

前 言

人类文明由早期农耕时代经历漫长演化形成工业时代,再由工业时代进一步发展形成当今的信息时代。数字化、网络化和智能化是信息时代的基本特征,这些特征作为对传统农耕文明和工业文明科学技术水平的巨大提升,正在对这个社会的方方面面产生深刻的变革,使得当代人们的生活和工作更加舒适、便捷。目前,作为引领信息社会发展动力的信息技术已经历了数字化和网络化阶段,正朝着智能化方向快速发展,人工智能技术在全社会得到前所未有的重视和广泛应用并以前所未有的速度向前飞跃发展。为顺应时代发展潮流和把握发展机遇,我国及时制定并推出了新一代人工智能发展规划,把人工智能发展放在国家战略层面进行系统布局,使得人工智能成为新一轮产业变革的核心驱动力。因此,人工智能的理论研究和应用开发是一个非常重要的优先发展方向。

人工智能作为人脑器官的延伸,主要目标是通过计算机模拟人类大脑的某些思维能力或智能行为,如推理、证明、识别、感知、认知、理解、学习等思维能力或活动,使得计算机能够像人类一样进行思考。从外部环境中获得知识和经验的学习能力是人类的一项基本思维能力,机器学习要解决的问题就是如何使得机器具有与人类类似的学习能力,使得机器系统能够较好地了解外部环境并能够适应外部环境的变化。人工智能系统主要使用机器学习技术解析外部环境数据,从数据中获取知识和模型参数,获得可用于决策或预测的数学模型。因此,机器学习为人工智能系统提供了基础性的核心算法支撑,要想学好人工智能,首先必须牢固掌握机器学习的基础理论与应用技术。

机器学习的主要目标是通过计算手段从经验数据等先验信息中获得一个具有较好泛化性能的数学模型,并使用该模型完成预测、分类和聚类等机器学习任务。因此,机器学习研究对象主要是从经验数据等先验信息中产生或构造模型的训练学习算法,或者说机器学习是一门关于训练学习算法设计理论与应用技术的学问。我们知道,算法设计是一种思维的艺术,需要一定的抽象思维能力和数学知识。机器学习算法更是如此,不仅涉及微积分、数理逻辑、数理统计、矩阵计算、图论等数学知识,还涉及众多最优化理论与方法,为广大初学者掌握机器学习知识带来一定困难。因此,为较好地满足广大读者系统地掌握机器学习入门性基础理论与应用技术的需要,本教程的编写着重考虑如下两个要点:

第一、注重知识体系的完备性。作为人工智能的核心技术,机器学习随着人工智能的产生而产生并随着人工智能理论发展而发展,目前已形成一个非常庞大且正在快速的延伸发展的知识体系,众多学习算法精彩纷呈、目不暇接、不胜枚举。本教程通过深度凝练机器学习现有知识体系,构建一套相对完备的入门性机器学习基础理论与应用技术,在基本上涵盖连接学习、符号学习和统计学习这三种基本学习类型的基础上,注重突出对基本理论与关键技术介绍和讨论。

第二、强调可读性和可理解性。本教程站在高年级本科生和低年级硕士研究生的思维角度编写,在保证表达准确的前提下,尽可能用最朴实的语言深入浅出地介绍机器学习理论及相关算法设计技术,尽可能细致地阐述理论与算法的思想内涵和本质,通过展示实际算例的具体演算过程,使得读者能够对机器学习理论与算法有着更加清晰、全面的理解。需要说明的是,本书并没有为了增加可读性而降低应有的内容深度,只是通过比较恰当的方式把相关

知识表达得更加清楚明白,使得广大读者能够通过自己的努力就可以不太困难地掌握机器学习的基本理论与应用技术。

本教程比较系统地介绍机器学习的入门性基础理论与应用技术,内容主要包括机器学习的基本知识、模型求解与优化的基本方法、监督学习和无监督学习方法、强化学习方法、神经网络与深度学习方法,将机器学习的经典内容与深度学习等前沿内容有机地结合在一起,形成一套相对完整、统一的知识体系,并在每个章节穿插相应的应用实例,使得广大读者不但能够较好地掌握机器学习基本理论,而且能够比较系统地掌握其应用技术,为今后的工作和进一步学习打下扎实的理论与应用基础。全书一共包含如下九章内容:

第一章和第二章是全书最基础的知识内容,主要为后续机器学习具体方法的介绍提供必备的理论和技術基础。第一章主要介绍机器学习的基本知识,包括机器学习基本概念、误差估计、发展历程及需要解决的基本问题;第二章主要介绍模型构建与优化的基本方法,包括模型的参数估计、模型优化的基本概念与方法、以及若干模型正则化方法。

第三章、第四章、第五章和第六章比较系统地介绍传统机器学习理论与方法。第三章主要介绍监督学习模型与算法,包括线性模型、决策树模型、贝叶斯模型和支持向量机模型;第四章主要介绍聚类分析、主分量分析、稀疏编码等无监督学习的基本理论和方法;第五章主要介绍集成学习方法,包括 Bagging 集成学习和 Boosting 集成学习方法;第六章主要介绍强化学习方法,包括基本强化学习和示范强化学习方法。

