



基于试验设计的 产品可靠性分析及改进

吕珊珊 王国东◎编著



基于试验设计的产品可靠性 分析及改进

吕珊珊 王国东 编著

西南交通大学出版社

· 成 都 ·

图书在版编目 (C I P) 数据

基于试验设计的产品可靠性分析及改进 / 吕珊珊,
王国东编著. —成都: 西南交通大学出版社, 2021.11
ISBN 978-7-5643-8309-1

I. ①基… II. ①吕… ②王… III. ①产品设计—可
靠性验证 IV. ①TB472

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2021) 第 204897 号

Jiyu Shiyan Sheji de Chanpin Kekaoxing Fenxi ji Gaijin

基于试验设计的产品可靠性分析及改进

吕珊珊 王国东 编著

责任编辑	梁志敏
封面设计	原谋书装
出版发行	西南交通大学出版社 (四川省成都市金牛区二环路北一段 111 号 西南交通大学创新大厦 21 楼)
发行部电话	028-87600564 028-87600533
邮政编码	610031
网 址	http://www.xnjdcbs.com
印 刷	成都蜀通印务有限责任公司
成品尺寸	170 mm × 230 mm
印 张	11
字 数	174 千
版 次	2021 年 11 月第 1 版
印 次	2021 年 11 月第 1 次
书 号	ISBN 978-7-5643-8309-1
定 价	46.00 元

图书如有印装质量问题 本社负责退换
版权所有 盗版必究 举报电话: 028-87600562

前 言

在制造业中，产品质量被视为企业的生命。国务院发布的《中国制造 2025》提出要加强质量品牌建设，将“质量为先”作为基本方针之一，强调要：坚持把质量作为建设制造强国的生命线，实现中国速度向中国质量的转变。党的十九大报告明确提出“质量第一”和“质量强国”的理念。目前，我国制造业正处于转型升级的关键时期，提高制造业产品质量迫在眉睫。可靠性作为质量的重要维度，是随时间变化的质量。分析和提升可靠性对全面提高产品质量水平至关重要，也是国家统筹推进“提升基础产品的质量、可靠性和寿命”工作的根本要求。

低可靠性的产品会增加制造商的售后维修成本，甚至威胁用户的生命安全。目前，我国多数制造企业已充分认识到提高产品可靠性的重要性，但是在可靠性分析和优化的过程中仍缺乏系统科学的方法。对制造商来说，有必要选择合适的理论方法。

对于产品可靠性的分析与改进，很难找到合适的物理模型。因此，需要收集产品可靠性数据，构建产品寿命与各因子之间关系的统计模型。试验设计是现代质量管理中重要的工具，可通过设计试验方案，快速获得产品质量数据，并通过建立质量与各因子之间的关系，识别显著性因子及确定因子水平，从而改进产品质量。采用试验设计方法进行产品可靠性提升是一个序贯性、不断完善的过程。首先，通过筛选试验识别影响产品可靠性的关键变量；然后，针对识别出的关键变量，基于响应曲面法确定变量水平，以优化产品可靠性；最后，对优化后的产品可靠性进行评估，若达到预期目标，则可进入大规模生产制造阶段，否则继续进行下一轮优化，直到最终实现产品可靠性的提升。本书在前人研究的基础之上，分别从关键变量识别、因子水平优化、加速寿命试验验证三个方面进行研究，以期最终提升产品可靠性。

本书第 1 章和第 2 章介绍了研究背景及试验设计和可靠性相关的理论。第 3 章研究了非完全随机化情形下的关键变量识别问题, 提出基于均值寿命的混合效应模型, 假设随机效应和试验因子通过平均失效时间影响产品的可靠性, 通过最大化产品的平均失效时间以改善产品可靠性, 然后基于极大似然估计方法获得模型的参数估计值, 并通过仿真试验对比传统的模型和本书所提出模型的优劣。

