

教育部高等教育司推荐

国外优秀信息科学与技术系列教学用书

# 信息论、推理 与学习算法

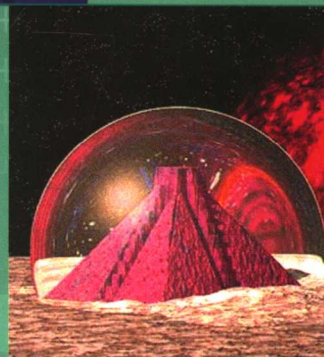
翻译版

## INFORMATION THEORY, INFERENCE, AND LEARNING ALGORITHMS

[英] · DAVID J. C. MACKAY 著

肖明波 席斌

许芳 王建新 译



高等教育出版社  
Higher Education Press



教育部高等教育司推荐  
国外优秀信息科学与技术系列教学用书

# 信息论、推理 与学习算法

翻译版

INFORMATION THEORY, INFERENCE,  
AND LEARNING ALGORITHMS

[英] · DAVID J.C.MACKAY 著

肖明波 席 斌

许 芳 王建新 译



高等教育出版社  
Higher Education Press

图字:01-2005-2303号

Information Theory, Inference and Learning Algorithms

David J. C. MacKay

© Cambridge University Press 2003

## 内容提要

本书是英国剑桥大学卡文迪许实验室的著名学者 David J. C. MacKay 博士总结多年教学经验和科研成果,于 2003 年推出的一部力作。本书作者不仅透彻地论述了传统信息论的内容和最新编码算法,而且以高度的学科驾驭能力,匠心独具地在一个统一框架下讨论了贝叶斯数据建模、蒙特卡罗方法、聚类算法、神经网络等属于机器学习和推理领域的主题,从而很好地将诸多学科的技术内涵融会贯通。本书注重理论与实际的结合,内容组织科学严谨,反映了多门学科的内在联系和发展趋势。同时,本书还包含了丰富的例题和近 400 道习题(其中许多习题还配有详细的解答),便于教学或自学,适合作为信息科学与技术相关专业高年级本科生和研究生教材,对相关专业技术人员也不失为一本有益的参考书。

## 图书在版编目(CIP)数据

信息论、推理与学习算法:翻译版/(英)麦凯(MacKay, D. J. C.)著;肖明波等译. -北京:高等教育出版社,2006.7

书名原文:Information Theory, Inference and Learning Algorithms

ISBN 7-04-019641-7

I. 信… II. ①麦… ②肖… III. 信息论—高等学校—教材 IV. G201

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 060464 号

---

出版发行	高等教育出版社	购书热线	010-58581118
社 址	北京市西城区德外大街 4 号	免费咨询	800-810-0598
邮政编码	100011	网 址	<a href="http://www.hep.edu.cn">http://www.hep.edu.cn</a>
总 机	010-58581000		<a href="http://www.hep.com.cn">http://www.hep.com.cn</a>
经 销	蓝色畅想图书发行有限公司	网上订购	<a href="http://www.landaco.com">http://www.landaco.com</a>
印 刷	北京民族印刷厂		<a href="http://www.landaco.com.cn">http://www.landaco.com.cn</a>
		畅想教育	<a href="http://www.widedu.com">http://www.widedu.com</a>
开 本	787×1092 1/16	版 次	2006 年 7 月第 1 版
印 张	47.75	印 次	2006 年 7 月第 1 次印刷
字 数	1 030 000	定 价	59.00 元

---

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请到所购图书销售部门联系调换。

版权所有 侵权必究

物料号 19641-00

# 前 言

20 世纪末,以计算机和通信技术为代表的信息科学和技术对世界经济、科技、军事、教育和文化等产生了深刻影响。信息科学技术的迅速普及和应用,带动了世界范围信息产业的蓬勃发展,为许多国家带来了丰厚的回报。

进入 21 世纪,尤其随着我国加入 WTO,信息产业的国际竞争将更加激烈。我国信息产业虽然在 20 世纪末取得了迅猛发展,但与发达国家相比,甚至与印度、爱尔兰等国家相比,还有很大差距。国家信息化的发展速度和信息产业的国际竞争能力,最终都将取决于信息科学技术人才的质量和数量。引进国外信息科学和技术优秀教材,在有条件的学校推动开展英语授课或双语教学,是教育部为加快培养大批高质量的信息技术人才采取的一项重要举措。

