

铁路静态激光接触网测量仪的硬件设计

吴仕军, 邱仕强, 王依嵩, 龚涛, 吴何睿莹, 周庆红*

西南科技大学数理学院, 四川 绵阳

收稿日期: 2026年3月17日; 录用日期: 2026年4月10日; 发布日期: 2026年4月22日

摘要

针对铁路接触网几何参数测量中存在的测量效率低、人工测量误差大的问题, 设计了一种铁路静态激光接触网测量仪的硬件系统。系统以STM32H743IIT6为主控核心, 构建了由激光测距模块、光学测量系统、光电编码器、倾角传感器及数据采集电路组成的测量平台。与传统通过机械旋转激光测距模块实现导高测量的方法不同, 本文采用程序控制光学系统改变激光传播路径的方式实现导高测量, 从而使激光对准接触线的操作更加简便。同时针对激光测距精度受温度影响较大的问题, 设计了基于TEC的温控模块以提高测距稳定性。实验结果表明, 在无温控条件下测距重复性精度约为 ± 2.96 mm, 而在温控条件下可提升至 ± 0.466 mm, 满足1 mm测量稳定性的设计要求。该系统具有结构简单、测量精度高和稳定性好的特点, 可为铁路接触网几何参数检测提供一种有效的技术方案。

关键词

接触网, 激光测距, 几何参数测量, STM32

Hardware Design of a Railway Static Laser Contact Network Measuring Instrument

Shijun Wu, Shiqiang Qiu, Yilun Wang, Tao Gong, Heruikun Wu, Qinghong Zhou*

School of Mathematics and Science, Southwest University of Science and Technology, Mianyang Sichuan

Received: March 17, 2026; accepted: April 10, 2026; published: April 22, 2026

Abstract

A hardware system for a railway static laser contact line measuring instrument is proposed to improve the accuracy and efficiency of geometric parameter measurement of railway contact networks. The system is based on the STM32H743IIT6 microcontroller and integrates a laser ranging module, optical measurement system, photoelectric encoder, inclination sensor, and data acquisition

*通讯作者。

文章引用: 吴仕军, 邱仕强, 王依嵩, 龚涛, 吴何睿莹, 周庆红. 铁路静态激光接触网测量仪的硬件设计[J]. 应用物理, 2026, 16(4): 379-392. DOI: 10.12677/app.2026.164035

circuits to realize multi-sensor data acquisition and processing. Unlike conventional measurement instruments that determine the contact wire height by mechanically rotating the laser ranging module, the proposed system measures the height by modifying the laser propagation path through an optical system. In this paper, a program-controlled optical system is used to change the laser propagation path to achieve contact wire height measurement, thereby making the operation of aligning the laser with the contact wire more convenient. In addition, considering the significant influence of temperature on the measurement accuracy of the laser ranging module, a temperature control module based on a thermoelectric cooler (TEC) is designed to stabilize the operating temperature of the laser device. Experimental tests were carried out to evaluate the stability of the laser ranging module under different temperature conditions. The results show that the repeatability accuracy of the module is approximately ± 2.96 mm without temperature control, while it improves to ± 0.466 mm when the temperature is controlled. The experimental results demonstrate that the proposed system can achieve the design requirement of 1 mm measurement stability. The instrument features high measurement accuracy, good stability, and a relatively simple structure, providing a practical solution for railway contact line geometric parameter measurement. to the Hans standard, which illustrates all the formats.

Keywords

Railway Contact Network, Laser Ranging, Geometric Parameter Measurement, STM32

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着高速铁路和电气化铁路的发展,接触网系统已成为铁路供电的关键组成部分,其运行状态直接影响列车运行的安全性与稳定性。接触线的导高、轨距和超高等几何参数是评估接触网性能的重要指标,对受电弓受流质量及列车运行平稳性具有重要影响[1]。因此,实现接触网几何参数的高精度与实时测量,对于保障铁路运输安全具有重要意义。

传统测量方法主要依赖人工或机械式设备,存在效率低、误差大等问题,难以满足现代铁路检测需求[2]。随着光电技术和嵌入式系统的发展,基于激光测距的检测方法因其非接触、高精度和快速响应等优势得到广泛应用[3]。然而,现有系统仍存在机械旋转结构引入误差及测距模块受温度影响导致稳定性下降等问题。

针对上述问题,本文设计了一种基于 STM32H743IIT6 的铁路静态激光接触网测量仪。该系统通过光学路径改变实现导高测量,使操作变得更加简便;同时引入基于 TEC 的温控模块以稳定激光测距模块工作温度[4]。实验结果表明,该系统在温控条件下可实现毫米级测距重复性精度,显著提升了测量稳定性。

2. 铁路网激光接触网测量仪系统设计

2.1. 系统结构

铁路静态激光接触网测量仪系统主要由主控电路系统、激光测距系统、光学系统、光电编码器、电阻尺、倾角传感器、视频图像显示系统以及机械结构等部分组成[5]。其中,主控电路系统集成了 MCU 控制电路、数据转换电路和电源稳压电路,是整个测量仪的核心控制单元。

主控电路系统主要负责各类传感器的数据采集与控制,并完成传感器之间的数据通信与信息处理。

同时, 主控电路还为各传感器模块及其他功能单元提供稳定的电源, 以保证系统的正常运行。

激光测距系统用于测量激光发射点到接触线目标点之间的距离, 是实现接触线导高测量的关键模块。为了提高激光测距系统的稳定性并减小环境温度变化对测量结果的影响, 在系统中设计了温度控制系统稳定激光测距模块的工作温度。

光电编码器用于检测激光头轴线与轨道水平面之间的夹角。通过结合激光测距模块测得的距离信息, 可以计算得到接触线的导高参数。

电阻尺用于直接测量两轨之间的轨距, 为接触网几何参数计算提供基础数据。倾角传感器用于测量轨道平面相对于水平面的倾斜角度。当列车通过曲线轨道时, 轨道通常存在一定的超高。通过结合倾角传感器测得的轨道倾角和长度传感器测得的轨间距, 可进一步计算得到内外轨之间的高度差, 即轨道超高, 此外, 系统还配备视频图像显示模块, 用于对测量过程进行辅助观察和实时显示相关信息。机械结构则根据各传感器及功能模块的安装需求进行整体设计, 用于支撑和固定各个子系统, 并保证仪器在实际测量过程中的稳定性和可靠性[6]。

