

国外电子与通信教材系列



独立成分分析

Independent Component Analysis



Aapo Hyvärinen

[芬兰] Juha Karhunen 著

Erkki Oja

周宗潭 董国华 徐 昕 胡德文 等译



电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

<http://www.phei.com.cn>

国外电子与通信教材系列

独立成分分析

Independent Component Analysis

Aapo Hyvärinen

[芬兰] Juha Karhunen 著

Erkki Oja

周宗潭 董国华 徐 昕 胡德文 等译

電子工業出版社.

Publishing House of Electronics Industry

北京 · BEIJING

内 容 简 介

独立成分分析(ICA)已经成为近年来神经网络、高级统计学和信号处理等研究领域中最令人振奋的主题之一。ICA源自对客观物理世界的抽象,它能够有效地解决许多实际问题,具有强大的生命力和广阔的工程应用前景。本书(英文原版)是国际上第一本对ICA这门新技术进行全面介绍的综合性专著,其中还包括了为理解和使用该技术的相应数学基础背景材料。本书不仅介绍了ICA的基本知识与总体概况、给出了重要的求解过程及算法,而且还涵盖了图像处理、无线通信、音频信号处理以及更多其他应用。

全书分为四个部分,共24章。第一部分(第2章至第6章)介绍了本书所用到的主要数学知识,第二部分(第7章至第14章)是本书的重点,详细讲述了基本ICA模型及其求解过程,第三部分(第15章至第20章)讨论了基本ICA模型的多种扩展形式,第四部分(第21章至第24章)对ICA方法在不同领域的应用做了生动的阐述。

本书可作为不同工程应用领域的大学教师、研究生和科技工作者的ICA入门教材;而对于探索ICA技术的专业研究人员来说,本书也是一本极有价值的参考书。

0-471-40540-X, Independent Component Analysis by Aapo Hyvärinen, Juha Karhunen and Erkki Oja.

Original English language edition copyright © 2001, John Wiley & Sons, Inc. All Rights Reserved. This translation published under license.

本书中文简体字翻译版由 John Wiley & Sons Inc. 授予电子工业出版社。未经出版者预先书面许可,不得以任何方式复制或抄袭本书的任何部分。

版权贸易合同登记号 图字: 01-2006-0894

图书在版编目(CIP)数据

独立成分分析 / (芬)海韦里恩(Hyvärinen, A.)等著;周宗潭等译.

北京:电子工业出版社,2007.6

(国外电子与通信教材系列)

书名原文:Independent Component Analysis

ISBN 978-7-121-04293-5

I. 独... II. ①海... ②周... III. 信号处理-教材 IV. TN911.7

中国版本图书馆CIP数据核字(2007)第060682号

责任编辑:李秦华

印 刷:北京季蜂印刷有限公司

装 订:三河市万和装订厂

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:23.25 字数:595千字

印 次:2007年6月第1次印刷

定 价:49.00元

凡所购买电子工业出版社的图书有缺损问题,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。

质量投诉请发邮件至 zltz@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线:(010)88258888

读者调查表

感谢对我们的支持！非常欢迎留下您的宝贵意见，帮助我们改进出版和服务工作。我们将从信息意见完备的读者中抽取一部分赠阅一本我们的样书（赠书定价限 50 以内，品种我们会与获赠读者沟通）。

姓名：_____ 单位：_____ 职务/职称：_____

邮寄地址：_____ 邮编：_____

电话：_____ 手机：_____ E-mail：_____ 专业方向：_____

您购买的出版物名称					
先进性和实用性	☐ 很好	☐ 好	☐ 一般	☐ 不太好	☐ 差
图书文字可读性	☐ 很好	☐ 好	☐ 一般	☐ 不太好	☐ 差
（光盘使用方便性）	☐ 很好	☐ 好	☐ 一般	☐ 不太好	☐ 差
图书篇幅适宜度	☐ 很合适	☐ 合适	☐ 一般	☐ 不合适	☐ 差
出版物中差错	☐ 极少	☐ 较少	☐ 一般	☐ 较多	☐ 太多
封面（盘面及包装）设计水平	☐ 很好	☐ 好	☐ 一般	☐ 不太好	☐ 差
图书（包括光盘）印装质量	☐ 很好	☐ 好	☐ 一般	☐ 不太好	☐ 差
纸张质量（光盘材质）	☐ 很好	☐ 好	☐ 一般	☐ 不太好	☐ 差
定价	☐ 很便宜	☐ 便宜	☐ 合理	☐ 贵	☐ 太贵
您从何处获取出版物信息	☐ 书目 ☐ 电子社宣传材料 ☐ 书店 ☐ 他人转告 ☐ 网站 ☐ 报刊				
您的具体意见或建议					

