

杨绍富, 杨峰. 雷击对钻孔应变仪的损坏及机理分析[J]. 华南地震, 2018, 38(3): 99-104. [YANG Shaofu, YANG Feng. Damage and Mechanism Analysis of Bore Strain Gauge by Lightning Stroke[J]. South China journal of seismology, 2018, 38(3): 99-104]

雷击对钻孔应变仪的损坏及机理分析

杨绍富¹, 杨 峰²

(1. 新疆维吾尔自治区地震局库尔勒地震台, 新疆 库尔勒 841000; 2. 新疆维吾尔自治区地震局, 乌鲁木齐 830011)

摘要: 2015年7月新疆巴伦台钻孔应变仪遭雷击后出现故障, 在维修过程中发现数据采集器内的通讯模块损坏, 导致通讯中断, 更换模块后开始有数据, 但杂乱无章、错误严重。根据信号完整性理论、传输线理论和RS-485通信协议等, 进一步从机理上分析了该现象产生的原因, 认为雷击显著降低了井下探头内RS-485模块的驱动能力, 导致接收端接收到不确定电平, 造成数字通信不可靠。于是在采集器通讯模块上加装了匹配电阻, 之后数据恢复正常。该案例的典型剖析, 对设备维护人员解决实际问题有一定的借鉴作用。

关键词: 分量式钻孔应变仪; 雷击; 数据采集器; RS-485 通讯模块; 匹配电阻

中图分类号: P315.72 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-8662(2018)03-099-06

DOI: 10.13512/j.hndz.2018.03.015

Damage and Mechanism Analysis of Bore Strain Gauge by Lightning Stroke

YANG Shaofu¹, YANG Feng²

(1. Korla Seismic Station of Earthquake Agency of Xinjiang Uygur Autonomous Region, Korla 841000, China;

2. Earthquake Agency of Xinjiang Uygur Autonomous Region, Urumqi 830011, China)

Abstract: In July 2015, the borehole strain gauge of Balun station in Xinjiang was damaged after being struck by lightning. During maintenance, it was found that the communication module in the data collector was damaged, and resulted in communication interruption. After replacing modules, data began to appear, but the disorder was very serious. According to the theory of signal integrity, the transmission line theory and the RS-485 communication protocol, the paper further analyzes the mechanism of the causes of the phenomenon, and finds that lightning significantly reduced the driving ability of down hole probe RS-485 module, and resulted in receiver uncertainty level and digital communication. Then the matching resistor was added to the collector's communication module, and the data returned to normal. The typical analysis of the case has a certain reference for the equipment maintenance personnel to solve practical problems.

Keywords: Component type borehole strain meter; Lightning stroke; Data collector; RS-485 communication module; Matching resistance

收稿日期: 2017-11-28

作者简介: 杨绍富(1982-), 男, 工程师, 主要从事地震监测和仪器运维工作。

E-mail: 49846678@qq.com.

0 前言

地壳在构造应力场作用下将发生差异运动与受力变形,同时积累能量,最终导致局部地壳的破坏而发生地震^[1]。当今地震成因理论认为:地震是地应力(应变)变化导致的。因此,要研究和预报地震,就必须对地应力(应变)变化进行观测^[2]。1984年新疆地震局建立钻孔应变观测网以来,新疆及其附近地区共发生中强以上地震27组。其中有异常的22组,占81%;填预报卡片并预报正确的10组,占37%。在10组预报正确的地震中,8组震前有短临(震前10天到1个月)异常且震中到台站的距离都在250 km以内。以这样的成绩,新疆地震局连续7年获中国地震局年度预报评比前三名,并获1993—1997年中国地震局防震减灾优秀成果二等奖^[3]。钻孔应变仪观测的是地表钻孔孔径的相对变化,而不是绝对值。我国是多雷的国家,大部分地震台站都受到雷电的干扰,雷电对观测系统设备的损坏有时会造成系统的瘫痪,严重影响地震观测^[4]。

通过分析RZB-II型分量式钻孔应变仪遭受雷击后出现的各种具体故障,并根据信号完整性理论、传输线理论和RS-485通信协议,本文利用排除法判断雷击可能对仪器哪些部件造成损害,从中找到数据采集错误的根源,然后做实验验证,最后对整个系统的损害情况进行评估并给出理论解释,为今后仪器故障的排查和维修提供可借鉴的解决思路。