第七章、第八章、第九章比较系统地介绍神经网络与深度学习方法。第七章主要介绍神经网络与深度学习的基本知识,包括神经网络的基本概念、基本模型和常用模型,以及深度学习的基本理论和模型训练方法;第八章主要介绍几种常用的深度网络模型与训练范式,包括深度卷积网络、深度循环网络和生成式对抗网络;第九章主要介绍深度强化学习理论与方法,包括基于价值的学习和基于策略的学习。

限于篇幅,本教程未将半监督学习、多示例学习、流形学习、迁移学习、度量学习、元学习、分布式学习等相对比较专门的机器学习前沿研究内容纳入介绍范围,读者可以查阅相关专著、学术论文或技术报告。事实上,如果牢固掌握了本书所介绍的机器学习基本知识内容,那么进一步学习和研究这些前沿知识就不是一件很难的事情。

本教程读者对象为智能科学与技术、数据科学与大数据技术、计算机科学与技术、软件工程、信息安全、物联网、电子信息工程、自动化、信息与计算科学等专业的本科生和低年级研究生,以及相关专业的科学工作者和技术研发人员。

本教程由汪荣贵、杨娟、薛丽霞编著。感谢研究生叶萌、朱正发、汤明空、李文静、俞鹏飞、姚旭晨、陈龙、江迪、郑岩、韩梦雅、邓韬、王静、龚毓秀、李明熹、董博文、麻可、李懂、刘兵,以及本科生孙旭等同学提供的帮助,感谢合肥工业大学计算机与信息学院、合肥工业大学人工智能学院、机械工业出版社的大力支持。

由于时间仓促,书中难免存在不妥之处,敬请读者不吝指正!

