

BOTDA 测试光路自动切换保护系统设计

王 升¹, 孙廷玺¹, 王旭峰^{2*}, 赵尊慧¹, 张真毅²

(1. 广东电网有限责任公司 珠海供电局, 广东 珠海 519000; 2. 无锡联河光子技术有限公司, 江苏 无锡 214000)

摘要:针对布里渊光时域分析仪(BOTDA)的测试光路在长期使用中易发生故障进而导致 BOTDA 测试中断的问题,设计了一种基于光时域反射(OTDR)原理的光路自动切换保护系统。系统以 K60 控制器为控制核心,应用 FLEXBUS 接口挂载 SRAM、FPGA 和 W5300,集成 K60+FPGA 架构的 OTDR 模块,通过光开关实现光路切换,监测各个光路的故障情况,能够在 BOTDA 测试光路出现故障时切换光路并发送短信报警;介绍了系统原理、主要硬件模块、以太网引导升级和光路自动切换保护软件流程。实验结果表明:OTDR 动态范围达到 35 dB 以上,满足 BOTDA 测试光路的监测要求。

关键词:布里渊光时域分析仪;自动切换;光时域反射;K60;控制器

中图分类号:TN929.11 文献标识码:A 文章编号:1002-5561(2020)03-0058-05

DOI:10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2020.03.014

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Design of automatic switching protection system for BOTDA test optical path

WANG Sheng¹, SUN Tingxi¹, WANG Xufeng^{2*}, ZHAO Zunhui¹, ZHANG Zhenyi²

(1. Guangdong Power Grid Company, Zhuhai Power Supply Bureau, Zhuhai Guangdong 519000, China;

2. Allian Stream Photonics Technology Co., Ltd., Wuxi Jiangsu 214000, China)

Abstract: In view of the problem that the testing optical path of the Brillouin optical time domain analyzer (BOTDA) is prone to failure in long-term use, which leads to the interruption of BOTDA testing, an optical path automatic switching protection system based on the principle of optical time domain reflectometer (OTDR) is designed. The system takes K60 controller as the control core, uses the FLEXBUS interface to mount SRAM, FPGA and W5300, integrates the OTDR module of K60+FPGA architecture, realizes the optical path switching through the optical switch, monitors the failure of each optical path, and can switch the optical path and send the short message alarm when the optical path fails in the BOTDA test; introduces the system principle, main hardware modules, ethernet guidance and upgrading and optical path self dynamic switch protection software process. The experimental results show that the OTDR dynamic range is more than 35 dB, which meets the monitoring requirements of BOTDA test optical path.

Key words: Brillouin optical time domain analyzer; automatic switching; optical time domain reflection; K60; controller

0 引言

布里渊光时域分析仪(BOTDA)从探测光纤的两端分别注入脉冲泵浦光和连续探测光,通过在脉冲泵浦光注入端检测受激布里渊散射信号方式来获取光

收稿日期:2019-08-28。

基金项目:广东电网有限责任公司科技项目(GDKJXM20172837,030400KK52170062)资助。

作者简介:王升(1985-),男,江苏泰州,本科,高级工程师。主要研究方向为输变电设备在线监测技术及电力通信技术。海底电缆运行状态检测及故障定位技术研究项目组成员,长期从事从布式光纤测温系统的安装维护验收工作。参与海底电缆监测技术研究及应用-课题2。

*通信作者:王旭峰(E-mail: 61946312@qq.com)。



纤沿线的温度及应变的分布信息,广泛应用于海底电缆、油气管道和铁路等长距离大型工程的健康诊断、故障监测及定位等领域^[1]。由于探测光缆距离很长,敷设环境较为复杂,受到外部因素影响较大,极易发生故障;且光缆本身也会不断老化,引起光信号传输链路的衰减、损耗的增大,进而导致 BOTDA 测试量程缩短。若 BOTDA 监测无法正常进行,大型工程的潜在风险就不能及时发现,安全难以得到有效保障。为此,本文设计一种基于光时域反射(OTDR)原理的光路自动切换保护系统,对 BOTDA 测试光路实施监测,在发现测试光路故障时能够实行切换保护,保障 BOTDA 监测的连续性。

1 系统原理

光路切换保护系统通常包含一个有业务信号的主用光路和多个没有业务信号的备用光路,当主用光路发生故障时,能够将业务链路快速地切换到备用光路上^[2]。系统整体方案如图 1 所示。

