

多通道脉冲电流自动化检测设备

张东¹, 王栋¹, 刘革麟¹, 王小永¹, 崔三俊², 马健¹, 齐毅¹

(1. 中国航天科工集团第六研究院二一〇所, 西安 710065;
2. 空军驻西安地区第八军事代表室, 西安 710065)

摘要: 多通道点火控制装置可控制航天器实现调姿变轨; 针对多通道点火控制装置在大批量生产中点火脉冲电流自动化程度低、检测效率差、缺乏数值化表征的问题; 提出一种对多通道点火设备脉冲电流采集检测的自动化改进方法, 并研制了多通道脉冲电流自动化检测设备; 该设备采用模拟数字转换器和基于 SDLC (同步数据链路控制) 通讯协议的控制系統, 建立对于待测产品与检测设备之间集中控制和信息交互, 实现对点火信号全周期采集, 降低了人为错误风险和偏差; 经实验测试, 设备对全周期点火电流值的检测最大偏差不大于 5%; 经部署、工艺验证和长期使用, 证明了该设备在提高测试效率、降低成本和改善质量方面取得了显著成果, 已应用于某型发动机控制装置的检验测试作业。

关键词: 多通道脉冲电流; 多通道电流采集; 自动化系统; 应用与验证

Automatic Testing Device with Multi-channel Pulse Current

ZHANG Dong¹, WANG Dong¹, LIU Gelin¹, WANG Xiaoyong¹, CUI Sanjun², MA Jian¹, QI Yi¹

(1. The 210th Institute of the Sixth Academy of CASIC, Xi'an 710065, China;

2. Office of the Eighth Military Representative of the Air Force in the Xi'an area, Xi'an 710065, China)

Abstract: Multi-channel ignition control devices can control spacecraft to achieve attitude adjustment and orbit change. Addressing the issues of low automation, poor detection efficiency, and lack of numerical representation of ignition pulse currents in the mass production of multi-channel ignition control devices, an automated improvement method for pulse current acquisition and detection of multi-channel ignition equipment is proposed, along with the development of the multi-channel pulse current automatic device. This device adopts an analog-to-digital converter and a control system based on synchronous data link control (SDLC) communication protocol, establishes centralized control and information interaction between the product to be tested and the testing equipment, achieves full-cycle acquisition of ignition signals, and reduces the risk of human error and bias. Experimental testing shows that the maximum deviation of the device in detecting the full-cycle ignition current value is not greater than 5%. After deployment, process validation, and long-term use, it proves that the device achieves significant results in improving testing efficiency, reducing costs, and enhancing quality. The device is applied in the inspection and testing of a certain type of engine control equipment.

Keywords: multi-channel pulse current; multi-channel current acquisition; automated system; application and validation

0 引言

随着航天装备的发展以及作战任务需求的复杂化, 多种动能拦截弹、飞船和高轨卫星开始使用有多个脉冲发动机矢量控制技术的姿控发动机或轨控发动机来进行调姿和变轨^[1]。

姿控发动机内每个脉冲固体发动机都有单独的点火装置, 航天器完成特定的战术动作需要按照点火逻辑对不同位置脉冲发动机按照一定时序进行点火^[2]。

某型号发动机的点火控制装置有不少于 54 路点火通道, 输出点火脉冲电流时间宽度 5~10 ms 之间, 峰值电流 1.1~2.0 A, 最小点火间隔时间 100 ms, 可通过电子信号精确控制航天器上对应通道脉冲固体发动机的点火时间和推力大小。根据任务环境的具体需要, 点火控制装置各通

道输出的点火脉冲电流大小、电平特征、时间间隔均有所不同。同时为保障产品点火测试的安全性, 在进行点火电流检测前必须先对各点火通道与外部接口之间的绝缘性进行测试。

现有的测试方法一般只在研制阶段, 对控制装置的输出通道逐一用示波器进行数据采集, 后续生产检验则只能通过二极管指示灯间接对脉冲电流是否正常输出进行定性的描述。该检测方法存在生产过程中无法对整批次的产品质量进行定量化表征的问题, 导致数据追溯和质量分析困难。

为避免在产品检验测试过程中, 因无法准确对点火电流的电平特征、时序进行故障检测, 导致点火电流紊乱, 造成点火失败或意外点火、引起灾难性事故。必须对此类多通道点火控制装置的脉冲电流进行采集和测量, 形成数

收稿日期: 2024-07-30; 修回日期: 2024-09-22。

作者简介: 张东(1986-), 男, 硕士研究生, 高级工程师。

通讯作者: 刘革麟(1998-), 男, 大学本科, 助理工程师。

引用格式: 张东, 王栋, 刘革麟, 等. 多通道脉冲电流自动化检测设备[J]. 计算机测量与控制, 2024, 32(11): 109-117.

值化表征。

在多通道脉冲电流检测研究中,国内外学者提出多种检测方案。在对微小电流检测方面,基于磁感原理的非接触多通道电流测试仪^[3]利用霍尔效应可以实现对电流的非接触式测量,提高了测量的安全性和准确性;基于 AD 采集技术的多通道微弱电流信号检测电路^[4],充分考虑了微弱信号的放大和滤波,提高了号的信噪比,可以适应较大范围的电流测量;多通道数据采集系统^[5]可用于配电设备监测,该系统有数据处理及对外通讯的功能,软件操作简便,易于实现数据的实时监控和分析。

在传感器技术应用方面,有基于多通道电流传感器开发的电磁阀驱动电源电流检测系统^[6],该设备使用 RS-485 总线实现数据的传输和检测报警;基于温度传感器的多通道模拟量数据采集系统^[7],提高了前端处理电路的性能;为多通道检测设备研发提供了更多信号采集手段。

上述成果虽然都具备多通道电平信号实时监测能力,可以将检测到的模拟信号形成数字化信息,供检测人员对产品在一定时间内的整体工作质量进行分析与评价,但其还是聚焦在稳定电流的采集,检测电流的频率也相对固定,缺乏对各通道输出电流时域特征的采集和表征。无法满足多通道点火控制装置输出的脉冲电流时间宽度在 100 ns~50 ms 之间及各通道点火间隔不到 200 ms 的检测要求。同时无法实现检测设备与待测产品的同步控制和信息交互,测量结果难以表征出全点火周期内的点火脉冲信号时域电平特征。