编 者

2018 年 12 月

目 录

出版说明

前言

第 1 章 机器学习概述

1.1 机器学习基本概念

1.1.1 人工智能与机器学习

1.1.2 机器学习基本术语

1.1.3 机器学习误差分析

1.2 机器学习发展历程

1.2.1 感知机与连接学习

1.2.2 符号学习与统计学习

1.2.3 连接学习的兴起

1.3 机器学习基本问题

1.3.1 数据特征提取

1.3.2 模型规则构建

1.3.3 模型性能评估

1.4 习题

第 2 章 模型估计与优化

2.1 模型参数估计

2.1.1 最小二乘估计

2.1.2 最大似然估计

2.1.3 最大后验估计

2.2 模型优化基本方法

2.2.1 梯度下降法

2.2.2 牛顿迭代法

2.3 模型优化概率方法

2.3.1 随机梯度法

2.3.2 最大期望法

2.3.3 蒙特卡洛法

2.4 模型正则化策略

2.4.1 范数惩罚

2.4.2 样本增强

2.4.3 对抗训练

2.5 习题

第 3 章 监督学习

3.1 线性模型

3.1.1 模型结构

3.1.2 线性回归

3.1.3 线性分类

3.2 决策树模型

3.2.1 模型结构

3.2.2 判别标准

3.2.3 模型构造

3.3 贝叶斯模型

3.3.1 贝叶斯方法

3.3.2 贝叶斯分类

3.3.3 贝叶斯回归

3.4 支持向量机

3.4.1 线性可分性

3.4.2 核函数技术

3.4.3 结构风险分析

3.5 监督学习应用

3.5.1 信用风险评估

3.5.2 垃圾邮件检测

3.5.3 车牌定位与识别

3.6 习题

第 4 章 无监督学习

4.1 聚类分析

4.1.1 划分聚类法

4.1.2 密度聚类法

4.2 主分量分析

4.2.1 基本 PCA 方法

4.2.2 核 PCA 方法

4.3 稀疏编码与学习

4.3.1 稀疏编码概述

4.3.2 稀疏表示学习

4.3.3 数据字典学习

4.4 无监督学习应用

4.5.1 热点话题发现

4.5.2 自动人脸识别

4.5 习题

第 5 章 集成学习

5.1 集成学习概述

5.1.1 集成学习基本概念

5.1.2 集成学习基本范式

5.1.3 集成学习泛化策略

5.2 Bagging 集成学习

5.2.1 Bagging 集成策略

5.2.2 随机森林模型结构

5.2.3 随机森林学习算法

5.3 Boosting 集成学习

- 5.3.1 Boosting 集成策略
- 5.3.2 AdaBoost 学习算法
- 5.3.3 GBDT 学习算法
- 5.4 集成学习应用
 - 5.4.1 房价预测分析
 - 5.4.2 自动人脸定位
- 5.5 习题
- 第 6 章 强化学习**
 - 6.1 强化学习概述
 - 6.1.1 强化学习基本知识
 - 6.1.2 马尔科夫模型
 - 6.1.3 强化学习计算方式
 - 6.2 基本强化学习
 - 6.2.1 值迭代学习
 - 6.2.2 时序差分学习
 - 6.2.3 Q 学习
 - 6.3 示范强化学习
 - 6.3.1 模仿强化学习
 - 6.3.2 逆向强化学习
 - 6.4 强化学习应用
 - 6.4.1 自动爬山小车
 - 6.4.2 五子棋自动对弈
 - 6.5 习题
- 第 7 章 神经网络与深度学习**
 - 7.1 神经网络概述
 - 7.1.1 神经元与感知机
 - 7.1.2 前馈网络模型
 - 7.1.3 模型训练基本流程
 - 7.2 神经网络常用模型
 - 7.2.1 径向机网络
 - 7.2.2 自编码器
 - 7.2.3 玻尔兹曼机
 - 7.3 深度学习基本知识
 - 7.3.1 浅层学习与深度学习
 - 7.3.2 深度堆栈网络
 - 7.3.3 DBN 模型及训练策略
 - 7.4 神经网络应用
 - 7.4.1 光电字符识别
 - 7.4.2 自动以图搜图
 - 7.5 习题
- 第 8 章 常用深度网络模型**
 - 8.1 深度卷积网络
 - 8.1.1 卷积网络概述
 - 8.1.2 基本网络模型
 - 8.1.3 改进网络模型
 - 8.2 深度循环网络
 - 8.2.1 动态系统展开
 - 8.2.2 网络结构与计算
 - 8.2.3 模型训练策略
 - 8.3 生成对抗网络
 - 8.3.1 生成器与判别器
 - 8.3.2 网络结构与计算
 - 8.3.3 模型训练策略
 - 8.4 深度网络应用
 - 8.4.1 图像目标检测
 - 8.4.2 自动文本摘要
 - 8.5 习题
- 第 9 章 深度强化学习**
 - 9.1 深度强化学习概述
 - 9.1.1 DRL 基本思想
 - 9.1.2 DRL 计算方式
 - 9.1.3 蒙特卡洛树搜索
 - 9.2 基于价值的学习
 - 9.2.1 深度 Q 网络
 - 9.2.2 深度双 Q 网络
 - 9.2.3 DQN 改进模型
 - 9.3 基于策略的学习
 - 9.3.1 策略梯度算法
 - 9.3.2 A3C 行为评价
 - 9.3.3 DDPG 学习算法
 - 9.4 深度强化学习应用
 - 9.4.1 智能巡航小车
 - 9.4.2 围棋自动对弈
 - 9.5 习题
- 参考文献**

【内容简介】

本书比较系统地介绍和讨论机器学习的入门性基础理论与应用技术，首先比较详细地介绍掌握机器学习理论和方法所必须具备的基础知识，包括机器学习的基本概念与发展历程、模型构造与优化的基本方法；然后，系统地介绍和讨论监督学习、无监督学习、集成学习、强化学习等传统机器学习理论与方法；最后，在详细探讨神经网络与深度学习基本理论的基础上，系统地介绍深度卷积网络、深度循环网络、生成式对抗网络等若干典型深度学习模型的基本理论与训练范式，分析讨论深度强化学习的基本理论与方法。本书将分布在人工智能各个分支的机器学习知识点进行凝练和优化，形成一套相对完备的入门性机器学习知识体系，基本上涵盖了符号学习、连接学习和统计学习的核心基本理论与方法，并且在每个章节穿插丰富的应用实例，使得读者在比较系统地掌握机器学习理论知识的同时，能进一步获得机器学习在多个方面的应用技术。本书站在高年级本科生和低年级硕士研究生的思维角度编写，尽可能用最朴实的语言深入浅出地准确表达知识内容，着重突出机器学习方法的思想内涵和本质，使得广大读者能够通过自己的努力就可以不太困难地掌握全书主要内容。本书内容丰富、思路清晰、实例讲解详细、图例直观形象，每章均配有一定数量习题，供读者练习，适合作为智能科学与技术、数据科学与大数据技术、计算机科学与技术以及相关专业的本科生或研究生机器学习入门性教材，也可供工程技术人员和自学读者学习参考。

