

现代数学基础丛书

162

现代测量误差模型

李高荣 张君 冯三营 著



科学出版社

“十二五”国家重点图书出版规划项目

现代数学基础丛书 162

现代测量误差模型

李高荣 张 君 冯三营 著



科学出版社

北京

内 容 简 介

现代测量误差模型是统计学热门研究课题之一,并在生物学、医学、传染病学、森林、经济学、金融学和遥感等领域有着广泛的应用.本书主要研究两种测量误差类型:可加测量误差和扭曲测量误差.全书共分8章内容,主要阐述这两种测量误差的线性模型、非线性模型、部分线性模型、变系数模型、单指标模型和部分线性单指标模型、降维模型的估计和统计推断方法,除了介绍这些模型的发展动态,也详细介绍相关研究的一些最新的研究成果,使读者对测量误差模型的方法和统计思想有一个较为全面的了解,并起到抛砖引玉的作用.

本书主要适用于理工院校数理统计、数学和计量经济学专业的研究生、高年级大学生、教师、一般科学技术人员阅读;另外,本书可供各行各业应用统计科学工作者和医学、生物学、经济学、金融学、社会学、心理学和工业工程等专业人士参考.

图书在版编目(CIP)数据

现代测量误差模型/李高荣,张君,冯三营著. —北京:科学出版社,2016.3
(现代数学基础丛书)

ISBN 978-7-03-047868-9

I. ①现… II. ①李… ②张… ③冯… III. ①测量误差 IV. ①P207

中国版本图书馆CIP数据核字(2016)第058800号

责任编辑:王丽平/责任校对:彭涛
责任印制:张伟/封面设计:陈敬

科学出版社 出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

北京中石油彩色印刷有限责任公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2016年3月第 一 版 开本:720×1000 1/16

2016年3月第一次印刷 印张:23 1/2

字数:440 000

定价:138.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

《现代数学基础丛书》编委会

主 编：杨 乐

副主编：姜伯驹 李大潜 马志明

编 委：（以姓氏笔画为序）

王启华 王诗晟 冯克勤 朱熹平

严加安 张伟平 张继平 陈木法

陈志明 陈叔平 洪家兴 袁亚湘

葛力明 程崇庆

作者简介

李高荣 北京工业大学统计学教授, 博士生导师, 2007 年于北京工业大学获博士学位, 2007 年 8 月到 2009 年 6 月在华东师范大学金融与统计学院从事博士后研究工作, 2009 年 7 月到北京工业大学工作. 目前担任全国工业统计学教学研究会常务理事、中国现场统计研究会高维数据统计分会理事、生存分析分会副秘书长、北京应用统计学会常务理事、美国数学评论评论员及众多国内外统计学术期刊的审稿专家. 主要研究方向是非参数统计、经验似然、变量选择、复杂高维数据分析等. 迄今为止, 在科学出版社出版过专著《纵向数据半参数模型》, 发表学术论文 60 余篇, 其中有 40 多篇被 SCI 和 EI 收录. 2010 年入选北京市属高等学校人才强教深化计划“中青年骨干人才培养计划”和“北京市优秀人才培养资助计划”, 2012 年破格评为北京工业大学“京华人才”.

张君 深圳大学统计学讲师, 硕士生导师, 香港浸会大学和深圳大学联合培养博士生项目合作导师, 2012 年于华东师范大学获博士学位, 2012 年 9 月到深圳大学数学与统计学院工作, 现任深圳大学统计科学研究所所长助理. 目前担任广东省现场统计学会理事、中国现场统计研究会高维数据统计分会理事、美国数学评论评论员及众多国内外统计学术期刊的审稿专家. 主要研究方向是非参数统计、降维、变量选择和测量误差数据分析等. 主持和参与了国家自然科学基金、天元基金等国家和省部级科研项目 7 项, 发表 SCI 学术论文 20 多篇. 2014 年入选深圳市海外高层次人才“孔雀计划”(C 类), 2015 年入选深圳大学优秀青年教师培养计划.

