

高等学校教材系列

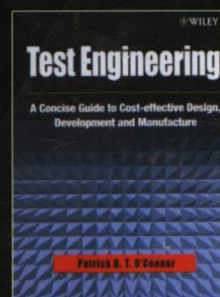


试验工程

—— 成本有效的设计、
研制和制造指南

Test Engineering

A Concise Guide to Cost-effective Design,
Development and Manufacture



[英] Patrick D. T. O'Connor 著
李金国 杨光 苏兴荣 等译



电子工业出版社
Publishing House of Electronics Industry
<http://www.phei.com.cn>

高等学校教材系列

试 验 工 程

——成本有效的设计、研制和制造指南

Test Engineering

A Concise Guide to Cost-effective Design, Development and Manufacture

[英] Patrick D. T. O'Connor 著

李金国 杨 光 苏兴荣 等译

電子工業出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京 · BEIJING

内 容 简 介

本书由著名的可靠性专家 Patrick D.T. O'Connor 撰写而成,是产品环境与可靠性试验领域的一本专业性较强的专著。随着科学技术的发展,产品试验作为产品质量管理的一部分得到越来越多的重视,其研究和应用也得到了长足的发展。本书系统论述了产品研制试验和生产试验原理、各种系统及分系统试验原理、试验过程的实施和标准化、试验过程及其信息的管理等方面的内容,并对试验工程的发展进行了展望。

从本书的内容来看,其首次系统性地从产品试验的基本原理、方法和经济性的角度阐述了试验工程活动,理论与实际结合较好,深入浅出,具有较高的实用价值。本书可作为大专院校产品环境与可靠性相关专业的教材,也可供工程技术人员、科研人员及管理人员参考。

Simon Haykin: **Test Engineering: A Concise Guide to Cost-effective Design, Development and Manufacture.**

ISBN 0-471-49882-3

Copyright © 2001, John Wiley & Sons, Inc.

All Rights Reserved. Authorized translation from the English language edition published by John Wiley & Sons, Inc.

No part of this book may be reproduced in any form without the written permission of John Wiley & Sons, Inc.

Simplified Chinese translation edition Copyright © 2005 by John Wiley & Sons, Inc. and Publishing House of Electronics Industry.

本书中文简体字翻译版由 John Wiley & Sons 授予电子工业出版社。未经出版者预先书面许可,不得以任何方式复制或抄袭本书的任何部分。

版权贸易合同登记号 图字: 01-2005-4176

图书在版编目 (CIP) 数据

试验工程——成本有效的设计、研制和制造指南 / (英) 奥康纳 (O'Connor P. D. T.) 著; 李金国等译.

北京: 电子工业出版社, 2005.11

(高等学校教材系列)

书名原文: Test Engineering: A Concise Guide to Cost-effective Design, Development and Manufacture

ISBN 7-121-01913-2

I. 试... II. ①奥... ②李... III. 可靠性试验 - 高等学校 - 教材 IV. TB302

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2005) 第 127454 号

责任编辑: 李秦华

印 刷: 北京智力达印刷有限公司

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

经 销: 各地新华书店

开 本: 787 × 980 1/16 印张: 14.5 字数: 324 千字

印 次: 2005 年 11 月第 1 次印刷

定 价: 45.00 元

凡购买电子工业出版社的图书,如有缺损问题,请向购买书店调换;若书店售缺,请与本社发行部联系。联系电话: (010) 68279077。质量投诉请发邮件至 zlts@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

审 委 会

主 任 朱和平

副主任 陈志杰 沈 齐

委 员 （以姓氏笔画为序）

丁其伯 王肖鸣 刘宁泽 李金国 苏兴荣 张宝珍 陈 明 杨小雷

杨 光 杨秉喜 赵 琼 祝耀昌 曾天翔 曹炳伦

译 委 会

主 任 李金国

副主任 苏兴荣 杨 光

委 员 （以姓氏笔画为序）

马志宏 马 杰 辛文波 陈丹明 赵书平

译 者 序

本书由著名的可靠性专家Patrick O'Connor撰写而成,是产品环境与可靠性试验领域的一本专业性较强的专著。随着科学技术的发展,产品试验作为产品质量管理的一部分得到越来越多的重视,其研究和应用也得到了长足的发展。本书系统论述了贯穿产品设计生产过程的研制试验和生产试验原理、各种系统及分系统的试验原理、试验过程的实施和标准化、试验过程及其信息的管理等方面的内容,并对试验工程的发展进行了展望。

