军事装备测控技术

文章编号:1671-4598(2021)11-0122-05 DOI:10.16526/j.cnki.11-4762/tp.2021.11.022 中图分类号:TP274 文献标识码:A

弹载遥测防毁采编存储系统的设计

鲍爱达^{1,2},张泽宇^{1,2},马游春^{1,2},杜壮波^{1,2}

(1. 中北大学 电子测试技术国家重点实验室,太原 030051;2. 中北大学 仪器科学与动态测试教育部重点实验室,太原 030051)

摘要:在航天航空的导弹数据采集领域中,针对遥测系统受环境因素影响较大,检测区域存在的"黑障"等问题,设计一种 将遥测系统与防毁记录仪相结合的弹载遥测防毁采编存储系统;该系统通过设计防毁记录仪的内外层防护结构保证系统的抗高冲 击性和稳定性;硬件方面通过设计56路模拟量信号的调理电路、模数转化电路以及多路 RS422、LVDS 数字量信号的光耦隔离 式接口电路,实现多通道高压模拟量的采集和数字信号接收的功能;软件方面通过对系统总体逻辑设计及遥测发送模块的设计, 实现对数据的采集、存储、发送与读取;最后通过实验测试,表明系统能够实现对多路高压模拟信号的采集以及数据准确完整回 读的功能,保证了导弹飞行数据的正确性与完整性。

关键词:抗高冲击记录仪;数据采集;数据存储; FPGA;遥测

Design of a Bullet-proof Telemetry Acquisition and Storage System

BAO Aida^{1,2}, ZHANG Zeyu^{1,2}, MA Youchun^{1,2}, DU Zhuangbo^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Electronic Measurement Technology, North China University, Taiyuan 030051, China;

2. Ministerial Key Laboratory of Instrument Science & Dynamic Measurement, North China University,

Taiyuan 030051, China)

Abstract: In the field of missile data acquisition in aerospace, in response to the problem that telemetry systems are influenced by environmental factors and the "black barrier" existing in the detection area, an on—board telemetry acquisition and storage system that combines telemetry system and anti—destruction recorder is designed. The system is designed to ensure high impact resistance and stability through the design of the inner and outer protection structure of the anti—destructive recorder; in the hardware aspect, it realizes the functions of multi—channel high—voltage analog signal acquisition and digital signal reception by designing 56 channel analog signal conditioning circuit, analog—to—digital conversion circuit and optocoupler isolated interface circuit of multi—channel RS422 and LVDS digital signal; in the software aspect, it realizes the functions of multi—channel high—voltage analysis of the system Logic design and telemetry module design, realize the data acquisition, storage, sending and reading. Finally, through the experimental test, it shows that the system can realize the function of multi—channel high voltage analog signal acquisition and data accurate and complete read back, and ensure the correctness and integrity of missile flight data.

Keywords: high impact resistant recorder; data acquisition; data storage; FPGA; telemetry

0 引言

近几年来,由于争议地区冲突对抗不断升级,地缘政 治博弈也越来越频繁,各国都开始大力发展军工产业。导 弹凭借其制导精度高、打击射程远、作战效果好等优点成 为了各国武器装备研究的重要方向之一^[1]。开展真实的导 弹靶场试验,采集并存储导弹在实际飞行过程中的各种数 据参数能够为优化导弹性能及可能的故障分析提供重要的 理论依据。在检测导弹的飞行状态时,导弹系统中的多路 模拟量和数字量信号是重要的被测对象之一^[2]。

对导弹飞行数据的采集一般采用弹上遥测系统^[3],可 以实现数据的实时传输,这样研究员能通过地面接收站实 时观察导弹在飞行过程中多路信号的变化,及时对回传的 飞行数据进行分析与研究。但是遥测系统存在检测区域的 "黑障"^[4-5],很多复杂的环境都会影响到遥测数据的完整回 传。如导弹在水下、山脉叠峦等复杂的地势环境和高温、 高压、高冲击的恶劣飞行环境中,都可能会出现部分数据 的丢失,导致遥测采编存储系统的数据传输不稳定。