为此,教育部要求由高等教育出版社首先开展信息科学和技术教材的引进试点工作。同时提出了两点要求,一是要高水平,二是要低价格。在高等教育出版社和信息科学技术引进教材专家组的努力下,经过比较短的时间,第一批引进的 20 多种教材已经陆续出版。这套教材出版后受到了广泛的好评,其中有不少是世界信息科学技术领域著名专家、教授的经典之作和反映信息科学技术最新进展的优秀作品,代表了目前世界信息科学技术教育的一流水平,而且价格也是最优惠的,与国内同类自编教材相当。

这项教材引进工作是在教育部高等教育司和高教社的共同组织下,由国内信息科学技术领域的专家、教授广泛参与,在对大量国外教材进行多次遴选的基础上,参考了国内和国外著名大学相关专业的课程设置进行系统引进的。其中,John Wiley 公司出版的贝尔实验室信息科学研究中心副总裁 Silberschatz 教授的经典著作《操作系统概念》,是我们经过反复谈判,做了很多努力才得以引进的。William Stallings 先生曾编写了在美国深受欢迎的信息科学技术系列教材,其中有多种教材获得过美国教材和学术著作者协会颁发的计算机科学与工程教材奖,这批引进教材中就有他的两本著作。留美中国学者 Jiawei Han 先生的《数据挖掘》是该领域中具有里程碑意义的著作。由达特茅斯学院的 Thomas Cormen 和麻省理工学院、哥伦比亚大学几位学者共同编著的经典著作《算法导论》,在经历了 11 年的锤炼之后于 2001 年出版了第二版。目前任教于美国 Massachusetts 大学的 James Kurose 教授,曾在美国三所高校先后 10 次获得杰出教师或杰出教学奖,由他主编的《计算机网络》出版后,以其体系新颖、内容先进而备受欢迎。在努力降低引进教材售价方面,高等教育出版社做了大量和细致的工作。这套引进的教材体现了权威性、系统性、先进性和经济性等特点。

教育部也希望国内和国外的出版商积极参与此项工作,共同促进中国信息技术

教育和信息产业的发展。我们在与外商的谈判工作中,不仅要坚定不移地引进国外最优秀的教材,而且还要千方百计地将版权转让费降下来,要让引进教材的价格与国内自编教材相当,让广大教师和学生负担得起。中国的教育市场巨大,外国出版公司和国内出版社要通过扩大发行数量取得效益。

在引进教材的同时,我们还应做好消化吸收,注意学习国外先进的教学思想和教学方法,提高自编教材的水平,使我们的教学和教材在内容体系上,在理论与实践的结合上,在培养学生的动手能力上能有较大的突破和创新。

目前,教育部正在全国 35 所高校推动示范性软件学院的建设和实施,这也是加快培养信息科学技术人才的重要举措之一。示范性软件学院要立足于培养具有国际竞争力的实用性软件人才,与国外知名高校或著名企业合作办学,以国内外著名 IT 企业为实践教学基地,聘请国内外知名教授和软件专家授课,还要率先使用引进教材开展教学。

我们希望通过这些举措,能在较短的时间,为我国培养一大批高质量的信息技术人才,提高我国软件人才的国际竞争力,促进我国信息产业的快速发展,加快推动国家信息化进程,进而带动整个国民经济的跨越式发展。

教育部高等教育司

二〇〇二年三月

# 译者序

1948年,香农发表了他的划时代论文 *The Mathematical Theory of Communication*, 宣告了信息论这一崭新学科的诞生。信息论不仅给出有效通信的极限,而且明确地指出了实现有效而可靠通信的必由之路。通过50多年的努力,人们不仅在理论上发展了香农信息论,而且实际通信系统也在逐步逼近香农极限。信息论是通信理论的重要基石,同时也正迅速渗透到其他相关的自然科学和社会科学领域,显示出强大的生命力和不可估量的应用前景。所有这一切在本书中都得到了绝佳体现,我们很高兴能将它翻译出来推荐给大家。