本书首次系统性地从产品试验的基本原理、方法和经济性的角度阐述了试验工程活动,理论与实际结合较好,深入浅出,紧跟技术前沿,具有较高的实用价值,其出版满足质量和可靠性管理工作的系统工程需要,在开展试验工程研究和应用方面具有较强的指导作用。因此,为学习国外先进的试验工程理论和方法,推动我国质量和可靠性工程的发展,我们组织人员进行了本书的翻译,供广大从事产品试验研究与应用的研究人员、工程技术人员和管理人员以及各大专院校的相关专业的师生参考。

空军装备研究院雷达与电子对抗研究所的空军装备环境与可靠性试验中心(以下简称中心)是专业的环境与可靠性试验研究机构,本书的翻译工作由该中心人员完成。序言、前言、第1章、第5章、第14章由杨光、李金国翻译,第2章由陈丹明翻译,第3章、第4章、第11章由马志宏翻译,第6章、第12章由马杰翻译,第7章、第9章由辛文波翻译,第8章、第10章由苏兴荣翻译,第13章、附录由赵书平翻译。最后,全书由李金国、杨光、苏兴荣统稿。本书的校对得到了曾天翔、祝耀昌、杨秉喜、张宝珍、丁其伯等专家的帮助,在此对他们表示衷心的感谢。感谢赵琼、祝东明、龚财宝、谷明彦、李丙辛等同志在该书的翻译组稿过程中所给予的无私帮助。

在本书的翻译和出版过程中,得到了空军装备研究院雷达与电子对抗研究所各位领导和专家的大力支持和帮助,在此表示衷心的感谢。

尽管为本书的翻译出版付出了较多的努力,但由于自身翻译水平所限,我们还是认识到书中存在较多的缺陷和不足。尽管这样,我们仍尽可能地要求自己更加努力,以便使原书的内容得到适度的共享,并热切地盼望将本书贡献给那些希望从本书获益的人们。书中不足之处敬请读者指正。

中文版序言

随着科学技术的不断发展,产品的质量问題已越来越引起人们的重视,而试验工程技术是产品发展的重要技术基础,是评价产品质量的重要手段,也是保证产品质量的重要环节。在产品的设计、制造、使用过程中,试验工作已成为项目管理必不可少的组成部分,产品试验工程在我国军用和民用领域得到越来越多的研究和应用。

本书是著名可靠性专家Patrick D.T. O'Conner撰写的产品试验工程领域中的一本专业书籍。本书首次从产品试验的基本原理、方法和经济性的角度阐述了试验工程活动。该书的出版将填补国内空白,在开展试验工程研究和应用方面具有较强的指导作用。该书阐述了研制试验和生产试验原理、各种系统及分系统的试验原理、试验过程的实施和标准化、试验过程及其信息的管理等方面的内容,并对试验工程的发展进行了展望。全书内容安排合理,系统性和理论性较强,紧跟技术前沿,满足质量与可靠性管理工作的需要。本书可作为大专院校环境与可靠性相关专业的教材,也可供工程技术人员、科研人员及管理人员参考。

随着各级部门产品质量意识的增强,产品试验工程正面临一个重要的发展时期,同时也对装备的试验工程理论和技术提出了更高的要求。本书的出版将有助于学习国外先进的试验工程理论和方法,推动环境与可靠性工程专业的发展。

在此对本书翻译出版工作的全体同志的辛勤劳动表示感谢!

对关注并支持本书翻译出版工作的专家和读者们表示感谢!

空军装备研究院雷达与电子对抗研究所所长



2005年8月24日

序 言

现代工程产品,无论是单个组件还是大型系统,其设计和生产过程必须能保证该产品能可靠地使用,因此,生产过程必须按照正确的方式执行,并使其变异最小化。设计和生产过程的所有方面都会对产品的设计、研制、制造和使用费用(或称其为产品寿命周期费用)产生影响,处在竞争环境中的现代工程所面临的挑战是保证产品寿命周期费用的最小化,同时达到产品的性能需求和投入市场的时间要求。