2.2. 传感器参数

根据市场调研, 本项目研发的新一代静态激光接触网测量仪设计参数见表 1, 选择的传感器主要参数见表 2。

Table 1. System design spec sheet

表 1. 系统设计技术指标表

参数	值
导高	范围 3000~15,000 mm; 精度 ± 1 mm;
拉出值	范围 ± 1000 mm; 精度 ± 4 mm;
线岔中心	精度 ± 3 mm;
500 mm 处高差	精度 ± 4 mm
轨距	范围 1410~1470 mm; 精度 ± 0.3 mm

Table 2. Main sensor specification table

表 2. 主要传感器规格参数表

传感器	参数
成都景瑞特 M730A 激光测距模块	测量范围 0.03~4 0m; 精度 ± 1 mm;
深圳米朗科技 KTM 型 100 mm 电阻尺	测量范围 ± 100 mm; 精度 ± 3 mm;
深圳瑞芬科技 HCTA716 倾角传感器	测量范围 $\pm 60^\circ$; 精度 0.008°;
上海恒祥 MP35 光电编码器	分辨率 24 Bits;

其中对导高测量的重复稳定性要求在 1 mm 以内, 该参数为核心参数, 由激光测距仪的重复性精度决定, 涉及激光测距仪的工作方式、系统稳定性等多项技术细节, 因此为本项目开发的关键性技术问题。

2.3. 主控电路系统

主控电路系统是铁路静态激光接触网测量仪的核心组成部分, 主要负责系统各功能模块的控制、数据采集与通信管理。该系统以 STM32H743IIT6 微控制器为核心, 通过串口通信接口与激光测距模块、光

电编码器、倾角传感器以及长度传感器等设备进行数据交互，同时对采集到的数据进行处理和传输[7]。为保证各类传感器能够稳定工作，主控电路系统还集成了数据转换电路和电源稳压电路，实现不同通信接口之间的信号转换以及多路电源的稳定输出。

在系统运行过程中，主控单元负责协调各传感器的工作状态，并对测量数据进行统一管理，从而实现接触网几何参数的测量与计算。同时，主控电路还通过接口模块与显示系统及图像采集模块连接，实现测量信息的实时显示与辅助观察。通过合理的电路结构设计，主控电路系统能够为整个测量仪提供稳定可靠的控制平台，提高系统运行的稳定性与可靠性。

2.3.1. MCU 控制电路

MCU 控制电路是整个测量系统的核心控制单元。该电路主要由微控制器核心电路、存储电路、接口连接电路以及电源转换电路等部分组成，用于实现系统控制、数据采集、通信以及信息处理等功能。

在本系统设计中，选用 STM32H743IIT6 作为主控制芯片。该器件基于 ARM Cortex-M7 内核，具有较高的运算性能和丰富的片上外设资源，能够满足多传感器数据采集与处理的需求。同时，该芯片集成多种通信接口，可为系统各功能模块之间的数据交互提供良好的硬件支持。

在接口设计方面，MCU 控制电路预留了 JTAG 程序下载接口、摄像头模块接口以及多路串口通信接口。其中，JTAG 接口主要用于单片机程序的下载与调试，便于系统软件的开发与维护；摄像头模块接口用于连接图像采集模块，实现测量过程中的图像获取与辅助显示；此外，STM32H743IIT6 提供的多路串行通信接口可用于连接激光测距模块、倾角传感器、光电编码器以及其他外部设备，实现各类传感器数据的实时传输与控制。

通过上述硬件设计，MCU 控制电路能够完成对各传感器模块的数据采集与统一管理，并为系统实现多设备协同工作提供可靠的硬件平台。

2.3.2. 数据转换电路

在铁路接触网几何参数测量系统中，不同传感器采用的通信接口标准存在差异。光电编码器采用 RS422 差分通信方式，而电阻尺采用 RS485 通信方式。由于主控单元串口接口为 TTL 电平，因此需要设计数据转换电路，实现 TTL 电平与 RS422/RS485 差分信号之间的转换，以保证主控系统能够稳定地与各类传感器进行通信。

在光电编码器通信接口设计中，电路图见图 1，系统采用 MAX490ESA+作为 RS422 差分收发器[8]。

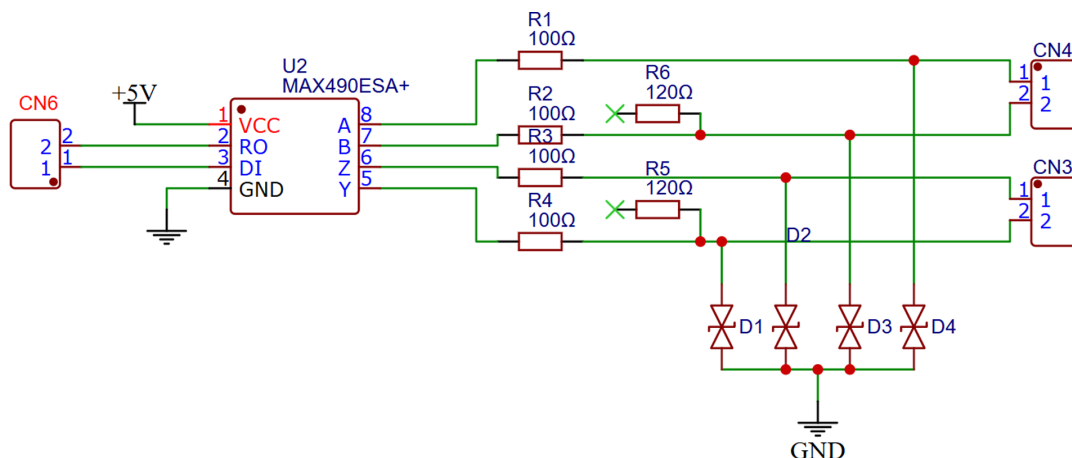


Figure 1. TTL to RS422 differential signal conversion circuit
图 1. TTL 电平与 RS422 差分信号转换电路

该器件内部集成差分驱动器和接收器,可实现 TTL 电平与 RS422 差分信号之间的转换。主控单元串口发送信号通过 DI 端输入,经芯片内部驱动后由 A/B 差分端输出至 RS422 总线;来自光电编码器的差分信号则通过 Y/Z 端输入,经芯片转换后由 RO 端输出为 TTL 电平信号,并送入 MCU 串口接收端进行处理。为提高通信线路的稳定性,在差分信号线上串联了 $100\ \Omega$ 电阻用于改善信号完整性,并在接口端预留 $120\ \Omega$ 终端匹配电阻,以减小长距离传输过程中产生的信号反射。同时,在通信接口处增加了瞬态电压抑制器件 RCLAMP0521P-N,用于对差分信号线进行静电放电(ESD)和瞬态浪涌保护,从而提高系统在复杂电磁环境下的抗干扰能力。