本书是英国著名的卡文迪许实验室的著名学者 David J. C. MacKay 博士总结多年教学经验和科研成果,于2003年推出的一部力作。它不仅包含传统信息论的内容(如香农定理和通信系统理论基础),还对 LDPC 等最新的编码算法进行了论述。此外,本书作者以高度的学科驾驭能力,匠心独具地在一个统一框架下讨论了贝叶斯数据建模、蒙特卡罗方法、聚类算法、神经网络等属于机器学习和推理领域的主题。从而很好地将通信、信号处理、数据挖掘、机器学习、模式识别、计算神经学、生物信息学和密码学等诸多学科的技术内涵融会贯通。本书注重理论与实际的结合,内容组织科学严谨,反映了多门学科的内在联系和发展趋势。同时,本书还包含了丰富的例题和近400道习题(其中许多习题还配有详细的解答),便于教学或自学,适合作为信息科学与技术相关专业高年级本科生和研究生教材,对相关专业技术人员也不失为一本有益的参考书。虽然信息论相关技术的发展日新月异,我们相信本书的内容不会很快过时;虽然国内外关于信息论的专著和教材已经出版很多,但本书有其显著特色和优势,有望成为一本素质教育教材。

本书主体部分包含六大部分,共50章。第一部分至第三部分为传统信息论的内容,讨论了信源编码定理和数据压缩、噪声信道编码定理和纠错码以及散列码等专题。第四部分涉及概率与推理,着重论述贝叶斯推理、聚类算法、蒙特卡罗方法以及决策论等内容,并指出了基于抽样理论的传统推理方法所存在的不足。第五部分神经网络,讨论了单神经元分类器、神经网络学习推理和 Hopfield 网络,还着重推导了神经网络的信息容量。第六部分稀疏图码,介绍 LDPC 码、Turbo 码、重复累加码和数字喷泉码等性能优越的“后现代”信道编码算法。

本书由肖明波、席斌、许芳和王建新等人翻译。具体分工为:肖明波负责前言、第1章至第3章、第27章至第30章和附录部分;王建新负责第4章至第7章、第12章至第19章和第31章至第33章;许芳负责第8章至第11章、第34章至第37章和第47章至第50章;席斌负责第20章至第26章和第38章至第46章。肖明波教授对全

书进行了审校。参加本书初稿翻译、校对、讨论、文字整理和公式录入等工作的还有杨光松、张静、卢菲恬、喻继森、林碧娇、苏杰、林小兰等人,在此对他们认真出色的工作和无私奉献的精神表示衷心感谢。

由于本书涉及领域广泛,而译者水平有限,加上时间紧迫,译文中难免存在不妥乃至错误之处,敬请读者和同行专家指正。

译者

2006年2月

# 序 言

本书为工程、科学、数学和计算等学科的高年级本科生和研究生而作。本书假设学生们熟悉本科一、二年级所学的微积分、概率论和线性代数等科学和工程数学课程的内容。

传统信息论课程不仅涵盖了优美的香农理论思想,还涵盖了通信问题的一些实际解决方案。本书则更进一步,论述了贝叶斯数据建模、蒙特卡罗方法、变参法、聚类算法和神经网络。

为什么要将信息论和机器学习统一起来呢?因为它们本来是一件事的两个方面。在20世纪60年代,一个叫控制论的领域中聚集了众多的信息论专家、计算机科学家和神经科学家,对共同的课题展开研究。信息论和机器学习至今仍然归划为一体。大脑是终极的压缩和通信系统。而数据压缩和纠错码的现代算法所使用的工具与机器学习中的相同。

