



智能

科/学/技/术/著/作/丛/书

生物地理学优化算法及应用

郑宇军 陈胜勇 张敏霞 著



科学出版社

智能科学技术著作丛书

生物地理学优化算法及应用

郑宇军 陈胜勇 张敏霞 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

生物地理学优化算法是一种新兴的智能优化算法。本书系统介绍了生物地理学优化算法的研究进展与典型应用,主要内容包括基础算法与国内外研究现状、对基础算法的重要改进、与其他启发式算法的融合,以及算法在交通运输、作业调度、图像处理和神经网络训练等领域的应用。

本书可供智能计算领域的科研人员和工程技术人员使用,也可作为计算机科学、人工智能、自动化和管理科学等专业的教师和学生的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

生物地理学优化算法及应用/郑宇军,陈胜勇,张敏霞著. —北京:科学出版社,2016

(智能科学技术著作丛书)

ISBN 978-7-03-047540-4

I. ①生… II. ①郑…②陈…③张… III. ①生物地理学-最优化算法-研究 IV. ①TP301.6

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 044371 号

责任编辑:朱英彪 乔丽维 / 责任校对:胡小洁

责任印制:张 倩 / 封面设计:陈 敬

科学出版社 出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

文林印务有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

2016 年 6 月第 一 版 开本:720×1000 1/16

2016 年 6 月第一次印刷 印张:16

字数:320 000

定价:98.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

《智能科学技术著作丛书》序

“智能”是“信息”的精彩结晶,“智能科学技术”是“信息科学技术”的辉煌篇章,“智能化”是“信息化”发展的新动向、新阶段。

“智能科学技术”(intelligence science & technology, IST)是关于“广义智能”的理论方法和应用技术的综合性科学技术领域,其研究对象包括:

- “自然智能”(natural intelligence, NI),包括“人的智能”(human intelligence, HI)及其他“生物智能”(biological intelligence, BI)。
- “人工智能”(artificial intelligence, AI),包括“机器智能”(machine intelligence, MI)与“智能机器”(intelligent machine, IM)。
- “集成智能”(integrated intelligence, II),即“人的智能”与“机器智能”人机互补的集成智能。
- “协同智能”(cooperative intelligence, CI),指“个体智能”相互协调共生的群体协同智能。
- “分布智能”(distributed intelligence, DI),如广域信息网、分散大系统的分布式智能。

“人工智能”学科自 1956 年诞生以来,在起伏、曲折的科学征途上不断前进、发展,从狭义人工智能走向广义人工智能,从个体人工智能到群体人工智能,从集中式人工智能到分布式人工智能,在理论方法研究和应用技术开发方面都取得了重大进展。如果说当年“人工智能”学科的诞生是生物科学技术与信息科学技术、系统科学技术的一次成功的结合,那么可以认为,现在“智能科学技术”领域的兴起是在信息化、网络化时代又一次新的多学科交融。

1981 年,“中国人工智能学会”(Chinese Association for Artificial Intelligence, CAAD)正式成立,25 年来,从艰苦创业到成长壮大,从学习跟踪到自主研发,团结我国广大学者,在“人工智能”的研究开发及应用方面取得了显著的进展,促进了“智能科学技术”的发展。在华夏文化与东方哲学影响下,我国智能科学技术的研究、开发及应用,在学术思想与科学方法上,具有综合性、整体性、协调性的特色,在理论方法研究与应用技术开发方面,取得了具有创新性、开拓性的成果。“智能化”已成为当前新技术、新产品的发展方向和显著标志。

为了适时总结、交流、宣传我国学者在“智能科学技术”领域的研究开发及应用成果,中国人工智能学会与科学出版社合作编辑出版《智能科学技术著作丛书》。需要强调的是,这套丛书将优先出版那些有助于将科学技术转化为生产力以及对社会和国民经济建设有重大作用和应用前景的著作。

我们相信,有广大智能科学技术工作者的积极参与和大力支持,以及编委们的共同努力,《智能科学技术著作丛书》将为繁荣我国智能科学技术事业、增强自主创新能力、建设创新型国家做出应有的贡献。

祝《智能科学技术著作丛书》出版,特赋贺诗一首:

**智能科技领域广
人机集成智能强
群体智能协同好
智能创新更辉煌**

涂序彦

中国人工智能学会荣誉理事长

2005年12月18日

前 言

自然启发算法是通过模拟和借鉴自然界的机理来求解现实工程问题的计算方法,它起源于20世纪50年代,并随着1975年遗传算法的提出而引起了广泛的关注。近20年来,已经涌现出一系列新兴的自然启发算法,其性能表现更加优越,应用范围也日益扩展,目前已成为人工智能领域的研究热点。

2008年,学者Simon在*IEEE Transactions on Evolutionary Computation*上提出了一种名为生物地理学优化(biogeography-based optimization, BBO)的新型启发式算法。该算法将问题的候选解模拟为生物地理学中的栖息地,巧妙地运用栖息地之间的物种迁移规律来搜索问题的最优解,在大量实际优化问题上表现出优异的性能,在学术界和工业界引起了广泛的研究兴趣。

本书作者及所在的课题组长期从事自然启发算法与应用的研究。我们从2010年开始关注BBO算法,针对算法的改进、与其他启发式算法的融合以及算法的工程应用开展了深入研究,在*Computers & Operations Research*、*IEEE Transactions on Evolutionary Computation*、*IEEE Transactions on Fuzzy Systems*、*IEEE Transactions on Intelligent Systems*等国际知名期刊上发表了多篇论文,其中包括提出了一种BBO算法的重大改进——生态地理学优化算法(ecogeography-based optimization, EBO),并将该算法应用于灾难救援中的工程维修任务调度,取得了良好的实际效果,这一成果获得了2014年国际运筹学联合会颁发的“国际运筹学进展奖”(IFORS Prize for Development)第二名(Runner-Up)。

本书系统介绍了BBO的基础算法和当前的研究进展,重点介绍了我们对BBO算法的改进、扩展与应用成果。全书共9章,第1章介绍优化问题和优化算法的基本概念,第2章介绍生物地理学优化的基础算法及当前的研究进展,第3章和第4章分别介绍我们对基础生物地理学优化算法的两个重要改进,第5章介绍生物地理学优化与其他启发式算法的融合,第6~9章分别介绍算法在交通运输、作业调度、图像处理和神经网络训练4个典型领域的应用。本书附录部分提供了几种主要BBO算法的Matlab程序代码。

本书可供智能计算领域的科研人员和工程技术人员使用,也可作为计算机科学、人工智能、自动化和管理科学等专业的教师和学生的参考书。

本书1~5章和第7章由郑宇军编写,第6章由张敏霞编写,第8章和第9章由陈胜勇编写,全书由郑宇军统稿。张蓓、吴晓蓓和张杰峰等研究生也承担了部分

文字整理和程序调试的工作。

借本书出版之际,衷心感谢中国科学院数学与系统科学研究院的袁亚湘老师、胡晓东老师和刘克老师,北京大学的谭营老师,西交利物浦大学的史玉回老师,绍兴文理学院的马海平老师,以及浙江工业大学的王万良老师、范菁老师、朱艺华老师和沈国江老师等给予的关心、指导和帮助。本书出版得到了国家自然科学基金(编号:61325019、61473263)和浙江工业大学专著与研究生教材出版基金(编号:20150104)的资助,在此表示感谢。

限于作者水平,书中难免存在不妥或需进一步改进之处,恳请读者提出宝贵意见和建议。

作 者

2016 年 1 月

《智能科学技术著作丛书》编委会

名誉主编：吴文俊

主 编：涂序彦

副 主 编：钟义信 史忠植 何华灿 何新贵 李德毅 蔡自兴 孙增圻
谭 民 韩力群 黄河燕

秘 书 长：黄河燕

编 委：(按姓氏汉语拼音排序)

蔡庆生(中国科学技术大学)

蔡自兴(中南大学)

杜军平(北京邮电大学)

韩力群(北京工商大学)

何华灿(西北工业大学)

何 清(中国科学院计算技术研究所)

何新贵(北京大学)

黄河燕(北京理工大学)

黄心汉(华中科技大学)

焦李成(西安电子科技大学)

李德毅(中国人民解放军总参谋部第六十一研究所)

李祖枢(重庆大学)

刘 宏(北京大学)

刘 清(南昌大学)

秦世引(北京航空航天大学)

邱玉辉(西南师范大学)