在电阻尺通信接口设计中,电路图见图 2,系统采用 MAX485CSA + T 作为 RS485 通信收发器,实现 TTL 串口信号与 RS485 差分信号之间的转换[9]。MCU 串口发送信号通过 DI 端输入,经内部驱动后由 A、B 端输出至 RS485 总线;来自电阻尺的差分信号则通过 A、B 端输入,经芯片内部接收器转换后由 RO 端输出至主控单元串口接收端。由于 RS485 通信采用半双工方式,在电路设计中通过三极管控制 DE 和 RE 引脚,实现发送与接收模式的自动切换,从而保证数据通信的可靠性。

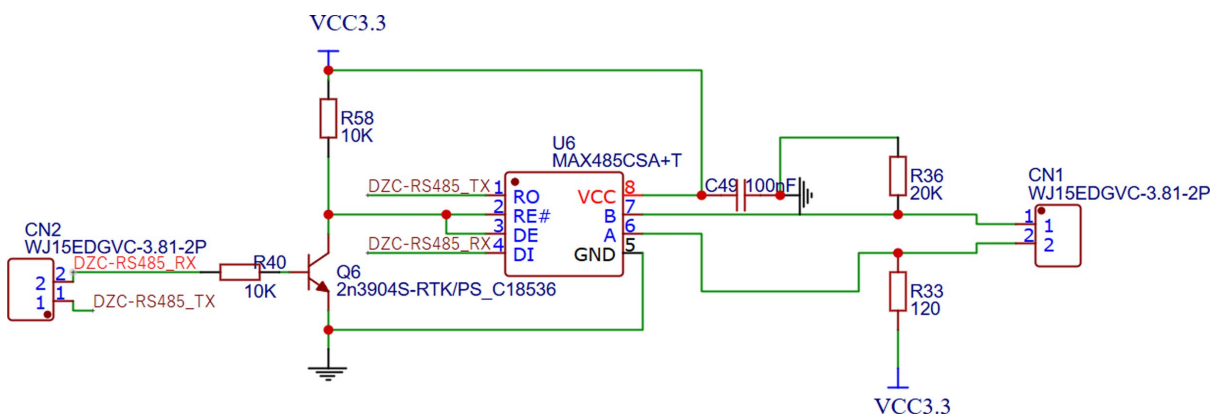


Figure 2. TTL to RS-485 differential signal conversion circuit
图 2. TTL 电平与 RS485 差分信号转换电路

此外,在 RS485 通信线路中设置了 $120\ \Omega$ 终端匹配电阻,以提高差分信号的传输质量;同时在电源端加入去耦电容,用于降低电源噪声对通信电路的影响。通过上述设计,实现了主控系统与光电编码器及电阻尺之间的稳定通信,为接触网几何参数测量系统的数据采集与处理提供了可靠的硬件基础。

2.3.3. 电源稳压电路

为满足系统中各功能模块对不同电压等级的供电需求,设计了多级电源稳压电路。系统输入电源为 $12\ \text{V}$ 直流电压,通过降压与升压两类 DC-DC 转换电路获得 $3.3\ \text{V}$ 、 $5\ \text{V}$ 和 $16\ \text{V}$ 等多路稳定电压,为主控电路及各类传感器模块提供可靠供电。电源稳压电路主要包括输入降压稳压模块和升压稳压模块两部分,其降压稳压模块电路结构见图 3,其升压稳压模块电路结构见图 4。

在降压稳压部分,系统采用两路开关型降压稳压器 LM2596R-3.3 和 LM2596R-5.0 对 $12\ \text{V}$ 输入电压进行转换[10]。其中,LM2596R-3.3 将输入电压降压至 $3.3\ \text{V}$,为激光测距模块、数据转换电路以及按键模块等提供工作电源;LM2596R-5.0 将输入电压转换为 $5\ \text{V}$ 电源,为 MCU 控制电路中的温控模块以及旋转编码器等设备供电。LM2596 系列属于高效率降压型开关稳压芯片,具有转换效率高、输出电流能力强以及负载调节性能良好等特点,适用于嵌入式测量系统的电源设计。

为了提高电源输出稳定性,在输入端设置大容量滤波电容($680\ \mu\text{F}$)对输入电压进行平滑处理,以减小电源纹波及瞬态干扰。同时在输出端配置电感($100\ \mu\text{H}$)与滤波电容($270\ \mu\text{F}$ 和 $330\ \mu\text{F}$)构成 LC 滤波网络,