## 如何使用本书

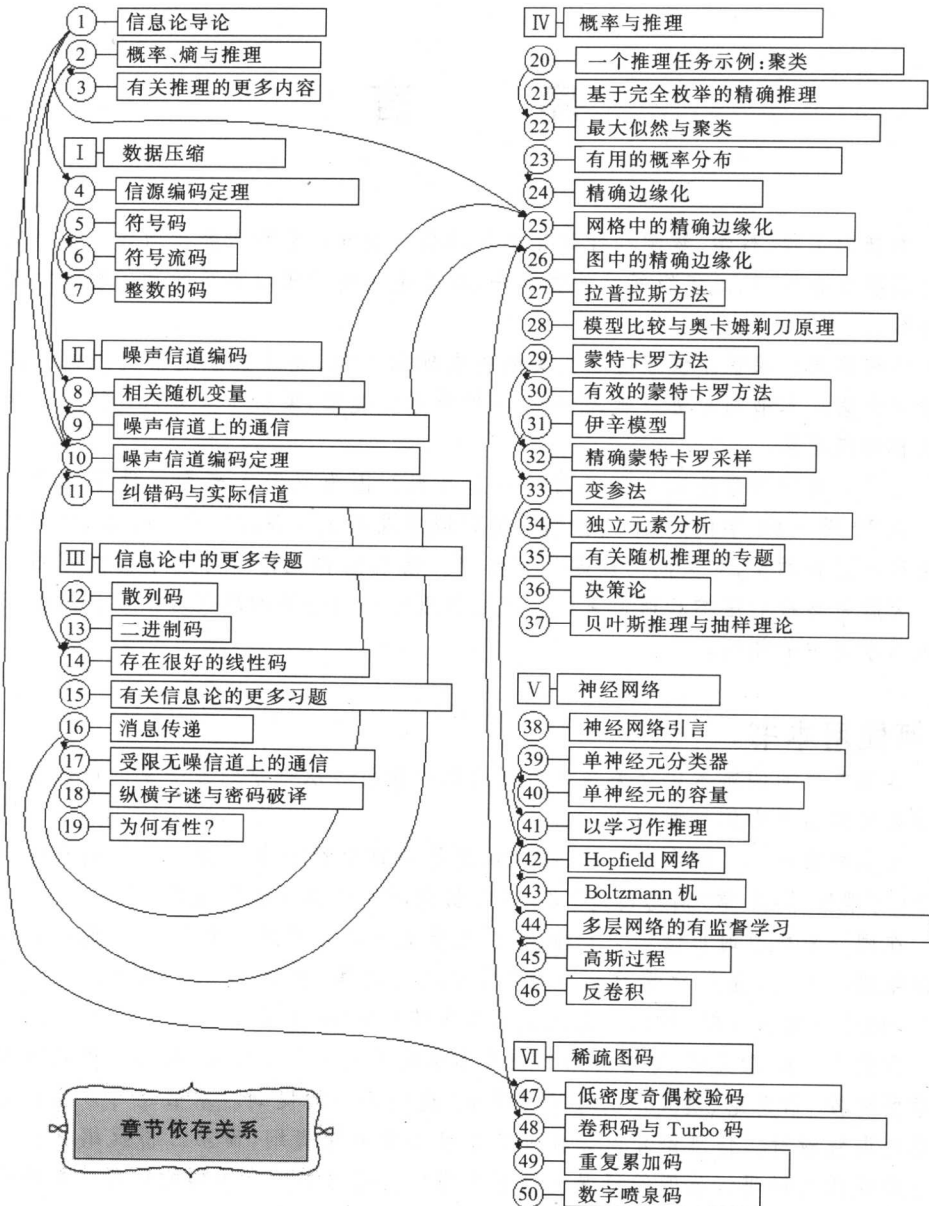
各章节之间的基本依存关系如后面的图中所示。从一章到另一章的箭头表明后者需要用到前者中的一些知识。

在本书第一、二、四和五部分,高级或选学的章节都放在后面。第三部分的全部章节(可能除第16章“消息传递”之外)在初读时都可作为选学内容。

在同一章内有时也做如下安排:最后几节往往是关于高级主题的,因此在初读时可以略过。例如,在初次学习第4章“信源编码定理”和第10章“噪声信道编码定理”这两个关键章节时,可以分别绕过第4.5节和第10.4节。

在接下来的几页中,笔者将给出使用本书的几种方式。首先,给出了本人在剑桥大学所讲授“信息论、模式识别与神经网络”这门课程的提纲。本书还可作为传统的信息论课程教材。信息论导论课程可参考第二份授课提纲,而第三份提纲旨在让学生理解现代纠错码。第四份授课提纲则表明如何将本书用于传统的机器学习课程。