为了能采集到脉冲电流的时域电平曲线,部分科研单位研制了基于辨识模拟信号特征同步触发的多通道采集设

备。其方法为人工预先设置好产品输出脉冲电平可能的电压值和上升沿时间等信号特征,然后设置采集频率,使得采集设备能在多个通道之间进行切换,当某通道出现符合“触发事件”的电平时,采集设备处于对该通道的连续采集状态,完成对脉冲电流的检测。其本质是一种多通道的数字示波器^[8]。

但此类设备存在准备周期长、布线多、人员错误设置“触发事件”特征等问题,同时当测试通道数量达到数十路甚至上百路时,必须购买大量昂贵的模拟信号转换装置,成本也会随之线性上升。且传统的电平采集电路在多通道脉冲电流采集测试中存在采样速率低、通道切换困难等限制。

因此,研制一种结构简单、高效率、成本较低的自动化多通道脉冲电流检测设备成为了亟待解决的问题。

本文提出一种同步指令交互的多通道数据采集方法,研制了用于某型号点火控制装置的多通道脉冲电流自动化检测设备。该设备经过性能测试、工艺验证和长期使用,取得了良好的应用效果。

1 系统结构与原理

多通道脉冲电路检测设备由控制模块、采集模块和辅助功能模块三部分组成,设备原理框图与各模块的功能如图 1 所示。

采集模块由模块转换电路、采样电阻、模拟量调理电路、多通道选择开关电路和 AD 转换单元共 5 部分组成。

1) 模块转换电路: 实现在绝缘电阻测试和点火电流测试两个功能的通道转接与切换;

2) 采样电阻: 固定阻值的采样电路,输出电流可在采

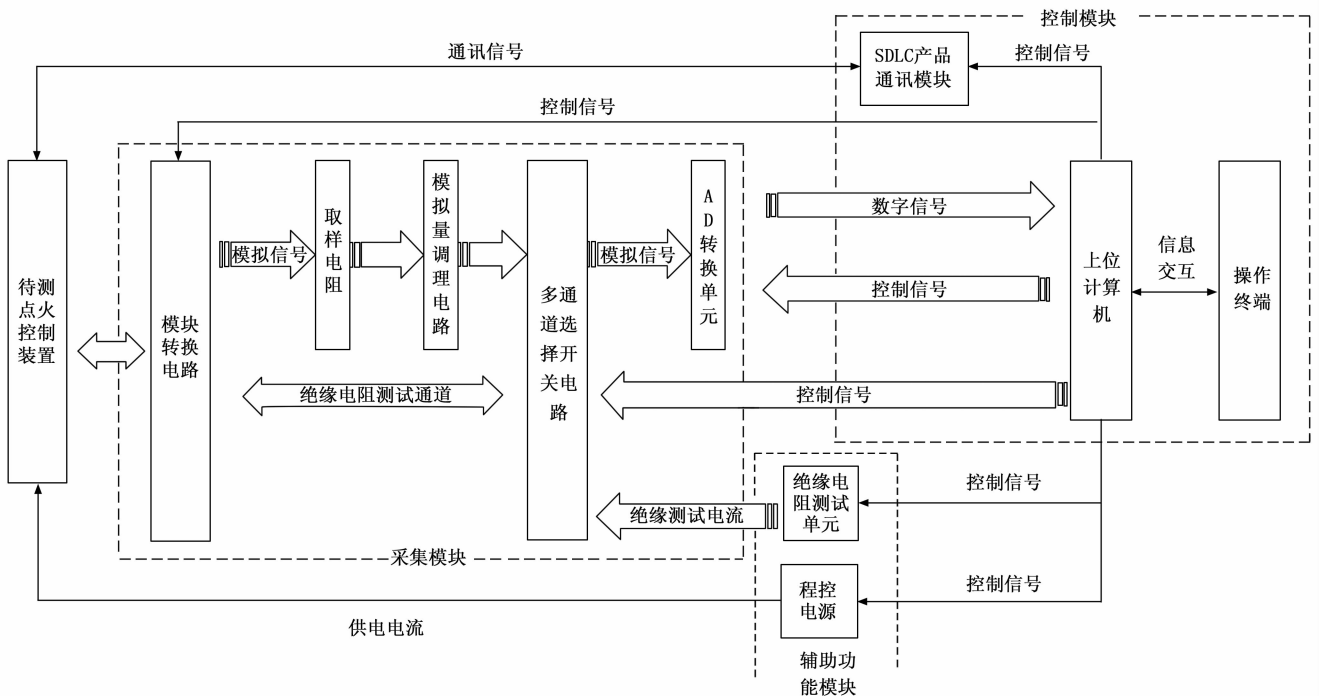


图 1 多通道脉冲电流自动检测设备原理框图

样电阻两端形成稳定的电压降, 供 AD 数据采集卡采集;

3) 模拟量调理电路: 实现对模拟信号的滤波、放大及阻抗匹配, 将信号控制在合理的电压输入范围之内;

4) 多通道选择电路可根据点火设置信息选通各路模拟信号, 实现对多通道信号覆盖采集;

5) AD 转换单元: 将当前通道的模拟信号转换为数字信号。

控制模块由 SDLC 通讯模块、上位计算机和操作终端 3 部分组成, 基于 SDLC 通讯技术、PXIe 总线结构和 RS-232 串口通信技术进行设计, 用于控制采集模块和辅助功能模块。上位计算机采用 window 系统, 基于 LabVIEW 设计了测试软件, 具备检测设备自检、一件化测试、数据存储分析、报表生成等功能。

辅助功能模块由程控电源和绝缘电阻测试单元组成。通过 RS-232 串口与控制模块建立指令交互, 实现对在测试过程中点火控制装置工作电流的监测和点火通道与接口外壳之间绝缘电阻的逐路测试。

2 设计与实现

基于依据点火通道工作时序进行开关闭合的采集切换模式, 结合多通道模拟开关电路设计和数据采集 (DAQ, data acquisition) 技术, 研制高效、低成本的检测设备, 其整体技术方案见图 2 所示。

输出的通道、各通道的输出顺序、输出间隔时间等。

2) 当待测产品接收到检测设备控制模块所发送的指令, 会对其进行应答并开始工作。

3) 检测设备的采集模块同步接收控制模块下达给待测产品的指令, 建立与之对应的“采集方案”: 保证各通道的采集顺序、采集间隔时间与输出顺序、输出间隔时间一致, 采集时间区间覆盖脉冲电流的输出时间。

4) 检测设备的控制模块发送“点火”的指令给待测产品, 产品开始执行之前的设置信息, 进行脉冲电流的输出。

5) 检测设备的采集模块同步接收到了“输出”指令, 以此为“0 时刻”开始执行之前的“采集方案”, 采集模块中的开关电路在多通道之间实现切换, 对输出的脉冲电流进行采集和处理。