阮秋琦(北京交通大学)

史忠植(中国科学院计算技术研究所)

孙增圻(清华大学)

谭 民(中国科学院自动化研究所)

谭铁牛(中国科学院自动化研究所)

涂序彦(北京科技大学)

王国胤(重庆邮电学院)

王家钦(清华大学)

王万森(首都师范大学)

吴文俊(中国科学院数学与系统科学研究院)

杨义先(北京邮电大学)

于洪珍(中国矿业大学)

张琴珠(华东师范大学)

赵沁平(北京航空航天大学)

钟义信(北京邮电大学)

庄越挺(浙江大学)

目 录

《智能科学技术著作丛书》序

前言

第 1 章 优化问题与算法	1
1.1 优化问题	2
1.1.1 连续优化问题	2
1.1.2 组合优化问题	4
1.2 精确优化算法	6
1.2.1 基于导数的方法	6
1.2.2 线性规划法	8
1.2.3 分支限界法	9
1.2.4 动态规划法	10
1.3 启发式算法	11
1.3.1 遗传算法	12
1.3.2 模拟退火算法	14
1.3.3 蚁群优化算法	15
1.3.4 粒子群优化算法	17
1.3.5 差分进化算法	18
1.3.6 和声搜索算法	20
1.3.7 烟花爆炸算法	20
1.4 小结	22
参考文献	22
第 2 章 生物地理学优化算法	24
2.1 生物地理学背景知识	24
2.2 生物地理学优化(BBO)算法	28
2.2.1 迁移操作	28
2.2.2 变异操作	29
2.2.3 算法框架	30
2.2.4 与一些经典启发式算法的比较	31
2.3 生物地理学优化算法研究进展	34
2.3.1 算法改进研究	34

2.3.2	算法在约束优化中的应用研究	37
2.3.3	算法在多目标优化中的应用研究	41
2.3.4	算法在组合优化中的应用研究	44
2.4	小结	46
	参考文献	46
第3章	局部化生物地理学优化算法	50
3.1	种群拓扑结构	50
3.1.1	全局拓扑结构	50
3.1.2	局部拓扑结构	51
3.1.3	局部拓扑结构在启发式算法中的应用	55
3.2	局部化生物地理学优化(Local-BBO)算法	56
3.2.1	基于环形结构的迁移	56
3.2.2	基于矩形结构的迁移	57
3.2.3	基于随机结构的迁移	58
3.2.4	Local-BBO 算法框架	59
3.3	算法性能测试	60
3.3.1	实验配置	60
3.3.2	实验结果	62
3.4	小结	66
	参考文献	67
第4章	生态地理学优化算法	69
4.1	生态地理学背景知识	69
4.2	生态地理学优化(EBO)算法	71
4.2.1	局部迁移和全局迁移	71
4.2.2	成熟度控制	72
4.2.3	EBO 算法框架	73
4.3	算法性能测试	74
4.3.1	实验配置	74
4.3.2	不成熟度参数影响测试	74
4.3.3	比较实验结果	75
4.4	小结	87
	参考文献	87
第5章	混合型生物地理学优化算法	88
5.1	与差分进化算法的混合	88
5.1.1	DE/BBO 算法	88

5.1.2	Local-DE/BBO 算法	91
5.1.3	自适应 DE/BBO 算法	97
5.2	与和声搜索算法的混合	106
5.2.1	BHS 算法	106
5.2.2	算法性能测试	107
5.3	与烟花爆炸算法的混合	111
5.3.1	生物地理学优化/烟花爆炸算法	111
5.3.2	算法性能测试	112
5.4	小结	116
	参考文献	116
第 6 章	生物地理学优化算法在交通运输中的应用	118
6.1	求解一般运输规划问题	118
6.1.1	一般运输规划问题	118
6.1.2	求解问题的 BBO 算法	119
6.1.3	算法性能实验	121
6.2	求解含路径规划的运输规划问题	124
6.2.1	含路径规划的运输规划问题	124
6.2.2	求解问题的 BBO 算法	125
6.2.3	算法性能实验	128
6.3	求解铁路车皮应急调度问题	131
6.3.1	铁路车皮应急调度问题	131
6.3.2	求解问题的 BBO/DE 算法	135
6.3.3	算法性能实验	137
6.4	求解应急空运问题	141
6.4.1	应急空运问题	141
6.4.2	求解问题的 EBO 算法	143
6.4.3	算法性能实验	143
6.5	小结	146
	参考文献	146
第 7 章	生物地理学优化在作业调度中的应用	148
7.1	基于 BBO 的流水线调度	148
7.1.1	流水线调度问题	148
7.1.2	求解问题的 BBO 算法	150
7.1.3	算法性能实验	152
7.2	基于 BBO 的车间作业调度	154

