

数字式气压计检定箱技术性能测试方法研究

郑树芳¹, 刘海珍¹, 米凯民², 杨明华¹, 常 洁¹

(1. 内蒙古自治区气象数据中心; 2. 内蒙古自治区气象局机关服务中心, 内蒙古 呼和浩特市 010000)

摘要:针对目前尚无人对数字式气压计检定箱技术性能的测试方法进行过研究, 研究制定出了一套科学合理的数字式气压计检定箱技术性能测试方案, 包括对测试所选用测量设备技术指标的要求、测试所需环境条件及传压介质的要求、测试气路连接方式的要求、各项技术性能测试方法的设计及测试结果的验证, 并以控制范围为(440~1100)hPa 的 QYJD-10 型气压检定箱作为测试对象, 以测量范围为(500~1100)hPa 的 0.01 级数字式气压计作为气压标准器、以测量范围为(-60~81)℃ 和最大允许误差为 ± 0.05 ℃ 的数字温度计作为温度标准器, 对该测试方案进行了测试验证, 综合评价了气压检定箱的各项技术性能均符合被检定或校准仪器相应规程规范的要求, 从而证明了该测试方案具有合理性与可行性, 为数字式气压计检定箱技术性能的测试工作提供一定的技术指导。

关键词:数字式气压计检定箱; 传压介质

中图分类号: TH71

文章编号: 1000-0682(2024)01-0061-05

文献标识码: A

DOI: 10.19950/j.cnki.CN61-1121/TH.2024.01.014

Study on the technical performance test method of digital barometer test box

ZHENG Shufang¹, LIU Haizhen¹, MI Kaimin¹, YANG Minghua¹, CHANG Jie¹

(1. Inner Mongolia Atmospheric Meteorological Data Center; 2. Inner Mongolia Meteorological

Bureau Agency Service Center, Inner Mongolia Huhhot 010000, China)

Abstract: At present, no one has studied the test method of the technical performance of the digital barometer test box, and a scientific and reasonable technical performance test scheme of digital barometer test box is developed. Including the requirements for the technical indicators of the selected measuring equipment, the requirements for the required environmental conditions and the pressure transmission medium, the requirements for the test air circuit connection mode, the design of various technical performance test methods and the verification of the test results and Taking QYJD-10 pneumatic test box with control range (440~1100) hPa as the test object, take 0.01 level digital barometer with measuring range (500~1100) hPa as pressure standard, digital thermometer with measuring range (-60~81)℃ and digital thermometer with maximum allowable error of ± 0.05 ℃ as temperature standard, the test protocol was test-verified, comprehensive evaluation of the technical performance of the pneumatic test box are in line with the requirements of the verification or calibration instruments, thus to prove that the test scheme is reasonable and feasible, it provides certain technical guidance for the technical performance test of the digital barometer test box.

Keywords: digital barometer test box; pressure transmission medium

收稿日期: 2023-09-25

基金项目: 内蒙古自治区气象局科技创新项目“计量检定质量控制方法研究”(nmqkjc202326)资助

第一作者: 郑树芳(1968—), 女, 内蒙古巴彦淖尔人, 高级工程师, 学士, 研究方向为气象计量检定校准技术研究。

E-mail: 314533019@qq.com

通信作者: 刘海珍(1991—), 女, 山西吕梁人, 工程师, 硕士, 研究方向为气象计量检定校准技术研究。

E-mail: 630261189@qq.com

0 引言

数字式气压计检定箱是用于检定或校准数字式气压计、气压变送器、气压传感器等数字显示的气压类测量仪器的主要配套设备, 其技术性能对于气压类测量仪器的检定或校准的准确可靠和量值传递具有至关重要的作用^[1]。虽然气象行业标准 QT126-