在识别出关键变量的基础上, 需要进一步确定关键变量的水平, 以优化产品可靠性。在可靠性改进试验中, 不仅会观测到产品的可靠性特征, 还会同时观测到产品其他方面的质量特征。第 4 章和第 5 章针对非完全随机化的试验, 同时观测到产品质量和可靠性特征时的问题进行研究, 以获得质量和可靠性同时最优的因子水平。其中, 第 4 章提出基于质量特征均值的方法建模产品的质量特征。基于两阶段的方法建模产品的可靠性特征, 并通过满意度函数法同时优化产品的质量和可靠性特征。由于第 4 章所提的两阶段方法不能提供联合的似然函数, 并且对于定时截尾的可靠性数据, 两阶段方法不能处理没有失效单元的处理组合, 因而第 5 章在提出混合效应模型的方法的同时, 对产品的质量和可靠性特征建模, 并与两阶段方法进行对比。

在产品可靠性优化的过程中存在着不确定性扰动, 由于这些不确定性扰动的影响, 产品可靠性本身也会产生波动, 波动是产生可靠性问题的根源。工程师不仅期望使产品可靠性达到目标值, 也希望各种不确定性扰动产生的可靠性变异尽可能小, 即实现寿命特性的稳健优化。第 6 章针对寿命数据的稳健优化问题, 提出以寿命数据中位数和标准差为位置和散度指标构建双响应曲面模型对寿命数据进行优化。在变量选择部分, 提出 Lasso 与方差分析相结合的方法进行变量选择; 在模型优化部分, 提出使用满意度函数法与熵权法相结合的方法针对寿命数据双响应曲面模型进行稳健优化, 以确定最优因子水平的组合。

针对优化后的产品, 需要进一步评估其可靠性水平, 判断是否达到预期目标。产品经过优化设计后, 其寿命很长, 无法在短期内从实验室常规试验或者现场试验中获得足够的失效信息, 而新产品快速推广的迫切需求使可靠性评估亟须在短期内完成。为了快速评

估新产品在保修期内的可靠性是否达到预期目标,可采用加速寿命试验(Accelerated Life Test)获得更多的失效数据以评估产品的可靠性。第7章和第8章分别针对失效机制变化的加速寿命试验建模问题进行研究。第7章假设 Weibull 分布的形状参数和尺度参数都随着应力水平的变化而变化,用加权最小二乘法获得加速模型系数的估计,并用自助法获得分位数的置信区间,通过实例介绍了该方法,并与其他方法做了比较。第8章考虑位置-尺度分布中尺度参数非常数假设,通过建立基于分位数的重新参数化模型,基于极大似然估计获得模型参数。将所提的方法应用于加速寿命试验的一个例子,并通过仿真试验对比了基于分位数重新参数化的模型和传统的模型。第9章和第10章考虑了加速寿命试验的非完全随机化进行建模分析。其中,第9章针对子抽样的加速寿命试验,假设 Weibull 分布的形状参数不变,提出改进的两阶段方法,使其能够计算分位数的置信区间,通过一个实例详细介绍了改进的两阶段法,并通过仿真与极大似然法进行比较。第10章同时考虑加速寿命试验的非完全随机化和 Weibull 分布形状参数的变化,提出非线性混合模型,基于极大似然估计获得模型参数估计值及分位数寿命,并采用参数自助法计算分位数的置信区间,并通过仿真试验对比模型的性能。

综上所述,本书主要研究以提升产品可靠性为目的,分别从寿命模型构建以识别关键变量;关键变量水平的确定以实现寿命特性的优化;加速寿命试验的建模以评估产品可靠性三个方面进行研究。本书的研究是对可靠性理论的进一步延伸,对于丰富质量工程相关理论的研究具有重要意义。此外,本书的研究成果可帮助企业有效降低产品可靠性的波动、快速评估产品可靠性水平并进行管理决策,对最终提高制造业产品质量、提升竞争力乃至完成制造业转型升级有一定的促进作用。

在此书即将付梓之际,首先要向我的导师何楨教授致以最诚挚的谢意。何老师对我生活和研究工作的关心使我铭记于心,以老师为榜样,认真做人,踏实科研。此外,感谢曾给予我诸多帮助的同门和朋友们。最后,向我的家人表达衷心的感谢,感谢你们对于我的无私疼爱、鼓励与支持。谨以此书献给他们。

