

Practical Artificial Intelligence

# 人工智能实战

使用C#的机器学习、  
机器人和Agent解决方案

[古] 阿纳达·佩雷兹·卡斯塔诺(Arnaldo Pérez Castaño) 著  
敖富江 周云彦 李 博 李海莉 译

Apress®



清华大学出版社

# 人工智能实战

[古] 阿纳达·佩雷兹·卡斯塔诺(Arnaldo Pérez Castaño) 著  
敖富江 周云彦 李博 李海莉 译

贵州师范学院内部使用

清华大学出版社

北 京

Practical Artificial Intelligence

Arnaldo Pérez Castaño

EISBN: 978-1-4842-3356-6

Original English language edition published by Apress Media. Copyright © 2018 by Apress Media.  
Simplified Chinese-Language edition copyright © 2019 by Tsinghua University Press. All rights reserved.

本书中文简体字版由 Apress 出版公司授权清华大学出版社出版。未经出版者书面许可，不得以任何方式复制或抄袭本书内容。

北京市版权局著作权合同登记号 图字：01-2019-6301

本书封面贴有清华大学出版社防伪标签，无标签者不得销售。

版权所有，侵权必究。侵权举报电话：010-62782989 13701121933

### 图书在版编目(CIP)数据

人工智能实战 / (古) 阿纳达·佩雷兹·卡斯塔诺 著；敖富江 等译。—北京：清华大学出版社，2019.10

书名原文：Practical Artificial Intelligence

ISBN 978-7-302-53856-1

I. ①人… II. ①阿… ②敖… III. ①人工智能—普及读物 IV. ①TP18-49

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2019)第 213297 号

责任编辑：王 军

装帧设计：孔祥峰

责任校对：牛艳敏

责任印制：丛怀宇

出版发行：清华大学出版社

网 址：<http://www.tup.com.cn>, <http://www.wqbook.com>

地 址：北京清华大学学研大厦 A 座 邮 编：100084

社总机：010-62770175 邮 购：010-62786544

投稿与读者服务：010-62776969, [c-service@tup.tsinghua.edu.cn](mailto:c-service@tup.tsinghua.edu.cn)

质量反馈：010-62772015, [zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn](mailto:zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn)

印装者：三河市国英印务有限公司

经 销：全国新华书店

开 本：170mm×240mm 印 张：24 字 数：630 千字

版 次：2019 年 12 月第 1 版 印 次：2019 年 12 月第 1 次印刷

定 价：98.00 元

产品编号：082905-01



# 译者序

从“知情识趣”的 Siri 助手到“倍有面子”的刷脸支付，从“要留清白在人间”的扫地机器人到“春风得意马蹄疾”的自动驾驶，人工智能早已从象牙塔中、科幻小说里，飞入寻常百姓家，它深刻地改变了经济和社会的方方面面，也成为计算机与信息技术中最为热门的领域之一。

本书作者 Arnaldo Pérez Castaño 是一位资深的程序员和人工智能专家，长期从事一线开发工作，在数学建模、算法优化等领域实践经验十分丰富，撰写了多本相关著作。本书是一本关于人工智能的入门书籍，适用于具有一定 C# 编程基础、希望学习掌握人工智能技术，有所建树的读者。和大多数注重数学理论的人工智能书籍不同，本书本着“闻之不若见之，知之不若行之”的理念，采用紧密结合实践的学习模型，从命题逻辑、一阶逻辑、自动定理证明等基础概念开始，全面介绍 Agent、多 Agent 系统、仿真、监督/无监督学习、启发式算法、搜索算法、强化学习等各种人工智能典型应用；每一章均包含一个编写了完整代码的实际问题，便于读者理解抽象的数学理论，在实践中消化吸收，融会贯通。

本书主要章节由敖富江、周云彦、李博、李海莉翻译，参与翻译的还有杜静、张民垒、秦富童、黄赅东、赵旭、刘宇、岁塞、庞训龙、王震、王金锁、孔德强等。为完美地翻译本书，做到“信、达、雅”，译者们在翻译过程中查阅、参考了大量中英文资料。当然，限于水平和精力有限，翻译中的错误和不当之处在所难免，我们非常希望得到读者的积极反馈以利于更正和改进。