7.2.1	车间作业调度问题	154
7.2.2	求解问题的 BBMO 算法	156
7.2.3	算法性能实验	160
7.3	基于 BBO 的维修作业分配与调度	162
7.3.1	维修作业分配-调度问题	162
7.3.2	求解问题的多目标 BBO 算法	165
7.3.3	算法性能实验	167
7.4	基于 EBO 的课程表调度	170
7.4.1	大学课程表调度问题	170
7.4.2	求解问题的 EBO 算法	173
7.4.3	算法性能实验	176
7.5	小结	179
	参考文献	179
第 8 章	生物地理学优化算法在图像处理中的应用	183
8.1	用于图像压缩的 BBO 算法	183
8.1.1	分形图像压缩问题	183
8.1.2	求解问题的 BBO 算法	185
8.1.3	算法性能实验	186
8.2	用于显著性目标检测的 BBO 算法	188
8.2.1	显著性目标检测问题	188
8.2.2	求解问题的 BBO 算法	189
8.2.3	算法性能实验	190
8.3	用于图像分割的 BBO 算法	195
8.3.1	图像分割问题	195
8.3.2	基于 BBO 的模糊 C 均值聚类算法	197
8.3.3	算法性能实验	198
8.4	小结	203
	参考文献	203
第 9 章	基于生物地理学优化的神经网络训练	206
9.1	神经网络简介	206
9.2	基于 BBO 的神经网络参数优化	208
9.2.1	前馈神经网络的参数优化问题	208
9.2.2	用于网络参数优化的 BBO 算法	209
9.2.3	算法性能实验	210
9.3	基于 BBO 的神经网络结构与参数优化	212

9.3.1	前馈神经网络的结构与参数优化问题	212
9.3.2	用于网络结构与参数优化的 BBO 算法	213
9.3.3	算法性能实验	215
9.4	基于 BBO 的模糊-神经网络训练	217
9.4.1	模糊-神经网络优化问题	217
9.4.2	用于模糊-神经网络训练的 BBO 算法	222
9.4.3	算法性能实验	223
9.5	小结	227
参考文献		227
附录	几种主要 BBO 算法的 Matlab 代码	229

第 1 章 优化问题与算法

优化问题贯穿于人类活动的所有方面。从原始人狩猎的分工协作,到农业生产中的精耕细作,再到工业生产中的作业调度;从家庭餐桌上的营养搭配,到单位的组织分工,乃至国家政策的制定与实施,无不体现着优化的思想。早期的优化主要依赖于经验分析,随着知识水平的提高,人们开始更多地使用精确的数学方法来描述和求解优化问题。自 20 世纪以来,飞速发展的电子计算机技术和人工智能技术为优化提供了全新的手段,使得人们能够有效应对很多以往无法解决的复杂优化问题,极大地促进了社会的进步和发展。

在优化问题的研究过程中,科学家常常能够从大自然中得到启迪,因为大自然本身就是一个“优化大师”。例如,在物种的进化过程中,不适应环境的基因逐步被淘汰,适应环境的基因更有可能被保留下来,并通过优化组合来进一步提高物种的竞争力;以此为启发,Holland 提出了遗传算法(genetic algorithms,GA)^[1]来求解优化问题。金属物体在降温的过程中,其每一个分子都会尽可能地向能量最低状态演化,最终使得所有分子的排列由无序转为有序;以此为启发,Kirkpatrick 等提出了模拟退火(simulated annealing,SA)算法^[2]。一只蚂蚁的能力微乎其微,蚁群却能够以一种奇妙的方式将蚂蚁组织起来,高效地协同完成觅食、筑巢和搬家等复杂任务,从而顽强地在自然界中生存下来;以此为启发,Dorigo 等提出了蚁群优化(ant colony optimization,ACO)算法^[3]。类似地,通过模拟鸟类集群的飞行模式,Kennedy 和 Eberhart 提出了粒子群优化(particle swarm optimization,PSO)算法^[4]。通过模拟蜂群的自组织模式,Karaboga 提出了人工蜂群(artificial bee colony,ABC)算法^[5]。此外,还涌现出差分进化(differential evolution,DE)^[6]、和声搜索(harmony search,HS)^[7]、杂草入侵优化(invasive weed optimization,IWO)^[8]和布谷鸟搜索(cuckoo search,CS)^[9]等启发式算法。

