

航空航天装备

# 基于 GB/T 38924—2020 民用轻小型无人机系统环境试验方法浅析

徐静, 赵毅, 潘勇, 胡德隆, 尹江梅

(山东省产品质量检验研究院, 济南 250100)

**摘要:** 为了提高民用轻小型无人机企业产品质量, 提高相关环境试验人员的综合试验能力, 提升行业检测技术水平, 以 GB/T 38924—2020 系列为基础, 对民用轻小型无人机环境试验方法进行了浅析。描述了民用轻小型无人机系统环境试验受到的影响因素, 主要有气候环境因素和机械环境因素。对气候环境试验方法、机械环境试验方法进行了对比分析和技术归纳。根据 GB/T 38924—2020 系列对具体试验参数进行分析, 温度试验的温度变化速率均不大于 3 °C/min; 低气压和高气压试验的压力变化速率不大于 4.8 kPa/min; 盐雾试验分为连续喷雾方式和间歇喷雾方式; 防水性试验的主要参数是雨滴直径和喷水量; 沙尘试验的主要参数是尘浓度、砂浓度、吹尘风速和吹砂风速; 冲击试验的主要参数是峰值加速度和脉冲时间, 振动试验的主要参数是功率谱密度、振幅、加速度、扫频速率, 冲击试验和振动试验参数应根据无人机类型和起飞质量来选取。根据相关标准选, 取冲击试验和振动试验某个试验参数进行试验实施, 并给出试验曲线。试验结果可靠, 并对部分环境试验提出几点方法建议。

**关键词:** 民用轻小型无人机; 气候环境试验; 机械环境试验; GB/T 38924—2020

中图分类号: V216 文献标识码: A 文章编号: 1672-9242(2022)02-0078-07

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2022.02.013

## Simple Analysis of Environmental Test Method for Civil Light and Small Unmanned Aerial Vehicle System Based on GB/T 38924—2020

XU Jing, ZHAO Yi, PAN Yong, HU De-long, YIN Jiang-mei

(Shandong Institute for Product Quality Inspection, Jinan 250100, China)

**ABSTRACT:** This paper aims to improve the product quality of civil light and small unmanned aerial vehicle (UAV) enterprises, to improve the comprehensive test ability of relevant environmental test personnel, and to improve the technical level of industry tests. On the basis of GB/T 38924—2020 series standards, the environmental test methods of civil light and small unmanned aerial vehicles (UAV) were analyzed. In this paper, the influence factors of the environmental test of civil light and small unmanned aerial vehicle (UAV) systems are analyzed, mainly including the climatic and mechanical environmental factors. The climatic environmental test method and mechanical environmental test method were compared and analyzed. Accord-

收稿日期: 2021-07-13; 修订日期: 2021-08-13

Received: 2021-07-13; Revised: 2021-08-13

作者简介: 徐静(1981—), 女, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为环境可靠性试验与电磁兼容试验。

**Biography:** XU Jing (1981—), Female, Master, Senior engineer, Research focus: environmental reliability test and EMC test.

引文格式: 徐静, 赵毅, 潘勇, 等. 基于 GB/T 38924—2020 民用轻小型无人机系统环境试验方法浅析[J]. 装备环境工程, 2022, 19(2): 078-084.

XU Jing, ZHAO Yi, PAN Yong, et al. Simple Analysis of Environmental Test Method for Civil Light and Small Unmanned Aerial Vehicle System Based on GB/T 38924—2020[J]. Equipment Environmental Engineering, 2022, 19(2): 078-084.

ing to GB/T 38924—2020 series standards, the specific test parameters were analyzed. The temperature change rate of temperature test is not more than 3 °C/min; the pressure change rate of low pressure and high-pressure test is not more than 4.8 kPa/min; the salt spray test is divided into continuous spray mode and intermission spray mode. The main parameters of the waterproofness test are raindrop diameter and spray water quantity. The main parameters of the sand and dust test are dust concentration and sand concentration. Dust-blowing velocity and sand-blowing velocity; the main parameters of the impact test are peak acceleration and pulse time. The main parameters of the vibration test are spectral density, amplitude, acceleration and sweep frequency rate, the test parameters of shock test and vibration test should be selected according to the type of unmanned aerial vehicle (UAV) and take-off weight. According to the relevant standards, a test parameter of shock test and vibration test were selected to carry out the test, and the test curves were obtained. The test results are reliable, and some suggestions for some environmental tests were put forward.