1 台站及钻孔应变仪器简介

巴伦台位于新疆和静县阿拉沟乡乌拉斯台查汗村,基岩为花岗岩或闪长岩,较为完整,站点靠近山脚,坡度较大。台站有测震、钻孔倾斜和钻孔应变三种观测手段,其中钻孔倾斜、钻孔应变属于天山中段前兆台网建设项目,2014年7月完成仪器安装架设。倾斜观测仪为CZB-2A型竖直摆钻孔倾斜仪,由新疆局前兆台网中心管理;应变仪为中国地震局地壳应力研究所研制的RZB-II型分量式钻孔应变仪,由库尔勒地震台管理。

应变仪安装在岩石钻孔中,使用特种水泥作为与岩石的耦合介质,具有很高的观测精度和稳定性,可以记录到清晰的固体潮汐和地震发生时地壳的受力变形^[5]。井下探头内水平安装4个位移传感器,采用三极板差动式电容传感元件,相邻元件之间的夹角皆为45°,用来测量四个方向的孔径相对变化。根据弹性力学可知,圆孔内两个互相正交的线应变之和能够代表圆孔周边介质的面应变,故可以得到两组面应变,因而可以进行仪器自检^[6-8],即 $S_1+S_3=S_2+S_4$,利用这一原理可对观测数据的可靠性进行检验。

选取2015年1月1日至2015年7月24日整点值数据,利用R语言软件编程,得到两条面应变观测曲线(图1)。

可以看出, S_1+S_3 和 S_2+S_4 两组面应变相关系数达到0.99,自检较好,说明四个分量观测数据可靠。

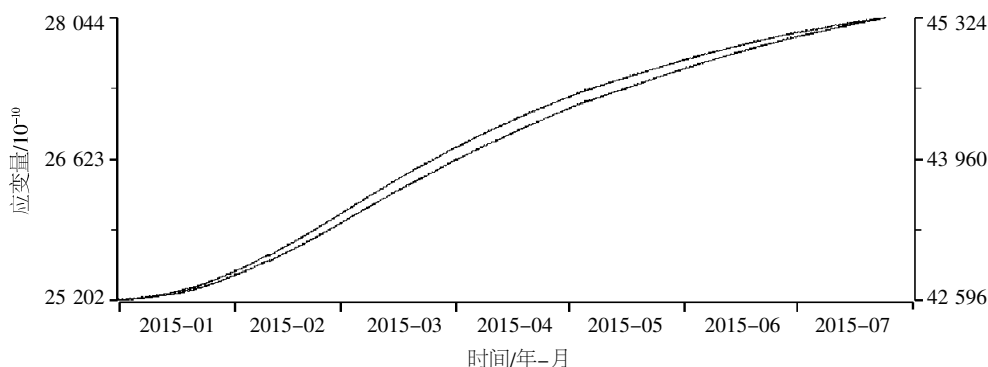


图1 巴伦台分量式钻孔应变自检结果(2015-01-01~2015-07-24)

Fig.1 Self testing results of borehole strain in component type of Balun Station

2 故障检查及维修

2015年7月25日处理数据发现,巴伦台分量式钻孔应变7月24日19:44~23:59缺数,为准确判断故障现象,及时联系局前兆台网中心值班人

员,了解同一测点的钻孔倾斜数据情况,结果钻孔倾斜数据也同步出现故障。笔者将该情况向局前兆台网中心领导汇报,并按照由近及远的顺序制定仪器故障检查方案。

(1) 由于RZB-II型分量式钻孔应变仪的数据

文件可通过中国地震前兆台网管理系统收回,我们在 Windows 命令行下通过使用 ping 命令向分量式钻孔应变仪的数据采集器发送 ICMP 回显请求,结果显示数据采集器可以连通,据此初步排除了通信及供电故障。

(2) 7月29日前往巴伦台台站现场检查,发现测点周边草地上非常潮湿。巴伦台镇包格且郭勒村宏观观测员介绍7月17日至31日,持续阴雨天气。当地牧民反映7月24日观测站所在地区出现了较强的雷雨天气。

(3) 打开 CZB-2A 钻孔倾斜仪的井盖后,发现井口旁安装的避雷器已经严重损坏,与避雷器紧挨的井壁上也有明显的灼烧痕迹,基本可以断定倾斜仪与应变仪均遭受到严重雷击。

(4) 进入观测室发现, RZB-II 型分量式钻孔应变仪的数据采集器面板上发送指示灯异常,液晶屏上也看不到数据曲线。此后,多次与前兆台网中心和中国地震局地壳所沟通、协调,更换两次数据采集器和 RS232 转 RS485 模块,仍然无法采集数据,初步判断井下传感器或数据采集器内串行通信单元被雷击损坏。