- ① 信息论导论
  - ② 概率、熵与推理
  - ③ 有关推理的更多内容
- I 数据压缩
- ④ 信源编码定理
  - ⑤ 符号码
  - ⑥ 符号流码
  - ⑦ 整数的码
- II 噪声信道编码
- ⑧ 相关随机变量
  - ⑨ 噪声信道上的通信
  - ⑩ 噪声信道编码定理
  - ⑪ 纠错码与实际信道
- III 信息论中的更多专题
- ⑫ 散列码
  - ⑬ 二进制码
  - ⑭ 存在很好的线性码
  - ⑮ 有关信息论的更多习题
  - ⑯ 消息传递
  - ⑰ 受限无噪信道上的通信
  - ⑱ 纵横字谜与密码破译
  - ⑲ 为何有性?
- IV 概率与推理
- ⑳ 一个推理任务示例:聚类
  - ㉑ 基于完全枚举的精确推理
  - ㉒ 最大似然与聚类
  - ㉓ 有用的概率分布
  - ㉔ 精确边缘化
  - ㉕ 网格中的精确边缘化
  - ㉖ 图中的精确边缘化
  - ㉗ 拉普拉斯方法
  - ㉘ 模型比较与奥卡姆剃刀原理
  - ㉙ 蒙特卡罗方法
  - ㉚ 有效的蒙特卡罗方法
  - ㉛ 伊辛模型
  - ㉜ 精确蒙特卡罗采样
  - ㉝ 变参法
  - ㉞ 独立元素分析
  - ㉟ 有关随机推理的专题
  - ㊱ 决策论
  - ㊲ 贝叶斯推理与抽样理论
- V 神经网络
- ㉔ 神经网络引言
  - ㉕ 单神经元分类器
  - ㉖ 单神经元的容量
  - ㉗ 以学习作推理
  - ㉘ Hopfield 网络
  - ㉙ Boltzmann 机
  - ㉚ 多层网络的有监督学习
  - ㉛ 高斯过程
  - ㉜ 反卷积
- VI 稀疏图码
- ㉔ 低密度奇偶校验码
  - ㉕ 卷积码与 Turbo 码
  - ㉖ 重复累加码
  - ㉗ 数字喷泉码

我在英国剑桥大学开设的  
“信息论、模式识别和  
神经网络”课程提纲

- ① 信息论导论
- ② 概率、熵与推理
- ③ 有关推理的更多内容

#### I 数据压缩

- ④ 信源编码定理
- ⑤ 符号码
- ⑥ 符号流码
- ⑦ 整数的码

#### II 噪声信道编码

- ⑧ 相关随机变量
- ⑨ 噪声信道上的通信
- ⑩ 噪声信道编码定理
- ⑪ 纠错码与实际信道

#### III 信息论中的更多专题

- ⑫ 散列码
- ⑬ 二进制码
- ⑭ 存在很好的线性码
- ⑮ 有关信息论的更多习题
- ⑯ 消息传递
- ⑰ 受限无噪信道上的通信
- ⑱ 纵横字谜与密码破译
- ⑲ 为何有性?

#### “信息论”短期课程提纲

- IV 概率与推理
- ⑳ 一个推理任务示例:聚类
- ㉑ 基于完全枚举的精确推理
- ㉒ 最大似然与聚类
- ㉓ 有用的概率分布
- ㉔ 精确边缘化
- ㉕ 网格中的精确边缘化
- ㉖ 图中的精确边缘化
- ㉗ 拉普拉斯方法
- ㉘ 模型比较与奥卡姆剃刀原理
- ㉙ 蒙特卡罗方法
- ㉚ 有效的蒙特卡罗方法
- ㉛ 伊辛模型
- ㉜ 精确蒙特卡罗采样
- ㉝ 变参法
- ㉞ 独立元素分析
- ㉟ 有关随机推理的专题
- ㊱ 决策论
- ㊲ 贝叶斯推理与抽样理论

#### V 神经网络

- ⑳ 神经网络引言
- ㉑ 单神经元分类器
- ㉒ 单神经元的容量
- ㉓ 以学习作推理
- ㉔ Hopfield 网络
- ㉕ Boltzmann 机
- ㉖ 多层网络的有监督学习
- ㉗ 高斯过程
- ㉘ 反卷积