冯三营 郑州大学数学与统计学院讲师, 硕士生导师, 美国数学评论评论员. 2004 年毕业于郑州大学获学士学位, 2007 年毕业于北京工业大学获硕士学位, 2015 年毕业于北京工业大学获统计学博士学位. 2015 年获北京市优秀毕业生和北京工业大学“十佳毕业生”称号, 荣获北京工业大学优秀博士学位论文. 主要研究方向是非参数统计、经验似然、测量误差、变量选择和函数型数据分析等. 主持和参与了国家自然科学基金、国家社科基金等国家和省部级科研项目 8 项, 在国内外学术期刊发表学术论文 30 余篇, 其中 15 篇被 SCI 和 SSCI 收录.

《现代数学基础丛书》序

对于数学研究与培养青年数学人才而言，书籍与期刊起着特殊重要的作用。许多成就卓越的数学家在青年时代都曾钻研或参考过一些优秀书籍，从中汲取营养，获得教益。

20世纪70年代后期，我国的数学研究与数学书刊的出版由于文化大革命的浩劫已经破坏与中断了10余年，而在这期间国际上数学研究却在迅猛地发展着。1978年以后，我国青年学子重新获得了学习、钻研与深造的机会。当时他们的参考书籍大多还是50年代甚至更早期的著述。据此，科学出版社陆续推出了多套数学丛书，其中《纯粹数学与应用数学专著》丛书与《现代数学基础丛书》更为突出，前者出版约40卷，后者则逾80卷。它们质量甚高，影响颇大，对我国数学研究、交流与人才培养发挥了显著效用。

《现代数学基础丛书》的宗旨是面向大学数学专业的高年级学生、研究生以及青年学者，针对一些重要的数学领域与研究方向，作较系统的介绍。既注意该领域的基础知识，又反映其新发展，力求深入浅出，简明扼要，注重创新。

近年来，数学在各门科学、高新技术、经济、管理等方面取得了更加广泛与深入的应用，还形成了一些交叉学科。我们希望这套丛书的内容由基础数学拓展到应用数学、计算数学以及数学交叉学科各个领域。

这套丛书得到了许多数学家长期的大力支持，编辑人员也为其付出了艰辛的劳动。它获得了广大读者的喜爱。我们诚挚地希望大家更加关心与支持它的发展，使它越办越好，为我国数学研究与教育水平的进一步提高做出贡献。

杨 乐

2003年8月

序 一

在工程、生物、医学、传染病学、经济、金融、社会和遥感等各个领域,人们不管用何种方式收集数据,不可避免会收集到测量误差数据,但是在进行数据分析时往往会忽略测量误差的影响,导致分析结果不准确或存在较大的偏差. 19世纪70年代,统计学家对测量误差数据分析提出线性测量误差模型以来,测量误差模型的研究已经取得了非常丰富的研究成果. 但是目前国内外有关测量误差模型的专著主要是以参数测量误差模型为主,而对于非参数或半参数测量误差模型的研究,目前还缺乏这方面的总结性工作,特别是近几年提出的扭曲测量误差的协变量调整模型. 《现代测量误差模型》这本专著以可加测量误差数据和扭曲测量误差数据为背景,系统介绍在这两种测量误差数据下测量误差模型的估计和统计推断方法,以及理论结果.

