



Python

金融衍生品大数据分析

建模、模拟、校准与对冲

[德]Yves Hilpisch 著

蔡立端 译



Derivatives Analytics with Python
Data Analysis, Models, Simulation, Calibration and Hedging

Yves Hilpisch全新大作!

探索基于市场定价的过程及实证结果!
指导读者开发基于市场定价的关键工具!

Python

金融衍生品大数据分析

建模、模拟、校准与对冲

[德]Yves Hilpisch 著
蔡立端 译



Derivatives Analytics with Python
Data Analysis, Models, Simulation, Calibration and Hedging

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内 容 简 介

Python 在衍生工具分析领域占据重要地位,使机构能够快速、有效地提供定价、交易及风险管理的结果。本书精心介绍了有效定价期权的四个领域:基于市场定价的过程、完善的市场模型、数值方法及技术。书中的内容分为三个部分。第一部分着眼于影响股指期货期价值的风险,以及股票和利率的相关实证发现。第二部分包括套利定价理论、离散及连续时间的风险中性定价,并介绍 Carr-Madan 和 Lewis 这两种流行的傅里叶期权定价方法。最后,第三部分探究基于市场定价的整个过程,以及定价奇异、复杂期权(衍生工具)所用的蒙特卡罗模拟。

本书兼具实用与学习价值,提供完整独立的 Python 脚本、模块及 5000 行以上代码。英文原书对应网站([Http://wiley.quant-platform.com](http://wiley.quant-platform.com))有书中所有代码及可立即执行的 IPython Notebook。

本书专门针对量化投资从业人员、交易员、风控经理等而写,也可作为各大高校、培训机构、研究机构的优秀参考书。

Derivatives Analytics with Python: Data Analysis, Models, Simulation, Calibration and Hedging, ISBN 978-1-119-03799-6, Yves Hilpisch. © 2015 John Wiley & Sons Ltd.

All Rights Reserved. Authorised translation from the English language edition published by John Wiley and Sons Ltd. Responsibility for the accuracy of the translation rests solely with PHEI and is not the responsibility of John Wiley and Sons Ltd. No part of this book may be reproduced in any form without the written permission of the original copyright holder, John Wiley and Sons Ltd.

本书简体中文版专有翻译出版权由 John Wiley & Sons, Ltd. 授予电子工业出版社。未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书的任何部分。本书封底贴有 John Wiley & Sons, Inc. 防伪标签,无标签者不得销售。

版权贸易合同登记号 图字: 01-2015-6367

图书在版编目(CIP)数据

Python 金融衍生品大数据分析:建模、模拟、校准与对冲 / (德)伊夫·希尔皮斯科(Yves Hilpisch)著;蔡立嵩译. —北京:电子工业出版社, 2017.8

书名原文: Derivatives Analytics with Python: Data Analysis, Models, Simulation, Calibration and Hedging
ISBN 978-7-121-31336-3

I. ①P… II. ①伊… ②蔡… III. ①软件工具—程序设计 IV. ①TP311.561

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 076218 号

责任编辑:高洪霞

印 刷:三河市双峰印刷装订有限公司

装 订:三河市双峰印刷装订有限公司

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

开 本:787×1092 1/16 印张:21.25 字数:538 千字

版 次:2017 年 8 月第 1 版

印 次:2018 年 6 月第 5 次印刷

定 价:99.00 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题,请向购买书店调换。若书店售缺,请与本社发行部联系,联系及邮购电话:(010) 88254888, 88258888。

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。

本书咨询联系方式:(010) 51260888-819, faq@phei.com.cn。

译者序

自 20 世纪后期以来，衍生品市场蓬勃发展，成为金融创新的主流。作为金融产品的重要组成部分，衍生品强化了跨时间、跨空间的价格竞争，提高了资产配置的效率，在金融市场中扮演着举足轻重的角色。一方面，衍生品有助于价格发现，使得各类资产能够更有效地被定价；另一方面，衍生品也具有套期保值的功能，可以帮助投资者认识、分离各种风险构成，进而根据各种风险大小和个人偏好更有效地配置资金。衍生工具的定价及对冲（避险）一直是金融工程的核心内容。

