

基于单片机的自动循迹激光导引 智能车 PID 控制系统设计

王楠

(杨凌职业技术学院, 陕西 咸阳 712100)

摘要: 智能车在运行过程中, 如果遇到突然出现的障碍物或者道路塌陷等情况, 容易发生意外; 为保证智能车的辅助驾驶功能和安全性能, 设计一种基于单片机的自动循迹激光导引智能车 PID 控制系统; 加设 MC9S12XS128 单片机处理器, 改装激光器、测速与测角单元、智能车 PID 控制器和智能车驱动模块, 完成硬件系统的优化; 在硬件系统的支持下, 根据激光信号的接收结果, 规划智能车的引导轨迹, 完成自动循迹激光导引工作; 利用硬件设备获取智能车的移动速度、位置和转向角, 实现对智能车实时运动状态的检测; 综合考虑运动参数与规划轨迹之间的偏差, 生成智能车 PID 控制指令, 通过舵机转向控制和驱动速度控制, 完成系统的控制功能; 通过系统测试实验得出结论: 优化设计系统的速度和转向角控制误差分别降低了 5.37 mm/s 和 0.25°, 同时智能车移动平衡度得到明显提升。

关键词: 单片机; 自动循迹; 激光导引智能车; PID 控制系统

PID Control System Design for Automatic Tracking Laser Guided Intelligent Vehicle Based on Microcontroller

WANG Nan

(Yangling Vocational & Technical College, Xianyang 712100, China)

Abstract: If encountering sudden obstacles or road collapses, intelligent vehicles are prone to accidents during operation. To ensure the auxiliary driving function and safety performance of intelligent vehicles, a PID control system based on single-chip microcomputer for automatic tracking laser guidance intelligent vehicles is designed. Install an MC9S12XS128 microcontroller processor, modify the laser, speed and angle measurement unit, intelligent vehicle PID controller, and intelligent vehicle drive module, and complete the optimization of the hardware system. With the support of the hardware system, based on the receiving results of laser signals, plan the guidance trajectory of the intelligent vehicle and complete the automatic tracking laser guidance. Utilize hardware devices to obtain the movement speed, position, and steering angle of the intelligent vehicle, and achieve the real-time detection of intelligent vehicle motion status. By taking into account the deviation between motion parameters and planned trajectory, the intelligent vehicle PID control instructions are generated, and the control function of the system is achieved through the servo steering and driving speed control. Through system testing experiments, the results show that the speed and steering angle control errors of the optimized design system are reduced by 5.37 mm/s and 0.25°, respectively, while the mobile balance of the intelligent vehicle is significantly improved.

Keywords: microcontroller; automatic tracking; laser guided intelligent vehicle; PID control system

0 引言

智能车是一种集辅助驾驶、驾驶决策等功能于一体的综合系统, 能够自动驾驶、自动避障、识别交通标志和建立车辆周围的地图等, 它还可以通过连接到云端的传感器和其他传感器, 以获取有关周围环境的信息, 并使用该信息来改进自动驾驶性能。自动循迹激光导引是智能车的重要功能之一, 主要是指利用激光器和光电传感器实现自动导航的技术。其核心原理是利用激光束的反射原理, 通过发射激光束并接收其反射光, 实现对物体位置的检测和判断, 可以实现对各种形状和颜色的物体进行精准的定位和

追踪。但当车辆面临复杂交通环境、交通标志不清晰或道路状况不理想时, 自动循迹激光导引智能车可能无法准确判断和处理各种情况, 导致导引错误或无法正确执行。为了提高智能车的安全性, 需要设计一种自动循迹激光导引智能车 PID 控制系统。

现阶段发展较为成熟的控制系统包括: 文献 [1] 提出的基于视觉路径识别的智能车控制系统、文献 [2] 提出的基于自适应动态滑模控制的智能车控制系统和文献 [3] 提出的基于自适应 RBF 神经网络的智能车控制系统。其中文献 [1] 提出系统以 MK60DN512ZVQ10 控制器为核心, 采

收稿日期: 2024-01-19; 修回日期: 2024-04-23。

基金项目: 杨凌职业技术学院科研项目 (ZK22-41)。

作者简介: 王楠 (1988-), 女, 硕士, 讲师。

引用格式: 王楠. 基于单片机的自动循迹激光导引智能车 PID 控制系统设计[J]. 计算机测量与控制, 2024, 32(9): 184-191.

用 OV7725 视觉传感器获取赛道的二值化图像，通过图像处理识别赛道路径，通过增量式编码器测量实时车速，采用 PID 控制算法控制舵机的转向和驱动电机的转速，实现对智能车的控制功能。文献 [2] 提出系统建立了以广义纵向力导数项为控制输入的车辆纵向动力学模型，并基于反步法构建了保证车速与纵向加速度同时收敛于期望值的新型滑模函数。利用 RBF 神经网络对控制律中的未知干扰量进行自适应补偿，根据执行器选择模块，将期望广义纵向力转换为执行层期望控制输入，从而完成了系统的控制功能。文献 [3] 提出系统基于智能车动力学方程的基本形式，对系统的不确定性进行了分析。接着，利用神经网络的逼近特性，对分析结果中的不确定项进行了整体逼近。基于自适应 RBF 神经网络控制方法设计了控制律，并通过李雅普诺夫稳定性分析方法设计了自适应控制律。然而上述系统在位置、速度、平衡性等方面，控制能力还有提升的空间。

为此，引入单片机设计自动循迹激光导引智能车 PID 控制系统。单片机是一种微型处理器，通常指嵌入式微控制器，它具有处理器核心、存储器、输入输出接口和定时/计数器等功能。PID 控制也就是比例积分微分控制，根据实际值与预期值的偏差，实现控制功能。利用单片机对自动循迹激光导引智能车 PID 控制系统进行优化设计，以期能够提升系统的控制功能，从而提高智能车的驾驶体验感和辅助功能。

1 自动循迹激光导引智能车 PID 控制硬件系统设计

从硬件方面来看，自动循迹激光导引控制系统由激光器和控制器组成，其中激光器是核心部件，能够产生高强度、高单色性的激光束。激光束经过透镜聚焦后，发射到待测物体上，当激光束照射到物体表面时，分别被吸收和反射。被反射的激光光束进入光电传感器，被光电传感器接收到后，产生电信号。控制器是智能部分，它能够根据光电传感器接收到的信号，对自动循迹激光导引进行控制和调节。根据激光器的工作原理，结合系统的控制功能需求，对硬件系统中的处理器、传感器等元件进行改装调整。