6) 采集模块将采集到的模拟信号转化为数字信号, 并传输到上位计算机进行记录、处理和分析。

7) 当待测产品使用外部供电时, 辅助功能模块内加入程控电源, 由上位计算机监视其供电情况。若待测产品有其他电气性能测试要求, 比如接口的绝缘电阻检测、电容检测或耐压测试等, 可在辅助模块加入对应的检测仪器, 通过控制模块实现同步控制和数据回传。

2.1 数据采集 (DAQ) 技术的应用与设计

DAQ 技术, 是指从传感器和其它待测设备等模拟和数字被测单元中自动采集非电量或者电量信号, 送到上位机中进行分析 and 处理^[9], 其核心功能是 AD 转换, 即将采集到的模拟信号转换为数字信号。

AD 转换单元选用采集率与待测产品输出的脉冲电流合适的 AD 数据采集卡。选取依据内容主要包括: 通道数、分辨率和采样频率三部分。

通道数指 AD 采集卡采集的通道数量, 其应与待测产品的输出通道数量相对应, 对于有 54 路输出通道的点火控制装置, 应选用 4 块单端 32 路/差分 16 路的数据卡或 2 块 64 路单端/32 路差分的数据采集卡。

分辨率指 AD 转换器所能分辨模拟输入信号的最小变化量^[10]。一般来讲分辨率转换器的位数应该比检测量总精度要求的最低分辨率高一位, 该型点火控制装置的检测精度要求为 10 mA, 所以采集卡最小分辨率应为 1 mV 之内。

根据香农采样理论, 采样频率必须是信号中有效频率的两倍以上, 才能避免产生混叠信号失真^[11], 所以一般应该选用最高采样率大于被采信号高频率分量的 5~10 倍的采集卡^[12]。点火通道的整体工作周期是 50~200 ms, 其中脉冲电流的有值宽度约 1.5 ms, 为保证信号特征完整, 检测设备每通道实际采样频率不应低于 34 kHz。

除此之外, AD 数据采集卡还应考虑总线结构和量程, 总线结构通常有 PCI、PXI、PXIe、USB、ISA 等多种类型, 不同总线具有不同的传输速度、电气特性、结构尺寸、配置过程。PXIe 总线具备处理速度快、体积小、结构坚固、价格适中、可靠稳定等特点, 且其可根据控制器和机箱的性能而灵活配置。

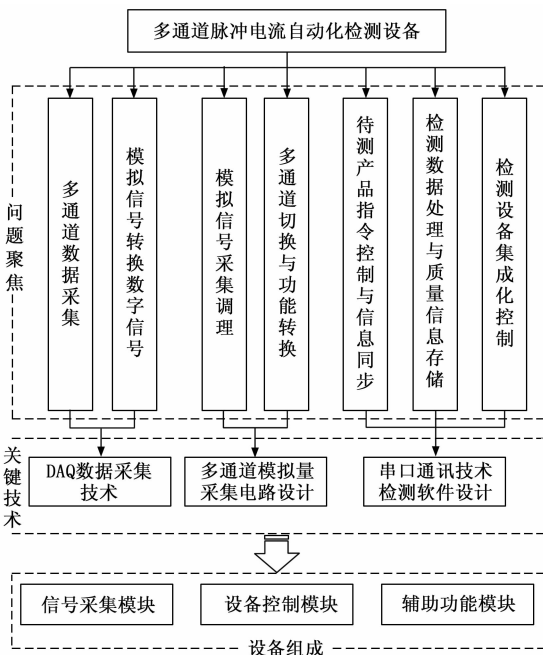


图 2 整体技术方案

该设备的控制模块与多通道点火控制装置 (待测产品) 和采集模块均建立交互关系, 使其收到控制模块的命令, 建立“同步时钟”, 结合各自功能执行, 实现多通道数据的有效采集。具体流程如下:

1) 控制模块发送“点火设置”指令给待测产品, 设置指令信息中含有输出脉冲电流的时序信息, 包括选择执行

综上，设备选用了 2 块 PCIE1805 型 PXIe 数据采集卡，它提供了 32 个通道的多路电压/电流测量，高达 1 MS/s 的采样率，16 位分辨率的模拟输入，可满足检测设备所需。

2.2 多通道模拟量采集电路设计

多通道脉冲电流值通过 AD 数据采集卡测量采样负载电阻两端的电压降，经过欧姆定律计算得出^[13]。但采样电阻两端的电压值比较小，为了隔离、规范到达 AD 数据采集卡的输入电压，将模拟信号放大调理至符合 AD 数据采集卡的电压输入范围，设计了多通道模拟量采集电路，其由模块转换电路、取样调理电路、通讯单元电路、点火测试通道采集开关和多路复用开关电路等组成。

模拟量采集电路接入端设计如图 3 所示。

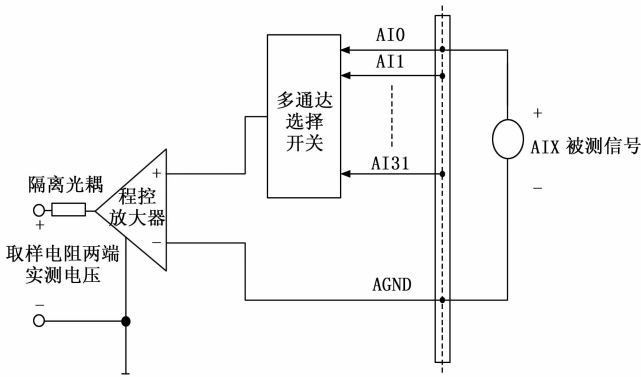


图 3 模拟量信号采集电路接入示意图

取样电路根据 AD 数据采集卡的采集电压范围和点火脉冲电流值选用 10 Ω 电阻作为取样电阻。每 8 组采样电路匹配 1 个 74HC238D 解码调理电路。模拟量调理电路的设计如图 4 所示。

多通道模拟量采集电路的通讯单元基于 RS-232 串口通

信技术研制，用以接收上位计算机的控制命令和反馈执行信息。

RS-232 串口通信，主要是通过 ASCII 码来进行传输的，使用地线来完成相应的接收与发送，串口通信端在一根线上进行发送，然后可以在另一根线上进行接收^[14]。计算机串口与设备（或仪器）之间进行点对点的通信，只需对发送数据、接收数据、地线等三条线进行简单连接来实现串口通信，其通讯距离一般在 10 m 之内，性能满足检测设备的集成化设计要求。