**KEY WORDS:** civil small and light UAV; climatic environmental test; mechanical environmental test; GB/T 38924—2020

近年来,随着集成制造的普及,无人机基础零部件生产开始迈向小型化、低成本、低能耗方向发展,无人机制造成本不断走低,同时伴随着人工智能、5G 通信等新技术的逐步完善应用,民用无人机行业迎来新的发展机遇,行业在良好的发展环境中迅速增长,行业规模不断扩大。民用无人机在国内外快速发展,广泛应用于各个领域,如航拍测绘、应急救援、电力巡检、快递送达、环境监测等<sup>[1-3]</sup>。随着无人机行业的飞速发展,应用领域的扩大,民用轻小型无人机生产企业日益增多,问题随之出现,监管体系的不完善,行业标准的缺失,导致生产民用无人机技术含量低,产品质量与作业成效差距很大,存在严重的安全隐患<sup>[4]</sup>。因此,对民用无人机系统行业的监管需求增加,如何提高民用轻小型无人机产品的质量,成为重中之重。环境因素对无人机产品在使用过程中有较大的影响,要提高产品质量,迫切需要制定行业技术标准。2020 年 7 月 21 日,GB/T 38924—2020 民用轻小型无人机系统环境试验方法系列国家标准的发布,为民用轻小型无人机系统环境试验方法提供了标准指南,为企业生产提供了技术支持,为质检行业提供了检验指南。

## 1 气候环境试验方法分析

### 1.1 气候环境因素的影响

由于天气气候多变,民用轻小型无人机系统在实际使用过程中,遇到不可预估的气候环境会导致产品电子元器件不能正常工作,严重影响产品性能及使用<sup>[5-6]</sup>。在进行气候环境试验时,应根据无人机寿命期环境剖面,确定可能遇到的各种气候环境,选择暴露试验、贮存试验等试验方式,来考核无人机在气候环境条件下的环境适应性<sup>[7]</sup>。对民用无人机系统气候环境影响的因素主要有低温、高温、湿热、气压、雨淋、风沙、盐雾等。在这些因素的作用下,机体结构会发生膨胀变形、开裂和脆断,产品性能也会发生变化,

会引起不同机械零部件之间相互咬死,电子元器件失效,使得无人机可靠性降低,性能降低,导致各类故障发生<sup>[8-9]</sup>。

### 1.2 试验标准

GB/T 38924—2020 系列适用于起飞质量为 0.25~150 kg 的民用轻小型无人机系统(包括飞行器和地面站)环境试验。GB/T 38924—2020 系列中气候环境因素试验标准及试验项目见表 1。

表 1 气候环境因素试验标准及试验项目  
Tab.1 Climatic environmental factor test standards and test items

标准	试验项目
GB/T 38924.2—2020	低温试验
GB/T 38924.3—2020	高温试验
GB/T 38924.4—2020	温度和高度试验
GB/T 38924.7—2020	湿热试验
GB/T 38924.8—2020	盐雾试验
GB/T 38924.9—2020	防水性试验
GB/T 38924.10—2020	砂尘试验

### 1.3 高低温试验

高低温试验严酷等级的制定需要考虑民用轻小型无人机系统使用地域环境极限温度、电池使用极限温度、产品本身电子元器件性能特点以及温度变化速率,来确定试验极限温度值以及试验时间。

GB/T 38924.2—2020<sup>[10]</sup>规定了民用轻小型无人机系统环境试验的低温试验方法,包括低温贮存试验和低温工作试验。低温贮存温度根据使用地域进行划分,寒带为-45 °C,温带为-30 °C,热带为-0 °C,试验持续时间推荐温度稳定后再保持 24 h。低温工作试验温度根据飞行器和地面站两种情况和使用地域进行了详细的规定,最低温度为-45 °C(寒带),最高温度为 0 °C(热带),试验持续时间推荐温度稳定后继续保持 2 h。