然而，衍生品的定价与对冲并不是容易掌握的技术。首先，其相关理论较艰涩难懂，许多抽象的数学知识对不少人而言难以逾越。其次，现实世界显然并不如理论假设那般完美，存在着各种各样的问题，如何将理论应用于偏离假设的现实世界是一项颇具挑战的任务。此外，衍生品定价与对冲的数值计算往往非常繁琐；在实务中，没有一定的编程能力难竟其功。

本书很大程度解决了上述典型的困难。作者以其丰富的业界经验及深厚的学识修养，清晰地表达了衍生工具定价、模拟、校准及对冲方法，让读者得以全面地了解衍生品相关的理论知识。而本书尤为出色之处，更在于作者匠心独运地将抽象的数学模型以 Python 实践，并与市场实际相结合，因此对于实务工作者而言，阅读本书后学习效率是立竿见影的。

值得一提的是，作者选择 Python 作为实践的编程语言，有其与时俱进的睿智。相较于 C++、Java 等语言，Python 一个广为人知的特色是简单易学，即便非专业的程序员也能轻易上手。除此之外，Python 平台上累积了相当完整的标准模块和包，功能强大的非标准模块和包更是无以计数，涵盖范围相当广泛。这样的环境对程序开发效率的提升不言而喻。Python 还提供了丰富的 API 和工具，方便程序员在必要之时可以用其他语言来编写扩充模块，故有“胶水语言”之称。再者，各种主要的操作系统都支持 Python；Python 程序往往不需要修改，便能同时在 Linux 与 Windows 平台上执行，可移植性非常好。综上所述，科学计算人员使用 Python 可以在很大程度上减少学习、处理编程细节的许多心力，从而专注于问题本身。对金融行业而言，这意味着成本降低与效率提升。读者不难发现，Python 能在金融界迅速地流行开来，其来有自。

总之，从理论与实务结合的角度，本书不论对于学者或金融行业的专业人员，都是一本难得一见、不可或缺的参考书。最后提醒读者，本书并不是入门书籍。为了能够更好地理解本书的内容，我们建议读者具有与下列书籍同等的背景知识：John Hull 的 *Options, Futures, and Other Derivatives*，Steven E. Shreve 的 *Stochastic Calculus for Finance*，以及 Umberto Cherubini 和 Giovanni Della Lunga 的 *Fourier Transform Methods in Finance* 一书。

前 言

这本书是我在公司工作、大学教书过程中，自己诸多活动及同事之间互动衍生的产物。一方面，在 The Python Quants GmbH 公司，我们从事的领域包括金融工程、计算金融和 Python 编程；另一方面，我在萨尔大学教数理金融学课程。

本书的目标读者是那些对基于市场的期权评估实务，即透过单一数值与技术的实践来完成工作并对此感兴趣的业界人士、研究人员与学生，也为那些想要了解 Python 如何应用于衍生品分析与金融工程的人士而作。然而，除了主要以实务与实践为导向外，本书也提供了必要的理论基础与数值工具。

Python 在金融界尤其是分析领域中的作用越来越不可小觑，我希望本书能对此有所贡献。如果您想要获取本书附带的 Python 脚本及 IPython 笔记，可以访问 <http://wiley.quant-platform.com>，注册网站上的 Quant Platform，它允许用户在浏览器上以互动与协作方式进行金融分析。更多的资源可以在 <http://derivatives-analytics-with-python.com> 上找到。您也应去 <http://dx-analytics.com> 网站上查看 Python 的开源库 DX Analytics，它能够用一种标准的和可重复使用的方式，来实现本书展现的概念与方法。

撰写本书需要长时间的独处，感谢我的家人，尤其是我的妻子 Sandra 的支持与理解。也要感谢我的同事 Michael Schwed 一直以来的帮助与支持。同时，感谢 Alain Ledon 与 Riaz Ahmad 的评论与反馈。在萨尔大学的课堂与研讨会上，参与者的讨论也对此书贡献卓著。这本书的部分内容，也得益于这些年来我在各种各样的 Python 及金融会议中的演讲。