(5) 2016年4月28日,对巴伦台台站防雷接地,地线焊接到钻孔倾斜套管,另端接数据采集器输入端。4月29日钻孔应变数据恢复,5月9日数据再次无法采集。4月29日至5月8日观测数据异常,没有固体潮形态(图2)。自检相关性不好,相关系数仅为-0.16,亦即观测数据不可靠(图3)。

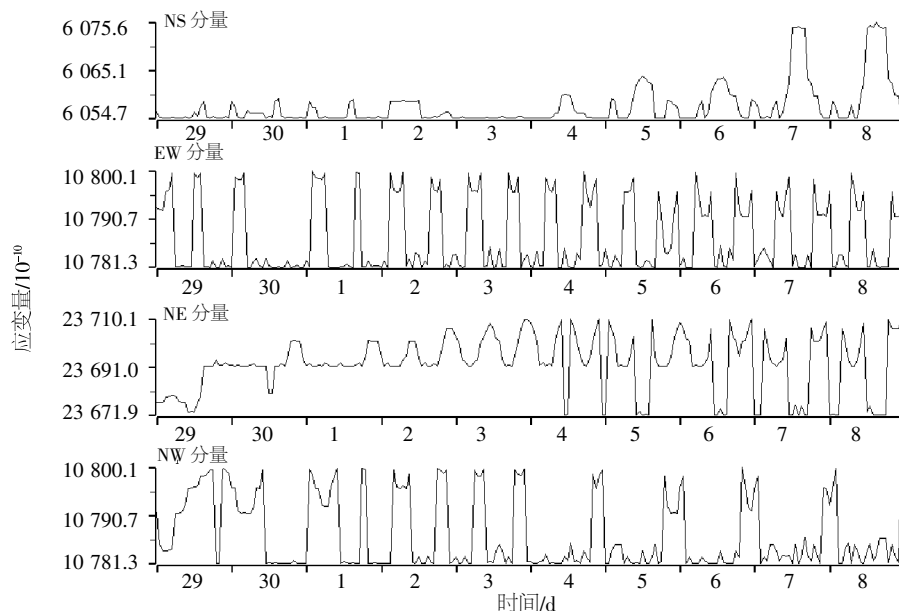


图2 巴伦台分量式钻孔应变整点值序列曲线(2016-04-29~2016-05-08)

Fig.2 Hourly value sequence curve of borehole strain in component type of Balun Station

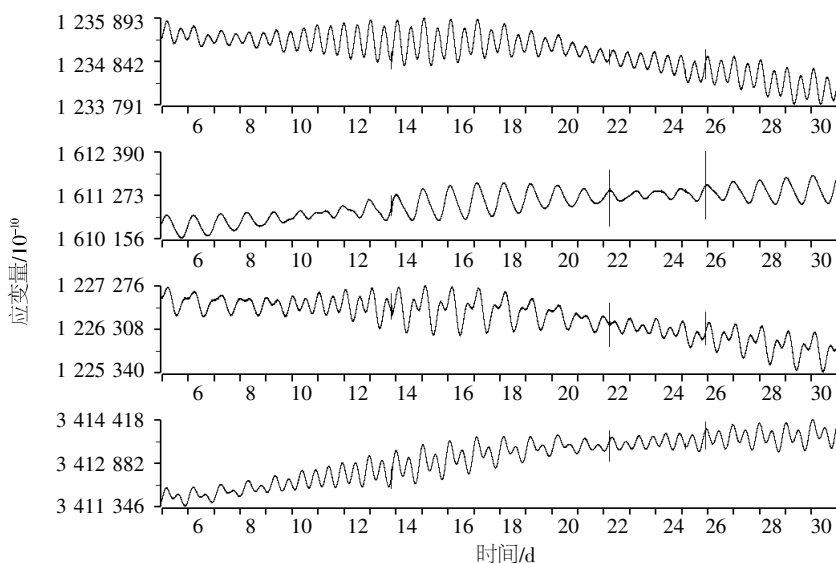


图3 巴伦台分量式钻孔应变整点值序列曲线(2016-11-05~2016-11-30)

Fig.3 Hourly value sequence curve of borehole strain in component type of Baluntai Station