GB/T 38924.3—2020<sup>[11]</sup>规定了民用轻小型无人机系统环境试验的高温试验方法,包括高温贮存试验和高温工作试验。高温贮存试验温度为70℃,试验持续时间推荐温度稳定后再保持3h。高温工作温度如果有关文件未规定试验温度,则推荐飞行器和地面站的舱外部分高温工作温度为55℃,地面站的舱内部分高温工作温度为40℃,试验持续时间推荐温度稳定后再保持2h。高低温试验规定的温度变化速率均不大于3℃/min。

高低温试验所用到的试验箱(室)能力应满足高低温试验各个温度点的要求。试验设备内,空气循环和温度控制系统应能保证受试设备周围的温度在试验温度的容差范围内。试验设备检测精度至少为试验温度允许误差的1/3。试验设备容积应能保证受试无人机不影响规定的试验温度,试验设备容积和受试设备容积之比应至少为5:1,发热受试设备应能达到10:1。受试设备与箱壁距离应不小于10cm。试验设备内空气应进行循环,并且受试设备附近的风速不超过1.7m/s。

#### 1.4 温度和高度试验

温度和高度试验严酷等级的制定需考虑民用轻小型无人机系统使用的最大海拔高度或飞行高度、受试设备高低温工作温度、气压和海拔高度的对应关系、温度变化速率和气压变化速率,来确定温度和气压值。GB/T 38924.4—2020<sup>[12]</sup>规定了民用轻小型无人机系统环境试验的温度和高度试验方法,包括低温低气压试验和高温高压试验。标准推荐给出的试验值见表2。温度变化速率不大于3℃/min,压力变化速率不大于4.8kPa/min。

表2 温度和高度试验值  
Tab.2 Temperature and height test requirements

试验项目	温度/℃	气压/kPa	对应高度/m
低温低气压	-40	40	7150
	-40	55	4850
	-40	70	3000
高温高压	55	40	7150
	55	55	4850
	55	70	3000

温度和高度试验箱(室)能力应满足低温低气压和高温高压所要求的温度和气压范围。吸入试验箱(室)的空气应不会污染试验箱(室)内部和受试设备。

#### 1.5 湿热试验

湿热试验严酷等级的制定需考虑民用轻小型无人机系统在交变湿热情况下的耐受能力,严酷等级值根据产品使用的区域和性能特点进行制定,来确定温度值和相对湿度值。GB/T 38924.7—2020<sup>[13]</sup>规定了民

用轻小型无人机系统环境试验的湿热试验方法。湿热试验的起始温度为30℃,高温温度可以从40、45、50、55、60、65℃中选取,但不能超过受试设备的高温暴露极值。升温、降温阶段相对湿度应 $\geq 85\%$ ,高温、高湿阶段相对湿度应 $\geq 95\%$ ,温度容差为 $\pm 2^\circ\text{C}$ ,相对湿度容差为 $\pm 4\%$ 。

湿热试验设备的能力应满足试验要求的温度和湿度范围,应能保证受试设备周围的温度、湿度在试验要求的容差范围内。试验箱(室)的容积应能保证受试设备不影响规定的温湿度。受试设备与箱壁距离应不小于10cm。试验设备应有通气孔,保证试验箱(室)内外压力平衡。工作区域风速应在0.5~1.7m/s。试验设备产生湿气的水应是蒸馏水或者去离子水。

#### 1.6 盐雾试验

盐雾试验严酷等级的制定需考虑民用轻小型无人机系统在盐雾环境中作业时间的长短,来确定是连续喷雾还是间歇喷雾以及喷雾时间。GB/T 38924.8—2020<sup>[14]</sup>规定了民用轻小型无人机系统环境试验的盐雾试验方法。根据民用轻小型无人机系统在盐雾环境的使用要求,将无人机系统分为A类B类。A类:长时间在内陆环境条件下作业,或偶尔会在沿海地区环境条件下作业的民用轻小型无人机系统;B类:长时间在沿海地区环境条件下作业的民用轻小型无人机系统。