谨以此书献给我可爱的儿子 Henry Nikolaus，我赞赏他那种直接的生活方式，以及对世界清晰的观察。

Yves Hilpisch
萨尔

目 录

第 1 章 快速导览	1
1.1 基于市场的估价	1
1.2 本书的结构	1
1.3 为什么选择 Python	3
1.4 深入阅读	4
第 1 部分 市场	6
第 2 章 什么是基于市场的定价	6
2.1 期权及其价值	6
2.2 普通金融工具与奇异金融工具	10
2.3 影响股权衍生工具的风险	11
2.3.1 市场风险	11
2.3.2 其他风险	12
2.4 对冲	13
2.5 基于市场的定价过程	14
第 3 章 市场典型事实	15
3.1 简介	15
3.2 波动率、相关性	15
3.3 基本案例：正态收益率	17
3.4 指数和股票	21
3.4.1 典型事实	21
3.4.2 DAX 指数收益率	21
3.5 期权市场	25
3.5.1 买卖价差	25
3.5.2 隐含波动率曲面	27
3.6 短期利率	28
3.7 结论	31
3.8 Python 脚本	31

3.8.1	GBM 分析	31
3.8.2	DAX 分析	35
3.8.3	BSM 隐含波动率	36
3.8.4	EURO STOXX 50 隐含波动率	38
3.8.5	EURIBOR 分析	40
第 2 部分 理论定价		42
第 4 章 风险中性定价		42
4.1	简介	42
4.2	离散时间不确定性	43
4.3	离散市场模型	47
4.3.1	基本元素	47
4.3.2	基础定义	47
4.4	离散时间模型的主要结果	49
4.5	连续时间模型	53
4.6	总结	58
4.7	证明	59
4.7.1	引理 1	59
4.7.2	命题 1	59
4.7.3	定理 1	60
第 5 章 完全市场模型		62
5.1	简介	62
5.2	Black-Scholes-Merton 模型	62
5.2.1	市场模型	62
5.2.2	基本 PDE	63
5.2.3	欧式期权	64
5.3	BSM 模型的 Greeks	67
5.4	Cox-Ross-Rubinstein 模型	71
5.5	总结	74
5.6	证明及 Python 脚本	74
5.6.1	伊藤引理	74
5.6.2	BSM 期权定价的脚本	74
5.6.3	BSM 看涨期权 Greeks 脚本	78

5.6.4	CRR 期权定价脚本	81
第 6 章	基于傅里叶的期权定价	84
6.1	概述	84
6.2	定价问题	85
6.3	傅里叶变换	85
6.4	基于傅里叶的期权定价	87
6.4.1	Lewis (2001)	87
6.4.2	Carr-Madan (1999)	89
6.5	数值计算	91
6.5.1	傅里叶级数	91
6.5.2	快速傅里叶变换	94
6.6	应用	94
6.6.1	Black-Scholes-Merton (1973) 模型	94
6.6.2	Merton (1976) 模型	97
6.6.3	离散市场模型	97
6.7	总结	101
6.8	Python 脚本	101
6.8.1	使用傅里叶方法的 BSM 看涨期权定价	101
6.8.2	傅里叶级数	106
6.8.3	单位根	108
6.8.4	卷积	108
6.8.5	参数模块	109
6.8.6	卷积计算看涨期权价值	110
6.8.7	卷积期权定价	111
6.8.8	DFT 期权定价	111
6.8.9	DFT 速度检验	112
第 7 章	利用模拟的美式期权定价	114
7.1	概述	114
7.2	金融模型	114
7.3	美式期权定价	115
7.3.1	问题形式	115
7.3.2	定价算法	117
7.4	数值结果	118
7.4.1	美式看跌期权	118