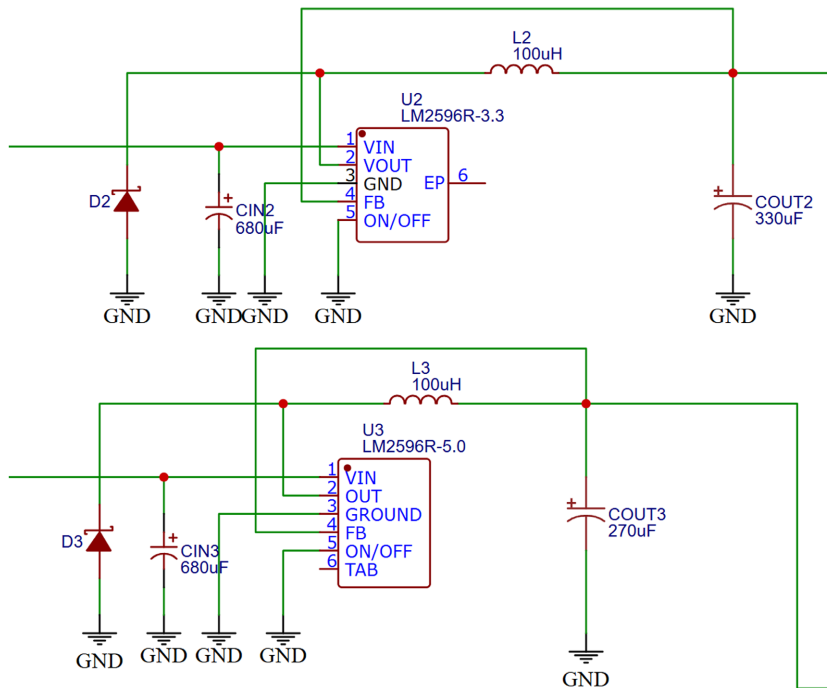


Figure 3. Step-down voltage regulator module circuit
图 3. 降压稳压模块电路

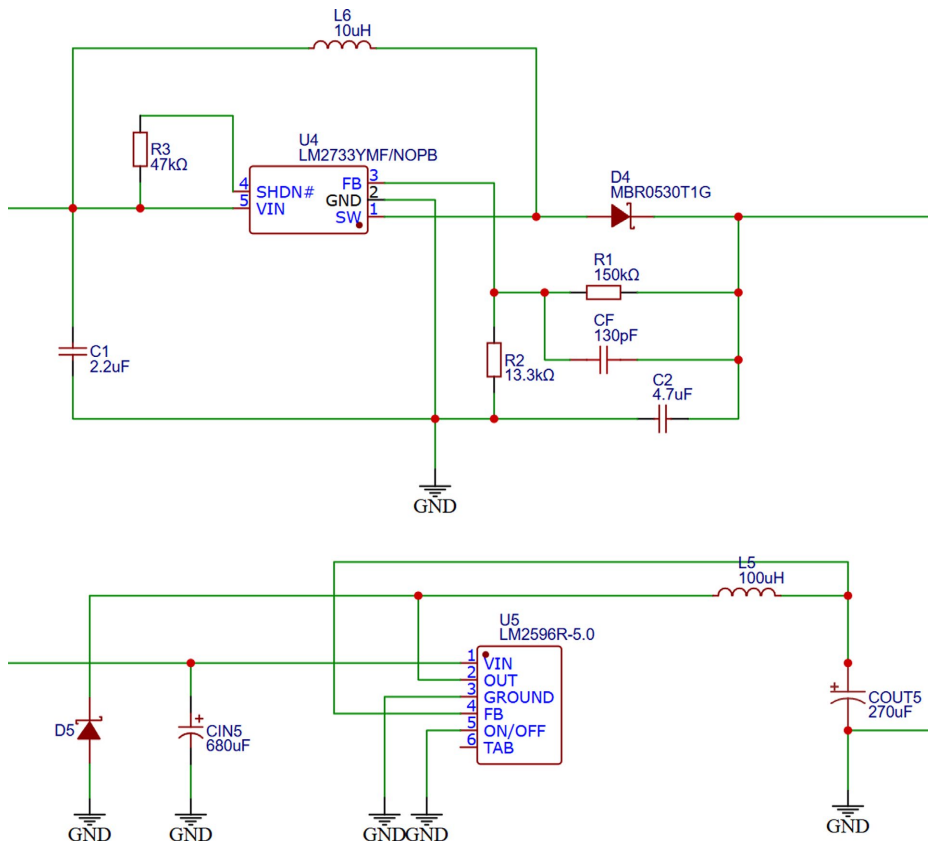


Figure 4. Step-up regulator module
图 4. 升压稳压模块电路

对开关电源产生的高频纹波进行进一步抑制,从而提高输出电压的稳定性。此外,在输入端设置瞬态抑制二极管,用于吸收电源线路中的瞬态过压或浪涌电压,以增强系统电源的抗干扰能力和可靠性。经过上述降压处理后,系统可获得稳定的 3.3 V 和 5 V 电源,并通过电源接口分配至各功能模块。

在升压稳压部分,为满足电阻尺和倾角传感器对较高电压的供电需求,设计了 16 V 升压电源电路。该电路以 LM2733YMF/NOPB 为核心控制芯片,通过升压型 DC-DC 拓扑结构实现稳定电压输出。输入电压通过 VIN 端进入芯片后,与外接电感 L6 (10 μH)构成升压电路。当芯片内部开关管导通时,电感储存能量;当开关关断时,电感释放能量并通过肖特基二极管 MBR0530T1G 向输出端提供电能,从而实现电压升高。

在输出端通过滤波电容 C2 (4.7 μF)对输出电压进行滤波,以减小输出纹波。电阻 R1 (150 k Ω)与 R2 (13.3 k Ω)构成反馈分压网络,并连接至 FB 引脚,用于检测输出电压并实现闭环调节,使输出电压稳定在 16 V。同时在反馈回路中加入补偿电容 CF (130 pF),用于改善系统的频率响应特性并提高环路稳定性。在输入端设置电容 C1 (2.2 μF)用于抑制输入电压纹波并提高电源瞬态响应性能。

通过上述降压与升压电源设计,系统能够获得稳定的 3.3 V、5 V 和 16 V 多路电压输出,为主控电路、激光测距系统以及各类传感器提供可靠电源,从而保证接触网几何参数测量系统的稳定运行。

2.4. 激光测距系统

激光测距系统是铁路接触网几何参数测量仪中的关键组成部分,其主要功能是测量激光发射点到目标位置之间的距离,为接触网导高及相关几何参数的计算提供基础数据。该系统主要由激光测距模块、温度控制电路以及热电制冷器(TEC)等部分组成。主控单元通过串口通信对激光测距模块进行控制并读取测距数据,从而实现对接触网导高等几何参数的精确测量,系统见图 5。

在测量过程中,激光测距模块向目标位置发射激光束,当激光束到达目标表面后产生反射,反射光信号被接收器接收,并通过内部信号处理电路计算激光传播时间或相位差,从而获得激光发射点与目标点之间的距离信息。测量结果经串口通信接口传输至主控单元,由主控系统对数据进行进一步处理,并结合光电编码器获取的角度信息进行计算,从而得到接触网导高等关键几何参数[11]。

根据系统设计要求,激光测距系统的重复性精度(稳定性)需达到 1 mm。为满足该指标,通过前期调研与实验验证,选用国产 M703A 型号激光测距模块,并结合温度控制技术提高测量稳定性。由于半导体激光器的输出功率、波长以及测距精度易受环境温度变化影响,因此在系统中引入温控模块,通过控制激光器工作温度来提高测距系统的稳定性。

在温控结构设计中,采用热电制冷器(TEC)与导热材料相结合的方式实现激光器温度调节。具体实现方法为:将激光头电路板嵌入具有良好导热性能的导热硅胶片中,使其与 TEC 冷端充分接触;TEC 热端