盐溶液的要求是质量分数为 $5\% \pm 1\%$ 氯化钠水溶液,(35 $\pm 2$ )℃时,盐溶液的pH值应为6.5~7.2。试验温度为(35 $\pm 2$ )℃,盐雾沉降率为1~2mL/(80cm<sup>2</sup>·h),应至少收集16h的盐溶液进行测量。

A类设备的试验时间和喷雾方式:从4、8、24h选取,并进行连续喷雾。B类设备的试验时间和喷雾方式:从8h(2h喷雾+2h干燥交替进行,共进行2个周期)、16h(4h喷雾+4h干燥交替进行,共进行2个周期)、48h(12h喷雾+12h干燥交替进行,共进行2个周期)中选取,并进行间歇喷雾。

盐雾试验箱应满足严酷等级要求的温度范围以及能够实现连续喷雾和间歇喷雾功能,辅助设备应能实现盐溶液浓度和pH的测量。

#### 1.7 防水性试验

防水性试验考核民用轻小型无人机系统对水的防护能力,严酷等级的制定考虑受试设备常用作业区域雨淋环境以及暴露时间长短,来确定喷水量以及雨滴直径。GB/T 38924.9—2020<sup>[15]</sup>规定了民用轻小型无人机系统环境试验的防水试验方法。根据民用轻小型无人机系统的使用要求,将无人机系统分为A类和B类。A类:偶尔会在淋雨环境条件下作业的民用轻小型无人机系统;B类:长时间在淋雨环境条件下作业的民用轻小型无人机系统。

A 类设备的试验条件要求：雨滴直径为 0.2~0.5 mm，喷水量为 140~280 L/(m<sup>2</sup>·h)，持续时间为 15 min。B 类设备的试验条件比 A 类设备要严酷，雨滴直径为 0.5~4.5 mm，喷水量为 280~450 L/(m<sup>2</sup>·h)，持续时间为 40 min。

防水性试验设备能力应能满足试验所要求的严酷等级值范围。试验设备应能产生一定压力的供水水源。在 25 ℃下，水的 pH 值应为 6.5~7.2。

## 1.8 沙尘试验

沙尘试验考核民用轻小型无人机系统对沙尘的防护能力，严酷等级的制定考虑受试设备常用作业区域的沙尘环境，来确定吹尘或吹砂速度及其浓度。GB/T 38924.10—2020<sup>[16]</sup>规定了民用轻小型无人机系统环境试验的沙尘试验方法。根据民用轻小型无人机的使用要求，将无人机系统分为 D 类设备和 S 类设备。D 类：作业过程中会经受吹尘影响的无人机系统，例如在未铺砌地面起降的无人机系统，该类设备应考虑吹尘试验。S 类：作业过程中会经受吹砂和吹尘影响的无人机系统，例如在沙漠地区作业、起降的无人机系统，尤其是没有专门防沙尘措施的无人机系统。

标准分别对吹尘试验条件和吹砂试验条件进行规定。尘质量浓度应保持在 3.5~8.8 g/m<sup>3</sup>。根据受试设备使用的环境不同，试验用砂浓度也不同。对于只暴露在自然环境条件下的受试设备，砂的质量浓度为 (0.18±0.2) g/m<sup>3</sup>；对于无防护储存措施或者可能在地面运行车辆附件作业的受试设备，砂的质量浓度为 (1.1±0.3) g/m<sup>3</sup>；对于可能在未铺砌地面上起降的直升机附件使用的受试设备，砂的质量浓度为 (2.2±0.5) g/m<sup>3</sup>。吹尘风速应保持在 2.4~8.9 m/s，吹砂风速应保持在 18~29 m/s。

试验箱内环境条件，第 1 阶段温度为(25±2) ℃，第 2 阶段温度为(55±2) ℃，相对湿度≤30%。吹尘方向应在受试设备 3 个正交轴 6 个方向进行，每个阶段每个方向试验时间应大于等于 1 h。