感谢本书的作者，于字里行间感受你们的职业精神和专业素养总是那么令人愉悦；感谢清华大学出版社给予我们从事本书翻译工作和学习的机会；感谢清华大学出版社的编辑们，他们为本书的翻译校对投入了巨大热情并付出了很多心血，没有他们的帮助和鼓励，本书不可能顺利付梓。

最后，希望读者能够通过阅读本书，早日掌握人工智能技术，并结合到自己的实际应用，收获事半功倍的助力！

译者



## 作者简介



Arnaldo Pérez Castaño 是一位计算机科学家，居住在古巴哈瓦那。他是 *PrestaShop Recipes* (Apress, 2017) 和一系列编程书籍 —— *JavaScript Fácil*、*HTML y CSS Fácil* 以及 *Python Fácil* (Marcombo S.A.) 的作者，并为 *MSDN Magazine*、*VisualStudio Magazine.com* 和 *Smashing Magazine* 等刊物撰写 AI 相关的文章。他是 Cuba Mania Tour (<http://www.cubamaniatour.com>) 网站的联合创始人之一。

他的专长包括 Java、VB、Python、算法、优化、Matlab、C#、.NET Framework 和人工智能。Arnaldo 通过 [freelancer.com](http://freelancer.com) 提供服务，并担任期刊 *Journal of Mathematical Modelling and Algorithms in Operations Research* (运筹学研究中的数学建模和算法) 的审稿人。他爱好电影和音乐。许多同事称他为“加勒比海科学家”。可以通过 [arnaldo.skywalker@gmail.com](mailto:arnaldo.skywalker@gmail.com) 与他联系。



# 技术审校者简介



James McCaffrey 在微软研究院的机器学习专家组工作。James 拥有南加州大学的认知心理学和计算统计学博士学位、心理学学士、应用数学学士学位以及计算机科学硕士学位。他经常在开发者大会上发表演讲。James 在大学时代工作于迪士尼乐园时学会了面对公众演说，他甚至仍然可以纯靠记忆背诵整部《丛林巡航》的解说词。



# 致 谢

首先，非常感谢微软研究院的 James McCaffrey 博士，他热情地接受了本书技术审校者的任务。我和他是在我为 *MSDN Magazine* 撰写文章时，在网上初识的。他当时的评论总是大有裨益，在本书的整个审查过程中同样如此。我还要感谢他的耐心，因为本书原先计划是 9 章，但最终却成为一本包含 17 章的书，而他一直陪伴着我完成这一切。

此外，我还必须感谢本书的编辑们，Pao Natalie 和 Jessica Vakili，感谢他们在本书写作过程中充满耐心和善解人意。

最后，我还想向所有 AI/机器学习相关领域的研究人员致谢，他们日复一日地尝试用新的进展、技术和想法推动这一非常重要的科学领域的进步。谢谢你们！

# 前 言

本书提出了一种学习人工智能知识的新模式。大多数人工智能书籍都十分偏重理论，而抛弃了能够证明书中介绍的理论的实践问题。而在本书中，我们提出了一种模式，该模式遵循理念：“告知的会被忘记；教会的能够记住；亲身参与，才能学会”，因此，本书中包含理论知识，但保证每章中都包含至少一个编写了完整代码(C#)的实际问题，以便让读者更好地理解，并作为一种让他们亲身体会本章介绍的理论概念和思想的方式。读者可以使用本书附带的代码来执行这些实际问题，这样应该能够帮助读者更好地理解书中描述的概念。

本书尽可能浅显易懂地描述所包含的解释和定义(考虑到它们属于数学、科学领域的事实)，因此不同背景的读者只需要具备最基本的数学或编程知识即可入门并理解内容。

第 1 章和第 2 章探讨许多科学领域(如数学或计算机科学)的基础：逻辑学。在这两章中，我们将介绍命题逻辑、一阶逻辑和自动定理证明，还将介绍用 C#编程的相关实际问题。

