

机载设备温度试验摆放间距研究

郭丽娜, 郭世勇, 郭华鹏, 高援凯, 余壮, 高海峰, 万翔, 钱磊

(中国航空工业集团公司 洛阳电光设备研究所, 河南 洛阳 471000)

摘要: **目的** 在多台产品进行温度试验时, 确定高低温试验箱中产品合理的放置间距, 以确保试验有效。**方法** 基于接触式测量, 对机箱类产品的摆放间隔随温度变化进行测试, 并对所有测试结果画出数据曲线, 进行分析研究。**结果** 通过对高低温试验箱中 1、5、10、15 cm 放置间距的产品的温度变化情况进行测定, 经过对比分析研究, 最终确定了合理的放置间距。**结论** 经过分析研究, 最终确定按照测试方案中制定的 10 cm 间距摆放, 则整个试验过程可信度仍较高。

关键词: 机载设备; 温度试验; 间距; 接触式; 采集; 环境试验

中图分类号: V271.4

文献标识码: A

文章编号: 1672-9242(2023)07-0083-07

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2023.07.011

Effect of Placement Distance of Aviation Equipment in Temperature Test

GUO Li-na, GUO Shi-yong, GUO Hua-peng, GAO Yuan-kai, YU Zhuang, GAO Hai-feng, WAN Xiang, QIAN Lei

(Luoyang Institute of Electro-Optical Equipment, AVIC, Henan Luoyang 471000, China)

ABSTRACT: The work aims to determine the reasonable placement distance of products in the high and low temperature test boxes when testing the temperature of multiple products, so as to ensure the effectiveness of the test. Based on touching measurement, the change of placement distance of chassis products with the temperature was tested and the data curves for all test results were drawn for analysis and research. By measuring the temperature changes of products with distance of 1, 5, 10 and 15 cm in the high and low temperature test boxes, the reasonable distance was finally determined through comparative analysis and research. After analysis and research, it is finally determined to place the product according to the distance of 10 cm set in the test plan, which can achieve high credibility of the whole test process.

KEY WORDS: aviation equipment; temperature test; distance; touching; collection; environment test

温度试验是机载设备环境试验中的重要一项, 它通过在实验室条件下模拟机上的真实环境, 用以考核设备能否经受机上的温度环境条件, 是保证设备质量的一种重要手段^[1-2]。无论是在航空机载设备的科研研制过程中, 还是生产批量交付过程中, 都需要进行温度试验。对于研制阶段的设备来说, 为保证设备质

量的稳定性, 温度试验条件通常直接采用系统的条件, 系统下所包含的组件往往不止 1 个, 在试验中需要同时放置于 1 个试验箱内, 不同设备的发热情况会因试验的摆放间距对试验效果产生直接影响。对于批生产阶段的设备来说, 同型号设备往往大批量放置于同一试验箱内, 容易忽略设备间发热对于试验效果的

收稿日期: 2022-10-18; 修订日期: 2023-02-10

Received: 2022-10-18; Revised: 2023-02-10

作者简介: 郭丽娜 (1978—), 女。

Biography: GUO Li-na (1978-), Female.

引文格式: 郭丽娜, 郭世勇, 郭华鹏, 等. 机载设备温度试验摆放间距研究[J]. 装备环境工程, 2023, 20(7): 083-089.

GUO Li-na, GUO Shi-yong, GUO Hua-peng, et al. Effect of Placement Distance of Aviation Equipment in Temperature Test[J]. Equipment Environmental Engineering, 2023, 20(7): 083-089.

影响。经过对前期多型号设备温度试验的试验实施过程和试验结果详细梳理发现,在温度试验过程中,机箱类设备涉及摆放间距的情况较多,过大的摆放间距会严重影响试验进度、科研及交付任务,降低试验效率,过小的摆放间距会引起过试验的现象出现,引起非关联故障的出现^[3]。

本文将针对上述问题开展研究工作。基于接触式测量技术,测试研究机箱类设备摆放间隔对温度变化的影响,探究不同间距下对于高低温筛选试验过程的影响,最终达到发挥试验箱最大效率的同时,避免过试验情况发生的目的,从而改善试验过程,提升设备试验的有效性。

