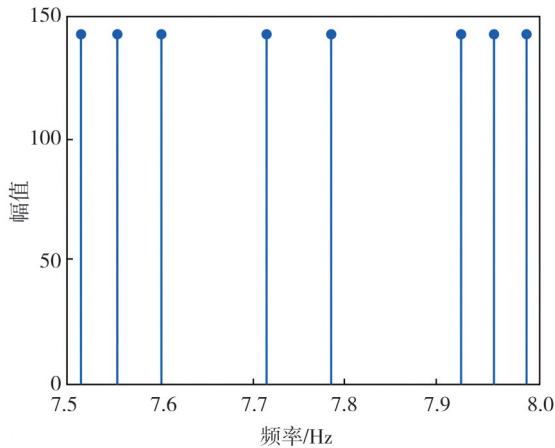


图 15 主要频率成分图

Fig. 15 Principal frequency component plot

频谱分析表明,信号能量主要集中于0~10 Hz 区间,与31 ms脉宽半正弦波的理论频带一致,呈现宽脉冲低频主导、无显著单一主频的特征,说明冲击激励在较宽频带内均有能量输入。

4.3 信号滤波分析

未滤波的原始信号局部仍叠加有宽频噪声与高频振荡成分,尤其在冲击起始阶段及主脉冲演化过程中表现较为突出。如图 16 所示,这些高频干扰可能掩盖真实的冲击特征,对峰值识别、脉宽测量及波形边界判定产生不利影响。

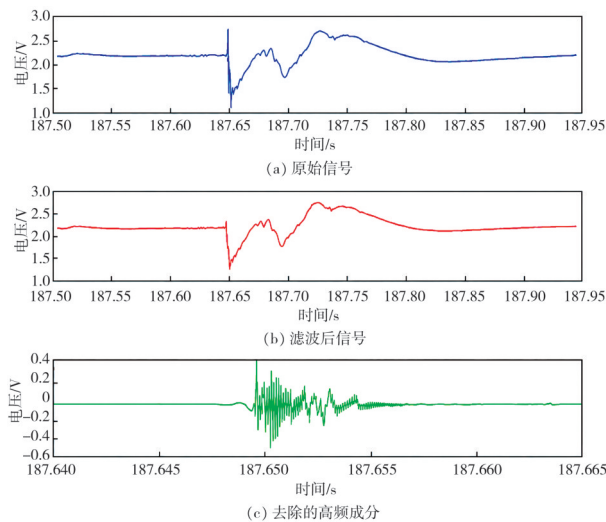


图 16 原始信号及滤波后信号

Fig. 16 Comparison of the original signal, filtered signal

为削弱噪声干扰并保留主脉冲物理特征,本文采用数字低通滤波方法对原始信号进行处理。傅里叶频谱表明,信号主频能量集中在2 kHz 以下低频区间,高于2 kHz 的成分为结构谐振与噪声干

扰,所选传感器在该频带内响应良好。该截止频率可在有效滤除高频波动与结构随机振动的同时,最大限度保留冲击响应的主导低频信息。经多次参数对比测试,结合冲击信号能量分布与传感器特性分析,将截止频率设定为2 kHz。

滤波后的信号波形与原始信号相比,曲线整体趋于平滑,主脉冲的起始位置、上升过程、峰值区域及衰减趋势均得到清晰呈现,原始波形中的高频毛刺和局部振荡被有效抑制。结果表明,滤波处理提升了信号信噪比,实现了主脉冲轮廓的清晰分离,为后续冲击特征参数提取及机理分析提供了可靠的数据基础。

5 结 论

本文围绕武器发射强冲击环境下的抗过载技术展开研究,研制出可承受100 000 g 冲击过载的数据记录仪。通过引入高比强度铝合金、三级防护体系及底部填充工艺,提高了系统在高冲击下的结构完整性与电气可靠性。实验结果表明,记录仪捕获了涵盖气动加速至静态平衡五个动力学阶段的周期信号,实测峰值达98 870 g。经2 kHz 低通滤波处理,波形特征清晰,数据解析准确,验证了100 000 g 高冲击过载环境下数据记录仪测试方案的可行性。这种从宏观机械壳体到微观互连层面的多重防护方案,为高冲击过载环境下电子组件易发生物理毁伤与数据丢失的问题提供了解决思路,并为高冲击武器参数获取提供了有效的实践支撑。

利益冲突声明/Conflict of Interests

所有作者声明不存在利益冲突。

All authors declare no relevant conflict of interests.