在近年来出现的新型启发式算法中,一种名为生物地理学优化(biogeography-based optimization,BBO)^[10]的算法取得了很大的成功。该算法是通过模拟生物地理学(Biogeography)中栖息地之间的物种迁移过程来求解优化问题,它不仅有着良好的模型基础,而且机制简单、性能优越,在短短几年内吸引了大量的研究者,并被应用于广泛的工程优化问题。

本章首先介绍优化问题的基本概念,然后介绍求解优化问题的一些传统精确算法,最后介绍 GA、SA 等几种典型的启发式算法。从第 2 章开始将逐步介绍 BBO 算法及其应用。

1.1 优化问题

通俗地说,优化问题就是要在众多的方案(解)中找出一个最优的方案(解)。如何知道一个解优于另一个解呢?这是通过问题的目标函数来评判的。假设问题是要找到使目标函数值最小的一个解,那么可采用如下的一般形式来刻画问题:

$$\begin{aligned} & \min f(\mathbf{x}) \\ & \text{s. t. } \mathbf{g}(\mathbf{x}) \geq 0 \\ & \mathbf{x} \in D \end{aligned} \quad (1.1)$$

其中, f 为目标函数; $\mathbf{x}$ 为决策变量(可以是一个值,但更多情况下是多个值组成的一个向量); D 为定义域; $\mathbf{g}$ 为约束函数集(可包含一个或多个约束函数)。求目标函数最大值的问题可以对称地转换为求最小值的形式;等式或其他形式的不等式约束也都可以转换为 $\geq$ 不等式约束的形式。如果约束函数的个数为0,通常称为无约束优化问题,否则称为约束优化问题。

根据问题定义域 D (也叫解空间)的分布情况,优化问题可以分为连续优化问题和组合优化问题两大类。

1.1.1 连续优化问题

顾名思义,连续优化问题是指解空间连续分布的优化问题。首先,最常见的一种就是求某个实函数在指定区间内的最优值,例如:

$$\begin{aligned} & \min 4x^3 + 15x^2 - 18x \\ & \text{s. t. } -1 \leq x \leq 1 \end{aligned} \quad (1.2)$$

该问题是一个一维优化问题,即只有一个决策变量。下面看一个多维的、目标函数也更为复杂的问题:

$$\begin{aligned} & \min \sum_{i=1}^n \left(\sum_{k=0}^{20} [0.5^k \cos(3^k \pi x_i + 0.5) + \sin(5^k \pi x_i)] \right) \\ & \text{s. t. } -100 \leq x_i \leq 100, \quad i = 1, 2, \dots, n \end{aligned} \quad (1.3)$$

其中, n 表示问题的维数。显然,维数越高,解空间越庞大,搜索起来也就越困难。

再举一个约束连续优化问题的例子。设某人每天至少需要100克碳水化合物和75克蛋白质的营养,但摄入脂肪量不宜超过90克,现只有两种食物A和B可选,它们的单价分别是12元/千克和16元/千克,每千克食物中含有的营养成分如表1-1所示。问这两种食物各选择多少,能在保证营养需要的前提下使花费最少?

