

一种甲烷浓度监测便携仪集中调校装置的设计

王博文

(中煤科工集团重庆研究院有限公司, 重庆 400039)

摘要:甲烷便携仪作为一款便携式的甲烷气体浓度监测装备,在矿井下的使用量非常大,使用频率非常高。便携仪电池的续航时间只有十几个小时,几乎每天都要充电。按照煤矿安全规程,甲烷便携仪为了保证其测量精度,需要每七天校准一次。基于以上原因,数量庞大的甲烷便携仪调校与充电等日常维护工作非常消耗时间成本与人力成本。该文设计一种智能化较高的甲烷浓度监测便携仪(以下简称甲烷便携仪)调校装置。该装置基于 ARM 和 FPGA 组合的设计架构,可以通过 PC 机以 TCP/IP 总线的方式集中管理控制对便携仪进行大批量充电和调校。该装置的设计及方案极大地降低了大批量甲烷便携仪在生产、使用中的调校的工序时间,极大减轻了工作负担,具有较高的自动化水平。

关键词:甲烷便携仪;甲烷传感器;单总线;甲烷便携仪调校;甲烷便携仪调校装置

中图分类号:TP393

文献标识码:A

文章编号:1673-629X(2025)04-0001-06

doi:10.20165/j.cnki.ISSN1673-629X.2024.0373

Design of a Centralized Calibration Device for Portable Methane Concentration Monitoring Instrument

WANG Bo-wen

(CCTEG Chongqing Research Institute, Chongqing 400039, China)

Abstract: The methane portable instrument, as a portable methane gas concentration monitoring equipment, is widely and frequently used in underground mines. The battery life of the portable device is only a dozen hours, and it needs to be charged almost every day. According to the coal mine safety regulations, the methane portable meter needs to be calibrated every seven days to ensure its measurement accuracy. Based on the above reasons, the daily routine maintenance work such as calibration and charging of a large number of methane portable instruments is largely time-consuming and labor-intensive. We design a highly intelligent methane concentration monitoring portable instrument (hereinafter referred to as methane portable instrument) calibration device. This device is based on a design architecture that combines ARM and FPGA, and can be centrally managed and controlled through a PC via TCP/IP bus for large-scale charging and calibration of portable devices. The design and scheme of this device greatly reduce the calibration process time of large-scale methane portable instruments in production and use, and greatly reduce manual labor with a high level of automation.

Key words: methane portable instrument; methane sensor; single bus; methane portable instrument calibration; methane portable instrument calibration device

0 引言

甲烷便携仪是井下作业人员常用的一种便携式甲烷气体浓度监测终端,作业人员随身携带随时随地监测周围环境的甲烷气体浓度,当周围环境的甲烷气体浓度超限时便携仪发出声光报警信息,提醒作业人员注意作业区火灾爆炸隐患,及时撤离危险区。煤矿安全规定,每个矿区作业人员需配发一台甲烷便携仪,甲烷便携仪需在每七天调校一次确保便携仪监测气体浓度的可靠性^[1-2]。甲烷便携仪在生产和使用中的数量非常庞大,维护和管理成为一大难题。甲烷便携仪为

了正常工作,除了调校之外还需要经常充电,基本上一日一充。虽然甲烷便携仪自带零点和线性调校功能,但在实际的生产应用中会非常繁琐,单机调校耗时耗力。该文研究的调校装置可以有效地解决以上问题。

1 主板功能设计

1.1 调校装置的总体架构

自动老化装置主板主要包括 ARM 核心板及 FPGA 核心板。ARM 主要实现人机交互,FPGA 主要

收稿日期:2024-07-11

修回日期:2024-11-13

基金项目:中煤科工集团有限公司重点研发项目(2023-TD-ZD005-002)