针对以上问题,本文设计了一种弹载遥测防毁采编存 储系统。通过设计具有抗大冲击、高过载的内外壳结构, 有效保护了内部电路,提高记录仪回收的成功率;同时采 用遥测无线采集和固态记录仪存储两者相结合的方式,对 数据进行双重备份,在导弹的飞行过程中实现对多路信号 的完整采集与存储,避免了遥测系统在复杂环境中重要数 据丢失的隐患。

收稿日期:2021-04-15; 修回日期:2021-05-11。

作者简介:鲍爱达(1980-),男,河北秦皇岛人,博士,硕士生导师,副教授,主要从事电子测试仪器与系统方向的研究。 引用格式:鲍爱达,张泽宇,马游春,等.弹载遥测防毁采编存储系统的设计[J].计算机测量与控制,2021,29(11):122-126.

1 结构设计

导弹经飞行落地后需要回收记录仪进行数据读取,因 此抗冲击性是防毁伤记录仪结构设计的一个重点^[6-7]。抗冲 击性主要从两方面研究,一是要保证电路系统能够抵抗导 弹飞行期间的高过载环境,使系统能够正常工作,完成数 据的采集;二是在导弹落地后,能够保护电路系统在受到 高冲击时不损毁,回收后可以正常读取存储模块中的数据。 因此为了完整的读取导弹的飞行数据,本文设计了一种具 有较高抗冲击能力的弹载防毁记录仪结构。

1.1 外层结构设计

本文设计的防毁记录仪的外层防护结构如图 1 所示。 设计的外层结构是一个内径为 51 mm, 外径为 61 mm 圆柱 型结构,与测试导弹的直径相等,便于防毁记录仪在弹体 上的安装。在设计防毁记录仪外层结构时,要从设备安置 的便捷性和安全性这两个方面去考虑。在外层结构侧边留 有直径 18.17 mm 的圆孔,方便与围在防护结构外表面的拱 形天线进行线路连接,这样可以使记录仪内部存储模块存 储的数据通过拱形天线实时发送给遥测地面接收站,实现 数据的实时传输功能。同时外侧要留有信号灯口和下载读 数接口,方便上位机进行读数操作;为了提高防毁伤记录 仪抗高冲击的能力,同时兼顾防护结构的强度和韧性,外 壳结构选用 35CrMnSiA 材料^[8]。它是一种合成钢材料,在 具有优良的强度和韧性的同时也易于加工锻造。该合成钢 材料通过回火处理后, 耐腐蚀性和抗氧化性都会大幅度提 高,力学性能如抗拉强度值和屈服应力值都很高,是制造 外壳的一种优秀材料。



图 1 防毁记录仪的外层结构

1.2 内层结构设计

内部防护结构采用蛋形结构,其设计的原理是拱门结构,由于其外表面结构为凸型,因此可以将外界的压力较 为均匀地分散到结构的各个部分,抗压、抗形变能力增强, 从而大幅度降低了内部电路受到的压力,保护内部电路和 接口的完整,避免了应力波的损坏。蛋形结构内腔型为单 个槽体,该结构的优点是内腔体外围壁厚增加,抗形变能 力进一步增强。蛋形结构的参数如下:内径为 26 mm,外径 为 35 mm,高 50 mm。槽体为长方体,长 21 mm,宽 16 mm, 高 33.5 mm。在蛋形结构的顶盖留有安装螺丝孔和走线 孔,方便记录仪回收后数据的读取。设计的内层防护结构 如图 2 所示。



为了避免存储电路板与内部结构发生碰撞,最大程度 的减少电路板上元器件因挤压碰撞而受到压力过大,需要 对记录仪进行灌封,灌封材料选择环氧树脂^[9]。环氧树脂 分为A、B两种胶,在灌封前按1:1的比例充分混合,用 玻璃棒均匀搅拌。等搅拌均匀后向结构内进行慢慢浇灌, 直至将电路板与结构内部的空隙全部填满密封。这样电路 板与蛋形结构成为一个整体,极大的增强了抗高冲击的 能力。

