无失效数据的可靠性分析

RELIABILITY ANALYSIS OF ZERO-FAILURE DATA

韩 明 著

中国统计出版社

无失效数据的可靠性分析

全国统计科学研究(计划)重点项目
宁波大学二十一世纪人才基金资助项目

无失效数据的可靠性分析

RELIABILITY ANALYSIS OF
ZERO-FAILURE DATA

韩 明 著

中國统计出版社

（京）新登字 041 号

图书在版编目(CIP)数据

无失效数据的可靠性分析/韩明著. 一北京：中国统计出版社，1999. 4

ISBN 7-5037-2897-3

Ⅰ. 无…

Ⅱ. 韩…

Ⅲ. 数据，无失效-可靠性-统计分析(数学)

Ⅳ. O212.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(98)第 39424 号

中国统计出版社出版

（北京三里河月坛南街 75 号　100826）

新华书店经销

科伦克三莱印务有限公司印刷

*

850×1168 毫米　32 开本 8.375 印张　20 万字

1999 年 4 月第 1 版　1999 年 4 月北京第 1 次印刷

印数 1　3000

*

定价　22.00 元

序

韩明同志所著《无失效数据的可靠性分析》是论述无失效数据条件下进行可靠性分析的理论和方法的一本学术专著。

在对产品的可靠性进行检验和分析时，常使用定时截尾试验方法。在定时截尾试验中，有时出现所有试样无一失效的情况，这时我们得到的是“无失效数据”。如何对无失效数据进行统计分析，是一个特殊的、有较大难度的问题。随着科学技术的进步，高可靠性产品迅速发展，加上样本容量小、试验时间不允许很长等原因，无失效数据越来越频繁地出现。因此，寻找在无失效数据条件下进行科学、有效的可靠性分析方法，现已成为可靠性分析的一个新的十分重要的领域。

目前，国内外在无失效数据方面的文献资料还较少，特别是迄今还没有一本这一领域的专著。韩明同志所写的这本书，系统地介绍和论述了国内外学者在这一领域所做的工作和成果，本书的出版将填补这一领域国内外没有研究专著的空白，将对统计学和可靠性理论及应用起到很好的促进作用。本书取材丰富，叙述细致严密，并收集了大量数值例子，为本领域的研究人员、实际工作者以及研究生、大学生提供了一本有价值的教材或参考书。

韩明同志近十年来对无失效数据的可靠性分析进行了深入的研究，取得了一系列重要的成果。特别是在无失效数据可靠性分析中应

用 Bayes 方法和多层 Bayes 方法，以及在无失效数据的可靠性分析中引进失效信息等方面，做出了许多独创性的工作。这些工作成果构成了本书的一个有特色的方面。作为一位青年学者，我们期望他在这一领域作出更大的贡献。

赵仁杰　谨识

1998 年 9 月 10 日

前言

一　问题的提出

在可靠性试验中，获得的数据常是各种截尾数据。在定时截尾试验中，如果失效(或故障)数大于零，对由这种试验方式获得的数据(称为有失效数据)进行可靠性分析已有比较成熟的方法。但随着科学技术的进步，产品的质量不断提高，产品的寿命越来越长，由定时截尾试验获得的数据有时是“无失效数据”(Zero-failure data)，即在规定的试验时间内没观察到产品失效。在无失效情况下如何对产品进行可靠性分析，对于建立在失效数据分析基础上的现有可靠性理论来说，是一个有一定难度的问题。

第四届全国可靠性数学学术会议纪要中指出：“可靠性的研究领域不断扩大，特别是以往比较薄弱和空白的领域有了新的进展，如软件可靠性，…，贮存可靠性和无失效数据的分析等等，都有一批论文出现。”随着科学技术的进步，高可靠性产品迅速发展，对无失效数据问题研究的需要也日益迫切起来了，这项工作具有理论和实际应用价值。

对无失效数据的研究是一个新问题，目前国外的文献很少(茆诗松、罗朝斌(1989))。国内的一些学者认为关于无失效数据的研究国外尚未见到充分的文献，如张忠占、杨振海(1989)，殷弘、杨瑛、丁邦俊、郑祖康(1996)等。确实，国外研究无失效数据问题的文献不多。

研究无失效数据问题最早的文献，在国外要算 Martz 和 Weller (1979)，在国内要算茆诗松、罗朝斌(1989)，张忠占、杨振海(1989)。

关于无失效数据可靠性的若干研究进展情况，见韩明(1993)。

二 本书的主要内容

本书主要包括三部分内容：第一部分——无失效数据的参数估计，由七章组成，即第一章，无失效数据的参数估计；第二章，指数分布；第三章，Weibull 分布；第四章，正态分布和对数正态分布；第五章，双参数指数分布；第六章，极值分布；第七章，二项分布——非参数方法。第二部分——无失效抽样检验，由一章组成，即第八章，无失效抽样检验方法。第三部分——与无失效数据有关的问题，由二章组成，即第九章，“倒挂”数据与无失效数据的综合处理；第十章，退化失效模型。