参考文献:

- [1] 聂聪聪. 抗高过载弹载数据记录仪研究与设计[D]. 太原: 中北大学, 2023.
 - [2] 刘辰. 多通道高精度弹载数据记录仪设计与实现[D]. 南京: 南京理工大学, 2024.
 - [3] 蒋炯炜, 查婕, 雷志军. 高性能数据记录仪的设计与实现[J]. 电子与封装, 2023, 23(10): 85-90.
- Jiang Jiongwei, Zha Jie, Lei Zhijun. Design and implementation of high performance data recorder[J]. Electronics & Packaging, 2023, 23 (10): 85-90. (in Chinese)

- [4] 岳振华, 岳凤英, 王恩怀, 等. 微型高冲击过载弹载数据记录仪的设计[J]. 中国测试, 2021, 47(12): 110-117.
Yue Zhenhua, Yue Fengying, Wang Enhuai, et al. Design of micro high impact overload missile borne data recorder[J]. China Measurement & Test, 2021, 47(12): 110-117. (in Chinese)
- [5] 尚义航, 赵凯明, 段俊萍, 等. 一种小体积MEMS传感器数据记录仪[J]. 微纳电子技术, 2025, 62(1): 010405.
Shang Yihang, Zhao Kaiming, Duan Junping, et al. A small volume mems sensor data recorder[J]. Micronanoelectronic Technology, 2025, 62(1): 010405. (in Chinese)
- [6] 李金强, 李杰, 张德彪, 等. 微型弹载冲击信号记录仪设计[J]. 中北大学学报(自然科学版), 2020, 41(4): 305-309.
Li Jinqiang, Li Jie, Zhang Debiao, et al. Design of miniature missile-borne shock signal recorder[J]. Journal of North University of China (Natural Science Edition), 2020, 41(4): 305-309. (in Chinese)
- [7] 郑智贞, 杨富伟, 郑浩鑫, 等. 一种高过载弹载记录仪的结构设计[J]. 制造业自动化, 2019, 41(4): 145-147.
Zheng Zhizhen, Yang Fuwei, Zheng Haoxin, et al. Structure design of a high overload missile recorder[J]. Manufacturing Automation, 2019, 41(4): 145-147. (in Chinese)
- [8] 王艳, 郭靖, 张会新, 等. 弹载记录仪存储模块防护结构设计及优化[J]. 兵器装备工程学报, 2020, 41(2): 166-169.
Wang Yan, Guo Jing, Zhang Huixin, et al. Design and optimization of protective structure of storage module of on-board recorder [J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2020, 41(2): 166-169. (in Chinese)
- [9] 李潇瑜. 基于SATA接口的FPGA弹载数据记录仪[D]. 太原: 中北大学, 2023.
- [10] 杨帆, 吴志强, 王宇. 基于过载上电的弹载飞行数据记录仪研究[J]. 自动化仪表, 2020, 41(9): 80-84.
Yang Fan, Wu Zhiqiang, Wang Yu. Research on missile-borne flight data recorder based on overload and electricity [J]. Process Automation Instrumentation, 2020, 41(9): 80-84. (in Chinese)
- [11] 丁红晖, 马游春, 苏庆庆. 基于高速eMMC存储的弹载记录仪设计[J]. 现代电子技术, 2018, 41(6): 70-73.
Ding Honghui, Ma Youchun, Su Qingqing. Design of missile-borne recorder based on high-speed eMMC storage [J]. Modern Electronics Technique, 2018, 41(6): 70-73. (in Chinese)
- [12] 李晋芳, 马游春, 李超杰, 等. 基于MRAM的无线弹载采集系统[J]. 电子测量技术, 2021, 44(10): 162-166.
Li Jinfang, Ma Youchun, Li Chaojie, et al. Wireless missile-borne acquisition system based on MRAM[J]. Electronic Measurement Technology, 2021, 44(10): 162-166. (in Chinese)
- [13] 刘思远, 苏淑靖, 许福佳. 高过载小量程加速度计结构优化与特性分析[J]. 传感器与微系统, 2023, 42(2): 49-52.
Liu Siyuan, Su Shujing, Xu Fujia. Structural optimization and characteristic analysis of small range accelerometer with high overload [J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2023, 42(2): 49-52. (in Chinese)
- [14] 余俊, 余少锋, 钟建棚, 等. 主从式测量系统中传感器数据同步采集方法[J]. 电子设计工程, 2025, 33(19): 174-177.
She Jun, Yu Shaofeng, Zhong Jianxu, et al. Synchronous collection method of sensor data in master-slave measurement system [J]. Electronic Design Engineering, 2025, 33(19): 174-177. (in Chinese)
- [15] 刘晓慧, 唐杰. 面向航空发动机性能测试的智能化数据采集与校准仪器设计研究[J]. 仪器仪表用户, 2025, 32(4): 66-68.
Liu Xiaohui, Tang Jie. Research on the design of intelligent data acquisition and calibration instrumentation for aero-engine performance testing [J]. Instrumentation Customer, 2025, 32(4): 66-68. (in Chinese)
- [16] 修威国. 高精度传感器自动化测试系统的设计[J]. 现代工业经济和信息化, 2023, 13(4): 45-46.
Xiu Weiguo. Design of high precision sensor automatic test system [J]. Modern Industrial Economy and Informationization, 2023, 13(4): 45-46. (in Chinese)
- [17] 崔文涛, 李杰, 张德彪, 等. 高过载高精度数据记录仪的设计与实现[J]. 中北大学学报(自然科学版), 2021, 42(6): 558-563.
Cui Wentao, Li Jie, Zhang Debiao, et al. Design and realization of high-overload and high-precision data recorder [J]. Journal of North University of China (Natural Science Edition), 2021, 42(6): 558-563. (in Chinese)