

Huanjing Yu Kekaoxing Shiyān Yingyong Jishu

环境与可靠性 试验应用技术

胡志强 编著



中国质检出版社
中国标准出版社

环境与可靠性试验应用技术

胡志强 编著

中国质检出版社

中国标准出版社

北 京

图书在版编目 (CIP) 数据

环境与可靠性试验应用技术/胡志强编著. —北京:
中国质检出版社, 2016. 8
ISBN 978-7-5026-4270-9

I. ①环… II. ①胡… III. ①可靠性工程—研究
IV. ①TB114. 3

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 057199 号

中国质检出版社 出版发行
中国标准出版社

北京市朝阳区和平里西街甲 2 号 (100029)
北京市西城区三里河北街 16 号 (100045)

网址: www.spc.net.cn

总编室: (010)68533533 发行中心: (010)51780238

读者服务部: (010)68523946

中国标准出版社秦皇岛印刷厂印刷
各地新华书店经销

*

开本 787 × 1092 1/16 印张 30.25 字数 708 千字
2016 年 8 月第一版 2016 年 8 月第一次印刷

*

定价 98.00 元

如有印装差错 由本社发行中心调换
版权专有 侵权必究
举报电话: (010) 68510107

前 言

随着产品设计观念的提升，我们对产品的关注点正逐渐从功能、技术指标为主，转向以全面提高产品的综合效能指标为中心，因而，也越来越重视产品的质量特性、使用的可靠度和耐用性，从而促进了“产品环境工程学”和“产品可靠性工程学”学科的建立和发展。

无论是产品环境工程学，还是可靠性工程学，其中实验室“环境模拟”试验都是这些学科中非常重要的一环。另一方面，30多年来，国内实验室“环境模拟试验”的规模与投资、涉及行业的领域与深度、参与人员的数量与技能均呈现井喷式的发展，使实验室“环境模拟”的基础理论和试验技术得到工程界越来越多的青睐。本书正顺应了这个求知若渴的学习潮流。著者积数十年从事本行业的经验和体会，耗费十年的挑灯夜战，终于完稿。

20多年前，著者和几位同行曾编著过一本《随机振动试验应用技术》，对推动国内随机振动试验的开展发挥了良好的作用。本书作为该书的姊妹篇，重点介绍温度、湿度、综合环境试验的基础理论，试验操作的应用技术，环境试验参数的检测，环境试验设备的结构、选择、使用、维护与校准等内容；比较全面而系统地阐述了环境与可靠性试验应用技术的方方面面。祈望本书能有助于环境试验设备生产厂与用户达成的共识，能为从事环境与可靠性试验的同行提供一些现场操作技术和可供借鉴的经验，为我国环境与可靠性试验技术的发展与提高起到抛砖引玉的作用。

编著此书历时十年，几经周折，期间得到家人的诸多鼓励，以及从事环境与可靠性试验的同行，如中国电子科技集团电子可靠性工程技术有限公司、广电计量、西安西测等单位的支持。诸多生产环境试验设备公司，如苏州苏试、重庆银河、重庆哈丁、重庆虹瑞、常熟虞华也为本书的出版提供了宝贵的资料和支持。