该书第一作者李高荣教授是具有一定学术造诣的青年统计学者,近十年来一直致力于非参数统计和数据分析方面的研究,取得了一系列创新性成果. 第二作者张君博士一直从事具有扭曲测量误差数据的协变量调整模型的研究,在该领域取得了可喜的研究成果. 作者以自己多年的研究工作为基础,并参考国内外的有关文献和新进展,系统地总结测量误差模型研究的思想、方法和理论结果,集中体现近年来在这方面的研究成果和所形成的理论体系,丰富测量误差模型的研究内容,具有重要的理论和应用价值. 该书有以下特色:

(1) 内容取材先进,反映了国内外测量误差模型研究的最新成果,重点突出了测量误差模型研究的思想和方法,以及理论结果;

(2) 撰写和阐述具有科学性,理论性强,结构清晰严谨,思想、方法、算法、定理、模拟研究和实例分析完整充实;

(3) 著作具有广泛的适应性,不仅适用于理工科院校数理统计、数学和计量经济学专业的学生和教师,还适用于数据分析的实际工作者;

(4) 著作撰写规范、文笔流畅、言简意赅、图表清晰.

因此,该著作具有很高的学术水平,是一部优秀的学术专著,将为促进统计学的发展发挥重要作用.

王启华

中国科学院数学与系统科学研究院

2015年10月18日

序 二

在一年多前就听李高荣教授讲他正在组织撰写一本关于半参数测量误差模型的专著,当时就很期待这部专著的出版.首先,国内目前还没有一本专门介绍测量误差模型的专著,其次,测量误差是实际问题中常见的一种数据类型,在工程、生物、医学、经济和金融等各个领域普遍存在,而对测量误差模型的研究也一直是统计学科研究人员和数据分析工作者特别关心的问题.现在由衷地高兴,李高荣、张君和冯三营高质量地完成了《现代测量误差模型》这部专著,倾注了他们大量的辛勤劳动和心血.

全书共有 8 章内容,介绍了可加测量误差数据和扭曲测量误差数据下线性测量误差模型、非线性测量误差模型、部分线性测量误差模型、变系数测量误差模型、单指标测量误差模型、协变量调整模型和测量误差降维模型的估计和统计推断方法.该书的一个显著优点是收集材料多,内容丰富,结构合理,除了介绍传统可加测量误差模型的统计思想和方法外,还系统介绍了 2005 年发展起来的协变量调整模型的方法和理论,以及测量误差模型的估计、假设检验、变量选择和降维等方法.尽管该书的内容较广,但是作者对每种方法的阐述却是重点突出,系统性强.作者按照模型的类型这一主线介绍统计思想、方法和理论,这又是该书的一大优点.该书除了注重统计思想、方法和理论,更加重视在统计学上的应用,以及实际数据的分析,这是本书的一个特色.因此,该书既适用于数理统计的教师和研究生,也适用于从事数据分析的工作者.

该书三位作者一直从事非参数统计与数据分析的科研工作,对测量误差模型的研究取得了创新性的成果.该书以他们多年的研究工作为基础,凝练相关文献的精华和最新进展,突出了该书的特色和优点,相信本书会成为一本相当有参考价值的参考读物.更为重要的是,该书系统总结了近几年测量误差模型所取得的研究成果,具有一定的学术价值.

三位青年学者能够静下心来,埋头完成这样一本学术专著,实属不易.感谢他们对统计学科发展做出的贡献.

薛留根

北京工业大学应用数理学院

2015 年 10 月 20 日

前 言

测量误差数据不可避免地存在于实际问题的研究中, 而把带有测量误差数据所建立的模型称为测量误差回归模型, 该类模型存在于许多领域, 如生物学、医学、传染病学、森林、经济学、金融学和遥感等领域. 如果忽略测量误差的影响, 将导致统计推断结果不准确或存在一定的偏差. 但是统计学者和实际工作者在对测量误差数据进行统计推断和分析时, 仍然希望能够正确分析变量之间的关系, 从而进行有效的统计推断和统计预测等. 因此, 越来越多的统计学家和实际工作者认识到处理测量误差的重要性和必要性. 在测量误差模型方面已有不少文献讨论, 如 Fuller (1987) 对线性测量误差模型的研究做了概括和总结, Carroll 等 (1995) 对非线性测量误差模型的研究做了详细的讨论. 本书目的是系统介绍近几年半参数测量误差模型的研究方法和理论结果, 使读者对测量误差领域有更深入的了解.

