

# 环境试验技术

王树荣 季凡渝 编著



中国工信出版集团



电子工业出版社  
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY  
<http://www.phei.com.cn>

# 环境试验技术

王树荣 季凡渝 编著



电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

## 内 容 简 介

产品的环境适应性贯穿于设计、研制和生产,直至使用的全过程,它涉及对产品全寿命期间所处平台环境的研究。本书叙述了当前国内环境试验的现状和发展,特别是当前模拟试验难以解决又迫切需要解决的问题。

本书共 25 章。第 1 章介绍了环境试验的由来、意义、作用和地位;国内外开展环境的情况;环境试验在产品的设计/制造/使用中应用;当前在环境试验领域中的两大标准体系等;第 2 章介绍了环境实验室本身的环境条件要求,实验室用水的要求,对试验条件的容差要求,环境试验前、试验中和试验后所需采集的信息要求,实验报告要给出的信息要求等;第 3~25 章,分别介绍了高温试验、低温试验、温度冲击(变化)试验、湿热试验、大气腐蚀、高度(低气压)、水试验、霉菌试验、沙尘试验、太阳辐射试验、流体污染试验、结冰冻雨试验、爆炸大气试验、振动试验、声振试验、冲击试验、加速度试验、地震试验、风压、倾斜摇摆试验、运输试验、振动冲击夹具设计、综合试验等内容。

本书可用于从事产品环境检测、可靠性等专业人员,也可作为高等院校相关专业本科生、研究生的教学参考用书。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。  
版权所有,侵权必究。

### 图书在版编目(CIP)数据

环境试验技术 / 王树荣, 季凡渝编著. —北京: 电子工业出版社, 2016.1  
ISBN 978-7-121-27685-9

I. ①环… II. ①王… ②季… III. ①电子产品—环境试验 IV. ①TN06

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 284609 号

策划编辑: 李 洁

责任编辑: 李 洁 文字编辑: 刘 凡

印 刷: 北京天宇星印刷厂

装 订: 三河市皇庄路通装订厂

出版发行: 电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编 100036

开 本: 787×1 092 1/16 印张: 23.25 字数: 663 千字 彩插: 16

版 次: 2016 年 1 月第 1 版

印 次: 2016 年 1 月第 1 次印刷

定 价: 98.00 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题, 请向购买书店调换。若书店售缺, 请与本社发行部联系, 联系及邮购电话: (010) 88254888。

质量投诉请发邮件至 [zlts@phei.com.cn](mailto:zlts@phei.com.cn), 盗版侵权举报请发邮件至 [dbqq@phei.com.cn](mailto:dbqq@phei.com.cn)。

服务热线: (010) 88258888。

# 序

## 《《《《 ORDER

产品的环境适应性、可靠性和电磁兼容性，是除功能和性能以外的三大不可缺少的重要特性。当前介绍和论述可靠性和电磁兼容性方面的书很多，而环境试验方面的书却很少，作者长期从事环境可靠性试验方面的工作，现任苏试试验连锁实验室（下称“苏试试验”）质量与技术总监，积累了一定的环境可靠性试验方面的工程经验，此书就是在此基础上写成的。

环境试验技术是一门综合性的试验技术，它研究各种环境因素对产品的影响、实验室的模拟实验方法和模拟实验技术，它还直接关系到环境试验设备的生产和发展，是保证和提高产品质量和可靠性的重要手段，在国民经济和国防建设上有着重要的地位。

电子工业出版社出版这本书，是对该专业领域的支持。本书可作为从事该领域工作，以及与这方面工作有关的人员，特别是直接从事环境可靠性试验工程技术人员的指导用书，也可作为产品设计人员开展环境与可靠性设计的参考，同时也可作为对此专业感兴趣的在校教师和学生学习的参考。

钟琼华

# 前言

## 《《《《 PREFACE

一项产品要成为被广大消费者所接受、欢迎的商品，一种军品要成为一种招之既来、来之能战、战之能胜的武器，除了它的功能和性能外，还要看它对环境的适应性和使用的可靠性。随着我国高新科技的飞速发展和高新武器的陆续装备部队，保持高新科技的持续发展和领先地位、使高新武器拥有和保持持续战斗力已成为当前要解决的头等重要问题之一，而解决这一重要问题的关键同样是它的环境的适应性和使用的可靠性

众所周知，任何产品都处于一定的环境之中，在一定的环境条件下使用、运输和储存，因此都摆脱不了环境的影响。特别是恶劣环境条件下工作的产品更是如此。产品的环境适应性和可靠性水平高低贯穿于产品设计、研制、生产、试验、使用全过程。可以这样说，产品环境适应性是设计出来的，也是试验出来的。就我国的国情而言，试验是非常重要的的一环，起到了非常重要的作用。