沙尘试验设备应满足严酷等级中要求的沙尘浓

度、风速、温度、相对湿度控制的要求。注入系统应能维持试验箱(室)内有足够浓度、均匀的悬浮沙尘。试验设备应有良好的密封性，以免试验过程中泄漏沙尘，且有收集和回收装置。

## 2 机械环境试验方法分析

### 2.1 机械环境因素的影响

民用轻小型无人机系统环境试验方法除了考虑气候环境，还包括机械环境影响因素。由于无人机在运输过程中会发生颠簸，或者发生意外跌落，都有可能对产品造成损坏。无人机在作业使用过程中，自身因素引起的振动冲击，电流对振动的影响，都会造成产品的性能下降，机械环境因素对无人机结构和飞行可靠性影响较大<sup>[17-18]</sup>。机械环境因素试验标准主要包括 GB/T 38924.5—2020、GB/T 38924.6—2020，分别对应冲击试验和振动试验。

### 2.2 冲击试验

冲击试验考核民用轻小型无人机系统对瞬间产生的机械冲击的耐受能力，严酷等级应考虑受试设备自身因素(设备类型、质量等)以及外界冲击因素(碰撞、意外跌落等)对其的影响，来确定峰值加速度、脉冲时间以及冲击次数。GB/T 38924.5—2020<sup>[19]</sup>规定了民用轻小型无人机系统环境试验的冲击试验方法，将自由跌落试验写进了冲击试验方法中，并规定了跌落高度。冲击波形采用后峰锯齿波。根据受试设备类别和起飞质量(0.25~150 kg)，对飞行冲击试验量值进行划分，规定标称脉冲时间为 11 ms。试验轴向为三轴向，冲击次数为每个方向 3 次，主要区别在于峰值加速度量值不一样，最大 6g，最小 2.5g。

实验室以固定翼无人机为例，最大起飞质量大于 0.25 kg，小于等于 50 kg。根据 GB/T 38924.5—2020 中规定的冲击试验等级，峰值是 5g，脉冲持续时间为 11 ms，冲击次数每个方向 3 次，试验得到的曲线如图 1 所示。

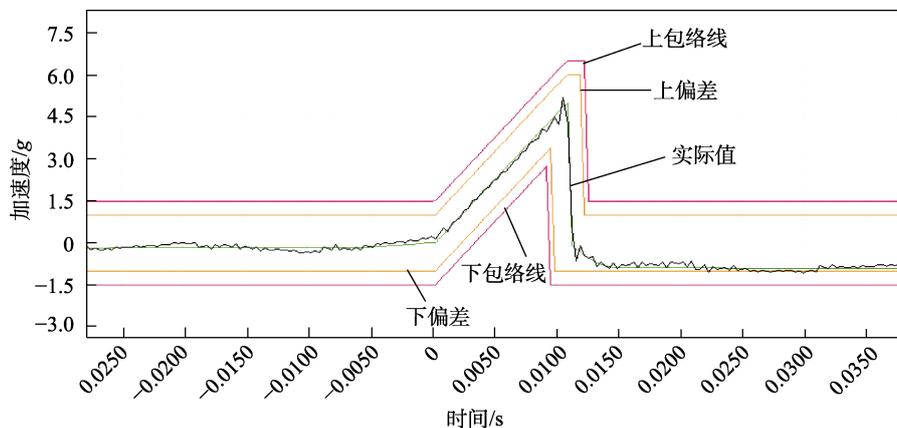


图 1 冲击试验曲线  
Fig.1 Shock test curve

冲击试验设备应能输出试验所要求的冲击激励波形、峰值加速度、脉冲时间。自由跌落试验用表面应是混凝土或是钢制成的平滑、坚硬的刚性表面。

### 2.3 振动试验

振动试验考核民用轻小型无人机系统在机械振动环境下的耐受能力，严酷等级应考虑受试设备自身因素（设备类型、质量、动力形式等）以及外界振动因素（运输等）对其的影响，来确定随机振动功率谱密度、正弦振动加速度、扫频速率以及振动时间。GB/T 38924.6—2020<sup>[20]</sup>规定了民用轻小型无

