

异步图书
www.epubit.com.cn

DEEP LEARNING 深度学习

[美] 伊恩·古德费洛 (Ian Goodfellow) [加] 约书亚·本吉奥 (Yoshua Bengio)

[加] 亚伦·库维尔 (Aaron Courville) 著

赵申剑 黎彧君 符天凡 李凯 译 张志华等 审校

中国工信出版集团

人民邮电出版社
POSTS & TELECOM PRESS

DEEP LEARNING

深度学习

[美] 伊恩·古德费洛 (Ian Goodfellow) [加] 约书亚·本吉奥 (Yoshua Bengio)

[加] 亚伦·库维尔 (Aaron Courville) 著

赵申剑 黎彧君 符天凡 李凯 译 张志华等 审校

人民邮电出版社
北京

图书在版编目(CIP)数据

深度学习 / (美) 伊恩·古德费洛
(Ian Goodfellow), (加) 约书亚·本吉奥
(Yoshua Bengio), (加) 亚伦·库维尔
(Aaron Courville) 著; 赵申剑等译. — 北京: 人民
邮电出版社, 2017.8 (2017.8 重印)
ISBN 978-7-115-46147-6

I. ①深… II. ①伊… ②约… ③亚… ④赵… III.
①机器学习 IV. ①TP181

中国版本图书馆CIP数据核字(2017)第153811号

版权声明

Deep Learning by Ian Goodfellow, Yoshua Bengio, Aaron Courville

© 2016 Massachusetts Institute of Technology

Simplified Chinese translation copyright © 2017 by Posts & Telecom Press.

This edition published by arrangement with MIT Press through Bardon- Chinese Media Agency. All rights reserved.

本书简体中文翻译版由 Bardon-Chinese Media Agency 代理 MIT Press 授权人民邮电出版社独家出版发行。未经出版者书面许可, 不得以任何方式复制或节录本书中的任何内容。

版权所有, 侵权必究。

-
- ◆ 著 [美] Ian Goodfellow [加] Yoshua Bengio
[加] Aaron Courville
译 赵申剑 黎彧君 符天凡 李 凯
审 校 张志华 等
责任编辑 王峰松
责任印制 焦志炜
- ◆ 人民邮电出版社出版发行 北京市丰台区成寿寺路 11 号
邮编 100164 电子邮件 315@ptpress.com.cn
网址 <http://www.ptpress.com.cn>
北京画中画印刷有限公司印刷
- ◆ 开本: 787×1092 1/16
印张: 33
字数: 805 千字 2017 年 8 月第 1 版
印数: 35 001-55 000 册 2017 年 8 月北京第 4 次印刷
- 著作权合同登记号 图字: 01-2016-1194 号
-

定价: 168.00 元

读者服务热线: (010)81055410 印装质量热线: (010)81055316

反盗版热线: (010)81055315

广告经营许可证: 京东工商广登字 20170147 号

内容提要

《深度学习》由全球知名的三位专家 Ian Goodfellow、Yoshua Bengio 和 Aaron Courville 撰写，是深度学习领域奠基性的经典教材。全书的内容包括 3 个部分：第 1 部分介绍基本的数学工具和机器学习的概念，它们是深度学习的预备知识；第 2 部分系统深入地讲解现今已成熟的深度学习方法和技術；第 3 部分讨论某些具有前瞻性的方向和想法，它们被公认为是深度学习未来的研究重点。

《深度学习》适合各类读者阅读，包括相关专业的大学生或研究生，以及不具有机器学习或统计背景、但是想要快速补充深度学习知识，以便在实际产品或平台中应用的软件工程师。

作者简介

Ian Goodfellow, 谷歌公司 (Google) 的研究科学家, 2014 年蒙特利尔大学机器学习博士。他的研究兴趣涵盖大多数深度学习主题, 特别是生成模型以及机器学习的安全和隐私。Ian Goodfellow 在研究对抗样本方面是一位有影响力的早期研究者, 他发明了生成式对抗网络, 在深度学习领域贡献卓越。

Yoshua Bengio, 蒙特利尔大学计算机科学与运筹学系 (DIRO) 的教授, 蒙特利尔学习算法研究所 (MILA) 的负责人, CIFAR 项目的共同负责人, 加拿大统计学习算法研究主席。Yoshua Bengio 的主要研究目标是了解产生智力的学习原则。他还教授“机器学习”研究生课程 (IFT6266), 并培养了一大批研究生和博士后。