本书的相关研究是国家自然科学基金青年项目“基于非完全随

机化试验设计的产品可靠性分析及稳健优化研究”（批准号：72002066），国家自然科学基金面上项目“面向分位寿命的试验设计与建模优化研究”（批准号：71871204），教育部人文社会科学研究青年基金项目“非完全随机化寿命试验条件下的产品可靠性分析及改进研究”（项目批准号：19YJC630117），教育部人文社会科学研究青年基金项目“复杂制造过程改进产品可靠性的试验设计与分析研究”（项目批准号：17YJC630151）的阶段性成果。

鉴于作者水平有限，书中难免存在不妥之处，恳请读者批评指正。

作 者
2021年6月

目 录

第 1 章	绪论	001
1.1	研究背景	001
1.2	研究意义	003
1.3	国内外研究现状	004
1.4	研究框架	012
第 2 章	可靠性分析及改善的基本理论与方法	015
2.1	试验设计概述及统计分析	015
2.2	可靠性概述及统计分析	020
2.3	考虑随机效应的统计分析方法	028
2.4	响应优化的满意度函数法	031
2.5	本章小结	035
第 3 章	基于试验设计的产品可靠性改善	036
3.1	方法	036
3.2	参数估计和推断	038
3.3	仿真研究	039
3.4	案例分析	042
3.5	本章小结	046
第 4 章	基于两阶段方法同时优化产品的质量与可靠性特征	047
4.1	案例描述	047
4.2	质量特征模型	049
4.3	可靠性特征模型	050
4.4	案例分析	053
4.5	本章小结	064

第 5 章	基于混合效应模型同时优化产品的 质量和可靠性特征	065
5.1	质量特征的线性混合模型	066
5.2	寿命特征模型	067
5.3	案例分析	068
5.4	基于满意度函数法同时优化质量和可靠性特征	073
5.5	与两阶段方法的对比	076
5.6	非平衡试验的质量特征分析	077
5.7	本章小结	077
第 6 章	基于双响应曲面方法的寿命特征稳健优化	079
6.1	基于寿命特征的双响应曲面模型构建	079
6.2	寿命特征的稳健参数优化	082
6.3	实例分析	086
6.4	本章小结	093
第 7 章	考虑形状参数不固定的加速寿命试验数据分析	095
7.1	假 设	096
7.2	推荐的方法	096
7.3	实 例	100
7.4	仿真研究	103
7.5	本章小结	105
第 8 章	考虑非常数尺度参数的 加速寿命试验低分位点估计	106
8.1	重新参数化模型描述和模型假设	106
8.2	参数估计	108
8.3	低分位数置信区间估计	109
8.4	案例分析	111
8.5	仿真试验	115
8.6	本章小结	119
第 9 章	考虑子抽样的加速寿命试验数据分析	120
9.1	Freeman 和 Vining 提出的两阶段法	120

9.2	改进的两阶段法	123
9.3	实例	126
9.4	仿真研究	130
9.5	本章小结	132
第 10 章 考虑随机效应和非常数形状参数的		
	加速寿命试验分析	133
10.1	非线性混合模型和模型假设	133
10.2	参数估计	134
10.3	分位数估计及置信区间计算	137
10.4	玻璃电容器的应用研究	138
10.5	仿真试验分析	144
10.6	本章小结	145
参考文献		146
附录 A 满意度函数法优化的 R 代码		161
附录 B 线性混合质量特征模型中参数估计的方差		163
附录 C ANOVA 表中方差分量的期望平方和		164

第 1 章 绪论

1.1 研究背景

随着全球化市场竞争的加剧和顾客需求的日益增长，质量已经成为企业在市场竞争中取胜的关键因素。质量作为产品最基本的特性，是提高消费者满意度的前提，是企业保持较高竞争优势的必备条件。著名质量管理专家朱兰曾预言过：“21 世纪将是质量的世纪”。产品质量已经逐渐成为企业核心竞争力的关键。可靠性是随时间而变化的质量^[1]，是产品质量的重要维度，是当今国家发展的重中之重，是提高国际竞争力的关键。国务院 2012 年 2 月 6 日颁布的《质量发展纲要》（2011—2020 年）指出质量发展是兴国之道、强国之策，明确提出要实施质量提升工程，其中包括可靠性提升工程。国务院 2015 年 5 月 8 日颁布的《中国制造 2025》，是中国版的“工业 4.0”，明确提出要加强质量品牌建设，将“质量为先”列为重要的基本指导方针之一。