您或周围人士有何著述计划 _____

您希望我处增添何种类型的图书 _____

电子工业出版社高等教育分社

联系人：冯小贝 E-mail: fengxiaobei@phei.com.cn, te_service@phei.com.cn

地址：北京市万寿路 173 信箱 1102 室 邮编：100036 电话：010-88254555

传真：010-88254560

反侵权盗版声明

电子工业出版社依法对本作品享有专有出版权。任何未经权利人书面许可，复制、销售或通过信息网络传播本作品的行为；歪曲、篡改、剽窃本作品的行为，均违反《中华人民共和国著作权法》，其行为人应承担相应的民事责任和行政责任，构成犯罪的，将被依法追究刑事责任。

为了维护市场秩序，保护权利人的合法权益，我社将依法查处和打击侵权盗版的单位和个人。欢迎社会各界人士积极举报侵权盗版行为，本社将奖励举报有功人员，并保证举报人的信息不被泄露。

举报电话：(010) 88254396；(010) 88258888

传 真：(010) 88254397

E-mail : dbqq@phei.com.cn

通信地址：北京市万寿路 173 信箱

电子工业出版社总编办公室

邮 编：100036

序

2001年7月间,电子工业出版社的领导同志邀请各高校十几位通信领域方面的老师,商量引进国外教材问题。与会同志对出版社提出的计划十分赞同,大家认为,这对我国通信事业、特别是对高等院校通信学科的教学工作会很有好处。

教材建设是高校教学建设的主要内容之一。编写、出版一本好的教材,意味着开设了一门好的课程,甚至可能预示着一个崭新学科的诞生。20世纪40年代MIT林肯实验室出版的一套28本雷达丛书,对近代电子学科、特别是对雷达技术的推动作用,就是一个很好的例子。

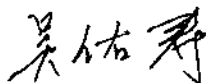
我国领导部门对教材建设一直非常重视。20世纪80年代,在原教委教材编审委员会的领导下,汇集了高等院校几百位富有教学经验的专家,编写、出版了一大批教材;很多院校还根据学校的特点和需要,陆续编写了大量的讲义和参考书。这些教材对高校的教学工作发挥了极好的作用。近年来,随着教学改革不断深入和科学技术的飞速进步,有的教材内容已比较陈旧、落后,难以适应教学的要求,特别是在电子学和通信技术发展神速、可以讲是日新月异的今天,如何适应这种情况,更是一个必须认真考虑的问题。解决这个问题,除了依靠高校的老师 and 专家撰写新的符合要求的教科书外,引进和出版一些国外优秀电子与通信教材,尤其是有选择地引进一批英文原版教材,是会有好处的。

一年多来,电子工业出版社为此做了很多工作。他们成立了一个“国外电子与通信教材系列”项目组,选派了富有经验的业务骨干负责有关工作,收集了230余种通信教材和参考书的详细资料,调来了100余种原版教材样书,依靠由20余位专家组成的出版委员会,从中精选了40多种、内容丰富,覆盖了电路理论与应用、信号与系统、数字信号处理、微电子、通信系统、电磁场与微波等方面,既可作为通信专业本科生和研究生的教学用书,也可作为有关专业人员的参考材料。此外,这批教材,有的翻译为中文,还有部分教材直接影印出版,以供教师用英语直接授课。希望这些教材的引进和出版对高校通信教学和教材改革能起一定作用。

在这里,我还要感谢参加工作的各位教授、专家、老师与参加翻译、编辑和出版的同志们。各位专家认真负责、严谨细致、不辞辛劳、不怕琐碎和精益求精的态度,充分体现了中国教育工作者和出版工作者的良好美德。

随着我国经济建设的发展和科学技术的不断进步,对高校教学工作会不断提出新的要求和希望。我想,无论如何,要做好引进国外教材的工作,一定要联系我国的实际。教材和学术专著不同,既要注意科学性、学术性,也要重视可读性,要深入浅出,便于读者自学;引进的教材要适应高校教学改革的需要,针对目前一些教材内容较为陈旧的问题,有目的地引进一些先进的和正在发展中的交叉学科的参考书;要与国内出版的教材相配套,安排好出版英文原版教材和翻译教材的比例。我们努力使这套教材能尽量满足上述要求,希望它们能放在学生们的课桌上,发挥一定的作用。