在第 3~7 章中，重点关注 Agent 和多 Agent 系统。这几章将深入研究不同类型的 Agent 及其架构，然后提出一个大型实际问题，其中将编写一个火星漫游车程序，其任务是在火星上找到水。我们还将讨论另一个实际问题，即设置一组使用 Windows Communication Foundation(WCF)进行通信的 Agent，最后通过提出另一个实际问题(第 7 章)结束本书的这一部分内容：构成多 Agent 系统的一组 Agent 将协作并进行通信以清洁房间的污垢。

第 8 章将描述人工智能的一个称为仿真的子领域，在该领域中通过运用统计和概率工具模拟现实生活场景。在本章中，我们将模拟一个机场的运作，其中飞机在某个特定时段内到达和离开机场。

第 9~12 章专门介绍监督学习，它是一种非常重要的机器学习范式，基本上是通过向一台机器(程序)提供许多对<数据，分类>的样本，教会它做某件事(通常是对数据进行分类)，其中数据可以是任何事物，它可以是动物、房屋、人等。例如，样本集可能是<象，大型><猫，小型>等。

显然，为了使机器能够理解和处理任何数据，必须输入数值而不是文本。在这些章节中，我们将探讨支持向量机、决策树、神经网络和手写数字识别。

第 13 章将阐释另一种非常重要的机器学习范式，即无监督学习。在无监督学习中，学习的是作为输入接收的数据的结构，没有监督学习中出现的标签(分类)；换句话说，样本只是<数据>，并且不包括分类。因此，无监督学习程序是在没有任何外部帮助的前提下，仅通过研究数据本身提供的信息进行学习。在本章中将介绍聚类，一种经典的无监督学习技术。另外将描述多目标聚类和多目标优化。构造帕累托边界的方法，即作者提出的帕累托边界生成器，也将

包含在本章中。

第 14 章将重点介绍启发式和元启发式，这是在前几章中提到过的一个主题，最终在本章中开展研究。本章将主要描述两种元启发式：遗传算法和禁忌搜索，它们是两种应用最广泛的元启发式类，即基于人口的元启发式和基于单一解的元启发式的典型代表。

第 15 章将探讨游戏编程，特别是需要执行搜索的游戏的世界。本章将详解和实现多种流行的搜索算法。本章还包括一个实际问题，其中设计和编码了一个滑动拼图智能 Agent。

第 16 章将深入探讨博弈论，特别是其称为对抗性搜索的子领域。在该领域中，我们将研究 Minimax 算法并实现一个使用该策略(Minimax)进行游戏的黑白棋 Agent。

第 17 章将描述一种目前被视为人工智能未来的机器学习范式：强化学习。在强化学习中，Agent 通过奖励和惩罚来学习。它们像人类一样与时俱进地学习，当学习过程足够长时，它们可以在游戏中达到极具竞争力的水平，直到击败人类世界冠军(例如西洋双陆棋和围棋)。