2 系统总体设计

弹载遥测防毁采编存储系统主要由遥测采编单元、防 毁记录仪、遥测系统组成,如图3所示。遥测采编单元主 要完成对开关量信号、模拟信号与数字信号采集功能。防 毁记录仪主要对采集的数据进行记录与保存,并且设备落 地可承受高冲击过载,保证数据完整不丢失,具备数据回 读的功能。遥测系统主要负责接收遥测采编单元传来的数 据,经信号调制及处理后,再通过天线发送给地面接收站, 对数据进行接收并存储。



图 3 弹载遥测采编存储系统组成及框图

3 硬件电路设计

3.1 采编单元总体设计

采编单元主要由主控模块、模拟量信号调理模块、数 字量接口模块、数据采集模块及电源模块组成,如图 4 所 示。采集的多路模拟量和数字量先经过信号调理电路及光 耦隔离电路^[10-11],对其进行降压处理和滤波降噪后,再输 入到主控模块中。主控模块选用 XC3S400 型号的 FPGA 作 为主控芯片,集成了很多的 RAM 模块和 IP 核,包含多个 逻辑单元,具有强大的数据处理能力。该模块主要实现了 对各路信号添加帧头、帧计数及帧尾的编帧功能,并将编 帧后的数据通过 RS422 接口实时发送给遥测系统和防毁记 录仪。电源模块为系统中各个模块提供需要的工作电压。 模数转换模块对输入的模拟信号进行模数转换。

3.2 模拟信号调理电路设计

模拟信号调理电路选用 INA149 芯片检测飞行器在飞行 过程中高压模拟信号的变化。INA149 不仅可以精准的测量 高达±275 V 共模电压范围内的微小差分电压量,而且还可 以对输入的信号进行隔离、降噪、滤波^[12],完全能取代隔 离运算放大器,简化了电路设计。电路分别对 56 路 5 V、 20 V、70 V、350 V 的模拟电压信号进行降压调理,调理后 的信号通过 4 片 16 通道的模拟开关组,AD 转换模块对信 号进行采集。70 V 电路设计原理如图 5 所示。









3.3 LVDS 接口电路设计

LVDS 接收端选用了 DS90LV048A 接口芯片将 LVDS 并行信号转化成串行信号,接收导弹在飞行过程中传来的 6 路 LVDS 数字量信号^[13]。LVDS 信号接收电路一般具有很 高的输入阻抗,端接电阻 "R5"取 100 Ω,因此驱动器输出 的电流大部分都流过了 100 Ω 的匹配电阻,并产生了 350 mV的电压。为了增加抗噪声性能,会在电源与地之间 加滤波电容 "C3"和 "C4",这样可以减少高频噪声,电压 稳定,使电路各部分之间通过电源产生的耦合干扰降至最小。LVDS接口电路如图 6 所示。



图 6 LVDS 接口电路图

考虑到遥测采编器在高温高压的恶劣环境中工作,为 了提高系统整体的抗干扰能力,屏蔽 LVDS 接口电路对前 置信号源可能造成的干扰,确保 LVDS 信号可以准确完整 的被 LVDS 接受端接收,DS90LV048A 芯片转换后的 LVDS 信号通常需要再经过隔离器进行信号隔离^[14]。因此 在 LVDS 接口电路输出端增加了高性能六通道的数字隔离 器 ISO7760。该器件的每个通道的输入和输出均由二氧化硅 绝缘栅隔离,提高电路电磁抗扰度和低辐射的能力,实现 了高抗噪性能。LVDS 隔离电路如图 7 所示。



图 7 LVDS隔离电路图

3.4 RS422 接口电路设计

RS422 接口电路选用 ADM2682E 作为 RS422 接口协议 芯片。该芯片内部集成 5 kV rms 隔离式 DC-DC 电源的 RS -422 收发器^[15],无需外部 DC-DC 隔离模块,大大简化 了电路的设计。RS422 数据接口电路主要负责接收 4 路数 字信号,数据传输速率为 5.28 Mb/s,对数字量信号进行记 录,RS422 接口电路设计如图 8 所示。