最后,预祝“国外电子与通信教材系列”项目取得成功,为我国电子与通信教学和通信产业的发展培土施肥。也恳切希望读者能对这些书籍的不足之处、特别是翻译中存在的问题,提出意见和建议,以便再版时更正。



中国工程院院士、清华大学教授

“国外电子与通信教材系列”出版委员会主任

出版说明

进入21世纪以来,我国信息产业在生产和科研方面都大大加快了发展速度,并已成为国民经济发展的支柱产业之一。但是,与世界上其他信息产业发达的国家相比,我国在技术开发、教育培训等方面都还存在着较大的差距。特别是在加入WTO后的今天,我国信息产业面临着国外竞争对手的严峻挑战。

作为我国信息产业的专业科技出版社,我们始终关注着全球电子信息技术的发展方向,始终把引进国外优秀电子与通信信息技术教材和专业书籍放在我们工作的重要位置上。在2000年至2001年间,我社先后从世界著名出版公司引进出版了40余种教材,形成了一套“国外计算机科学教材系列”,在全国高校以及科研部门中受到了欢迎和好评,得到了计算机领域的广大教师与科研工作者的充分肯定。

引进和出版一些国外优秀电子与通信教材,尤其是有选择地引进一批英文原版教材,将有助于我国信息产业培养具有国际竞争能力的技术人才,也将有助于我国国内在电子与通信教学工作中掌握和跟踪国际发展水平。根据国内信息产业的现状、教育部《关于“十五”期间普通高等教育教材建设与改革的意见》的指示精神以及高等院校老师们反映的各种意见,我们决定引进“国外电子与通信教材系列”,并随后开展了大量准备工作。此次引进的国外电子与通信教材均来自国际著名出版商,其中影印教材约占一半。教材内容涉及的学科方向包括电路理论与应用、信号与系统、数字信号处理、微电子、通信系统、电磁场与微波等,其中既有本科专业课程教材,也有研究生课程教材,以适应不同院系、不同专业、不同层次的师生对教材的需求,广大师生可自由选择 and 自由组合使用。我们还将与国外出版商一起,陆续推出一些教材的教学支持资料,为授课教师提供帮助。

此外,“国外电子与通信教材系列”的引进和出版工作得到了教育部高等教育司的大力支持和帮助,其中的部分引进教材已通过“教育部高等学校电子信息科学与工程类专业教学指导委员会”的审核,并得到教育部高等教育司的批准,纳入了“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”。

为做好该系列教材的翻译工作,我们聘请了清华大学、北京大学、北京邮电大学、南京邮电大学、东南大学、西安交通大学、天津大学、西安电子科技大学、电子科技大学、中山大学、哈尔滨工业大学、西南交通大学等著名高校的教授和骨干教师参与教材的翻译和审校工作。许多教授在国内电子与通信专业领域享有较高的声望,具有丰富的教学经验,他们的渊博学识从根本上保证了教材的翻译质量和专业学术方面的严格与准确。我们在此对他们的辛勤工作与贡献表示衷心的感谢。此外,对于编辑的选择,我们达到了专业对口;对于从英文原书中发现的错误,我们通过作者联络、从网上下载勘误表等方式,逐一进行了修订;同时,我们对审校、排版、印制质量进行了严格把关。

今后,我们将进一步加强同各高校教师的密切关系,努力引进更多的国外优秀教材和教学参考书,为我国电子与通信教材达到世界先进水平而努力。由于我们对国内外电子与通信教育的发展仍存在一些认识上的不足,在选题、翻译、出版等方面的工作中还有许多需要改进的地方,恳请广大师生和读者提出批评及建议。