1.1 MC9S12XS128 单片机处理器

优化设计自动循迹激光导引智能车 PID 控制系统中的处理器以 MC9S12XS128 单片机作为核心元件，该元件的结构如图 1 所示。

图 1 表示的 MC9S12XS128 为 16 位单片机，包括 MC33886 驱动、OV6620 信息采集、RS232 通信、舵机控制、车速检测等模块。作为 Freescale 公司 16 位单片机的主流产品，其总线频率可以高达 80 MHz。这款单片机的一大特点是其在线编程功能，支持在线写入、擦除以及程序的在线下载。在运行应用程序时，CPU 的寄存器以及存储器等的瞬间数值和信息可以实现动态的获取。

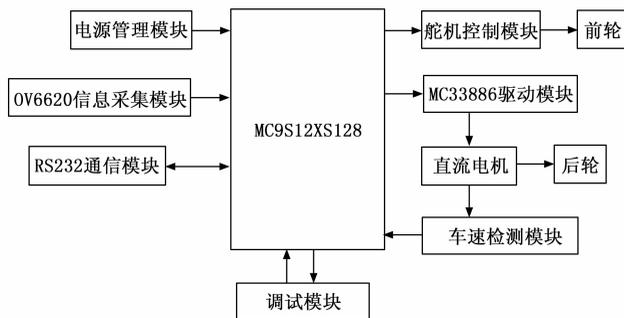


图 1 MC9S12XS128 单片机结构图

1.2 激光器

激光器加设的目的是为自动循迹激光导引功能提供硬件支持^[4]，系统中安装的激光器由发射端、接收端等部分组成，激光器工作时，利用激光发射二极管向智能车方向及其移动环境中发射激光脉冲，激光信号会在大气环境中传播并散射，并被智能车以及环境中的障碍物等实体进行吸收^[5]。设计系统中激光器的工作原理如图 2 所示。

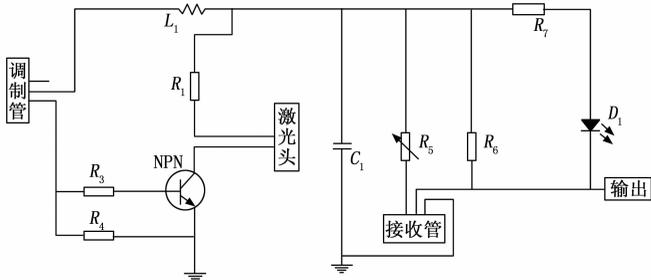


图 2 激光器工作原理图

激光发射端与接收端采取两对一的形式，上排传感器具有 45 厘米的前瞻性，而下排传感器的前瞻性则为 15 厘米^[6]。通过 74LS04 反相器驱动激光发射端以 180 kHz 的频率发射激光，照射到智能车的移动环境中，由相应的接收端接收反射光。

1.3 测速与测角单元

为实现对智能车实时运行状态的精准检测，安装测速单元和测角单元，其中测速元件采用的是光电编码器，在工作过程中，通过将旋转编码器的脉冲输出端口连接到 K60 的输入捕捉口，并采用程序对脉冲进行累加计数，该系统可以在旋转一圈时输出固定数量的脉冲。通过设定单片机内部定时器模块，在单位时间内对接收端口进行脉冲计数，从而实现车速采集^[7]。使用时将其安装在智能车电机主轴齿轮上，当编码盘转动时，会产生一个脉冲信号，对该脉冲信号进行整形处理后的输出结果即为测速结果。测速工作电路如图 3 所示。

图 3 中的电阻器 R1 是一个限制电流的装置，它能在光通过编码器板时导通光敏三极管，因此在射极上形成一个电流。这个电流经过 R2 生成一个用来控制三极管开关的电压。三极管集电极和 PLC 的输入端口相连，三极管接通后，

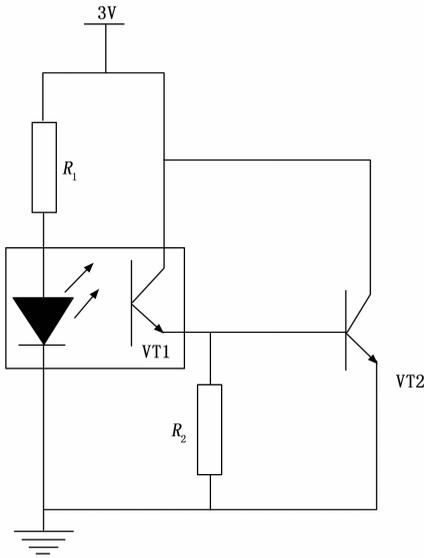


图 3 智能车测速电路图

X 口将输出一个信号。光敏三极管脉冲产生的波形有不规则性，无法被 PLC 直接辨识，所以在这里采用三极管进行整形。利用一个加速度传感器来获得智能车辆的实时转向角度^[8]。加速度传感器可以测定由物体移动引起的重力加速度。在此基础上，通过对智能车辆在 Z 轴方向的加速度进行监测，获得其在这个方向上的加速度，最后求出智能车辆的倾斜角。

1.4 智能车 PID 控制器

综合考虑智能车的工作原理，将优化设计系统中的控制器分为舵机控制、电机控制等多个部分，PID 控制器内部各个组成元件之间的连接结构如图 4 所示。

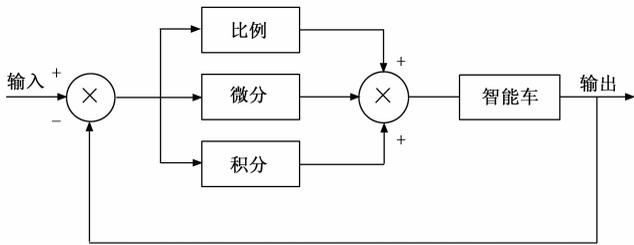


图 4 智能车 PID 控制器连接结构图

舵机控制模块产生 PP5 和 PP6 信号，形成一路 PWM 波，将其连接到舵机控制器中^[9]。按照上述方法可以得出电机控制模块、平衡控制模块的改装结果，并利用供电电路对各个控制模块进行连接，保证控制任务的并行运行。

1.5 智能车驱动模块

从车身构造来看，这款智能车是 4 个轮子，左右两个轮子，分别由两台 9 V 直流电动机驱动。利用单片机的 4 个输入输出端口，实现了对左右车轮马达速度的控制，从而对小车的左旋、右旋进行了控制。智能车辆采用 H 桥型的驱动电路，采用 L298N 作为马达的驱动芯片。L298N 采