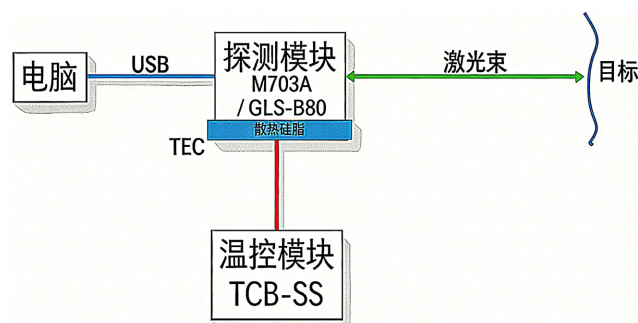


Figure 5. Block diagram of PID-based TEC temperature stabilization for single-point laser ranging
图 5. 采用 PID 控制的 TEC 温度稳定单点激光测距示意图

通过导热硅脂与金属散热结构连接,以增强散热能力,从而形成稳定的热传导路径。同时,温控系统采用 PID 控制算法对 TEC 进行闭环控制。PID 控制器选用广泛应用于半导体激光器温度控制的小型 PCB 温控模块,通过实时监测温度变化并调节 TEC 工作状态,使激光头工作温度保持在稳定范围内[12]。

为了验证温控结构的有效性,对 M703A 型号激光测距模块在 PID 控制的 TEC 温度稳定条件下进行了长时间测量实验。实验结果见图 6,实验结果表明,在温度稳定控制条件下,M703A 激光测距模块在较长时间连续测量过程中能够保持不超过 1 mm 的重复性误差,满足系统对测量稳定性的要求。因此,采用 TEC 温控结构的 M703A 激光测距模块能够满足本系统高稳定性测距的应用需求,为接触网几何参数测量提供可靠的数据基础。

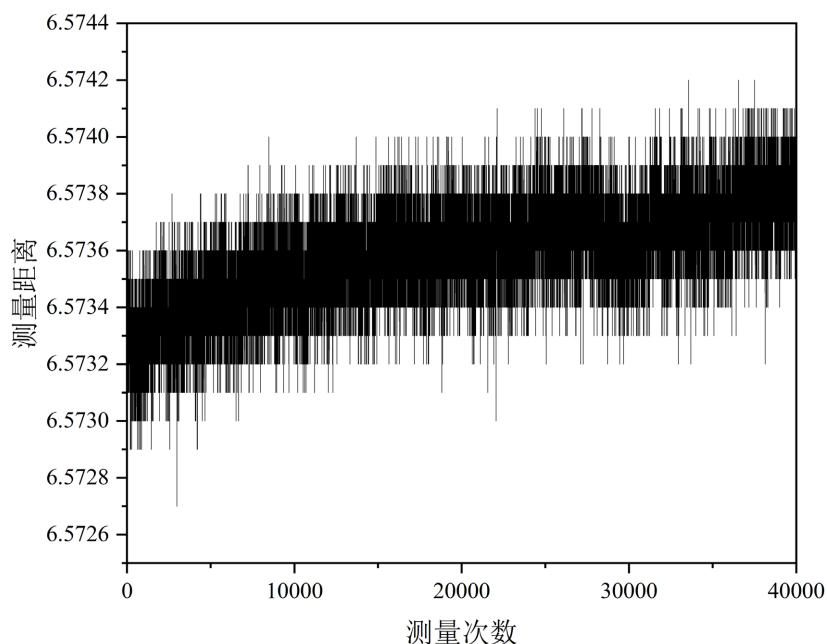


Figure 6. Stability test data graph of M703A under temperature control
图 6. M703A 在温控下的稳定性测试数据图

此外在不同温度下对 M703A 的稳定性表现进行了测量,数据见图 7。该数据显示在不同温度下 M703A 对同一距离获得的测量数据各有差别,这是由温度引起零点漂移,可通过调零来消除这一误差;同时,对于一选定型号的激光头有一最佳温度值,在这一工作点上激光头可以提供很好的测量重复性精度(稳定性) [13],见图 7 中的 26℃。

2.5. 光学测量系统及机械结构设计

为提高激光对准接触线过程的操作便捷性,本文设计了一种光学测量系统,见图 8。激光由测距模块发出后,经由两片安装于上方挠性光学调节架上的反射镜进行光路引导,随后通过半透半反镜射出。通过与半透半反镜同轴布置的光电编码器对其姿态进行精确控制,从而实现激光光束的定向偏转并完成与接触线的对准。系统的转向范围为 30°~120°,角度分辨率为 24 bit,响应时间为 75 ns。

机械外壳是铁路接触网激光测量仪的重要组成部分,机械结构 3D 图见图 9,长 280 mm,宽 118 mm,高 69 mm,公差为 0.1 mm。其主要作用是系统各功能模块提供安装支撑,同时保护内部电路与传感器,提高设备在现场环境中的稳定性与可靠性。根据系统结构与各传感器的安装需求,对设备机械结构进行了整体设计,使激光测距模块、光电编码器、电阻尺以及倾角传感器等部件能够合理布置并保持稳定工

作状态[14]。

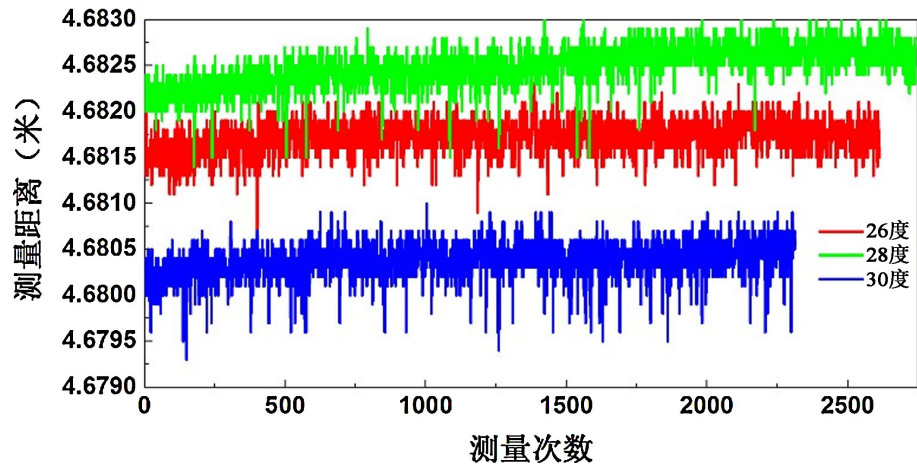


Figure 7. Experimental data of M703A single-point laser ranging at different temperatures
图 7. 不同温度下 M703A 单点激光测距验证性实验数据

