

DOI:10.20033/j.1003-7241.(2026)10-0030-08

一种基于多传感器的公路隧道亮度自动检测系统

冯俊杰¹, 赵乐¹, 郝旭¹, 杨建华², 霍长灵², 张超²

(1. 陕西高速公路工程试验检测有限公司, 西安 710086; 2. 西安工业大学, 西安 710021)

摘要:针对传统的路面亮度检测方法依赖人工手持检测设备,存在工作量大、检测效率低和安全风险高等问题。为了提升检测效率,减少人工操作,并能在不同环境条件下保持较高的准确性,设计一种公路隧道亮度自动检测系统。设计一种公路隧道亮度自动检测系统。该系统基于车载计算平台,集成照度计、成像亮度计和激光传感器等多种传感器,采用实时数据采集与动态亮度加权算法相结合的方法,提高亮度数据的采集精度和稳定性。同时,结合车辆位置信息与环境适应性设计,实现隧道亮度的高效、精准检测。综合验证结果表明,该系统能够快速、稳定、连续地检测隧道照明情况和亮度分布,有效地解决了隧道亮度检测人力成本高、试验检测安全隐患大的问题。在保障检测人员安全的同时,也间接提高了公路隧道的运营安全。自动检测系统能有效提高道路照明质量评估的精度,为公路隧道照明维护提供可靠的技术支持。

关键词:隧道亮度检测;车载自动化系统;多传感器;人机交互;动态亮度加权算法;公路隧道

中图分类号: TP274;TP212;U453.7;U459.2

文献标志码: A

文章编号: 1003-7241(2026)10-0030-08

A highway tunnel brightness automatic detection system based on multi-sensor

Feng Junjie¹, Zhao Le¹, Hao Xu¹, Yang Jianhua², Huo Changling², Zhang Chao²

(1. Shaanxi Expressway Engineering Test and Inspection Co., Ltd., Xi'an 710086, China;

2. Xi'an Technological University, Xi'an 710021, China)

Abstract: The traditional road brightness detection method relies on manual handheld detection equipment, which has problems such as large workload, low detection efficiency, and high safety risks. In order to improve detection efficiency, reduce manual operation, and maintain high accuracy under different environmental conditions, a highway tunnel brightness automatic detection system is designed. An automatic brightness detection system for highway tunnels is designed. The system is based on a vehicle mounted computing platform, integrating multiple sensors such as illuminance meter, imaging brightness meter, and laser sensor. It adopts a combination of real-time data acquisition and dynamic brightness weighting algorithm to improve the accuracy and stability of brightness data acquisition. At the same time, by combining vehicle location information with environmental adaptability design, efficient and accurate detection of tunnel brightness can be achieved. The comprehensive verification results show that the system can quickly, stably, and continuously detect the lighting situation and brightness distribution of tunnels, effectively solving the problems of high labor costs and large safety hazards in tunnel brightness detection. While ensuring the safety of inspection personnel, it also indirectly improves the operational safety of highway tunnels. It can effectively improve the accuracy of road lighting quality assessment and provide reliable technical support for the maintenance of highway tunnel lighting.

Keywords: tunnel brightness detection; vehicle-mounted automatic system; multi-sensor; human-machine interaction; dynamic brightness weighting algorithm; highway tunnel

隧道作为现代公路交通系统的重要组成部分,其照明质量不仅影响驾驶员的视觉舒适性,还直接关系到行车的安全性^[1]。隧道内环境光线复杂,传统的隧道亮度检测方法通常依赖于人工手持检测设备,存在操作烦琐、效率低下以及数据误差较大的问题,同时因检测环境的特殊性,还存在一定的安全风险^[2]。因此,传统方法不仅无法满足日益增长的交通安全管理需求,也限制了隧道照明质量维

护的精确度和效率。

近年来,随着车载自动化检测技术的快速发展,多传感器融合与嵌入式控制技术在亮度检测领域逐步应用。相比传统方法,车载自动检测系统能够实时采集隧道亮度数据并进行智能分析,有效提升检测效率与可靠性^[3-5]。然而,由于隧道环境中光照条件多变、车辆行驶速度不同等因素,目前的自动检测系统在数据处理的精确性和系统