电子工业出版社

教材出版委员会

主 任	吴佑寿	中国工程院院士、清华大学教授
副主任	林金桐	北京邮电大学校长、教授、博士生导师
	杨千里	总参通信部副部长，中国电子学会会士、副理事长 中国通信学会常务理事、博士生导师
委 员	林孝康	清华大学教授、博士生导师、电子工程系副主任、通信与微波研究所所长 教育部电子信息科学与工程类专业教学指导分委员会委员
	徐安士	北京大学教授、博士生导师、电子学系主任
	樊昌信	西安电子科技大学教授、博士生导师 中国通信学会理事、IEEE 会士
	程时昕	东南大学教授、博士生导师
	郁道银	天津大学副校长、教授、博士生导师 教育部电子信息科学与工程类专业教学指导分委员会委员
	阮秋琦	北京交通大学教授、博士生导师 计算机与信息技术学院院长、信息科学研究所所长 国务院学位委员会学科评议组成员
	张晓林	北京航空航天大学教授、博士生导师、电子信息工程学院院长 教育部电子信息科学与电气信息类基础课程教学指导分委员会副主任委员 中国电子学会常务理事
	郑宝玉	南京邮电大学副校长、教授、博士生导师 教育部电子信息与电气学科教学指导委员会委员
	朱世华	西安交通大学副校长、教授、博士生导师 教育部电子信息科学与工程类专业教学指导分委员会副主任委员
	彭启琮	电子科技大学教授、博士生导师、通信与信息工程学院院长 教育部电子信息科学与电气信息类基础课程教学指导分委员会委员
	毛军发	上海交通大学教授、博士生导师、电子信息与电气工程学院副院长 教育部电子信息与电气学科教学指导委员会委员
	赵尔沅	北京邮电大学教授、《中国邮电高校学报（英文版）》编委会主任
	钟允若	原邮电科学研究院副院长、总工程师
	刘 彩	中国通信学会副理事长兼秘书长，教授级高工 信息产业部通信科技委副主任
	杜振民	电子工业出版社原副社长
	王志功	东南大学教授、博士生导师、射频与光电集成电路研究所所长 教育部高等学校电子电气基础课程教学指导分委员会主任委员
	张中兆	哈尔滨工业大学教授、博士生导师、电子与信息技术研究院院长
	范平志	西南交通大学教授、博士生导师、信息科学与技术学院院长

译者序

目前,独立成分分析(ICA)这门新的数据处理技术已得到了国内外学术界的普遍认可和广泛关注,并在不同的研究和应用领域开始发挥重要作用。ICA这一专业术语及其内涵,“鸡尾酒会”问题、脑电信号分离、通信系统的盲分离等ICA的典型应用问题,以及ICA中有关峭度、不动点算法等一系列基本概念,已为国内许多从事数据处理的科研工作者所熟悉。但是,要了解独立成分分析背后所隐含的重要应用背景与数学理论基础;把握ICA的应用范围及相应的各种限制;了解如何应用独立成分分析的思路,从而针对具体的专业应用问题提出更为合理的分析方法,这些更深层次的内容,可能并非通过阅读几篇综述文献或相关专业文献,或学习、分析和使用MATLAB工具包中的那些现成算法就能很好地掌握的。然而,目前国内仍然没有一本比较全面而深入的中文教材来供那些对ICA感兴趣的初学者和不同专业领域的研究人员做参考。这种状况下,翻译出版一本比较权威的ICA教材就显得很有必要。本书的英文版是国际上第一本对ICA这门新技术进行全面介绍的综合性专著,作者Aapo Hyvärinen, Juha Karhunen 和Erikki Oja为ICA方法的建立做出过重要贡献,并且一直活跃在ICA的相关研究领域。本书的内容主要取材于作者自己的研究小组所开展的原创性研究工作,另外还包含了更多的相关理论、新算法,以及在各个领域的应用。本书具有较强的完备性和自包含性,可以作为不同工程应用领域的大学教师、研究生和科技工作者的ICA入门和自学教材。

本书的翻译工作由胡德文教授联系与组织。全书分为四个部分,第一部分由董国华主译,董国华最终校对;第二部分由周宗潭和刘杨翻译,刘杨校对;第三部分由徐昕翻译,第四部分由胡德文和冯贵玉翻译;第三部分和第四部分由周宗潭校对,全书的统稿工作由周宗潭和胡德文完成。另外,王刚、杨竹青、刘亚东、颜莉蓉、沈辉等多位同志也参与了本书的翻译校对工作。本书原作者对中文版的出版给予了热情的支持和帮助,并专门为中文版做序;电子工业出版社为本书的出版做了大量的工作,由于译者的科研工作很紧张,导致翻译工作中间多次间断和拖后,影响了编辑出版的进度,正是由于出版社编辑们的严格把关、耐心帮助和热情鼓励,才使得本书最终得以及时与读者见面,译者在此一并表示真诚的感谢。

原作者序

非常感谢胡德文教授为把我们的《独立成分分析》一书翻译成中文(原书由 John Wiley & Son 于 2001 年出版)而所做出的重要努力。

我们于 1999 年开始撰写本书,当时 ICA 还是一种相当新颖的方法,它的前景在一定程度上尚未可定:它是否能够成为实际应用中的一种重要技术、其理论是否已得到了充分的发展,这些都还是不清楚的。