参考文献

- [1] Ackley, D H, G E. Hinton, T, J. Sejnowski. A learning algorithm for Boltzmann machines[J]. Cognitive Science, 9(1): 147-169, 1985
- [2] Alec Radford, Luke Metz, Soumith Chintala. Unsupervised Representation Learning with Deep Convolutional Generative Adversarial Networks [J]. ICLR, arXiv:1511.06434 ,2016.
- [3] Broomhead, D S. Multivariate functional interpolation and adaptive networks[J]. Complex Systems, 2 (3): 321-355, 1988.
- [4] Brodley, C. E. and P. E Utgoff. Multivariate decision trees[J]. Machine Learning, 19(1):45-77, 1995.
- [5] Boyd, S and L Vandenberghe. Convex Optimization[J]. Cambridge University Press, Cambridge, UK, 2004, <https://doi.org/10.1017/CBO9780511804441>.
- [6] Barbero A , Dorronsoro J R . Momentum Sequential Minimal Optimization: An accelerated method for Support Vector Machine training[C]. International Joint Conference on Neural Networks. IEEE Xplore, 2011.
- [7] Bengio, Y, A Courville, and P. Vincent. Representation learning: A review and new perspectives[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 35(8): 1798-1828, 2013.
- [8] Chauvin, Y and D. E. Rumelhart, eds. Backpropagation: Theory, Architecture, and Applications[J]. Lawrence Erlbaum Associates, Hillsdale, Neurocomputing 9(3):358-359 ,1995.
- [9] Crammer, K and Y Singer. On the algorithmic implementation of multiclass kernel-based vector machines[J]. Journal of Machine Learning Research, 2:265-292, 2001.
- [10] Crammer, K and Y Singer. On the algorithmic implementation of multiclass kernel-based vector machines[J]. Journal of Machine Learning Research, 22:265-292, 2001.
- [11] Chawla, N. V., K. W. Bowyer, L O. Hall, and W. P. Kegelmeyer. SMOTE: Synthetic minority over-sampling technique[J]. Journal of Artificial Intelligence Research, 16: 321-357, 2002.
- [12] Crammer, K and Y Singer. On the learnability and design of output codes for multiclass problems[J]. Machine Learning, 47(2-3): 201-233, 2002.
- [13] Carlos Florensa, David Held, Xinyang Geng, Pieter Abbeel. Automatic Goal Generation for Reinforcement Learning Agents[J]. arXiv:1705.06366, 2017.
- [14] Chen L , Wang R , Yang J , et al. Multi-label image classification with recurrently learning semantic dependencies[J]. The Visual Computer, 2018:1-11.
- [15] Drummond, C and R C. Holte. Cost curves: An improved method for visualizing classifier performance[J]. Machine Learning, 65(1): 95-130, 2006.
- [16] Elman, J. L. Finding structure in time[J]. Cognitive Science, 14(2):179-211, 1990.
- [17] Escalera, S, O. Pujol, P. Radeva. Error-correcting output codes library[J]. Journal of Machine Learning Research, 11: 661-664, 2010
- [18] Evan Shelhamer, Jonathan Long, Trevor Darrell. Fully Convolutional Networks for Semantic Segmentation[J]. arXiv:1411.4038, 2016.
- [19] Fawcett, T. An introduction to ROC analysis[J]. Pattern Recognition Letters, 27(8):861-874, 2006.
- [20] Gerstner, Wulfram, et al. Spiking Neuron Models: Single Neurons, Populations, Plasticity[J]. Kybernetes, 2002, 4(7/8):277-280.
- [21] Geoffrey E. Hinton, Simon Osindero, Yee-Whye Teh. A Fast Learning Algorithm for Deep Belief Nets[J]. University of Toronto, University of Singapore, Neural Computation, 2006.
- [22] Gui L Y , Gui L , Wang Y X , et al. Factorized Convolutional Networks: Unsupervised Fine-Tuning for Image Clustering[J]. IEEE Winter Conference on Applications of Computer Vision (WACV). IEEE Computer Society, 2018.
- [23] Hinton, G, S Osindero, Y -W. The. A fast learning algorithm for deep belief nets[J]. Neural Computation, 18(7): 1527-1554, 2006.
- [24] Hinton, G. A practical guide to training restricted Boltzmann machines[J]. Technical Report UTML TR 2010-003, Depart Science, University of Toronto, 2010.
- [25] He K, Zhang X, Ren S, et al. Deep Residual Learning for Image Recognition[J]. arXiv:1512.03385, 2015.
- [26] Hengshuang Zhao, Jianping Shi, Xiaojuan Qi, Xiaogang Wang, Jiaya Jia. Pyramid Scene Parsing Network[J]. arXiv:1612.01105, 2016
- [27] Hsu C C , Lin C W . CNN-Based Joint Clustering and Representation Learning with Feature Drift Compensation for Large-Scale Image Data[J]. IEEE Transactions on Multimedia, PP(99):1-1, 2017.
- [28] Ian J. Goodfellow, Jean Pouget-Abadie, Mehdi Mirza, Bing Xu, David Warde-Farley, Sherjil Ozair, Aaron Courville, Yoshua Bengio. Generative Adversarial Networks[J]. arXiv: 1406.2661, 2014.
- [29] Ian Goodfellow. NIPS 2016 Tutorial: Generative Adversarial Networks[J]. arXiv:1701.00160, 2016.
- [30] Kohonen, T. Self-Organizing Maps[D], 3rd edition. Springer, Berlin, 2001.
- [31] Krizhevsky A , Sutskever I , Hinton G . ImageNet Classification with Deep Convolutional Neural Networks[J]. Advances in neural information processing systems, 2012, 25(2).
- [32] Kaiming He, Xiangyu Zhang, Shaoqing Ren, Jian Sun. Spatial Pyramid Pooling in Deep Convolutional Networks for Visual Recognition[J]. arXiv:1406.4729, 2014.
- [33] Osuna E , Freund R , Girosi F . An Improved Training Algorithm for Support Vector Machines[C]. Neural Networks for Signal Processing VII- IEEE Workshop. 1997.
- [34] Platt J C . Probabilities for SV Machines[J]. Advances in Large Margin Classifiers, 1999:61-74.