2011 空盒气压表检定箱测试规范^[2]规定了气压检定箱技术性能的测试方法,但由于数字式气压计和空盒气压表感应器的材料和工作原理不同,准确度不同,致使其测试方法不同^[3-6]。目前,无人对数字式气压计检定箱技术性能的测试方法进行过研究。该文根据国家计量技术规范 JJF1094-2002^[7]规定的测量仪器计量特性评定基本原则和通用方法,参照气象行业标准 QT126-2011 空盒气压表检定箱测试规范和数字式气压计气压检定装置说明书以及其他相关的技术文件,研究制定出了一套数字式气压计检定箱技术性能的测试方案,包括对测试所选用测量设备技术指标的要求、测试所需环境条件及传压介质的要求、测试气路连接方式的要求、各项技术性能测试方法的设计及测试结果的验证,并以控制范围为(440~1100) hPa 的 QYJD-10 型气压检定箱作为测试对象,以测量范围为(500~1100) hPa 的 0.01 级数字式气压计作为气压标准器、以测量范围为(-60~81)℃ 和最大允许误差为 ± 0.05 ℃ 的数字温度计作为温度标准器,对该测试方案进行测试验证,综合评价气压检定箱的各项技术性能是否符合被检定或校准仪器相应规程规范的要求,从而证明该测试方案具有合理性与可行性,也为数字式气压计检定箱技术性能的测试工作提供一定的技术指导。

1 测试所选用测量设备的工作原理及技术指标

1.1 数字式气压计检定箱

该次测试试验所选用的 QYJD-10 型气压检定箱,主要由压力自动控制系统、工控机、气路换向阀、空气发生器、气压传感器、温度传感器等部件组成。气压检定箱通过工控机上气路换向阀选择检定或校准气路连接方式,通过空气发生器实现增加气体压力或减少气体压力,通过压力自动控制系统读取气密箱体外的实际气压值和温度值,根据设定气压值与实际气压值的偏差自动控制空气发生器增压或减压,使气密箱体内气体压力达到设定值并维持稳定状态。其工作原理如图 1 所示。

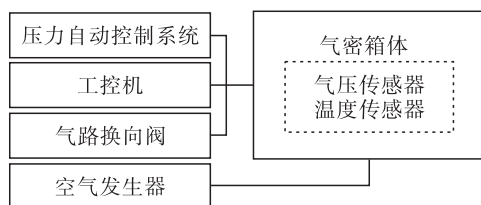


图 1 数字式气压计气压检定箱工作原理示意图

其主要技术指标:压力工作范围为(500~1100) hPa,内置气压传感器精度为 $\pm 0.02\%$ FS,控制精度为 $\pm 0.003\%$ FS,升降压速率为 9 hPa/min~18 hPa/min(负载 70 L),气密箱漏气率为 ≤ 0.3 hPa/10 min。

1.2 标准数字式气压计

在该次测试试验中,气压标准器选用测量范围为(500~1100) hPa 的 0.01 级标准数字式气压计。气压检定箱检定或校准的数字式气压计是以数字形式输出气压量值,其结构有一体型和分离型两种,它是由被测压力经传压介质作用在压力传感器上,压力传感器输出相应的电信号,经信号处理单元处理后显示压力量值,实现气体压力的测量^[8-9]。其工作原理如图 2 所示。

根据数字式气压计感应材料和原件结构的不同,压力传感器可分为石英晶体谐振式气压传感器、硅电容式数字气压传感器和振筒式气压传感器,由于其感应元件均受环境温度的影响,则压力传感器通过自身内置温度传感器的输出信号测得环境温度,然后对其气压测得值进行了数字化温度补偿^[10-12],但这种补偿并不是绝对的,为尽量减少这种影响,则在本次测试试验中,环境温度波动应不大于 ± 0.1 ℃^[11]。

气压标准器的主要技术指标:测量范围为(500~1100) hPa,最大允许误差为 ± 0.1 hPa,分辨力为 0.01 hPa。

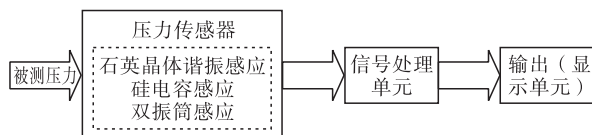


图 2 数字式气压计工作原理示意图

1.3 标准温度计和计时器(秒表)