应该说,在应用和理论两个方面,我们都是相当幸运的。一方面,许多实际应用领域的相关工作已经证实了 ICA 是非常有用的,而在这些领域中,神经信息学和生物信息学尤其值得特别提及;另一方面,本书中所阐述的理论也经受住了时间的考验,现在已经被广泛接受。

中国的科学家已经对 ICA 的研究做出了重要的贡献,我们希望本书能够吸引和激励更多的参与者。同样也希望对 ICA 应用感兴趣的中国学者和专家能够在本书中找到有用的原则性引导,并在理论上有所帮助。

于赫尔基辛, 2006 年 10 月

Aapo Hyvärinen, Juha Karhunen, Erkki Oja

英文原文:

We are very grateful to Prof. Dewen Hu for his great efforts in translating our book "Independent component analysis" (originally published by John Wiley and Sons in 2001) into Chinese.

When we started writing the book in 1999, ICA was still a rather new method, and its future was somewhat uncertain. It was not clear whether it would become an important technique for practical applications, and whether the theory was sufficiently developed.

We have been quite fortunate in both respects. On the one hand, ICA has proven very useful in a large number of application fields, of which neuroinformatics and bioinformatics deserve special mention. On the other hand, the theory that we expounded in the book has stood the test of time, and is now well-established.

Chinese scientists have made important contributions to research on ICA, and we hope this book will inspire many more. We equally hope that Chinese researchers and professionals interested in applications of ICA will find useful guidelines and theoretical understanding in this book.

Helsinki, October 2006

Aapo Hyvärinen, Juha Karhunen, and Erkki Oja

序 言

独立成分分析(ICA)是一种统计和计算技术,用于揭示随机变量、测量数据或信号中的隐藏成分。对于通常以大量样本数据库形式给出的多元观测数据,ICA 定义了一个生成模型。此模型假设观测数据变量是某些未知内在变量的线性或非线性混合,而且不仅内在变量是未知的,实现混合的系统也是未知的。我们还假定那些内在变量是非高斯且相互独立的,并称它们为观测数据的独立成分。这些独立成分(也可称为源或因子)可以通过 ICA 方法找到。

ICA 可以看成是主成分分析和因子分析的延展。但是,ICA 是一项更强有力的技术,当经典方法完全失效时,它仍然能够找出支撑观测数据的内在因子或源。

ICA 所分析的数据可能来源于许多不同的应用领域,包括数字图像、文档数据库,以及经济指标和心理学测量。在许多实例中,测量结果是以一组并行(Parallel)信号或时间序列的形式给出的,盲源分离(Blind source separation)这一术语可以用于刻画该类问题。盲源分离的典型例子有:多个麦克风拾取同时发出语音的混合信号、多个传感器记录的脑电波、手机中的射频干扰信号或从某些工业过程中得到的并行时间序列。

ICA 技术也是一项相对较新的发明。它是 20 世纪 80 年代初期首先在神经网络建模领域中引入的。到 20 世纪 90 年代中期,几个研究小组引入了一些极为成功的新算法,类似鸡尾酒会效应问题的演示,也给人们留下了深刻的印象:ICA 可以从混合信号中找出每个人的语音波形。因此,无论是在神经网络领域(特别是无监督学习),还是在更为一般的高级统计学和信号处理领域中,ICA 都成了激动人心的新话题之一。ICA 在生物信号处理、语音信号分离、无线通信、故障诊断、特征提取、金融时间序列分析和数据挖掘等现实领域中的应用报道也正在不断涌现。

在过去的 20 年内,ICA 的文章大量发表在信号处理、人工神经网络、统计学、信息论及各种应用领域的期刊和会议文集中。最近还举办了几场关于 ICA 的专题会议和学术研讨[70,348],出版了一些关于 ICA,盲源分离以及其他相关主题的论文合集[315,173,150]和专著[105,267,149]。这些现有的文献对于其预期读者来说是非常有用的,但它们大都只集中于论述 ICA 方法的某些特定主题;而简短的专业论文和书籍章节中通常不包含数学和统计学的预备知识。因此,对更广泛的读者群来说,完全理解 ICA 这个技术性相当强的主题变得非常困难。

直到目前为止还没有一本内容广泛、细节丰富的教材:既能覆盖数学背景知识、基本原理和求解算法,又能兼顾 ICA 实际应用的现状。本书的出版目的就是希望填补这个空缺,并充当 ICA 的入门导引。