-
- [35] Lecun Y L, Bottou L, Bengio Y, et al. Gradient-Based Learning Applied to Document Recognition[J]. *Proceedings of the IEEE*, 86(11):2278-2324, 1998.
- [36] Lecun Y, Bengio Y. Convolutional networks for images, speech, and time series[M]. *The handbook of brain theory and neural networks*. MIT Press, 1998.
- [37] Lanckriet G, Cristianini N, Bartlett P, et al. Learning the Kernel Matrix with Semi-Definite Programming[C]. *Nineteenth International Conference on Machine Learning*. Morgan Kaufmann Publishers Inc. 2002.
- [38] Lecun Y, Bottou L, Orr G B. In *Neural Networks - Tricks of the Trade*[J]. *Canadian Journal of Anaesthesia*, 2012, 41(7):658.
- [39] Lantao Yu, Weinan Zhang, Jun Wang, Yong Yu. SeqGAN: Sequence Generative Adversarial Nets with Policy Gradient[J]. *arXiv:1609.05473*, 2016.
- [40] MacKay, D J C. A practical Bayesian framework for backpropagation networks[J]. *Neural Computation*, 4(3): 448-472, 1992
- [41] Murthy, S. K., S. Kasif, and S. Salzberg. A system for induction of blique decision trees[J]. *Journal of Artificial Intelligence Research*, 2:1-32, 1994.
- [42] Mitchell, T. *Machine Learning*. McGraw Hill, New York, NY, 1997.
- [43] Murthy, S K. Automatic construction of decision trees from data A multi-disciplinary survey[J]. *Data Mining and Knowledge Discovery*, 2(4):345-389, 1998.
- [44] Park, J. and L.W. Sandberg. Universal approximation using radial-basis-function networks[J]. *Neural Computation*, 3(2): 246-257, 1991.
- [45] Platt, J. C, N Cristianini, and J Shawe-Taylor. Large margin DAGs for multiclass classification[J]. In *Advances in Neural Information Processing Systems 12NIPS*. S A Solla, T K Leen, and K.R. Muller, eds, MIT, 2000.
- [46] Quinlan, J. R. Induction of decision trees[J]. *Machine Learning*, 1(1):81-106, 1986.
- [47] Raileanu, L. E. and K. Stoffel. Theoretical comparison between the Gini index and information gain criteria[J]. *Annals of Mathematics and Artificial Intelligence*, 41(1): 77-93, 2004.
- [48] Ross Girshick, Jeff Donahue, Trevor Darrell, Jitendra Malik. Rich feature hierarchies for accurate object detection and semantic segmentation[J]. *arXiv:1311.2524*, 2013.
- [49] Ross Girshick. Fast R-CNN[J]. *ICCV* 2015.
- [50] Schwenker, F., et al.. Three learning phases for radial-basis-function networks[J]. *Neural Networks*, 14 (4-5): 439-458, 2001.
- [51] Simonyan K, Zisserman A. Very Deep Convolutional Networks for Large-Scale Image Recognition[J]. *Computer Science*, 2014.
- [52] Shaoqing Ren, Kaiming He, Ross Girshick, Jian Sun. Faster R-CNN: Towards Real-Time Object Detection with Region Proposal Networks[J]. *NIPS* 2015.
- [53] Szegedy C, Liu N W, Jia N Y, et al. Going deeper with convolutions[C]. *2015 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*. IEEE Computer Society, 2015.
- [54] Schaul T, Quan J, Antonoglou I, et al. Prioritized Experience Replay[J]. *Computer Science*, *arXiv:1511.05952*, 2015.
- [55] Shen M, Zhang Y, Wang R, et al. Robust object tracking via superpixels and keypoints[J]. *Multimedia Tools and Applications*, 2018, 77(19):25109-25129.
- [56] Tibshirani, R. Regression shrinkage and selection via the LASSO[J]. *Journal of the Royal Statistical Society: Series B*, 58(1): 267-288, 1996.
- [57] Utgoff, P. E. Incremental induction of decision trees[J]. *Machin Leaning*, 4(2):161-186, 1989a.
- [58] Utgoff, P. E. Perceptron trees: A case study in hybrid concept representations[J]. *Connection Science*, 1(4): 377-391, 1989b.
- [59] Utgoff, P. E, N C. Berkman, and J. A Clouse. Decision tree induction based on efficient tree restructuring[J]. *Machine Learning*, 29 (1): 5-44, 1997.
- [60] Vapnik V. The nature of statistical learning theory[M]. Springer, 1995.
- [61] Vapnik, V. N. An overview of statistical learning theory[J]. *IEEE Transactions on Neural Networks*, 1999, 10(5):988-999.
- [62] Wang R, Xie Y, Yang J, et al. Large scale automatic image annotation based on convolutional neural network[J]. *Journal of Visual Communication and Image Representation*, 2017:S1047320317301499.
- [63] Wang J, Xu X, Wang F, et al. A Deep Prediction Architecture for Traffic Flow with Precipitation Information[J]. 2018. https://doi.org/10.1007/978-3-319-93818-9_31.
- [64] Wang R, Wang Q, Yang J, et al. Super-resolution via supervised classification and independent dictionary training[J]. *Multimedia Tools and Applications*, 2018.77: 27709.
- [65] Xue L, Zhong X, Wang R, et al. Low - resolution vehicle recognition based on deep feature fusion[J]. *Multimedia Tools and Applications*, 2018.77: 27617.
- [66] Yuzhen Lu, Fathi M. Salem. Simplified Gating in Long Short-term Memory (LSTM) Recurrent Neural Networks[J]. *arXiv:1701.03441*, 2017.
- [67] Zhou Z H, Jiang Y. NeC4.5: Neural Ensemble Based C4.5[J]. *IEEE Transactions on Knowledge & Data Engineering*, 2004, 16(6):770-773.
- [68] Zhou Z H, Liu X Y. On Multi-Class Cost-Sensitive Learning[C]. *Proceedings, The Twenty-First National Conference on Artificial Intelligence and the Eighteenth Innovative Applications of Artificial Intelligence Conference*, July 16-20, 2006, Boston, Massachusetts, USA. AAAI Press, 2006.
- [69] Zhou Z H, Liu X Y. Training cost-sensitive neural networks with methods addressing the class imbalance problem[J]. *IEEE*