用 H 电桥驱动，具有很强的驱动能力，一块 L298N 可以驱动两台 9 V 的直流电动机^[10]。L298N 有四路信号输入口，可实现对左、右两个马达速度的控制，其他接口均为接地。在驱动器与马达之间接有一个稳压三极管，用以维持马达与马达的平衡。

除了硬件元件外，还需要对系统电路的连接情况进行调整，调整目的是实现硬件系统中所有设备的连接，并提供不同等级的电压支持。除此之外，还需要加设一个抗干扰电路，降低各元件运行过程中产生工作信号对其他元件的影响，最大程度的保证硬件系统的运行效果。

2 自动循迹激光导引智能车 PID 控制系统软件功能设计

在硬件系统的支持下，以 PID 理论作为控制原理，完成对智能车运动状态与参数的控制。优化系统的控制原理如下：执行自动循迹激光导引环节，检测智能车环境中的道路位置和障碍物分布情况，生成导航轨迹，以此作为智能车的控制目标。采集智能车的实际运行参数作为控制初始数据，结合初始数据与控制目标之间的偏差，在 PID 控制理论的支持下生成智能车控制指令，并从方向、位置、速度等多个方面，实现系统的自动循迹激光导引智能车 PID 控制功能。

2.1 智能车自动循迹激光导引

智能车自动循迹激光导引的目的是确定智能车控制目标，具体的导引过程如图 5 所示。

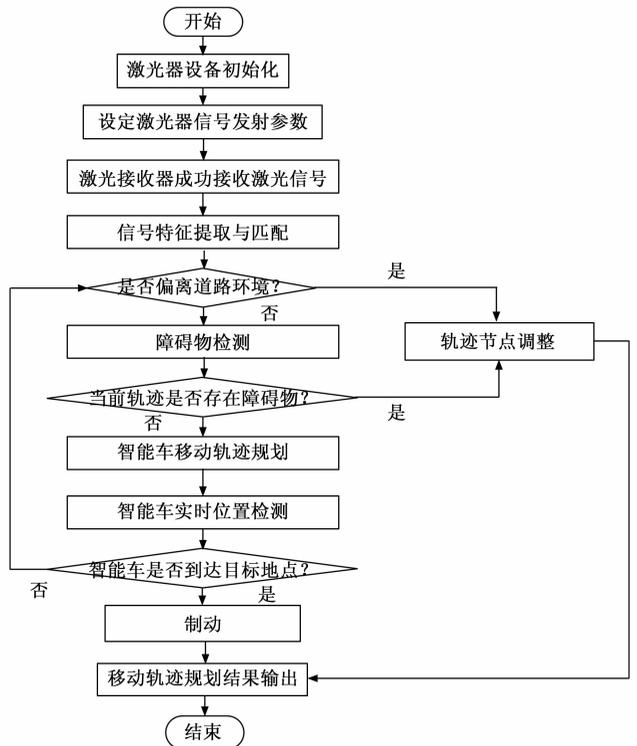


图 5 智能车自动循迹激光导引流程图

在实际的导引过程中，利用激光器发出激光束，这些

激光束在遇到障碍物时会反射回来^[11]。反馈的激光信号被接收器成功接收，并根据信号的特性计算出物体的距离和方位。智能车对移动环境中任意位置的定位结果可以表示为：

$$P(i) = \frac{\sum_{i=1}^n v_i p_i}{\sum_{i=1}^n v_i} \quad (1)$$

其中： v_i 和 p_i 分别表示移动环境中第 i 个激光器的相对输出值和激光器安装位置， n_c 表示的是移动环境中安装激光器的总数量^[12]。根据激光器的信号输出结果，确定当前定位对象的属性，对处于移动道路上的节点进行逐一连接，得出初始激光导引轨迹，可以量化表示为：

$$L_0 = \frac{[P_x(i) - P(i)][P(i) - P_y(i-1)]}{P_x(i+1) - P_x(i-1)} \quad (2)$$

公式 (2) 中 $P_x(i)$ 和 $P_y(i)$ 分别表示移动道路中第 i 个节点在水平和竖直方向上的分量， $i+1$ 和 $i-1$ 分别为第 i 个节点的前后两个相邻节点^[13]。其中 $P_x(i)$ 和 $P_y(i)$ 的计算公式如下：

$$\begin{cases} P_x(i) = P(i) \cdot \cos\theta \\ P_y(i) = P(i) \cdot \sin\theta \end{cases} \quad (3)$$

式中， θ 为激光器对激光信号的发射角度。通过公式 (1) ~ (3) 的联立，即可得出初始激光导引轨迹的生成结果。在此基础上，利用激光信号的反馈结果，确定当前激光导引轨迹中是否存在障碍物，障碍物的判定条件如下：

$$\delta = \frac{L_0 \sum Q[i]}{n_{\text{transmit}}} \geq \delta_0 \quad (4)$$

其中： $Q[i]$ 表示接收端实际接收到的激光信号强度， n_{transmit} 为发射激光落在移动轨迹上的信号数量， δ_0 表示的是激光发射管权重阈值^[14]。若公式 (4) 表示条件成立，则认为对应轨迹点存在障碍物，需要结合激光引导信号对导引轨迹进行调整，任意存在障碍物轨迹点的调整结果如下：

$$\begin{cases} P'_x(i) = \delta P_x(i) \pm \frac{l_{\text{obstacle}}}{2} \\ P'_y(i) = \delta P_y(i) \pm \frac{w_{\text{obstacle}}}{2} \end{cases} \quad (5)$$

式中， l_{obstacle} 和 w_{obstacle} 分别表示障碍物的长度和宽度。按照上述方法在激光信号的支持下，完成智能车在移动环境中的导引轨迹规划，完成自动循迹激光导引任务，并以此作为系统的控制目标。