人类所处的环境存在各种各样的自然和诱发环境因素，我们生产的产品同样也处于各种自然和诱发环境因素的影响下。例如，产品在运输、储存和使用过程中有可能要经受到高温、低温、温度变化（冲击）、湿度、气压、盐雾、霉菌、太阳辐射、风雨、积冰冻雨、振动、地震、冲击、噪声、稳态加速度、倾斜摇摆、倾倒翻倒、自由跌落、电磁辐射、核辐射、硫化氢、二氧化硫、沙粒、尘等的作用与影响。当然，这些环境因素在许多情况下是轮流和同时作用在产品上的。

要使产品在全寿命期间在可能遇到的各种环境因素作用下使用合格，必须首先经过实验室模拟现场的考核。本书全面和系统地介绍了在实验室模拟现场的各种环境试验模拟试验方法，为此也介绍了模拟试验的一些共性的和通用的要求。本书叙述了当前国内环境试验的现状和发展，特别是当前模拟试验难以解决又迫切需要解决的问题。

第1章介绍了环境试验的由来、意义、作用和地位；国内外开展环境的情况；环境试验在产品的设计/制造/使用中应用；当前在环境试验领域中的两大标准体系等。

第2章介绍了环境实验室本身的环境条件要求，实验室用水的要求，对的试验条件的容差要求，环境试验前、试验中和试验后所需采集的信息要求，实验报告要给出的信息要求等。

从第3~25章，分别介绍了高温试验、低温试验、温度冲击（变化）试验、湿热试验、大气腐蚀、高度（低气压）、水试验、霉菌试验、沙尘试验、太阳辐射试验、流体污染试验、结冰冻雨试验、爆炸大气试验、振动试验、声振试验、冲击试验、加速度试验、地震试验、风压、倾斜摇摆试验、运输试验、振动冲击夹具设计、综合试验。

在每一试验中，叙述了导致该试验的自然和诱发环境因素，该种环境因素对产品的影响机理和故障与失效模式，进行该试验的目的，实验室的模拟试验方法，当前国内外在该试验上权威模拟试验规范，试验的条件和要求，环境应力施加的一种或多种试验程序，对实现该环境因素的试验设备的要求，对试验项目的试验设计技术和试验实施技术。为使内容精简，将所有振动归入第16章振动试验，内容包括正弦振动试验、随机振试验，拍频振动、时间历程振动；将所有冲击归入18章冲击试验，内容包括规定脉冲波形法、冲击响应谱法、规定冲击机法、弹道冲击法、倾倒与翻到法、自由跌落法、撞击试验法等；将风压和倾倒和翻

到试验合为一章。振动冲击的安装和夹具的设计制作得是否符合要求，是完成振动冲击试验的关键，在 IEC 和国标中也是单独列为一项试验规范。为此，在本书中详细叙述了夹具的设计要求、夹具设计原则、制作材料、制作方法、夹具的安装使用技术、夹具的检验和鉴定方法、典型和通用夹具的示例、夹具的合格判决等内容。

感谢苏试试验的芮志成、刘宇杨，南京实验室沉辰，南京欣捷偌的苏露华在图文的校对上所做的工作。

由于笔者能力和认识有限，错误在所难免，希望读者批评指教，提出宝贵意见。也希望将其中的有关问题发至 [wangshurong1939@126.com](mailto:wangshurong1939@126.com) 进行研讨和交流。

作者

# 目录

## CONTENTS

### 第1章 概 论

- |                                   |   |                          |   |
|-----------------------------------|---|--------------------------|---|
| 1.1 环境试验的意义、作用与地位·····            | 1 | 1.7 试验顺序·····            | 5 |
| 1.2 环境试验的由来·····                  | 1 | 1.8 环境试验的两大标准体系·····     | 6 |
| 1.3 国内外环境试验开展情况·····              | 1 | 1.8.1 民用(商用)标准体系·····    | 6 |
| 1.4 环境因素·····                     | 2 | 1.8.2 军用产品标准体系·····      | 7 |
| 1.5 环境试验的形式和种类·····               | 2 | 1.9 当前实验室模拟现场的方法和发展····· | 7 |
| 1.6 环境试验在产品的设计、制造、<br>使用中的应用····· | 4 | 参考文献·····                | 8 |

### 第2章 环境试验通用要求

- |                   |    |                     |    |
|-------------------|----|---------------------|----|
| 2.1 试验环境条件要求····· | 9  | 2.6 温度稳定·····       | 11 |
| 2.2 实验室用水·····    | 9  | 2.7 试验设备和测试仪器·····  | 12 |
| 2.3 试验条件容差·····   | 9  | 2.8 试验文件·····       | 12 |
| 2.4 试验信息要求·····   | 10 | 2.9 试验报告要给出的信息····· | 12 |
| 2.5 试验中断处理要求····· | 11 | 参考文献·····           | 13 |