- Transactions on Knowledge and Data Engineering, 2006, 18(1):63-77.
- [70] Zhou, Z.H. Ensemble Methods: Foundations and Algorithms Chapman & Hall/CRC[M]. Boca Raton, FL, 2012.
- [71] Zhou Z H . Large margin distribution learning[M]. Artificial Neural Networks in Pattern Recognition. Springer International Publishing, 2014.
- [72] Zhang Q , Wang R , Yang J , et al. Modified collective decision optimization algorithm with application in trajectory planning of UAV[J]. Applied Intelligence, 2017.48: 2328.
- [73] Alpaydin. 机器学习导论[M]. 范明, 译. 北京: 机械工业出版社, 2015.
- [74] Aurelien Geron. 机器学习实战: 基于 Scikit-Learn 和 TensorFlow[M]. 王静源, 等译. 北京: 机械工业出版社, 2018.
- [75] 陈军令. 基于径向基神经网络的财务预警研究[D]. 中南大学, 2013.
- [76] 陈仲铭, 彭凌西. 深度学习原理与实践[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2018.
- [77] 陈智. 基于卷积神经网络的语义分割研究[D]. 北京交通大学, 2018.
- [78] 蔡自兴, 徐光祐. 人工智能及其应用[M]. 2 版. 北京: 清华大学出版社, 1996.
- [79] Downey, A.B. 贝叶斯思维: 统计建模的 Python 学习法[M]. 许杨毅, 译. 北京: 人民邮电出版社, 2015.
- [80] 笪庆, 曾安详. 强化学习实战: 强化学习在阿里的技术演进和业务更新[M]. 北京: 电子工业出版社, 2018.
- [81] 邓乃扬, 田英杰. 数据挖掘中的新方法: 支持向量机[M]. 北京: 科学出版社, 2004.
- [82] 邓乃扬, 田英杰. 支持向量机: 理论、算法与拓展[M]. 北京: 科学出版社, 2009.
- [83] 邓亚平, 王敏. 基于分块 2DPCA 的人脸识别方法[J]. 计算机工程与设计, 35(9):3229-3233, 2014
- [84] Elad, M. 稀疏与冗余表示: 理论及其在信号与图像处理中的应用[M]. 曹铁勇, 等译. 北京: 国防工业出版社, 2015.
- [85] Flach, P. 机器学习[M]. 段菲, 译. 北京: 人民邮电出版社, 2016.
- [86] 冯超. 深度学习轻松学: 核心算法与视觉实践[M]. 北京: 电子工业出版社, 2017.
- [87] 冯晶. 基于 AdaBoost 算法的人脸检测系统研究及其 SoC 实现[D]. 南京航空航天大学, 2017.
- [88] 冯超. 强化学习精要: 核心算法与 TensorFlow 实现[M]. 北京: 电子工业出版社, 2018.
- [89] Giuseppe Bonaccorso. 机器学习算法[M]. 罗娜, 等译. 北京: 机械工业出版社, 2018.
- [90] 葛强强. 基于深度置信网络的数据驱动故障诊断方法研究[D]. 哈尔滨工业大学, 2016.
- [91] 高隽. 人工神经网络原理及仿真实例[M]. 2 版. 北京: 机械工业出版社, 2007.
- [92] 高聪, 王福龙. 基于模板匹配和局部 HOG 特征的车牌识别算法[J]. 计算机系统应用(1):122-128, 2017.
- [93] 郭宪, 方勇纯. 深入浅出强化学习: 原理入门[M]. 北京: 电子工业出版社, 2018.
- [94] Haykin, S. 神经网络与机器学习[M]. 3 版. 北京: 机械工业出版社, 2011.