制造业是国民经济的主体，提升制造业的国际竞争力，是提升我国综合国力，建设世界强国的必由之路。顾客在制造商生产产品的看法在很大程度上取决于产品的可靠性。顾客在产品使用过程中由于可靠性差而出现的各种问题的经历和体验（如手机黑屏、碎屏，汽车召回、维修等），会降低其对该品牌产品的忠诚度，影响周围人对该品牌产品的选择，从而影响产品销售及制造商的声誉，使企业可能会丧失掉一大部分潜在客户。质量差、不可靠的产品，不仅会影响制造商的经济利益，而且会影响顾客的人身安全，导致意想不到的事故，造成巨大的经济损失甚至人员伤亡。1971 年，苏联“礼炮”号飞船由于零部件失灵致使三名宇航员不幸丧生。1986 年，美国“挑战者”号航天飞机由于密封橡胶圈失效，致使七名宇航员全部遇难，造成 12 亿美元的经济损失。这些都是由于可靠性问题导致的重大安全事故的案例。因此，提升产品可靠性不仅能为企业带来巨大的经济效益，还直接关系到顾客的安全和国家的综合国力。

在质量及可靠性的分析及改善中，企业需要考虑先进的质量管理理念及工具。产品质量的改善经历了事后检验、事中控制和事前设计三个阶段。试验设计（Design of Experiment, DOE）是改善产品质量的重要工具，被广泛应用于产品质量的评估和改善。其基本思想是通过设计试验，改变影响因子的组合，分析影响产品质量特性和工艺过程的显著性因子，拟合质量特性输出与影响因子的关系模型，并优化因子水平，在改善产品质量的同时降低成本。20 世纪 20 年代，英国统计学家 R. A. Fisher 首先提出试验设计的方法并将其应用于农业生产中。随后，试验设计被广泛应用于产品和流程的改善^{[2] - [6]}。

然而，可靠性改善试验比质量改善试验更难以实行^[7]。这主要是由于两方面的原因：一是可靠性数据通常是非正态的，寿命数据通常服从指数分布、威布尔分布、对数正态分布和伽马分布等；二是寿命数据通常是截尾的，由于时间、成本和其他限制，工程师往往在达到预定时间或故障数时就停止试验，一些测试单元在试验结束时仍然没有失效，即数据是截尾的。截尾机制的存在使得数据包含较少的信息且难以分析。因此，应用试验设计的工具改善产品可靠性是一个极具挑战性的工作。

在许多工业试验中，工程师可能会同时观测到产品的质量 and 可靠性特征。如对于手机来说，除了手机的使用寿命，工程师往往会观测到诸如手机外形、尺寸、待机时间等的质量特征。在这种情况下，如何找到同时优化质量和可靠性特征的最佳条件也值得深入研究。此外，在产品大批量生产过程中，受制造容差和加工误差的影响，只能在一定精度上将试验因子设定在指定水平，与实验室条件下确定的最优水平并不完全一致，这些因子的波动会影响产品寿命特征。此外，产品的寿命除了受可控因子的影响，还受实际中不可控因子（如温度、湿度）的影响。因此，考虑不确定性扰动的影响，如何实现产品寿命的稳健优化，值得进一步研究。

产品质量和可靠性的分析及改善对于企业在激烈的市场竞争中保持较强的竞争优势是非常重要的。可靠性数据分析为可靠性设计和试验提供了基础，给可靠性管理提供了决策依据^[8]。高度可靠的产品，如汽车、电子部件和电视机等，通常具有较好的设计和制造流程，以至于产品在很长时间内都不会失效。在正常的操作条件下，评估这些产品的可靠性将耗费巨大的人力、物力和时间成本。加速寿命试验（Accelerated Life Test, ALT）就是在这种条件下应运而生的。通过增加应力、使用率等方