本书的预期读者可能来自多个学科:诸如统计学、信号处理、神经网络、应用数学、神经和认知科学、信息论、人工智能和工程领域。不论是研究人员、学生还是工程实践领域的工作者都可以使用本书。我们还做了各种努力使本书能够自足(self-contained),以便那些仅有大学微积分、矩阵代数、概率论和统计学基本背景知识的读者阅读。本书也适合作为 ICA 方面的研究生教材,许多章节后都有习题和计算机练习作业。

本书的范围和内容

本书提供了把 ICA 作为统计与计算技术的全而导引,重点是数学原理和基本算法。大部分

素材基于作者自己的研究小组中开展的原创性研究工作,这从不同主题所占比重的角度可以自然地反映出来。本书覆盖面较宽,特别涵盖了那些能同时适用于大规模问题求解的算法:即算法在观测变量数目和数据点个数都非常巨大时仍然有效。当 ICA 大量地用于真正的现实应用问题(而不是直到最近仍占主流的玩偶型问题或小规模探讨性研究)时,这些算法就能在不久的将来得到越来越多的应用。卷积型混合、时滞及其他一些不同于 ICA 的盲源分离技术中涉及到的更为专门的信号处理方法,本书相应地强调得略少一些。

由于 ICA 是一个进展迅速的研究领域,不可能在一本教材中囊括每项已报道过的研究进展。我们已尽力在适当的地方涵盖了其他研究者的核心贡献,并给出了一个庞大的文献目录,以便进一步参考。对于可能被遗漏的那些重要贡献,我们深表歉意。

为便于阅读,本书分成了四个部分。

- 第一部分给出了**数学预备知识**,引入了书中后面部分会用到的基本数学概念。该部分从第 2 章的概率论速成教程开始。假设读者已熟悉本章中的大部分内容,不过本章还引入了特为 ICA 预备的一些概念,如高阶累积量和多变量概率理论。在第 3 章中,接着讨论最优化理论和梯度法,它们在构造 ICA 算法时将会用到。第 4 章回顾和综述了估计理论。信息论是 ICA 的一个补充性理论框架,它包含在第 5 章中。第 6 章是第一部分的总结,其中讨论了与 ICA 相关的主成分分析、因子分析和去相关方法。

更为自信的读者可以按照其意愿跳过第一部分中部分或全部导论性的章节,而直接从第二部分中 ICA 的原理开始学习。

- 第二部分涵盖并解决了**ICA 基本模型**;即 ICA 中经典的线性瞬态无噪声混合模型,它构成了 ICA 理论的核心。第 7 章引入了该基本模型,并讨论了混合矩阵的可辨识性问题。后面各章讨论对该模型进行估计的不同方法。一个核心的原则是非高斯性,它与 ICA 的关系在第 8 章中首次进行了讨论。接下来我们回顾了极大似然原理(第 9 章)和极小互信息原理(第 10 章),并展示了这些基本原理之间的联系。第 11 章讨论了使用高阶累积张量的代数方法,第 12 章回顾了基于非线性去相关的早期 ICA 工作以及非线性主成分方法,这两章中的内容可能不太适合于(本书)导论教程的性质。在这些章节中,我们还讨论了与每一种基本原理相对应的计算独立成分和混合矩阵的实用算法。在第 13 章中,接着讨论了主要与数据预处理和数据降维相关的一些实际问题与具体考虑,其中包括引导使用者如何把 ICA 真正确实地应用于自己的具体问题。第 14 章综述和比较了各种 ICA 方法,并对第二部分进行了总结。
- 第三部分中给出了 ICA 基本模型的各种扩展。相比第二部分而言,这部分内容具有更多的探索性质(面不够成熟),因为大多数扩展是最近才引入的,尚存在许多未解决的问题。如果要开设一门 ICA 的导论课程,可能只需在该部分挑选出几章即可。我们首先在第 15 章中讨论了在 ICA 模型中引入显式观测噪声的问题,然后在第 16 章中探讨独立成分个数多于混合观测量个数的情况。第 17 章进一步将模型进行推广:混合过程可以是非常一般的非线性形式。第 18 章讨论了估计另外一种线性混合模型的方法,该混合模型与 ICA 模型类似,但是假设的前提条件差别较大:即成分不是非高斯的,但具有某种时间依赖性。第 19 章讨论了混合系统中包含卷积的情况。ICA 更进一步的扩展,特别是不要求成分严格独立的模型,将在第 20 章中给出。
- 第四部分探讨 ICA 方法的一些应用:特征提取(第 21 章)与图像处理和视觉研究都有关