- [95] Howard M. Schwartz. 多智能体机器学习: 强化学习方法[M]. 连晓峰, 谭励, 等译. 北京: 机械工业出版社, 2017.
- [96] 韩力群. 人工神经网络教程[M]. 北京: 北京邮电大学出版社, 2006.
- [97] 韩少玄. 基于径向基网络的面板堆石坝永久沉降预测[D]. 大连理工大学, 2015.
- [98] 胡韦伟, 汪荣贵, 胡琼, 等. 基于 Adaboost 定位的实时人脸跟踪方法[C]. 中国仪器仪表学会青年学术会议. 2007.
- [99] 洪冬梅. 基于 LSTM 的自动文本摘要技术研究[D]. 华南理工大学, 2018.
- [100] Ian Goodfellow, Yoshua Bengio, Aaron Courville. 深度学习[M]. 赵申剑等译. 北京: 人民邮电出版社, 2017.
- [101] Jeremy Watt, 等. 机器学习精讲: 基础、算法及应用[M]. 杨博, 译. 北京: 机械工业出版社, 2018.
- [102] 焦李成, 等. 深度学习、优化与识别[M]. 北京: 清华大学出版社, 2017.
- [103] Kuntal Ganguly. GAN: 实战生成对抗网络[M]. 刘梦馨, 译. 北京: 电子工业出版社, 2018.
- [104] 刘全, 傅启明, 等. 大规模强化学习[M]. 北京: 科学出版社, 2016.
- [105] 刘晓曼, 刘永民. 基于分块 K-SVD 字典学习的彩色图像去噪[J]. 南京理工大学学报(自然科学版), 40(5), 2016.
- [106] 刘少山, 唐洁, 等. 第一本无人驾驶技术书[M]. 北京: 电子工业出版社, 2017.
- [107] 刘铁岩, 陈微, 等. 分布式机器学习: 算法、理论与实践[M]. 北京: 机械工业出版社, 2018.
- [108] 李航. 统计学习方法[D]. 北京: 清华大学出版社, 2012.
- [109] 李晓会. 基于深度堆栈网络的高光谱图像分类方法研究[D]. 西北工业大学, 2016.
- [110] 李博. 机器学习实践应用[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2017.
- [111] 李金洪. 深度学习之 TensorFlow: 入门、原理与进阶实战[M]. 北京: 机械工业出版社, 2018.
- [112] 李玉鑑. 深度学习: 卷积神经网络从入门到精通[M]. 北京: 机械工业出版社, 2018.
- [113] 栾悉道, 等. 稀疏表示方法导论[M]. 北京: 电子工业出版社, 2017.
- [114] 梁允文. 通用计算平台上基于 K-SVD 图像去噪算法的并行技术[D]. 中国科学院大学(中国科学院光电技术研究所), 2017.
- [115] 卢博超. 车牌定位与字符识别的方法研究[D]. 华北理工大学, 2017.
- [116] 罗向龙, 焦琴琴, 牛力瑶, et al. 基于深度学习的短时交通流预测 [J]. 计算机应用研究, 2017(1):91-93, 97.
- [117] Mitchell, T.M. 机器学习[M]. 曾华军, 等译. 北京: 机械工业出版社, 2003.
- [118] Miroslav Kubat. 机器学习导论[M]. 王勇, 仲国强, 等译. 北京: 机械工业出版社, 2016.
- [119] Mariette Awad, 等. 高效机器学习: 理论、算法及实践[M]. 李川, 等译. 北京: 机械工业出版社, 2017.
- [120] Marco Wiering, Martijn van Otterlo. 强化学习[M]. 赵地, 等译. 北京: 机械工业出版社, 2018.
- [121] Massih-Reza Amini. 机器学习: 理论、实践与提高[M]. 许鹏, 译. 北京: 人民邮电出版社, 2018.
- [122] 彭博. 深度卷积网络: 原理与实践[M]. 北京: 机械工业出版社, 2018.
- [123] 彭伟. 揭秘深度强化学习[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2018.
- [124] 秦泽南. 基于朴素贝叶斯与 SVM 的垃圾邮件检测系统的设计与实现[D]. 哈尔滨工业大学, 2010.