### 第3章 高温试验

- |                     |    |                    |    |
|---------------------|----|--------------------|----|
| 3.1 自然和诱发的高温环境····· | 14 | 3.5 试验程序·····      | 18 |
| 3.2 影响机理和失效模式·····  | 15 | 3.6 对试验设备的要求·····  | 19 |
| 3.3 试验目的·····       | 16 | 3.7 试验设计与试验技术····· | 20 |
| 3.4 实验室模拟·····      | 16 | 参考文献·····          | 22 |

### 第4章 低温试验

- |                   |    |                      |    |
|-------------------|----|----------------------|----|
| 4.1 自然的低温环境·····  | 23 | 4.6 试验程序·····        | 26 |
| 4.2 诱发的低温环境·····  | 23 | 4.7 对试验设备的要求·····    | 27 |
| 4.3 影响机理失效模式····· | 24 | 4.8 试验设计技术与试验技术····· | 28 |
| 4.4 目的·····       | 24 | 参考文献·····            | 31 |
| 4.5 实验室模拟·····    | 24 |                      |    |

### 第5章 温度冲击(变化)试验

- |                               |    |                |    |
|-------------------------------|----|----------------|----|
| 5.1 自然和诱发的温度冲击<br>(变化)环境····· | 32 | 5.3 试验目的·····  | 33 |
| 5.2 影响机理和失效模式·····            | 32 | 5.4 实验室模拟····· | 33 |
|                               |    | 5.5 试验程序·····  | 34 |

5.6 对试验设备的要求	36	参考文献	40
5.7 试验设计技术与试验技术	37		

## 第6章 湿热试验

6.1 自然和诱发的湿热环境	41	6.6 相对湿度的测量	53
6.2 影响机理、失效模式	41	6.7 试验设计与试验技术	54
6.3 基本原理与概念	42	6.8 合格与否的判决	57
6.4 湿热环境的实验室模拟	45	参考文献	57
6.5 对试验设备的要求	51		

## 第7章 大气腐蚀试验

7.1 自然和诱发的大气腐蚀环境	58	7.6 对试验设备的要求	64
7.2 影响机理和失效模式	58	7.7 试验设计	66
7.3 试验目的	59	7.8 试验技术	68
7.4 实验室模拟	60	7.9 结果分析	71
7.5 试验程序	61	参考文献	71

## 第8章 低气压(高度试验)

8.1 自然低气压环境	72	8.5 试验程序	74
8.2 影响机理和失效模式	72	8.6 对试验设备的要求	77
8.3 试验目的	73	8.7 试验设计与试验技术	78
8.4 实验室模拟	74	参考文献	82

## 第9章 水试验

9.1 自然和诱发的水环境	83	9.6 四种模拟现场的试验方法	91
9.2 影响机理和失效模式	83	9.7 试验程序和要求	92
9.3 基本原理与概念	84	9.8 试验设计技术和试验技术	95
9.4 水环境的实验室模拟	84	9.9 结果分析与合格判决	96
9.5 对试验设备的要求	87	参考文献	96

## 第10章 霉菌或长霉试验

10.1 霉菌及其主要特征	97	10.7 霉菌试验技术	108
10.2 霉菌生长环境	98	10.8 常用菌种及其形态	118
10.3 影响机理和故障模式	99	10.9 防霉措施	123
10.4 霉菌环境的实验室模拟	102	10.10 灭菌	124
10.5 对试验设备的要求	106	10.11 记录	125
10.6 试验程序	107	参考文献	125

## 第11章 沙(砂)尘试验

11.1 自然界沙尘环境	126	11.2 影响机理和失效模式	127
--------------	-----	----------------	-----



11.3 试验目的·····	128	11.7 试验设计·····	136
11.4 实验室的模拟·····	129	11.8 试验技术·····	137
11.5 试验程序·····	131	参考文献·····	139
11.6 对试验设备的要求·····	133		

## 第 12 章 太阳辐射试验

12.1 自然太阳辐射环境·····	140	12.6 测试仪表·····	148
12.2 影响机理、失效模式·····	140	12.7 试验设计技术与试验技术·····	149
12.3 基本原理与概念·····	141	12.8 结果分析与合格判决·····	152
12.4 地面太阳辐射环境的实验室模拟·····	142	12.9 安全性·····	152
12.5 对试验设备的要求·····	146	参考文献·····	153