Aaron Courville, 蒙特利尔大学计算机科学与运筹学系的助理教授, 也是 LISA 实验室的成员。目前他的研究兴趣集中在发展深度学习模型和方法, 特别是开发概率模型和新颖的推断方法。Aaron Courville 主要专注于计算机视觉应用, 在其他领域, 如自然语言处理、音频信号处理、语音理解和其他 AI 相关任务方面也有所研究。

中文版审校者简介

张志华, 北京大学数学科学学院统计学教授, 北京大学大数据研究中心和北京大数据研究院数据科学教授, 主要从事机器学习和应用统计学的教学与研究。

译者简介

赵申剑, 上海交通大学计算机系硕士研究生, 研究方向为数值优化和自然语言处理。

黎彧君, 上海交通大学计算机系博士研究生, 研究方向为数值优化和强化学习。

符天凡, 上海交通大学计算机系硕士研究生, 研究方向为贝叶斯推断。

李凯, 上海交通大学计算机系博士研究生, 研究方向为博弈论和强化学习。

中文版推荐语(按姓氏拼音排序)

《深度学习》的中文译本忠实客观地表述了英文原稿的内容。本书的三位共同作者是一个老中青三代结合的整体,既有深度学习领域的奠基人,也有处于研究生涯中期的领域中坚,更有领域里近年涌现的新星。所以,本书的结构行文很好地考虑到了处于研究生涯各个不同阶段的学生和研究人员的需求,是一本非常好的关于深度学习的教科书。

深度学习近年来在学术界和产业界都取得了极大的成功,但诚如本书作者所说,深度学习是创建人工智能系统的一个重要的方法,但不是全部的方法。期望在人工智能领域有所作为的研究人员,可以通过本书充分思考深度学习和传统机器学习、人工智能算法的联系和区别,共同推进本领域的发展。

—— 微软研究院首席研究员华刚博士

这是一本还在写作阶段就被开发、研究和工程人员极大关注的深度学习教科书。它的出版表明我们进入了一个系统化理解和组织深度学习框架的新时代。这本书从浅入深介绍了基础数学、机器学习经验,以及现阶段深度学习的理论和发展。它能帮助 AI 技术爱好者和从业人员在三位专家学者的思维带领下全方位了解深度学习。

—— 腾讯优图杰出科学家、香港中文大学教授贾佳亚

深度学习代表了我们这个时代的人工智能技术。这部由该领域最权威的几位学者 Goodfellow、Bengio、Courville 撰写的题为《深度学习》的著作,涵盖了深度学习的基础与应用、理论与实践等各个方面的主要技术,观点鲜明,论述深刻,讲解详尽,内容充实。相信这是每一位关注深度学习人士的必读书目和必备宝典。感谢张志华教授等的辛勤审校,使这部大作能够这么快与中文读者见面。

—— 华为诺亚方舟实验室主任,北京大学、南京大学客座教授,IEEE Fellow 李航

从基础前馈神经网络到深度生成模型,从数学模型到最佳实践,这本书覆盖了深度学习的各个方面。《深度学习》是当下最适合的入门书籍,强烈推荐给此领域的研究者和从业人员。

—— 亚马逊主任科学家、Apache MXNet 发起人之一李沐

出自三位深度学习最前沿权威学者的教科书一定要在案前放一本。本书的第二部分是精华,对深度学习的基本技术进行了深入浅出的精彩阐述。

—— ResNet 作者之一、Face++ 首席科学家孙剑

过去十年里，深度学习的广泛应用开创了人工智能的新时代。这本教材是深度学习领域有重要影响的几位学者共同撰写。它涵盖了深度学习的主要方向，为想进入该领域的研究人员、工程师以及初学者提供了一个很好的系统性教材。

—— 香港中文大学信息工程系主任汤晓鸥教授

这是一本教科书，又不只是一本教科书。任何对深度学习感兴趣的读者，本书在很长一段时间里，都将是你能获得的最全面系统的资料，以及思考并真正推进深度学习产业应用、构建智能化社会框架的绝佳理论起点。

—— 新智元创始人兼 CEO 杨静

译者序

青山遮不住，毕竟东流去

深度学习这个术语自 2006 年被正式提出后，在最近 10 年得到了巨大发展。它使人工智能 (AI) 产生了革命性的突破，让我们切实地领略到人工智能给人类生活带来改变的潜力。2016 年 12 月，MIT 出版社出版了 Ian Goodfellow、Yoshua Bengio 和 Aaron Courville 三位学者撰写的《Deep Learning》一书。三位作者一直耕耘于机器学习领域的前沿，引领了深度学习的发展潮流，是深度学习众多方法的主要贡献者。该书正应其时，一经出版就风靡全球。