式加速产品的失效，以获得及时有效的产品信息。如何对加速寿命试验情形下的数据进行建模分析，评估产品可靠性，以发现可能存在的潜在问题，具有重要的研究意义。

综上所述，本文主要考虑如下几方面的研究问题：

- (1) 如何构建寿命特性模型，以识别关键变量。
- (2) 如何进行关键变量最优水平的确定，以实现寿命特性的优化。
- (3) 如何进行加速寿命试验的设计和分析，以准确、快速评估优化结果。

1.2 研究意义

质量是兴国之道、强国之策。为了在激烈的市场竞争中保持较强的竞争优势，制造商必须竭尽全力改善产品的质量。质量的概念应该包括可靠性。达到可靠性的标准，不一定能满足高品质的质量要求；但不满足可靠性要求，肯定达不到质量标准。可靠性作为产品质量的一个重要组成部分，影响了消费者的购物选择，越来越引起制造商的重视。改善产品可靠性是提高产品质量的重要方面。中国要想成为制造强国，实现《中国制造 2025》提出的制造业强国的目标，就必须关注产品的可靠性，对产品的可靠性进行分析及改善。产品的可靠性问题与顾客利益、人身安全、企业经济效益、国家综合国力密切相关。因此，对产品的质量和可靠性进行分析及改善是十分重要且迫切的问题，具有重要的理论意义和应用价值。

从理论上讲，可靠性分析及改善是质量科学研究中的热点问题，国内外已有较多的关于可靠性分析及改善的相关研究。在加速寿命试验的建模分析时，很多学者忽略了试验的非完全随机化及失效机制的变化。本书针对该问题提出非线性混合模型进行加速寿命试验的建模分析，并提出新的方法以获得准确的低分位点寿命估计。针对产品可靠性改善方面的研究，多数研究者没有考虑先进的质量管理工具，如试验设计等。传统的试验设计方法所处理的响应一般为产品及过程的质量特性，并假设质量特性服从正态分布。而可靠性试验结果往往具有样本量小、包含截尾数据的特征，且寿命数据不服从正态分布，这就使得将试验设计应

用于产品可靠性改进具有极大的挑战。因此，将试验设计与可靠性结合进行研究具有重要意义。本书结合试验设计工具，建模产品的均值寿命与应力之间的关系，以改善产品的可靠性。考虑到试验的非完全随机化设计，以往的研究很少同时考虑产品的质量特征和可靠性特征的优化问题。对于同时观测到产品质量和可靠性特征的非完全随机化试验的优化问题，本书提出两种不同的方法以同时优化质量和可靠性特征。本研究对提高我国在可靠性分析及改善领域的研究水平具有重要的指导意义。

从实践上讲，通过加速寿命试验对现有产品可靠性的评估，可以及时获得产品可靠性的信息，为企业提供关于产品在正常使用条件下可靠性的相关信息，以帮助企业评估现有产品的可靠性，将产品更好的投入市场。通过试验设计方法改善产品的可靠性，第一，可以保证企业生产的产品质量满足顾客的要求；第二，高可靠性的产品可以改善企业的信誉，使企业在生产同类型产品的企业中保持较强的竞争力；第三，高可靠性的产品可以减少由于产品故障而出现的赔偿、维修、召回等的成本，提高企业的经济效益；第四，高可靠性的产品可以提高产品的安全性，降低故障的发生，保障顾客的切身利益和人身安全；第五，可以提高我国制造业的国际竞争力。本研究考虑了可靠性工程师在可靠数据分析及产品可靠性改善方面可能遇到的具体问题，提出新的方法以指导工程实践，具有重要的现实意义。