收稿日期:2025-01-23;录用日期:2025-03-10

基金项目:陕西省交通运输厅交通科研项目(24-102X)。

作者简介:冯俊杰(1982—),男,硕士,高级工程师,研究方向为智能检测技术,试验测试技术。

通信作者:杨建华(1980—),男,副教授,研究方向为智能检测,智能交通。

引用本文:冯俊杰,赵乐,郝旭,等.一种基于多传感器的公路隧道亮度自动检测系统[J].自动化技术与应用,2026,45(10):30-36,54.(Feng Junjie, Zhao Le, Hao Xu, et al. A highway tunnel brightness automatic detection system based on multi-sensor[J]. Techniques of Automation and Applications, 2026, 45(10):30-36,54.)

稳定性上仍面临诸多挑战。

本文针对隧道亮度检测存在的效率低、误差大和人工操作强度高等问题,设计了一种公路隧道亮度自动检测系统。该系统基于车载计算平台,集成照度计、成像亮度计和激光传感器等多种传感器,采用实时数据采集与动态亮度加权算法相结合的方法,提高了亮度数据的采集精度和稳定性。同时,结合车辆位置信息与环境适应性设计,实现了隧道亮度的高效、精准检测。

通过实验验证,该系统在复杂隧道环境中展现出良好的实用性和可靠性,为公路隧道照明质量的自动化评估与维护提供了技术支持与方法参考。

1 系统框架

本章主要介绍系统整体架构设计,内容包括硬件设计、算法设计和软件设计三部分。硬件设计涉及系统架构和传感器选型。算法设计负责处理传感器采集的数据,并根据车辆位置设计加权权重方案以计算隧道亮度。软件设计包括自动数据采集触发程序和上位机应用软件的开发^[6-8]。本章系统框架如图1所示。

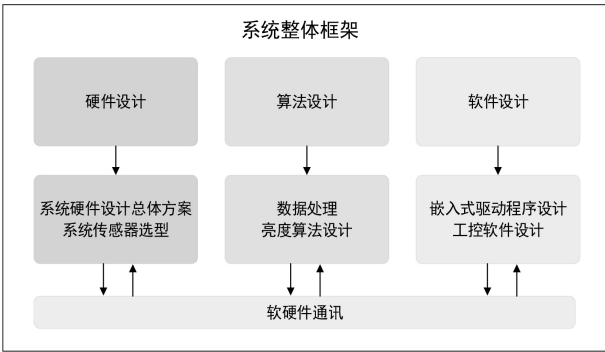


图1 系统整体框架

Fig. 1 The overall framework of the system

2 硬件设计

2.1 系统硬件设计总体方案

系统硬件设计总体方案如图2所示,其包含了该系统的电源供电方案、各类传感器与主控板,上位机之间的通信、数据处理以及软件设计。

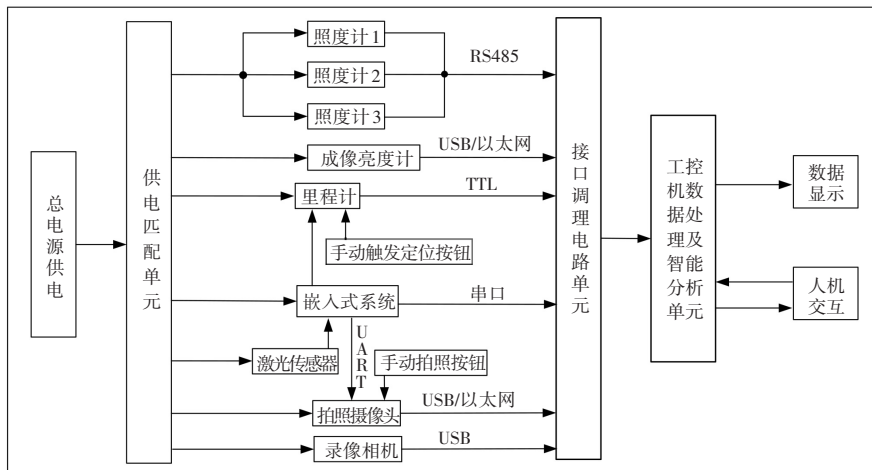


图2 系统硬件设计总体方案

Fig. 2 Overall design plan for system hardware

系统总体架构设计以车载工控机为核心,结合多种传感器和嵌入式平台,构建了高效的数据采集、处理与控制系统。传感器通过车载计算机与嵌入式平台互联,实时采集隧道及道路表面亮度数据、车辆位置及相关环境信息。