书中各章由著者编写，徐晓梅研究员参与了第五章部分书稿的编写工作，

中国电子科技集团电子可靠性工程技术有限公司的工程师们倾力帮助完成书稿文字的录入和插图的整理，中国质检出版社编辑等友人也为本书的面世付出了辛勤的劳动。

借本书出版、发行的机会，对上述同行业的试验室、设备制造公司，以及为本书的出版付出努力的同仁们，一一表示衷心的感谢。

著者

乙未年 冬 于京城 陋室

目 录

第 1 章 环境与可靠性试验概论	(1)
1.1 工程产品特性指标描述	(1)
1.2 产品环境与可靠性工程的内涵	(1)
1.3 产品环境与可靠性工程的意义及作用	(3)
1.4 产品环境工程与环境试验	(4)
1.4.1 产品环境工程	(4)
1.4.2 产品环境试验	(6)
1.4.3 环境试验设备	(10)
1.4.3.1 环境试验设备的分类	(10)
1.4.3.2 环境试验规范对环境试验设备的要求	(12)
1.5 产品可靠性工程与可靠性试验	(15)
1.5.1 产品可靠性工程	(15)
1.5.2 产品可靠性试验	(16)
1.5.3 可靠性试验设备	(18)
第 2 章 环境与可靠性试验基础理论	(21)
2.1 温度试验基础理论	(21)
2.1.1 热力学基础定律	(23)
2.1.2 物质的相态变化及其描述	(24)
2.1.2.1 理想气体状态方程	(24)
2.1.2.2 工质的 $p-v$ (压力-比容) 图	(26)
2.1.2.3 焓 (i) 及工质的压—焓图	(27)
2.1.2.4 熵 (S) 及工质的温—熵图	(32)
2.1.3 传热学基础知识	(36)
2.1.3.1 热传导	(36)
2.1.3.2 对流传热	(37)
2.1.3.3 热辐射	(38)
2.1.3.4 工程传热计算	(39)
2.1.4 工质流体动力学	(44)
2.1.4.1 层流、湍流及其传热特性	(44)
2.1.4.2 一元流场的伯努利能量方程	(45)
2.1.4.3 工质的节流过程	(46)

2.1.4.4	两相流动的基本特征	(48)
2.2	制冷原理及制冷系统	(49)
2.2.1	基本热力循环	(50)
2.2.1.1	卡诺循环与逆卡诺循环	(50)
2.2.1.2	单级压缩式制冷循环	(51)
2.2.1.3	两级压缩式制冷循环	(55)
2.2.1.4	复叠式制冷循环	(57)
2.2.2	液氮制冷	(58)
2.2.3	实用型制冷系统解读	(61)
2.2.3.1	小型实用型制冷系统	(61)
2.2.3.2	大功率实用制冷系统解读	(63)
2.3	制冷系统部件的功能及其选择	(69)
2.4	主要制冷部件的结构及工作原理	(73)
2.4.1	制冷压缩机	(73)
2.4.1.1	活塞式制冷压缩机	(74)
2.4.1.2	螺杆式制冷压缩机	(76)
2.4.1.3	涡旋式制冷压缩机	(79)
2.4.1.4	离心式制冷压缩机	(82)
2.4.2	冷凝器	(83)
2.4.2.1	风冷式冷凝器	(84)
2.4.2.2	水冷式冷凝器	(84)
2.4.3	蒸发器	(86)
2.4.4	蒸发冷凝器	(87)
2.4.5	膨胀阀	(88)
2.4.5.1	机械式膨胀阀	(88)
2.4.5.2	电子式膨胀阀	(90)
2.4.5.3	毛细管式节流装置	(91)
2.4.6	电磁阀	(92)
2.4.7	压力控制器	(92)
2.4.7.1	吸排气压力控制器	(93)
2.4.7.2	滑油压力控制器	(94)
2.4.8	油气分离器	(96)
2.4.9	干燥过滤器	(97)
2.5	制冷剂	(98)
2.5.1	温度试验箱对制冷剂的要求	(98)
2.5.2	制冷剂的种类	(100)
2.6	润滑油及润滑油系统	(103)
2.6.1	对制冷系统用润滑油的要求及其特性	(103)
2.6.2	制冷压缩机润滑油系统	(105)