2.2 检测智能车实时运动状态

通过智能车自动循迹激光导引，计算激光信号的距离和方位，确定智能车在移动环境中的定位和导航目标，提供了导引轨迹规划和路径修正的基础。利用硬件系统中的测角与测速设备，对任意时刻智能车的运行状态进行检测，其中智能车移动速度的检测结果为：

$$v(t) = [P'_x(i) + P'_y(i)] \frac{d}{\Delta t} \quad (6)$$

其中： d 和 Δt 分别表示智能车的实际移动距离和移动

消耗时间。另外智能车在任意时刻的转向角度检测结果为：

$$\varphi = v(t) \arctan\left(\frac{ay}{ax}\right) \quad (7)$$

式中， $\frac{ay}{ax}$ 为加速度计测量的加速度值^[15]。除速度和角度外，还需要对智能车的实时位置进行定位，利用激光器设备，向已知位置发射激光信号，综合考虑接收信号角度、大气衰减规律与接收信号强度，推断出当前智能车与已知位置节点之间的距离和角度关系，从而得出智能车实时运动状态的检测结果。

2.3 生成智能车 PID 控制指令

通过测量智能车的移动速度和转向角度，可以对智能车的运动行为进行监控和控制，确保智能车按照预定的导引轨迹运动，进一步优化智能车的运动状态检测结果，提高导引精度和准确性。根据智能车实时运动状态与自动循迹激光导引轨迹之间的偏差，计算智能车控制量，由此生成 PID 控制指令^[16]。根据自动循迹激光导引轨迹生成结果，计算智能车转向角的控制目标，得出转向角控制量为：

$$K_\varphi = \varphi - \varphi_M \quad (8)$$

式中， φ_M 为转向角控制目标。同理可以得出智能车位置和速度控制量的计算结果，记为 K_p 和 K_v 。在此基础上，在 PID 控制理论的支持下，生成 PID 控制指令。PID 控制原理如图 6 所示。

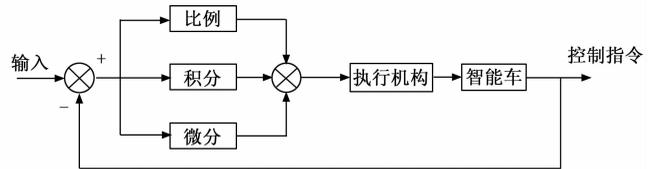


图 6 PID 控制原理图

从图 6 中可以看出，PID 控制包括比例、积分和微分 3 个部分，比例部分对误差进行比例放大，成正比于误差。它是控制系统中最简单和最基础的部分，用于调整系统的增益，积分部分用于消除系统稳态误差，成正比于误差的积分，主要用于调整系统的静态性能，而微分部分成正比于误差的变化率，也就是误差随时间的变化率，主要用于调整系统的动态性能，例如响应速度和稳定性^[17]。结合图 6 表示原理，得出智能车 PID 控制指令的生成结果为：

$$u(t) = \kappa_p \times K_\varphi + \kappa_i \times \int K(t) dt + \kappa_d \times \frac{dK(t)}{dt} \quad (9)$$

其中： κ_p 、 κ_i 和 κ_d 分别表示的是比例、积分和微分的增益系数， $K(t)$ 为 t 时刻的智能车控制量，该变量的计算公式如下：

$$K(t) = u(t)[K_\varphi(t) + K_p(t) + K_v(t)] \quad (10)$$

将控制量的计算结果代入到公式 (10) 中，得出综合控制量的计算结果，并将其输入到公式 (9) 中，即可得出智能车 PID 控制指令的生成结果。

2.4 实现自动循迹激光导引智能车 PID 控制功能

在自动循迹激光导引系统中，生成的 PID 控制指令是

实现自动循迹激光导引的关键。通过检测智能车的实时运动状态和测量与导引轨迹的偏差,计算智能车的控制量,基于 PID 理论,根据当前的误差和控制量参数,生成 PID 控制指令,提高智能车的稳定控制能力。基于此,在 MC9S12XS128 单片机处理器、智能车 PID 控制器等硬件设备的支持下,从方向、速度等方面,通过智能车 PID 控制指令的执行,实现系统的智能车控制功能。

2.4.1 智能车舵机转向控制

智能车的舵机转向控制原理是通过连杆机构将转动转化为位移,从而改变车辆的位置。为了防止车辆在转弯过程中偏离路线,选择使用增量式 PID 控制算法来控制转向舵机。比例系数的选择取决于道路状况和车速。在直道上行驶时,可以适当减小比例系数,使智能车在直道上减少转弯分量,充分发挥其加速性能。若遇到大弯道或直角弯道,则应增加比例系数,使智能车提前减速以做好转弯准备^[18]。在大 S 弯和小 S 弯时,其比例系数应该在以上两者的范围内。积分系数对系统的动态特性有一定的影响,但是当积分系数太大时,则会引起系统延时。这样,集成因子被指定为 0。微分系数的主要功能是快速修正。在低速行驶条件下,对微分系数的修正作用不大。但是在没有微分系数的情况下,智能汽车在高速直线上会发生左右摇摆。所以,差分系数的修正量与路面条件有关,对于直线段,为了防止因过多的修理而造成汽车失稳,宜选用小的差分系数;如遇大弯、直弯时,需增大微分系数,以保证车辆能平稳地通过黑色线条中央;对小 S 曲线,选用中等偏微分系数即可。PID 控制下,智能车舵机的工作情况可以量化表示为:

$$R_{\text{steering engine}} = K(t)e_n \times \frac{e_n}{22} + e_n \times 5 - e_{n-1} \times 4 \quad (11)$$

其中: e_n 和 e_{n-1} 分别表示第 n 和 $n-1$ 次控制下的偏差值。重复上述流程,综合考虑激光导引轨迹类型,完成舵机转向控制,保证智能车的实际行驶轨迹与导引轨迹一致。

2.4.2 智能车驱动速度控制

在智能车的驱动速度控制过程中,首先要获取智能车当前的运动状态信息,综合考虑两个舵机的转向情况、实时速度,根据预设运行目标进行速度控制^[19]。实际运行中控制电机 PWM 信号占空比增值情况如下:

$$\zeta = \kappa_p \times (e_{v_n} - e_{v_{n-1}}) + \kappa_I \times e_{v_n} + \kappa_d \times R_{\text{steering engine}} 2e_{v_{n-2}} \quad (12)$$

其中: e_{v_n} 、 $e_{v_{n-1}}$ 和 $e_{v_{n-2}}$ 第 n 、 $n-1$ 、 $n-2$ 次速度偏差^[20]。在实际的控制过程中,根据控制目标调整比例、积分和微分系数的具体取值,保证智能车速度控制稳定。