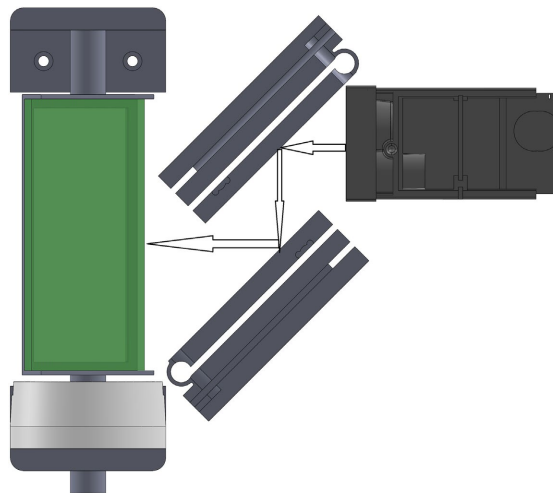


Figure 8. Optical system schematic diagram
图 8. 光学系统示意图

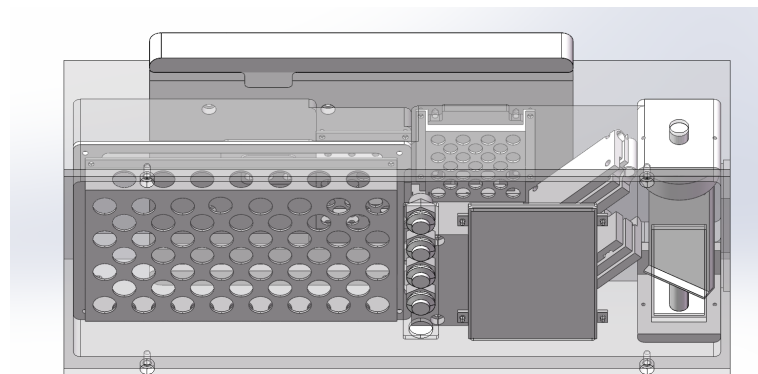


Figure 9. 3D diagram of the mechanical structure
图 9. 机械结构 3D 图

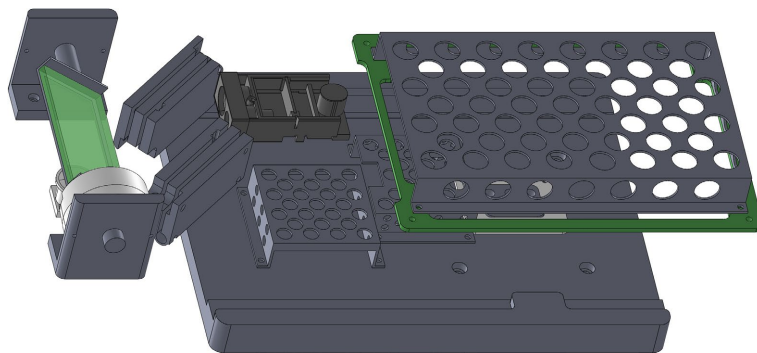


Figure 10. Internal view of mechanical structure

图 10. 机械结构内部图

在结构设计方面, 测量仪外壳采用模块化布局, 见图 10, 将主控电路、激光测距系统及各类传感器分别安装在独立单元内, 并通过机械支架固定, 以降低振动对测量精度的影响。激光测距模块处预留光学窗口, 确保激光能够稳定发射并接收目标反射信号。激光光束的对准通过程序控制光电编码器旋转半透半镜实现。温控模块布置于激光测距模块旁, 倾角传感器置于其后方, 主控电路板位于倾角传感器上方。外壳选用高强度、低质量的铝材, 在保证结构刚性的同时减轻整机重量, 从而提高设备的便携性[15]。

通过合理的机械结构设计, 各功能模块能够稳定安装并保持良好的相对位置关系, 为系统测量精度和长期稳定运行提供了可靠的结构保障。

3. 整机测试与实验分析

3.1. 测试平台搭建

为验证铁路接触网几何参数测量仪的测量性能, 对系统进行了整机测试实验。实验平台主要由激光接触网测量仪样机、标准测量工具以及模拟测量环境组成。实验中利用标准测量尺和固定支架构建测量场景, 通过调整目标物位置模拟不同导高条件, 并使用高精度钢尺或激光测距仪作为参考测量工具, 对系统测量结果进行对比验证。在测试过程中, 将测量仪固定在稳定支架上, 使激光测距模块对准目标位置, 通过主控系统采集激光测距数据以及角度信息, 并计算得到接触网导高参数[16]。所有测量数据通过串口传输至上位机进行记录与分析, 从而完成整机性能测试。产品经过调试, 目前基础功能已完成设计。

3.2. 测量重复性测试

为了验证系统测量稳定性, 在固定测量距离条件下, 结果我们对检测平台倒数第二根接触线进行了实测。实验中将目标板固定在指定距离位置, 保持环境条件不变, 连续采集多组测量数据, 并对测量结果进行统计分析, 测量结果见图 11。

从测量数据可以看出, 样机对接触线高度的测量重复性精度(稳定性)总体表现良好, 绝大多数数据(约 99.9%)的变化在 1 mm 以内, 只有极少数数据(约 0.1%)超出该范围, 这主要是由激光测距模块电路噪声引起的瞬时波动[15]。进一步观察测试过程发现, 在测量初始阶段, 读数呈上升趋势, 其原因在于激光模块启动工作后产生热量, 使模块内部温度升高, 温控模块随之进行动态调节以维持设定温度。在温控系统达到新的稳定状态之前, 测量数据出现短暂漂移。实验中观察到, 该预热和温控平衡阶段持续时间约为 3 分钟, 之后测量读数迅速趋于稳定。这一现象表明, 激光器发热会引起光学元件和激光二极管的温度变化, 从而导致激光波长和光路长度的微小漂移, 对测量结果产生短时影响。在温控模块调节完成并达到热平衡后, 光学系统和电子电路恢复稳定, 从而保证了后续测量的高重复性。针对这一过程, 可以通

过提前预热激光模块、优化温控控制算法或采用低热膨胀材料来缩短预热时间并进一步提高测量精度。

进一步对图 11 中的测量数据进行统计分析, 结果见图 12。统计分布显示, 整机系统导高结果呈现出典型的高斯分布特征, 说明在长期测量过程中, 系统误差主要来源于随机噪声而非系统性偏差, 测量过程具有良好的随机稳定性。在 95% 置信概率条件下, 该组数据的置信区间为 ± 0.66 mm, 表明系统在实际