2.7 湿度试验基础理论	(106)
2.7.1 湿空气的组成	(106)
2.7.2 湿度的定义	(107)
2.7.3 湿空气的焓—湿 ($i-d$) 图	(110)
2.7.3.1 空气的焓	(110)
2.7.3.2 焓—湿图的构成与应用	(110)
第3章 环境与可靠性试验设备	(115)
3.1 温度试验箱及热力计算	(116)
3.1.1 温度试验箱基本技术参数	(116)
3.1.2 温度试验箱热力循环参数计算	(120)
3.1.2.1 试验箱所需冷(热)量的估算	(120)
3.1.2.2 制冷压缩机热力参数计算	(122)
3.1.2.3 冷凝器热力参数计算	(129)
3.1.2.4 蒸发器热力参数计算	(132)
3.2 温度/湿度试验箱及热力计算	(133)
3.2.1 温湿度试验箱技术参数	(134)
3.2.2 加湿与除湿热力参数计算	(137)
3.2.3 加湿方式及装置	(140)
3.2.4 除湿原理及装置	(143)
3.3 温湿度试验箱	(146)
3.3.1 温度、湿度的环境效应	(146)
3.3.2 温湿度试验箱的结构及系统	(148)
3.3.2.1 温湿度试验箱本体	(148)
3.3.2.2 空气调制室	(157)
3.3.3 温度冲击试验箱	(159)
3.4 温湿度试验箱的控制及保护系统	(163)
3.4.1 温度、湿度的控制原理及方法	(163)
3.4.1.1 控制点的选择	(163)
3.4.1.2 控制原理	(164)
3.4.1.3 控制理论及控制方法	(165)
3.4.2 温湿度试验箱典型控制系统解读	(172)
3.4.2.1 系统的主供电电路	(172)
3.4.2.2 高温级制冷压缩机的运行	(172)
3.4.2.3 低温级制冷压缩机的运行	(178)
3.4.2.4 加热及其他	(180)
3.4.3 温湿度试验箱保护及告警系统	(180)
3.5 温湿度试验箱的使用及维护	(182)
3.5.1 试验箱的使用	(182)
3.5.2 试验箱的维护	(184)

3.5.3	制冷系统检漏	(186)
3.5.4	检查及排除制冷系统中的空气	(187)
3.5.5	灌注制冷剂	(188)
3.5.6	抽取制冷剂	(190)
3.6	综合环境试验设备	(191)
3.6.1	综合环境试验设备的发展历程	(191)
3.6.2	“温度+湿度+高度”综合环境试验设备	(193)
3.6.2.1	真空的基本知识	(194)
3.6.2.2	真空的获得	(198)
3.6.2.3	温度—湿度—高度试验设备组成及特点	(200)
3.6.3	“温度+湿度+振动”综合环境试验设备	(204)
3.6.3.1	CERT设备的特点	(204)
3.6.3.2	CERT设备组成	(206)
3.6.3.3	CERT设备的配套方式	(207)
3.6.3.4	CERT设备试验箱与振动台接口	(209)
3.6.4	温度+湿度+振动+高度综合环境试验设备	(213)
3.6.4.1	四综合配套用振动台的特点及结构	(213)
3.6.4.2	四综合试验设备接口的特点及结构	(215)
3.6.5	可靠性强化试验设备	(216)
3.6.5.1	可靠性强化试验的概念与历史	(216)
3.6.5.2	高加速寿命试验 HALT	(217)
3.6.5.3	高加速应力筛选 HASS	(218)
3.6.5.4	可靠性强化试验 (RET) 设备	(218)
第4章	环境与可靠性试验技术	(223)
4.1	环境试验工程师的职责	(223)
4.2	试验室环境条件	(226)
4.2.1	试验室大气环境条件	(226)
4.2.2	其他环境条件	(230)
4.3	正确理解环境试验方法	(230)
4.3.1	环境与可靠性试验的特点	(230)
4.3.2	熟悉各类环境模拟试验规范的要求	(232)
4.3.3	典型环境试验规范解读	(235)
4.3.3.1	GJB 150 到 GJB 150A 的变化特点	(235)
4.3.3.2	部分试验项目修订的主要内容	(237)
4.3.4	辅助性环境试验条件的解读	(249)
4.3.4.1	风速	(250)
4.3.4.2	相对湿度	(250)
4.3.4.3	变温速率	(252)
4.3.5	环境试验参数的允差	(252)