同时考虑到辅助功模块需要根据检测任务的不同而使用各种程控测试仪器，而计算机 RS-232 口的传输格式可以与单片机等许多芯片上的串口兼容，用非常少的连结便可完成串行通信^[15]，很多仪器都设计有 RS-232 串口。所以为上位计算机方便集成化控制整体设备，采集模块与控制模块的通信使用了 RS-232 串口的设计，基于德州仪器的 MAX3232 系列线路驱动器/接收器的电路设计见图 5 所示。

点火测试通道采集开关电路与多通道点火控制装置的控制模块保持一致，由上位计算机通过特定的 SDLC 协议通讯同步输入测试指令和时钟信息，由现场可编程逻辑门阵列（FPGA，field programmable gate array）控制（SPI，serial peripheral interface）串行外设接口结构的开关，让相应测试通道在点火周期内保持开启状态，测试通道的开启时间是点火工作时间的 2 倍，以保证检测数据的完整性。

相比传统的基于 AD+ 的多通道开关，这样的设计有着同步性好、数据传输速率较高的特点^[16]。原理框图如图 6。

当进行绝缘电阻测试时，模块转换电路将通道开关的控制权移交给基于 STM32F407 设计的多路复用开关电路，其控制单元可控制 120 组继电器开关按照命令依次打开测试通道，对点火通道的每一个针脚进行绝缘电阻检测。多

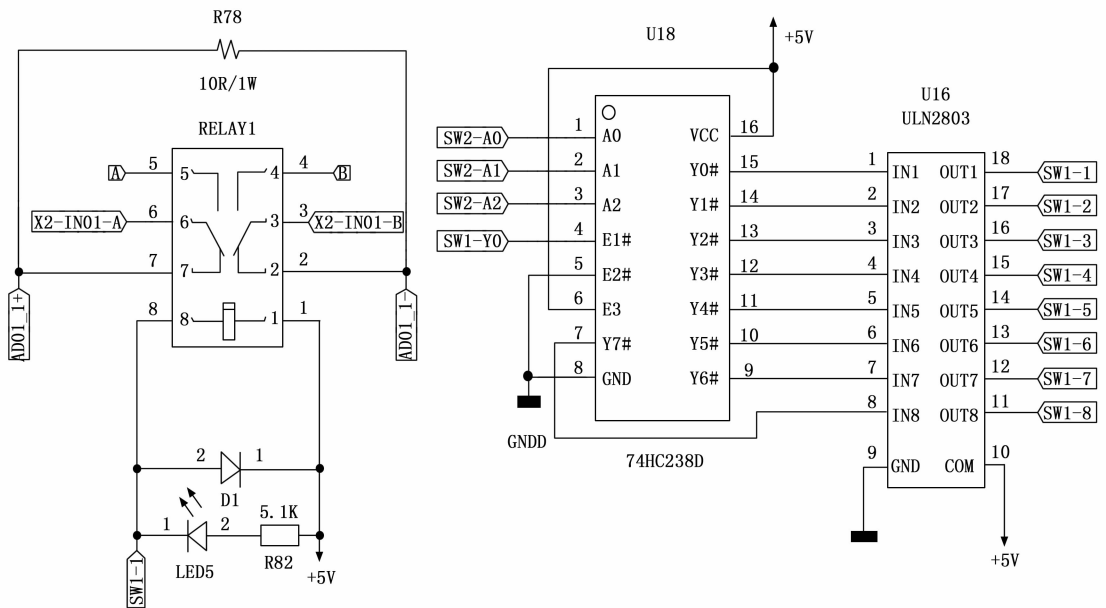


图 4 模拟量调理电路设计图

路复用开关的控制单元设计如图 7 所示。

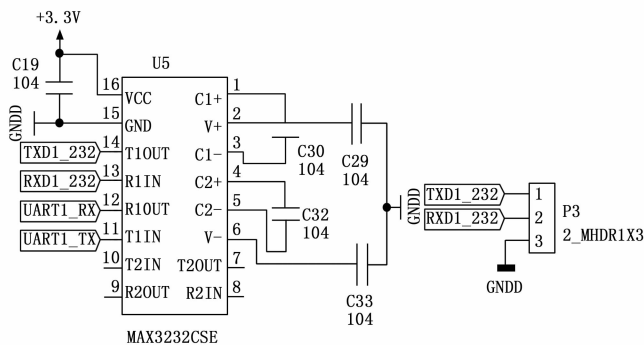


图 5 采集模块通讯单元设计图

2.3 控制模块和检测软件设计

控制模块基于串口通讯控制技术设计, 在检测设备中起到控制和调度作用, 主要由三大功能单元组成。

指令发生单元: 依照待测产品允许的通讯协议进行动作指令的发送, 完成对待测产品的点火参数设置, 并将指令信息传输给设备的上位计算机。

集成控制单元: 接收到指令发生单元的信息后, 控制多通道选择开关电路切换、接收来自数据处理单元的信息、与上位机或其他设备进行数据交互。

数据处理单元: 接收采集模块处理后的数字信号, 依照上位机程序对测量数据进行显示和判定。

结合 SDLC 的协议通讯^[17]和 PCIE1805 型 AD 数据采集卡的结构特点, 本设备控制模块采用了 IPC-610-L 型 window 系统上位计算机。

检测设备采用的数据采集技术是 LabVIEW 的核心技术之一, 基于 LabVIEW 进行软件编程具有良好的适配性。其

采用图形化的代码块和连线方式, 使得编程过程更加直观和易于理解, 而且可生成独立的可执行文件, 对 RS-232 串口通信有很好的支持^[18]。有利于在后续使用中进行模块化更改和优化。检测设备的软件功能界面如图 8 所示。

功能操作区: 可选择进行检测设备系统自检、对待测产品进行通讯自检、进行点火测试、绝缘电阻测试、回放之前的测试文件、生成测试报表等。

点火设置区: 设置点火的通道号、间隔时间、各通道点火时序等。

点火通道信息列表: 可勾选需要检测的通道编号、观察各通道测量出的最大电流值、点火是否成功等。

通讯信息记录栏: 显示检测设备与待测产品的指令通讯信息, 观察命令帧和应答帧是否正常。

点火脉冲电流曲线观测区: 选择某一通道后, 此处可观察采集到的点火脉冲电流波形。

电源设置区: 设置对待测产品的供电参数, 可设置电压/电流的安全限制值。

工作电流监测区: 实时显示产品的工作电流, 供检测人员对产品状态进行监测。

检测结果提示图标: 提示当前测试产品是否完成点火前自检及点火测试结果是否合格。不合格则图标变为红色, 中止测试。

待测产品如果还有其他对各通道的电气功能测试要求, 只需修改上位机的测试软件和接口, 将该功能的程控测试设备接入多路复用开关之后, 就能将各种功能测试设备与控制模块进行整合, 建立高效的一体化检测设备。