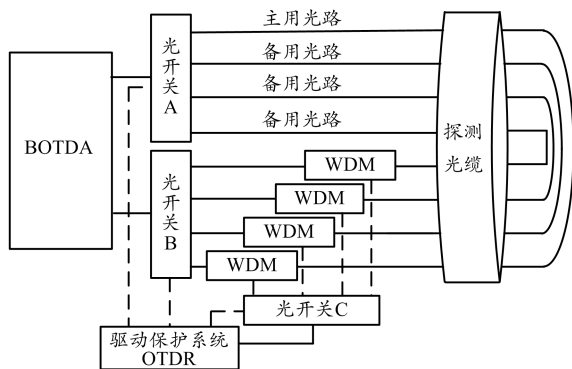


图 1 BOTDA 光路切换保护系统方案

图 1 中,OTDR 和 BOTDA 的激光器的工作波长分别是 1625 nm 和 1550 nm,采用高隔离度的波分复用器(WDM)实现这 2 种光波的耦合与分离,进而保证各自测量互不影响。BOTDA 测试时会占用 1 条光路,而其它 3 条光路作为备用光路。系统驱动光开关 C 逐一连通各个光路,并启动内部的 OTDR 测试流程,分析各个光路的损耗和故障状态。当发现 BOTDA 测试光路出现异常时,立即控制光开关 A 和 B,将 BOTDA 的测试光路切换到其它备用光路上。

2 硬件设计

系统以恩智浦 MK60FX512VLQ12 (简称 K60)为主控制器,该控制器主频高达 120 MHz,内部集成了 SDHC、SPI、FLEXBUS 和 FLEXNVM 等多种模块,软件参考资源丰富,非常适合本设计应用^[3]。控制器内置的 FLEXNVM 是一种非易失性 FLASH 内存,可用于存储编程代码、数据以及 EEPROM 的备份数据。由于控制器内部集成了 SDHC 控制器并且控制器官方免费提供了 FAT32 文件系统,因此采用容量 16G 的 SD 卡来存储监测数据,可以极大地降低开发难度和节约数据存储成本。在系统的 OTDR 模块中,K60 是 OTDR 的后端,负责 OTDR 数据处理和远程通信;而现场可编程门阵列(FPGA)是 OTDR 前端,负责 OTDR 前端信号采样和逻辑控制,系统硬件结构如图 2 所示。

2.1 FLEXBUS 总线接口

FLEXBUS 是一种新型控制总线接口,可直接连接外部 RAM、FLASH 及 FPGA 或其它简单的目标(从

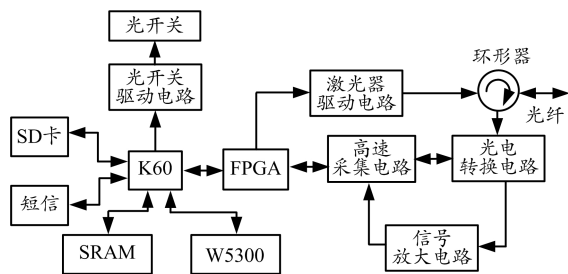


图 2 系统硬件结构图

机)器件,具有较快的操作速度和很高的灵活性,可以简化外围硬件电路和节约成本^[4]。外扩的 SRAM 采用 1M×8 位低功耗和低电压全 CMOS 静态 RAM EM6808 FV AU;FPGA 采用 Altera 公司的 CYCLONE IV 系列器件 EP4CE40115,将 FLEXBUS 复用总线的低 21 位(FB_A[0:19])作为地址总线,高 8 位(FB_A[24:31])作为数据总线,可实现 1 MB 映射空间的读写。另外,FLEXBUS 上也挂载 W5300 以太网接口芯片,该芯片集成了 TCP/IP 协议、10/100M 以太网 MAC 和 PHY,并且速度可达到 50 Mb/s,可通过简单配置实现高速以太网通信功能,是一种低成本的高速以太网方案^[5]。考虑到 W5300 只需占用 1 kB 映射空间,故 FLEXBUS 复用总线的选取低 10 位(FB_A[0:9])作为地址总线,高 8 位(FB_A[24:31])作为数据总线。FLEXBUS 接口连接如图 3 所示。