作者简介:王博文(1982-),男,高级工程师,研究方向为仪器仪表与传感器。

实现与 20 路报警仪的单总线通信。ARM 与 FPGA 采用 UART 接口进行通信。

主板原理框图如图 1 所示。

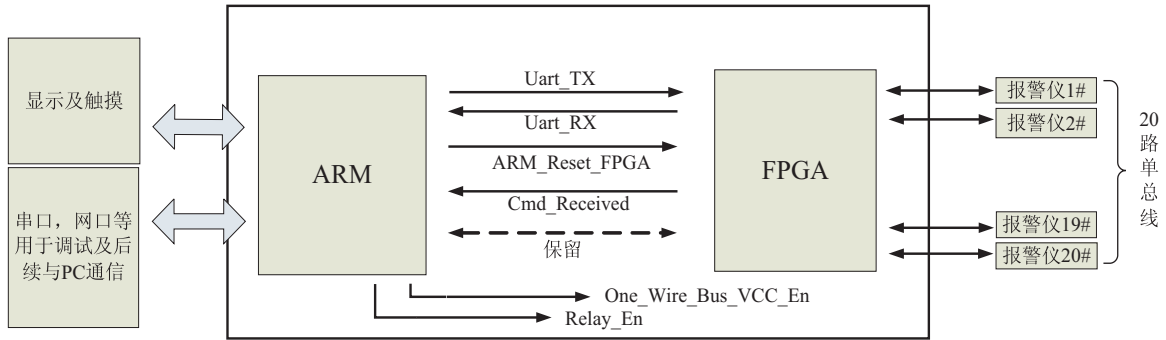
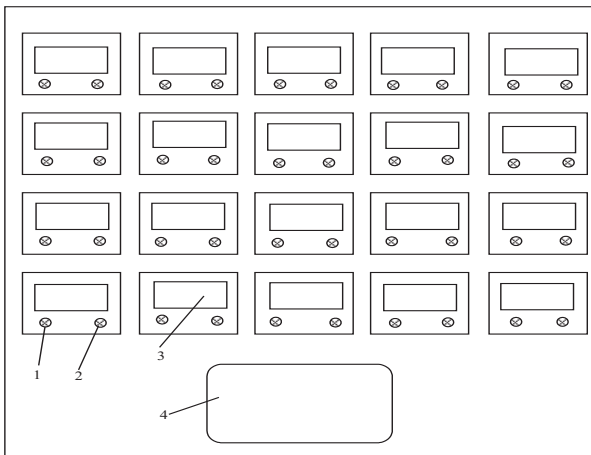


图 1 主板原理框图

1.2 调校装置的功能设计

调校装置有给便携仪充电与向便携仪下发通信指令两个基本功能。调校装置的插槽如图 2 所示, 插槽的低端有两个“正”“负”充电触点。当便携仪插入调校装置内部后, 便携仪底端的“正”“负”充电触点就和调校装置的“正”“负”充电触点相接触。当调校装置对便携仪进行充电时, 每个插槽的两个指示灯左边的红灯就点亮, 当充电充满后, 右边的绿灯就点亮。由于调校装置插槽充电的正极和便携仪的正极连接, 而便携仪的正极又连接一个 GPIO 端口, 这样调校装置切换为通信模式后, 可以通过单总线协议与便携仪通信, 下发各种指令给便携仪^[2-4]。老化装置结构示意图如图 2 所示。



1. 便携仪在线指示灯 2. 便携仪充电指示灯 3. 便携仪插槽
4. 人机交互界面

图 2 老化装置结构示意图

1.3 通信方案设计

考虑到便携仪需要在井下工作人员施工时随身佩戴, 井下没有充电的条件, 所以便携仪的待机时间要长, 才能最大限度保证可靠性。便携仪的单片机采用 stm8 超低功耗方案, 只有一个 8 段数码管 I2C 接口和 GPIO 接口。将便携仪单片机一个 GPIO 接口设置为输入模式, 并和调校装置充电的正极连接。调校装置

的充电正极与 FPGA 的输出管脚相连, FPGA 共输出 20 路管脚与 20 台便携仪通过单总线协议通信^[3]。

用单总线的优势在于节省便携仪的硬件开销, 降低便携仪的功耗, 避免便携仪因功耗过大待机时间缩短导致井下环境的有害气体监测中断。并且可以依托充电接口, 不增加额外的结构的开孔。

单线通信中存在两个写时隙: 写 0 和写 1。主机通过写 0 时隙向从机写 0, 通过写 1 时隙向从机写 1。总线上拉接上拉电阻, 空闲时为高电平。两个写时隙都是以主机先将总线拉低为开始。写 0 时隙: 先将总线拉低 10 ms, 之后再保持 5 ms, 最后释放总线 5 ms。写 1 时隙: 先将总线拉低 10 ms, 之后置高 5 ms, 最后释放总线。在写时隙开始后的 15~20 ms 器件为从机的采样时间。由此判断写入电平。写时隙波形如图 3 所示。