本书主要考虑两种测量误差数据: 可加测量误差数据和扭曲测量误差数据, 介绍在这两种测量误差数据下线性测量误差模型、非线性测量误差模型、部分线性测量误差模型、变系数测量误差模型、单指标测量误差模型、协变量调整模型和测量误差降维模型的估计和统计推断方法. 本书除了介绍这些测量误差模型的发展动态和一些已取得的研究成果外, 也详细介绍了有关它们研究的一些最新的研究成果, 让读者对测量误差模型的方法和统计思想有一个较为全面的了解和认识. 本书的一个特点是只介绍各种测量误差模型的统计方法和统计思想, 书中给出的理论结果没有给详细的证明过程, 感兴趣的读者可参考相关的参考文献. 本书的每章内容自成体系, 读者可选择感兴趣的章节阅读.

全书分为 8 章. 第 1 章绪论, 主要介绍一些预备知识, 主要内容包括: 回归模型介绍, 非参数光滑方法, 经验似然方法, bootstrap 方法, 变量选择方法等. 此外, 以一元线性测量误差模型和非参数测量误差模型为例, 介绍一些本书中涉及的估计方法, 让读者了解研究测量误差模型的必要性和重要性. 最后对扭曲测量误差数据和协变量调整回归模型做了简单介绍. 第 2 章针对线性可加测量误差模型和协变量调整线性回归模型, 讨论两种测量误差模型的估计方法和理论结果. 第 3 章考虑非线性测量误差模型和非线性半参数测量误差模型的统计推断问题, 介绍这两种模型的估计方法和理论结果. 第 4 章讨论多元混淆变量情形下的协变量调整线性模型和非线性模型, 为了避免“维数祸根”问题, 本章把多元混淆变量的失真函数建模为单指标模型或可加模型, 发展估计方法并研究模型中参数的估计和统计推断问题, 建立估计量和检验统计量的渐近性质. 第 5 章讨论两种测量误差的部分线性模型:

部分线性 EV 模型和协变量调整部分线性模型. 研究这两种模型的估计方法, 经验似然和变量选择, 以及所得估计量的渐近结果. 第 6 章考虑变系数测量误差模型和部分线性变系数测量误差模型的估计方法、变量选择和统计推断问题, 并研究估计量和检验统计量的渐近性质. 第 7 章针对单指标模型和部分线性单指标模型, 在可加测量误差和受失真函数污染后的测量误差两种情况下, 讨论模型中参数和非参数分量的估计方法和理论结果. 第 8 章首先介绍几种经典的充分降维方法, 并讨论结构维数的选取问题. 然后针对可加测量误差降维模型和协变量调整降维模型讨论了充分降维方法及其相关理论.

本书第 1 章、第 2 章、第 5 章 (除 5.6 节的内容)、第 6 章 6.5.2 节和第 7 章 7.2 节由李高荣负责撰写, 第 4 章、第 5 章 5.6 节、第 7 章 (除 7.2 节的内容) 和第 8 章由深圳大学数学与统计学院张君负责撰写, 第 3 章和第 6 章 (除 6.5.2 节的内容) 由郑州大学数学与统计学院冯三营负责撰写. 李高荣制定了全书的结构和框架, 对全书的内容进行了认真的修改和校对, 最后对全书进行了定稿.

本书的完成得到了国家自然科学基金 (11471029, 11401391, 11501522)、北京市自然科学基金 (1142002), 北京市教育委员会科技计划面上项目 (KM201410005010) 和北京工业大学北京科学与工程计算研究院开放基金资助项目的支持, 还特别得到了北京工业大学京华人才支持计划项目 (2013-JH-L07) 对本书的资助, 作者谨在此表示感谢.