该书包括 3 个部分，第 1 部分介绍基本的数学工具和机器学习的概念，它们是深度学习的预备知识。第 2 部分系统深入地讲解现今已成熟的深度学习方法和技术。第 3 部分讨论某些具有前瞻性的方向和想法，它们被公认为是深度学习未来的研究重点。因此，该书适用于不同层次的读者。我本人在阅读该书时受到启发良多，大有裨益，并采用该书作为教材在北京大学讲授深度学习课程。

这是一本涵盖深度学习技术细节的教科书，它告诉我们深度学习集技术、科学与艺术于一体，牵涉统计、优化、矩阵、算法、编程、分布式计算等多个领域。书中同时也蕴含了作者对深度学习的理解和思考，处处闪烁着深刻的思想，耐人回味。第 1 章关于深度学习的思想、历史发展等论述尤为透彻而精辟。

作者在书中写到：“人工智能的真正挑战在于解决那些对人们来说很容易执行、但很难形式化描述的任务，比如识别人们所说的话或图像中的脸。对于这些问题，我们人类往往可以凭直觉轻易地解决”。为了应对这些挑战，他们提出让计算机从经验中学习，并根据层次化的概念体系来理解世界，而每个概念通过与某些相对简单的概念之间的关系来定义。由此，作者给出了深度学习的定义：“层次化的概念让计算机构建较简单的概念来学习复杂概念。如果绘制出表示这些概念如何建立在彼此之上的一幅图，我们将得到一张‘深’(层次很多)的图。由此，我们称这种方法为 AI 深度学习 (deep learning)”。

作者指出：“一般认为，到目前为止深度学习已经经历了三次发展浪潮：20 世纪 40 年代到 60 年代深度学习的雏形出现在控制论 (cybernetics) 中，20 世纪 80 年代到 90 年代深度学习以联结主义 (connectionism) 为代表，而从 2006 年开始，以深度学习之名复兴”。

谈到深度学习与脑科学或者神经科学的关系，作者强调：“如今神经科学在深度学习研究中的作用被削弱，主要原因是我们根本没有足够的关于大脑的信息作为指导去使用它。要获得对被大脑实际使用算法的深刻理解，我们需要有能力同时监测 (至少是) 数千相连神经元的活动。我们不能够做到这一点，所以我们甚至连大脑最简单、最深入研究的部分都还远远没有理解”。值得注意的是，我国有些专家热衷倡导人工智能与脑科学或认知学科的交叉研究，推动国家在所谓的“类脑智能”等领域投入大量资源。且不论我国是否真同时精通人工智能和脑科学或认知心理学的学者，至少对交叉领域，我们都应该怀着务实、理性的求是态度。唯有如此，我们才有可能在这一波人工智能发展浪潮中有所作为，而不是又成为一群观潮人。

作者进一步指出：“媒体报道经常强调深度学习与大脑的相似性。的确，深度学习研究者比其他机器学习领域（如核方法或贝叶斯统计）的研究者更可能地引用大脑作为参考，但大家不应该认为深度学习在尝试模拟大脑。现代深度学习从许多领域获取灵感，特别是应用数学的基本内容如线性代数、概率论、信息论和数值优化。尽管一些深度学习的研究人员引用神经科学作为重要的灵感来源，然而其他学者完全不关心神经科学”。的确，对于广大青年学者和一线的工程师来说，我们是完全可以完全不用因为不懂神经（或脑）科学而对深度学习、人工智能踟躇不前。数学模型、计算方法和应用驱动才是我们研究人工智能的可行之道。深度学习和人工智能不是飘悬在我们头顶的框架，而是立足于我们脚下的技术。我们诚然可以从哲学层面或角度来欣赏科学与技术，但过度地从哲学层面来研究科学问题只会导致一些空洞的名词。

关于人工神经网络在 20 世纪 90 年代中期的衰落，作者分析到：“基于神经网络和其他 AI 技术的创业公司开始寻求投资，其做法野心勃勃但不切实际。当 AI 研究不能实现这些不合理的期望时，投资者感到失望。同时，机器学习的其他领域取得了进步。比如，核方法和图模型都在很多重要任务上实现了很好的效果。这两个因素导致了神经网络热潮的第二次衰退，并一直持续到 2007 年”。“其兴也悖焉，其亡也忽焉”。这个教训也同样值得当今基于深度学习的创业界、工业界和学术界等警醒。