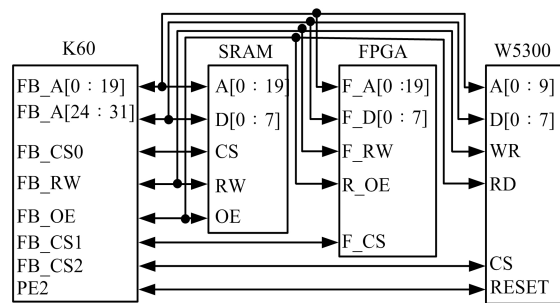


图 3 FLEXBUS 接口连接图

SRAM、FPGA 和 W5300 的片选信号分别连接 K60 的片选信号 FB_CS0、FB_CS1 和 FB_CS2,在控制器中的映射地址空间分别为 0x60000000~0x600FFFFF、0x70000000~0x700FFFFF 和 0x80000000~0x800003FF。FPGA 的映射地址空间中,0x70000000~0x700FFEFF 用于 OTDR 数据缓冲,其它作为 FPGA 的寄存器区,其映射地址空间和功能如表 1 所示。

2.2 OTDR 模块

OTDR 前端电路由光路器件、激光器驱动电路、光电转换电路、信号放大电路和高速采集电路组成。OTDR 的工作流程为:系统接收到待测量的命令后,由

表 1 映射地址空间与功能对应表

映射地址空间	功能
0x700FFE00~0x700FFE03	读取 FPGA 版本号
0x700FFE04~0x70800007	设置采样次数
0x700FFE08~0x700FFE0B	设置脉冲宽度
0x700FFE0C~0x700FFE0F	设置脉冲间隔
0x700FFE10~0x700FFE13	设置采样点数
0x700FFE14~0x700FFE17	读取 FPGA 状态
0x700FFE18~0x700FFE1B	FPGA 控制

FPGA 产生测量脉冲信号,通过脉冲驱动电路控制激光器发出脉冲激光。光信号通过光环形器进入被测光纤,在信号传播中会发生瑞利散射和菲涅尔反射以及正常的光纤传输损耗,后向散射的信号会回到光环形器,并由雪崩二极管(APD)接收后转换为微弱电信号,先后经多级放大电路放大、模/数转换器(ADC)采集和 FPGA 数据处理后,送入 K60 控制器进一步信号处理分析,最终评估出整个光路的损耗状况。这里比较关键的电路有激光器驱动电路、信号放大电路和高速采集电路。

2.2.1 激光器驱动电路

OTDR 探测距离依赖于激光器的脉冲宽度,脉冲宽度越大携带光能量越大,探测距离就会越长。激光器驱动电路要求输出功率大、稳定度高、响应度好、激光脉冲频率可调和激光脉冲宽度可调。为此,本文设计的激光器选用欧胜德的 1625 nm FP 激光器,激光器驱动采用 IC-HK 激光器驱动芯片,在 300 mA 驱动电流下脉冲峰值功率可达 60 mW。此外,激光器脉冲频率和宽度由 FPGA 产生,FPGA 工作时钟在 100 MHz,可产生 10 ns~20 μ s 的脉冲宽度,激光器驱动电路如图 4 所示。

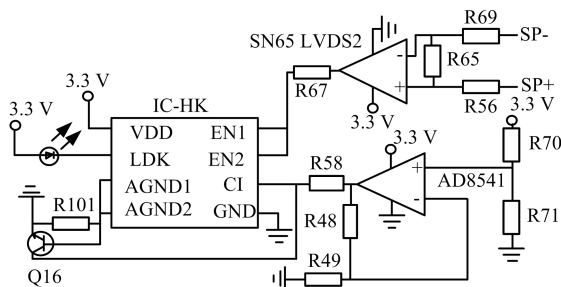


图 4 激光器驱动电路

图 4 中,低压差分时钟信号 SP+和 SP-由 FPGA 产生,经低噪声、高速的 SN65LVDS2 信号转换器转换为单端信号,同时控制 IC-HK 使能脚 EN1 和 EN2。CI 控制脚的偏置电压由运放 AD8541 提供,偏置电压大小可通过修改 R70 和 R71 阻值来调整。又因 EN1 和

EN2 直连,最终的 LDK 输出的驱动电流是 2 个通道电流之和。此外,在 AGND1、AGND2 和 CI 之间用三极管 Q16 来限制 IC-HK 电流,以防激光器过流而烧坏。

2.2.2 信号放大电路

经过 APD 转换后的电流信号是非常微弱的,极易受噪声影响,甚至被噪声淹没,不能直接提供给 ADC 采集,需进行信号放大。为此,本文设计了两级信号放大电路,如图 5 所示。