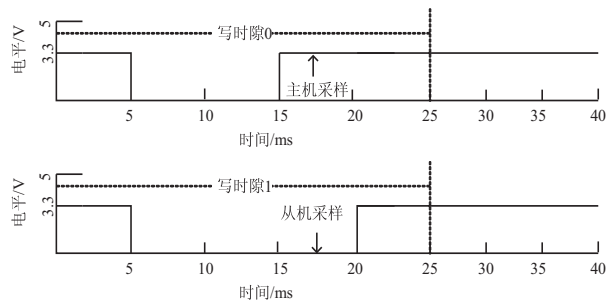


图 3 写时隙波形

总线也有读时隙, 总线上的从机仅在主机发出读时隙时才向主机传输数据。产生过程为主机向从机下发命令(利用多个写时隙完成)之后产生读时隙。每个读时隙为 25 ms, 且由主机发起, 拉低总线 5 ms, 随后释放, 从机在检测到主机拉低的 5 ms 后, 将需要传输的电平置于总线上维持 5 ms, 随后释放总线。主机在读时隙的 15~20 ms 时对总线进行采样^[4-5]。

通信和充电命令由 ARM 处理器通过 RS232 接口下发给 FPGA, 当 FPGA 接收到 ARM 处理器下发的调校命令后就将其转化为单总线的指令下发给便携仪, 便携仪收到后响应相应的指令执行调校或充电动

作。读时隙波形如图4所示。

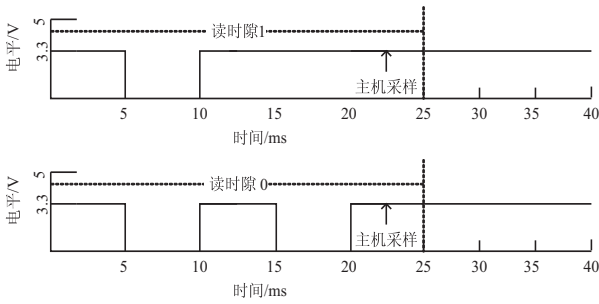


图4 读时隙波形

2 ARM 主板软件设计

2.1 自动零点调校

零点调校分自动、手工调校两种模式。手工调校模式下,需要手工选择具体的便协议,然后点击“开始调校”按钮发送调校指令^[6]。自动调校模式下,将全部便携仪选中,点击“开始调校”按钮,即开始运行自动调校线程,具体的流程如下:

(1) 查询便携仪是否在线。

(2) 查询便携仪实时值,当实时值小于门限值如0.2时,启动定时器计时。

(3) 如果实时值超过门限值则定时器清零,否则定时器超过5s时发送调校指令,开始调校。

(4) 等待调校结果。

每台便协议调校完成后,程序会在对应的小方格上端用红色字体显示“已完成”标识,显示已经调校完成,此时可以拔掉便携仪置入另一台便协议进行调校。以上流程全过程无需操作界面菜单,极大提高了效率,节省了人力。

2.2 自动线性调校

线性调校也分自动、手工两种模式。手工模式下,通过点击选择便携仪对应的网格选中便携仪,再点击“开始调校”按钮进行调校。自动模式下,通过启动自动调校程序,当通标气管插上便携仪的气嘴后,气体达到一定浓度时,触发老化装置下发调校指令进行调校^[7-8]。当调校完成,老化装置收到便携仪发出的“已完成”指令时,将网格的右上角打上“已完成”标志,同时中间小格返回响应时间参数。具体的调校流程如下:

(1) 查询便携仪是否在线。

(2) 便携仪在线时装置查询便携仪实时值,当便携仪浓度实时值大于门限值如0.3时,启动定时器计时。

(3) 定时器计时5s,假设5s内标气的误差小于0.1时,启动调校程序开始调校。假设5s内标气的误差大于0.1时,则复位定时器重新计时。假设5s内标

气值小于门限值如0.2时,则重新回到流程2。

(4) 调校完成后等待便携仪发送调校完成指令,结束调校流程。

(5) 等待气管拔出或设备离线。

便携仪自动调校流程如图5所示,其中 V 代表便携仪监测到甲烷浓度的实时值, T 是时间变量, Err 表示实时值 V 和标气浓度之间的误差。

2.3 误差及响应时间统计分析

便携仪经过零点和线性调校后,按照工序进行误差统计及响应时间统计。便携仪的误差和响应时间是检验便携仪质量优劣的重要指标,便携仪在出厂前要对测量误差和响应时间进行统计分析,只有这两种参数的统计平均值达到行业强制标准,便携仪才允许出厂。