我非常荣幸获得人民邮电出版社王峰松先生的邀请来负责该书的中文翻译。我是 2016 年 7 月收到王先生的邀请，但那时我正忙于找工作，无暇顾及。然而，当我和我的学生讨论翻译事宜时，他们一致认为这是一件非常有意义的事情，表达愿意来承担。译稿是由我的四位学生赵申剑、黎彧君、符天凡和李凯独立完成的。申剑和天凡是二年级的硕士生，而李凯和彧君则分别是二年级和三年级的直博生。虽然他们在机器学习领域都还是新人，其知识结构还不全面，但是他们热情高涨、勤于学习、工作专注、执行力极强。他们通过重现书中的算法代码和阅读相关文献来加强理解，在不到三个月的时间就拿出了译著的初稿，之后又经过自校对、交叉校对等环节力图使译著保持正确性和一致性。他们自我协调、主动揽责、相互谦让，他们的责任心和独立工作能力让我倍感欣慰，因而得以从容。

由于我们无论是中文还是英文能力都深感有限，译文恐怕还是有些生硬，我们特别担心未能完整地传达出原作者的真实思想和观点。因此，我们强烈地建议有条件的读者去阅读英文原著，也非常期待大家继续指正译著，以便今后进一步修订完善。我恳请大家多给予 4 位译者以鼓励。请把你们对译著的批评留给我，这是我作为他们的导师必须要承担的，也是我对王峰松先生的信任做出的承诺。

当初译稿基本完成时，我们决定把它公开在 GitHub 上，希望通过广大读者的参与来完善译稿。令人惊喜的是，有上百位热心读者给予了大量富有建设性的修改意见，其中有 20 多位热心读者直接帮助润色校对（详见中文版致谢名单）。可以说，这本译著是大家共同努力的结晶。这些读者来自一线的工程师和在校的学生，从中我领略到了他们对深度学习和机器学习领域的挚爱。更重要的是，我感受到了他们开放、合作和奉献的精神，而这也是推动人工智能发展不可或缺的。因此，我更加坚定地认为中国人工智能发展的希望在于年青学者，唯有他们才能让我国人工智能学科在世界有竞争力和影响力。

江山代有人才出，各领风骚数十年！

张志华代笔

2017 年 5 月 12 日于北大静园六院

中文版致谢

首先，我们要感谢原书作者在本书翻译时给予我们的大力帮助。特别是，原书作者和我们分享了书中的原图和参考文献库，这极大节省了我们的时间和精力。

本书涉及的内容博大且思想深刻，如果没有众多同学和网友的帮助，我们不可能顺利完成翻译。

我们才疏学浅而受此重任，深知自身水平难以将本书翻译得很准确。因此我们完成初稿后，将书稿公开于 GitHub，及早接受网友的批评和建议。以下网友为本书的翻译初稿提供了很多及时的反馈和宝贵的修改意见：@tttwy、@tankeco、@fairmiracle、@GageGao、@huangpingchun、@MaHongP、@acgtyrant、@yanhuibin315、@Buttonwood、@titicacafz、@weijy026a、@RuiZhang1993、@zymiboxpay、@xingkongliang、@oisc、@tielei、@yuduowu、@Qingmu、@HC-2016、@xiaomingabc、@bengordai、@Bojian、@JoyFYan、@minoriiww、@khty2000、@gump88、@zdx3578、@PassStory、@imwebson、@wlbksy、@roachsina、@Elvinczp、@endymecy、@9578577、@linzhp、@cnscozzheng、@germany-zhu、@zhangyafeikimi、@showgood163、@kangqf、@NeutronT、@badpoem、@kkpoker、@Seaball、@wheai0、@angrymidiao、@ZhiweiYang、@corenel、@zhaoyu611、@SiriusXDJ、@dfcv24、@EmisXXY、@FlyingFire、@vsoda、@friskit-china、@poerin、@ninesunqian、@JiaqiYao、@Sofring、@wenlei、@wizyoung、@imageslr、@indam、@XuLYC、@zhouqingping、@freedomRen、@runPenguin 和 @piantou。

在此期间，我们 4 位译者再次进行了校对并且相互之间也校对了一遍。然而仅仅通过我们的校对，实在难以发现翻译中存在的所有问题。因此，我们邀请一些同学和网友帮助我们校对。经过他们的校对，本书的翻译质量得到了极大的提升。在此我们一一列出，以表示我们由衷的感谢！