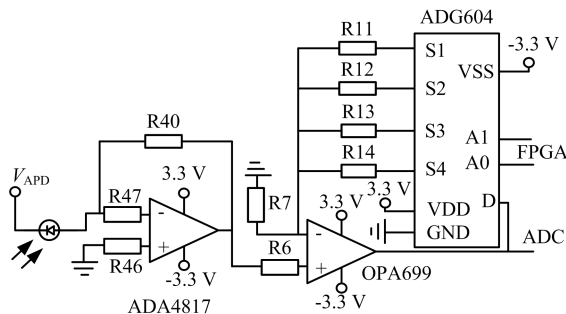


图 5 两级信号放大电路

图 5 中, V_{APD} 是由低噪声的升压芯片 LT3482 升压输出 50 V 低噪声低纹波的电压,并且 APD 采用反向偏压工作模式,可以增大信号带宽和提高测量分辨率。光信号经 APD 转换为电流信号后,第一级电路采用 I-V 高速转换电路,输入级选用的是极低电压噪声,低偏置电流(达到 PA 级)和极高电压转换速率的 ADI 公司的 ADA4817 运算放大器进行信号的放大和转换;第二级采用低噪声、高速和精密运放 OPA699 放大器进行跨阻放大,通过 FPGA 控制 ADG604 模拟开关的 A0 和 A1 脚选择不同的放大电阻以获得不同的放大倍数,通道 $S_n(n=1,2,3,4)$ 对应的放大倍数是 $R1n/R7+1$ 。ADG604 具有导体电阻小、较低功耗和开关速度小于 150 ns(双电源 ± 3.3 V 供电)等特点。

2.2.3 高速采集电路

光在光纤中传播速度非常快,这就要求采集系统满足较高的速度和分辨率,才能采集到完整的信号,并准确地反映光纤链路的真实情况。因此,选用 14 位采样精度和 80 MHz 采样率的 AD9649,其内部有高性能采样保持放大器和片内基准电压源。经过信号放大电路的信号,通过高速、低噪声的放大器 AD8039 将信号从单端信号转换低压差分信号,再送入 ADC 转换,这样可以较好地抑制共模噪声。FPGA 输出的差分时钟信号作为 AD9649 的采样时钟,同时输出工作时序信号进行模/数转换和数据读取。由于高采样率的 ADC 芯片价格较高,可通过等效采样技术提高 ADC

的量化精度,从而提高 OTDR 的空间分辨率^[6]。另外,采用累加平均可以很好地消除 OTDR 本身的电路系统噪声,提高信噪比,进而提高 OTDR 的动态范围。

2.3 光开关模块

设计中单个光开关需要用到 4 个通道,因此采用中国电子科技集团公司第三十四研究所的 1×4 结构的机械光开关模块。该模块具有以下优点:插入损耗≤1.0 dB;切换时间≤12 ms;寿命≥3×10⁷ 次。光开关的通道选择是通过 5 V 控制电平的驱动实现的,因此,引入 MC1413 电平转换芯片使得控制器引脚输出电平由 3.3 V 转换至 5 V。

2.4 短信模块

随着通信行业发展,4G 基站的不断普及,而 2G 基站正在不断减少和关闭,因此,选用 Gport-G43 4G 作为短信模块,该模块支持移动、联通 2G/3G/4G,电信 4G 网络,采用 5 V 供电,内置丰富的网络协议,支持传统 TTL 串口接口,可以直接挂载到 K60 串口上使用。在系统发现报警时,可将报警内容打包成 AT 指令文本,以短信的方式通过 4G 模块发送到指定用户手机上。

3 软件设计

本文采用 IAR Embedded Workbench for ARM 6.30 作为系统软件开发平台。应用软件在 MQX 嵌入式操作系统代码基础上开发实现,通过基于 TCP 协议的 SOCKET 接口与 BOTDA 或者上级监测系统通过网络通信,可实时发送监测数据。此外,系统一般安装在无人值守的机房,因此需要配备以太网远程升级功能。

3.1 以太网引导升级

由于 W5300 自带 TCP/IP 协议栈,为引导程序设计节省了不少程序空间,同时考虑引导程序相对简单,移植 FLASH 驱动程序和简单地调用 W5300 接口即可满足引导升级要求,因此引导程序开发选用裸机方式。