#### VI 稀疏图码

- ⑳ 低密度奇偶校验码
- ㉑ 卷积码与 Turbo 码
- ㉒ 重复累加码
- ㉓ 数字喷泉码

- ① 信息论导论
- ② 概率、熵与推理
- ③ 有关推理的更多内容
- I 数据压缩
- ④ 信源编码定理
- ⑤ 符号码
- ⑥ 符号流码
- ⑦ 整数的码
- II 噪声信道编码
- ⑧ 相关随机变量
- ⑨ 噪声信道上的通信
- ⑩ 噪声信道编码定理
- ⑪ 纠错码与实际信道
- III 信息论中的更多专题
- ⑫ 散列码
- ⑬ 二进制码
- ⑭ 存在很好的线性码
- ⑮ 有关信息论的更多习题
- ⑯ 消息传递
- ⑰ 受限无噪信道上的通信
- ⑱ 纵横字谜与密码破译
- ⑲ 为何有性?
- IV 概率与推理
- ⑳ 一个推理任务示例:聚类
- ㉑ 基于完全枚举的精确推理
- ㉒ 最大似然与聚类
- ㉓ 有用的概率分布
- ㉔ 精确边缘化
- ㉕ 网格中的精确边缘化
- ㉖ 图中的精确边缘化
- ㉗ 拉普拉斯方法
- ㉘ 模型比较与奥卡姆剃刀原理
- ㉙ 蒙特卡罗方法
- ㉚ 有效的蒙特卡罗方法
- ㉛ 伊辛模型
- ㉜ 精确蒙特卡罗采样
- ㉝ 变参法
- ㉞ 独立元素分析
- ㉟ 有关随机推理的专题
- ㊱ 决策论
- ㊲ 贝叶斯推理与抽样理论
- V 神经网络
- ⑳ 神经网络引言
- ㉑ 单神经元分类器
- ㉒ 单神经元的容量
- ㉓ 以学习作推理
- ㉔ Hopfield 网络
- ㉕ Boltzmann 机
- ㉖ 多层网络的有监督学习
- ㉗ 高斯过程
- ㉘ 反卷积
- VI 稀疏图码
- ④ 低密度奇偶校验码
- ⑤ 卷积码与 Turbo 码
- ⑥ 重复累加码
- ⑦ 数字喷泉码

“信息论与编码”高级课程

- ① 信息论导论
- ② 概率、熵与推理
- ③ 有关推理的更多内容

#### I 数据压缩

- ④ 信源编码定理
- ⑤ 符号码
- ⑥ 符号流码
- ⑦ 整数的码

#### II 噪声信道编码

- ⑧ 相关随机变量
- ⑨ 噪声信道上的通信
- ⑩ 噪声信道编码定理
- ⑪ 纠错码与实际信道

#### III 信息论中的更多专题

- ⑫ 散列码
- ⑬ 二进制码
- ⑭ 存在很好的线性码
- ⑮ 有关信息论的更多习题
- ⑯ 消息传递
- ⑰ 受限无噪信道上的通信
- ⑱ 纵横字谜与密码破译
- ⑲ 为何有性?

#### IV 概率与推理

- ⑳ 一个推理任务示例:聚类
- ㉑ 基于完全枚举的精确推理
- ㉒ 最大似然与聚类
- ㉓ 有用的概率分布
- ㉔ 精确边缘化
- ㉕ 网格中的精确边缘化
- ㉖ 图中的精确边缘化
- ㉗ 拉普拉斯方法
- ㉘ 模型比较与奥卡姆剃刀原理
- ㉙ 蒙特卡罗方法
- ㉚ 有效的蒙特卡罗方法
- ㉛ 伊辛模型
- ㉜ 精确蒙特卡罗采样
- ㉝ 变参法
- ㉞ 独立元素分析
- ㉟ 有关随机推理的专题
- ㊱ 决策论
- ㊲ 贝叶斯推理与抽样理论

#### V 神经网络

- ㉜ 神经网络引言
- ㉝ 单神经元分类器
- ㉞ 单神经元的容量
- ㉟ 以学习作推理
- ㊱ Hopfield 网络
- ㊲ Boltzmann 机
- ㊳ 多层网络的有监督学习
- ㊴ 高斯过程
- ㊵ 反卷积

#### VI 稀疏图码

- ㊶ 低密度奇偶校验码
- ㊷ 卷积码与 Turbo 码
- ㊸ 重复累加码
- ㊹ 数字喷泉码

“贝叶斯推理与机器学习”课程提纲

## 有关习题

只有通过亲自参与对某一主题的创新,你才能真正理解它。习题在本书中起到了关键作用。为了便于指导,我们对每个题目都标出了等级,用从1到5之间的某个数字表明其难度,这和参考文献 Knuth(1968年)所采用的评级类似。



此外,对于作者特别推荐的习题,在页边用“鼓励鼠”标记出来。有些需要使用计算机的习题,则用“C”标记出来。

书中给出了许多习题的答案。请善用之。在给出解答的地方,还给出了原题的难度等级。

许多其他习题的答案可供本书授课教师使用,如需要请发电子邮件至 `solutions@cambridge.org`。



### 习题标记汇总

特别推荐

▷ 推荐

C 需要使用计算机的部分

[1] 简单(一分钟左右可解出)

[2] 中等难度(15分钟左右可解出)