在智能车位置、速度等运动参数的控制过程中,需要最大程度的保证智能车的平衡度,避免出现侧翻现象,控制智能车移动的安全性。

3 系统测试

为了测试优化设计基于单片机的自动循迹激光导引智能车 PID 控制系统的控制功能,设计系统测试实验。此次

实验采用白盒测试的方式,基本测试原理为:在配置的智能车移动环境中,设置智能车的控制任务,根据系统的自动循迹激光导引、PID 控制指令生成等步骤,完成对智能车的控制,并收集智能车的实际运动数据作为系统控制功能的测试结果,并与对比控制系统进行对比测试,体现出优化设计系统在控制功能方面的优势。

3.1 配置智能车控制对象

此次系统测试实验选择 TMS320F2812 型号的智能车作为控制对象,该智能车采用的是前轮转向、后轮驱动运行方案,从组成结构上看,由车架、驱动轮、舵轮、传动机构、制动装置等元件组成。选择智能车的总重量为 1 100 g,长度、宽度和高度分别为 388 mm、206 mm 和 104 mm,轮距为 160 mm,轮胎宽/直径为 25 mm/55 mm,功耗约为 10 w。

3.2 布置智能车移动环境

为保证智能车具有一定的控制操作性,对智能车的移动环境进行布置,布置结果如图 7 所示。

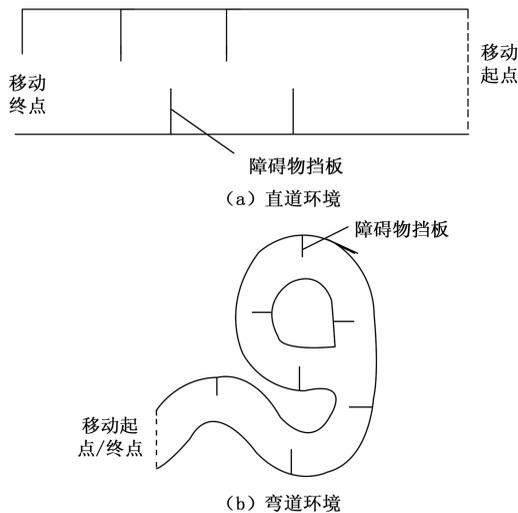


图 7 智能车移动环境示意图

从图 7 中可以看出,生成的移动环境分为直道环境和弯道环境,两种移动环境中均包含障碍物,障碍物的数量和位置均存在差异。移动环境路径总长度分别为 28 m 和 32 m,最大转角为 75°。

3.3 安装硬件系统设备

根据控制系统硬件部分的优化设计结果,将相关硬件设备安装到智能车或布置的智能车移动环境中。其中 MC9S12XS128 原理结构图如图 8 所示。

当 MC9S12XS128 单片机产生灯光显示时,证明单片机成功接入供电电路。测速和测角元件是表面贴装元件。在安装角度传感电路板时,一定要保证陀螺感应器是水平放置的。另外,该激光器还采用了“一”字形布置,使各传感器在轨道上呈一条直线,并把激光器放置在智能车辆中央。通过这种方法,在由曲线转向直道时,仅在引导车辆的重心在直道上时,由控制器来控制舵轮转向,这样就可

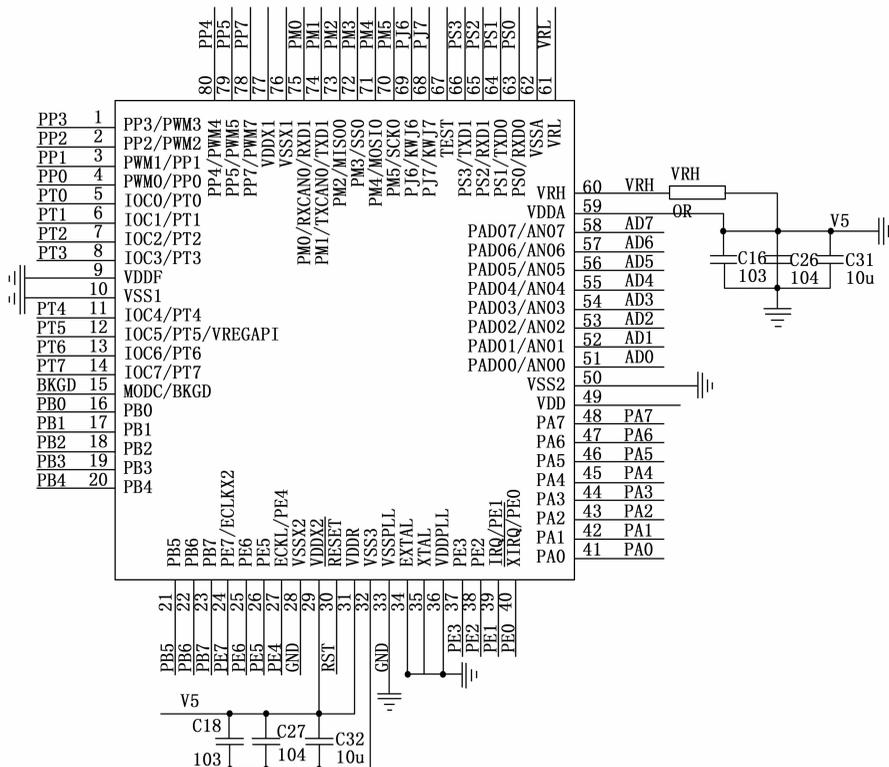


图 8 MC9S12XS128 原理结构图

以大幅度地减少舵轮调节的数量。在硬件设备安装完成后，对硬件系统中的所有设备进行调试，完成所有设备均与智能车适配，且能够在智能车移动环境中正常运行。

3.4 描述系统测试实验过程

根据智能车移动环境的布设情况，生成智能车的控制任务，部分控制任务的生成情况如表 1 所示。

表 1 智能车控制任务表

控制任务编号	直道环境			弯道环境				
	控制目标位置	控制目标速度 (mm/s)	控制目标转向角/(°)	控制目标位置	控制目标速度 (mm/s)	控制目标转向角/(°)		
	x/mm	y/mm		x/mm	y/mm			
1	529	59	120	2.2	143	64	115	0.8
2	456	46	150	1.7	164	97	130	1.1
3	713	111	170	2.5	129	81	40	0.4
4	29	107	70	1.4	183	122	30	0.2
5	120	252	100	1.2	217	197	35	2.1
6	833	63	60	0.8	244	35	75	1.6
7	177	21	80	0.6	356	66	95	0.5
8	395	67	50	1.3	713	121	110	2.1

按照上述方法可以得出智能车在布设移动环境中任意节点位置上的控制任务生成结果。优化设计基于单片机的自动循迹激光导引智能车 PID 控制系统采用 Code warrior