4.3.6	环境试验条件的“剪裁”	(255)
4.3.7	合理选择试验项目的顺序	(258)
4.4	正确设置环境试验程序	(259)
4.4.1	环境试验主程序的设置	(259)
4.4.2	如何进入气候环境试验主程序的起点	(263)
4.4.3	如何设置气候环境试验的退出程序	(264)
4.5	气候环境试验技术	(265)
4.5.1	气候环境试验箱内安放产品的通用要求	(266)
4.5.2	合理地利用气候试验箱工作空间的流场	(269)
4.5.3	关于“温度稳定”的概念	(277)
4.5.3.1	判定“温度稳定”的准则	(278)
4.5.3.2	判定温度稳定的经验公式	(279)
4.5.4	如何控制温湿度试验中的凝露条件	(280)
4.5.5	如何选择气候环境试验的测控点	(282)
4.5.6	气候环境试验的温度控制策略	(284)
4.6	振动环境试验	(285)
4.6.1	解释几个“谱”的含义	(286)
4.6.2	振动试验中的各向异性及映射	(286)
4.6.3	振动试验的分类	(287)
4.6.4	振动试验任务书	(291)
4.6.5	振动试验允差	(292)
4.6.6	振动试验控制方法	(297)
4.6.6.1	探讨振动试验控制方法的理由	(297)
4.6.6.2	国军标 GJB 150.16A—2009 的振动试验控制方法	(299)
4.6.6.3	其他试验规范规定的振动试验方法	(302)
4.6.7	振动试验过程	(303)
4.6.8	振动预试验量级的选择	(306)
4.6.9	振动试验中断的处理	(307)
4.6.10	振动试验夹具	(308)
4.6.10.1	夹具的功能与作用	(309)
4.6.10.2	夹具的设计理论及其应用	(313)
4.6.10.3	夹具设计制作的具体要求	(329)
4.6.10.4	常用夹具型式分析	(332)
4.6.10.5	夹具的制作工艺	(335)
4.6.10.6	夹具的安装与使用	(337)
4.6.10.7	夹具测试	(340)
4.7	环境试验参数检测	(341)
4.7.1	环境参数检测的要求	(342)
4.7.2	温度测量	(343)

4.7.2.1	温度测量及精度要求	(343)
4.7.2.2	铂电阻温度计	(343)
4.7.2.3	热电偶温度计	(346)
4.7.2.4	温度变送器	(348)
4.7.3	湿度测量	(350)
4.7.3.1	湿度测量及精度要求	(350)
4.7.3.2	干湿球法湿度传感器	(350)
4.7.3.3	电容式湿度传感器	(356)
4.7.3.4	露点温度计	(358)
4.7.4	真空测量	(359)
4.7.4.1	真空测量及精度要求	(359)
4.7.4.2	绝对真空计的测量原理及方法	(359)
4.7.4.3	相对真空计的测量原理及方法	(360)
4.7.5	振动测量	(363)
4.7.5.1	振动测量及精度要求	(363)
4.7.5.2	压电式加速度计原理及结构	(364)
4.7.5.3	压电晶体加速度计的温度效应	(368)
4.7.5.4	压电晶体加速度计使用中的问题	(371)
4.7.5.5	电荷放大器的原理及使用	(373)
4.8	综合环境试验技术	(377)
4.8.1	综合环境试验的特点	(377)
4.8.2	环境因素效应	(378)
4.8.2.1	单一环境因素对产品效能的影响 ^[15]	(378)
4.8.2.2	成对环境因素对产品效能的影响及引发产品失效的模式 ^[15]	(383)
4.8.3	温度与湿度综合	(387)
4.8.4	温度与高度综合	(391)
4.8.5	湿度与高度综合	(395)
4.8.6	温度/湿度/高度综合	(395)
4.8.7	温度与振动综合	(398)
4.8.8	湿度与振动综合	(401)
4.8.9	温度与振动综合的实例—环境应力筛选	(401)
4.8.9.1	环境应力筛选参数的选择	(403)
4.8.9.2	环境应力筛选中的几个问题	(407)
4.8.9.3	关于高加速应力筛选 HASS (Highly Accelerated Stress Screen)	(409)
4.8.10	温度/湿度/振动综合环境可靠性试验	(411)
4.8.10.1	名词解释	(412)
4.8.10.2	可靠性试验发展过程	(412)
4.8.10.3	常规性可靠性试验 (CERT)	(413)