人机系统环境试验的振动试验方法，包括标准振动试验和运输振动试验。其中，标准振动试验包括随机振动试验、正弦振动试验以及正弦加随机振动试验，运输振动试验条件包括随机振动试验条件和跑车试验条件。

根据受试设备类别、动力形式和起飞质量(0.25~150 kg)对试验量值进行定量划分。试验轴向为三轴向，试验时间为每个轴向1 h，试验频率范围和幅值见 GB/T 38924.6—2020 中附录 A。实验室以 GB/T 38924.6—2020 中运输振动试验的随机振动环境试验为例进行试验，参数见表 3。试验曲线如图 2 所示。

表 3 运输振动试验参数  
Tab.3 Transport vibration test parameter value

垂直轴 Y		横侧轴 Z		纵向轴 X	
频率/Hz	功率谱密度/(g <sup>2</sup> ·Hz <sup>-1</sup> )	频率/Hz	功率谱密度/(g <sup>2</sup> ·Hz <sup>-1</sup> )	频率/Hz	功率谱密度/(g <sup>2</sup> ·Hz <sup>-1</sup> )
10	0.015	10	0.000 13	10	0.006 5
40	0.015	20	0.000 65	20	0.006 5
500	0.000 15	30	0.000 65	120	0.000 2
—	—	78	0.000 02	121	0.003
—	—	79	0.000 19	200	0.003
—	—	120	0.000 19	240	0.001 5
—	—	500	0.000 01	340	0.000 03
—	—	—	—	500	0.000 15

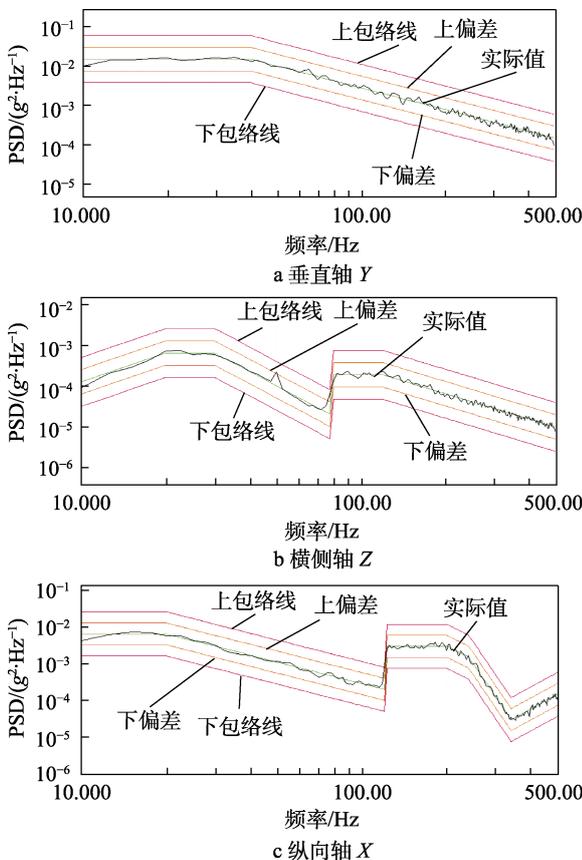


图 2 运输振动试验曲线

Fig.2 Transport vibration test curve: a) vertical axis Y; b) vertical axis Z; c) vertical axis X

振动试验设备能力应满足 GB/T 38924.6—2020 中附录 A 规定的试验量级的要求。随机振动试验控制信号的加速度功率谱密度，在 50 Hz 以下，控制容差不应超过±3 dB 或-1.5 dB，500~2000 Hz 不应超过±3 dB，总均方根值控制容差应在 20%~5%。正弦振动试验，加速度量值控制容差应在±10%范围内。