1 理论分析

1.1 温度试验的热传递基本理论

温度试验的热传递基本理论可用 3 个定律来描述,即牛顿冷却定律、傅里叶定律和能量守恒定律。一般情况下,试验箱内热源(或冷源)与试验样品表面间的热交换可用牛顿冷却定律进行描述,见式(1)。

$$Q_d = \alpha \times F \times \Delta t_z \quad \alpha \propto v \times C \quad (1)$$

式中: Q_d 为产品获得或失去的热量; α 为对流换热系数; v 为流体与固体的相对流速; C 为流体的比热容; F 为被试产品表面的面积; Δt_z 为被试产品表面与包围产品气流的温度差。

被试产品表面部件温度改变后,和其相邻部件间会出现温度差,热量沿着温度梯度的方向,选择热阻最小途径向内部其他部件(或反向)传递。物体内部热量传递服从傅里叶定律,即:

$$q = (\lambda \times \Delta t) / L \quad (2)$$

式中: λ 为物质的导热系数; Δt 为传递途径上的温度差; L 为传递路径的长度。

被试产品内部各零件自身温度的改变取决于该部件其本身的热容量大小。根据能量守恒定律,其表达式为:

$$\Delta t_s = Q_d / (V \times C \times \gamma) \quad (3)$$

式中: Q_d 为零件从自身表面获得或失去的热量;

C 为组成该零件的材料的比热容; V 为组成该零件的材料的体积; γ 为组成该零件的材料的密度。式(1) — (3) 反映了温度试验中的所有影响要素。

1.2 摆放间距对温度试验的影响分析

通常认为,温度试验中摆放被试品是一件非常简单的事情,试验的实施者进行这类操作时有一定的随意性。对于一些稳态性的温度试验,如高(低)温的工作试验,高(低)温贮存试验,恒温恒湿、盐雾、霉菌等气候试验。出于试验机理和考核目的,规定升降温过程中温度变化的速率很低,因而在变温过程中被试产品内部温度场的差异性较小,由温差效应带来的被试产品内部的温差应力也很小,故被试品在试验箱中的摆放相对试验结果的影响小。然而,在一些包含快速温度循环的可靠性试验和高变温速率的环境应力筛选(高加速试验)以及电工电子产品的温度变化试验中,由于试验过程中的温度变化速率很高,在变温过程中被试产品内部温度场的分布非常不均匀,被试品在试验箱内由于摆放间距会导致相互之间的热传导速度不同,会在被试品内部激发出完全不一样的温度场,由温差效应带来的被试品内部温度应力场也会大不相同,也有可能引起强烈的温差效应,使产品的潜在缺陷显现为故障。因此,被试品在试验箱中的摆放间距是对试验结果有较大影响的一个条件^[3]。

2 研究方案介绍

2.1 测试仪器

本次试验所用的测试设备是温度自动测试仪^[4],如图1所示,其技术参数见表1。该设备由采集器与计算机合二为一,主机将计算机集成于一体,代替了原来的数据采集器,以及笔记本电脑设备复杂、操作麻烦的程序,可自行处理数据处理,记录打印可自行完成。

2.2 多设备间距试验方案设计

试验中以 2 套系统共计 8 台机箱作为被试品,第



图1 温度测试仪
Fig.1 Temperature tester

表 1 温度测试仪技术参数
Tab.1 Technical parameters of temperature tester

参数项目	参数值
型号	HT0330
外形尺寸	390 mm×320 mm×85 mm
质量	约 8.0 kg
精度等级	0.02%
温度测量范围	-80~1 600 ℃
湿度测量范围	0~100%
热电偶显示分辨率	0.01 ℃
热电阻显示分辨率	0.01 ℃
湿度显示分辨率	0.01%
通道数	热电偶 40 个、热电阻 20 个、湿度 20 个
热电偶冷端处理方式	支持自动补偿及手动补偿

1—4 台在温度箱靠里侧一排, 每台被试品之间间距按照 GJB 150A^[5-6]推荐的距离 15 cm; 第 5—8 台在温度箱靠外侧为一排, 且每台被试品间距为 1 cm, 标定依据为实际交付过程中放置的普遍情况。温度传感器通道 1—6 分别在 2 台设备的中间位置, 通道 7 和通道 8 为别粘贴在温度箱底部和上部, 其具体分布位置如图 2 所示。