4.8.10.4 可靠性强化试验 (RET)	(415)
4.8.11 温度/湿度/高度/振动综合环境试验	(418)
第5章 试验设备的选择与校准	(422)
5.1 环境试验设备的选择	(422)
5.1.1 设备选择依据	(422)
5.1.2 设备选择的基本原则	(423)
5.1.3 试验设备基本技术指标的选择	(425)
5.1.3.1 试验箱内部容积的选择	(425)
5.1.3.2 温度范围	(426)
5.1.3.3 相对湿度范围	(427)
5.1.3.4 温度变化速率	(430)
5.1.4 环境试验箱辅助性技术指标的选择	(431)
5.1.4.1 风速	(431)
5.1.4.2 露点温度选择	(431)
5.1.5 环境试验箱精度指标的选择	(432)
5.1.5.1 温度场	(432)
5.1.5.2 波动度	(433)
5.1.5.3 温度均匀度	(434)
5.1.5.4 温度偏差	(434)
5.1.5.5 相对湿度的控制精度	(435)
5.1.5.6 相对湿度偏差	(436)
5.1.6 试验箱温度控制点的选择	(438)
5.2 环境试验设备的校准	(438)
5.2.1 校准的要求	(439)
5.2.2 温度环境试验箱的校准	(440)
5.2.2.1 温度环境箱校准参数	(441)
5.2.2.2 如何校准温度参数	(442)
5.2.3 温度湿度环境试验箱的校准	(458)
5.2.3.1 温度湿度环境箱校准的参数	(458)
5.2.3.2 如何校准相对湿度参数	(459)
5.2.4 温度/湿度/振动综合环境试验箱的校准	(461)
5.2.4.1 综合环境试验箱的校准要求	(463)
5.2.4.2 综合环境条件下的校准参数	(463)
5.2.5 温度/湿度/高度/振动四综合环境试验系统的校准	(466)
参考文献	(468)

第1章 环境与可靠性试验概论

1.1 工程产品特性指标描述

完整描述一个工程产品的特性至少有十二项指标：

1. 效能：指产品的性能（或功能）指标。之所以用“效能”而不用“性能”或“功能”，说明该产品的性能是“有效”的。或者说：该产品的“性能”具有可实用性，其“功能”具有可信赖性。
2. 经济性：衡量产品经济性的指标是“效费比”或“费效比”。或称之为投入与产出之比。
3. 生产性：指产品制造过程中的工艺性及所需配件的配套性。
4. 可测试性：指对产品的主要技术指标能否直接进行测试和故障判别。
5. 可靠性：衡量可靠性的指标是 MTBF 值，即平均无故障工作时间。
6. 环境适应性：指产品适应其储存、运输及使用环境的能力。
7. 电磁兼容性：指产品对抗电磁辐射的能力以及向周围空间产生电磁辐射的强度。
8. 运输性：指产品在各种正常运输环境条件下，不至于损伤其功能的能力。
9. 保障性：指产品使用过程中的资源保障，如动力供应、消耗品补充等。
10. 可维修性：可维修性包括维修的可达性和可维修度。可达性是指具有供维修者使用的操作空间，维修度是指可以维修更换的零部件数量占总零部件数的比例。
11. 安全性：包括工程产品自身的安全性（如过载保护等）和对产品使用者的安全防护。
12. 人一机一环境的和谐性：指产品的运行不会造成对周围环境的影响以及使用产品的人在使用过程中的舒适感和便利性。

在这十二项指标中，产品的效能和经济性是最基本指标，生产性和可测试性涉及产品的制造过程，可靠性、环境适应性、电磁兼容性、运输性属于产品质量性指标，保障性、可维修性、安全性、人一机一环境的和谐性属于确保产品延长正常使用时间的指标。

1.2 产品环境与可靠性工程的内涵

从广义上讲，与产品质量特性相关的可靠性、环境适应性、电磁兼容性、运输性都涉及产品使用的可靠性问题，因此，从文学的用词看，上述四个特性都可以概括为产品的“可靠性”特性。但是，从工程的角度出发，可靠性、环境适应性、电磁兼容性、运输性分属于两门不同的应用工程学科，可靠性属于产品可靠性工程学，环境适应性、电磁兼容