- [125] 齐岳,黄硕华.基于深度强化学习 DDPG 算法的投资组合管理[J]. 计算机与现代化 (05):93-99, 2018.
- [126] Roberto Battiti, Mauro Brunato. 机器学习与优化[M]. 王戎弋, 译. 北京: 人民邮电出版社, 2018.
- [127] Shai Shalev-Shwartz, 等. 深入理解机器学习: 从原理到算法[M]. 张文生, 等译. 北京: 机械工业出版社, 2016.
- [128] Sanjeev Kulkarni, Gilbert Harman. 统计学习理论基础[M]. 肖忠祥, 等译. 北京: 机械工业出版社, 2016.
- [129] 史丹青. 生成对抗网络入门指南[M]. 北京: 机械工业出版社, 2018.
- [130] 石东源,熊国江, 陈金富, 等. 基于径向基函数神经网络和模糊积分融合的电网分区故障诊断[J]. 中国电机工程学报, 2014,34(04):562-569.
- [131] 单晨晨. 基于深度置信网络的发动机状态监控研究[D]. 中国民航大学, 2017.
- [132] 单九思. 基于深度置信网络的铁路道岔故障诊断系统的研究与实现[D]. 石家庄铁道大学, 2017.
- [133] 孙见青, 汪荣贵, 胡韦伟. 基于 EM-PCA 和级联分类器的人脸检测[J]. 中国科学院大学学报, 2008, 25(2):216-223.
- [134] 孙见青, 汪荣贵, 胡韦伟. 一种新的基于 NGA/PCA 和 SVM 的特征提取方法[J]. 系统仿真学报, 2007,19(20): 4823-4826.
- [135] 山下隆义. 图解深度学习[M]. 张弥, 译. 北京: 人民邮电出版社, 2018.
- [136] Thiago Christiano Silva,赵亮. 基于复杂网络的机器学习方法[M]. 李泽荃, 杨翌, 等译. 北京: 机械工业出版社, 2018.
- [137] 唐亘. 精通数据科学: 从线性回归到深度学习[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2018.
- [138] 王松桂, 等. 线性模型引论[M]. 北京: 科学出版社, 2004.
- [139] 王万森. 人工智能原理及其应用[M].2 版. 北京: 电子工业出版社, 2012.
- [140] 王雪松, 朱美强, 程玉虎. 强化学习原理及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 2014.
- [141] 王旭阳. 基于深度学习的食道癌图像检测技术的研究[D]. 兰州大学, 2017
- [142] 王耶利. 基于 A3C 模型的带预判游戏智能体研究[D]. 哈尔滨工业大学, 2018.
- [143] 汪荣贵,丁凯,杨娟,薛丽霞,张清杨.三角形约束下的词袋模型图像分类方法[J]. 软件学报, 2017,28(7):1847-1861.
- [144] 汪荣贵,张佑生, 高隼,彭青松. Bayes 网络推理结论的解释机制研究[J]. 计算机研究与发展, 2005 (09) :1527-1532.
- [145] 汪荣贵. Bayes 网络理论及其在目标检测中应用研究[D]. 合肥工业大学, 2004.
- [146] 汪荣贵. 算法设计与应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 2017.
- [147] 汪荣贵. 离散数学及其应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 2017.
- [148] 吴岸城. 神经网络与深度学习[M]. 北京: 电子工业出版社, 2016.
- [149] 吴岸城. 深度学习算法实践[M]. 北京: 电子工业出版社, 2016.
- [150] Yoav Goldberg. 基于深度学习的自然语言处理[M]. 车万翔, 等译. 北京: 机械工业出版社, 2018.
- [151] 叶韵. 深度学习与计算机视觉: 算法原理、框架应用与代码实现[M]. 北京: 机械工业出版社, 2017.
- [152] 杨沐晔. 基于随机森林模型的二手房价格评估研究[D]. 中南大学, 2012.
- [153] 杨娟,李永福,汪荣贵,薛丽霞,张清杨. 基于双广义高斯模型和多尺度融合的纹理图像检索方法[J]. 电子与信息学报, 2016,38(11):2856-2863.
- [154] 杨梅芳, 石义龙. 基于 2DPCA+PCA 与 SVM 的人脸识别[J]. 信息技术, 2018(02):32-36.
- [155] 杨志. 基于深度学习的车牌字符识别研究[D]. 安徽大学, 2018.
- [156] 姚宏亮, 王浩, 张佑生, 汪荣贵. 多 Agent 动态影响图及其一种近似推理算法研究[J]. 计算机学报. 2008, 31(2): 236-244.
- [157] 姚宏亮, 王浩, 汪荣贵. 多 Agent 动态影响图的近似计算方法, 计算机研究与发展[J]. 2008, 45(3): 487-495.
- [158] 周志华. 机器学习[M]. 北京: 清华大学出版社, 2016.
- [159] 赵永科. 深度学习: 21 天实战 Caffe[M]. 北京: 电子工业出版社, 2016.
- [160] 赵卫东, 董亮. 机器学习[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2018.
- [161] 赵玉婷,. 基于 deep Q-network 双足机器人非平整地面行走稳定性控制方法[J]. 计算机应用, 2018, 38(9):2459-2463.
- [162] 张超群. 基于深度学习的字符识别[D]. 电子科技大学, 2016.
- [163] 张璐. 基于支持向量机的车牌识别系统的研究[D]. 东北石油大学, 2016.
- [164] 张前. 无人驾驶车辆道路场景环境建模[D]. 西安理工大学, 2018.
- [165] 张佑生、彭青松、汪荣贵. 一种基于变异灰度直方图的视频字幕检测定位方法[J]. 电子学报, 2004, 32(2): 314-317.
- [166] 张世龙. 基于改进策略梯度方法的游戏智能研究[D]. 华南理工大学, 2018.
- [167] 邹鸿程. 微博话题检测与追踪技术研究[D]. 解放军信息工程大学, 2012.
- [168] 朱斐,朱海军,刘全,陈冬火,伏玉琛.一种解决连续空间问题的真实在线自然梯度 AC 算法[J]. 软件学报,2018,29(02):267-282.
- [169] 左国玉,杜婷婷,马蕾. 基于动作注意策略的树形 DDQN 目标候选区域提取方法[J/OL]. 电子与信息学报:1-8,2019.