2.2 系统传感器选型

系统传感器的车载布局如图3所示,以车载工控机为核心,集成照度计、成像亮度计、激光传感器和里程计,实现数据采集、处理与通信的闭环控制。照度计型号为KM9562B,量程为0~5 000 lx,分辨率为0.1 lx,精度为±7%,使用RS485通讯,供电为DC 12 V。成像亮度计型号为CX-2B。激光传感器型号为TOFSense-F2,量程为25 m,精度±3.0 cm,抗环境光约为 100×10^5 lx,使用串口通信,供电为DC 5 V。里程计型号为LG953E,输出脉冲8p/转,输出脉冲信号,供电为DC 8 V。

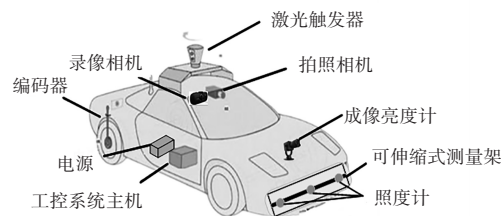


图3 自动检测设备装车示意图

Fig. 3 Schematic diagram of loading automatic detection equipment onto vehicles

照度计采用高精度光电技术,安装在检测车辆前方,能够在不同光照条件下准确测量路面亮度,数据经嵌入式板处理后,传输至车载计算机进行存储。成像亮度计固定于车引擎盖上,具备较强环境适应性,通过内置图像处理芯片实时输出高分辨率亮度图像,为亮度分析提供大视野

数据支持。激光传感器与里程计结合使用,安装在车辆顶部。激光传感器测量检测车与隧道口的距离并触发亮度采集程序。

系统通过光电传感器、成像亮度计和激光传感器的协同工作,实时监测路面亮度,提供精准的数据采集与车辆定位,适应复杂的光照和地形变化。

3 算法设计

3.1 数据处理

在公路隧道路面亮度自动检测系统中,照度计采集的原始数据通过 RS485 协议传输至嵌入式板卡,经处理后再传输至上位机。由于隧道内复杂光照和动态变化,数据常受环境光、传感器误差和传输噪声影响,因此需要对原始数据进行滤波处理,提高准确性和可靠性。本系统采用巴特沃斯低通滤波与均值滤波相结合的方法,先通过巴特沃斯低通滤波器去除高频噪声,保留信号的低频成分,以确保信号整体趋势的准确性。

Butterworth 数字滤波器传递函数为

$$H(z) = \frac{1}{\prod_{k=1}^n (z - z_k)} \quad (1)$$

其中, $H(z)$ 为数字滤波器传递函数, n 为滤波器阶数, z_k 为滤波器在单位圆上的极点, k 代表不同的极点, $k = 1, 2, \dots, k$ 。

针对隧道中不同因素对传感器数据采集产生的干扰,利用巴特沃斯低通滤波器可以实现对通带正常的干扰情况下,加速超过截至频率的高频数据衰减,使得数据更加平滑的同时还能保证数据特点不丢失。

均值滤波^[9]是一种简单的线性滤波方法,其基本思想是用一段时间内的平均值来代替当前数据点,起到平滑信号、去噪的作用。其算法为

$$y(t) = \frac{1}{N} \sum_{i=t-\frac{N}{2}}^{t+\frac{N}{2}} x(i) \quad (2)$$

其中, $y(t)$ 为原始数据在时刻 t 的值, $x(i)$ 为原始数据在时刻 i 的值, N 为滑动窗口大小,为奇数。

3.1 亮度算法设计

嵌入式控制中心对照度计采集的数据进行滤波处理,得到更精确的数据,并通过串口将处理后的数据传输至上位机软件,上位机接收到数据后按照布灯方式、路面类型,确定亮度换算参数。将计算得到的亮度数据和里程计的位置信息在照度计界面上绘制二维曲线图实时显示。