3.1.1 升级配置文件

K60 拥有 512 kB 的 FLASH 和 512 kB 的 FLEX-NVM, FLEXNVM 用来存储临时的升级程序和重要的系统参数, K60 片内存储区域分配如表 2 所示。

本文分别修改引导程序和应用程序的 ICF 文件。

①引导程序 FLASH_ICF 修改如下:

```
define symbol __ICFEDIT_intvec_start__=0x00000000; //中断向量表
```

表 2 存储区域分配表

存储器	地址范围	大小	功能
FLASH	0x00000000~0x000003FF	1 kB	引导中断向量
	0x00000400~0x0000BFFF	47 kB	引导程序区
	0x0000C000~0x0000C3FF	1 kB	应用中断向量
	0x0000C400~0x0007FFFF	463 kB	应用程序区
FLEXNVM	0x10000000~0x1000BFFF	48 kB	系统参数区
	0x1000C000~0x1007FFFF	464 kB	升级程序区

```
define symbol __ICFEDIT_region_ROM_start__=0x00000400; //起始地址
```

```
define symbol __ICFEDIT_region_ROM_end__=0x0000BFFF; //结束地址
```

②应用程序 FLASH_ICF 修改如下:

```
define symbol __ICFEDIT_intvec_start__=0x0000C000; //中断向量表
```

```
define symbol __ICFEDIT_region_ROM_start__=0x0000C000C400; //起始地址
```

```
define symbol __ICFEDIT_region_ROM_end__=0x000007FFFF; //结束地址
```

3.1.2 引导升级流程

系统引导升级流程如图 6 所示。系统应用程序和引导程序公用一套以

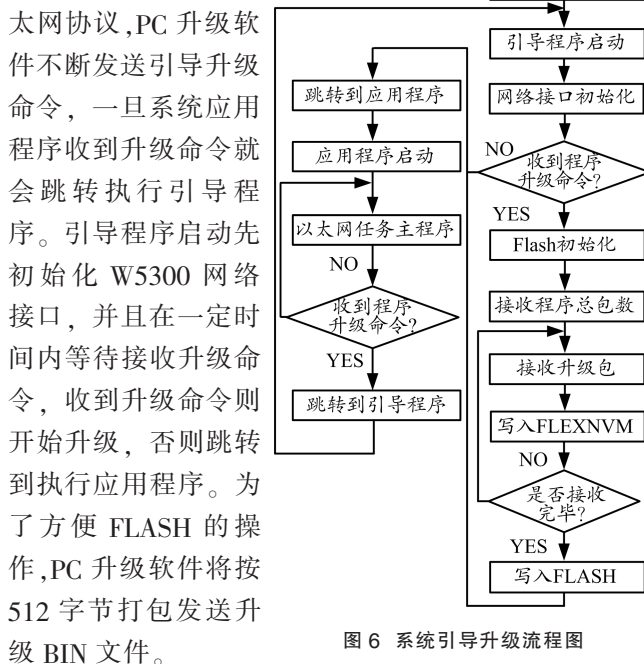


图 6 系统引导升级流程图

3.2 光路自动切换保护流程

系统根据 BOTDA 或者上级监测系统配置的测量参数周期性地启动光路自动切换保护软件流程,具体流程如图 7 所示。

4 实验分析

4.1 测量性能实验

在 VisualStudio2008 编写系统测试软件中,选取一条由 5 卷长度分别为 12.883 km、4.900 km、27.978 km、29.275 km 和 41.982 km 的单模光纤组成的总长为 117 km 的光路,采用脉宽 20 μ s 和平均时间 3 min 进行测试,得到的曲线如图 8 所示。

图 8 中,┐为起始事件,└为反射事件,~表示衰减事件,┘表示结束事件。测试识别出 6 个事件,位置依次为 0 km、12.875 km、17.771 km、45.753 km、75.022 km 和 116.997 km,可以得到对应 5 卷光纤的长度分别为 12.875 km、4.896 km、27.982 km、29.269 km 和 41.975 km,与实际长度比较,定位相对误差均小于 10 m,证明测试结果准确。同时,测得动态范围实际超过 35 dB,监测 117 km 时还有较大余量,而 BOTDA 实际项目应用中的测试环路长度大多数不超过 120 km,因此,系统完全满足 BOTDA 配套要求。