(6) 2016 年 7 月 27 日, 现场检查采集数据异常的原因, 更换观测室内数据采集器和 RS-232 接口, 数据形态依然不正常; 7 月 28 日, 使用 4 种版本的数据采集软件测试, 数据仍然不正常; 用笔记本电脑串口连接数据采集器串口, 发现数据采集器能够通过串行口发送数据及控制指令, 但 RS-232 转 RS-485 模块数据输出不正常, 判断井下传感器正常, 数据采集器内的 RS-232 转 RS-485 模块损坏。

(7) 2016 年 11 月 3 日, 收到局前兆台网中心发来的新数据采集器, 现场更换并在数据采集器通讯模块上加装 $120\ \Omega$ 阻抗匹配电阻, 经过一段时间的运行观察, 观测数据形态恢复正常。

3 机理分析

巴伦台分量式钻孔应变数据采集器遭雷击后, 观测数据不正常。在数据采集器通讯模块上加装一个 $120\ \Omega$ 的电阻后, 数据恢复正常。这究竟是什么原因呢? 本文试图从信号完整性理论、传输线理论和 RS-485 通信协议等方面入手, 深入分析给出合理解释。

3.1 雷害分析

巴伦台台站靠近山脚, 坡度较大, 并且应变和倾斜通信电缆较长, 在观测井与观测室均位于山体滚球半径之外, 且缺少地网及防雷设施的情况下, 观测系统受雷击的概率相对较大。根据 RZB-II 型分量式钻孔应变仪数据采集器 RS-232 转 RS-485 模块遭受雷击损坏, 而数据采集器和井下传感器电源模块均未受损的情况分析, 雷电流很可能是通过 RS-485 通信线路或外屏蔽线路侵入观测系统, 最终击毁 RS-232 转 RS-485 模块形成泄流通道, 因为数据采集器已经存在泄流通路, 所以井下传感器 RS-485 通信模块未被彻底损坏是有可能的, 虽然目前很多 485 通信芯片内部都集成了静电防护和过电流冲击保护单元, 由于雷电产生的电动势往往非常高, 即便持续时间很短, 485 通信模块仍然不可避免的遭受冲击, 从而导致部分性能, 特别是驱动能力的降低。由于传感器固定在井下, 不能取出测试, 而且 485 通信芯片是集成电路, 很难判断芯片内部具体受损部件及其受损程度。

3.2 RS-485 通信原理及传输线理论分析

RZB-II 型分量钻孔应变仪传感器与数据采集

器之间采用 RS-485 通信, RS-485 通信具有抗干扰能力强, 传输速率高, 传送距离远的特点。因为 RS-485 接口采用差分方式传输信号, 一般只需两根连线(一般叫 AB 线), 所以 RS-485 接口采用屏蔽双绞线(图 4), 图中 D 与 R 为 RS-485 通信的收发缓冲器, 双绞线中的两个导线分别连接 A、B 两个接线端。在采用双绞线, 不用 Modem 的情况下, 若传输速率为 $9\ 600\ \text{bit/s}$, 则 RS-485 通信的传输距离可达 $1\ 500\ \text{m}$ ^[9]。

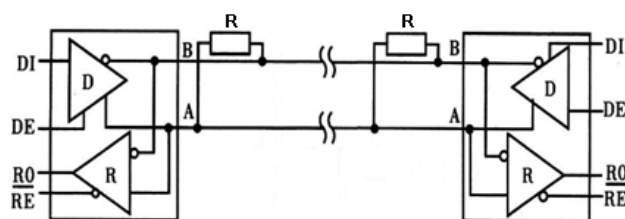


图 4 RS-485 通信典型应用电路

Fig.4 Typical application circuit of RS-485 communication

通信模型通常包含 4 个元素, 分别是: 通信的发送者、发送的消息、传输消息的介质以及接收者^[10], 通信中出现的任何问题, 都由这 4 个元素产生。RZB-II 型分量式钻孔应变仪使用的 RS-485 通信中, 数据采集器与传感器互为通信的发送者/接受者, 发送的消息是控制指令和数据等, 传输介质即为与数据采集器后面板上标记为主传感器的 8 芯航空插头相连的电缆线中的其中两根。

RZB-II 型分量式钻孔应变仪传感器的内部结构如图 5 所示。从 RS-485 通信传输线往外看, RS-485 通信模块位于传感器的最外层, 当雷电从信号传输线上侵入时, 最先被击毁的应该是 RS-485 通信模块。雷击后井下 RS-485 模块仍能输出数据, 结合井上 RS-485 模块被击穿, 侵入的雷电流已经存在泄流通路的情况考虑, 传感器内部除 RS-485 通信模块以外部分理应保持完好。