7.4.2	美式空头秃鹰式价差	122
7.5	总结	122
7.6	Python 脚本	123
7.6.1	二项定价	123
7.6.2	LSM 蒙特卡罗定价	125
7.6.3	原始算法和对偶算法	126
第 3 部分 基于市场的定价		132
第 8 章 基于市场定价的第一个例子		132
8.1	概述	132
8.2	市场模型	132
8.3	定价	133
8.4	校准	133
8.5	模拟	134
8.6	总结	140
8.7	Python 脚本	140
8.7.1	数值积分定价	140
8.7.2	FFT 定价	142
8.7.3	根据三种到期日的期权报价校准模型	145
8.7.4	根据到期时间较短的期权报价校准模型	147
8.7.5	MCS 定价	150
第 9 章 一般市场模型		154
9.1	概述	154
9.2	框架	154
9.3	框架的特征	156
9.4	零息债券定价	157
9.5	欧式期权定价	158
9.5.1	PDE 方法	158
9.5.2	变换方法	160
9.5.3	蒙特卡罗模拟	161
9.6	总结	162
9.7	证明和 Python 脚本	162
9.7.1	伊藤引理	162

9.7.2	债券定价的 Python 脚本	163
9.7.3	欧式看涨期权定价的 Python 脚本	164

第 10 章 蒙特卡罗模拟 171

10.1	概述	171
10.2	零息债券定价	171
10.3	欧式期权定价	175
10.4	美式期权定价	180
10.4.1	数值结果	182
10.4.2	高准确性与低速度	185
10.5	总结	187
10.6	Python 脚本	188
10.6.1	一般零息债券定价	188
10.6.2	CIR85 模拟和定价	190
10.6.3	通过蒙特卡罗模拟对欧式期权自动定价	193
10.6.4	通过蒙特卡罗模拟对美式看跌期权自动定价	194

第 11 章 模型校准 202

11.1	概述	202
11.2	一般考量	202
11.2.1	为什么校准	202
11.2.2	模型的不同部分分别是什么角色	204
11.2.3	什么是目标函数	205
11.2.4	什么是市场数据	207
11.2.5	什么是最优化算法	208
11.3	短期利率部分的校准	208
11.3.1	理论基础	208
11.3.2	根据 Euribor 校准模型	209
11.4	股权部分的校准	212
11.4.1	傅里叶变换方法定价	212
11.4.2	根据 EURO STOXX 50 期权的报价进行校准	213
11.4.3	H93 模型校准	214
11.4.4	跳跃部分校准	214
11.4.5	BCC97 模型的完全校准	217
11.4.6	根据隐含波动率校准	218
11.5	总结	220

11.6	COX-INGERSOLL-ROSS 模型的 PYTHON 脚本	222
11.6.1	CIR85 模型校准	222
11.6.2	H93 随机波动率模型校准	225
11.6.3	隐含波动率的比较	228
11.6.4	模型跳跃扩散部分的校准	230
11.6.5	BCC97 完全模型的校准	233
11.6.6	根据隐含波动率校准 BCC97 模型	236
第 12 章	一般模型框架下的模拟与定价	240
12.1	概述	240
12.2	模拟 BCC97 模型	240
12.3	股权期权定价	242
12.3.1	欧式期权	242
12.3.2	美式期权	244
12.4	总结	245
12.5	Python 脚本	245
12.5.1	模拟 BCC97 模型	245
12.5.2	MCS 法对欧式看涨期权定价	251
12.5.3	MCS 法对美式看涨期权定价	252
第 13 章	动态对冲	256
13.1	概述	256
13.2	BSM 模型对冲研究	257
13.3	BCC97 模型对冲研究	262
13.4	总结	265
13.5	Python 脚本	265
13.5.1	BSM 的 LSM Delta 对冲 (单一路径)	265
13.5.2	BSM 的 LSM Delta 对冲 (多条路径)	269
13.5.3	BCC97 中美式看跌期权的 LSM 算法	271
13.5.4	BCC97 的 LSM Delta 对冲 (单一路径)	277
第 14 章	摘要	280
附录 A	果壳里的 Python	281
A.1	Python 基础	281
A.1.1	安装 Python 包	281
A.1.2	Python 第一步	282