本设计采用三个照度计作为直接亮度检测传感器,将三个照度计并排安装在车辆的前保险杠的位置。本设计使用照度计计算隧道路面亮度采用类似中心布点法的方法^[10-11],按照预先设定的距离 5 m 采集一次。针对照度计的亮度计算,本算法通过三个照度计采集 5 次数据后进行亮度求和加权平均计算得出亮度。照度采集示意图如图 4 所示。

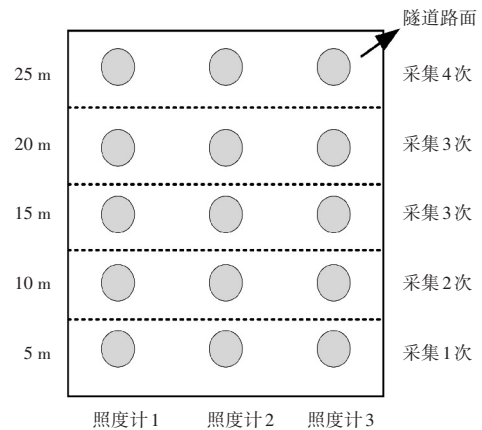


图 4 照度计亮度采集示意图

Fig. 4 Schematic diagram of luminance collection by illuminance meter

PC 读取照度计的数值后,根据界面设置选项选择路面类型,隧道照明灯类型以及布灯方式确定亮度换算参数,得到的数值根据中心布点法计算具体的亮度值。

$$L_{av} = \frac{\sum L_j}{G_M P} \quad (3)$$

其中, L_{av} 为平均亮度值,单位为 cd/m^2 。 L_j 为 3 个照度计在采集区域内第 j 次采集亮度值加权后的总照度。 G_M 为采集次数, M 为次数。 P 为不同路面与布灯方式选择的亮度换算参数。

可根据各个传感器的亮度值计算出平均亮度值。

$$L_j = Q_a L_{1j} + Q_b L_{2j} + Q_c L_{3j} \quad (4)$$

其中, L_{1j} 为照度计 1 第 j 次采集的照度值。 L_{2j} 为照度计 2 第 j 次采集的照度值。 L_{3j} 为照度计 3 第 j 次采集的照度值。

Q_a, Q_b, Q_c 分别为照度计 1, 照度计 2, 照度计 3 的加权系数。 Q_a, Q_b, Q_c 满足关系式:

$$Q_a + Q_b + Q_c = 1 \quad (5)$$

考虑不同隧道位置段(如入口段、过渡段、隧道段、出口段)对照度的影响,本文设计使用加权平均方法对每个位置段的测量结果进行加权,根据不同路段设计不同的加权系数方案^[12-14],具体方案如下。

1) 入口段加权系数方案,由于入口段照明较弱,传感器靠近入口的部分可以给予较高的权重,即

$$Q_a = 0.5, Q_b = 0.3, Q_c = 0.2。$$

2) 过渡段加权系数方案,过渡段的光照较为均衡,因此三个系数可以设计得更均匀,即

$$Q_a = 0.4, Q_b = 0.3, Q_c = 0.3。$$

3) 隧道段,隧道段光照均匀,3 个传感器的权重设计为等同,即

$$Q_a = 0.33, Q_b = 0.34, Q_c = 0.33。$$

4) 出口段,出口段照明较强,靠近出口的传感器可以赋予更大的权重,即

$$Q_a = 0.2, Q_b = 0.3, Q_c = 0.5。$$

路面亮度总均匀度 U_o 是指道路表面的最小亮度值 $L_{\min}$ 和整个道路路面的平均亮度值 L_{av} 的比值。计算公式为

$$U_o = \frac{L_{\min}}{L_{av}} \tag{6}$$

路面亮度总均匀度是道路照明的重要指标,用于评价路面区域内各点的可察觉率。它反映了道路表面作为路标、物体及背景的质量^[15-16]。良好的亮度均匀度可以减少眩光,提升驾驶员视觉舒适度,从而降低交通事故风险。根据道路照明标准,路面亮度总均匀度应不低于0.4。纵向均匀度 U_l 通常指车流方向上的亮度变化,即在道路中轴线上的最小亮度与最大亮度的比值。计算公式为

$$U_l = \frac{L_{\min}}{L_{\max}} \tag{7}$$

亮度纵向均匀度用于限制车道中心线上最亮点与最暗点的亮度差异。与路面总均匀度不同,纵向均匀度反映了照明环境中可能出现的明暗交替带。它是评价机动车道照明质量的关键指标,通常要求纵向均匀度高于整体路面亮度均匀度,一般在0.5~0.7之间。