表 1-1 食物营养成分表(克)

成分 食物	碳水化合物	蛋白质	脂肪
A	125	60	60
B	100	120	72

令选择食物 A 和 B 的量分别为 x_1 千克和 x_2 千克,根据总花费最小的目标和营养需求的约束,该问题可表述为如下形式:

$$\begin{aligned} &\min 12x_1 + 16x_2 \\ \text{s. t. } &125x_1 + 100x_2 \geq 100 \\ &60x_1 + 120x_2 \geq 75 \\ &60x_1 + 72x_2 \leq 90 \\ &x_1 \geq 0, x_2 \geq 0 \end{aligned}$$

(1.4)

最后看一个传感器网络的例子。如图 1-1 所示,网络中要增加一个新的传感器 S,它需要和已有的传感器 A、B、C 进行通信,表 1-2 给出了 3 个传感器的坐标位置以及它们每日与 S 通信的时长。图中,圆心在(18,25)、半径为 5 的阴影部分表示一个水塘,不能在其中放置传感器。在距离 d 上通信 1 小时的能耗为 $2d^{1.6}$ 。问如何选择传感器 S 的位置,可使得每日的总能耗最小。

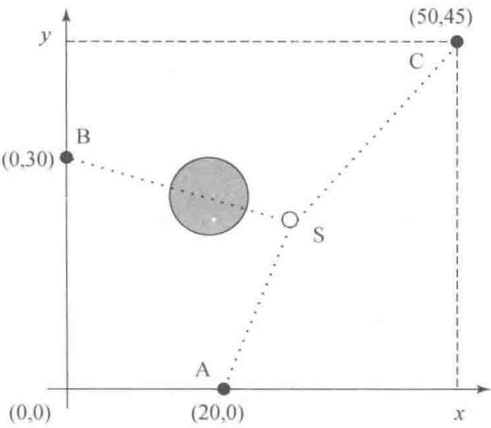


图 1-1 传感器放置问题示意图

表 1-2 传感器坐标和预期通信时长

传感器	坐标	通信时长/小时
A	(20,0)	2.5
B	(0,30)	3.5
C	(50,45)	3

令传感器 S 放置的坐标为 (x, y) , 问题的目标函数就是它与其余 3 个传感器的通信能耗之和, 约束条件是它不能位于阴影部分, 故该问题可表述为如下形式:

$$\begin{aligned} \min & 5(\sqrt{(x-20)^2 + y^2})^{1.6} + 7(\sqrt{x^2 + (y-30)^2})^{1.6} \\ & + 6(\sqrt{(x-50)^2 + (y-45)^2})^{1.6} \\ \text{s. t. } & (x-18)^2 + (y-25)^2 \geq 25 \\ & 0 \leq x \leq 50, \quad 0 \leq y \leq 45 \end{aligned} \quad (1.5)$$

对于很多连续优化问题特别是复杂函数优化问题, 一个求解的难点在于局部最优解的存在。局部最优解指在一个区域范围内取得最优值的解, 但它并不一定是整个解空间内的最优解, 后者称为全局最优解。图 1-2 就给出了一个一维连续优化问题局部最优解的示例。很多算法往往只能求得局部最优解而非全局最优解, 有的局部最优解和全局最优解相差不大, 而有的局部最优解可能远不如全局最优解, 后者是我们应当尽量避免的情况。

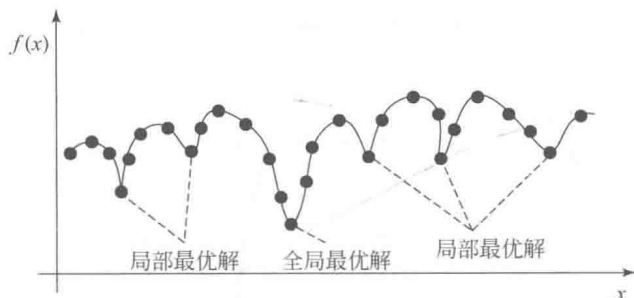


图 1-2 全局和局部最优解示例

1.1.2 组合优化问题

和连续优化问题不同, 组合优化问题的解空间是离散分布的。之所以称为“组合优化”, 是因为这类问题大多都涉及离散个体的选择、分组或排列。著名的 0-1 背包问题就是一个典型的组合优化问题, 其一般性表述为: 给定一个容积为 b 的背包以及 n 个物品, 其中第 i 个物品的体积和价值分别为 a_i 和 c_i , 问如何装包才能使得背包中物品的总价值最大? 该问题的数学模型可表述为如下形式:

$$\begin{aligned} \max & \sum_{i=1}^n c_i x_i \\ \text{s. t. } & \sum_{i=1}^n a_i x_i \leq b \\ & x_i \in \{0, 1\}, \quad i = 1, 2, \dots, n \end{aligned} \quad (1.6)$$