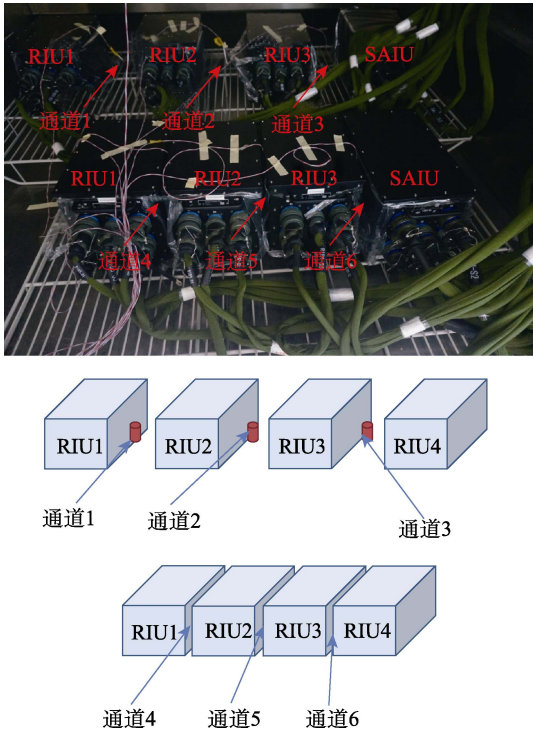


图 2 温度测试点位置
Fig.2 Temperature test points

本文以实际测试情况为经验, 指定 4 种测试方案。其中, 1 cm 极小间距测试方案模拟试验箱最大有效容积试验过程; 5 cm 中等间距测试方案模拟试

验箱非饱和和试验过程; 10 cm 中等间距测试方案模拟试验箱非饱和和试验过程; 15 cm 标准间距测试方案模拟试验箱标准试验过程。根据试验设备情况与试验目标, 将测试方案分为以下 4 种, 见表 2。

表 2 测试方案
Tab.2 Test plan

序号	测试方案	设备间距/cm
1	极小间距——典型交付情况(60%)	1
2	中等间距——普遍交付情况(20%)	5
3	中等间距——常见交付情况(15%)	10
4	标准间距——非典型交付情况(5%)	15

3 试验过程

3.1 方案 4 基准曲线测定^[7-8]

为测定被试品间距对温度试验效果的影响, 首先需要对试件符合 GJB 150A 推荐距离 (15 cm 间距) 的标准温度曲线, 并监测其试验数据和温度曲线, 该试验数据作为标准试验条件下试验效果的基准曲线 (标准试验监测曲线)。试验过程中按照标准的筛选剖面通断电要求进行设备上电, 试验在进行 2 个循环后结束^[9-12], 收集保存数据后准备进行间距试验。试验步骤如下:

1) 将 1—4 台被试品居中放置在温度箱的置物架上, 处理机与试验箱内壁间保持 15 cm 的距离, 以确保空气能正常循环, 如图 3 所示。

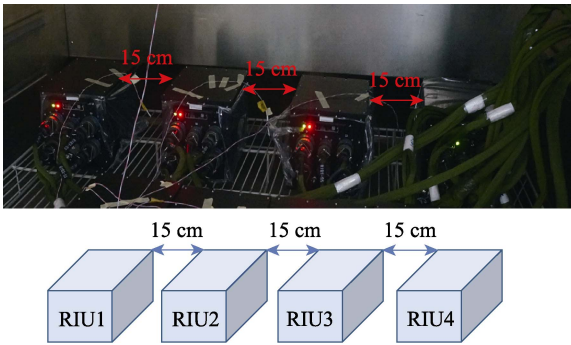


图 3 方案 4 标准间距下设备和传感器分布
Fig.3 Equipment and sensor distribution under standard distance in plan 4

- 2) 在设备间布置温度传感器, 粘贴温度传感器^[13]。
- 3) 关闭箱门, 同时开启温度自动测试系统, 实时记录各温度传感器的温度^[8]。
- 4) 将温度箱设置为 25 ℃, 启动。监控温度自动测试系统, 直至所有测试点温度均达到 25 ℃。
- 5) 将温度箱设置为-55~71 ℃的筛选循环曲线, 同时温度自动测试系统记录各温度传感器的温度^[14]。