### 3 环境试验方法几点建议

1) 气候环境试验中，低温试验和高温试验要注意升降温速率的选择。对于常规的电子元器件产品，要求温度变化速率不超过 1 °C/min，GB/T 38924—2020 要求不大于 3 °C/min。在试验过程中，可以选择较低温度变化速率，以满足标准的要求，保证受试设备受热均匀。

2) 气候环境试验中，盐雾试验要注意试验周期的选择。根据受试设备类别的不同，选择试验方法是连续喷雾还是间接喷雾，试验周期的选择对检查受试设备盐雾试验的耐受能力起着重要的作用。试验过程中，盐溶液浓度和 pH 的监测，需要对收集溶液进行测量确定。

3) 机械环境试验中，要注意试验量级的选择，首先根据无人机类别和起飞质量进行选择试验量级。试验过程中，对无人机样品的安装方式也尤其重要，要用专用夹具将受试设备安装在台面上，保证夹具的刚性和对称性与实际使用情况一样，受试设备按其规

定的方式连接在夹具和振动台面上。对外部装有减振器或缓冲器的受试设备, 应将减振器或缓冲器和受试设备一起进行试验。

## 4 结语

GB/T 38924—2020 系列环境试验方法国家标准的发布实施, 为民用轻小型无人机系统环境试验提供了试验方法指南, 为质检行业提供了检测方法依据, 为无人机行业提供了产品质量保证, 能够促进无人机行业健康有序地发展。通过实验室对部分环境试验进行实施, 给出试验曲线, 并对环境试验方法提出几点建议, 有利于提高检测人员的试验能力, 有利于行业检测水平的提高。