根据 JJG1084-2013《数字式气压计》^[13]相关规定,在气压检定箱检定或校准数字式气压计过程中,实验室环境温度最大范围为(20 \pm 5)℃,即本次测试试验的环境温度应不超过(20 \pm 5)℃,则本次测试试验所选用的标准温度计的测量范围应不小于(10~30)℃;又由于本次测试试验实验室环境温度波动应不大于 ± 0.1 ℃,则本次测试试验所选用的标准温度计的最大允许误差应不大于 ± 0.1 ℃、分辨力应不大于 0.1℃。因此,本次测试试验所选用的温度标准器是测量范围为(-60~81)℃、最大允许误差为 ± 0.05 ℃ 和分辨力为 0.02℃ 的数字温度计。

计时器或秒表用于测试过程的计时,精确到秒即可。

2 测试前的准备工作

2.1 测试环境条件

依据 QT126-2011《空盒气压表检定箱测试规范》和 JJG1084-2013《数字式气压计》中的相关规定以及本次测试试验所选用标准数字式气压计的准确度等级,本次测试试验的环境条件可确定为:温度应控制在 $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$ 范围内,温度波动应不大于 $\pm 0.1^\circ\text{C}$;相对湿度应不大于 80%;并避免人员、机械、照明、阳光照射等其他因素可能使箱内环境温度发生变化和波动。

2.2 测试使用的传压介质

由于本次测试试验所选用的标准数字式气压计的灵敏度较高,为尽可能减少尘埃、水汽等对其感应元件的影响,则本次测试试验所选用的传压介质为洁净、干燥、非腐蚀性、非易燃性的空气。

2.3 测试气路连接方式

对数字式气压计检定箱技术性能进行测试时,由于其自身结构原因,则有两种测试气路连接方式,并通过气压检定箱工控机上的气路换向阀左右旋转进行控制选择。

第一种测试气路连接方式是将气压检定箱工控机上的气路换向阀转动到“PI”,并选择使用终端容积为 1 L 以下进行输出控制,用多通乳胶管将标准数字式气压计的外置气孔、气压检定箱体的外置气孔和气压检定箱压力控制装置的外置气孔对应密封接通,并将其电源接通和开关打开,然后调节气压检定箱压力自动控制装置对其技术性能进行测试。测试气路连接方式一如图 3 所示。这种测试气路输出方式仅适用于测试所选用的气压标准器有外置气孔。

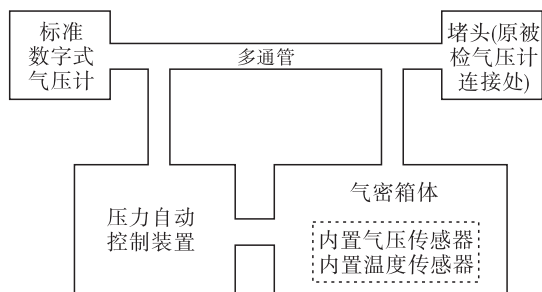


图3 测试气路连接方式一图

第二种测试气路输出方式是将工控机上的气路换向阀转动到“PII”,选择使用终端容积为 70 L 以

上进行输出控制,将标准数字式气压计平稳放置于气压检定箱体内中央水平位置,确保其气孔畅通、电源接通和开关打开,然后将气压检定箱体密封门关好,用多通乳胶管将气压检定箱体的外置气孔和气压检定箱压力自动控制装置的外置气孔对应密封接通,最后调节气压检定箱压力自动控制装置对其计数性能进行测试。测试气路连接方式二如图 4 所示。这种测试气路输出方式既适用于测试所选用的气压标准器有外置气孔,又适用于测试所选用的气压标准器无外置气孔。