6) 通过温度自动测试系统每分钟采集 1 次温度数据, 记录 2 个循环过程中非工作与工作状态下该部件上所有传感器的试验数据。

3.2 方案 1、2、3 测试过程

依据设备放置间距的定义, 在进行多设备温度试验时, 应尽量使所有试件重心保持在一条直线上。试验过程中重点关注的是温度巡检仪记录的各型设备的温变曲线。整个试验过程均严格控制温度巡检仪的各路温度传感器始终准确记录测温点的温度变化曲线, 严格控制试验箱中的运行剖面与试验剖面相符合^[15]。具体步骤如下:

1) 将 4 台设备居中放置在温度箱的置物架上, 为了探究试验效果, 除中心试件外, 所有试件距箱壁按照 GJB 150A 的要求保持 15 cm 以上, 试件间距离按照梯度设定, 后续根据前一次试验情况不断迭代调整。本次试验中, 4 台设备间距设定为 1、5、10 cm, 距离两侧箱壁均大于 15 cm, 以确保空气能正常循环, 如图 4—6 所示。

2) 关闭箱门, 同时开启温度自动测试系统, 实时记录各温度传感器的温度。

3) 将温度箱设置为 25℃, 启动温度箱。监控温度自动测试系统, 直至所有测试点温度均达到 25℃。

4) 将温度箱设置为 -55~71℃ 的筛选循环曲线, 同时温度自动测试系统记录各温度传感器的温度。

5) 通过温度自动测试系统每分钟采集 1 次温度数据, 记录 2 个循环过程中非工作与工作状态下该部件上所有传感器的试验数据。

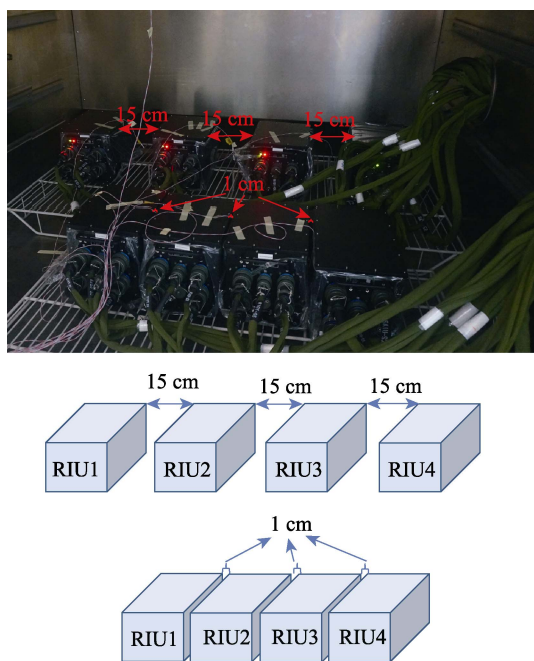


图 4 标准和极小间距下设备和传感器分布
Fig.4 Equipment and sensor distribution under standard and minimal distance

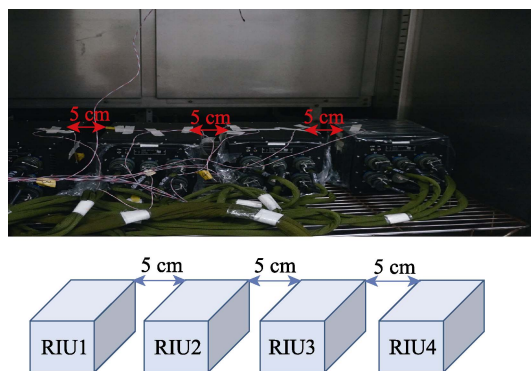


图 5 中等间距 5 cm 下设备和传感器分布
Fig.5 Equipment and sensor distribution under moderate distance of 5 cm

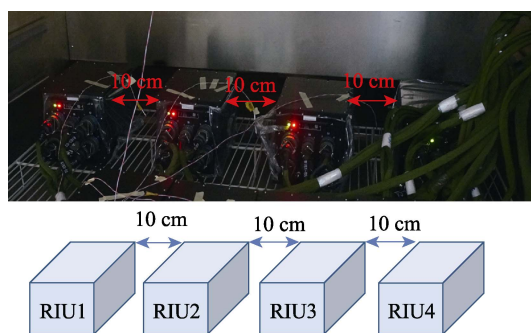


图 6 中等间距 10 cm 下设备和传感器分布
Fig.6 Equipment and sensor distribution under moderate distance of 10 cm