由于产品的市场是一个竞争的市场,则提高产品的质量和可靠性将会使产品具有更大的竞争优势。这方面的例子是非常多的,特别是日本的磁卡、机床、大型挖掘设备、电子元件和消费类电子产品等,它们于最近30年到40年间在世界市场上占据了显著的位置。日本产品在市场上的成功,很大程度上是W. Edwards Deming的功劳,他向日本人讲授了质量、产品和竞争之间的根本关系。今天,这种道理已经被处于市场竞争中的几乎所有的公司所理解,那些无法理解它的公司已经失去了它们的地位或导致失败。

这些最初在日本扎根的原理、思想和方法,最终又回到它们发源的西方国家,其中方法学在美国得到进一步发展,用于解决军用装备中存在的不能令人满意的质量和可靠性问题。如将其用于质量和可靠性管理的标准体系(MIL-Q-9858和MIL-STD-758),用于预计和测试可靠性的方法(MIL-STD-721, MIL-HDBK-217, MIL-STD-781)。MIL-Q-9858是国际质量标准体系(ISO 9000)的模型,而可靠性量化方法已得到类似的发展,并在其他类型的产品中进行了应用。

西方国家中产生的这些方法在很大程度上是由用户需求所驱动的,特别是军方用户。他们发现强迫接受标准和过程成效较低,同时供应商主动进行改善的热情不足,从而导致军方需要为备用件和维修活动买单。相反地,日本的质量运动是由工业部门发起的,因为他们深刻了解质量是提高生产力和竞争力的关键因素。

这两种发展情况反映了日本人和西方人不同的思维方式,日本人在工业中,特别是在工程中一般应用演绎的思维方式,而西方则采用归纳的思维方式。演绎方法在宽广方向上需求产生持续改进,并通过仔细评价而产生新的思路。归纳方法则带来创造和“突破”,并更依赖于控制人和过程的“系统”。演绎方法需要更清晰的观察,特别是对理性和非理性的区分,然而,这种方法无益于产生全新的思想。显然,这些特点相互之间并不冲突,许多工程师都兼具二者的特点。日本人思考方式的整个趋势反映了他们的积极性,以及通过工业团队合作并采纳西方教授Deming和Drucker的哲学思想所取得的成功,而西方国家的竞争者们却发现放弃所谓的“科学”管理模式是那么困难,这种管理方式依赖于系统和更为严格的组织和过程。

遗憾的是,质量和可靠性工程的发展经历了相对于其他工程学科更多不合理的磨难,这是分析和控制的方法与系统发展的结果。它与推理逻辑不同,推理逻辑会发现,质量和可靠性通过知识对细节的关注和对所涉及人员的持续改进而实现。当然,西方思想也有积极的贡献:我们仅需回忆 Shewhart 在统计过程控制和 Fisher 在统计试验方面所做的创新性工作,当然,Deming 也是美国人。学生、教师、工程师和经理们在对质量和可靠性工程方法进行有效的区分时具有一定困难,许多人因此而被导向错误的方向。

在本书中,我们将尝试着向读者提供包含质量和可靠性工程与管理有关的所有方面的、均衡的和实用的、有关当前和未来情况的资料,涉及到可能会对未来产品产生影响的新科学和工程的发展。我衷心地希望本书能在工程学的学习和应用上带来积极的帮助。

Patrick D. T. O'Connor

前 言

在工程系统和产品的研制过程中,试验通常是最耗费财力、时间且非常困难的工作。为了确保产品设计满足性能、安全性、耐用性、可靠性以及其他规定的要求,必须进行研制试验。大多数研制试验过程需要试验技术领域的专业工程师与来自设计、研制、制造和维修领域的专业工程师进行涉及多学科的综合思考和团队合作。许多制造项目必须通过试验以确保它们的制造是正确的,许多项目还必须在使用过程中进行试验。然而,工业中的许多试验是基于惯例、标准和程序进行的,它们并不能保证试验顺利完成与费用、时间之间的优化平衡。目前,对试验的错误理解比较普遍,特别是许多工程人员认为试验应力不应超过产品的使用水平,试验中出现的故障仅代表试验的故障,以及可靠性试验的目的与可靠性统计学的产生有关。

实际上,试验并不只是一个工程事件,由于其在经济和商业方面的重要性,试验也是一个管理问题。由于试验的花费一般较高,因此其往往面临着希望减少试验的压力,而没有理解试验对产品性能、可靠性、安全性的影响,以及产品在使用过程中出现故障时可能带来的更大花费。