1.3 国内外研究现状

针对本书的研究内容，将围绕寿命试验的非完全随机化、加速寿命试验的建模、考虑试验设计工具的质量及可靠性改善领域国内外的研究现状进行总结分析。

1.3.1 可靠性试验非完全随机化情形下的研究

随机化是试验设计的基本原则。完全随机化(Completely Randomized Design, CRD)的假设是指每一个测试单元被随机的安排一个应力水平组

合(处理组合)。在工业试验中,由于时间和成本的约束,可靠性试验往往是非完全随机化的设计^[9]。然而,在实际的可靠性试验中,工程师通常在每个试验组中放置一些测试单元,然后对其施加特定的处理组合。在许多工业试验中,很难实现完全随机化的设计。在一个试验中有可能有不同的批次,且同一批次之间的产品寿命可能是相关的。在试验中也可能存在聚类数据,同一类别内的数据是相关的。Jones 和 Nachtsheim^[10]指出,许多工业试验都是裂区试验,然而在分析时却被错误地以完全随机化设计进行分析,实际上裂区试验由于含有随机效应,其分析比完全随机化的试验更复杂。因此,有必要将随机效应引入质量及寿命模型以包含试验工具的效应。

混合效应模型是处理含有随机效应的质量特征数据的有效方法。它可以处理同一试验组内不同观测单元之间的相关性^[11]。在响应曲面方法建模中包含随机效应对于模型拟合和最优条件确定起关键作用^[12], Khuri^[12]考虑了固化时间和温度及批次效应对镀锌钢筋的剪切强度的影响,通过线性混合效应模型将批次效应纳入模型。Valeroso 和 Khuri^[13]对随机挑选的四个果园收获的新鲜苹果的储存问题进行研究,将果园视为随机区组效应,基于线性混合模型同时优化含有随机效应的多个质量特性。当质量特征服从正态分布时,线性混合模型可以用来分析含有随机效应的试验。McCulloch 和 Searle^[14]详细描述了关于线性混合模型的建模和分析方法。有关线性混合模型更详细的描述,见参考文献[11, 15, 16]。

随着试验设计的广泛应用,工业试验中经常会遇到试验的响应是非正态的情形,如产品缺陷数(泊松分布)、产品寿命(通常服从左偏的分布)。非正态响应的试验设计受到越来越广泛的关注。线性混合模型方法适用于服从正态分布的质量特征,当质量特征非正态时,该方法则不适用。针对质量特征非正态时的试验,Robinson 等^[17]提出了考虑因子相关时的广义线性混合模型(Generalized Linear Mixed Models, GLMM)分析非完全随机化的裂区试验设计问题。Robinson 等^[18]假设裂区试验设计的响应服从伽马分布,用广义线性模型拟合响应的分布,提出了基于Bayesian的因子估计方法以分析非正态响应的裂区试验设计。Woods 和 Van de Ven^[19]基于广义估计方程模型(Generalized Estimating Equations)分析区组设计的试验。Wang 等^[20]提出一个混合效应估计方程法,通过条件二次推理函数估计固定因子效应和随机效应。以上的研究是基于响应

是非正态的情形下的分析，然而可靠性试验中，有些产品的寿命往往比较长，为了节约时间和成本，需要对数据进行截尾，这就使得通常适用于质量特征分析的方法并不能直接应用于可靠性数据的分析。

Kensler 等^[9]指出，在目前的时间和成本限制下，可靠性试验通常不是完全随机化的设计并且包含截尾数据。Freeman^[21]通过一个温度湿度箱的例子描述了非完全随机化的可靠性试验。许多可靠性试验由于子抽样、区组、聚类等试验工具的选择而不满足完全随机化的设计。当试验不满足完全随机化设计时，应考虑随机效应对可靠性数据建模和分析的影响。在可靠性数据分析中忽视了随机效应，可能会导致严重的问题。当测试组之间的变异大于测试单元之间的变异时，这种后果将非常严重。许多研究人员已经意识到在可靠性试验分析中引入随机效应的必要性。