4 试验数据处理及分析

4.1 标准间距下温度循环筛选测试结果

温度自动测试系统测得标准间距下温度随时间的变化曲线如图 7 所示。其中, 通道 1、2、3 分别位于温度箱内侧的 4 台设备中间, 通道 7、8 分别位于温度箱底部和顶部位置。通过分析图 7 可知, 通道 1、2、3 所对应的 3 条曲线的升降温过程为线性, 并且与通道 7、8 所对应的温度随时间的变化曲线的拟合度较高。因此, 在按照 GJB 150A 的要求摆放设备时, 设备周围的环境温度变化过程与温度箱设定的升温过程符合, 升温过程呈线性。若在交付过程中进行筛选试验时, 按照标准及测试方案中制定的 15 cm 间距摆放, 则整个筛选过程的可信度较高, 能完全满足筛选剔除早期缺陷的环境试验要求, 达到筛选试验的目的。

4.2 极小间距下温度循环筛选测试结果

温度自动测试系统测得极小间距下温度随时间的变化曲线如图 8 所示。其中, 通道 1、2、3 为标准间距, 通道 4、5、6 为极小间距, 通道 7、8 为筛选箱顶部及底部。通过分析图 8 可知, 相比较于标准间

距,极小间距下4台设备周围的环境温度变化过程滞后于温度箱设定的温度变化,在高低温循环的保温阶段,存在明显的欠试验现象。根据图8中第一循环升温及高温段定量分析可知,存在75 min的滞后效应。由第一循环的降温及低温段定量分析可知,存在50 min的滞后效应。其中,第5—8台中的RIU2与

RIU3之间通道5的温变速率最慢(116 min),说明通道5温度传感器所在位置的温度滞后效应最大。若在交付过程中进行筛选试验时,按照测试方案中制定的1 cm间距摆放,则整个筛选过程的可信度较低,不能满足筛选剔除早期缺陷的环境试验要求,达不到筛选试验的目的。