- 第 1 章 (引言): 刘畅、许丁杰、潘雨粟和 NeutronT 阅读了本章，并对很多语句提出了不少修改建议。林中鹏进行了校对，他提出了很多独到的修改建议。
- 第 2 章 (线性代数): 许丁杰和骆徐圣阅读了本章，并修改语句。李若愚进行了校对，提出了很多细心的建议。蒋武轩阅读并润色了部分内容，提升了译文准确性和可读性。
- 第 3 章 (概率与信息论): 许丁杰阅读了本章，并修改语句。李培炎和何翊卓进行了校对，并修改了很多中文用词，使翻译更加准确。
- 第 4 章 (数值计算): 张亚霏阅读了本章，并对其他章节也提出了一些修改建议。张源源进行了校对，并指出了原文可能存在的问题，非常仔细。
- 第 5 章 (机器学习基础): 郭浩和黄平春阅读了本章，并修改语句。李东和林中鹏进行了校对。本章篇幅较长，能够有现在的翻译质量离不开这 4 位的贡献。
- 第 6 章 (深度前馈网络): 周卫林、林中鹏和张远航阅读了本章，并提出修改意见。

- 第 7 章 (深度学习中的正则化): 周柏村进行了非常细心的校对, 指出了大量问题, 令翻译更加准确。
- 第 8 章 (深度模型中的优化): 房晓宇和吴翔阅读了本章。黄平春进行了校对, 他提出的很多建议让行文更加流畅易懂。
- 第 9 章 (卷积网络): 赵雨和潘雨粟阅读了本章, 并润色语句。丁志铭进行了非常仔细的校对, 并指出很多翻译问题。
- 第 10 章 (序列建模: 循环和递归网络): 刘畅阅读了本章。赵雨提供了详细的校对建议, 尹瑞清根据他的翻译版本, 给我们的版本提出了很多建议。虽然仍存在一些分歧, 但我们两个版本的整合, 让翻译质量提升很多。
- 第 12 章 (应用): 潘雨粟进行了校对。在他的校对之前, 本章阅读起来比较困难。他提供的修改建议, 不仅提高了行文流畅度, 还提升了译文的准确度。
- 第 13 章 (线性因子模型): 贺天行阅读了本章, 修改语句。杨志伟校对了本章, 润色大量语句。
- 第 14 章 (自编码器): 李雨慧和黄平春进行了校对。李雨慧提升了语言的流畅度, 黄平春纠正了不少错误, 提高了准确性。
- 第 15 章 (表示学习): cnscottzheng 阅读了本章, 并修改语句。
- 第 17 章 (蒙特卡罗方法): 张远航提供了非常细致的校对, 后续又校对了一遍, 使译文质量大大提升。
- 第 18 章 (直面配分函数): 吴家楠进行了校对, 提升了译文准确性和可读性。
- 第 19 章 (近似推断): 黄浩军、张远航和张源源进行了校对。本章虽然篇幅不大, 但内容有深度, 译文在 3 位的帮助下提高了准确度。

所有校对的修改建议都保存在 GitHub 上, 再次感谢以上同学和网友的付出。经过这 5 个多月的修改, 初稿慢慢变成了最终提交给出版社的稿件。尽管还有很多问题, 但大部分内容是可读的, 并且是准确的。当然目前的译文仍存在一些没有及时发现的问题, 因此修订工作也将持续更新, 不断修改。我们非常希望读者能到 GitHub 提建议, 并且非常欢迎, 无论多么小的修改建议, 都是非常宝贵的。

此外, 我们还要感谢魏太云学长, 他帮助我们与出版社沟通交流, 并给予了我们在排版上的指导。

最后, 感谢我们的导师张志华教授, 没有老师的支持, 我们难以完成翻译。

英文原书致谢

如果没有他人的贡献，这本书将不可能完成。我们感谢为本书提出建议和帮助组织内容结构的人：Guillaume Alain、Kyunghyun Cho、Çağlar Gülçehre、David Krueger、Hugo Larochelle、Razvan Pascanu 和 Thomas Rohée。