试验不充分和不合适的主要原因,似乎是由于工程上没有对这种基本的行为产生一致的基本原理和方法学。试验并不能像大多数工程课程那样进行教学,这门课程的很多方面都没有现成的书籍,但其中包含的部分专业内容可能都已经学习过了,如与机械工程有关的疲劳试验、与电子工程有关的数字电路试验。然而,其中仍然存在较多未涉及的内容,特别是多学科交叉和系统方面的内容。工程训练往往强调设计,试验和制造方面引起的注意则较少,并且缺乏进行研究和设计的“魅力”,这种现象可从从事试验和制造工作的工程人员所获得尊重较少、地位和薪水较低等反映出来。在某些国家,作为工程人员资格认证方式之一的技师和学徒培训方式近乎消失,更加剧了这种不利趋势的发展。工业部门在许多关键领域已经开始缺乏有才干的工程人员,从而导致设计在研制阶段未能进行充分的试验,而产品在制造和维修阶段的试验也不充分,增加了产品整个寿命周期的费用,降低了产品的竞争力,甚至会导致更大的灾难。

随着数学建模、有限元分析和电路设计自动化等基于计算机的现代技术的发展,工程人员能方便地进行综合设计与分析,产品性能的许多方面都能通过软件进行“试验”,这些强有力的工具能对正确设计结果的产生提供极大的帮助,并且能降低实际产品的试验需求,减少研制费用。但是,这些方法不能再现应用条件下的总体可靠性,如环境和制造的变异及相互影响。因此,它们的使用和由此获得的结果应被当做研制试验程序中的一部分而进行综合,从以往的资料来看,这种综合以前很少完成和提及。

缺乏试验技术培训还会产生其他不利结果,包括一些标准创建时发布了不合适和无效的试验方法,但是工业部门又坚持采用这些方法。

为什么现代产品的工程师、管理者和用户都认为试验不重要呢?一个主要原因是大多数批量生产的产品能获得非常高的可靠性。我们中有多少人看到过微处理器、内存条、移动电话或汽车发动机出现故障?现代工程产品采用先进技术后显现出复杂、便宜及非常可靠的特点,如微电子技术、加工技术、表面冶金技术、塑料技术、润滑技术、软件技术等。然而,我们如履薄冰:试验的疏忽或试验不充分太容易导致故障的发生,我们都能记住这些情况,就像工程师和客户们都能记住一样。这种不确定性或偶然性的成分是很危险的(在工程中“好运”很少,不同程度的坏运气则显得很正常)。

试验应基于这样一个基本原理,即它能为工程产品和系统试验有关的所有计划、方法和决策提供一个基础。这并不是说在任何给定的环境中进行试验时都有一种“正确的”方法,而其他方法都是“错误的”。一般来说,工程领域,特别是试验领域,要比人们努力工作的其他领域更为困难,因为该领域包含有更多的不确定性,以至于在做什么试验及怎么做试验上总是需要进行判决,甚至发生争执;设计师可能认为不需要进行大量试验,但是项目工程师则不这么认为;负责资金的人员希望花费最少的钱,希望做最少的试验,等等。然而,如果所有人都对什么是已知的,什么是不确定的,以及其他一些基本因素表示认同,如费用、时间、市场、规划、安全等,那么例行的计划和决策就有了基础。试验的以上基本原理的本质是,有效的试验是增值过程而非消耗过程这一准则。

本书的写作目的是向所有学习试验基本原理的工程类学生提供一本基础教材,可作为学位课程的一部分,并可为工程师和工程管理者的培训提供参考,希望通过此书使好的试验原理得到更大范围的了解,同时也使不合适方法中存在的缺点得到更大范围的了解。

本书不可避免地存在不足,并且不能代表本书出版后技术发展的情况,但我将在我的主页上(<http://www.pat-oconnor.co.uk>)保持信息的更新,这些信息包括适合设计分析和试验的团体、软件、设备和服务的清单,欢迎大家访问并提供建议和帮助。