[3] 较难

[4] 难

[5] 可作为研究课题

## 因特网资源

网站 <http://www.inference.phy.cam.ac.uk/mackay/itila> 包含了以下几种资源。

1. 软件:在讲课时我所使用的教学软件、交互式软件和研究软件,是用 Perl、octave、tel、C 和 gnuplot 编写的。还包括一些动画。
2. 本书的勘误信息。提前感谢你将它们用电子邮件发给我。
3. 本书的电子版。本书以 postscript、pdf 和 djvu 三种格式供读者在计算机上阅读。纸质图书的版权限制同样适用于这些电子书。

## 关于这一版本

原著是第一版的第三次印刷。在第二次印刷时,本书的设计做了一些小调整。全书的页码基本维持不变,只是在第1章、第6章和第28章中将一些段落、图和公式做了移动。所有公式、章节和习题序号都未改变。在第三次印刷时,将第8章的名字

由“相关联 (Correlated) 随机变量”改为“相关随机变量”，因为前者不够严谨。

## 致谢

非常感谢在我创作期间提供资助的机构：英国皇家协会与达尔文学院，在早年为我提供了优厚的研究基金；英国剑桥大学；美国加州大学旧金山分校 Keck 中心，我在这里度过了一个多产的学术假期；Gatsby 慈善基金的资助使我获得充分的写作自由，而幸免于陷入 Escher 阶梯的怪圈之中。

我的工作有赖于免费软件作者们的慷慨。写作本书时我所使用的是 LATEX 2 $\epsilon$ 。再三感谢 Donald Knuth 和 Leslie Lamport！我们的计算机所运行的是 GNU/Linux 操作系统。我每天都使用 emacs、Perl 和 gnuplot 等软件。谢谢 Richard Stallman，谢谢 Linus Torvalds，感谢诸位。

许多读者都将他们对本书的意见反馈给我，在此无法一一列出，我要向他们致以诚挚的谢意。特别要感谢过去 9 年中在英国剑桥大学研读“信息论与机器学习”这门课程的所有学生和同事们。

推理研究小组的成员给了我巨大的支持，我要感谢他们在过去 10 年中所表现出的慷慨和耐心：Mark Gibbs, Michelle Povinelli, Simon Wilson, Coryn Bailer-Jones, Matthew Davey, Katriona Macphee, James Miskin, David Ward, Edward Ratzer, Seb Wills, John Barry, John Winn, Phil Cowans, Hanna Wallach, Matthew Garrett, 特别还有 Sanjoy Mahajan。还要感谢 Graeme Mitchison、Mike Cates 和 Davin Yap。

最后，向我个人心目中的英雄——我的导师们表示感激，我从他们那里学到了许多东西。他们是 Yaser Abu-Mostafa, Andrew Blake, John Bridle, Peter Cheeseman, Steve Gull, Geoff Hinton, John Hopfield, Steve Luttrell, Robert MacKay, Bob McEliece, Radford Neal, Roger Sewell 以及 John Skilling。

谨以此书献给

反军火贸易运动

[www.caat.org.uk](http://www.caat.org.uk)

和平不能靠武力维持。它只能通过理解来达到。

——Albert Einstein



# 目 录

第 1 章 信息论导论	4
第 2 章 概率、熵与推理	26
第 3 章 有关推理的更多内容	57
<b>第一部分 数据压缩</b>	<b>77</b>
第 4 章 信源编码定理	79
第 5 章 符号码	105
第 6 章 符号流码	128
第 7 章 整数的码	151
<b>第二部分 噪声信道编码</b>	<b>157</b>
第 8 章 相关随机变量	158
第 9 章 噪声信道上的通信	166
第 10 章 噪声信道编码定理	185
第 11 章 纠错码与实际信道	202
<b>第三部分 信息论中的更多专题</b>	<b>219</b>
第 12 章 散列码:用于有效信息检索的码	221
第 13 章 二进制码	235
第 14 章 存在很好的线性码	263
第 15 章 有关信息论的更多习题	267
第 16 章 消息传递	277
第 17 章 受限无噪信道上的通信	286
第 18 章 纵横字谜与密码破译	301
第 19 章 为何有性? 信息获取与进化	312
<b>第四部分 概率与推理</b>	<b>325</b>
第 20 章 一个推理任务示例:聚类	328
第 21 章 基于完全枚举的精确推理	339
第 22 章 最大似然与聚类	346