4 系统软件设计

4.1 软件架构设计

系统软件架构主要分为两大部分:嵌入式软件设计以及上位机应用软件设计,如图5所示。

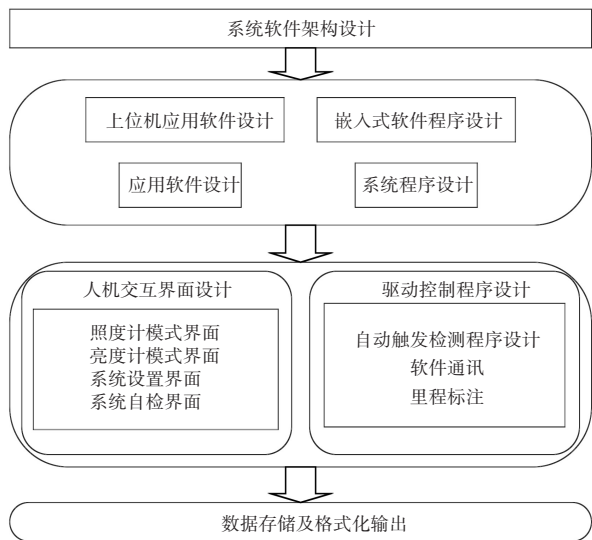


图5 公路隧道亮度自动检测系统软件架构图

Fig. 5 Software architecture diagram of the automatic brightness detection system for highway tunnels

4.2 嵌入式软件程序设计

嵌入式软件设计是对嵌入式驱动程序的设计。数据采集的触发方式包括手动触发和自动触发,设置手动触发的优先级最高,其次是自动触发。自动采集的主要流程为嵌入式处理器接收到触发信号后,嵌入式板自动触发数据采集功能,实时采集传感器数据并通过串口与上位机软件进行通讯将数据上传至上位机进行显示,如图6所示。

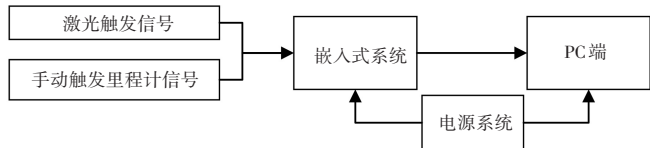


图6 数据采集自动触发

Fig. 6 Data collection is automatically triggered

嵌入式软件负责手动与自动采集触发及数据与位置信息的融合匹配。激光触发模块安装在检测车辆上方,并与嵌入式主控板通讯。当车辆到达隧道入口时,激光模块检测到反射信号,主控中心确认信号有效,并驱动里程计开始计程。同时,嵌入式板通过信号调理单元与工控机通讯,向上位机发送采集信号,启动亮度数据与位置信息的接收。嵌入式软件设计流程如图7所示。