我们感谢为本书内容提供反馈的人。其中一些人对许多章都给出了建议：Martín Abadi、Guillaume Alain、Ion Androutsopoulos、Fred Bertsch、Olexa Bilaniuk、Ufuk Can Biçici、Matko Bošnjak、John Boersma、Greg Brockman、Alexandre de Brébisson、Pierre Luc Carrier、Sarath Chandar、Pawel Chilinski、Mark Daoust、Oleg Dashevskii、Laurent Dinh、Stephan Dreseitl、Jim Fan、Miao Fan、Meire Fortunato、Frédéric Francis、Nando de Freitas、Çağlar Gülçehre、Jurgen Van Gael、Javier Alonso García、Jonathan Hunt、Gopi Jeyaram、Chingiz Kabytayev、Lukasz Kaiser、Varun Kanade、Asifullah Khan、Akiel Khan、John King、Diederik P. Kingma、Yann LeCun、Rudolf Mathey、Matías Mattamala、Abhinav Maurya、Kevin Murphy、Oleg Mürk、Roman Novak、Augustus Q. Odena、Simon Pavlik、Karl Pichotta、Eddie Pierce、Kari Pulli、Roussel Rahman、Tapani Raiko、Anurag Ranjan、Johannes Roith、Mihaela Rosca、Halis Sak、César Salgado、Grigory Sapunov、Yoshinori Sasaki、Mike Schuster、Julian Serban、Nir Shabat、Ken Shirriff、Andre Simpelo、Scott Stanley、David Sussillo、Ilya Sutskever、Carles Gelada Sáez、Graham Taylor、Valentin Tolmer、Massimiliano Tomassoli、An Tran、Shubhendu Trivedi、Alexey Umnov、Vincent Vanhoucke、Marco Visentini-Scarzanella、Martin Vita、David Warde-Farley、Dustin Webb、Kelvin Xu、Wei Xue、Ke Yang、Li Yao、Zygmunt Zajac 和 Ozan Çağlayan。

我们也要感谢对单个章节提供有效反馈的人。

- 数学符号：Zhang Yuanhang。
- 第 1 章 (引言)：Yusuf Akgul、Sebastien Bratieres、Samira Ebrahimi、Charlie Gorichanaz、Brendan Loudermilk、Eric Morris、Cosmin Parvulescu 和 Alfredo Solano。
- 第 2 章 (线性代数)：Amjad Almahairi、Nikola Banić、Kevin Bennett、Philippe Castonguay、Oscar Chang、Eric Fosler-Lussier、Andrey Khalyavin、Sergey Oreshkov、István Petrás、Dennis Prangle、Thomas Rohée、Gitanjali Gulve Sehgal、Colby Toland、Alessandro Vitale 和 Bob Welland。
- 第 3 章 (概率与信息论)：John Philip Anderson、Kai Arulkumaran、Vincent Dumoulin、Rui Fa、Stephan Gouws、Artem Oboturov、Antti Rasmus、Alexey Surkov 和 Volker Tresp。
- 第 4 章 (数值计算)：Tran Lam AnIan Fischer 和 Hu Yuhuang。
- 第 5 章 (机器学习基础)：Dzmitry Bahdanau、Justin Domingue、Nikhil Garg、Makoto Otsuka、Bob Pepin、Philip Popien、Emmanuel Rayner、Peter Shepard、Kee-Bong

Song、Zheng Sun 和 Andy Wu。

- 第 6 章 (深度前馈网络): Uriel Berdugo、Fabrizio Bottarel、Elizabeth Burl、Ishan Durgkar、Jeff Hlywa、Jong Wook Kim、David Krueger 和 Aditya Kumar Praharaj。
- 第 7 章 (深度学习中的正则化): Morten Kolbæk、Kshitij Lauria、Inkyu Lee、Sunil Mohan、Hai Phong Phan 和 Joshua Salisbury。
- 第 8 章 (深度模型中的优化): Marcel Ackermann、Peter Armitage、Rowel Atienza、Andrew Brock、Tegan Maharaj、James Martens、Kashif Rasul、Klaus Strobl 和 Nicholas Turner。
- 第 9 章 (卷积网络): Martín Arjovsky、Eugene Brevdo、Konstantin Divilov、Eric Jensen、Mehdi Mirza、Alex Paino、Marjorie Sayer、Ryan Stout 和 Wentao Wu。
- 第 10 章 (序列建模: 循环和递归网络): Gökçen Eraslan、Steven Hickson、Razvan Pascanu、Lorenzo von Ritter、Rui Rodrigues、Dmitriy Serdyuk、Dongyu Shi 和 Kaiyu Yang。
- 第 11 章 (实践方法论): Daniel Beckstein。
- 第 12 章 (应用): George Dahl、Vladimir Nekrasov 和 Ribana Roscher。
- 第 13 章 (线性因子模型): Jayanth Koushik。
- 第 15 章 (表示学习): Kunal Ghosh。
- 第 16 章 (深度学习中的结构化概率模型): Minh Lê 和 Anton Varfolom。
- 第 18 章 (直面配分函数): Sam Bowman。
- 第 19 章 (近似推断): Yujia Bao。
- 第 20 章 (深度生成模型): Nicolas Chapados、Daniel Galvez、Wenming Ma、Fady Medhat、Shakir Mohamed 和 Grégoire Montavon。
- 参考文献: Lukas Michelbacher 和 Leslie N. Smith。