### 参考文献:

- [1] 张飞. 无人机行业发展现状与未来展望[J]. 产业与科技论坛, 2020, 19(20): 14-15.  
ZHANG Fei. Development Status and Prospect of UAV Industry[J]. Industrial & Science Tribune, 2020, 19(20): 14-15.
- [2] 黄凤娟. 中国无人机行业的发展分析[J]. 安徽电子信息职业技术学院学报, 2020, 19(5): 102-106.  
HUANG Feng-juan. Analysis on the Development of UAV Industry in China[J]. Journal of Anhui Vocational College of Electronics & Information Technology, 2020, 19(5): 102-106.
- [3] 刘怡彪, 薛珂, 王春科. 国外无人机发展趋势研究[J]. 工程与试验, 2020, 60(3): 41-42, 64.  
LIU Yi-biao, XUE Ke, WANG Chun-ke. Research on the Development Trend of Foreign UAV[J]. Engineering & Test, 2020, 60(3): 41-42, 64.
- [4] 邵文武, 杨进程, 黄涛. 我国民用无人机市场发展现状及存在问题分析[J]. 沈阳航空航天大学学报, 2019, 36(6): 61-69.  
SHAO Wen-wu, YANG Jin-cheng, HUANG Tao. Analysis on the Development Status and Existing Problems of Civil UAV Market in China[J]. Journal of Shenyang Aerospace University, 2019, 36(6): 61-69.
- [5] 魏英魁, 胡彦平, 宫晓春. 某型号无人机环境试验技术策划[J]. 装备环境工程, 2019, 16(7): 32-34.  
WEI Ying-kui, HU Yan-ping, GONG Xiao-chun. Environmental Test Technology Scheme for a Certain Type of UAV[J]. Equipment Environmental Engineering, 2019, 16(7): 32-34.
- [6] 孙敏, 葛庆庆. 某型无人机温-湿-高试验的设计与实施[J]. 环境技术, 2015, 33(6): 12-14.  
SUN Min, GE Qing-qing. Design and Implementation of Temperature-Humidity-Altitude Test for a Kind of UAV[J]. Environmental Technology, 2015, 33(6): 12-14.
- [7] 胥泽奇, 张世艳, 宣卫芳. 装备环境适应性评价[J]. 装备环境工程, 2012, 9(1): 54-59.  
XU Ze-qi, ZHANG Shi-yan, XUAN Wei-fang. Environmental Worthiness Evaluation of Equipment[J]. Equipment Environmental Engineering, 2012, 9(1): 54-59.
- [8] 唐虎, 李喜明. 飞机气候试验[J]. 装备环境工程, 2012, 9(1): 60-65.  
TANG Hu, LI Xi-ming. Climatic Test of Aircraft[J]. Equipment Environmental Engineering, 2012, 9(1): 60-65.
- [9] 张亚娟, 吴敬涛, 孟宁. 飞机实验室风吹雨气候环境试验技术研究[J]. 装备环境工程, 2017, 14(11): 59-63.  
ZHANG Ya-juan, WU Jing-tao, MENG Ning. Wind and Rain Test of Aircraft in Climatic Environment Laboratory[J]. Equipment Environmental Engineering, 2017, 14(11): 59-63.
- [10] GB/T 38924.2—2020, 民用轻小型无人机系统环境试验方法 第2部分: 低温试验[S].  
GB/T 38924.2—2020, Environmental Test Methods for Civil Small and Light Unmanned Aircraft System—Part 2: Low-Temperature Test[S].
- [11] GB/T 38924.3—2020, 民用轻小型无人机系统环境试验方法 第3部分: 高温试验[S].  
GB/T 38924.3—2020, Environmental Test Methods for Civil Small and Light Unmanned Aircraft System Part 3: High-Temperature Test[S].
- [12] GB/T 38924.4—2020, 民用轻小型无人机系统环境试验方法 第4部分: 温度和高度试验[S].  
GB/T 38924.4—2020, Environmental Test Methods for Civil Small and Light Unmanned Aircraft System—Part 4: Temperature and Altitude Test[S].
- [13] GB/T 38924.7—2020, 民用轻小型无人机系统环境试验方法 第7部分: 湿热试验[S].  
GB/T 38924.7—2020, Environmental Test Methods for Civil Small and Light Unmanned Aircraft System Part 7: Humidity Test[S].
- [14] GB/T 38924.8—2020, 民用轻小型无人机系统环境试验方法 第8部分: 盐雾试验[S].  
GB/T 38924.8—2020, Environmental Test Methods for Civil Small and Light Unmanned Aircraft System Part 8: Salt Spray Test[S].
- [15] GB/T 38924.9—2020, 民用轻小型无人机系统环境试验方法 第9部分: 防水性试验[S].  
GB/T 38924.9—2020, Environmental Test Methods for Civil Small and Light Unmanned Aircraft System Part 9: Waterproofness Test[S].
- [16] GB/T 38924.10—2020, 民用轻小型无人机系统环境试验方法 第10部分: 沙尘试验[S].  
GB/T 38924.10—2020, Environmental Test Methods for Civil Small and Light Unmanned Aircraft System Part 10:

- Sand and Dust Test[S].
- [17] 曹惠茹, 钟晓婷, 祝文坚, 等. 多旋翼无人机振动与发热测试与试验[J]. 电子测量技术, 2018, 41(18): 97-101.  
CAO Hui-ru, ZHONG Xiao-ting, ZHU Wen-jian, et al. Experiment of Vibration and Heating for Multi-Rotor UAV[J]. Electronic Measurement Technology, 2018, 41(18): 97-101.
- [18] 程文彬, 陆瑞强, 杨振鸿, 等. 小型多旋翼无人机安全性能检验方法探讨[J]. 轻工标准与质量, 2020(5): 108-109.  
CHENG Wen-bin, LU Rui-qiang, YANG Zhen-hong, et al. Discussion on Safety Inspection Method of Small Multi-Rotor UAV[J]. Standard & Quality of Light Industry, 2020(5): 108-109.
- [19] GB/T 38924.5—2020, 民用轻小型无人机系统环境试验方法 第5部分: 冲击试验: [S].  
GB/T 38924.5—2020, Environmental Test Methods for Civil Small and Light Unmanned Aircraft System Part 5: Shock Test[S].
- [20] GB/T 38924.6—2020, 民用轻小型无人机系统环境试验方法 第6部分: 振动试验[S].  
GB/T 38924.6—2020, Environmental Test Methods for Civil Small and Light Unmanned Aircraft System Part 6: Vibration Test[S].