本书下载资源请扫封底二维码获取。

# 目 录

第 1 章 逻辑学与人工智能	1
1.1 逻辑是什么	1
1.2 命题逻辑	2
1.3 逻辑联结词	3
1.3.1 否定	3
1.3.2 合取	4
1.3.3 析取	4
1.3.4 蕴涵	5
1.3.5 等值	6
1.4 命题逻辑定律	6
1.5 范式	8
1.6 逻辑电路	9
1.7 实际问题：使用继承和 C# 运算符计算逻辑公式的值	11
1.8 实际问题：将逻辑公式表达为 二叉决策树	14
1.9 实际问题：将公式转换为否定 范式(NNF)	16
1.10 实际问题：将公式转换为合取 范式(CNF)	18
1.11 本章小结	21
第 2 章 自动定理证明和一阶逻辑	23
2.1 自动定理证明	23
2.2 实际问题：C#中的 Clause 类和 Cnf 类	25
2.3 DPLL 算法	30
2.4 实际问题：在命题逻辑中建模 鸽巢原理	37
2.5 实际问题：判断一个命题逻辑 公式是否可满足	37
2.6 一阶逻辑	41
2.7 实际问题：清洁机器人	45
2.8 本章小结	49
第 3 章 Agents	51
3.1 Agent 是什么	51
3.2 Agent 的属性	53
3.3 Agent 环境的类型	55
3.4 有状态 Agent	56
3.5 实际问题：将清洁机器人作为 Agent 建模并对其添加状态	57
3.6 Agent 的架构	63
3.6.1 反应式架构：包容架构	63
3.6.2 慎思式架构：BDI 架构	65
3.6.3 混合架构	69
3.6.4 旅行机	71
3.6.5 InteRRaP	72
3.7 本章小结	73
第 4 章 火星漫游车	75
4.1 火星漫游车简介	75
4.2 火星车的架构	77
4.3 火星车的程序代码	78
4.4 Mars Rover 可视化应用程序	96
4.5 本章小结	106
第 5 章 多 Agent 系统	107
5.1 多 Agent 系统是什么	107
5.2 多 Agent 组织	109

5.3	通信	110	9.3	不完全可分情形	189
5.3.1	言语行为理论	111	9.4	非线性可分情形: 核心技巧	191
5.3.2	Agent 通信语言(ACL)	112	9.5	序列最小优化算法(SMO)	192
5.4	协调与合作	116	9.6	实际问题: SMO 实现	196
5.4.1	使用合同网协商	118	9.7	本章小结	201
5.4.2	社会规范与社会	120	<b>第 10 章</b>	<b>决策树</b>	<b>203</b>
5.5	本章小结	121	10.1	决策树是什么	203
<b>第 6 章</b>	<b>基于 WCF 的多 Agent 系统</b>		10.2	利用 ID3 算法生成决策树	206
	通信	123	10.2.1	熵和信息增益	207
6.1	服务	123	10.2.2	实际问题: 实现 ID3 算法	208
6.2	契约	124	10.2.3	C4.5 算法	217
6.3	绑定	126	10.2.4	实际问题: 实现 C4.5 算法	220
6.4	端点	126	10.3	本章小结	226
6.5	发布者/订阅者模式	127	<b>第 11 章</b>	<b>神经网络</b>	<b>227</b>
6.6	实际问题: 利用 WCF 在多个 Agent 之间通信	127	11.1	神经网络是什么	227
6.7	本章小结	138	11.2	感知器: 单神经网络	229
<b>第 7 章</b>	<b>清洁 Agent: 一个多 Agent 系统</b>		11.2.1	实际问题: 实现感知器神经网络	231
	问题	139	11.2.2	Adaline 神经网络和梯度下降搜索	235
7.1	程序结构	139	11.2.3	随机逼近法	237
7.2	清洁任务	140	11.2.4	实际问题: 实现 Adaline 神经网络	238
7.3	清洁 Agent 平台	141	11.2.5	多层网络	239
7.4	合同网	142	11.2.6	反向传播算法	241
7.5	FIPA-ACL	146	11.2.7	实际问题: 实现反向传播算法并解决 XOR 问题	244
7.6	MAS 清洁 Agent	149	11.3	本章小结	251
7.7	GUI	155	<b>第 12 章</b>	<b>手写数字识别</b>	<b>253</b>
7.8	运行应用程序	157	12.1	手写数字识别是什么	253
7.9	本章小结	159	12.2	训练数据集	254
<b>第 8 章</b>	<b>仿真</b>	<b>161</b>	12.3	用于 HDR 的多层神经网络	255
8.1	仿真是什么	161	12.4	实现	256
8.2	离散事件仿真	162	12.5	测试	261
8.3	概率分布	163	12.6	本章小结	262
8.4	实际问题: 机场仿真	165			
8.5	本章小结	173			
<b>第 9 章</b>	<b>支持向量机</b>	<b>175</b>			
9.1	支持向量机是什么	176			
9.2	实际问题: 利用 C#实现线性 SVM	181			