A.1.3	数组操作	286
A.1.4	随机数	289
A.1.5	绘图	289
A.2	欧式期权定价	291
A.2.1	Black-Scholes-Merton 方法	292
A.2.2	Cox-Ross-Rubinstein 方法	294
A.2.3	蒙特卡罗方法	299
A.3	金融选题	301
A.3.1	近似	301
A.3.2	最优化	303
A.3.3	数值积分	304
A.4	Python 进阶	305
A.4.1	类和对象	305
A.4.2	基本的输入输出	308
A.4.3	与电子表格交互	309
A.5	快速金融工程	311

表格列表

3.1	DJIA 指数股票的看涨期权的买卖价差	26
3.2	DJIA 指数股票的看跌期权的买卖价差	26
5.1	欧式看涨期权的 CRR 二项定价算法的结果; 上半部分是指数过程, 下半部分是期权定价过程	72
7.1	在 LSM 和 DUAL 算法下, 25 次使用基本例子参数模拟美式看跌期权的结果	121
7.2	在 LSM 和 DUAL 算法下, 25 次使用基本例子参数模拟空头秃鹰式价差的结果	122
10.1	使用 Medvedev 和 Scaillet (2010) 参数的 H93 模型中欧式看涨期权和看跌期权的定价结果, $M_0 = 50$, $I = 100,000$, 表现评价的标准为 $PY_1 = 0.025$, $PY_2 = 0.015$.	179
10.2	使用 Medvedev 和 Scaillet (2010) 参数的 H93 模型中的欧式看涨期权和看跌期权的定价结果, $M_0 = 50$, $I = 100,000$, 表现评价的标准为 $PY_1 = 0.025$, $PY_2 = 0.015$.	181
10.3	使用 Medvedev 和 Scaillet (2010) 参数的 H93 和 CIR85 模型中的美式看跌期权的定价结果。表现评价的标准为 $PY_1 = 0.025$, $PY_2 = 0.015$.	184
10.4	使用 Medvedev 和 Scaillet (2010) 参数的 H93 和 CIR85 模型中的美式看涨期权的定价结果。表现评价的标准为 $PY_1 = 0.025$, $PY_2 = 0.015$.	186
10.5	使用 Medvedev 和 Scaillet (2010) 参数的 H93 和 CIR85 模型中的美式看跌期权的定价结果。表现评价的标准为 $PY_1 = 0.01$, $PY_2 = 0.01$.	187

图形列表

2.1	执行价格为 8,000 的指数欧式看涨期权的内在价值取决于到期日当天的指数水平	7
2.2	$K = 9,000$, $T = 1.0$, $r = 0.025$, $\sigma = 0.2$ 的指数欧式看涨期权的 Black-Scholes-Merton 价值大小取决于指数的初始水平 S_0 ; 为了比较, 该期权的未折现内在价值也一并展示	9
3.1	超过十年期几何布朗运动及其日对数收益率的一条模拟路径	18
3.2	日对数收益率的直方图 (柱状) 以及具有相同均值及方差的正态分布的概率密度函数图 (线形)	18
3.3	几何布朗运动之日对数收益率的 Q-Q 图	19
3.4	几何布朗运动的模拟路径的实际波动率	20
3.5	几何布朗运动序列对数收益率的滚动 (以 252 天为滚动窗口) 均值、波动率及二者的相关性, 虚线对应的是整个时间段的平均值	20
3.6	2004 年 10 月 1 日至 2014 年 9 月 30 日期间 DAX 指数及其日对数收益率	22
3.7	2004 年 10 月 1 日至 2014 年 9 月 30 日期间 DAX 指数日对数收益率的直方图 (柱状) 及具有相同均值和波动率的正态分布的概率密度函数图 (线形)	23
3.8	2004 年 10 月 1 日至 2014 年 9 月 30 日期间 DAX 指数日对数收益率的 Q-Q 图	23
3.9	2004 年 10 月 1 日至 2014 年 9 月 30 日期间 DAX 指数的实际波动率	24
3.10	滚动的 (以 252 天为滚动窗口) 均值、波动率及二者的相关性; 虚线对应的是整个时间段的均值	25
3.11	2014 年 9 月 30 日 EURO STOXX 50 指数欧式看涨期权的隐含波动率	28
3.12	1999 年 1 月 1 日到 2014 年 9 月 30 日间 1 周 Euribor 的每日报价及日对数变化	29
3.13	1 周 Euribor 日对数变化的直方图 (柱状) 与具有相同均值和标准差的正态分布 (线形)	29
3.14	1 周 Euribor 日对数变化的 Q-Q 图	30
3.15	1999 年 1 月 1 日到 2014 年 9 月 30 日间 1 周 (点)、1 个月 (点-虚线)、6 个月 (虚线)、1 年 (实线) 的 Euribor 日报价	30