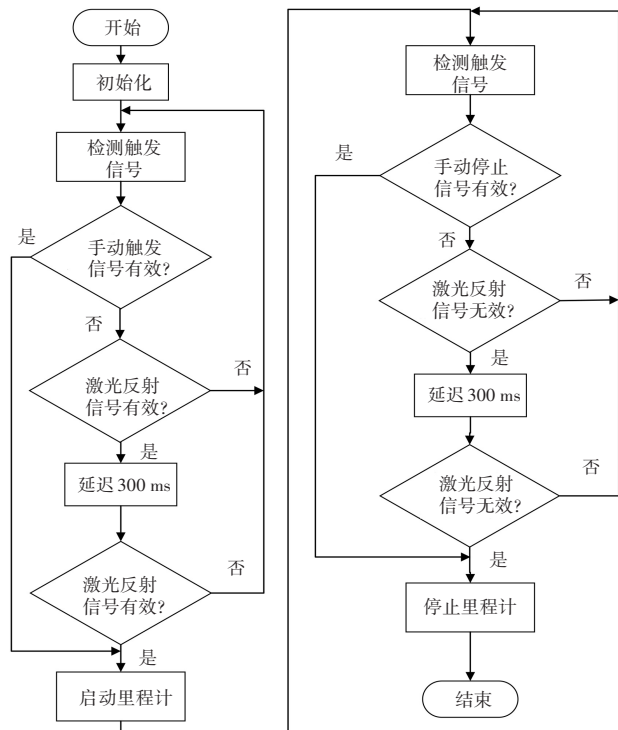


图7 嵌入式软件数据采集流程

Fig. 7 Process of data acquisition for embedded software

4.3 上位机应用软件设计

为提升操作员与公路隧道亮度自动检测系统的交互效率与便捷性,系统设计了功能全面的上位机应用软件。随着车载检测系统数据采集与处理量的迅速增加,软件通过直观的模式设置和数据管理界面,帮助操作人员高效完成操作。

在数据存储方面,软件支持自定义存储路径,提供灵活的文件管理。针对不同隧道路面材质(如水泥路面与沥青路面)的差异,软件设置了亮度换算参数选项,提高数据采集的适用性和操作便利性。同时,为适应高速公路隧道中常见灯具(如LED灯和高压钠灯)的不同需求,设计了相应的灯具类型选项,增强了系统适用性。

为确保照度计采集的数据在软件界面中准确拟合二

维位置及图像,采样频率根据车辆行驶速度和采样距离动态调整。此外,应用软件集成了系统自检功能,可实时监控传感器工作状态,并提供状态显示与比对验证功能,确保设备运行前的参数正常,提升系统可靠性与用户体验。应用软件的流程如图 8 所示。

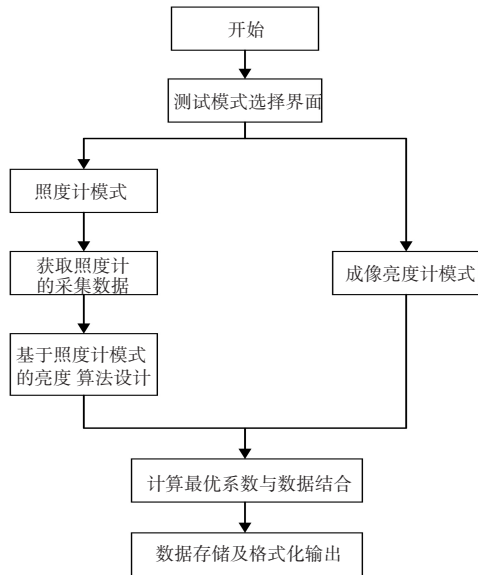


图 8 应用软件流程

Fig. 8 Process of application software

应用软件设计了多种模式界面,操作人员可根据实际需求实时切换模式,以便直观查看各亮度传感器的实时数据和历史记录,提升数据监测的便捷性和精准度。同时,系统配备的监控摄像机能够全程录制车辆检测过程的视

频,为后续分析和故障排查提供影像依据;拍照摄像机专门用于记录隧道名称等关键信息,确保检测数据与具体隧道环境一一对应,实现数据管理的规范化与溯源能力的提升。应用软件初始界面如图 9 所示。

点击“照度计”选项即可进入检测界面,如图 10 所示,在该界面中,系统直观展示多个照度计采集的实时亮度数据,并同步显示车辆所在隧道的具体位置及当前采集的相关信息,方便操作人员实时了解隧道内的光照状况和数据采集情况。为了科学评估隧道照明质量,系统依据《公路工程质量检验评定标准 第二册 机电工程》^[17]中的相关规范,引入了多项关键照明质量指标,包括路面平均亮度、路面亮度总均匀度以及路面亮度纵向均匀度等。这些指标全面反映了隧道光照条件的均衡性与舒适性,从而为隧道照明系统的优化与维护提供重要参考依据。

为了提升系统的可操作性,软件设计中规划了设置界面,旨在提供一个灵活、便捷的操作平台,使得操作员能够根据实际需求自定义系统各项参数和设置。设置界面包括了多个选项,旨在满足不同环境和条件下的操作需求,具体设计如图 11 所示。

在设置界面中,操作人员可以自定义亮度传感器(照度计)的数据存储路径,并根据隧道灯具类型选择亮度计算参数,设定不同的采样间隔。由于灯具类型、路面类型和布灯方式等因素会影响传感器的采集精度,因此需要为不同条件设计亮度换算系数以补偿数据误差。最后,传感器标定在工程中至关重要,是确保系统精度、可靠性、安全性和合规性的关键步骤。