响应时间是指便携仪从通入一定浓度甲烷标气到显示数值达到规定的误差范围之内所需的时间,按照标准要求要求在20s之内。该调校装置对便携仪进行调校后,平均响应时间在8s之内,满足行业标准。

误差统计功能是便携仪经过零点和线性调校后,通入浓度值为0.5%、2.5%、3.5%的甲烷标气,待显示值稳定后调校装置主板软件计算出该便携仪显示值和实际值之间的误差值。主板软件统计便携仪在每种浓度标气下的三次误差值,计算平均误差。当便携仪通入0.5%浓度的甲烷标气时,根据行业标准平均误差范围应在 $\pm 0.1\%$ 之内。通入2.5%浓度的甲烷标气时,平均误差范围应在 $\pm 0.25\%$ 之内。通入3.5%浓度的甲烷标气时,平均误差范围应在 $\pm 0.3\%$ 之内。平均误差值在规定范围之内视为便携仪质量合格,否则视为便携仪质量不合格。主板软件将用列表的方式显示每个便携仪在每种浓度甲烷标气下的平均误差值,并标注结果是否合格。

3 扩容升级方案

该装置支持的便携仪数量较少(仅仅20台),在实际生产线上的便携仪往往是几百上千台,所以单台装置在操作上仍然存在较大的瓶颈。PC机以太网接口通过星型接口与装置连接,实时建立通讯并下发相关调校信息,初步设定该操作台可以控制10台自动老化装置,可以调校200台便携仪,替代现有操作台。

每台调校装置通过网口借助路由器与PC机相连,PC机作为主机,调校装置作为从机。数据链路层面,调校装置作为Socket套接字的客户端与PC机相连,PC机随时侦听调校装置发起的通信链路。PC机与调校装置建立链路通信后,就实时地发送状态查询命令,查询调校装置的插槽有没有便携仪插入,有便携仪插入的话就显示“在线”,否则显示“离线”。PC机