性、运输性属于产品环境工程学研究的内容。

可靠性（工程语言的“可靠性”）是研究产品在规定的使用条件（通常指正常的任务环境）下，在规定的时间内（寿命期或维修周期）内完成规定功能的概率。在这当中，任务环境条件是给定的（充分条件之一），完成所规定的功能是必须的（必要条件），而在时间（达到的目的）上可以向后延拓（可靠性增长）。也就是说，产品可靠性工程中，时间是变量，达到规定的平均无故障工作时间 MTBF（main time between failure）是该学科的终极目标。

产品环境工程是研究产品对其预期的储存、运输、使用环境的适应能力。产品在储存、运输、使用过程中（时间无限制），无故障地完成所规定的功能是必需的（必要条件），产品的环境条件是可变的，其变量既包含环境因素的改变，也包含环境因素应力的变化，产品环境工程的终极目标是产品能经受住储存、运输、使用过程中具有一定风险概率的极值环境的考验。

比较两门学科中占有重要地位的“试验”的研究内容和方法，可以看出这两者间明显的区别：

1) 产品完成规定的功能都是必要条件。但是可靠性试验过程中可以出现“故障”，需要分析故障的性质是否与 MTBF 值相关联，非关联性故障可以置之不理，关联性故障则需考虑对 MTBF 值的影响量。环境试验中一旦出现故障，则判定被试产品为失效，需要分析故障的原因，改进设计或制作工艺，重新用改进后的产品再次进行该环境条件下的试验，直到通过为止；

2) 可靠性试验的环境条件是预先给定的任务环境条件（充分条件之一），试验过程中一般不会改变。环境试验中施加于产品上的环境条件是可变的，其变量既包含环境因素种类的改变，也包含环境因素应力量值的变化，试验过程中可以从低量级的应力值开始逐渐加大到产品在储存、运输、使用过程中遭遇到的极值环境条件（有一定的风险概率值）为止；

3) 对于定时截尾可靠性试验，试验总的时间会有一定的约束，对于定数截尾可靠性试验，试验总的时间原则上没有限制，但无论哪种可靠性试验，试验时间都是一个变量，是从时间的延续上求得产品的 MTBF 值。虽然产品在实际使用中的时间（寿命）通常是不受限制的，但是在环境适应性试验中，试验的时间是预先规定的，是必须达到的试验技术指标，试验时间不够判定为“欠试验”，试验时间超过要求判定为“过试验”，时间计量有严格的“误差”要求。

如此可见，可靠性试验与环境适应性试验之间无论从试验目的与试验程序、应力种类及应力水平、数据处理及故障模式等方面都有不同的概念和做法，两者不可混为一谈。同理，作为学科而言，产品可靠性工程学和 product 环境工程也是两门独立的自成体系的工程学科。

另一方面，工程产品的可靠性寿命、环境适应性、使用耐久性、工作安全性、可测试性及可维修性等等，在一般的使用者眼中，都是广义的可靠性。而且，环境适应性试验和可靠性试验之间在试验设备、试验方法、试验技术、检测手段、数据归纳、工程管理等也有太多的相同或相似之处，产品环境工程与狭义性的产品可靠性工程之间既有学科内容相互交叉，彼此渗透之处，又有学科体系各自独立自成一体的特点，用一句

文学的语言概括,产品可靠性工程学和-product环境工程学的关系是“相辅相成,相得益彰”,故业内同行通常又将二者合并称为“产品环境与可靠性工程”,因此,有很多从事环境适应性试验和可靠性试验的实验室命名为“环境与可靠性试验中心”或“环境与可靠性检测中心”。

1.3 产品环境与可靠性工程的意义及作用

存在于地球表面及大气层空间中环境因素的种类,目前还无法统计出一个确切的数目,其中对工程产品的使用寿命及安全运行产生较大影响的因素不下几十种,这些环境因素所呈现的状态又随着空间的拓展和时间的延续,以及受人类生产、生活行为的影响而千变万化。因此,人类和工程产品时时刻刻面对的环境氛围是一个纷繁复杂、变化莫测的大千景象,任何为人类服务的工程产品都必然暴露在这样的一个空间环境中。另一方面,如果以文学语言描述产品使用者的要求,总是希冀于产品在各种使用环境条件下,能够长期满足人们所期望的功能,产品能够经久耐用,价廉物美。这就是随着科学技术的发展和人民生活水平的提高,产品环境工程与可靠性工程越来越受到重视的根本原因。