图 9 应用软件初始界面

Fig. 9 Initial interface of the application software



图 10 系统软件照度计界面
Fig. 10 System software sensor interface



图 11 系统软件设置界面
Fig. 11 System software settings interface

5 系统测试

为了验证隧道亮度自动检测系统的功能和性能,系统测试工作按照如图 12 所示流程进行。

如图 13 所示,在不同隧道环境及照明条件下,通过多传感器数据融合处理和动态亮度加权算法,实现了高精度的数据采集,系统按照设定的采样间隔进行数据采集,在车辆高速行驶时,系统能实现实时采集并处理亮度数据,最后在上位机软件界面生成并显示隧道位置和亮度信息的二维曲线图。通过实验验证表明,本系统的亮度检测至数据输出的延迟低于 100 ms,满足实时性要求。

为进一步验证公路隧道亮度自动检测系统的实际性能,本研究开展了大量的系统测试。测试从系统的检测精

度、稳定性和适应性等方面进行,共取出 30 组系统采集的隧道亮度数据。作为对比,按照公路隧道亮度自动检测系统的采样间隔,人工使用手持式照度计进行数据采集,取出了 30 组实际光照强度数据。具体的可视化数据对比图如图 14 所示。

图 14 是实际光照强度数据与“公路隧道亮度自动检测系统”采集的数据二维图像。图 14 展示了检测系统能够准确反映光照强度的变化;系统采集的数据经过算法处理后,输出的数据得到了平滑调整,减少了波动;系统采集的数据与实际光照强度数据之间的差异较小;在整个实验过程中光照数据曲线呈现出较为一致的变化趋势,两者数据基本吻合。通过计算 30 组实验数据的平均误差为 4.97%,满足工程实际检测精度的要求。

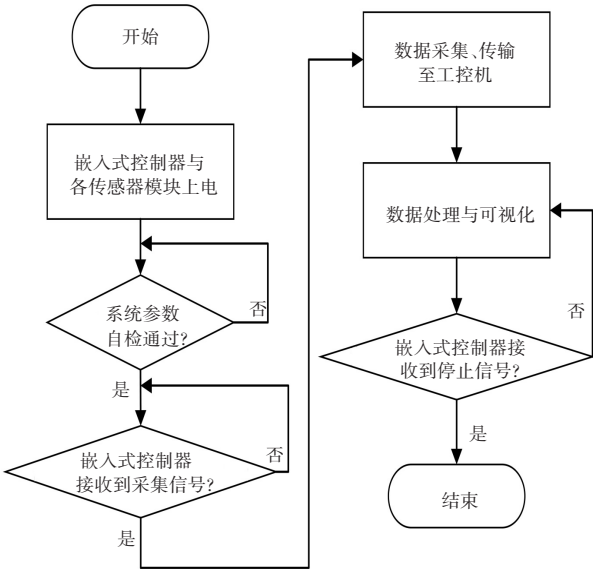


图 12 系统测试流程
Fig. 12 System testing process



图 13 系统测试数据可视化
Fig. 13 Visualization of system test data

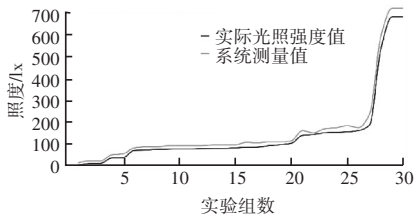


图 14 可视化数据对比图
Fig. 14 Visual data comparison chart

综上所述,系统在实际检测过程中表现出较高的检测精度,稳定性良好,且能够准确、稳定地反映光照强度变化,满足工程实际需求。

6 结论

本文研究并设计了一套公路隧道路面亮度自动检测系统,能够快速、稳定、连续地检测隧道照明情况和亮度分布,有效地解决隧道亮度检测人力成本高、试验检测安全隐患大的问题。在保障检测人员安全的同时,也间接提高了公路隧道的运营安全。

综合测试结果表明,该系统具有高效、精准、稳定和适应性强的特点,能够有效解决公路隧道照明检测中的烦琐、耗时和安全隐患问题,为隧道照明质量的自动化评估提供了一定的技术保障。

(下转第 54 页)