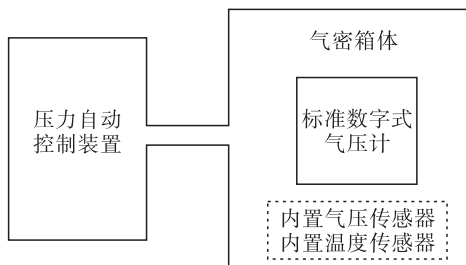


图4 测试气路连接方式二图

3 技术性能测试

数字式气压计检定箱技术性能包括漏气率、压力场波动度和压力控制偏差。由气压检定箱自身结构导致其存在一定程度的漏气现象,当其密封性差、漏气率较大时,会直接导致气压检定箱体内气体压力的不均匀性和波动性,又由于气压标准器和受检定或校准数字式气压计的灵敏度和滞后性不同,则会使受检定或校准数字式气压计的测量误差和测量结果的不确定度增大。此外,气压检定箱在检定或校准数字式气压计的示值误差过程中,在设定各测量点上,稳定后的压力不得偏离该测量点 $\pm 5\text{ hPa}$ 。因此,在检定或校准数字式气压计时,应对气压检定箱漏气率、压力场波动度和压力控制偏差进行测试,确保其漏气率不超过受检定或校准数字式气压计最大允许误差的十分之一,且降低由于压力场波动度导致的测量误差和测量结果的不确定度,并确保气压检定箱平稳稳定在设定测量点上。

3.1 测试点

在 QT126-2011 空盒气压表检定箱测试规范中规定,技术性能测试点为 1050 hPa 和 800 hPa(高原地区为 550 hPa),且在每个测试点上,稳定后的压力不得偏离该测试点 $\pm 5\text{ hPa}$ 。由于不同规格型号的数字式气压计,其测量范围会有所不同,有的可达到 $(10 \sim 1200)\text{ hPa}$,因此,在检定或校准数字式气压计时,气压检定箱技术性能测试点通常选择测量

范围的下限压力点和上限压力点,且在每个测试点上,稳定后压力不得偏离该测试点 ± 5 hPa,在测试时,各测试点的顺序无明确要求,可根据实际情况自行确定。由于本次测试试验所选用 0.01 级数字式气压计标准装置的测量范围为 (500 ~ 1100) hPa,则本次测试试验的测试点选择 500 hPa 和 1100 hPa。

3.2 测试方法

在规定的环境条件下,根据实际情况,选择其中一种测试气路连接方式对气压检定箱的技术性能进行测试。为严格考核气压检定箱的各项技术性能,则本次漏气率、压力场波动度和压力控制偏差测试均在气压检定箱静态稳定的条件下进行。在测试过程中,首先确保气路中管线和气动元件连接牢固可靠且密封,然后通过气压检定箱压力自动控制装置分别设定气压测试点为 500 hPa 和 1100 hPa,当达到设定值并稳定 3 min 后,停止压力控制,确定气压检定箱达到静态稳定后,记录气压检定箱的气压示值、标准数字式气压计的气压示值和标准数字式温度计的温度示值,并作为初始数据,每隔 1 min 记录 1 次,共记录 11 次,用第 11 次的标准数字式气压计气压示值减去第 1 次的标准数字式气压计气压示值得到差值的绝对值作为气压检定箱在该测试点的漏气率,用 11 次标准数字式气压计气压示值中的最大值减去最小值后再除以 2 得到的值作为气压检定箱在该测试点的压力场波动度,用 11 次气压检定箱气

压示值的平均值减去 11 次标准数字式气压计气压示值的平均值得到的差值作为气压检定箱在该测试点的压力场控制偏差,一个压力点测试结束后,再按上述方法进行另一个压力点测试。

4 测试结果的判定

4.1 漏气率测试结果验证

根据数字式气压计检定箱漏气率的测试方法,气压检定箱在某压力测试点每分钟内的漏气率可由公式(1)计算得到。

$$\Delta P_l = \frac{|P_{10} - P_0|}{10} \quad (1)$$

式中: P_{10} 为第 10 分钟时标准数字式气压计气压示值(hPa); P_0 为标准数字式气压计初始气压示值(hPa); ΔP_l 为气压检定箱在该压力测试点每分钟内的漏气率(hPa)。