Feiveson 和 Kulkarni^[22]通过一个具体的案例说明了可靠性数据分析中考虑随机效应的重要性。León 等^[23]提出了基于贝叶斯的马尔科夫蒙塔卡罗建模的方法，拟合加速寿命试验中的随机效应。研究结果表明，忽略了随机效应可能会误导数据分析的结果。León 等^[24]通过仿真试验说明忽略批次效应将会误导试验的结论。考虑到居住在同一个地理区域（社区）中的女性的居住环境相同，Mahmood 等^[25]假设同一个地理区域中女性的生育间隔是相关的，基于异质性模型分析根据地理区域聚类的生育间隔数据。结果表明，忽略同一聚类之间的相关性将可能会导致错误的参数估计和标准误差估计。Freeman 和 Vining^[26]通过两阶段方法，将子抽样的随机效应引入失效时间模型，在分析中区分了试验单元和观测单元之间的差异。相比于传统的可靠性分析方法，该方法正确的估计了试验误差。Kensler 等^[9]同时将子抽样和区组效应引入两阶段方法进行建模分析。Xiao 和 Tang^[27]针对子抽样数据，提出一种综合考虑异质性 (frailty) 思想和多重数据填充技术的方法分析可靠性数据，通过仿真试验和案例分析进一步阐述了 Freeman 和 Vining^[26]关于将试验设计工具与可靠性分析相结合的提议。对于工程师来所，两阶段方法简单易行，可以通过基本的统计软件（如 Minitab、JMP 等）实现。然而，两阶段方法不能提供一个联合的似然函数，从而无法计算分位数的置信区间。Freeman^[28]通过仿真试验发现，两阶段法得到的统计量偏差过大，只有当每组的样品个数在 20 以上时，才能忽略统计量的偏差。基于此，Freeman 和 Vining^[29]提出了一种非线性混合模型 (Nonlinear Minxed Model, NLMM) 的方法，

分析非完全随机化的可靠性试验。与两阶段方法和传统模型相比,非线性混合模型对威布尔分布形状参数的估计偏倚最小,且对模型的误判和随机效应方差的增加表现得更稳健。Kensler 等^[30]同时考虑子抽样和区组效应,建立非线性混合模型,通过电池寿命的试验说明该方法的应用。针对两阶段方法第一阶段中极大似然估计参数值的偏差,Wang 等^[31]提出了无偏因子方法,对威布尔分布的形状参数和尺度参数进行纠偏。Wang 等^[32]基于无偏因子方法,对 Freeman 和 Vining^[26]的两阶段方法进行改进,分析含有子抽样的寿命数据。Seo 和 Pan^[33]提出广义线性混合模型的方法,分析非完全随机化的步进应力加速寿命试验,并将该方法应用于实际数据,结果表明忽略步进应力加速寿命试验中的试验工具的选择可能会导致应力效应估计值较大的偏差。因此,对于非完全随机化的可靠性试验,在分析中应考虑随机效应对模型的影响。

1.3.2 加速寿命试验建模的研究

企业为了保持较高的竞争优势,往往会竭尽全力提高产品的可靠性,从而使得产品具有更长的寿命。然而,在正常的试验条件下,可靠性试验往往需要几个月乃至更长的时间。为了节约试验的时间及成本,一般会采用增加应力的方法加速产品失效以获得充足的可靠性数据,即加速寿命试验。加速寿命试验是通过建立高应力条件下产品寿命数据的统计模型,外推出正常应力下产品的可靠性信息。基于加速寿命试验分析产品可靠性信息具有重要的研究意义。

国外对于加速寿命试验统计分析的研究始于 20 世纪 60 年代。20 世纪 70 年代初,加速寿命试验技术进入我国,引起了相关领域学者的关注。Meeker 和 Escobar^[34, 35]以及 Nelson^[36]描述了加速寿命试验建模和分析的基本理论、方法及一些实例。Nelson^[37, 38]描述了截至 2005 年关于加速寿命试验计划的相关文献研究。Escobar 和 Meeker^[39]详细的综述了关于加速寿命试验建模和数据分析的方法。Collins 等^[40]综述了几种常用的加速模型。国内的张春华等^[41]针对恒定应力试验、步进应力试验、序进应力试验及加速寿命试验优化设计等相关研究进行了概述。黄婷婷和姜同敏^[42]综述了加速寿命试验相关的统计加速模型。

大多数关于加速寿命试验统计分析的研究假设寿命数据服从常见的