集中控制老化装置示意图如图 6 所示^[9-10]。

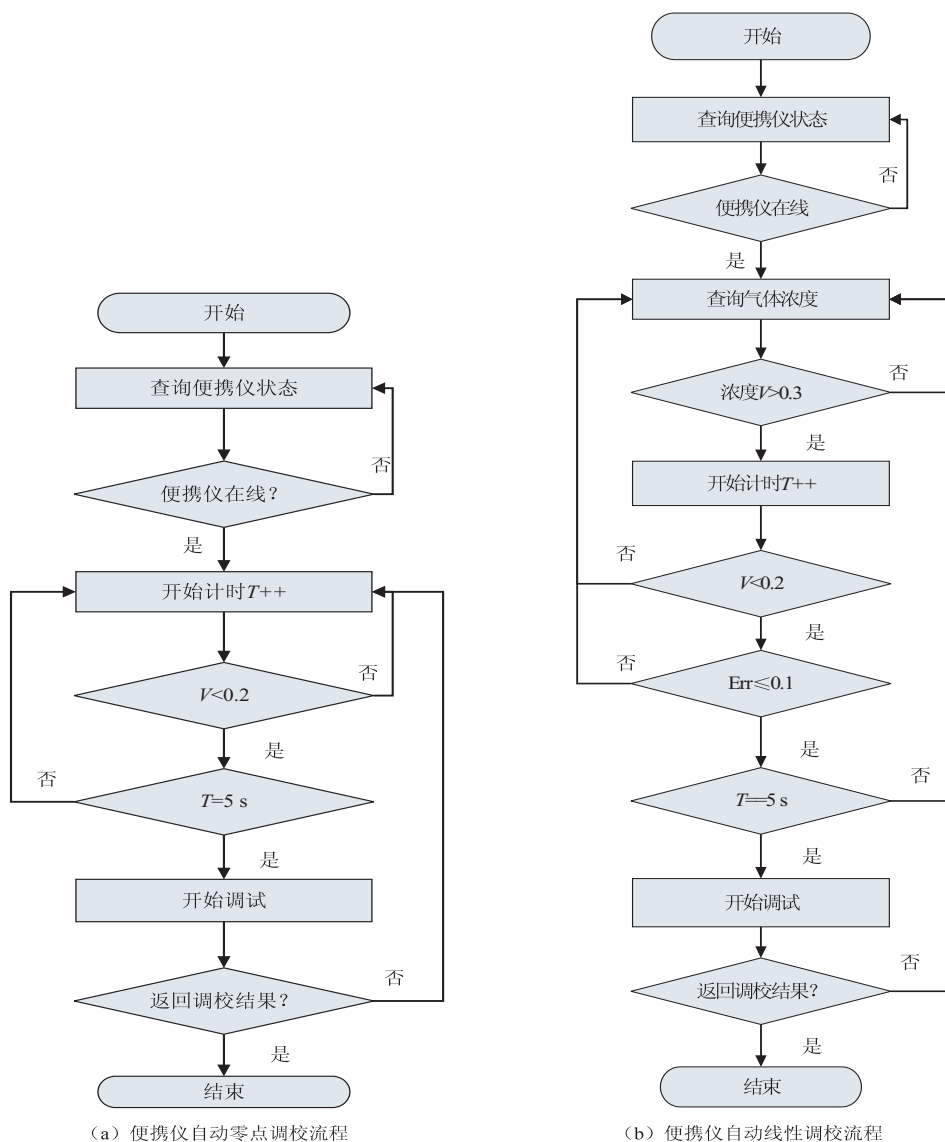
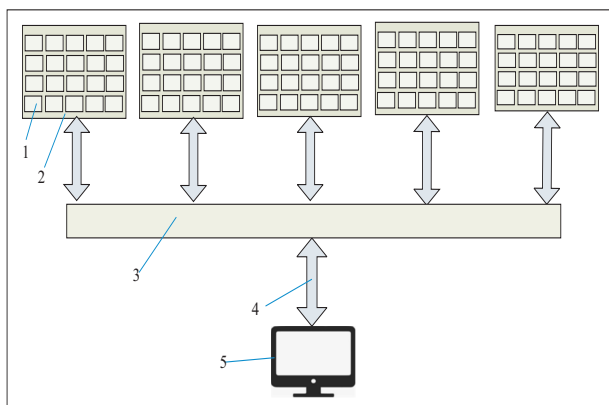


图 5 便携仪自动调校流程



1. 调校装置插槽 2. 调校装置 3. 路由器 4. 以太网网线 5. PC 机

图 6 PC 集中控制老化装置示意图

该方案升级后,具备如下优点:

- (1) 批量时间设置。
- (2) 批量参数查看,如实时值、灵敏度、相应时间、剩余电量、放电时间、DA 值等批量查看功能如表 1

所示。

(3) 批量参数校准,如零点校准、线性校准、时间校准。

(4) 批量记录存储检索,按照实际的工序生成记录如 excel 保存。

(5) 批量充电(定时)、关机(定时)。

(6) 批量产品异常告警,如测量值或者时间等参数误差较大,在 PC 界面用软件发出告警信息,提示该产品存在故障。

4 工序时间分析

4.1 单台便携仪调校时间分析

便携仪手工调校,单台的调校时间包括从货架取便携仪时间 T_1 ,手工调整零点时间 T_2 ,手工调整时钟的时间 T_3 ,手工调整线性的时间 T_4 ,便携仪开机时间 T_5 ,便携仪关机时间 T_6 ,便携仪放回货架时间 T_7 。单

台便携仪的手工调校时间为:

$$T_a = \sum_{i=1}^7 T_i \quad (1)$$

式中, T_i ——单台便携仪手工调校第 i 个工序时间。

用调校装置调校便携仪后的工序时间将会大大缩短,主要体现在调整零点、线性时间、调整时钟、便携仪关机时间上。例如调校装置切换为自动调整零点后,将便携仪从货架取下来,直接插入调校装置的插槽内,等待 1 s 左右,便携仪自动完成零点调校。线性调校和时钟调校、关机操作等同以上原理。调校完一台便

携仪的总时长为 29 s^[10-12]。

单台便携仪手工调校工序:

从货架取便携仪时间 T_1/s	1.5
手工调整零点时间 T_2/s	5
手工调整时钟的时间 T_3/s	10
手工调整线性的时间 T_4/s	5
便携仪开机时间 T_5/s	3
便携仪关机时间 T_6/s	3
便携仪放回货架时间 T_7/s	1.5

表 1 PC 机集中控制调校装置调校便携仪参数列表

序号	机号	状态	实时值/%	灵敏度	响应时间/s	时刻	剩余电量/%	放电时间	DA 值 mv
1	1-01	在线	0.01	7.90	2.76	01:14:02	82	17:26	1 733
2	1-02	在线	-0.01	7.93	2.76	01:14:02	57	10:01	1 743
3	1-03	在线	0.01	6.92	2.51	01:14:02	27	5:32	1 733
4	1-05	在线	0.01	6.91	2.71	01:14:02	53	9:12	1 733
5	1-11	在线	0.02	7.94	2.72	01:14:02	62	13:21	1 733
6	1-12	离线	0.01	7.93	2.73	01:14:02	87	18:12	1 731
7	2-15	离线	0.01	7.93	2.76	01:14:02	59	11:56	1 733
8	2-17	在线	0.03	7.93	2.18	01:14:02	82	17:25	1 732
9	2-18	在线	0.01	8.12	2.67	01:14:02	71	15:21	1 733
10	2-20	在线	-0.02	7.93	2.34	01:14:02	57	10:23	1 723

4.2 调校装置调校便携仪时间分析

单台调校装置调校 N 台便携仪需要的时间为:

$$T_b = \sum_{i=1}^7 T_i + \left(\frac{N}{20} + \text{Sign}(N \bmod 20) \right) \times T_8 \quad (2)$$

式中, T_i ——调校装置调校便携仪第 i 个工序时间,如表 2 所示。

$\text{Sign}(x)$ ——符号函数:若 $x > 0$, $\text{Sign}(x) = 1$, 若 $x = 0$, $\text{Sign}(x) = 0$;

N ——便携仪的数量;

mod ——取模;

T_8 ——人工操作触摸屏切换调校页面如零点、线性、时钟调校页面需要的时间。

调校装置最多一次能调校 20 台便携仪,调校装置调校便携仪的工序如下所示。从下列调校装置调校便携仪的工序参数可以看出便携仪的线性、零点、时钟调校以及关机时间经过调校装置的批处理操作后,大大缩减。便携仪的开机时间是长按开机,所以保持不变。可以计算出调校完 20 台便携仪的时间为 43 s^[13-14]。

调校装置调校便携仪的工序:

从货架取便携仪时间 T_1/s	2
自动调整零点时间 T_2/s	1
自动调整时钟的时间 T_3/s	1
自动调整线性的时间 T_4/s	5
便携仪开机时间 T_5/s	3

便携仪关机时间 T_6/s	1
便携仪放回货架时间 T_7/s	2
触摸屏切换功能时间 T_8/s	30

4.3 多台调校装置集成调校便携仪时间分析

将多台调校装置通过 PC 机集中控制管理后,触摸屏切换的工序将会大大减少。此时 $T_8 = 10$ s。所以 100 台便携仪的调校时间为:

$$T_c = \sum_{i=1}^7 T_i + \left(\frac{N}{100} + \text{Sign}(N \bmod 100) \right) \times T_8 \quad (3)$$

式中, T_i ——调校装置调校便携仪第 i 个工序时间,如表 2 所示。

$\text{Sign}(x)$ ——符号函数:若 $x > 0$, $\text{Sign}(x) = 1$, 若 $x = 0$, $\text{Sign}(x) = 0$;

N ——便携仪的数量;

mod ——取模;

T_8 ——人工操作触摸屏切换调校页面如零点、线性、时钟调校页面需要的时间。

使用 PC 机集中控制便携仪调校装置后,单台调校装置的页面设置及切换时间将大大缩减。用 Matlab 画出单台便携仪调校、用单台调校装置调校便携仪及用 PC 机集中控制便携仪调校的曲线对比如图 7 所示。

当便携仪的数量接近 1 000 时,用调校装置调校便携仪省去的人工操作时间接近手工调校耗费的时

一半,大概节省了 4 h,而用 PC 机集中控制调校装置调校便携仪耗费的时间又比单台调校装置节省 40 min。说明在生产和使用环节,利用调校装置调校可以极大改善现有的人工手工调校时间成本的浪费问题^[15]。