我对专家们给予大量的无私帮助表示衷心感谢,特别是Gregg Hobbs在有关HALT和HASS试验的章节和其他有关章节的写作中提供了鼓励和帮助,MSC软件公司的Ing. Rafat Malik进行了第5章中有关有限元分析的写作,nCode国际公司的员工们提供了有关疲劳分析方法和软件的信息,LDS的Richard Baker在振动试验方面给予了非常有价值的帮助,Jon Turino和Ben Bennetts在有关电子产品试验的主题上做了大量工作,John Musa, Sam Keene和Sean O'Connor在软件试验方面的写作给予了较大帮助,Brendan Davis在制造试验经济学方面提供了较多的信息和见解,特别是在附加值试验这一概念上。Jim Morrison对关于误差的章节进行了评阅和完善, Frank Everest和Sidney Dunn非常热心地评阅了本书,并为本书的进一步完善提供了大量的建议。另外一些公司提供了图形和其他信息,衷心感谢他们所做出的贡献。

然而,我清楚地认识到本书不可避免地存在许多缺点、错误和疏忽,我无法像 Peter Mark Roget 博士那样对书中的不足进行优雅的表述,更无法对其表述进行任何改动。在其所著百科全书第一版(1852 年版)的序言中这样写道:

尽管为本书的出版付出了较大的努力,但我还是认识到书中存在的大量缺陷和不足,与其应达到的优秀程度还有较大距离。从工作本身来说,完美程度虽然距离遥远,但我尽可能地要求自己努力工作,使本书目前的版本所表现的优点得到适度的共享,并热切地盼望将本书贡献给那些希望从本书获益的人们,也贡献给那些公正的评论家们,他们可能会非常容易地发现书中存在的问题,同时也会认识到其中存在的困难。

我将本书作为样品交付读者,由读者和运用书中描述的原理进行试验的人们对本书进行试验。

Patrick O'Connor

pat@pat-oconnor.co.uk

<http://www.pat-oconnor.co.uk>

<http://www.pat-oconnor.co.uk/testengineering.htm>

2001 年 2 月

目 录

第 1 章	绪论	1
1.1	为什么要试验	1
1.2	如何进行试验	6
1.3	分析和仿真	9
1.4	好的和坏的试验	9
1.5	试验经济性	11
1.6	试验程序管理	13
第 2 章	材料的应力、强度及失效	14
2.1	引言	14
2.2	机械应力及断裂	14
2.3	温度效应	22
2.4	磨损	23
2.5	腐蚀	24
2.6	吸潮和凝露	24
2.7	材料和元器件的选取	25
	参考文献	26
第 3 章	电气和电子产品的应力、强度和失效	28
3.1	引言	28
3.2	应力影响	29
3.3	元器件类型和失效机理	31
3.4	电路和系统	38
	参考文献	39
第 4 章	变异及可靠性	41
4.1	变异	41
4.2	载荷 - 强度干涉	47
4.3	随时间变化的变异	50
4.4	多变异及统计试验	51
4.5	离散变异	54

4.6	置信度及显著性水平	54
4.7	可靠性	55
4.8	小结	56
	参考文献	56
第 5 章	设计分析	58
5.1	引言	58
5.2	质量功能展开	59
5.3	设计分析方法	61
5.4	可靠性和安全性分析方法	69
5.5	过程设计分析	73
5.6	小结	73
5.7	设计分析软件	74
5.8	设计分析的局限性	74
5.9	分析结果用于试验规划	75
	参考文献	75
第 6 章	研制试验原理	77
6.1	引言	77
6.2	功能试验	77
6.3	可靠性和耐久性试验：加速试验	78
6.4	设计或生产偏差的试验：田口方法	87
6.5	过程试验	89
6.6	β 试验	89
6.7	小结	90
	参考文献	90
第 7 章	材料和系统试验	91
7.1	材料	91
7.2	组件与系统	93
7.3	系统方面	100
7.4	数据采集与分析	102
7.5	标准试验方法	103
7.6	试验中心	103
7.7	信息	103
	参考文献	103

第 8 章 电子产品测试	104
8.1 引言	104
8.2 电路测试原理	104
8.3 测试设备	106
8.4 测试数据采集	111
8.5 测试设计	111
8.6 电子元件测试	113
8.7 EMI/EMC 试验	116
8.8 信息	117
参考文献	117
第 9 章 软件	118
9.1 引言	118
9.2 工程系统中的软件	120
9.3 软件错误	120
9.4 预防错误	122
9.5 语言	124
9.6 软件设计的分析	125
9.7 数据的可靠性	126
9.8 软件测试	126
9.9 小结	128
参考文献	130
第 10 章 制造试验	131
10.1 引言	131
10.2 制造试验原理	131
10.3 制造试验的经济性	133
10.4 检验和测量	134
10.5 试验方法	136
10.6 应力筛选	138
10.7 电子产品制造试验方法选择和经济性	140
10.8 电子元器件试验	144
10.9 统计过程控制和验收抽样	147
参考文献	147