产品环境与可靠性工程首先是从提高军工产品的作战保障能力开始的,第二次世界大战前,由于对环境影响军事装备的认识不足,二战中在诸如俄罗斯本土的低温冰雪气候,在太平洋岛屿上的热带湿热性气候,在中东地区干热性沙漠气候条件下,很多军事装备或是受到损坏或是无法正常工作,对战役的胜败产生了重要的影响。例如德国的战车和飞机发动机在俄罗斯严寒的冬季环境条件下启动困难,贻误战机,从而导致在重大战役中失利。

第二次大战后,首先从军用飞机工业领域开始重视产品的环境适应性与可靠性,战后曾对二次大战中军用飞机的故障原因进行过分析,据统计,20世纪50年代飞机事故中有40%与振动、疲劳带来的损伤有关,故二次大战后研究振动、疲劳与强度等力学工程得到快速的发展。20世纪60年代后,电子技术的发展促进了军事装备及工业自动化程度的日益提高,而电工、电子、机电一体化产品受环境影响的敏感程度比普通的机电型产品高很多。20世纪70年代初,美国空军总部对沿海基地使用的航空产品故障调查时发现,由于环境因素引发航空电子设备的失效约占故障总数的51%,其中温度环境引起的失效率占产品总失效率的21%,振动环境占总失效率的13.5%,湿度因素占9.5%,沙尘约占3%,盐雾约占2%,冲击约占1%,高度(主要指真空度)约占1%等。这些统计数据表明产品周围的环境条件对于产品使用的故障率及其寿命周期有着非常重要的影响,这就导致人们更加深入地研究产品的使用环境与产品故障及其寿命之间的关系,促使人们更加关注产品的环境适应性能力及可靠性指标。

随着产品的设计观念由以产品的功能、技术指标为主逐渐转向更加关注全面提高产品的综合效能指标为中心,随着人们越来越重视产品的质量和耐用性,工程产品的环境适应性与可靠性被列为产品的重要特性,产品环境工程学和可靠性工程学逐渐成为工程产品应用工程学科的一个重要分支,受到从事工程产品设计、制造、试验乃至管理工作的人们越来越多的青睐,也使得越来越多的工程技术人员致力于环境与可靠性工程的研究与开发,促进着该学科的迅猛发展。

1.4 产品环境工程与环境试验

“环境”是人类在生产生活过程中必须面对的大自然恩赐，是人类应用的一切工具及制成品（产品）在生产、使用、运输及储存过程中制约其性能的重要因素。第二次世界大战后，武器装备的进步使人们逐步认识到“环境”对产品的严重影响，并进而出现了一个新的工程行业—环境试验。早期的环境试验更多的是“自然暴露试验”，实验室内简单的单一环境因素的环境模拟只是作为产品出厂前例行检验的一种手段，受到试验规范、试验设备和试验技术等等的限制，实验室内模拟的环境条件与产品实际使用中的状况相距甚远，不足以对产品的环境适应能力做出科学的判断。近半个多世纪以来，随着工业技术的进步及发展，环境试验规范、试验设备和试验技术都有了长足的进步，环境试验已非昨日黄花，而是日新月异。而且，随着工程产品应用空间的延拓，服役寿命的增长，环境与工程产品的关系已由单纯的环境试验扩展为产品环境工程，从更广泛的角度、更深的层次研究工程产品的环境适应性能力，并因此出现了一门新的应用工程性学科—产品环境工程学。

1.4.1 产品环境工程

产品环境工程的概念最早见于20世纪末美国军方的文件中，2000年1月1日美国国防部正式颁布并替代MIL-STD-810E的国防部试验方法标准MIL-STD-810F“环境工程考虑和实验室试验”中，正式定义“环境工程”是“将工程实践用于各种环境对设备的有效性能产生影响的一系列工作”。