感谢我的家人和爱女李睿菡这些年对我科研工作的支持, 让我有足够的时间和精力完成本书的部分撰写工作和全书的修改. 特别感谢张君和冯三营, 在我的要求下参与本书的撰写工作. 他们的加入使得本书的内容更加完善, 并保证本书能够按时顺利完成, 同时也感谢他们家人对他们科研工作的支持. 最后感谢我的导师薛留根教授多年来对我的关心和支持, 也感谢北京工业大学应用数理学院和北京科学与工程计算研究院支持和帮助我的各位同事. 在本书的出版过程中, 得到了科学出版社领导和王丽平等编辑的支持和帮助, 在此一并表示感谢.

由于作者知识和能力有限, 书中内容难免有许多不足之处, 还恳请各位专家和同行及实际应用者多提宝贵意见, 敬请有关专家与广大读者批评指正.

李高荣

北京工业大学北京科学与工程计算研究院

2015 年 10 月

符号表

\mathbb{R}	实数集合
\mathbb{R}^p	p 维 Euclidean 空间
$\ \cdot\ $	Euclidean 模
i.i.d.	独立同分布
$=:$	“定义为”或“记为”
T	向量或矩阵的转置
$\text{tr}(A)$	矩阵 A 的迹
$A \otimes B$	矩阵 A 和 B 的 Kronecker 乘积
$A^{\otimes 2}$	AA^T
$\text{mineig}(A)$	矩阵 A 的最小特征值
$\text{diag}(a_1, \dots, a_n)$	由元素 a_1, \dots, a_n 组成的对角矩阵
$A_{(i,j)}$	矩阵 A 的第 (i, j) 个位置上的元素
\xrightarrow{L}	依分布收敛
\xrightarrow{P}	依概率收敛
a.s.	几乎处处收敛, 或者依概率 1 强收敛
$y = O(1)$	y 是有界变量
$y = o(1)$	y 是无穷小量
$\xi_n = o_P(\eta_n)$	对任一 $\epsilon > 0$, 有 $P\{\ \xi_n\ \geq \epsilon\ \eta_n\ \} \rightarrow 0$
$\xi_n = o_P(1)$	ξ_n 依概率收敛到 0
$\xi_n = O_P(1)$	ξ_n 依概率有界
$K(\cdot)$	核函数
h 和 h_n	窗宽
$N(\mu, \Sigma)$	均值为 μ , 协方差阵为 Σ 的正态分布
χ_p^2	自由度为 p 的 χ^2 分布
$t(n)$	自由度为 n 的 t 分布
$\ \cdot\ _p$	p 范数
$\text{sgn}(t) = I(t > 0) - I(t < 0)$	符号函数
\perp	表示独立
$\ g\ _\infty$	对于任意的函数 $g(u)$, 定义 $\ g\ _\infty = \sup_{u \in [0,1]} g(u) $
$\ A\ _F$	表示矩阵 A 的 Frobenius 范数

目 录

丛书序

序一

序二

前言

符号表

第 1 章	绪论	1
1.1	回归模型介绍	1
1.1.1	参数回归模型	1
1.1.2	非参数模型	2
1.1.3	半参数模型	2
1.1.4	变系数模型	3
1.1.5	单指标模型	3
1.2	非参数光滑方法	4
1.2.1	N-W 核光滑方法	4
1.2.2	Gasser-Müller 光滑方法	8
1.2.3	局部多项式光滑方法	9
1.3	经验似然	13
1.3.1	经验似然的思想	13
1.3.2	经验似然的若干应用	15
1.4	Bootstrap 方法	18
1.5	变量选择方法	19
1.6	测量误差模型的估计方法	22
1.6.1	测量误差介绍	22
1.6.2	校正的估计方法	22
1.6.3	SIMEX 方法	24
1.6.4	逆卷积方法	26
1.7	扭曲测量误差数据	28
第 2 章	线性测量误差模型	30
2.1	引言	30
2.1.1	线性测量误差模型介绍	30