## 第 13 章 流体污染、密封、浸渍试验

13.1 流体污染试验·····	154	13.2.2 Qa: 衬套、心轴和垫圈·····	159
13.1.1 试验目的、诱发环境、 影响机理、故障和 失效模式·····	154	13.2.3 Qc: 容器的密封(漏气)·····	160
13.1.2 流体的种类·····	154	13.2.4 Qd: 容器的密封(漏液)·····	161
13.1.3 试验条件·····	155	13.2.5 Qf: 浸水·····	161
13.1.4 试验过程·····	156	13.2.6 Qk: 用质谱仪的示踪气体法·····	162
13.1.5 对试验设备的要求·····	158	13.2.7 Ql: 加压浸渍试验·····	163
13.1.6 试验设计和试验技术·····	158	13.2.8 Qm: 内部预先加压示踪气体 密封试验·····	164
13.2 密封试验·····	158	13.3 浸渍试验·····	164
13.2.1 试验目的、诱发环境、 影响机理、故障和失 效模式·····	158	13.3.1 设备的浸渍试验·····	164
		13.3.2 印制电路板的浸渍试验·····	166
		参考文献·····	168

## 第 14 章 积冰冻雨试验

14.1 积冰冻雨的自然环境条件·····	169	14.6 试验设备·····	174
14.2 影响机理·····	172	14.7 试验程序·····	174
14.3 故障和失效模式·····	173	14.8 试验设计·····	175
14.4 试验目的·····	173	14.9 试验技术·····	176
14.5 实验室的模拟·····	173	参考文献·····	177

## 第 15 章 爆炸性大气试验

15.1 自然和诱发爆炸性大气环境·····	178	15.6 试验程序·····	182
15.2 影响机理和失效模式·····	178	15.7 试验设计·····	183
15.3 试验目的·····	179	15.8 试验技术·····	185
15.4 实验室的模拟·····	179	参考文献·····	185
15.5 试验设备·····	181		

## 第16章 振动试验

16.1 现场振动环境	186	16.7 时间历程振动	205
16.2 影响机理和失效模式	187	16.7.1 时间历程振动的时域描述	205
16.3 实验室模拟	187	16.7.2 时间历程振动试验条件	206
16.4 正弦振动试验	188	16.7.3 时间历程的合成和试验控制	206
16.4.1 正弦振动的描述	188	16.8 炮击振动	208
16.4.2 正弦振动试验要求	189	16.8.1 炮击振动时域描述	208
16.4.3 正弦振动中的低频试验技术	191	16.8.2 炮击振动的方法和程序	208
16.5 随机振动试验	193	16.8.3 炮击振动试验要求	211
16.5.1 随机振动的描述	193	16.9 对试验设备的要求	211
16.5.2 随机振动试验要求	196	16.10 振动试验中的安装用控制	213
16.6 正弦拍频振动	201	16.11 试验程序	215
16.6.1 正弦拍频振动的描述	202	16.12 振动试验技术	219
16.6.2 正弦拍频振动试验条件	202	参考文献	222
16.6.3 正弦拍频振动应用示例	204		

## 第17章 声振试验

17.1 诱发环境噪声	223	17.7.1 声场	229
17.2 影响机理	223	17.7.2 产生声场(声源)的装置	232
17.3 故障和失效模式	224	17.7.3 检测声场的仪器	232
17.4 试验目的	225	17.8 试验设计	233
17.5 实验室的模拟	225	17.8.1 试验要求和条件	233
17.6 试验程序	226	17.8.2 试验规范标准的选择	235
17.6.1 试验程序的更新与发展	226	17.8.3 试验的类型	237
17.6.2 试验前的准备	227	17.8.4 其他	237
17.6.3 试验暴露	229	17.9 试验技术	238
17.7 试验设备	229	参考文献	240

## 第18章 冲击试验

18.1 诱发冲击的环境	241	18.5.4 对试验设备的要求	246
18.2 影响机理和失效模式	241	18.5.5 试验程序	251
18.3 试验目的	242	18.6 规定脉冲波形的碰撞/颤振(多次冲击)试验方法	251
18.4 实验室的模拟	242	18.6.1 试验要求	252
18.5 规定标称冲击脉冲波形的方法	244	18.6.2 试验程序	253
18.5.1 三种标称冲击脉冲波形及数学表达式	244	18.7 冲击响应谱的方法	254
18.5.2 三种标称(经典)冲击脉冲峰值加速度和脉冲持续时间	244	18.7.1 冲击响应谱基本概念	254
18.5.3 试验条件(严酷等级)的选择	245	18.7.2 合理利用冲击响应谱选择试验所需的冲击脉冲波形	258

18.7.3	冲击响应试验谱试验示例	258	18.8.7	轻量级试验程序	268
18.7.4	GJB 150A 中的冲击响应谱	260	18.8.8	轻量级强碰撞冲击中的有关 试验技术问题	269
18.7.5	现场冲击的冲击响应谱 转换示例	261	18.9	跌落、倾跌与翻倒试验	269
18.8	规定一种冲击机的方法——强碰撞 冲击试验	263	18.9.1	自由跌落试验	269
18.8.1	强碰撞冲击试验机	264	18.9.2	倾跌与翻倒试验	270
18.8.2	现场水中爆炸冲击和中量级 冲击的比较	266	18.10	各种冲击试验方法在 GJB150A 中 的应用	272
18.8.3	强碰撞冲击试验的三种程序	266	18.10.1	一般冲击试验方法	272
18.8.4	轻量级强碰撞冲击试验机 标准结构	266	18.10.2	爆炸分离冲击	273
18.8.5	轻量级试验条件(严酷等级) 及其选择	267	18.10.3	弹道冲击	274
18.8.6	轻量级安装	268	18.11	重现现场冲击的时间历程	275
			18.12	锤击试验	276
				参考文献	277