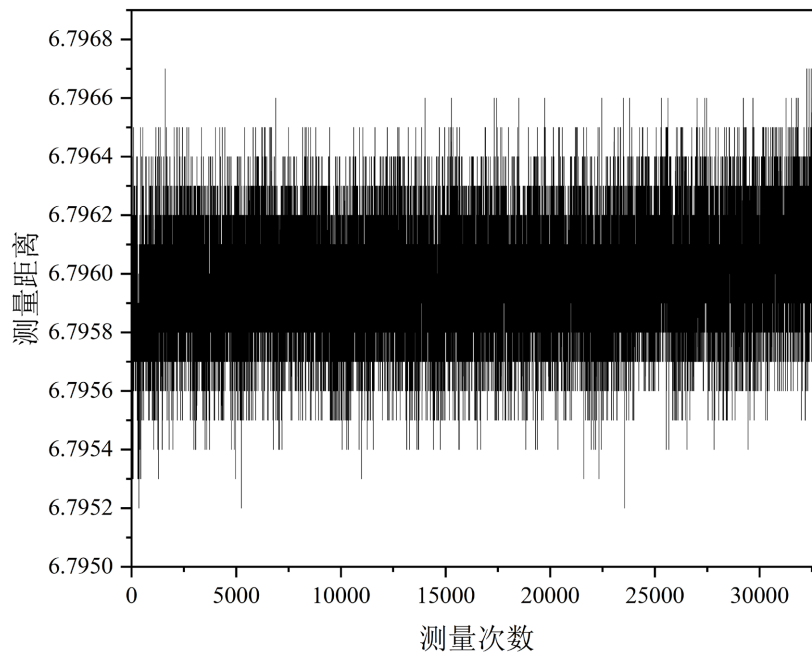


Figure 11. Measurement repeatability (stability) data of the prototype
图 11. 样机测量重复性精度(稳定性)数据

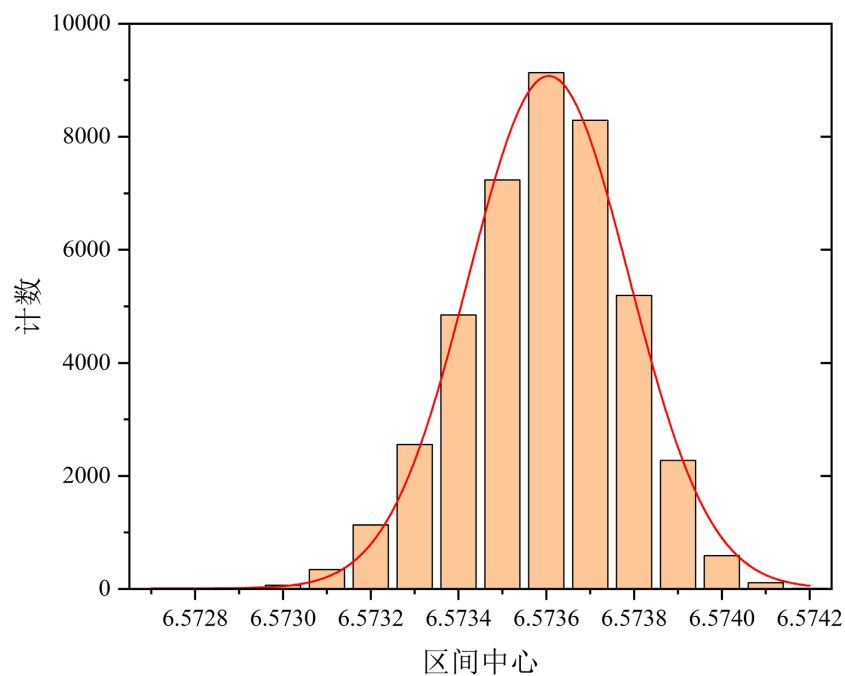


Figure 12. Statistical distribution of measurement results
图 12. 测量结果统计图

工作状态下能够实现亚毫米级的稳定测量精度。

为进一步分析系统在不同时间尺度下的稳定性特征,采用 Allan 方差对原始测量数据进行不确定度评价[16],结果见图 13。根据 Allan 方差曲线的变化趋势,可对该静态接触网测量仪样机的噪声类型及长期稳定性进行系统分析。

在短平均时间区域,即 τ 为 1 秒至 10 秒范围内,Allan 标准差曲线呈现约负二分之一斜率,表明仪器噪声以白噪声为主。 τ 为 1 秒时, $\sigma(\tau)$ 约为 2.0×10^{-4} , 对应角度随机游走系数; τ 为 10 秒时, $\sigma(\tau)$ 降至约 3.0×10^{-5} , 表明平均处理可有效抑制白噪声。

在 τ 为 10 秒至 100 秒区域,曲线斜率逐渐减缓,噪声类型由白噪声向闪烁噪声过渡。 τ 为 100 秒时, $\sigma(\tau)$ 约为 5.0×10^{-6} 。

在 τ 为 100 秒至 1000 秒区域,曲线进一步趋于平缓,闪烁噪声成为主导成分。 τ 为 1000 秒时, $\sigma(\tau)$ 约为 1.5×10^{-6} , 该值反映了仪器的偏置不稳定性指标。