三 本书的主要特色

本书首次系统地介绍了无失效数据可靠性问题的研究情况，填补了在该领域国内外没有研究专著的空白，在介绍理论和方法的同时还兼顾了实际应用。

本书试图采用数理统计中的经典方法、Bayes 方法和多层 Bayes 方法，来处理无失效数据的可靠性问题。

四 本书的读者对象

本书可作为有关专业研究生和高年级大学生的教材或教学参考书，也可供有关专业的教师和工程技术人员参考。

本书是作者在宁波大学为历届学生开设的选修课、讨论班的讲义基础上，经过数次补充、修改而成的。

本书是全国统计科学研究(计划)重点项目、宁波大学二十一世纪人才基金资助项目。部分内容是浙江省教委基金、宁波大学基金资助项目的研究成果。

赵仁杰教授、魏振军副教授对本书的全部内容进行了仔细地审

阅，并提出了一些中肯的建议，赵仁杰教授还亲自为本书作序，在此作者一并表示衷心地感谢。作者还要感谢曹晋华教授、王静龙教授、龚平教授、赵仁杰教授、魏振军副教授对作者多年来的指导和帮助，特别是对作者在写作本书过程中的指导和鼓励。

由于作者水平有限，错误和不妥之处，恳请批评指正。

韩　明

1998 年 11 月 29 日

于宁波大学

目　录

第一章
无失效数据的参数估计

在定时截尾试验中，设产品寿命 T 的分布函数为 $F(t,\theta)$，$\theta\in\Theta$ 为未知参数，Θ 为参数空间，截尾时间分别为 $t_1,t_2,\cdots,t_m(t_1<t_2<\cdots<t_m)$，在 $t_i(i=1,2,\cdots,m)$ 处共试验 n_i 个样品，若结果所有样品无一失效（即这 n_i 个样品的寿命均大于 t_i），则称这类数据为无失效数据（或无故障数据，或零失效数据）(Zero-FailureData)，记作 (t_i,n_i)，$i=1,2,\cdots,m$。

试验提供的信息可概况为：

①产品寿命 T 的分布函数为 $F(t,\theta)$，简记作 $F(t)$。

②$t=0$ 时其失效概率 $p_0=P\{T<0\}=0$（或近似为零）。

③记 $s_i=n_i+\cdots+n_m$，它表示在 t_i 时刻处有 s_i 个样品还未失效，即有 s_i 个样品的寿命大于 t_i。

④$0<t_1<t_2<\cdots<t_m$，在 t_i 时刻的失效概率记为 $p_i=P\{T<t_i\}$，则 $p_0<p_1<\cdots<p_m$。

现在的问题是：如何利用无失效数据 (t_i,n_i) 和上述信息估计参数 θ 以及各种可靠性指标，这就是所谓的无失效数据的参数估计问题。

本章将给出一些有代表性的方法和结果，它们在一些常见的寿命分布无失效数据的参数估计中都可以使用。至于一些只适用于个别寿命分布的方法和结果，将在以后各章中按寿命分布类型分别讨论。

本章以下分为三节，分别用经典方法、Bayes 方法以及多层 Bayes 方法介绍无失效数据的参数估计。

1.1 经典方法

作为经典方法，这里主要介绍的是：配分布曲线法、极小 χ^2-法、等效失效数法、MLR 分布族可靠度的下限、最优置信限法、修正似然函数法、改造 CLASS-K 法、广义线性模型法等。

1.1.1 配分布曲线法

茆诗松、罗朝斌(1989)提出了配分布曲线法，其基本思想是先估计失效概率，然后用最小二乘法给出分布参数的估计，最后给出可靠度的估计。其具体步骤如下：

①首先在截尾时间 t_i 处($i=1,2,\cdots,m$)获得失效概率 $p_i=P\{T<t_i\}$ 的估计 $\hat{p}_i$，其中 T 为产品的寿命。

②通过诸点$(t_i,\hat{p}_i)(i=1,2,\cdots,m)$配一条分布曲线。这相当于在分布曲线族中选一条曲线最靠近诸点$(t_i,\hat{p}_i)$，这里靠近的标准选用最小二乘法的标准。

③最后由确定下来的分布曲线求得可靠度的估计。

其中关键是①，即如何估计失效概率 $p_i(i=1,2,\cdots,m)$。

以下给出 p_i 的经典估计(茆诗松、罗朝斌(1989))。

设$(t_i,n_i,)$是一组无失效数据($i=1,2,\cdots,m$)，假设有 n 个产品参加定时截尾试验，其中有 r 个产品在截尾时间 t 之前失效，而 $n-r$ 个产品在 t 时刻没有失效。若记 t_r 为第 r 个产品的失效时间，t_{r+1} 为在 t 后第一个失效产品的失效时间，显然有 $t_r<t<t_{r+1}$，假设产品的寿命 T 的分布函数 $F(t)$是连续的，则有 $F(t_r)<F(t)<F(t_{r+1})$。

由于 $F(t_r)$和 $F(t_{r+1})$可看作来自$[0,1]$上的均匀分布的样本的第 r 个和第 $r+1$ 个顺序统计量，它们的数学期望分别为 $E[F(t_r)]=r/(n+1)$和 $E[F(t_{r+1})]=(r+1)/(n+1)$。常用 $r/(n+1)$去估计 $F(t_r)$，用$(r+1)/(n+1)$去估计 $F(t_{r+1})$。而对 $F(t)$，若用 $r/(n+1)$去