4 软件逻辑设计

4.1 系统总体逻辑设计

设计系统时,硬件电路的设计是基础,软件逻辑的设



图 8 RS422 接口电路图

计是关键,所以我们先对系统进行总体逻辑设计如图 9 所 示,主要包括数据采集、数据编帧、数据存储、数据读取 4 个部分。



图 9 系统总体逻辑框图

数据采集:采编单元的模拟量接口电路和数字量接收 模块完成了导弹在飞行过程中飞行数据采集的功能。由于 各个接口数据的传输速率不同,所以要在 FPGA 内部调用 异步 FIFO 解决时钟不匹配的问题^[16]。由图可知,将采集 调理后的数据分别缓存至 FPGA 内 11 个 FIFO 中。

数据处理: FPGA 内部的模数混合编帧模块读取 11 个 FIFO 数据缓冲器中缓存的数据,分别对不同 FIFO 中的数 据添加帧标志、帧计数、帧长度等信息,进行模数混合编 帧^[17-18],之后将编帧的数据缓存到 FIFO12。FIFO12 数据 缓冲器将缓存的数据分别发送给遥测发送模块和采集数据 输出模块。遥测发送模块将处理后的数据发送给发射机, 发射机通过遥测天线将数据实时发回遥测地面接收站;采 集数据输出模块通过 RS422 发送接口将数据传输给存储单 元的 RS422 接收模块。

数据存储和读取:由于 RS422 接收模块的写入速率与 Flash 读取速率不匹配^[19],需要在 FPGA 内部调用异步 FIFO 解决读写速率不匹配的问题,调用的 FIFO_ctrld 写 入和读取宽度为 8 位,深度为 2 k。RS422 接收模块将编帧 的数据通过数据缓存器 Flash_FIFO 缓存至 Flash_ctrl 控 制模块中。Flash 控制模块通过 ce、rb、ale、cle 控制线完 成存储芯片 Flash 的数据写入及数据读出上传的功能;同样 地,为了解决 Flash 数据读取和 USB 读数模块速率不匹配 的问题,同样在 FPGA 内部调用 FIFO,调用的 FT232_ ctrl 写入和读取宽度为 8 位,深度为 2 k。若对 Flash 存储模 块中存储的数据进行数据回读时,PC 上位机通过 USB 方口 线下发命令至 FT232_ctrl 控制模块,Flash 存储器响应命 令后,数据通过 245_FIFO 缓存至 FT232_ctrl 模块中, 从 Flash 读出后再通过 USB 接口上传至 PC 端^[20]。

4.2 遥测发送模块逻辑设计

遥测发送模块主要实现了弹载防毁遥测采编存储系统 中采编单元与发射机之间数据传输的功能。在软件设计中, 遥测发送模块按照遥测发射机的协议将发送给记录仪的数 据进行重新编帧。遥测控制逻辑的程序流程图如图 10 所示。



图 10 遥测发送模块逻辑框图

由于遥测的码速率为 4.8 Mbps,遥测采编器的数据下 传速率为 2.5 Mbps,因此为了解决传输速率不匹配的问题, 遥测发送模块在对下传数据进行编帧时需要添加同样帧结 构的无效数 "CC"来保证遥测的码速率,与遥测 PCM 码流 的脉宽相匹配。本设计中遥测系统转发的 PCM 码速率为 4.8 Mbps,帧同步码为 "EB 90",帧长为 64 字节。

5 功能测试

5.1 遥测功能测试结果

遥测发送模块发送数据的接收测试结果如图 11 所示。 数据包括帧头"EB 90"、帧计数连续递增,无效数"CC" 和有效数据。

如图 11 所示, 帧头 "EB 90"对齐, 帧计数依次累加, 证明数据传输完整准确, 不存在数据丢失的问题。接收的 数据试验结果表明遥测发送模块可以实现弹载遥测防毁采 编存储系统中采编单元与发射机之间数据传输的功能。