## 第 19 章 加速度试验

19.1	加速度的诱发环境	278	19.6	试验设备	281
19.2	影响机理和失效模式	278	19.7	试验要求	282
19.3	试验目的	278	19.8	试验设计	285
19.4	实验室的模拟	279	19.9	试验技术	286
19.5	试验过程	279	19.10	加速度坠撞安全实例	287
19.5.1	试验准备	279		参考文献	289
19.5.2	试验程序	280			

## 第 20 章 地震试验

20.1	自然的地震环境	290	20.7	试验过程	298
20.2	影响机理和失效模式	290	20.8	地震试验系统	303
20.3	试验目的	292	20.9	试验设计	304
20.4	实验室的模拟	292	20.10	试验技术	305
20.5	试验程序	295	20.11	地震震级和烈度	306
20.6	试验条件	295		参考文献	307

## 第 21 章 风压、倾斜和摇摆试验

21.1	风压试验	308	21.1.6	对试验设备的要求	311
21.1.1	风的自然环境条件	308	21.1.7	试验设计与试验技术	312
21.1.2	影响机理和失效模式	309	21.2	倾斜和摇摆试验	313
21.1.3	试验目的	309	21.2.1	诱发的倾斜和摇摆条件	313
21.1.4	实验室模拟	310	21.2.2	影响机理及故障和失效模式	313
21.1.5	试验程序	311	21.2.3	试验目的	314

21.2.4	实验室的模拟	314
21.2.5	试验过程	314
21.2.6	试验设备	315

21.2.7	试验设计与试验技术	316
	参考文献	319

## 第22章 运输试验

22.1	产品运输的振动冲击环境	320	22.6	实验室模拟运输的试验规范谱	326
22.2	影响机理和故障与失效模式	320	22.7	冲击	339
22.3	产品运输试验目的	320	22.8	试验设计	340
22.4	产品运输振动考核的方式	321	22.9	试验技术	342
22.5	实验室模拟试验	321		参考文献	342

## 第23章 加速试验

23.1	引言	343	23.6	温度循环的加速	351
23.2	加速试验的原理	343	23.7	环境和可靠性试验的加速模型	352
23.3	加速试验方法的分类	343	23.8	按寿命要求设计试验方案示例	353
23.4	振动应力的加速	345	23.9	环境可靠性应力的一般要求	354
23.5	温度应力的加速	350		参考文献	354

## 第24章 振动冲击夹具的设计、验证与安装

24.1	夹具设计概述	355	24.7	夹具的结构形式	365
24.2	夹具的设计要求	356	24.8	夹具安装技术	369
24.3	夹具的设计原则	361	24.9	夹具的鉴定	371
24.4	设计步骤	362	24.10	合格判据	375
24.5	制作夹具的材料	362	24.11	夹具的使用	375
24.6	夹具的制作方法	363		参考文献	376

## 第25章 综合环境试验

25.1	自然和诱发的综合环境	377	25.7	试验应力	381
25.2	影响机理和失效模式	377	25.8	试验剖面	384
25.3	试验目的	378	25.9	试验过程	387
25.4	实验室的模拟试验	378	25.10	试验设计	389
25.5	对试验设备的要求	379	25.11	试验技术	390
25.6	试验程序	380		参考文献	391

# 第 1 章 概 论

## 1.1 环境试验的意义、作用与地位

一个产品要成为被广大消费者所接受和所欢迎的商品，一个军品要成为一种召之即来、来之能战、战之能胜的武器，除了它的功能和性能外，还要看它对环境的适应性和使用的可靠性。

随着我国高新科技的飞速发展和高新武器陆续装备部队，保持高新科技的持续发展和领先地位及高新武器的持续战斗力已成为当前要解决的头等重要问题之一，而解决这一重要问题的关键同样是它对环境的适应性和使用的可靠性。

众所周知，任何产品都处于一定的环境之中，要在一定的环境条件下使用、运输和储存，因此都摆脱不了这些环境的影响。特别恶劣环境条件下工作的产品更是如此。产品的环境适应性和可靠性贯穿于产品设计、研制、生产、试验、使用全过程。可以这样说：产品环境适应性更重要的是设计出来的，是试验出来的。就我国的国情而言，试验（鉴定、验收试验）是非常重要的环节，起着非常重要的作用。