软件进行系统的编写和调试。在控制系统软件功能运行过程中，综合考虑控制任务和移动环境情况，对 PID 控制程序中的相关参数进行调整，具体的调整曲线如图 9 所示。

在硬件设备的支持下，将生成的智能车控制任务输入到控制软件运行程序中，得出智能车的控制结果，如图 10 所示。

根据任意时刻智能车的实际运行情况，得出智能车运行过程中所有控制任务的实现结果。设置基于视觉路径识别的智能车控制系统和基于自适应动态滑模控制的智能车控制系统作为对比系统，在相同的实验环境下，完成对比系统的开发与运行，并得出相应的控制结果数据。其中，基于视觉路径识别的智能车控制系统的参数设置如下：设置视觉传感器的安装高度为 0.31 m，倾斜角度为 43°，最大帧率为 150 帧/s，控制器输出周期为 20 ms；基于自适应动态滑模控制的智能车控制系统的参数设置如下：设置车辆空气阻力系数为 0.3，空气密度为 1.293 kg · m⁻³，车辆迎风面积为 2.8 m²。

3.5 设置系统控制功能测试指标

此次实验分别从速度、转向角和平衡度 3 个方面测试系统的控制功能，其中速度和转向角控制误差指标的测试结果如下：

$$\begin{cases} \epsilon_v = |v_K - v_M| \\ \epsilon_\varphi = |\varphi_K - \varphi_M| \end{cases} \quad (13)$$

式中， v_K 和 v_M 分别表示智能车移动速度的控制结果和控制目标， φ_K 和 φ_M 对应的是转向角度的控制结果和目标。另外，

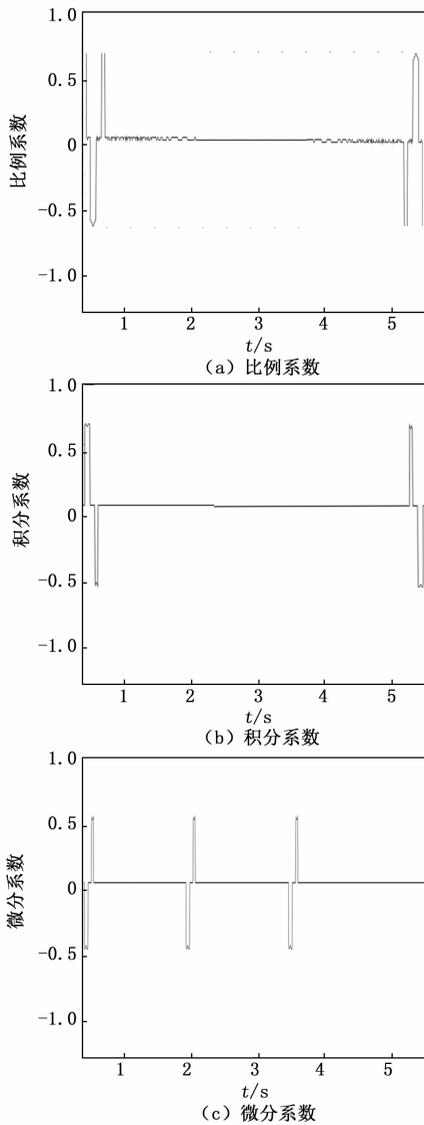


图 9 PID 控制参数调整曲线

智能车平衡度控制功能的测试指标设置为车辆侧倾角，该指标的测试结果如下：

$$\vartheta = \tan\left(\frac{a_c}{g}\right) \quad (14)$$

其中 a_c 为智能车侧向角速度， g 为重力加速度。最终计算出控制误差越小、车辆侧倾角越小，证明对应系统的控制功能越优。

3.6 系统测试实验结果与分析

从直道和弯道两个环境下，重复执行控制指令与数据统计操作，分别得出反映系统功能的测试结果。

3.6.1 直道环境

通过相关数据的统计，得出 3 种系统控制作用下智能车速度和转向角控制误差的测试结果，如表 2 所示。

将表 2 中的数据代入到公式 (13) 中，得出直道环境下 3 种控制系统作用下智能车速度控制误差的平均值分别

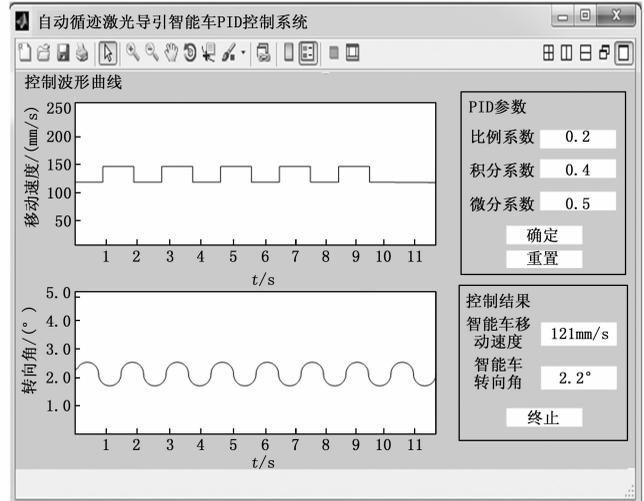


图 10 自动循迹激光导引智能车 PID 控制系统运行界面

为 7.75 mm/s、4.25 mm/s 和 0.63 mm/s，智能车的平均转向角控制误差分别为 0.43°、0.25° 和 0.09°。另外通过公式 (14) 的计算，得出不同控制系统作用下智能车移动平衡度的测试对比结果，如图 11 所示。

表 2 直道环境智能车速度和转向角控制误差测试数据表

控制任务编号	基于视觉路径识别的智能车控制系统		基于自适应动态滑模控制的智能车控制系统		基于单片机的自动循迹激光导引智能车 PID 控制系统	
	实际速度/(mm/s)	实际转向角/(°)	实际速度/(mm/s)	实际转向角/(°)	实际速度/(mm/s)	实际转向角/(°)
1	127	2.9	125	2.7	121	2.2
2	158	2.1	152	1.9	150	1.5
3	175	2.1	173	2.4	171	2.5
4	81	1.7	77	1.6	70	1.3
5	107	1.0	104	1.1	102	1.2
6	69	1.1	66	0.9	60	0.8
7	88	0.2	84	0.3	81	0.4
8	57	2.0	53	1.8	50	1.5