2.1.2	广义线性测量误差模型介绍	31
2.1.3	协变量调整线性回归模型介绍	32
2.1.4	本章结构	33
2.2	线性测量误差模型的估计方法	34
2.2.1	校正的估计方法	34
2.2.2	M 估计方法	35
2.2.3	SIMEX 估计方法	36
2.3	响应变量缺失的线性测量误差模型	37
2.3.1	回归系数的经验似然	37
2.3.2	响应均值的经验似然	41
2.3.3	模拟研究	43
2.4	广义线性测量误差模型的纠偏经验似然方法	45
2.4.1	纠偏经验似然方法和主要结果	46
2.4.2	偏 profile 经验似然方法	50
2.4.3	模拟研究	51
2.5	协变量调整回归模型的估计方法	56
2.5.1	binning 方法	56
2.5.2	最近邻 binning 方法	58
2.5.3	局部线性估计方法	59
2.5.4	直接估计方法	60
2.6	置信区间	63
2.6.1	渐近正态近似方法	63
2.6.2	Bootstrap 重抽样近似方法	64
2.6.3	经验似然方法	65
2.7	协变量调整回归模型的变量选择	67
2.7.1	估计方法	67
2.7.2	渐近性质	68
2.7.3	算法和 λ 的选取	71
2.7.4	模拟研究和实际数据分析	73
2.8	模型检验	77
2.8.1	引言	77
2.8.2	检验统计量及其讨论	78
2.8.3	Bootstrap 方法	81
2.8.4	模拟研究	82

第 3 章 非线性测量误差模型	84
3.1 引言	84
3.1.1 非线性测量误差模型介绍	84
3.1.2 非线性半参数测量误差模型介绍	85
3.2 非线性测量误差模型的估计方法	86
3.2.1 最小距离估计方法	86
3.2.2 调整的最小二乘估计	88
3.2.3 SIMEX 估计方法	89
3.2.4 工具变量方法	90
3.3 非线性测量误差模型的经验似然推断	91
3.3.1 经验似然方法	91
3.3.2 基于模拟的经验似然方法	94
3.3.3 模拟研究	96
3.4 非线性半参数 EV 模型的 profile 最小二乘估计	97
3.4.1 估计方法	97
3.4.2 条件和渐近性质	99
3.4.3 模拟研究	101
3.5 非线性半参数 EV 模型的经验似然推断	103
3.5.1 方法与主要结果	104
3.5.2 模拟研究	106
第 4 章 多元协变量调整模型	108
4.1 单指标协变量调整线性模型	108
4.1.1 引言和模型介绍	108
4.1.2 最小二乘估计方法	109
4.1.3 “去一分量”最小二乘估计方法	110
4.1.4 模拟研究	114
4.2 单指标协变量调整非线性模型	115
4.2.1 模型介绍	115
4.2.2 指标参数 θ 的估计	116
4.2.3 参数 β 的估计	117
4.2.4 条件和渐近性质	118
4.2.5 经验似然置信域	120
4.2.6 模拟研究	121
4.2.7 实例分析	124
4.3 可加协变量调整非线性模型	126