取两个测试点中漏气率较大者作为气压检定箱的漏气率。数字式气压计检定箱漏气率的测试数据如表 1 所示。

经验证,数字式气压计检定箱漏气率为 0.012 hPa/min,而本次测试选用 0.01 级的数字式气压计标准装置,其可检定或校准 0.03 级及以下的数字式气压计,漏气率小于 0.03 级数字式气压计最大允许误差绝对值的十分之一,即符合要求。

表 1 数字式气压计检定箱漏气率的测试数据/hPa

测试项目	次数	测试点 1 (500)	测试点 2 (1100)
漏气率	P_0 /hPa	501.47	1097.70
	P_{10} /hPa	501.59	1097.60
	单点漏气率/(hPa/min)	0.012	0.010
	漏气率/(hPa/min)	0.012	

4.2 压力场波动度测试结果验证

根据数字式气压计检定箱压力场波动度的测试方法,气压检定箱在某压力测试点 10 分钟内的压力波动度可由公式(2)计算得到。

$$\Delta P_b = \pm \left| \frac{1}{2} (P_{\max} - P_{\min}) \right| \quad (2)$$

式中: P_{\max} 为 10 分钟内标准数字式气压计最大气压示值(hPa); P_{\min} 为 10 分钟内标准数字式气压计最小气压示值(hPa); ΔP_b 为数字式气压计气压检定箱在该压力测试点 10 分钟内的压力场波动度(hPa)。

取两个测试点中压力场波动度较大者作为气压检定箱的压力场波动度。数字式气压计检定箱压力

场波动度的测试数据如表 2 所示。

表 2 数字式气压计检定箱压力场波动度的测试数据/hPa

测试项目	次数	测试点 1 (500)	测试点 2 (1100)
压力场波动度	P_0 /hPa	501.47	1097.60
	P_1 /hPa	501.48	1097.61
	P_2 /hPa	501.50	1097.62
	P_3 /hPa	501.51	1097.64
	P_4 /hPa	501.52	1097.65
	P_5 /hPa	501.53	1097.66
	P_6 /hPa	501.54	1097.67
	P_7 /hPa	501.55	1097.67
	P_8 /hPa	501.56	1097.68

续表 2

测试项目	次数	测试点 1 (500)	测试点 2 (1100)
压力场 波动度	P_9/hPa	501.58	1097.69
	P_{10}/hPa	501.59	1097.70
	P_{\max}/hPa	501.59	1097.70
	P_{\min}/hPa	501.47	1097.60
	单点压力场波动度	0.06	0.05
压力场波动度		0.06	

经验证,数字式气压计检定箱压力场波动度为 $\pm 0.006\text{ hPa}/1\text{ min}$,而本次测试选用 0.01 级的数字式气压计标准装置,其可检定或校准 0.03 级及以下的数字式气压计,漏气率小于 0.03 级数字式气压计最大允许误差绝对值的十分之一,即符合要求。

表 3 数字式气压计检定箱压力控制偏差的测试数据/hPa

测试项目	次数	测试点 1(500)		测试点 2(1100)	
		气压检定箱示值	气压标准器示值	气压检定箱示值	气压标准器示值
压力控制偏差	P_0	501.33	501.47	1097.71	1097.60
	P_1	501.34	501.48	1097.73	1097.61
	P_2	501.36	501.50	1097.75	1097.62
	P_3	501.37	501.51	1097.76	1097.64
	P_4	501.38	501.52	1097.77	1097.65
	P_5	501.39	501.53	1097.78	1097.66
	P_6	501.40	501.54	1097.79	1097.67
	P_7	501.41	501.55	1097.79	1097.67
	P_8	501.42	501.56	1097.80	1097.68
	P_9	501.44	501.58	1097.81	1097.69
	P_{10}	501.45	501.59	1097.82	1097.70
	P	501.39	501.53	1097.77	1097.65
单点压力控制偏差		-0.17		0.12	
压力控制偏差					