系;脑成像的应用(第 22 章)集中讨论人脑的电/磁活动测量。第 23 章讨论 ICA 在无线通信中的应用。ICA 在计量经济学和音频信号处理中的应用,以及 ICA 对其他应用领域的启示在第 24 章中探讨。

书中那些非常复杂和入门课程中可以跳过的章节,我们都已用星号标出。本书中给出的一些算法,其对应软件是公开的,可以通过互联网在我们的网页或其他 ICA 研究者提供的网页中获得。包含真实数据的数据库也同时提供下载,以便测试算法。我们还为本书专门制作了网页,其中包含了一些适当的提示,地址是:

www.cis.hut.fi/projects/ica/book

建议读者通过访问这些网页以获得更多的信息。

本书由三位作者合作完成,A. Hyvärinen 负责第 5 章、第 7 章、第 8 章、第 9 章、第 10 章、第 11 章、第 13 章、第 14 章、第 15 章、第 16 章、第 18 章、第 20 章、第 21 章和第 22 章;J. Karhunen 负责第 2 章、第 4 章、第 17 章、第 19 章和第 23 章;E. Oja 负责第 3 章、第 6 章和第 12 章。第 1 章和第 24 章则由三位作者联合撰写。

致谢

感谢许多 ICA 研究者,他们的原创性贡献形成了 ICA 的基础,并使得本书的问世成为可能。我们特别对丛书主编 Simon Haykin 致以谢意,多年以来,他在信号处理和神经网络方面的文章和著作一直鼓舞着我们。

本书的某些部分,是建立在与赫尔辛基技术大学(Helsinki University of Technology)中我们研究小组的其他成员紧密合作基础上的。第 21 章主要基于我们与 Patrik Hoyer 的合作研究,该章所有实验也都是他完成的。第 22 章基于 Ricardo Vigário 的实验和素材。13.2.2 节基于我们与 Jaakko Särelä 及 Ricardo Vigário 的联合工作。16.2.3 节由 Razvan Cristescu 提供。20.3 节基于我们和 Ella Bingham 的联合工作,14.4 节基于我们和 Xavier Giannakopoulos 的联合工作,20.2.3 节则基于我们和 Patrik Hoyer 及 Mika Inki 的联合工作。第 19 章部分基于 Kari Torkkola 提供的素材。第 17 章中许多内容基于我们和 Harri Valpola 及 Petteri Pajunen 的联合工作,24.1 节是我们和 Kimmo Kiviluoto 及 Simona Malaroiu 联合完成的。

在本书写作的不同阶段,有几个人友善地同意阅读并评述了该书的部分或全部内容。为此,我们诚挚地感谢 Ella Bingham, Jean-François Cardoso, Adrian Flanagan, Mark Girolami, Antti Honkela, Jarmo Hurri, Petteri Pajunen, Tapani Ristaniemi 和 Kari Torkkola。Leila Koivisto 在编辑上给予了我们帮助,Antti Honkela, Mika Ilmoniemi, Merja Oja 和 Tapani Raiko 在某些插图上提供了帮助。

我们在 ICA 方面的研究工作,以及本书写作是在芬兰赫尔辛基技术大学的神经网络研究中心(Neural Networks Research Centre)进行的。研究工作的部分资助来自于“BLISS”项目(欧盟)和“信息处理新原理”项目(芬兰科学院),在此深表谢意。另外,A.H.(即 A. Hyvärinen,原书只用了姓名的缩写)要表达对赫尔辛基大学心理学系 Göte Nyman 和 Jukka Häkkinen 的谢意,他们提供的友好服务,使得本书的部分内容能够完成。

Aapo Hyvärinen, Juha Karhunen, Erkki Oja
埃斯波(Espoo), 芬兰(Finland)

2001 年 3 月

目 录

第 1 章 引论	1
1.1 多元数据的线性表示	1
1.2 盲源分离	2
1.3 独立成分分析	4
1.4 ICA 的历史	7

第一部分 数学预备知识

第 2 章 随机向量和独立性	10
2.1 概率分布和概率密度	10
2.2 期望和矩	13
2.3 不相关性和独立性	17
2.4 条件密度和贝叶斯法则	20
2.5 多元高斯密度	22
2.6 变换的密度	25
2.7 高阶统计量	25
2.8 随机过程*	31
2.9 小结与文献引述	36
习题	37
计算机练习	40
第 3 章 梯度和最优化方法	42
3.1 向量和矩阵梯度	42
3.2 无约束优化和学习规则	46
3.3 约束优化的学习规则	54
3.4 小结与文献引述	56
习题	56
计算机练习	57
第 4 章 估计理论	58
4.1 基本概念	58
4.2 估计器的性质	59
4.3 矩方法	62
4.4 最小二乘估计	64
4.5 极大似然法	67
4.6 贝叶斯估计*	69