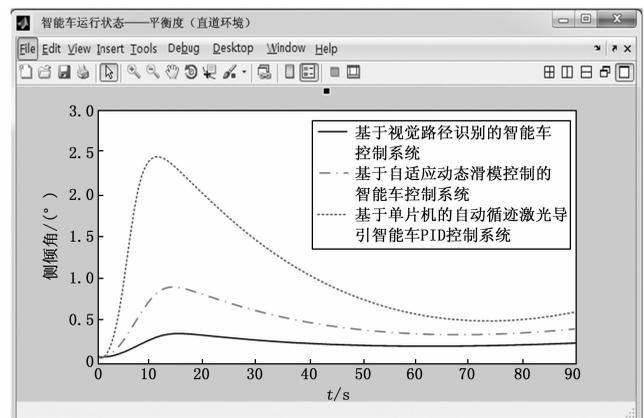


图 11 直道环境下智能车移动平衡度测试对比结果

从图 11 中可以直观的看出，在优化设计系统控制下，智能车的侧倾角更低，由此证明与对比系统相比，在直道环境中优化设计系统的控制功能更优。

3.6.2 弯道环境

在弯道环境下，智能车运动参数控制误差的测试结果，如表 3 所示。

表 3 弯道环境智能车速度和转向角控制误差测试数据表

控制任务编号	基于视觉路径识别的智能车控制系统		基于自适应动态滑模控制的智能车控制系统		基于单片机的自动循迹激光导引智能车 PID 控制系统	
	实际速度 / (mm/s)	实际转向角 / (°)	实际速度 / (mm/s)	实际转向角 / (°)	实际速度 / (mm/s)	实际转向角 / (°)
1	122	0.4	113	0.6	114	0.8
2	139	1.6	133	1.4	130	1.0
3	48	0.9	42	0.7	41	0.3
4	37	0.9	35	0.5	31	0.2
5	44	2.5	36	2.3	34	2.1
6	81	2.2	73	1.9	75	1.5
7	99	0.9	97	0.8	95	0.5
8	118	2.8	113	2.4	111	2.0

通过公式 (13) 的计算，得出弯道环境下两种对比系统作用下平均移动速度的控制误差分别为 7.25 mm/s 和 2.50 mm/s，平均转向角的控制误差分别为 0.53° 和 0.28°，优化设计系统控制下，速度与转向角控制误差的平均值分别为 0.63 mm/s 和 0.05°。弯道环境下平衡度测试结果如图 12 所示。

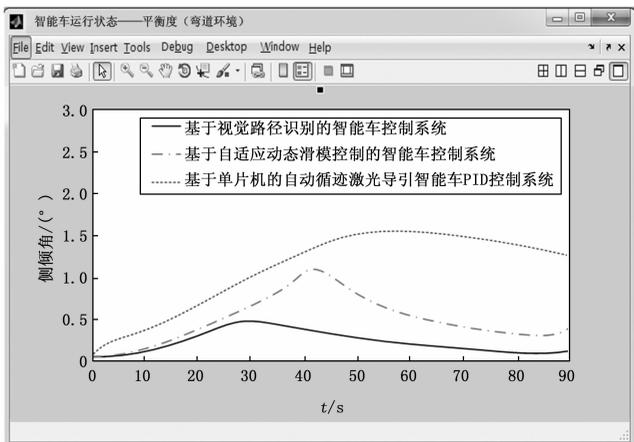


图 12 弯道环境下智能车移动平衡度测试对比结果

从图 12 中可以看出，在弯道环境中，控制系统作用下智能车的平均侧倾角分别为 1.3°、0.5° 和 0.2°，由此证明优化设计系统在弯道环境中对智能车平衡度的控制效果更佳。综合直道和弯道两种环境下系统测试结果，证明优化设计方法在该环境中具有较高的适配度，且能够达到预期控制

效果。

4 结束语

在此次研究中，以单片机为核心，结合激光导引技术，实现了对智能车的精确控制。PID 控制算法在智能车控制系统中起到了关键作用，它通过对误差信号的实时调整，实现了对智能车转向和速度的精确控制。同时，针对不同的道路状况和环境因素，对 PID 控制参数进行了优化和调整，使智能车在各种环境下都能保持良好的性能。从实验结果中可以看出，通过 MC9S12XS128 单片机的应用，能够有效实现对智能车运动状态与参数的有效控制，尽量保证与控制目标一致，且在直道环境和弯道环境中均具有较高应用效果。然而此次系统测试实验仅对某一型号的智能车进行测试，因此得出的实验结果存在一定的偶然性，在未来的研究中，需要进一步优化系统的性能并补充系统测试数据，提高智能车的适应性和可靠性，为实际应用奠定更加坚实的基础。

参考文献：

- [1] 焦冰, 李琳, 邱会然. 基于视觉路径识别的智能车控制系统设计 [J]. 机床与液压, 2021, 49 (12): 78-81.
- [2] 赵健, 杜金朋, 朱冰, 等. 基于自适应动态滑模控制的智能汽车纵向巡航控制 [J]. 汽车工程, 2022, 44 (1): 8-16.
- [3] 吕佳, 邱建岗, 张续光. 智能汽车自适应 RBF 神经网络循迹控制 [J]. 机械设计与制造, 2023 (2): 132-135.
- [4] 宁蕴绯, 花春飞, 李凯勇. 半导体激光器驱动电路开路故障自修复仿真 [J]. 计算机仿真, 2022, 39 (10): 410-413.
- [5] 张平, 江书真, 陈一凡, 等. 基于横纵向综合控制的智能汽车路径跟踪 [J]. 重庆交通大学学报 (自然科学版), 2023, 42 (4): 153-160.
- [6] 方培俊, 蔡英凤, 陈龙, 等. 基于车辆动力学混合模型的智能汽车轨迹跟踪控制方法 [J]. 汽车工程, 2022, 44 (10): 1469-1483.
- [7] 张震, 尤伟强, 肖利华, 等. 基于 CANFD 的智能汽车域控制器软件升级系统设计 [J]. 中北大学学报 (自然科学版), 2022, 43 (4): 321-326.
- [8] 路勇良, 赵军, 李莉莉, 等. 一种进给伺服系统非线性 PID 交叉耦合控制 [J]. 机床与液压, 2023, 51 (19): 46-51.
- [9] 熊屹林, 曾喆昭, 王伟. 非线性欠驱动不稳定系统的自耦 PID 控制方法 [J]. 空间控制技术与应用, 2023, 49 (1): 82-89.
- [10] 苏杰, 曾喆昭, 熊屹林. 不确定混沌系统同步的自耦 PID 协同控制方法 [J]. 控制工程, 2022, 29 (8): 1464-1472.
- [11] 冯宇, 孙丹, 潘登, 等. 基于机载光电载荷图像的无人机自主循迹导引 [J]. 激光与红外, 2023, 53 (3): 464-473.
- [12] 任斌, 冯继和. 基于视觉引导 AGV 的控制系统设计与实现 [J]. 东莞理工学院学报, 2021, 28 (3): 27-32.
- [13] 李松凯, 王海宇, 张永洪, 等. 智能车路径图像高速处理与运动控制研究 [J]. 单片机与嵌入式系统应用, 2015, 15

(11): 30-32.