第 11 章	使用试验	148
11.1	引言	148
11.2	使用试验的经济性	148
11.3	试验计划	149
11.4	机械设备和系统	149
11.5	电气和电子元件	150
11.6	软件	152
11.7	以可靠性为中心的维修	152
11.8	修复产品的应力筛选	154
11.9	校准	154
	参考文献	155
第 12 章	数据收集和分析	156
12.1	引言	156
12.2	故障报告、分析和纠正措施系统 (FRACAS)	156
12.3	验收抽样	163
12.4	绘制概率和风险图	164
12.5	时间序列分析法	165
12.6	数据收集和分析软件	166
12.7	可靠性验证与可靠性增长的度量	166
12.8	数据分析概述	169
12.9	数据来源	169
	参考文献	170
第 13 章	法律、法规和标准	171
13.1	引言	171
13.2	法律和法规	171
13.3	制订法规的主要机构	173
13.4	标准	175
13.5	通用标准	177
13.6	工业/技术标准	180
13.7	小结	180
	参考文献	181
第 14 章	试验管理	182
14.1	引言	182

14.2	组织和责任	183
14.3	试验程序	184
14.4	研制试验程序	184
14.5	工程试验计划	189
14.6	生产和维修	190
14.7	试验培训和教学	191
14.8	试验发展的前景	192
14.9	小结	194
	参考文献	195
附录 A	首字母缩写词	196
附录 B	试验法规和标准	199
附录 C	研制试验计划举例	203
附录 D	生产阶段试验计划举例	206
索引		208

第1章 绪 论

1.1 为什么要试验

必须对工程产品进行试验的理由有很多, 这些理由可归纳为以下几点。

设计的不确定性

我们必须确定产品的设计满足性能、安全性、可靠性和耐用性的规定要求, 如果我们对产品达到所有的要求充满信心, 那么在原则上是不需要通过试验以对此进行验证的。然而, 在产品研制过程中进行试验的需求直接反映了设计中存在较多的不确定性, 特别是在所有工程设计中有一个“不确定性间隙”, 它存在于我们所了解的设计情况和依据所有的需求实际应达到的情况之间。对某些新产品来说, 它可能存在较少的不确定性, 或不存在不确定性, 因此其所需试验较少。例如, 一个完全静态的简单元件, 比如一个固定部件的安装托架, 由于在工程条件下其功能非常简单, 其设计保证所有影响性能和耐用性的特征都能得到很好理解并加以考虑。若该托架用于支撑一个承受振动应力的部件, 那么它必须尽可能轻, 此时不确定性开始增长。如果该托架出现了故障, 并且导致的后果非常严重, 那么就必须非常谨慎地对其进行试验, 以确定设计计算和分析的有效性。若产品是批量生产, 由于生产过程将引入误差, 从而导致更多的不确定性, 则会产生更多的试验任务。

当然, 很少有工程产品像上面的安装托架那么简单。即使十分简单的设计, 如舱门执行器或电子计时电路等, 它们也都具有需要通过试验进行确认的特征, 试验的数量则显然依赖于设计师对问题的熟悉程度, 以及他们的知识、经验和技能。正式设计过程(如计算、部件和材料的信息以及分析方法), 通常不包括有关部件相互间的影响、抵抗变化或衰减的能力以及可靠性等方面的情况, 这些情况对系统的影响一般是难以完全预计的, 仅可通过试验进行发现。如果通过试验发现设计是正确的, 那么就不需要重新设计, 否则必须进行改进, 而改进后的设计需要重新进行试验。此时我们可以发现在设计团队的经验、知识及技能和研制费用之间存在着非常紧密的联系。

大多数工程产品的复杂性要远大于上面所给出的例子, 多数情况下要求一个设计团队拥有处理所有问题的知识是不实际的, 在不进行试验、试验结果分析和改进的情况下, 希望得到所有特征的优化也是不可能的。实际上处理过程通常需要在几个循环中往复进行, 困难的设计过程尤其需要如此。新型复印机的设计就是一个很好的例子, 该产品包括了大量不同的电子电路(电源、模拟电路、数字电路、高电压等)、传感器、机械装置、驱动器、控制器、显示器等。