产品使用前，通常要求验证产品在现场能否令人满意和安全地工作。这就要通过环境适应性试验来完成。

## 1.2 环境试验的由来

环境对产品的影响是在 20 世纪 30 年代末、特别是在第二次世界大战中才开始受到人们的重视的。那时，在热带和亚热带地区使用的电子产品遇到了当时称之为“气候劣化”的问题。尤其是在第二次世界大战的战场上，由于受各种恶劣环境的影响，产品出现了许多问题。据当时美国空军的调查和统计，产品的损坏有 52% 是由于恶劣环境所引起的。其中受温度影响而损坏的占 21%，受振动影响而损坏的占 14%，受潮湿影响而损坏的占 10%，受沙尘盐雾影响而损坏的占 7%……环境影响使许多产品失灵、失效及误动作，从而贻误了不少战机，造成了很大损失。这就迫使各先进的工业国家从一连串战争损坏报告中开始着手解决产品的环境适应性问题。

## 1.3 国内外环境试验开展情况

美国是开展环境试验较早的国家。这项工作是在美国国防部领导下进行的，从研究热带防护开始。20 世纪 40 年代，他们主要开展现场试验和实验室的人工模拟试验，并进行研究和制订试验规范。20 世纪 50 年代末，美国陆、海、空三军都有了各自的环境试验规范和标准。20 世纪 60 年代，联合制订出美国三军的通用环境试验方法，即现在的 MIL-STD-810G，紧接着又开始进行对宇航环境的研究。这样就形成了从元器件、微电路到设备，从



空中、陆地到海洋的完整环境试验军标系统。从 20 世纪 60 年代到现在, 美国的环境试验军标 MIL-STD-810 经过多次修改和补充, 已成为欧美发达国家军方的重要标准, 并被不少国家接受和采用, 现已更新到 810G, 并被称为当今环境试验的“圣经”。

国际电工委员会(下称 IEC)是在 1948 年开始考虑环境试验问题的, 刚开始, 仅在 TC40、TC12 技术委员会里开展些工作。随着电子产品环境问题日益突出, 1961 年专门成立了 TC50 “环境试验技术委员会”, 从事环境试验机理、技术和试验程序的研究。1978 年又成立了 TC75 “环境条件技术委员会”, 专门从事环境条件分类和分级的研究。TC50 和 TC75 的文件和标准, 吸取了各国环境条件和环境试验的经验, 集中了各国专家的智慧, 具有体系完整、结构严谨、技术先进和使用方便等一系列优点, 已成为当今世界公认的科学技术和国际贸易的准则。随着标准的完善和经典, 现将 TC50 和 TC75 合在一起归 TC108, IEC 标准已被各国广泛采用, 成为国际贸易中消除技术障碍的重要基础之一。

我国的环境试验工作是从 1955 年正式开始的, 首先在广州、上海、海南建立自然暴露试验站, 与东欧六国共同合作探索热带、亚热带、工业气体等对电气产品的影响。我国的环境试验刚开始时学习、采用苏联标准, 后来逐步建立了我国自己的环境试验标准体系。为了提高我国电子产品的环境适应性与使用可靠性, 增强我国电子产品进入国际市场的竞争能力, 我国已经参照 IEC 标准和美国军用标准(如 MIL-STD-810F 等)制定了一系列商用(民用)产品和军用产品的环境条件与环境试验标准。这预示着我国环境试验将有一个大的发展。

## 1.4 环境因素

人类所处的环境存在各种自然和诱发环境因素, 我们生产的产品也处于各种自然和诱发环境因素的影响下, 例如, 产品在运输、储存和使用过程中就要经受到温度、湿度、振动、冲击等多种多样、错综复杂的环境因素的影响。

根据来源及性质的不同, 将影响产品的环境因素分为以下几种。

- (1) 气候条件: 温度(高温与低温)、湿度、气压、风雨、水、冰霜等;
- (2) 机械条件: 振动、冲击、稳态加速度、摇摆、噪声等;
- (3) 生物条件: 霉菌、有害动物、海洋生物等;
- (4) 辐射条件: 太阳辐射、电磁辐射、核辐射等;
- (5) 化学活性物质: 硫化氢、二氧化硫、盐雾等;
- (6) 机械活性物质: 沙粒、尘等。

## 1.5 环境试验的形式和种类

### 1. 环境试验的形式

#### 1) 自然暴露试验

自然暴露(环境)试验是考核产品环境适应性的重要手段, 它是将样品放在自然环境条件下进行暴露和测试, 一般来说, 这样能真实反映产品在实际使用中的性能和可靠性, 也是验证人工模拟试验可重现性的基础。这种试验的周期长, 通常需要两年以上。自然暴露试验偏重于对材料、工艺(镀、涂层)和结构件的环境适应性研究, 重点在于对材料的腐蚀、