3 设备性能测试与应用实验

作为实际检验作业工序应用的检测设备, 需具备高效

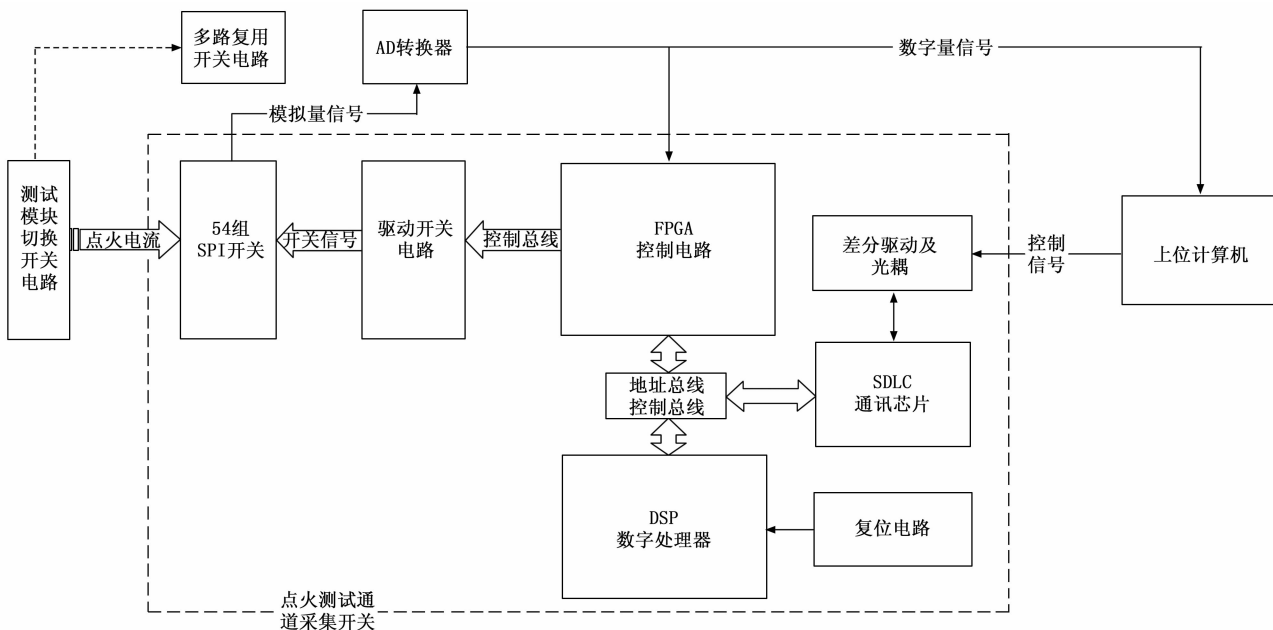


图 6 点火测试通道采集开关原理框图

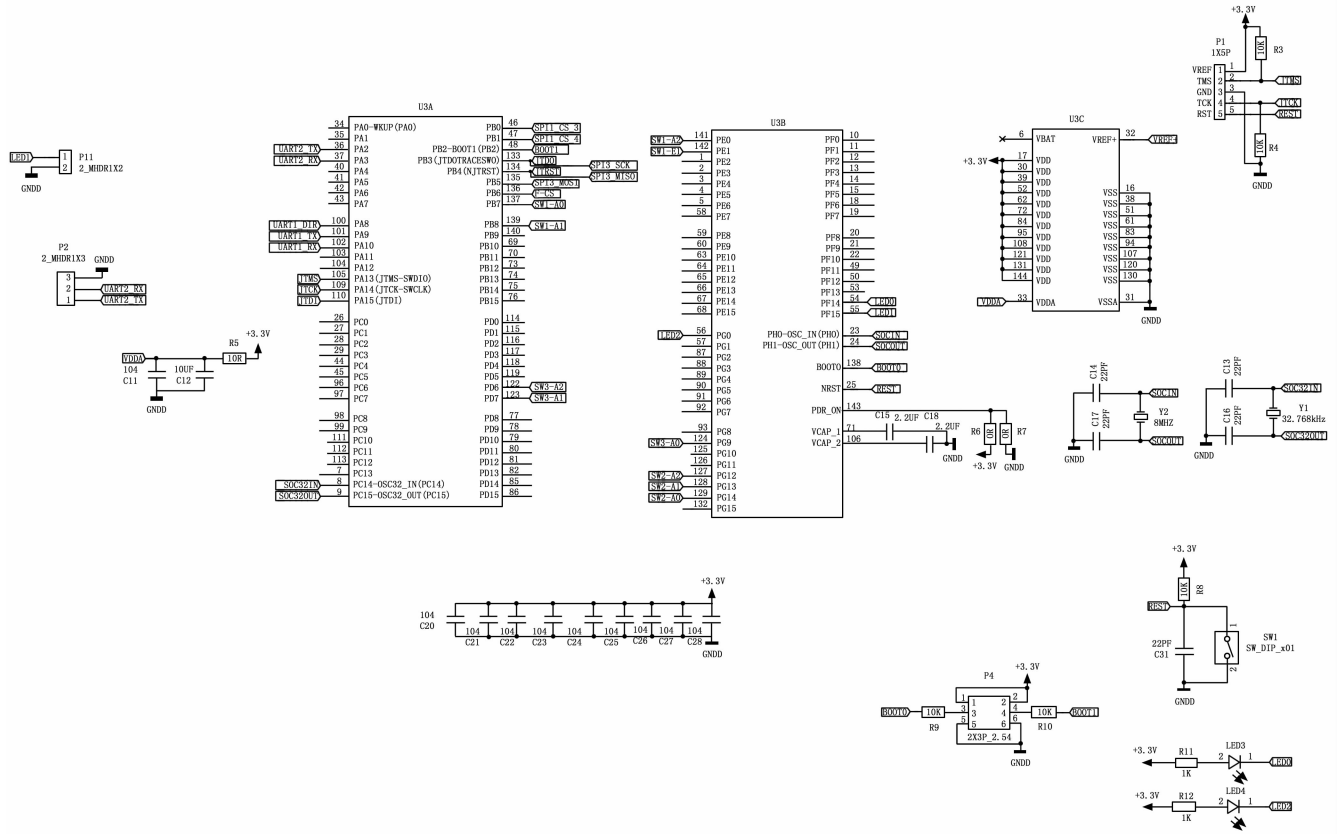


图 7 多路复用开关的控制单元设计图



图 8 软件功能界面图

率、高精度、低成本、低损耗、数据可追溯、便于改装升级等特点。

从检验检测作业的全要素管控出发,先测试设备的性能是否实现技术指标,再开展设备应用实验,评估该检测设备的使用效果。

3.1 检测设备性能测试与评估

检测设备主要技术指标如下:

- 1) 电压测量精度 $\pm 3\%$;
- 2) 绝缘测试输出电压精度 $\pm 1.5\%$,电阻值精度 $\pm 1.5\%$;
- 3) 点火脉冲电流检测采样率不低于 34 kHz;
- 4) 点火脉冲电流全周期最大偏差不大于 5%。

将检测设备的测试接口与经过计量的标准电源相接,设置电源电压值为 5 V,进行输出。使用 AD 数据采集卡的驱动程序进行模拟量输入功能测试^[19],设置采集量程为 $\pm 10\text{ V}$,数据轮询率为 1 000 Hz,采集各个通道的电压值,在开始采集 3 s 后,停止数据采集,对各通道的 8 组连续采集数值进行记录。结果显示 54 路通道电压值在 4.988 7~5.034 3 V 之间,经计算最大误差为 0.69%,表明 AD 数据采集卡和调理电路性能良好,模拟量信号采集精度符合技术指标要求。

将检测设备按照电子行业标准 SJ/T 11385-2008 绝缘电阻测试仪通用规范,由国防科技工业 6113 二级计量站进行了计量检定,对检测设备输出电压和测试电阻的检定结果如表 1 和表 2 所示。

表 1 输出电压检定结果

标称值/V	开路电压值/V	最大误差/%
10	10.01	0.1
50	49.92	0.016
100	99.83	0.017
250	249.8	0.08
500	499.1	0.18
700	749.5	0.067
1 000	998.4	0.016

表 2 绝缘电阻测试值检定结果(500 V)

标准电阻值/ Ω	实测电阻值/ Ω	最大误差/%
1 M	0.999 M	0.01
3 M	2.993 M	0.024
5 M	4.992 M	0.016
10 M	9.973 M	0.026
30 M	29.96 M	0.013
50 M	49.92 M	0.016
100 M	100.2 M	0.02
300 M	300.9 M	0.03
500 M	501.0 M	0.02
1 G	0.996 G	0.04

检定结果显示绝缘电阻测试功能输出测试电压最大误差低于 0.18%，在 500 V 电压下的电阻测量最大误差不超过 0.04%，检测设备绝缘电阻检测功能满足技术指标要求。

使用检测设备对多通道点火控制装置进行 54 路同步点火状态的脉冲电流采集。对测试数据表进行检查，各通道在 200 ms 的整个点火周期内，有效采样取点超过 100 000 个，每通道采样率不低于 50 kHz，达成设计指标，可以有效表征点火脉冲电流的时域特征。

全周期点火电流检测的偏差通过在相同的时间间隔内，使用标准示波器的测试结果数据集 $F_{(x)} = \{x_i, i = 1, 2, \dots, N_1\}$ 与使用多通道检测设备测试结果数据集 $G_{(y)} = \{y_i, i = 1, 2, \dots, N_2\}$ 进行分析对比计算得出。

先确定待测产品下达点火指令的“0 时刻”在两组采集数据的时间点，将从此刻起 200 ms 内的数据以 50 μ s 为间隔取点，分别计算两组采样值的均值检验统计量：

$$\bar{X} = \frac{1}{N_1} \sum_{i=1}^{N_1} x_i \quad (1)$$

$$\bar{Y} = \frac{1}{N_2} \sum_{i=1}^{N_2} y_i \quad (2)$$

$$\sigma_x^2 = \frac{1}{N_1 - 1} \sum_{i=1}^{N_1} (x_i - \bar{X})^2 \quad (3)$$

$$\sigma_y^2 = \frac{1}{N_2 - 1} \sum_{i=1}^{N_2} (y_i - \bar{Y})^2 \quad (4)$$

\bar{X} 为示波器采集均值； \bar{Y} 为检测设备检测均值； x_i 为示波器采集值； y_i 为检测设备检测值； σ_x^2 为示波器采集值的总体方差； σ_y^2 为检测设备检测值的总体方差。

当其属于同一种方差分布，再采用成对数据 t 检验法^[20]可以计算均值检验统计量， T 是具有 $(N_1 + N_2 - 2)$ 个自由度的 t 分布：

$$T = \frac{(\bar{X} - \bar{Y}) \sqrt{N_1 + N_2 - 2}}{\sqrt{[(N_1 - 1)\sigma_x^2 + (N_2 - 1)\sigma_y^2] \left(\frac{1}{N_1} + \frac{1}{N_2}\right)}} \quad (5)$$

如果检验统计量 $T < t_{1-\alpha/2} = t_{\alpha/2}$ ，则可以接受假设，表明

在显著水平 α 下仿真数据与试验数据的均值无显著性差异（其中 $t_{\alpha/2}$ 可以根据可信度 α 查 t 分布表得到），证明检测设备和示波器的测量数据具有一致性，可进行偏差计算，具体评价方法如下：

单组数据偏差为：

$$\Delta I_i = \frac{|I_n - I_{ci}|}{I_n} \times 100\% \quad (6)$$

ΔI_i 为 i 时刻单组数据偏差； I_n 为示波器 i 时刻单点采集值； I_{ci} 为检测设备 i 时刻单点检测值。

将所有取点的单组数据偏差代入，计算单次点火的整体偏差 s ：

$$s = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta I_i \quad (7)$$

在 54 路通道中抽选 10 组，将待测产品同一点火通道定为观测对象，依次下达同步点火指令和间隔为 100 ms 的逐路点火指令，分别使用示波器直接采集和使用多通道脉自动化检测设备进行脉冲电流的检测。测试结果显示其全部符合正态分布，成对 t 检验无明显差异，时域点火电流值明显拟合。图 9 为 1 号通道同步点火的时域曲线对比，经过计算，偏差均值约为 1.43%。