4.3.1	模型介绍	126
4.3.2	估计方法和渐近性质	127
4.3.3	经验似然置信域	130
4.3.4	模型检验	131
4.3.5	模拟研究	132
4.3.6	实际数据分析	134
第 5 章	部分线性测量误差模型	137
5.1	引言	137
5.1.1	部分线性模型介绍及研究现状	137
5.1.2	部分线性可加测量误差模型	140
5.2	校正的估计方法	141
5.2.1	参数部分带有测量误差情况	141
5.2.2	非参数部分带有测量误差情况	144
5.2.3	参数和非参数部分都带有测量误差情况	146
5.3	经验似然方法	148
5.3.1	引言	148
5.3.2	经验似然方法和渐近性质	149
5.3.3	模拟研究	153
5.4	两种变量选择方法	155
5.4.1	校正的惩罚最小二乘法	156
5.4.2	惩罚分位数回归	158
5.4.3	估计方法的实施	160
5.5	协变量调整部分线性模型的变量选择	163
5.5.1	模型介绍	163
5.5.2	变量选择方法	165
5.5.3	渐近性质	166
5.5.4	模拟研究和实际数据分析	169
5.6	协变量调整部分线性模型的约束估计和检验	173
5.6.1	改进的约束估计和渐近性质	173
5.6.2	假设检验	177
5.6.3	数值模拟	180
第 6 章	变系数测量误差模型	184
6.1	引言	184
6.1.1	变系数模型及研究现状	184
6.1.2	部分线性变系数模型及研究现状	185

6.2	变系数测量误差模型的局部偏差校正统计推断	186
6.2.1	局部偏差校正估计	187
6.2.2	局部纠偏经验似然	190
6.3	变系数测量误差模型的变量选择	193
6.3.1	估计方法	193
6.3.2	算法	194
6.4	部分线性变系数测量误差模型的经验似然统计推断	195
6.4.1	参数部分协变量带有测量误差的情形	195
6.4.2	非参数部分协变量带有测量误差的情形	198
6.4.3	模拟研究	201
6.5	部分线性变系数测量误差模型的约束统计推断	204
6.5.1	引言	204
6.5.2	参数部分协变量带有测量误差的情形	204
6.5.3	非参数部分协变量带有测量误差的情形	208
6.5.4	模拟研究	211
6.5.5	实例分析	218
6.6	部分线性变系数测量误差模型的变量选择	221
6.6.1	引言	221
6.6.2	估计方法	222
6.6.3	算法	223
第 7 章	单指标测量误差模型	225
7.1	引言	225
7.1.1	部分线性单指标模型及研究现状	225
7.1.2	MAVE 方法	227
7.1.3	降维方法	230
7.2	单指标测量误差模型的 SIMEX 估计	232
7.2.1	模型介绍	232
7.2.2	SIMEX 估计程序	232
7.2.3	渐近性质	235
7.2.4	模拟研究和实际数据分析	237
7.3	部分线性单指标 EV 模型	240
7.3.1	两阶段估计方法	241
7.3.2	修正的拟似然估计方法	244
7.3.3	经验似然方法	246
7.4	部分线性单指标协变量调整模型	249

7.4.1	模型介绍	249
7.4.2	模型转换和估计思想	250
7.4.3	指标参数 θ 的估计	251
7.4.4	参数 β 的估计	254
7.4.5	变量选择	255
7.4.6	模拟研究	258
7.4.7	实际应用	260
7.5	部分线性单指标补救 EV 模型	262
7.5.1	模型介绍	262
7.5.2	估计方法和渐近性质	262
7.5.3	变量选择	266
7.5.4	模拟研究	268
7.5.5	实际应用	273
第 8 章	测量误差降维模型	275
8.1	引言	275
8.2	充分降维方法	276
8.2.1	逆回归方法	277
8.2.2	逆方差方法	281
8.2.3	等高线回归方法	284
8.2.4	方向回归方法	285
8.2.5	Hessian 主方向方法	287
8.2.6	最小平均方差估计方法	288
8.2.7	条件密度函数的 dMAVE 方法	290
8.2.8	累积分布降维方法	292
8.2.9	结构维数的选取	294
8.3	可加测量误差降维模型	296
8.3.1	最小二乘方法	297
8.3.2	切片逆回归方法	300
8.3.3	累积分布降维方法	301
8.3.4	Hessian 主方向方法	302
8.3.5	方向回归方法	303
8.3.6	等高线回归方法	305
8.3.7	模拟研究	306
8.4	协变量调整降维模型	312
8.4.1	模型介绍	312