5.2 高压模拟量电路的电压采集试验

为了验证采编单元能够采集到多路高压模拟量信号,

00000708	00 01	02 03	04 05	06 07	08 09	0a (b	0c 0d	Ce Of	10 11	12 1	3 14	15	16 17	18 19	18	1b	10 1d	1e	11	20	21	22 2	23 2	24 25	26	27
00000000	eb 93	04 03	29 44	02 7e	00 7e	00 35	cd 05	CC CC	00 00	00.0	C 00	00	00 00	00 00	cc	cc	00 00	CC	00	00	cc	00 0	00 0	cc ci	00	00
00000048	eb 93	09 03	29 44	02 7e	09 7e	00 35	cd 06	cc cc	cc cc		c cc	cc		00 00	cc	cc		cc	cc	cc	cc	-				cc
000000000	eb 93	14 03	29 44	02 7e	00 7e	00 35	ed 07	cc cc	00 00	00 0	0 00	00	00 00	00 00	cc	cc	00 00	CC	00	00	cc	00 0	cc /		00	00
00000048	eb 93	19 03	29 66	02 7e	00 7e	00 35	cd 08	03 00	00 78	15 5	8 18	98	Oe a0	00 bi	00	00	00 10	00	20	00	30	00 1	0.0	00 51	00	60
00000120	eb 90	24 03	29 44	02 7e	00 7e	00 35	cd 09	00 00	00 00	00 0	• 7	动	粉	00 00	00	00	00 00	00	00	00	00	00 0	10 0	00 DI	00	00
00000168	eb 93	29 03	29 44	02 7e	00 7e	00 35	cd 0a	00 00	00 00	00 0	0 7	- ~~	~	00 00	10	61	00 00	00	00	00	00	f0 (61 V	ae 21	5 59	31
00000160	eb 90	34 03	29 44	02 7e	00 7e	00 15	cd 0b	24 56	1a be	86 b	0 58	3f	se Zo	59 35	e7	ź3	06 35	83	b4	1c	bc	64 0	14 3	12 el	a 5	9b
000001f8	eb 93	39 03	29 44	02 7e	00 7e	00 35	cd 0c	cc cc	CC CC	: 00 0	c cc	: cc	00 00	00 00	cc	cc	00 00	cc	ec.	00	cc	00 0	cc r	cc ci	: 00	cc
00000240	eb 90	44 03	29 44	02 7e	00 7e	00 35	cd 0d	cc cc	cc cc	. cc c	c cc	cc	cc cc	CC CC	cc	cc	cc cc	cc	cc	cc	cc	cc (20 B		e cc	cc
00000288	eb 93	49 03	29 44	02 7e	00 7e	00 35	cd 0e	cc cc	CC CC	00.0	c cc	cc.	00 00	00 00	cc	cc	00 00	cc	cc.	00	cc	00 0	20 S	CC 01	: 00	cc
00000260	eb 93	54 03	29 44	02 7e	00 7e	00 35	cd 01	cc cc	CC CC	00 0	0 00	00	00 00	00 00	cc	cc	00 00	CC	00	00	cc	00 0	20 0	cc ct	: 00	CC
00000318	eb 93	59 03	29 44	02 7e	00 7e	00 35	cd 10	0f 01	(b ac	90.9	a 42	60	00 00	00 00	00	00	00 13	44	d1	07	20	52 5	a 4	40 4°	75	34