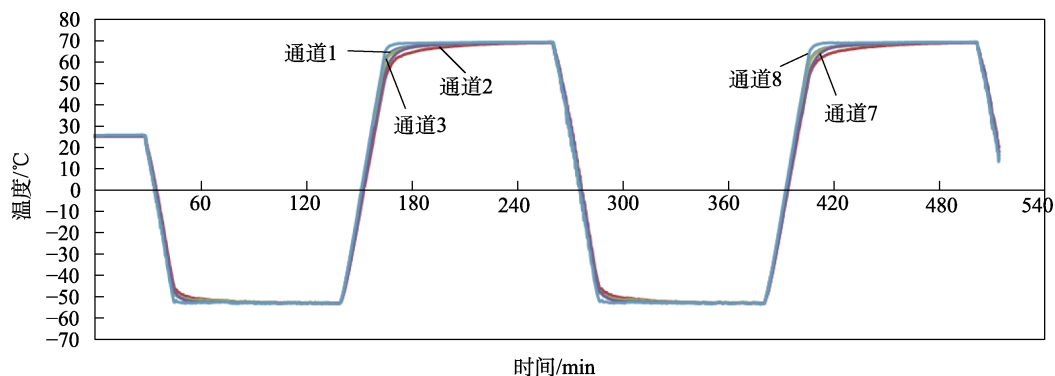


图7 标准间距下温度随时间的变化

Fig.7 Change of temperature with time under standard distance

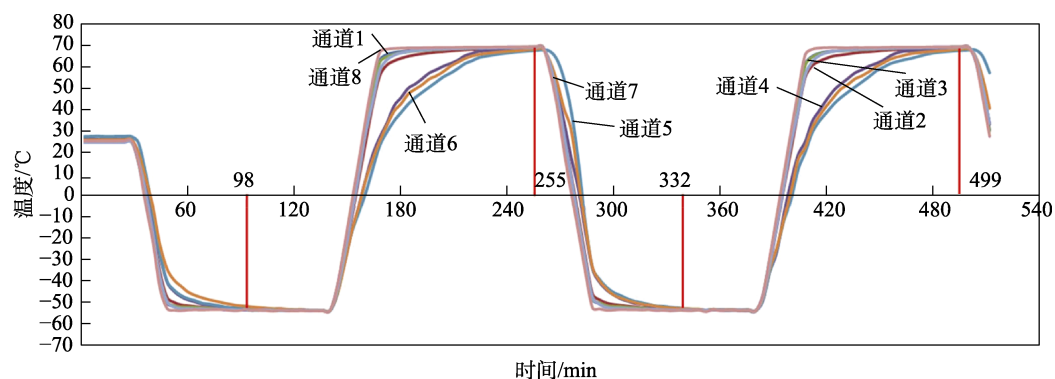


图8 极小间距下温度随时间的变化

Fig.8 Change of temperature with time under minimal distance

4.3 中等间距 5 cm 下温度循环筛选测试结果

在中等间距下温度循环筛选刚开始时,由于设备故障,试验出现过中断,因此截取筛选过程中的2个循环进行分析。温度自动测试系统测得8个通道温度随时间的变化趋势如图9所示。分析图9可知,相比较于标准间距,中等间距(5 cm)下4台设备周围的环境温度变化过程滞后于温度箱设定的温度变化。在高低温循环的保温阶段,存在欠试验的现象。根据第一循环升温及高温段定量分析可知,存在52 min的滞后效应。由第一循环的降温及低温段定量分析可知,存在28 min的滞后效应。其中,第5—8台的RIU2与RIU3之间的通道5的温变速率最慢(92 min),说明通道5的温度传感器所在的位置温度滞后效应最大。若在交付过程中进行筛选试验时,按照测试方案中制定的5 cm间距摆放,则整个筛选

过程的可信度仍较低,不能满足筛选剔除早期缺陷的环境试验要求,达不到筛选试验的目的。

4.4 中等间距 10 cm 下温度循环筛选测试结果

截取中等间距10 cm下温度循环筛选过程中的2个循环进行分析,如图10所示。通过分析图10可知,相比较于标准间距,中等间距(10 cm)下4台设备周围的环境温度变化过程滞后于温度箱设定的温度变化较小,在高低温循环的保温阶段,基本上不存在欠试验现象。根据图10中第一循环升温及高温段定量分析可知,存在10 min的滞后效应。由第一循环的降温及低温段定量分析可知,存在8 min的滞后效应。其中,第5—8台的RIU2与RIU3之间的通道5温变速率最慢,说明通道5的温度传感器所在的位置温度滞后效应最大。