整个观测范围内 Allan 方差曲线单调递减,未出现上翘现象,表明仪器不存在显著的速率斜坡噪声或温度漂移效应,长期稳定性优良。

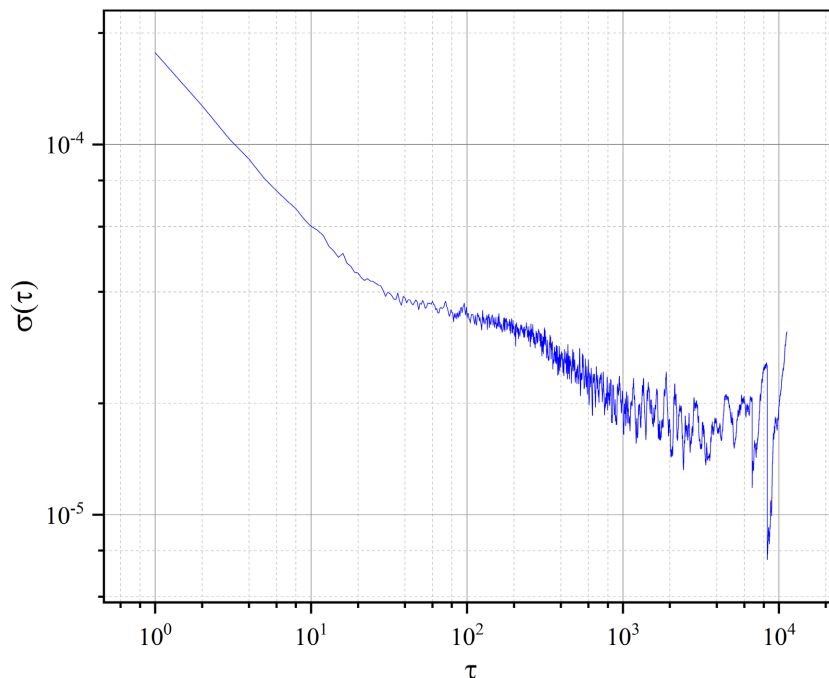


Figure 13. Allan variance curve
图 13. Allan 方差曲线图

3.3. 测试对比

为验证所研制铁路静态激光接触网测量仪的性能,将本系统与市面主流设备(蓝动)进行对比测试[17]。在相同环境条件下,对模拟设置的 6 根接触线进行多次重复测量,并对两种设备的测量稳定性及测量精度进行分析。实验结果见表 3。由测试数据可知,本系统在重复测量过程中数据波动较小,其测量结果稳定性与蓝动设备基本一致,测量值均保持在小数点后一位范围内变化,表现出良好的重复性。在测量精度方面,本系统的绝对误差与蓝动设备处于同一量级,差异较小,具有良好的可比性综上所述,所研制的铁路静态激光接触网测量仪在测量稳定性和精度方面均达到了与主流设备相当的水平,验证了系统设

计的有效性 with 工程应用可行性。

Table 3. Comparison table of contact wire height test data
表 3. 导高测试数据对比表

蓝动导高值(mm)	样机导高值(mm)	导高值差(mm)
5056.4	5056.2	0.2
5332.6	5332.3	0.3
5609.5	5609.4	0.1
5889.7	5889.5	0.2
6169.4	6169.3	0.1
6446.2	6445.9	0.3

3.4. 实验结果分析

通过对整机测试数据进行分析可以看出, 所设计的铁路接触网激光测量系统在测量稳定性和测量精度方面均能够满足系统设计指标。激光测距模块在 TEC 温控结构的控制下能够保持稳定工作状态, 有效降低了环境温度变化对测距精度的影响。同时, 主控系统能够稳定完成多传感器数据采集与处理, 实现导高等几何参数的准确计算。

实验结果表明, 该系统能够实现接触网导高等关键参数的稳定测量, 具有较好的测量精度和可靠性, 为铁路接触网状态检测提供了有效的技术手段。

4. 总结与展望

本文设计并实现了一种基于激光测距技术的铁路接触网几何参数测量系统。系统以主控电路为核心, 结合激光测距模块、数据转换电路、电源稳压电路及多种传感器, 实现了接触网导高、轨距和超高等参数的测量。整机实验结果表明, 在 TEC 温控条件下, 激光测距系统能够保持良好的测量稳定性, 重复性误差控制在 1 mm 以内, 满足设计要求。然而, 本研究主要在实验室理想环境下进行, 系统在实际现场条件下的性能仍需进一步验证。在未来工作中, 需要针对现场应用进行系统结构和测量算法的优化, 以提升测量精度和环境适应能力; 同时, 应加强结构防护设计(防水、防尘、抗振)、电路的 EMI/EMC 防护能力、宽温度范围适应性及快速标定方法的开发。此外, 探索多传感器融合与智能化测量技术, 将有助于进一步提高铁路接触网检测设备的自动化水平与可靠性。

参考文献

- [1] 韩丙虎. 新型激光接触网全参数检测仪的研制[J]. 铁道技术监督, 2007, 35(12): 28-30.
- [2] 陈忠斌, 韦宝泉. 基于 DSP2812 的接触网参数激光测量仪的研究与开发[J]. 仪表技术与传感器, 2013(4): 32-34.
- [3] 葛志武, 张捷, 徐瑾, 杨波. 基于 ARM 和 nRF24L01+ 的无线车门动能测试系统设计[J]. 工业控制计算机, 2016, 29(10): 30-32.
- [4] 何峰, 等. 动态测量技术精度检测系统设计[J]. 测绘科学, 2009, 34(2): 151-153.
- [5] 于志刚, 吴东波, 赵少鹏, 翟瑞占, 李庆卓, 孟令华. 接触网几何参数检测仪的原理及应用[J]. 山东科学, 2009, 22(3): 77-79.
- [6] 李硕, 王代强. 基于 TEC 的高精度温控系统设计[J]. 传感器与微系统, 2020, 39(5): 97-99.
- [7] 刘宇, 刘多纳, 杨晓辉, 杨磊. 无线 Mesh 自组网技术在室内定位的应用[J]. 无线电通信技术, 2018, 44(1): 39-42.
- [8] 赵锐, 张成飞, 孙颖, 李鑫, 刘俊, 唐军. 基于谐振式光学陀螺的 RS422 传输系统设计[J]. 压电与声光, 2018,

40(5): 799-801+806.

- [9] 余海涛, 张丹平. 基于 RS-232/RS-485 接口转换器的半双工串行通信[J]. 工业控制计算机, 2002, 15(11): 53-54.
- [10] 潘传勇, 丁国臣, 陈世夏. 基于 LM2596 的不间断直流电源设计[J]. 现代电子技术, 2013, 36(17): 107-109.
- [11] 刘德生. 刚性悬挂移动式接触网施工技术浅谈[J]. 电气化铁道, 2007(2): 32-35.
- [12] 刘国福. 对我国发展高速电气化铁路接触网的思考和探讨[J]. 铁道工程学报, 2003(1): 122-125.
- [13] 青莉. 接触导线几何参数测量研究: [硕士学位论文]. 成都: 西南交通大学, 2005.
- [14] Fletcher, G.E. (1989) Automatic Measurement of the Position of the Overhead Contact Wire. *International Conference on Main Line Railway Electrification*, York, 25-28 September 1989, 119-123.
- [15] 张韬. 基于图像处理的接触网检测系统研究与改进[J]. 铁道机车车辆, 2009, 29(1): 68-71.
- [16] 杨喆, 孔凡昌, 王保民. 基于单片机的接触网激光测距系统的研究与设计[J]. 企业技术开发, 2012, 31(34): 8-10.
- [17] 济南蓝动激光技术有限公司. 全数字化电气化铁路激光接触网参数检测仪[P]. 中国专利, CN101108592A. 2008-01-23.