<b>第 13 章 聚类和多目标聚类</b> .....263	15.6 有信息搜索..... 319
13.1 聚类是什么..... 263	15.7 运用 A*算法求解滑块拼图..... 321
13.2 层次聚类..... 265	15.8 本章小结..... 324
13.3 划分聚类..... 267	<b>第 16 章 博弈论：对抗性搜索与</b>
13.4 实际问题：k-Means 算法..... 269	<b>黑白棋游戏</b> .....325
13.5 多目标聚类..... 274	16.1 博弈论是什么..... 326
13.6 帕累托边界生成器..... 275	16.2 对抗性搜索..... 327
13.7 本章小结..... 278	16.3 极小化极大搜索算法..... 328
<b>第 14 章 启发式方法&amp;元启发式方法</b> .....279	16.4 $\alpha$ - $\beta$ 剪枝算法..... 330
14.1 启发式方法是什么..... 279	16.5 黑白棋游戏..... 332
14.2 爬山算法..... 280	16.6 实际问题：在 Windows 窗体
14.3 实际问题：实现爬山算法..... 282	程序中实现黑白棋游戏..... 335
14.4 P-元启发式算法：遗传算法..... 286	16.7 实际问题：使用 Minimax 算法
14.5 实际问题：对旅行商问题实现	实现黑白棋 AI..... 347
遗传算法..... 288	16.8 本章小结..... 349
14.6 S-元启发式方法：禁忌搜索..... 296	<b>第 17 章 强化学习</b> .....351
14.7 本章小结..... 300	17.1 强化学习是什么..... 351
<b>第 15 章 游戏编程</b> .....303	17.2 马尔可夫决策过程..... 352
15.1 电子游戏是什么..... 303	17.3 值函数/动作值函数与策略..... 355
15.2 游戏中的搜索..... 304	17.4 值迭代算法..... 357
15.3 无信息搜索..... 306	17.5 策略迭代算法..... 358
15.4 实际问题：实现 BFS、DFS、	17.6 Q-Learning 和时序差分学习..... 359
DLS 和 IDS..... 308	17.7 实际问题：使用 Q-Learning
15.5 实际问题：在滑块拼图问题中	求解迷宫问题..... 360
实现双向搜索..... 313	17.8 本章小结..... 371

# 第 1 章

## 逻辑学与人工智能

在本章中，我们将阐释一个不仅对人工智能(Artificial Intelligence, AI)，也对许多其他知识领域，如数学、物理、医学、哲学等，都至关重要的主题。自从上古时代开始，该主题(逻辑)就得到了一些如亚里士多德、欧几里得和柏拉图等伟大的数学家和哲学家的深入研究和形式化阐述。AI 诞生于人类的早期阶段，是一种使科学得以蓬勃发展的基本工具。它令我们复杂的人类意识变得清晰而直接，并理顺我们有时混乱的思维。

逻辑是本章的阐述重点。本章将解释它的一些基本概念、概念和分支，以及它与计算机科学和 AI 的关系。该主题对于理解本书中将阐释的许多概念至关重要。此外，如果没有逻辑，又如何能创造出优秀的人工智能？逻辑指导我们思维的理性，所以，如果我们绕过这一极其重要的、具备于人类“天生”智能中的、在许多情况下决定决策(或者确切地说是理性决策)的元素(逻辑)，又如何能创造出一个人工版本的思维？

本书将以这些主题开始：命题逻辑，一阶逻辑，一些实际问题。在这些实际问题中我们将学习：如何创建一个逻辑框架，如何使用一种名为 DPLL 的优秀算法解决 SAT(satisfiability, 可满足性)问题，以及如何使用一阶逻辑组件编写第一个简单、朴素的清洁机器人。