4.2 模拟报警实验

实验采用脉宽 20 μ s 和平均时间 15 s 的测量参数,对 4 个光纤链路通道进行轮训测试,平均时间 15 s。第 1 个通道连接上述的 117 km 光路并设置报警距离阈值为 116.997 km,其它 3 个通道不连光路并且不设报警阈值,在 75.220 km 位置处断开法兰连接。测试上位机软件得到报警信息显示如图 9 所示。

在 75.220 km 位置处重复连接/断开法兰进行测试 10 次,测得系统报警响应时间如表 3 所示。

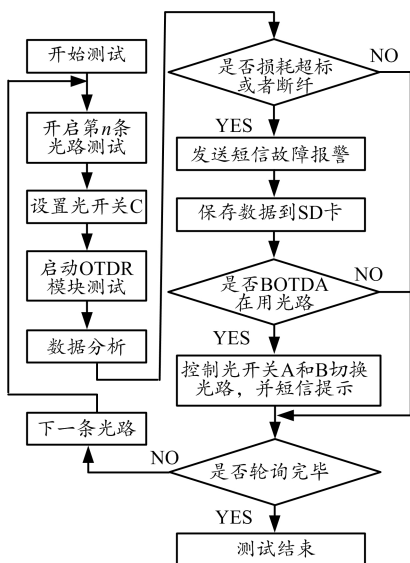


图7 光路自动切换保护流程

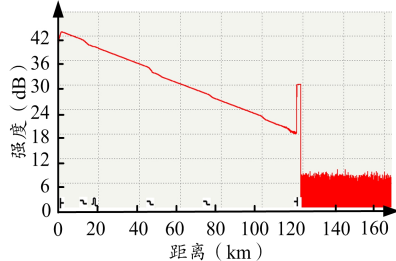


图8 OTDR测试曲线

通道号	发生时间	断纤位置(km)	复位
1	2019-09-11 13:56:51	75.220	清除

图9 测试软件报警信息

表3 报警响应时间数据

测试次数	响应时间(s)	测试次数	响应时间(s)
1	15	6	27
2	16	7	38
3	32	8	55
4	35	9	43
5	41	10	60

从表 3 可以看出,响应时间范围在 15~60 s 之间,报警响应时间最短的情况是断开法兰并且系统测试刚好切换到该通道,系统在平均时间到达后进行事件分析,此时响应时间是平均时间 T ;报警响应时间最长的情况是该通道刚测试完而法兰却断开了,那么系统会在其它通道测试完后重新测试该通道,此时响应时间是 $4T$ 。另外,考虑系统测试过程中法兰若断开,那么系统会丢弃之前的数据重新进行该通道的测试,故此时的响应时间也是 T 。系统的平均时间 T 的设置范围在 5 s~3 min 之间。当 BOTDA 测试光路发生故障时,系统能够在 $T\sim 4T$ 时间范围内实现光路的自动切换保护。

5 结束语

本文设计了一种光路自动切换保护系统,主动监测 BOTDA 测试光路和备用光路的损耗情况,当监测到异常时可以实现光路的切换保护,并进行短信报警,可以保证 BOTDA 测试光路的安全性。系统以 K60 控制器为核心,充分发挥片上集成 SDHC、FLEXBUS 和 FLEXNVM 等多种资源优势,精简电路设计,降低开发难度和成本。同时,集成开发了基于 K60+FPGA 架构的 OTDR 模块,实验证明了其测量定位准确和动态范围较高。系统整体设计方案集成度高、安全可靠和性价比高,值得推广和应用。

参考文献:

- [1] 李永倩,张立欣,李晓娟,等. 瑞利布里渊光时域分析系统传感性能的提升方法[J]. 光学学报,2017,37(1):50-58.
- [2] 郭英超,谢虎. 基于 ARM_AVR 的光纤自动切换保护系统的研究[J]. 光通信技术,2012,36(8):26-28.
- [3] 管凤旭,张西磊,吕淑平,等. 基于 K60 的步进电动机控制系统实验装置设计[J]. 实验室研究与探索,2017,36(3):75-78.
- [4] 王菲,张炜轩,单菲. Kinetis 平台 FlexBus 总线扩展的存储空间系统设计[J]. 单片机与嵌入式系统应用,2013,13(6):53-55.
- [5] 张从鹏,赵康康. 基于 STM32 的串口服务器系统开发[J]. 仪表技术与传感器,2016(1):73-75.
- [6] 吴志刚,黄在朝,吴鹏. 基于 FPGA 的等效采样在光时域反射计中的应用[J]. 光通信技术,2012,36(10):44-46.