老化和劣化形貌及规律的研究。近年来才开始重视元器件、装备的部件、设备乃至整个武器(枪、炮、军用车辆、整个飞机机身等)的自然暴露试验。自然暴露试验可分为无气候防护和有气候防护两种。无气候防护是指在室外暴露,样品直接受气候影响。有气候防护又可分为完全气候防护和部分气候防护两种:完全气候防护是在空调和半空调室内暴露,能保护样品免受直接气候影响;部分气候防护是指产品在棚下、掩蔽所中的暴露,仅能部分保护产品免受直接气候影响。

## 2) 人工模拟试验

现代化生产具有周期短、更新换代快,产品使用领域越来越广的特点,需要在很短的时间内迅速了解产品的环境适应能力。为此,需要一种不受天然气候时令和地区影响,能够在实验室模拟现场环境和现场环境影响的环境试验方法,即实验室的人工模拟试验。

人工模拟试验就是将各种自然环境因素在实验室内重现出来。然而,要将各种环境因素在实验室完全模拟出来是非常困难的。环境模拟技术是随着现代科学技术的发展而发展的,虽然现在已经进步与先进了许多,但要完全模拟现场还是不可能的。

## 3) 现场试验

现场使用试验是将产品放在实际使用环境条件下,用以评价和分析产品的环境适应性和使用可靠性的试验。与自然暴露试验一样,它能真实反映产品在实际使用中的性能和可靠性水平,也是验证实验室人工模拟试验重现性的基础,但不足之处是试验周期长,花费的人力物力大。但如果有一个切实可行的故障、失效统计分析方案,得出的产品环境适应性和可靠性水平将会以更高的置信度反映产品的真实水平,对评价产品的实际能力(对军品是战斗力)更加有效。

## 2. 人工模拟试验的原则

当前实验室人工模拟试验采用的方法有:模拟主要环境因素、加速环境因素对产品的影响(加大环境因素的严酷程度,即高出实际可能出现的严酷程度)、模拟环境因素对产品的影响(影响等效)。当然,其中的加大严酷程度和影响等效是以实验室出现的失效模式与现场出现的失效模式相一致为原则。为此人们通过不断地实践,总结出了三种人工模拟方法,给出了确定环境应力要求和时间的原则。

(1) 重视现场的环境条件:指实验室的环境条件及其变化和现场环境条件尽量保持一致(当然包含取一定的出现概率(风险率)等)。

(2) 重现现场环境的影响(效应):指实验室人工模拟试验结果与现场环境条件对产品影响的结果相等效。

(3) 模拟产品寿命期的累积损伤:用加速试验的方法模拟产品寿命期的累积损伤。

## 3. 环境试验的种类

### 1) 单因素试验

(1) 气候:高度(低气压)试验、低温试验、高温试验、温度冲击、温度变化、湿热试验(有的标准又将其分为恒定湿热、交变湿热、专门用于元器件的加速恒定湿热、未饱和和高压蒸气恒定湿热)、太阳辐射试验、盐雾试验(有的标准又将其分为恒定、交变和复合盐雾等)、霉菌试验、水试验(又可分为淋雨试验、浸水试验、滴水试验、积冰试验、冻雨试验)、风压、沙尘试验等。

(2) 力学:振动试验(又可分为正弦振动试验、宽带随机振动试验、振动-时间历程法、振动-正弦拍频振动法、地震试验法、炮击振动)、声振、稳态加速度试验、冲击、碰





撞、强碰撞冲击、倾跌与翻倒、自由跌落、弹跳、摇摆试验、运输试验等。

(3) 其他:不少标准将下列试验也列入环境试验之中,例如,接触点和连接件的硫化氢、接触点和连接件的二氧化硫、高浓度二氧化硫、硫化混合气体腐蚀试验、引出端和整体安装件强度(接端强度)、在清洗剂中浸渍、撞击-弹簧锤、撞击-摆锤、元器件在振动冲击等动态试验中的安装要求、爆炸、耐燃烧、密封、可焊性等。

### 2) 组合因素试验

组合因素试验是指两个或两个以上的环境因素按一定的规律组合依次作用在样品上。这种试验明确规定两个相邻环境因素之间的间隔时间,因为它对试验结果有显著影响。目前这种试验有:温度-高度试验、温度变化、温度冲击等。

### 3) 综合因素试验

综合因素试验是指两个或两个以上的环境因素同时作用在样品上,这种试验比较复杂,试验费用高,但模拟真实,不少在单因素条件作用下不易暴露的缺陷,在综合因素试验中便暴露出来。这种试验目前有:温度/湿热、低温/低气压、低温/振动(正弦)、高温/振动(正弦)、低气压/振动(正弦)、温度循环/振动/湿热、温度循环/振动/湿热/高度等。