00000360	eb 93	64 03	29 44	02 7e	00 7e	00 35	cd 11	31 00	ea 90	55 a	a 00	00	1b 73	00 00	00	00	00 00	00	00	00	00	00.0	10 0	00 01	00	02
000003a8	eb 93	69 03	29 44	02 7e	00 7e	00 35	cd 12	Cc 6d	41 fe	65 7	£ 41	00	00 fa	0a 01	00	74	aa 55	66	26	01	03	b0 1	12 8	80 41	60	00
00000320	eb 93	74 03	29 44	02 7e	00 7e	00 35	cd 13	00 00	00 00	00 0	0 00	00	00 00	00 00	00	00	ea 90	55	88	00	00	10 7	14 0	00 00	00	00
00000438	eb 93	79 03	29 66	02 7e	00 7e	66 35	cd 14	10 92	cĉ 32	fc 5	b 14	ef	23 3e	40 26	a3	bd	00 00	00	00	c8	32	fc 3	lb 3	14 ei	23	Se
00000480	eb 93	84 03	29 44	02 7e	00 7e	00 35	cd 15	as 71	bd 40	84 b	4 13	11	52 58	40 ec	11	7a	e7 25	7e	43	40	ae	df 9	ab 4	44 9X	00	12
00000408	eb 93	89 03	29 44	02 7e	00 7e	00 35	cd 16	75 3a	90 15	7e 4	3 40	So	af 90	44 00	00	00	00 00	00	00	00	00	00 0	10 0	00 e:	t eb	47
00000510	eb 90	94 03	29 44	02 7e	00 7e	00 35	cd 17	68 3d	08 30	00.0	0 00	00	00 00	£0 41	00	00	£0 cl	07	00	00	00	00 0	10 0	00 01	00	c7
00000558	eb 93	99 03	29 44	02 7e	00 7e	00 35	cd 18	03 00	00.78	09 8	8 08	98	10 a0	00 b1	00	00	00 10	00	20	0.0	30	00.4	10 0	00 59	00	€C.
000005a0	eb 90	04 04	29 44	02 7e	00 7e	00 35	cd 19	cc cc	cc cc	00 0	c cc	cc	00 00	00 00	cc	CC	00 00	CC	cc	00	cc	00 0	20 0	CC 01	cc.	CC
000005e8	eb 93	09 04	29 44	02 7e	00 7e	00 35	cd la	cc cc	CC CC	00.0	。有	效	数。	00 00	cc	cc	00 00	cc	cc	00	cc	00 0	20 0	CC 01	ec.	cc
00000630	the set	14 04	29 44	02 7e	00 7e	00 Sad	i.)	10 CC	cc cc	00 0	e		6	00 00	cc	cc	00 00	cc	cc	00	cc	00 0	20 0	cc ct	: 00	cc
00000678	贝头	19 04	29 44	02 7e	00 7e	00 399	111 30	C DC	CC CC	00 1	0 00	20	00 30	00 40	00	50	00 60	00	78	1b	88	07 5	H 6	01 6	0 00	ыс
00000600	IED 9.	26 96	29 44	02 7e	00 Te	00 35	00 10	66 39	aa 55	aa 2	6 01	63	ee 7c	80 41	. 00	00	00 00	00	00	89	90	10 0	10 0	90 09	0 66	00
00000708	eb 90	29 04	29 44	02 7e	09 7e	00 35	cd le	00 00	00 00	00 0	0 00	CC	00 00	00 00	00	00	00 00	00	00	00	00	00 0	10 0	30 01	00	CC