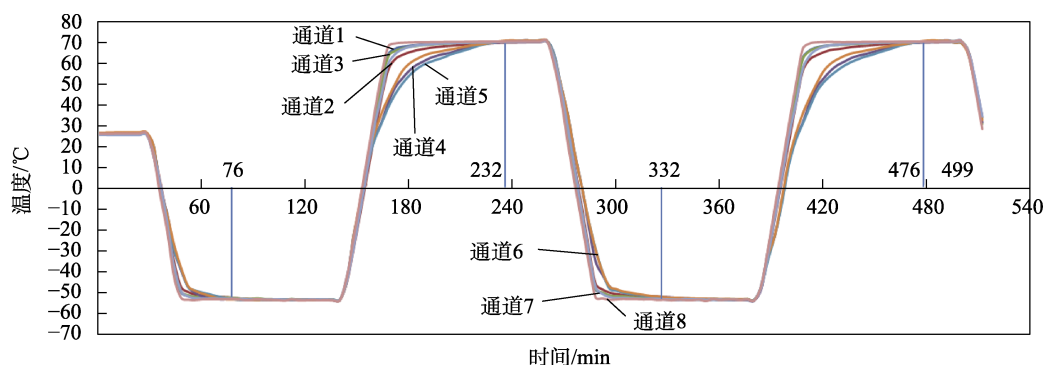


图 9 中等间距 5 cm 下温度随时间的变化

Fig.9 Change of temperature with time under moderate distance of 5 cm

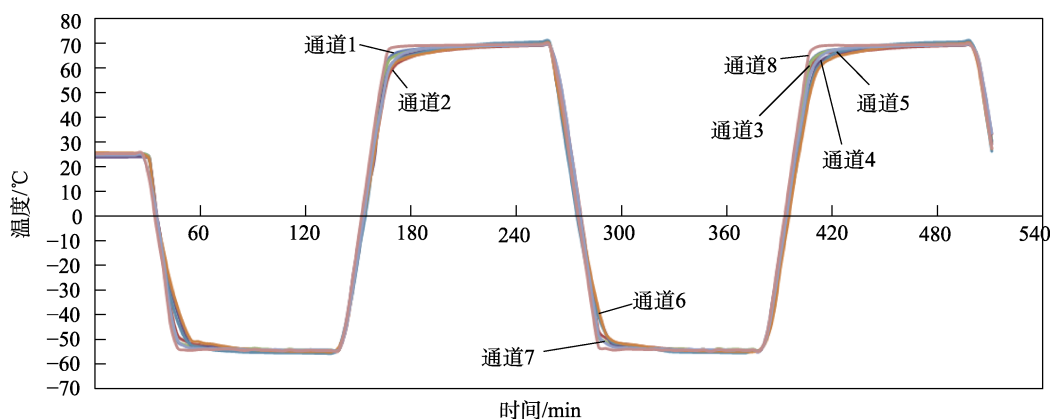


图 10 中等间距 10 cm 下温度随时间的变化

Fig.10 Change of temperature with time under moderate distance of 10 cm

若在试验过程中进行筛选试验时,按照测试方案中制定的 10 cm 间距摆放,则整个筛选过程的可信度仍较高。其中,高温段的温度滞后效应相较于整个恒温过程的占比 8.3%,低温段的温度滞后效应相较于整个恒温过程占比 6.7%。上述指标均在 10%内^[16-17],能够满足筛选剔除早期缺陷的环境试验要求,在达到筛选试验目的的同时能够缩短试验间距 5 cm,提升试验效率 30%。

5 结论

本文采用基于接触式测量的温度曲线变化测试方法,探究设备的摆放间距对于筛选试验效果的影响,并找出最佳摆放距离。研究成果可直接应用于机箱类设备的筛选、温度试验,显著提高机箱类设备的试验效率,研究成果已在同类型产品筛选试验中应用,并取得直接成效。

经过本文所开展的研究,机箱类设备在进行温度试验前需注意以下几点^[18-19]:

1) 对于不同设备合箱筛选的情况,尽量保持不同型设备间距 10 cm 以上进行高低温试验,虽不完全符合 GJB 150 相关规定,但误差仍能够满足 10%以内要求。有条件的情况下,应尽可能将功耗高的设备放

置于试验箱边缘(保持距离试验箱内壁 15 cm 以上)。

2) 在同型多设备交付同时提交筛选试验时,应严禁将各设备间距摆放在 10 cm 以下,避免试验中欠试验现象产生,影响故障析出。

3) 在多设备摆放过程中,不摆仅应关注设备间放距离,还要注意各设备与试验箱体各面应保持 15 cm 以上的距离。

参考文献:

- [1] 胡志强. 环境与可靠性试验应用技术[M]. 北京: 中国质检出版社, 2016.
HU Zhi-qiang. Application Technology of Environment and Reliability Test[M]. Beijing: China Quality Inspection Press, 2016.
- [2] 何国伟. 可靠性试验技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 1995.
HE Guo-wei. Reliability Testing Technology[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1995.
- [3] 崔晓非, 王军义. 风速和摆放对温度试验中散热产品的影响[J]. 环境技术, 2018, 36(4): 10-13.
CUI Xiao-fei, WANG Jun-yi. Influence of Wind Speed and Position on Heat Dissipation Products in Temperature