5.1	范例欧式看涨期权价值随执行价格 K 、到期时间 T 、短期利率 r 、波动率 σ 的变动	66
5.2	范例欧式看跌期权价值随执行价格 K 、到期时间 T 、短期利率 r 、波动率 σ 的变动	67
5.3	欧式看涨期权的 delta 值随到期时间 T 、执行价格 K 的变化	68
5.4	欧式看涨期权的 gamma 值随到期时间 T 、执行价格 K 的变化	69
5.5	欧式看涨期权的 theta 值随到期时间 T 、执行价格 K 的变化	69
5.6	欧式看涨期权的 rho 值随到期时间 T 、执行价格 K 的变化	70
5.7	欧式看涨期权的 vega 值随到期时间 T 、执行价格 K 的变化	70
5.8	CRR 模型的欧式看涨期权每增加 20 个时间步数的价值变化	73
5.9	CRR 模型的欧式看涨期权每增加 25 个时间步数的价值变化	73
6.1	函数 $f(x) = x $ 的 1 阶 (左) 和 5 阶 (右) 傅里叶级数近似	93
6.2	Lewis 积分方法与 BSM 解析公式的定价准确性的比较, 参数设定为 $S_0 = 100, T = 1.0, r = 0.05, \sigma = 0.2$	95
6.3	CM99 FFT 方法与 BSM 解析公式的定价准确性的比较, 参数设定为 $S_0 = 100, T = 1.0, r = 0.05, \sigma = 0.2, N = 4,096, \epsilon = 150^{-1}$	96
6.4	画在虚平面的 $n = 5$ 和 $n = 30$ 的单位根序列	98
7.1	时间步数 $M = 75$ 时 25 次模拟得到的美式看跌期权定价结果, AV = 原始 (LSM) 和对偶 (DUAL) 取值的平均, 虚线 = 真实值	121
7.2	时间步数 $M = 75$ 时 25 次模拟得到的美式空头秃鹰式价差的结果, AV = 原始 (LSM) 和对偶 (DUAL) 取值的平均, 虚线 = 真实值	123
8.1	根据三个到期日期权的市场报价对 Merton 跳跃扩散模型校准的结果: 线 = 市场报价, 点 = 模型价格	135
8.2	根据部分市场报价对 Merton 跳跃扩散模型校准的结果: 线 = 市场报价, 点 = 模型价格, 柱状 = 二者的差别	136
8.3	Lewis 公式 (线)、Carr-Madan 公式 (三角形) 及蒙特卡罗模拟 (点) 三种方法对欧式看涨期权定价结果的比较	137
10.1	CIR85 短期利率过程的 20 条模拟路径	174
10.2	$T = 2$ 到期的 ZCB 价值; 线 = 解析值, 点 = 精确方法的蒙特卡罗模拟值 ($M = 50$ 且 $I = 50,000$)	174
10.3	$T = 2$ 到期的 ZCB 价值; 线 = 解析值, 点 = 欧拉方法的蒙特卡罗模拟值 ($M = 50$ 且 $I = 50,000$)	175
10.4	使用与不使用矩匹配时蒙特卡罗定价误差的箱形图	180