4.7 小结与文献引述	73
习题	74
计算机练习	77
第5章 信息论	78
5.1 熵	78
5.2 互信息	81
5.3 极大熵	82
5.4 负熵	83
5.5 通过累积量逼近熵	83
5.6 用非多项式函数近似熵	85
5.7 小结与文献引述	89
习题	89
计算机练习	90
本章附录:有关证明	90
第6章 主成分分析和白化	93
6.1 主成分	93
6.2 在线学习的 PCA	97
6.3 因子分析	101
6.4 白化	102
6.5 正交化	103
6.6 小结与文献引述	105
习题	105

第二部分 独立成分分析基本模型

第7章 什么是独立成分分析	108
7.1 动机	108
7.2 独立成分分析的定义	111
7.3 ICA 的实例	114
7.4 ICA 比白化更加强大	115
7.5 高斯变量为何不能适用	117
7.6 小结与文献引述	118
习题	119
计算机练习	119
第8章 极大化非高斯性的 ICA 估计方法	120
8.1 非高斯就是独立的	120
8.2 用峭度来度量非高斯性	123
8.3 用负熵度量非高斯性	129
8.4 估计多个独立成分	137
8.5 ICA 与投影寻踪	139

8.6 小结与文献引述	141
习题	141
计算机练习	142
本章附录:有关证明	143
第 9 章 ICA 的极大似然估计方法	145
9.1 ICA 模型中的似然度	145
9.2 极大似然估计算法	147
9.3 信息极大原理	151
9.4 例子	151
9.5 小结与文献引述	153
习题	154
计算机练习	154
本章附录:有关证明	155
第 10 章 极小化互信息的 ICA 估计方法	156
10.1 用互信息定义 ICA	156
10.2 互信息和非高斯性	157
10.3 互信息和似然估计	157
10.4 极小化互信息的算法	158
10.5 例子	158
10.6 小结与文献引述	159
习题	159
计算机练习	159
第 11 章 基于张量的 ICA 估计方法	160
11.1 累积张量的定义	160
11.2 由张量特征值得到独立成分	160
11.3 用幂法计算张量分解	162
11.4 特征矩阵的联合近似对角化	163
11.5 加权相关矩阵方法	164
11.6 小结与文献引述	165
习题	165
计算机练习	165
第 12 章 基于非线性去相关和非线性 PCA 的 ICA 估计方法	166
12.1 非线性相关和独立性	166
12.2 Héroult-Jutten 算法	168
12.3 Cichocki-Unbenauen 算法	169
12.4 估计函数方法*	170
12.5 通过独立性的等变自适应分离(EASI)	171
12.6 非线性主成分	172

12.7	非线性 PCA 指标和 ICA	175
12.8	非线性 PCA 指标的学习规则	176
12.9	小结与文献引述	182
	习题	182
第 13 章	实际的考虑	184
13.1	时间滤波作为预处理	184
13.2	用 PCA 进行预处理	186
13.3	应该估计多少个成分	188
13.4	算法选择	189
13.5	小结与文献引述	189
	习题	189
	计算机练习	190
第 14 章	基本 ICA 方法的综述和比较	191
14.1	目标函数和算法	191
14.2	ICA 估计原理的联系	191
14.3	统计最优非线性函数	193
14.4	ICA 算法的实验比较	195
14.5	参考文献	199
14.6	基本 ICA 方法小结	200
	本章附录:有关证明	201
第三部分 ICA 的扩展及其相关方法		
第 15 章	有噪声的 ICA 模型	204
15.1	定义	204
15.2	传感器噪声和信号源噪声	204
15.3	噪声成分数目较少的情况	205
15.4	混合矩阵的估计	205
15.5	估计无噪声的独立成分	208
15.6	通过稀疏编码收缩而去噪	211
15.7	小结	211
第 16 章	具有超完备基的 ICA 模型	212
16.1	独立成分的估计	212
16.2	估计混合矩阵	213
16.3	小结	217
第 17 章	非线性 ICA	218
17.1	非线性 ICA 与 BSS	218
17.2	后非线性混合的分离	221
17.3	采用自组织映射的非线性 BSS	222