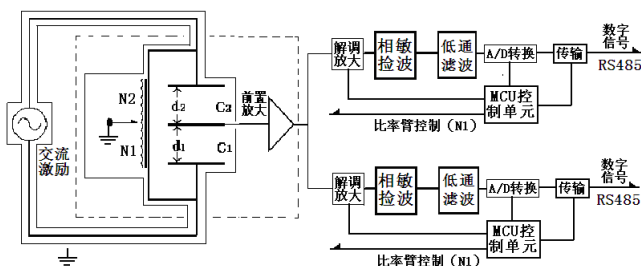


图 5 RZB-II 型分量式钻孔应变仪传感器内部结构

Fig.5 Internal structure of RZB-II type component type borehole strain sensor

RZB-II 型分量式钻孔应变仪的 RS-485 通信中使用的传输介质是高性能电缆,从时间轴上看,信号的传输过程就是一系列电压从高到低,或者从低到高的变化电平沿着通信电缆从发送端延伸拓展到接收端。在通信电缆上,沿着信号传输电缆线上存在一些电感,在信号传输电缆和返回路径之间会存在一些电容,结合传输线理论^[1],可以画出 RZB-II 型分量式钻孔应变仪通信线缆的一阶模型,如图 6 所示。

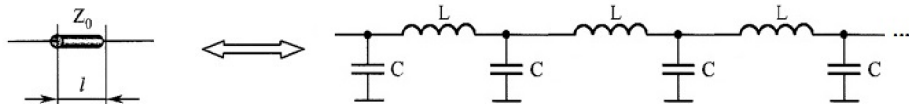


图 6 通信电缆一阶等效电路模型近似

Fig.6 Approximation of first order equivalent circuit model of communication cable

表 1 常见的可控阻抗传输线及其特性阻抗
Table 1 Common controllable impedance transmission lines and their characteristic impedances

传输线名称	特性阻抗/ Ω
RG174	50
RG58	52
RG59	75
RG62	93
电视天线	300
有线电视电缆	75
双绞线	100~130

由于 RZB-II 型分量式钻孔应变仪使用的电缆线的特性阻抗只与它材料特性、介电常数和单位长度电容量有关^[3],在遭受雷击后,材料特性等参数并未改变,因此通信线缆的特性阻抗也保持不变,根据表 1 可知其特性阻抗仍然维持在 100~130 Ω 左右。

信号前沿空间延伸的实质是电磁波在介质中的传播,在 RS-485 通信线上,电磁波波长远大于传输线的宽度,因此根据波的特性,可将传输的电磁波近似地看做平面波。通信电缆可以看做是均匀的,在传感器与通信电缆的连接点和通信电缆与数据采集器的连接点上,特征阻抗发生改变,这两个节点就是整个 RZB-II 型分量式钻孔应变仪 RS-485 通信线上的阻抗不连续点,在这两个不连续点上,一部分电磁波反射回源,另一部分电磁波越过不连续点继续传播。反射的大小用反射系数来表示,反射系数的定义如下式所示:

3.3 特性阻抗匹配及驱动能力分析

由于电缆线材质上是均匀的,从信号的接收端(假设是数据采集器)往信号的发送端(假设是传感器)看过去,每一个电容和电感,都构成了一个电缆的瞬时阻抗 Z_0 ,一般用特性阻抗来反映电缆瞬时恒定阻抗,常见的可控阻抗传输线以及他们的特性阻抗值^[12]如表 1 所示。

$$\rho = \frac{V_{ref}}{V_{inc}} = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \quad (1)$$

式(1)中,为反射系数, V_{ref} 和 V_{inc} 分别是反射电压与入射电压, Z_1 是不连续点前入射区域的瞬态阻抗, Z_2 是不连续点后透射区域的瞬态阻抗。在 RZB-II 型分量式钻孔应变仪的 RS-485 通信中,共有两个阻抗不连续点,一个是井下 RS-485 通信模块与通信电缆的连接点,另一个是通信电缆与数据采集器内 RS-485 通信模块的连接点。在遭受雷击前后,整个传输线路的特性阻抗都不会发生改变,即两个不连续点上的反射系数相同。