按照定义，产品环境工程学是将工程惯例用于各种环境（环境因素种类及环境应力量值）对装备（整机）、分系统、部件的效能产生影响的学科，是研究工程产品环境适应性能力的工程应用性学科。由于工程产品在贮存、运输、和使用中所遭受的环境包含各种自然环境和人工诱发环境（见后续内容），除气候环境、力学环境、生物环境、空间环境、深海环境外，也包括电磁环境和运输环境，故产品的环境适应性、电磁兼容性、运输性都归属于产品环境工程学科研究的范畴。

产品环境工程是包含多个工程领域的系统工程，除环境试验之外，至少还应包括如下方面：对工程产品效能有影响的自然环境和诱发环境的种类；这些环境因素对设备的影响机理；监测和分析现场环境条件；确定在何种情况下可以在实验室内进行模拟；室内环境模拟试验与自然环境暴露及现场使用试验之间的关系；制定环境试验标准；评价特种环境对设备的影响；如何指导产品进行耐环境的设计，增强产品的环境适应性能力；环境试验设备的开发与应用；以及对上述各项工作进行有效管理等都属于环境工程的范畴。因此，产品环境工程是为保证产品在寿命期内，在预期的运输、储存、使用和维护状态时所经历的环境条件下能正常工作而进行的设计、研究、管理的一项系统工程。是以工程产品为对象，研究产品与环境之间相互影响及适应的关系，并最终生产出能适应严酷环境条件的高品质产品的系统工程。

综上所述，产品环境工程大体包含下述四个方面的内容。

1) 环境条件及环境影响

a) 研究、测量、收集和分析产品贮存、运输、使用的现场环境条件，包括现场环境

因素的种类、应力水平、出现的概率及其变化规律；

b) 确定在何种情况下，实验室环境模拟试验适用且能合理地等效于现场使用状况和自然环境暴露试验的状态；

c) 研究不同环境应力之间的相互耦合及相互制约；

d) 研究自然及诱发环境因素对产品效能的影响机理；

e) 研究和评价产品对其寿命周期内遭受环境应力的响应特性；

f) 产品失效模式及故障分析；

g) 根据产品现场环境条件，制定各类产品的环境标准、规范、指南、手册等标准体系，用以指导产品的耐环境设计和环境试验。

2) 耐环境设计、环境防护与控制技术

耐环境设计是将产品的环境适应性通过设计纳入到产品中，以期达到产品耐受环境能力的要求。

产品耐环境设计包括两个方面：一是增强产品自身的抗环境能力，如选用好的材料、元器件及精细的结构设计等；另一方面是采取措施减缓环境应力对产品作用的强度，如减振、隔热防护（环境防护）及为产品的工作空间创造微环境条件（即环境控制技术）。

3) 环境试验

环境试验是评价产品对环境应力是否适应的最有效的手段，通过环境试验可以分析和验证各种环境因素对产品效能的影响程度及作用机理。

环境试验的目的之一是发现产品耐环境设计的缺陷，以便及时改正设计，提高产品的环境适应性能力，如产品研制阶段的环境试验。另一方面是鉴别验证产品的环境适应性是否满足预定的（如合同规定的）要求，如生产阶段的鉴定试验、验收试验和例行试验。

环境试验分为外场试验（含现场工作试验、自然暴露试验）和实验室环境模拟试验。实验室模拟环境试验研究内容包含：

a) 环境条件的选择与剪裁；

b) 环境试验顺序的选择；

c) 环境试验设备及环境条件的检测；

d) 试验的实施及试验过程的控制；

e) 试验数据记录、采集、分析；

f) 故障判据及试验结果的判定。

4) 环境工程管理

产品环境工程是一个系统工程，贯穿于工程产品研制、生产的全过程中，必需在产品全寿命期的各个阶段进行有效的协调与管理，其内容包括：

a) 环境工程纳入产品研制及生产过程中的信息管理；

为了使产品环境工程的各项工作落到实处，从产品研发或生产过程的开始就应当制定出针对该产品的“产品环境工程管理大纲”，以便使环境工程的各项工作纳入产品研制的过程中，同步推进。

b) 在产品研制、生产的全过程中，环境工程子系统自身的管理及各个子系统之间相互协调的管理；

产品的环境工程项目主管在专家的协助下编制环境工程自身的管理计划，如确定产品