[14] 程望斌, 陈久, 杨路思, 等. 自动导引小车的优化设计与实现 [J]. 湖南理工学院学报 (自然科学版), 2021, 34 (1): 45-49.

[15] 朱旭, 张泽华, 闫茂德. 含输入时延与通信时延的车辆队列 PID 控制系统稳定性 [J]. 交通运输工程学报, 2022, 22 (3): 184-198.

[16] 辛亮, 杜子学, 杨震, 等. 单轴转向架跨座式单轨车辆的主动控制研究 [J]. 重庆交通大学学报 (自然科学版), 2021, 40 (7): 123-127.

[17] 尹智帅, 何嘉雄, 聂琳真, 等. 基于优化算法的自动驾驶车

辆纵向自适应控制 [J]. 系统仿真学报, 2021, 33 (2): 409-420.

[18] 余米森, 钱玉宝, 黄华宝, 等. 连续工况下基于 PID+LQR 算法的自动驾驶车辆纵向耦合控制 [J]. 科学技术与工程, 2022, 22 (30): 13490-13496.

[19] 屈小贞, 冯浩轩, 李刚. 车辆主动转向与电子稳定控制系统的协同控制 [J]. 科学技术与工程, 2021, 21 (30): 13155-13162.

[20] 罗鹏, 李擎, 董禄. 车辆轨迹的预瞄与模糊分数阶比例-积分-微分控制 [J]. 科学技术与工程, 2022, 22 (17): 7056-7063.

(上接第 20 页)

与标准应变仪测得值, 并进行 8 个通道最大非线性误差计算, 并将结果进行显示。如表 5 为 8 通道最大非线性误差计算。

表 5 8 通道最大非线性误差计算

第 1 路 /%	第 2 路 %	第 3 路 /%	第 4 路 /%	第 5 路 /%	第 6 路 /%	第 7 路 /%	第 8 路 /%
0.27	0.33	0.37	0.37	0.40	0.37	0.40	0.37

由上述表 5 可以看出最大误差出现在第 5 路和第 7 路, 为 0.4%, 而应变测试结果与标准值的最大非线性误差均在 ±0.5% 以下, 满足设计指标和要求^[17]。误差比较小, 从另外的角度说明应变测量系统的精度高, 后续经过多次测量, 系统具有可行性^[18]。图 14 为应变仪实物图。



图 14 应变测试仪实物图

5 结束语

根据整个系统的可行性分析和传感器系统的设计测量要求, 经过多次试验测量应变值和基准设备对应变值进行比较, 结果显示应变测试结果与最大标准值非线性误差低于 0.5%, 性能可靠、稳定, 数据传输比较稳定, 精度较高, 能满足任务要求^[19]。整个系统结构清晰, 测量精度高, 测试仪体积小, 具有很好的工程实用价值高^[20]。

参考文献:

[1] 池玉辰, 李江成. 基于物联网的动态电阻式应变采集仪研发与应用 [J]. 自动化与仪器仪表, 2018 (5): 182-185.

[2] 迟玉锴, 朱香将, 杨红磊, 等. 一种应变式测力系统的研究 [J]. 科技展望, 2016, 26 (36): 308.

[3] 徐丽娇. 多通道应变仪自动标定系统设计 [D]. 上海: 上海交通大学, 2016.

[4] 龙思宇. 基于 PXI 总线的数字应变仪的关键技术研究 [D]. 成都: 西南交通大学, 2008.

[5] 闫振靖, 李伟. 应力应变电测技术在高压电器中的应用 [J]. 黑龙江科技信息, 2013 (21): 95.

[6] 吴其琦. 多功能数字应变仪的设计 [D]. 柳州: 广西科技大学, 2013.

[7] 徐凯. 全电子公共补偿静态应变仪的研制 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2007.

[8] 马敏. AT-1A 型全自动测温电桥的研制 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2010.

[9] 卢磊, 葛良全, 鲍彤. 基于单片机的智能体感代步车设计 [J]. 信息通信, 2013 (9): 80-81.

[10] 吴键. 面向结构监测的智能无线传感网络关键技术研究 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2010.

[11] 董力纲. 高精度多通道应变测量系统研究 [D]. 太原: 中北大学, 2021.

[12] 赵中梁, 潭秋林, 庞俊奇, 等. 多类型应变/温度信号同步采集设计 [J]. 自动化与仪表, 2023 (3): 38.

[13] 陈照章, 成立, 唐平, 等. 基于开关电容 IC 的抗混滤波器研制 [J]. 仪表技术与传感器, 2003 (10): 31-32.

[14] 许海树, 张明旭, 尤若宁, 等. 一种基于 ARM 控制器的心电采集系统的设计 [J]. 中国医学装备, 2017, 14 (6): 3-6.

[15] A study of strain and deformation measurement using the Arduino microcontroller and strain gauges devices [J]. Revista Brasileira de Ensino de Fisica, 2019, 41 (3): 156-159.

[16] 杨磊. 旋转叶片振动采集系统的研究与设计 [D]. 西安: 长安大学, 2013.

[17] 王菊凤, 龙波, 黄徐瑞晗. 静态电阻应变仪测量值的不确定度分析 [J]. 计量与测试技术, 2017 (4): 45-49.

[18] 周少帅. 多通道温度、应变参数监测存储系统的设计与实现 [D]. 太原: 中北大学, 2021.

[19] 陈立奇. 基于单片机的嵌入式多电机智能控制系统设计 [J]. 计算机测量与控制, 2020, 28 (5): 60-63.

[20] 何铭俊, 赵川, 姬云龙. 一种卫星有效载荷自动化测试系统的设计 [J]. 计算机测量与控制, 2020, 28 (8): 126-129.