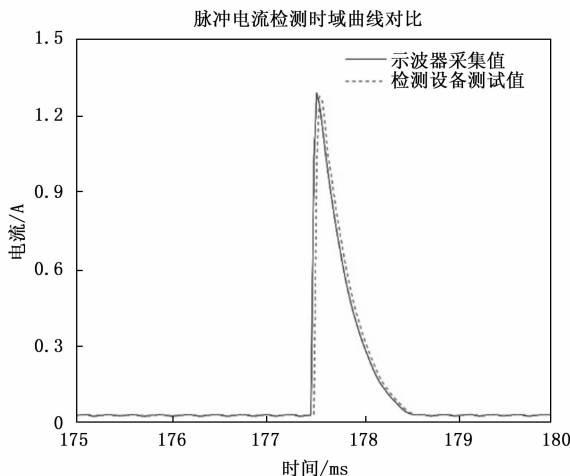


图 9 检测数据对比

10 组测试结果的偏差均值见表 3 所示，整体偏差均值为 0.94%~1.77%，符合产品检测最大偏差不大于 5% 的要求，满足设计指标要求。

3.2 检测设备应用验证与评估

设备性能测试与评估合格后，开展应用验证和评估，主要内容包括检测效率提升有效性实验和设备作业工艺验证。

多通道脉冲电流检测设备的核心任务是提高对多通道点火控制装置的综合检测效率。

在产品总装测试厂房安装检测设备，由同一组检测人员依次使用多通道脉冲电流检测设备和原有测试工装仪器及其方法对同一个产品，按照产品规范的要求测试项目进

行检测作业，记录两种模式的作业用时。实验从测试开始前的准备工作开始，到完成检测记录结束，各项统计用时对比如表 4 所示。

表 3 点火脉冲电流测量偏差均值

测试通道号	偏差均值(同步点火)	偏差均值(逐路点火)
1	1.43%	1.49%
2	1.51%	1.39%
3	1.39%	1.42%
6	1.50%	1.54%
12	1.24%	1.37%
18	1.41%	1.41%
24	1.45%	1.47%
36	1.39%	1.50%
52	1.77%	0.94%
53	1.43%	1.49%
54	1.51%	1.19%

表 4 效率提升有效性实验

应用前			应用后		
步骤	操作	用时	步骤	操作	用时
准备	连接测试工装和仪器,人工逐一 对仪器状态检查 确认	10 min	准备	打开上位计算机, 点击检测设备自 检	2 min
插接	在产品端进行 三次插接更换	6 min	插接	在产品端进行 一次插接	2 min
参数 设置	依次操作供电 设备为产品供电、 设置遥测工装对 产品的命令、完 成采集设备参 数调节	5 min	参数 设置	在上位计算机中 按固化程序完成 对产品的供电和 命令设置,勾选 测试参数	0.5 min
点火前 状态 测试	人工注意对产品 各通道的绝缘电 阻进行测试	10 min	一键化 检测	点击功能检测按 键,设备自动完 成绝缘电阻测 试、多通道点火 电流逐路采集、 判定检测结果, 期间状态异常 自动报警	5 min
点火脉 冲电 流 检测	人工观察点火负 载指示灯,记录 点火时序	3 min			
判定检 测结果	人工判断检 测结果	3 min			
记录检 测数据/ 出具检 测报告	人工记录各项检 测的数据和产品 状态信息,填 写检测报告	5 min	记录检 测数据/ 出具检 测报告	数据自动存储为 excel文件,点击 “生成报表”,设 备出具检测报告	0.5 min

实验证明单件产品的检测用时由 42 分钟缩短至 10 分钟,大幅提高了检测效率。

工艺验证就是企业即将批生产的新产品在投产前需通过小批试制来考核工艺方案,检查工艺文件和设备工装的合理性、适应性以保证批生产时产品品质稳定、成本低廉并符合安全和环境保护的要求^[21]。

根据检测设备功能和指标的达成情况,编写并经评审通过了工艺验证方案和工艺作业规程,将检测设备进行了实际作业部署,在 30 天内对 2 批次产品完成了检测。

在工艺验证期间,检测设备未出现故障情况,在满足作业进度的情况下,该工位人员由 2 人减少为 1 人。随机进行了 10 次检测结果的重复性和再现性验证,结果显示重复测试数据与初次测试数据偏差在 5% 以内,满足该产品检测的相关要求。

在工艺验证期结束后,召开了工艺验证评估会,通过了工艺验证分析评估报告,确定其在以下 6 个方面有良好的应用效果。

1) 提高生产效率:通过自动化设备的应用,实现更高的生产效率,单件产品的检测时间缩短了 70%,连续作业的综合检测效率提高 200%;

2) 降低成本:从逐一通道测试变为一键自动化测试,减少操作人员一名,有效降低了人力成本。

3) 改善检测质量:实现了对于点火脉冲电流的数字化表征,形成了全点火周期的检测数据,数据偏差低于 2%,数据自动储存,提高了产品质量的可追溯性。

4) 提高作业可靠性:实现了各设备仪器的集成化整合,在相同作业工期内,检测设备故障的次数有效降低,降低了产品进度延期的风险,

5) 增强安全性:增加了对产品工作电流的监测功能,减少了测试过程中对产品的插拔次数,减少事故风险和对产品的伤害。

6) 适应性和灵活性:该检测方法及设备具备适应变化需求和灵活性,可以根据产品要求的不同,在同一设备架构下灵活更改软硬件设置,应对不同型号和规模的任务。

4 结束语

不论反导武器、空空导弹、飞船、卫星还是无人机助推器,将多个点火器或动力装置集中于一个电子控制装置的设计越来越广泛。本研究基于待测产品与检测设备的同步控制和信息交互思想,结合模拟量数据采集测量、SDLC 协议通讯、一体化串口控制、LabVIEW 软件开发等技术,成功研制出一种自动化多通道脉冲电流检测设备,解决了传统测试设备中的效率低、成本高的问题,实现了质量原始数据的可追溯性。同时测试实验和工艺验证表明该设备具有良好的性能与应用性,适合大批量多通道点火控制装置的检验作业。

随着产能提高,后续还将配合产线实现测试线缆自动化插接集成与全检点一键化检测。

相关研究结果可推广于弹上安全机构、伺服控制电机、多通道阀门等内部有多通道工作时序电信号激发机制产品

的检验检测设备的研制。

参考文献:

- [1] 王晓东, 李 芸, 谢晓瑛. 具有侧向脉冲推力的动能拦截弹姿控发动机组点火研究 [J]. 现代防御技术, 2007 (6): 41 - 44, 50.
 - [2] 朱 京. 姿控发动机点火逻辑研究 [J]. 现代防御技术, 2007 (3): 42 - 45.
 - [3] 严 嵘, 林佳伟, 季 业, 等. 基于磁感原理的非接触多通道电流测试仪的设计与验证 [J]. 电子测量技术, 2021, 44 (16): 6
 - [4] 徐 杰, 孙向阳, 于增辉, 等. 一种多通道微弱电流信号检测电路的设计与实现 [J]. 电子制作, 2021 (5): 9 - 11.
 - [5] 解佳鹏. 多通道数据采集系统的设计 [J]. 电子世界, 2021 (13): 142 - 143.
 - [6] 王 菁, 周毅力, 白泽霖. 多通道电磁阀电流检测系统设计 [J]. 自动化仪表, 2024, 45 (7): 85 - 88.
 - [7] 李 瑞, 杨启帆, 雷文龙, 等. 多通道模拟量数据采集系统设计 [J]. 长江信息通信, 2022, 35 (3): 132 - 134.
 - [8] 秦源淋. 示波器触发原理和应用 [J]. 计量与测试技术, 2012, 39 (2): 36 - 38.
 - [9] 王 琳, 商 周, 王学伟. 数据采集系统的发展与应用 [J]. 电测与仪表, 2004, 41 (8): 5.
 - [10] 冯 雪. 数据采集卡性能指标与应用 [J]. 工业控制计算机, 2008 (5): 10 - 11.
- 上接第 108 页)
- [15] LI M L, YANG M, YU Y X, et al. Short-term wind power forecast based on continuous conditional random field [J]. Ieee Transactions on Power Systems, 2024, 39 (1): 2185 - 2197.
 - [16] WANG C, HE Y, ZHANG H L, et al. Wind power forecasting based on manifold learning and a double-layer SWLSTM model [J]. Energy, 2024, 290: 130076.
 - [17] 何建强, 张玉萍, 滕志军. 基于 K-means 和改进 KNN 算法的风电功率短期预测系统 [J]. 计算机测量与控制, 2022, 30 (5): 156 - 162.
 - [18] YANG F, ZENG Y, QIAN J, et al. Parameter identification of doubly-fed induction wind turbine based on the ISIAGWO algorithm [J]. Energies, 2023, 16 (3): 1355.
 - [19] 丁 明, 钟林恒, 韩平平, 等. 基于遗传算法的风电变流器控制环节参数辨识实用方法 [J]. 电气应用, 2016, 35 (11): 46 - 52.
 - [20] 李 辉, 吴 优, 谢翔杰, 等. 基于改进 PSO 的双馈风电机组传动链参数辨识 [J]. 太阳能学报, 2021, 42 (12): 134 - 142.
 - [21] DHAR M K, THASFIQUZZAMAN M, DHAR R K, et al. Study on pitch angle control of a variable speed wind turbine using different control strategies [C] //IEEE International Conference on Power, Control, Signals and Instrumentation Engineering. 2017: 285 - 290.
 - [22] OWHADI H. Bayesian numerical homogenization [J]. ArXiv: Numerical Analysis, 2015, 13 (3): 812 - 828.
 - [23] RAISSI M, PERDIKARIS P, KARNIADAKIS G E. Physics [11] SHANNON E C. A mathematical theory of communication [J]. ACM SIGMOBILE Mobile Computing and Communications Review, 2001, 5 (1): 3 - 55.
 - [12] 苏景贤. SIZE3 直流接触器性能测试系统的研发 [D]. 江门: 五邑大学, 2012.
 - [13] 伍良生, 王新华. Windows 下的数据采集和 A/D 转换 [J]. 计算机工程与设计, 2002 (11): 46 - 47.
 - [14] 洪成泽, 郑 颖. RS-232 串口通信在 PC 机与单片机通信中的应用 [J]. 南方农机, 2019, 50 (4): 175.
 - [15] 朱常青. 用 RS-232 串口实现数据的远距离传输 [J]. 石油仪器, 2003 (1): 15 - 17.
 - [16] 顾 颀, 胡生亮, 李朝旭. 基于 SPI 接口 ADC 和 FPGA 的并行多通道同步采样系统设计 [J]. 舰船电子工程, 2011, 31 (12): 146 - 149.
 - [17] 田拥军, 赵光强, 曾健平. 基于 RS485 总线技术的 PC 机与单片机多机通讯设计 [J]. 湖南工程学院学报 (自然科学版), 2007 (2): 19 - 23.
 - [18] 李 涸. 图形编程软件 LabVIEW 在电声仪器测量中的应用 (一) [J]. 电声技术, 1997 (1): 27 - 30.
 - [19] 张玉涛, 邵宗战, 李建一, 等. NI 数据采集卡功能测试 [J]. 计量技术, 2007 (8): 41 - 43.
 - [20] 菲诗松, 吕晓玲. 数理统计学 [M]. 北京: 中国人民大学出版社, 2016.
 - [21] 庄明惠. 工艺验证及其规范管理 [J]. 汽车工艺与材料, 2007 (5): 35 - 37.
 - [22] RAISSI M, PERDIKARIS P, KARNIADAKIS G E. Physics-informed deep learning (Part I): data-driven solutions of nonlinear partial differential equations [J]. 2017, 10561.
 - [24] RAISSI M, PERDIKARIS P, KARNIADAKIS G E. Physics-informed neural networks: A deep learning framework for solving forward and inverse problems involving nonlinear partial differential equations [J]. Journal of Computational Physics, 2019, 378: 686 - 707.
 - [25] WILLARD J, JIA X, XU S, et al. Integrating scientific knowledge with machine learning for engineering and environmental systems [J]. ACM Computing Surveys, 2023, 55 (4): 1 - 37.
 - [26] BAI S, KOLTER J Z, KOLTUN V. An empirical evaluation of generic convolutional and recurrent networks for sequence modeling [J]. Arxiv Preprint, 2018: 1803. 01271.
 - [27] SALIMANS T, KINGMA DP. Weight normalization: A simple reparameterization to accelerate training of deep neural networks [J]. Advances in Neural Information Processing Systems, 2016, 29.
 - [28] MEKA R, ALAEDDINI A, BHAGANAGAR K. A robust deep learning framework for short-term wind power forecast of a full-scale wind farm using atmospheric variables [J]. Energy, 2021, 221: 119759.
 - [29] HU C J, ZHAO Y, JIANG H, et al. Prediction of ultra-short-term wind power based on CEEMDAN-LST-TCN [J]. Energy Reports, 2022, 8: 483 - 92.