我们还要感谢那些允许我们引用他们的出版物中的图片、数据的人。我们在图片标题的文字中注明了他们的贡献。

我们还要感谢 Lu Wang 为我们写了 pdf2htmlEX，我们用它来制作这本书的网页版本，Lu Wang 还帮助我们改进了生成的 HTML 的质量。

我们还要感谢 Ian 的妻子 Daniela Flori Goodfellow 在 Ian 的写作过程中的耐心支持和检查。

我们还要感谢 Google Brain 团队提供了学术环境，从而使得 Ian 能够花费大量时间写作本书并接受同行的反馈和指导。我们特别感谢 Ian 的前任经理 Greg Corrado 和他的现任经理 Samy Bengio 对这项工作的支持。最后我们还要感谢 Geoffrey Hinton 在写作困难时的鼓励。

数学符号

下面简要介绍本书所使用的数学符号。我们在第 2 ~ 4 章中描述大多数数学概念，如果你不熟悉任何相应的数学概念，可以参考对应的章节。

数和数组

a	标量 (整数或实数)
\mathbf{a}	向量
A	矩阵
\mathbf{A}	张量
I_n	n 行 n 列的单位矩阵
I	维度蕴含于上下文的单位矩阵
$e^{(i)}$	标准基向量 $[0, \dots, 0, 1, 0, \dots, 0]$, 其中索引 i 处值为 1
$\text{diag}(\mathbf{a})$	对角方阵, 其中对角元素由 \mathbf{a} 给定
a	标量随机变量
\mathbf{a}	向量随机变量
\mathbf{A}	矩阵随机变量

集合和图

\mathbb{A}	集合
\mathbb{R}	实数集
$\{0, 1\}$	包含 0 和 1 的集合
$\{0, 1, \dots, n\}$	包含 0 和 n 之间所有整数的集合
$[a, b]$	包含 a 和 b 的实数区间
$(a, b]$	不包含 a 但包含 b 的实数区间
$\mathbb{A} \setminus \mathbb{B}$	差集, 即其元素包含于 \mathbb{A} 但不包含于 \mathbb{B}
\mathcal{G}	图
$\text{Pa}_{\mathcal{G}}(x_i)$	图 \mathcal{G} 中 x_i 的父节点

索引

a_i	向量 \mathbf{a} 的第 i 个元素, 其中索引从 1 开始
a_{-i}	除了第 i 个元素, \mathbf{a} 的所有元素
$A_{i,j}$	矩阵 \mathbf{A} 的 i, j 元素
$\mathbf{A}_{i,:}$	矩阵 \mathbf{A} 的第 i 行
$\mathbf{A}_{:,i}$	矩阵 \mathbf{A} 的第 i 列
$A_{i,j,k}$	3 维张量 \mathbf{A} 的 (i, j, k) 元素
$\mathbf{A}_{:,:,i}$	3 维张量的 2 维切片
a_i	随机向量 \mathbf{a} 的第 i 个元素

线性代数中的操作

\mathbf{A}^\top	矩阵 \mathbf{A} 的转置
\mathbf{A}^+	\mathbf{A} 的 Moore-Penrose 伪逆
$\mathbf{A} \odot \mathbf{B}$	\mathbf{A} 和 \mathbf{B} 的逐元素乘积 (Hadamard 乘积)
$\det(\mathbf{A})$	\mathbf{A} 的行列式

微积分

$\frac{dy}{dx}$	y 关于 x 的导数
$\frac{\partial y}{\partial x}$	y 关于 x 的偏导
$\nabla_x y$	y 关于 \mathbf{x} 的梯度
$\nabla_{\mathbf{X}} y$	y 关于 \mathbf{X} 的矩阵导数
$\nabla_{\mathbf{X}} y$	y 关于 \mathbf{X} 求导后的张量
$\frac{\partial f}{\partial \mathbf{x}}$	$f: \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^m$ 的 Jacobian 矩阵 $\mathbf{J} \in \mathbb{R}^{m \times n}$
$\nabla_{\mathbf{x}}^2 f(\mathbf{x})$ or $\mathbf{H}(f)(\mathbf{x})$	f 在点 \mathbf{x} 处的 Hessian 矩阵
$\int f(\mathbf{x}) d\mathbf{x}$	\mathbf{x} 整个域上的定积分
$\int_{\mathcal{S}} f(\mathbf{x}) d\mathbf{x}$	集合 \mathcal{S} 上关于 \mathbf{x} 的定积分