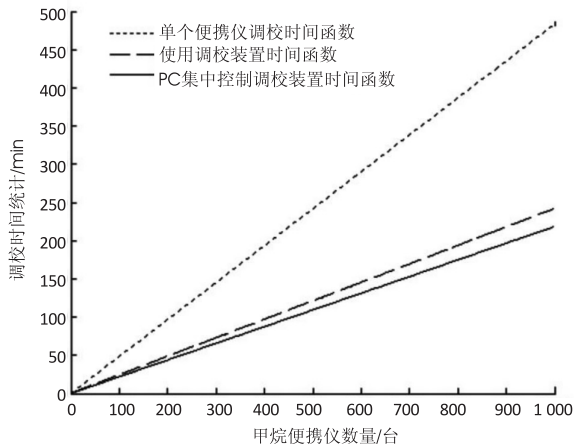


图 7 便携仪的集中调校方案时间曲线对比

5 结束语

为了解决甲烷便携仪的定期调校与定时充电问题,本项目组研发了甲烷便携仪调校装置。通过对单台调校装置和多台组合调校装置的工序分析,证明该调校装置能够极大地节省甲烷便携仪生产和使用中的操作工序,有效降低人为误差,满足了生产和煤矿生产安全的需要,有较大的实用价值。

参考文献:

- [1] 郝叶军. 具备蓝牙传输的矿用多参数便携仪的设计[J]. 电脑知识与技术, 2017, 13(36): 228-229.
- [2] 侯玥羲. JCB4 便携式甲烷检测报警仪的应用简析[J]. 机械管理开发, 2016, 31(8): 51-52.
- [3] 陈某舟, 郑小军. 一种基于 FPGA 的智能多主单总线[J]. 单片机与嵌入式系统应用, 2023, 23(3): 39-41.
- [4] 王 赛, 魏 霞, 黄德启, 等. 基于 IMX6ULL 核心板的网络安全监测管理平台数据网关的设计[J]. 现代电子技术, 2022, 45(8): 80-86.
- [5] 贾永康. 便携式甲烷检测报警仪自动化检定装置的研究[J]. 中国计量, 2022(1): 110-111.
- [6] 周德胜, 梁光清, 郭清华. 基于脉冲供电的便携式甲烷检测仪[J]. 煤矿安全, 2020, 51(3): 93-96.
- [7] 曾 伟. 矿用便携式激光甲烷检测报警仪[J]. 煤矿安全, 2018, 49(7): 75-77.
- [8] 王 浩, 康健力, 吴骅刚. 一种单总线 ASIC 的多通道校准和烧录系统设计与测试[J]. 中国集成电路, 2023, 32(9): 50-56.
- [9] 贺诗明, 刘邦银. 模块化并联逆变器基于单总线的相位同步方法[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(20): 8015-8025.
- [10] SUTO H, INOUE G. A new portable instrument for in situ measurement of atmospheric methane mole fraction by applying an improved tin dioxide-based gas sensor[J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 2010, 27(7): 1175-1184.
- [11] HU J, WEI B Y, ZHANG H, et al. Coal mine low power laser methane detection and alarm instrument[C]//SPIE conference on applied optics and photonics. Beijing: SPIE, 2019.
- [12] LEVRAULT C M, DIFFORD G F, STEINHEIM G, et al. Validation of the methane production measurement accuracy and ranking capacity of portable accumulation chambers for use with small ruminants[J]. Biosystems Engineering, 2023, 236(61): 201-211.
- [13] RIDDICK S N, CHEPTONUI F, YUAN K, et al. Estimating regional methane emission factors from energy and agricultural sector sources using a portable measurement system: case study of the Denver - Julesburg basin[J]. Sensors, 2022, 22(19): 7410.
- [14] Chemistry. Researchers from university of Tasmania report findings in chemistry (continuous and real-time indoor and outdoor methane sensing with portable optical sensor using rapidly pulsed Ir Leds)[J]. Chemicals & Chemistry, 2020, 38(23): 5032-5040.
- [15] ROBINSON D L, DOMINIK S, DONALDSON A J, et al. Repeatabilities, heritabilities and correlations of methane and feed intake of sheep in respiration and portable chambers[J]. Animal Production Science, 2020, 60(7): 880.