### ■ 注意

逻辑可以分为数理逻辑、哲学逻辑、计算逻辑、布尔逻辑、模糊逻辑、量子逻辑等类别。在本书中将讨论计算逻辑，它涉及计算机科学和逻辑学中必然交叉的相关领域。

## 1.1 逻辑是什么

对于逻辑是什么以及它在我们日常生活中的作用有多大，我们都有一点直觉上的认识。尽管具有关于逻辑的此类常识或文化理念，但令人惊奇的是，在科学界中对于逻辑到底是什么，却(迄今为止)并没有一个正式或放之四海而皆准的定义。

为了向逻辑的奠基者们寻求它的定义，我们可以追溯到它的起源，发现逻辑(logic)这个词实际上派生于古希腊语 *logike*，意为“概念、思路或思想”。

一些理论家将逻辑定义为“思维的科学”。虽然该定义似乎是对我们通常与逻辑一词所联系到一起的那些事物的一种不错的近似描述，但它其实并不非常准确，因为逻辑并不是与思想和推理研究相关的唯一一种科学。现实情况是，该学科根深蒂固地建立在所有其他科学的基础之上，很难对它给出一个正式定义。

在本书中，将把逻辑视为形式化人类推理的一种方式。

由于计算逻辑是与计算机科学相关的逻辑学分支，因此在此将阐释关于该主题的一些重要概念。在此描述的概念最终将在全书及书中所提出的每个实际问题中都会用到。

逻辑广泛应用于计算机科学中，例如处理器层次的逻辑门，硬件(例如浮点运算)和软件的验证，高级编程中的约束编程，以及人工智能中的规划、调度、代理控制等问题。

## 1.2 命题逻辑

在人类的日常生活和交流过程中，我们不断倾听具有某种意义的语言表达，在其中我们可以找到命题。

命题(proposition)是可以根据其真实性(“真”或“1”，“假”或“0”等)或其模态(有可能的、不可能的、必要的等)进行分类的陈述。每个命题都表达了一种代表其意义和内容的思想。由于我们语言中表达的方式种类繁多，可以将它们分类为叙述、感叹、提问等。在本书中，将关注第一类命题，即陈述，它们是对判断的表达，以下将其简称为命题。

下面是一些命题的例子。

- (1) “吸烟会损害你的健康。”
- (2) “迈克尔·乔丹是有史以来最伟大的篮球运动员。”
- (3) “爵士乐是世界上最酷的音乐流派。”
- (4) “100 大于 1。”
- (5) “哈瓦那有美丽的海滩。”
- (6) “第二次世界大战于 1945 年结束。”
- (7) “我听史汀的音乐。”
- (8) “我会阅读西班牙诗人拉斐尔·阿尔伯蒂的诗作。”

这样的命题称为简单(simple)命题或原子(atomic)命题，我们可能在任何日常对话中使用到此类命题。为了增加它们的复杂性和含义，可以使用复合命题(compound proposition)，此类命题是通过逻辑联结词将简单命题(例如上文所列)连接在一起获得的。

这样，基于上文列出的命题，可以得到以下(未必为真或有意义的)复合命题。

- (1) “哈瓦那没有(NOT)美丽的海滩。”
  - (2) “吸烟会损害你的健康并且(AND)100 大于 1。”
  - (3) “迈克尔·乔丹是有史以来最伟大的篮球运动员或者(OR)第二次世界大战于 1945 年结束。”
  - (4) “如果(IF)爵士乐是世界上最酷的音乐类型，那么(THEN)我会听史汀的音乐。”
  - (5) “当且仅当(IF ONLY IF)100 大于 1 时，我才阅读西班牙诗人拉斐尔·阿尔伯蒂的诗作。”
- 其中的逻辑联结词以大写字母单词或短语表示，如“NOT”、“AND”、“OR”、“IF ... THEN”和“IF AND ONLY IF”。

简单命题或原子命题用称为命题变量(propositional variables)的字母(p、q、r 等)表示。我们可以将以下一些命题命名如下。

- (1)  $p$  = “吸烟会损害你的健康。”
- (2)  $q$  = “迈克尔·乔丹是有史以来最伟大的篮球运动员。”
- (3)  $r$  = “爵士乐是世界上最酷的音乐流派。”
- (4)  $s$  = “100 大于 1”。