• 126 •

图 11 遥测发送模块发送数据的接收结果

我们对多通道模拟量采集电路做了可靠性试验,其中第48 通道的实际输入电压值如图12所示。



弹载遥测防毁采编存储系统设计第 48 通道来采集 350 V的高压模拟量。具体的测试过程为:将电压源作为系 统的信号产生源与系统进行联调;等系统上电启动后,电 压源分别设置不同的电压值为系统提供电压模拟信号,系 统的采集存储模块开始对输入的电压模拟信号进行采集。 100 V交流电压源在 60 s 左右给系统提供输入电压;持续 20 s 后,交流电压源变为 180 V 供电;持续 20 s 后,交流电压 源依次变为 240 V、336 V 为系统提供输入电压。从上图中 可以看出,采集的真实电压值变化与实际操作相符,表明 了系统的第 48 通道可以实现对 350 V 高压模拟量信号采集 的功能。

6 结束语

本文设计一种将遥测系统与防毁记录仪相结合的弹载 遥测防毁采编存储系统,结合传统的弹载动态测试技术, 设计了具有抗高冲击的防毁记录仪内外层防护结构,保证 了系统的稳定性;电路上设计模拟信号的调理电路和数字 信号的接口电路,实现了对多路信号采集存储的功能;软 件上完成了遥测发送模块的逻辑设计;在测试中成功实现 数据传输功能以及对高压模拟量信号的采集功能,验证了 弹载遥测防毁采编存储系统的可靠性和稳定性。弹载遥测 防毁采编存储系统的研究,对于评估导弹飞行状态以及改 进导弹性能有着重要意义和价值。

参考文献:

- [1] 王雅琳,张 灿,宋怡然,等.世界飞航导弹武器装备与技术 近5年发展回顾与展望[J].战术导弹技术,2020(4):71 -78.
- [2] 孙 成,陈泽宏,牛 康,等.基于 FPGA 的便携式导弹快速 测试方法研究 [J]. 计算机测量与控制,2020,28 (3):148-153.
- [3] 胡 磊.无线电遥测系统及在兵器试验中的应用 [J]. 电子测 试, 2019 (17): 80-81.
- [4]张 腾.某遥测数据采编与固态记录综合测试装置的设计 [D].太原:中北大学,2011.
- [5]张 吴,周军辉,吴 松,等. 飞航武器遥测系统现状及发展 趋势分析[J]. 飞航导弹, 2017 (11): 80-84.
- [6] 王海霞. 抗冲击弹载记录仪的设计与研究 [D]. 太原: 中北大 学, 2019.
- [7] 王 艳. 抗高过载记录仪防护结构的设计及优化 [D]. 太原: 中北大学, 2020.
- [8]施 刚,姜 雪,周文静,等.高强焊接圆钢管轴心受压整体
 稳定性能设计方法研究 [J].建筑结构,2015,45 (21):1
 -8.
- [9]张 晶,贾宏光,郝相宇,等.高过载数据储存器缓冲隔振结构的优化设计[J].爆炸与冲击,2012,32(5):557-560.
- [10] 朱 诚,徐腾飞,金运昌,等.一种高精度模拟信号隔离电路设计 [J].现代电子技术,2020,43 (6):9-12.
- [11] 王 博,仲维彬. 基于 HCNR201 线性光耦的飞机高压信号 隔离电路设计 [J]. 中国科技信息,2019 (24): 28-29.
- [12] 许路,赖纪东,苏建徽,等.信号的高速磁隔离传输系统 设计[J].传感器与微系统,2020,39(6):116-118.
- [13] 陈杨杨. 基于 LVDS 的高速串行互连结构信号完整性研究 [D]. 重庆: 重庆邮电大学, 2019.
- [14]章 挺,余飞鸿.基于 FPGA 的多视频接口的紫外成像系统
 设计[J].电子测量技术,2021,44 (1):103-109.
- [15] 李建翔,王洪凯,杨玉华,等. 基于 RS422+LVDS 高速长 线通信的设计与实现 [J]. 仪表技术与传感器,2021 (3): 40-44.
- [16] 张晓光, 尤文斌, 王 吴. 基于 FPGA 的 DDR 多数据通道的 实现 [J]. 中国电子科学研究院学报, 2021, 16 (1): 21 -26.
- [17] 杨圣龙. 模数混合采编存储系统的设计与实现 [D]. 中北大 学, 2018.
- [18] 崔 婧. 多通道模数数据混合采集装置的设计及实现 [D]. 太原:中北大学,2014.
- [19] 吴嘉伟,魏志强,张会新. 基于 FPGA 和 FLASH 的多路数 据存储技术 [J].现代电子技术,2020,43 (4):34-37.
- [20] 李继秀,钟燕清,田 易,等. 基于 FPGA 和 USB 的高速数 据实时采集系统的设计和实现 [J]. 电子测试, 2020 (20): 23-25.