- Test[J]. Environmental Technology, 2018, 36(4): 10-13.
- [4] 徐涛, 戚长森. 基于 CompactRIO 的便携式航空发动机温度采集系统[J]. 测控技术, 2016, 35(3): 50-53.
- XU Tao, QI Chang-sen. Portable Temperature Acquisition System for Aero-Engine Based on CompactRIO[J]. Measurement & Control Technology, 2016, 35(3): 50-53.
- [5] GJB 150.1A—2009, 军用装备实验室环境试验方法[S]. GJB 150.1A—2009, Laboratory Environmental Test Methods for Military Materiel[S].
- [6] MIL-STD-810G, Environmental Engineering Considerations and Laboratory Tests[S].
- [7] 蔡良续, 龙德中, 宋小燕, 等. 温度环境试验及其标准综述(一)温度对装备的影响及温度试验的重要性[J]. 环境技术, 2014(4): 93-96.
- CAI Liang-xu, LONG De-zhong, SONG Xiao-yan, et al. Overview of Temperature Environmental Testing and Its Standards (1) The Influence of Temperature on Equipment and the Importance of Temperature Testing[J]. Environmental Technology, 2014(4): 93-96.
- [8] 蔡良续, 张露, 徐良, 等. 温度环境试验及其标准综述(四)温度试验技术[J]. 环境技术, 2015(2): 77-82.
- CAI Liang-xu, ZHANG Lu, XU Liang, et al. Overview of Temperature Environmental Testing and Its Standards (4) Temperature Testing Techniques[J]. Environmental Technology, 2015(2): 77-82.
- [9] GJB 1032—90, 电子产品环境应力筛选方法[S]. GJB 1032—90, Environmental Stress Screening Process for Electronic Products[S].
- [10] 臧兵, 张景山, 李明. 谈谈高低温工作试验中的保温时间[J]. 航天器环境工程, 2015, 32(4): 408-414.
- ZANG Bing, ZHANG Jing-shan, LI Ming. Temperature Maintaining Time in High and Low Temperature Operation Tests[J]. Spacecraft Environment Engineering, 2015, 32(4): 408-414.
- [11] GAUTHIER R A, 李香生, 赵琪. 表面温度测量[J]. 国外计量, 1983(2): 31-33.
- GAUTHIER R A, LI Xiang-sheng, ZHAO Qi. Surface Temperature Measurement[J]. Foreign Measurement, 1983(2): 31-33.
- [12] 祝耀昌, 张建军. GJB 150A 的应用和剪裁[J]. 航天器环境工程, 2012(6): 608-615.
- ZHU Yao-chang, ZHANG Jian-jun. Application and Tailoring of GJB 150A[J]. Spacecraft Environmental Engineering, 2012(6): 608-615.
- [13] 吴相甫. 航空装备实验室温度环境试验剪裁探讨[J]. 装备环境工程, 2018, 15(1): 74-79.
- WU Xiang-fu. Tailoring of Laboratory Temperature Environment Test for Aviation Equipment[J]. Equipment Environmental Engineering, 2018, 15(1): 74-79.
- [14] 傅耘. 温度试验中产品温度稳定的研究[J]. 环境技术, 2001, 19(3): 8-12.
- FU Yun. Temperature Stabilization of Products in Temperature Tests[J]. Environmental Technology, 2001, 19(3): 8-12.
- [15] 李龙刚. 军用航电产品环境试验及过程控制研究[J]. 电子世界, 2019(6): 48-49.
- LI Long-gang. Research on Environmental Test and Process Control of Military Avionics Products[J]. Electronics World, 2019(6): 48-49.
- [16] 程丛高. GJB 150.3A 高温试验方法的应用及分析[J]. 装备环境工程, 2012, 9(6): 91-96.
- CHENG Cong-gao. Application and Analysis of GJB 150.3A High Temperature Test Method[J]. Equipment Environmental Engineering, 2012, 9(6): 91-96.
- [17] 中国航空工业集团公司第三〇一研究所. GJB 150《军用设备环境试验方法》实施指南[K]. 北京: 中国航空工业集团公司第三〇一研究所, 1998.
- AVIC China Aero-polytechnology Establishment. Implementation Guide of GJB 150 Environmental Test Methods for Military Equipment[K]. Beijing: AVIC China Aero-polytechnology Establishment, 1998.
- [18] 刘新佳, 郭强岭. 空空导弹高温试验实施研究[J]. 河南科技, 2015(5): 138-140.
- LIU Xin-jia, GUO Qiang-ling. Study on the Implementation of High Temperature Test of Air-to-Air Missile[J]. Henan Science and Technology, 2015(5): 138-140.
- [19] 张艳辉, 史明丽. 空空导弹工作温度分析[J]. 装备环境工程, 2015, 12(2): 99-103.
- ZHANG Yan-hui, SHI Ming-li. Analysis on Operating Temperature for Air-to-Air Missiles[J]. Equipment Environmental Engineering, 2015, 12(2): 99-103.

责任编辑: 刘世忠