命题既可以为真(1)也可以为假(0),具体取决于它的构成命题的真假值,这种命题称为公式。请注意,公式可以很简单,即仅由一个命题构成,因此每个命题都可认为是一个公式。

命题逻辑的语法遵循以下规则。

- (1) 所有变量和命题常量(真/假)都是公式。
- (2) 如果  $F$  是公式,则  $\text{NOT } F$  也是公式。
- (3) 如果  $F$  和  $G$  是公式,那么  $F \text{ AND } G$ 、 $F \text{ OR } G$ 、 $F \Rightarrow G$ 、 $F \Leftrightarrow G$  也是公式。

公式  $F$  的解释是对  $F$  中出现的每个命题变量进行真值赋值,并确定  $F$  的真值。因为每个变量总是有两个可能的取值(真/假或 1/0),公式  $F$  的解释总数是  $2^n$ ,其中  $n$  是  $F$  中出现的变量总数。

在所有解释下值都为真的命题称为重言式(tautology)或逻辑定律(logic law)。

在所有解释下值都为假的命题称为矛盾式(contradiction)或不可满足式(unsatisfiable)。

本书着重研究组合命题的真值以及它们的计算方式。在可满足性问题中,我们接收一个公式,通常是一种特殊的标准化形式,称为合取范式(Conjunctive Normal Form, CNF),我们将尝试为其原子命题指派真值,使公式变为真(1),如果这样的指派组合存在,则称该公式是可满足(satisfiable)的。这是计算机科学中的一个典型问题,本章将讨论该问题。

在下一节中,将进一步介绍逻辑联结词,因为它们在确定公式最终是否取真值上起着决定性作用。

## 1.3 逻辑联结词

通常而言,逻辑联结词使用以下符号表示。

- $\neg$  表示否定(非)
- $\wedge$  表示合取(与)
- $\vee$  表示析取(或)
- $\Rightarrow$  表示蕴含(“如果...那么”)
- $\Leftrightarrow$  表示双重蕴含或等值(“当且仅当”)

逻辑联结词的行为类似一元或二元(接收一个或两个参数)函数,其输出值可以为 1(真)或 0(假)。为了更好地理解每个联结词及其每个可能输入的输出,可以使用真值表(truth table)。

### ■ 注意

波浪符号( $\sim$ )也用于表示否定。

在真值表中,列对应于变量和输出,行则对应于各命题变量的所有可能取值组合。在后面几小节中,将给出每个联结词的详细真值表。

### 1.3.1 否定

设有一个命题  $p$ ,则该命题的否命题记为  $\neg p$ (读作非  $p$ )。这是一个一元逻辑联结词,因为它只需要一个命题作为输入。

接下来尝试否定一些前文所述的命题。

- (1) “吸烟并不损害健康。”

- (2) “迈克尔·乔丹不是有史以来最伟大的篮球运动员。”
- (3) “爵士乐不是世界上最酷的音乐流派。”
- (4) “100 不比 1 大。”
- (5) “哈瓦那没有美丽的海滩。”
- (6) “第二次世界大战不是在 1945 年结束。”

否定逻辑联结词的真值表如表 1-1 所示。

表 1-1 否定逻辑联结词的真值表

p	$\neg p$
1	0
0	1

从表 1-1 中可以看出，如果命题 p 为真(1)，则其否命题为假(0)；而当命题 p 为假(0)时，则其否命题为真(1)。

### 1.3.2 合取

设有命题 p、q，则它们的合取记为  $p \wedge q$  (读作 p 与 q)，它是一个二元逻辑联结词，需要两个命题作为输入。

前述命题的合取可以简单地通过使用词语 AND 得到，如下所示。

- (1) “吸烟损害健康并且我会阅读西班牙诗人拉斐尔·阿尔伯蒂的诗作。”
- (2) “迈克尔·乔丹是有史以来最伟大的篮球运动员并且爵士乐是世界上最酷的音乐流派。”
- (3) “100 大于 1 并且哈瓦那有美丽的海滩。”