11.1	直到 12 个月的 Euribor 利率曲线结构 (包括 Eonia 利率): 点 = 从 2014 年 9 月 30 日开始的 市场报价, 线 = 插值曲线, 虚线 = 利率曲线结构的一阶导数	211
11.2	Euribor 市场及模型隐含远期利率: 线 = 从 2014 年 9 月 30 日开始的 市场远期利率, 点 = 模型的隐含远期利率, 柱 = 模型与市场远期利率的 差值	211
11.3	到期日为 $T = 2$ 的单位零息债券在 t 时的价值	212
11.4	根据 EURO STOXX 50 期权的市场报价对 H93 模型校准的结果: 线 = 从 2014 年 9 月 30 日开始的 市场报价, 点 = 校准之后的模型定价	215
11.5	根据 EURO STOXX 50 期权从 2014 年 9 月 30 日起的 市场报价数据、校准过的 H93 模型的 隐含波动率	216
11.6	根据 EURO STOXX 50 指数 5 个到期时间为 17 天的 欧式看涨期权市场报价校准 BCC97 模型 跳跃扩散部分的结果, 其中市场报价从 2014 年 9 月 30 日开始	217
11.7	根据 EURO STOXX 50 指数 15 个到期时间分别为 17、80 和 171 天的 欧式看涨期权市场报价, 同时校准 BCC97 模型 跳跃扩散部分和随机波动率部分的结果, 其中市场报价从 2014 年 9 月 30 日 开始	218
11.8	根据 EURO STOXX 50 期权从 2014 年 9 月 30 日起的 市场报价数据、校准过的 BCC97 模型 的隐含波动率	219
11.9	根据 EURO STOXX 50 指数 15 个到期时间分别为 17、80 和 171 天的 欧式看涨期权的市场隐含波动率、校准 BCC97 模型的结果, 其中市场报价从 2014 年 9 月 30 日 开始	220
11.10	根据 EURO STOXX 50 期权从 2014 年 9 月 30 日起的 市场隐含波动率、校准过的 BCC97 模型 的隐含波动率	221
12.1	校准过的 CIR85 模型中短期利率的 10 条 模拟路径, 其中模拟路径时长 1 年 (从 2014 年 9 月 30 日起)、时间步数为 25	241
12.2	校准过的 BCC97 模型中波动率的 10 条 模拟路径, 其中模拟路径时长 1 年 (从 2014 年 9 月 30 日起)、时间步数为 25	241
12.3	校准过的 BCC97 模型中 EURO STOXX 50 指数 水平的 10 条模拟路径, 其中模拟路径 时长 1 年 (从 2014 年 9 月 30 日起)、 时间步数为 25	242
12.4	校准过的 BCC97 模型中 EURO STOXX 50 指数 水平一年后模拟值 (即 2015 年 9 月 30 日) 的直方分布图	242
13.1	BSM 模型中美式看跌期权的在行权日有 盈利的动态复制策略	258
13.2	BSM 模型中美式看跌期权的在行权日有 损失的动态复制策略	258
13.3	BSM 模型中美式看跌期权的 10,000 个 动态复制的行权日 (折现) P&L 的 频率分布图	261

13.4 BSM 模型中美式看跌期权的 10,000 个动态复制的行权日 (折现) P&L 的频率分布图 (更多时间步数及模拟路径)	261
13.5 BCC97 模型中美式看跌期权的动态复制 (行权日有正的收益)	263
13.6 BCC97 模型中美式看跌期权的动态复制 (行权日有损失)	264
13.7 一般市场模型 BCC97 中美式看跌期权的 10,000 个动态复制的行权日 (折现) P&L 的频率分布图 (更多时间步数及模拟路径)	264
13.8 BCC 模型中美式看跌期权的动态复制 (由于指数发生跳跃, 结果在行权日有很大损失)	265
A.1 matplotlib 画图的示范 (线图)	290
A.2 matplotlib 画图的示范 (点和柱状)	291
A.3 股指水平 T 期模拟值的直方分布图	300
A.4 通过常数回归 (叉号)、线性回归 (点) 及二次回归 (三角) 近似余弦函数 (线) 的结果	302
A.5 三次样条插值 (点) 近似余弦函数 (线) 的结果	303
A.6 Excel 格式存储的 DAX 报价的样本电子表格 (这里用 LibreOffice 显示), 数据来源 finance.yahoo.com	310
A.7 DAX 指数历史数据, 数据来源 http://finance.yahoo.com	311
A.8 2005 年 1 月 3 日至 2014 年 10 月 28 日 DAX 指数报价及日对数收益率, 数据来源 http://finance.yahoo.com	315