RZB-II 型分量式钻孔应变仪采用的是应答式通信模式,数据采集器向传感器发送指令,传感器接到指令后执行相应的动作并反馈动作执行结果或输出数据采集器请求的观测的数据。更换新数据采集器后,即使数据采集器端不安装 120 Ω 的阻抗匹配电阻,传感器仍能够返回数据,说明传感器已经收到数据采集器发送的指令并能正常识别,从数据采集器到传感器的单向通信没有问题,这也反过来验证了传输线路在雷击后并不影响正常通信。但传感器反馈的数据却出现错误,在 RS-485 通信中,接收端 AB 之间有大干+200 mV 的电平时,被视作正逻辑,小于-200 mV 时,被视作负逻辑^[14],因此出现错误数据的原因在于数据采集器内部 RS-485 模块的 AB 端接收到了位于-200 mV~+200 mV 之间不确定电平,亦即 V_{inc} 位于-200 mV~+200 mV 之间,由于反射系数不变,据此可以判断 V_{ref} 和 V_{inc} 的总和发生了改变,即井下传感器的驱动能力下降了。

阻抗匹配主要用于传输线上,来达到所有高频的微波信号皆能传至负载点的目的,不会有信号反射回来源点,从而提升能源效益。如果传输线的特征阻抗跟负载阻抗不匹配(相等)时,在负载端就会产生反射。本文中数据采集器(负载端)遭雷击,导致传输线特性阻抗和负载端失配,所以传输信号在负载端反射,反射信号和原信号叠加在一起,导致了观测数据错误。传输线特性阻抗一般为 $120\ \Omega$,因此在负载端加装 $120\ \Omega$ 电阻和传输线特性阻抗匹配,信号由源端传至负载端没有反射,即观测数据正常。

4 结语

(1) 地震台站由于所处地理位置、观测环境等因素的问题,雷击成为仪器安全运行的一大常见隐患。因此,有效的防雷措施很有必要,能够减小雷击风险,保障观测资料的连续、完整。对于雷击风险较大的台站,维护人员平时应认真、仔细地做好设备的防雷检查和维护工作。其次,在遇到故障时要根据实际现象科学、准确的做出判断。

(2) 本文的案例比较典型,尤其是维修过程中发现的匹配阻抗问题,对设备维护人员很有借鉴意义。雷击虽然不影响传输线路的特性阻抗,但是可以显著降低 RS-485 模块的驱动能力,从而导致接收端接收到不确定电平,严重影响数字通信的可靠性。

参考文献:

- [1] 陈征,欧阳祖熙,李宏,等. RZB 型深井宽频带地形变综合观测系统的垂向应变测量单元 [J]. 震灾防御技术, 2014,9(1):126-132.
- [2] 邱泽华,谢富仁,苏恺之,等. 发展钻孔应变观测的战略构想[J]. 国际地震动态,2004(1):7-14.
- [3] 蒋靖祥,尹光华,哈斯高娃. 钻孔应变仪在地震前的记录及地震预测[J]. 地震研究,2000,23(4):410-417.
- [4] 王凤. 地震前兆台站的防雷[J]. 灾害学,2005,20(2):58-60.
- [5] 李涛,陈群策,欧阳祖熙,等. RZB 型钻孔应变仪在青藏高原东缘地应力监测中的应用[J]. 北京大学学报(自然科学版),2011,57(4):677-683.
- [6] 阚宝祥,邱泽华,池顺良. 姑咱台四分量钻孔应变观测的实地标定[J]. 大地测量与地球动力学,2009,29(1):36-40.
- [7] 张国红,王勇,杨选辉,等. 钻孔应变资料的可靠性分析[J]. 大地测量与地球动力学,2010,30(S1):62-66.
- [8] 唐磊,邱泽华,宋荣. 钻孔四分量应变观测自检内精度分析[J]. 大地测量与地球动力学,2010,30(S2):36-39.
- [9] 张筠莉,刘书智. Visual C++ 实践与提高-串口通信与工程应用篇[M]. 北京:中国铁道出版社,2006.
- [10] Douglas Brooks 著. 刘雷波,赵岩译. 信号完整性与 PCB 设计[M]. 北京:电子工业出版社,2013.
- [11] Eric Bogatin 著. 李玉山,李丽萍译. 信号完整性分析[M]. 北京:电子工业出版社,2012.
- [12] Eric Bogatin 著. 李玉山,李丽萍译. 信号完整性分析[M]. 北京:电子工业出版社,2012.
- [13] Stephen H.Hall,Howard L.Heck 著. 张徐亮,鲍景富,张雅丽,等译. 高级信号完整性技术[M]. 北京:电子工业出版社,2011.
- [14] 刘健. 提高串行总线的可靠性[J]. 硅谷,2010(6):34-36.