合取逻辑联结词的真值表如表 1-2 所示。

表 1-2 合取逻辑联结词的真值表

p	q	$P \wedge q$
1	0	0
0	1	0
0	0	0
1	1	1

从表 1-2 中可以看出，只有当 p 和 q 同时为真(1)时， $p \wedge q$  才为真(1)。

### 1.3.3 析取

设有命题 p、q，则它们的析取记为  $p \vee q$  (读作 p 或 q)。它是一个二元逻辑联结词，需要两个命题作为输入。

前述命题的析取可以简单地通过使用词语 OR 得到，例如：

- (1) “我会阅读西班牙诗人拉斐尔·阿尔伯蒂的诗作，或聆听史汀的音乐。”
- (2) “迈克尔·乔丹是有史以来最伟大的篮球运动员，或爵士乐是世界上最酷的音乐流派。”
- (3) “第二次世界大战在 1945 年结束，或哈瓦那有美丽的海滩。”

析取联结词的真值表如表 1-3 所示。

表 1-3 析取联结词的真值表

p	q	$p \vee q$
1	0	1
0	1	1
0	0	0
1	1	1

从表 1-3 中可以看出, 当 p 或 q 有一个为真时,  $p \vee q$  就为真。

### 1.3.4 蕴涵

在数学中, 有无数表达法用于表示一种蕴涵关系, 即形如 “if...then” 关系。若有命题 p、q, 则它们的蕴涵关系可表示为  $p \Rightarrow q$  (读作 p 蕴涵 q)。这是一个二元逻辑联结词, 它需要两个命题作为输入, 并表明由 p 的真实性可以推导出 q 的真实性。

我们称 q 为真是 p 为真的必要条件, p 为真是 q 为真的充分条件。

蕴涵联结词类似于在多种命令式编程语言(如 C#、Java 或 Python)中使用的条件语句(if)。为了理解联结词产生的输出, 请设想以下命题:

- p = “John 是聪明的。”
- q = “John 去了剧院。”

蕴涵  $p \Rightarrow q$  将描述为 “如果 John 是聪明的, 则他去剧院”。接下来分析 p、q 的每个可能的值组合以及联结词得到的结果。

第 1 种情况, 其中  $p=1, q=1$ 。此时, John 很聪明, 且他去剧院; 因此,  $p \Rightarrow q$  为真。

第 2 种情况, 其中  $p=1, q=0$ 。此时, John 很聪明, 但他并不去剧院; 因此,  $p \Rightarrow q$  为假。

第 3 种情况, 其中  $p=0, q=1$ 。此时, 即使 John 去了剧院, 但他并不聪明; 由于 p 为假, 而  $p \Rightarrow q$  仅描述当  $p(=John \text{ 聪明})$  为真时的状况, 因此无法否定命题  $p \Rightarrow q$ ; 因而该命题为真。

第 4 种情况, 其中  $p=0, q=0$ 。此时, John 不聪明, 也不去剧院。由于 p 为假, 而  $p \Rightarrow q$  仅描述当  $p(=John \text{ 聪明})$  为真时的状况, 因此  $p \Rightarrow q$  为真。

总而言之, 当  $p=0$  时, 命题  $p \Rightarrow q$  恒为真, 因为, 如果条件 p(John 是聪明的)不成立, 则结果(John 去剧院)可能是任何情况。该命题可以解释为 “如果 John 聪明, 那么他会去剧院”, 或者 “如果 John 不聪明, 那么可能发生任何事情”, 而后者为真。

蕴涵联结词的真值表如表 1-4 所示。

表 1-4 蕴涵联结词的真值表

p	q	$P \Rightarrow q$
1	0	0
0	1	1
0	0	1
1	1	1

当命题 p 为假或命题 p 与 q 均为真时, 命题  $P \Rightarrow q$  为真。