5 结束语

针对无人对数字式气压计检定箱技术性能的测试方法进行过研究,该文研究提出了一套科学合理的数字式气压计检定箱技术性能测试方案,包括对测试所选用测量设备技术指标的要求、测试所需环境条件及传压介质的要求、测试气路连接方式的要求、各项技术性能测试方法的设计及测试结果的验证,并以控制范围为(440~1100)hPa 的 QYJD-10 型气压检定箱作为测试对象,以测量范围为(500~1100)hPa 的 0.01 级数字式气压计作为气压标准器、以测量范围为(-60~81)℃和最大允许误差为 $\pm 0.05\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的数字温度计作为温度标准器,对该测试

4.3 压力控制偏差测试结果验证

根据数字式气压计检定箱压力控制偏差的测试方法,数字式气压计检定箱在某压力测试点 10 分钟内的压力控制偏差可由公式(3)计算得到。

$$\Delta P_c = \frac{1}{10} \sum_{i=1}^{10} P_{ia} - \frac{1}{10} \sum_{i=1}^{10} P_{ib}$$

(3)

式中: P_{ia} 为 10 分钟内第 i 次气压检定箱气压示值(hPa); P_{ib} 为 10 分钟内第 i 次标准数字式气压计气压示值(hPa); ΔP_c 为数字式气压计检定箱在该压力测试点的压力控制偏差(hPa)。

取两个测试点中压力控制偏差绝对值较大者作为气压检定箱的压力控制偏差,数字式气压计检定箱压力控制偏差的测试数据如表 3 所示。

经验证,数字式气压计检定箱的压力控制偏差为-0.17 hPa,未超过 $\pm 5\text{ hPa}$,即符合要求。

方案进行了测试验证,综合评价了气压检定箱各项技术性能均符合被检定或校准仪器相应规程规范的要求,从而证明了该方案具有合理性与可行性。通过采用该方案,实现数字式气压计检定箱技术性能测试工作的科学化与规范化,确保其检定或校准仪器时所得到的测量结果准确可靠,进而为计量技术机构向社会提供具有证明作用的数据和结果及一定的基础保障。

参考文献:

[1] 李文博,颜平江,武灿灿. 气压检定箱校准方法研究[J]. 工业仪表与自动化装置,2023(01):72-76.

[2] 中国气象局. QT126-2011 空盒气压表检定箱测试规范[S]. 2011.

(下转第 103 页)

由表 2 中数据可以看出,实验单独加入模块一后,对实验精度提升有一定帮助,提升了 0.02%;实验单独加入模块二后,模型的精确率降低 1.8%,召回率降低 1.1%,平均精度降低 1.5%,MobileNetv3 轻量化网络带来损失在可控范围内,但模型参数量减少了 50%,计算量减少了 55%;实验加入模块三和模块四后,精确率和召回率都有明显提升,分别提升了 1.1% 和 1.5%,平均精度也提升 0.4%。通过消融实验可以看出,YOLOv5s - pointer 算法取得了较好的检测结果,同时模型更加轻量化。

4 结语

目前仪表识别算法模型只在特定环境中表现良好,且模型较为复杂,不适合边缘设备部署。鉴于以上存在的问题,该文提出了 YOLOv5s - Pointer 网络模型,将 Mixup 数据增强加入 YOLOv5s 网络头部,训练过程中使网络可以更好的适应不同的场景;引入 MobileNetv3 替换 YOLOv5s 中原有的 CSPDarkNet53 网络,极大的降低原有网络的参数量,提升检测速率;替换 YOLOv5s 中定位损失函数 CLoU,使用更有利的 SLoU,并通过引入动态样本加权思想,使得模型对困难样本的关注度更高,避免了过多的关注简单样本导致训练出现过拟合现象。通过自建指针仪表数据集对改进模型进行训练和验证,实验结果表明,YOLOv5s - Pointer 网络对比 YOLOv5s 网络检测精度提升 1.3%,同时参数量减少了 78%,可以满足边缘设备的部署要求。后期将对模型进一步改进,并通过引入其他改进方法,满足指针仪表读数系统在设备上的运行。

参考文献:

- [1] 陈从平,王钦,姚威. 基于机器视觉的指针式仪表自动读数算法[J]. 传感器与微系统, 2022,41(10): 130 - 133.
- [2] 董文轩,梁宏涛,刘国柱. 深度卷积应用于目标检测算法综述[J]. 计算机科学与探索, 2022,16(05): 1025 - 1042.
- [3] 邵延华,张铎,楚红雨. 基于深度学习的 YOLO 目标检测综述[J]. 电子与信息学报, 2022,44(10): 3697 - 3708.
- [4] 赵英,王琦,沙捷. 基于 YOLOv5s 的轻量化乒乓球目标检测算法[J]. 计算机应用, 2023,43(S1): 229 - 234.
- [5] 金鑫,庄建军,徐子恒. 轻量化 YOLOv5s 网络车底危险物识别算法[J]. 浙江大学学报(工学版), 2023,57(08): 1516 - 1526 + 1561.
- [6] HOWARD A, SANDLER M, CHU G, et al. Searching for MobileNetV3 [J]. 2019. DOI: 10. 48550/arXiv. 1905. 02244.
- [7] SANDLER M, HOWARD A, ZHU M, et al. MobileNetV2: Inverted Residuals and Linear Bottlenecks[C]//2018 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition.
- [8] 任欢,王旭光. 注意力机制综述[J]. 计算机应用, 2021(S1 vo 41): 1 - 6.
- [9] YIN Y, LEI L, LIANG M, et al. Research on Fall Detection Algorithm for the Elderly Living Alone Based on YOLO [C]//2021 IEEE International Conference on Emergency Science and Information Technology (IC-ESIT).
- [10] TONG Z, CHEN Y, XU Z, et al. Wise - IoU: Bounding Box Regression Loss with Dynamic Focusing Mechanism[Z/OL]. arXiv, 2023(2023 - 04 - 08) [2023 - 09 - 15].
- [11] YU Z, HUANG H, CHEN W, et al. YOLO - FaceV2: A Scale and Occlusion Aware Face Detector[Z/OL]. arXiv, 2022(2022 - 08 - 04) [2023 - 09 - 15].
- [3] 金路,陶笑昱,王鹏. 浅谈空盒气压表和气压计的计量检定[J]. 仪器仪表用户, 2020,27(12): 110 - 112.
- [4] 刘海珍,郑树芳,姜雨蒙,等. 计量标准测量能力若干关键技术考核方法的研究[J]. 内蒙古气象, 2022(05): 43 - 48.
- [5] 郑树芳,刘海珍,温晓辉,等. 精密露点仪期间核查方法的研究[J]. 现代电子技术, 2023,46(08): 164 - 168.
- [6] 郑树芳,刘海珍,温晓辉,等. 电子探空仪基测箱校准结果的不确定度评定方法的研究[J]. 计算机测量与控制, 2022,30(12): 339 - 347.
- [7] 国家质量监督检验检疫总局. JJF1094 - 2002 测量仪器特性评定[S]. 北京:中国计量出版社, 2002.
- [8] 蒋涛,孟宪罗,甄树勇. 气象用 PTB 系列气压传感器通用性的研究[J]. 计量与测试技术, 2016,43(10): 20 - 22 + 24.
- [9] 刘海珍,郑树芳,温晓辉,等. 气象用数字式气压计期间核查方法的研究[J]. 现代电子技术, 2022,45(24): 70 - 73.
- [10] 刘海珍,郑树芳,温晓辉,等. 关于自动气象站气压传感器的测量误差受环境温度影响的研究[J]. 现代电子技术, 2023,46(10): 21 - 25.
- [11] 李扬,刘明光,钱学成,等. 压力传感器的温度补偿研究及其应用[J]. 电测与仪表, 2016,53(18): 107 - 112 + 123.
- [12] 李亮,杜利东,赵湛,等. 数字气压传感器的一种高效标定和补偿方法[J]. 传感器与微系统, 2014,33(11): 44 - 47.
- [13] 国家质量监督检验检疫总局. JJG1084 - 2013 数字式气压计[S]. 北京:中国质检出版社, 2013.