## 1.6 环境试验在产品的设计、制造、使用中的应用

### 1. 环境试验应用范围

- 产品设计、开发与研制(摸底试验、安全试验);
- 设计与生产定型(环境鉴定试验);
- 生产检验(环境应力筛选试验等);
- 产品验收(交付试验);
- 可靠性试验。

### 2. 环境试验的种类

#### 1) 摸底试验

在产品设计与开发阶段,环境试验是用来考核所用的元器件、所设计的结构、所采用的工艺等能否满足实际环境的要求。为了节省时间及充分暴露缺陷和薄弱环节,通常都用加速和强化的方法进行,采用远高于一般试验条件(严格等级)的量值来进行,这一阶段的环境试验通称摸底试验。例如,为了考核晶体管和集成电路的内强度,在 GB/T 2423.15—1995 中给出了 3g、5g、10g、20g、50g、100g、200g、500g、1000g、2000g、5000g、10000g、20000g、30000g、50000g 共 15 个稳态加速度等级,可以说 10g 以上的等级都是作为考核结构安全性和检查工艺缺陷用的,因为人(如飞行员)最大的承受能力为 7g。

#### 2) 鉴定试验

这一阶段的环境试验是用来确定全部技术指标是否达到设计要求,能否满足预定的环境(其中包括安装和维修中出现的环境条件),能否保证预计的寿命和满足安全要求等。在此阶段产品可能遇到的环境因素都要通过环境试验来考核。这类试验称为鉴定试验,有时又称为定型试验。鉴定试验是最全面的试验,它又分为设计定型的鉴定试验和生产定型的鉴定试验两种。





### 3) 环境应力筛选试验

环境应力筛选试验有两种：一种是 ESS 试验，主要用于对工艺质量的检验，即通过温度循环+随机振动试验将生产过程中的潜在缺陷触发成故障暴露出来，如不良的元器件、虚焊、连接不牢固等；另一种是 HASS 试验，它用高应力进行环境应力筛选，加速发现制造过程问题、潜在缺陷、偏差等。

### 4) 例行试验

例行试验主要有两个目的：一是用来检查产品生产了相当长的时间后质量的稳定性，它通常是周期性进行；二是用来检验当生产工艺、生产设备或生产人员等发生重大变化时质量的保证性。例行试验在产品出厂时采用抽样方式进行，而且仅进行非破坏性的环境试验项目。

### 5) 安全试验

环境试验用于安全试验有两种：一种是 SOF 试验，即试用前的基本环境试验，如新型号空中运载工具试飞前，要对机载电子设备进行最低限度的高温、低温、振动、冲击试验；另一种是用来检查产品是否存在危害健康、生命及设备的问题，如用稳态加速度、冲击来检查零部件安装、连接的牢固性，以防止其在紧急情况下被甩出而造成人身伤亡或打坏其他设备。当用环境试验考核安全性时，通常采用比正常试验高的试验条件（严格等级）。

### 6) 可靠性试验

如今可靠性已成为产品（特别是军工产品）质量的热点，而可靠性是设计出来的、生产出来的、管理出来的，也是试验出来的。可靠性试验的核心是环境应力剖面，美国军标 MIL-STD-781D、我国军标 GJB 899A 就是用温度循环/振动/湿热三因素综合模拟安装在军用运载工具上的电子设备所遇到的综合环境及其变化情况，以此来鉴定、验收和评价电子设备可靠性水平。环境试验还用于设计、研制与生产过程中的可靠性增长试验。此外，可靠性项目中装机元器件的二次筛选试验也是通过环境试验来完成的。

### 7) 验收试验

验收试验是指产品出厂时为了保证质量必须进行的一些项目的试验，通常采用抽样方式进行。由于验收试验的产品往往还要交付使用，所以验收试验的量级通常比鉴定试验的量级低，如航天产品的环境试验要求就分为鉴定级和验收级，产品通过验收级测试才能送往发射场发射。按美军标 MIL-STD-1540 的规定，在小子样的情况下，验收试验量级是产品平台现场实测数据的数学期望+5 dB，鉴定试验量级是产品平台现场实测数据的数学期望+11 dB。

## 1.7 试验顺序

环境试验顺序的含义就是在某产品要进行的众多环境试验项目中，先进行哪项试验、后进行哪项试验的问题。

### 1. 按试验目的确定试验顺序

用于研究的试验，如为了研究样品的性能，希望尽可能多地取得资料和数据，此时应先进行对产品破坏性小的环境试验，后进行破坏性大的环境试验。这种顺序也适用于复杂的、数量少的、昂贵样品的定型试验。为了检验设计的有效性，希望以最快的速度取得有关失效和失效趋势方向的资料，应先进行最严酷的试验。这样若前面的试验通不过，就没有必要进行后面的试验，以节省时间和费用。