概率和信息论

$a \perp b$	a 和 b 相互独立的随机变量
$a \perp b \mid c$	给定 c 后条件独立
$P(a)$	离散变量上的概率分布
$p(a)$	连续变量 (或变量类型未指定时) 上的概率分布
$a \sim P$	具有分布 P 的随机变量 a
$\mathbb{E}_{\mathbf{x} \sim P}[f(\mathbf{x})]$ or $\mathbb{E}f(\mathbf{x})$	$f(\mathbf{x})$ 关于 $P(\mathbf{x})$ 的期望
$\text{Var}(f(\mathbf{x}))$	$f(\mathbf{x})$ 在分布 $P(\mathbf{x})$ 下的方差
$\text{Cov}(f(\mathbf{x}), g(\mathbf{x}))$	$f(\mathbf{x})$ 和 $g(\mathbf{x})$ 在分布 $P(\mathbf{x})$ 下的协方差
$H(\mathbf{x})$	随机变量 \mathbf{x} 的香浓熵
$D_{\text{KL}}(P \parallel Q)$	P 和 Q 的 KL 散度
$\mathcal{N}(\mathbf{x}; \boldsymbol{\mu}, \boldsymbol{\Sigma})$	均值为 $\boldsymbol{\mu}$, 协方差为 $\boldsymbol{\Sigma}$, \mathbf{x} 上的高斯分布

函数

$f: \mathbb{A} \rightarrow \mathbb{B}$	定义域为 \mathbb{A} 值域为 \mathbb{B} 的函数 f
$f \circ g$	f 和 g 的组合
$f(\mathbf{x}; \boldsymbol{\theta})$	由 $\boldsymbol{\theta}$ 参数化, 关于 \mathbf{x} 的函数 (有时为简化表示, 我们忽略 $\boldsymbol{\theta}$ 而记为 $f(\mathbf{x})$)
$\log x$	x 的自然对数
$\sigma(x)$	Logistic sigmoid, $\frac{1}{1 + \exp(-x)}$
$\zeta(x)$	Softplus, $\log(1 + \exp(x))$
$\ \mathbf{x}\ _p$	\mathbf{x} 的 L^p 范数
$\ \mathbf{x}\ $	\mathbf{x} 的 L^2 范数
x^+	x 的正数部分, 即 $\max(0, x)$
$\mathbf{1}_{\text{condition}}$	如果条件为真则为 1, 否则为 0

有时候我们使用函数 f , 它的参数是一个标量, 但应用到一个向量、矩阵或张量: $f(\mathbf{x})$ 、 $f(\mathbf{X})$ 或 $f(\mathbf{X})$ 。这表示逐元素地将 f 应用于数组。例如, $\mathbf{C} = \sigma(\mathbf{X})$, 则对于所有合法的 i 、 j 和 k , $C_{i,j,k} = \sigma(X_{i,j,k})$ 。

数据集和分布

p_{data}	数据生成分布
\hat{p}_{train}	由训练集定义的经验分布
\mathbf{X}	训练样本的集合
$\mathbf{x}^{(i)}$	数据集的第 i 个样本 (输入)
$y^{(i)}$ 或 $\mathbf{y}^{(i)}$	监督学习中与 $\mathbf{x}^{(i)}$ 关联的目标
\mathbf{X}	$m \times n$ 的矩阵, 其中行 $\mathbf{X}_{i,:}$ 为输入样本 $\mathbf{x}^{(i)}$

目 录

第 1 章 引言	1
1.1 本书面向的读者	7
1.2 深度学习的历史趋势	8
1.2.1 神经网络的众多名称和命运变迁	8
1.2.2 与日俱增的数据量	12
1.2.3 与日俱增的模型规模	13
1.2.4 与日俱增的精度、复杂度和对现实世界的冲击	15

第 1 部分 应用数学与机器学习基础

第 2 章 线性代数	19
2.1 标量、向量、矩阵和张量	19
2.2 矩阵和向量相乘	21
2.3 单位矩阵和逆矩阵	22
2.4 线性相关和生成子空间	23
2.5 范数	24
2.6 特殊类型的矩阵和向量	25
2.7 特征分解	26
2.8 奇异值分解	28
2.9 Moore-Penrose 伪逆	28
2.10 迹运算	29
2.11 行列式	30
2.12 实例：主成分分析	30
第 3 章 概率与信息论	34
3.1 为什么要使用概率	34
3.2 随机变量	35
3.3 概率分布	36
3.3.1 离散型变量和概率质量函数	36
3.3.2 连续型变量和概率密度函数	36
3.4 边缘概率	37
3.5 条件概率	37
3.6 条件概率的链式法则	38