

蔗糖企业生产参数二次规划模型与仿真研究



冯德鸿*, 杨灿

三峡大学理学院数学系, 湖北宜昌 443002

摘要: 在前期研究“基于二次规划建模的甘蔗企业生产计划与算例研究”的基础上, 应用运筹学二次规划建模的最优化理论与方法, 对蔗糖企业生产计划建模与仿真计算进行了更深入的研究: 在原有的生产计划模型基础上引入了参数变量, 改进了原有的生产计划模型, 而且仿真计算方面更体现出各类场景、更逼真于收砍旺季期间大规模的生产计划编制情形。决策者可根据收砍旺季期需要加工生产的车辆数来适时调整生产线, 在生产周期、生产线与生产时间、人力成本之间寻找平衡点。含参变量蔗糖企业生产计划 0-1 二次规划模型和内点算法在解决收砍旺季期企业大规模化生产问题具有较高程度的人工智能意义, 能更有效更适时的实现人机交互。

关键词: 蔗糖企业生产计划; 生产周期; 子时段; 参数 0-1 二次规划模型; 大数据仿真计算

DOI: [10.57237/j.wjfse.2023.04.001](https://doi.org/10.57237/j.wjfse.2023.04.001)

A Quadratic Programming Model and Simulation Study on Production Parameters of Sucrose Enterprises

Feng Dehong*, Yang Can

Department of Mathematics, College of Science, China Three Gorges University, Yichang 443002, China

Abstract: Based on the previous research on the production plan and case study of sugarcane enterprises based on quadratic programming modeling, the optimization theory and method of quadratic programming modeling in operations research were applied to conduct a more in-depth study on the production plan modeling and simulation calculation of sugarcane enterprises: On the basis of the original production planning model, parameter variables have been introduced to improve the original production planning model, and simulation calculations more reflect various scenarios and are more realistic in the large-scale production planning situation during the peak harvest season. Decision makers can adjust the production line in a timely manner based on the number of vehicles that need to be processed during the peak harvest season, and find a balance point between the production cycle, production line and production time, and labor costs. The 0-1 quadratic programming model and interior point algorithm with parametric variables in the production plan of sucrose enterprises have a high degree of artificial intelligence significance in solving the large-scale production problem of enterprises during the peak harvest season, and can more effectively and timely achieve human-machine interaction.

*通信作者: 冯德鸿, ctguf@sina.com

Keywords: Production Plan of Sugar Enterprise; Production Cycle; Sub-period;
Parameter 0-1 Quadratic Programming Model; Big Data Simulation Calculation

1 引言

在研究降低甘蔗种植与生产成本问题上，国内外主要研究热点在如下两方面：首先是在宏观层面进行的研究，采用的方法是以定性分析法为主：自整合土地资源培育蔗种直到蔗糖成品进入市场，这个全过程的种植与生产成本包括如下：土地租金、劳动力、以及相关生产资料等成本，对上述三要素进行综合定性分析[1]，或初步地定量分析；其次是在微观层面进行的研究，方法是以“智慧农业”与“智慧生产”为理念，综合应用各类（高空、中空、低空无人机）遥感卫星影像[2]、空间地理信息系统[3]、人工智能启发式[4]与最优化计算方法、5G 安全网络[5]无人机械化种植管理等技术[6]，以精益种植与精准生产等多目标进行研究[7]。

本文应用运筹学二次规划建模的最优化理论与方法，对蔗糖企业生产计划建模与仿真计算的研究，属于第二方向，是在前文“带损失率约束的甘蔗企业生产计划模型与算例研究”[8]与“基于二次规划建模的甘蔗企业生产计划与算例研究”[9]基础上做了更进一步的研究：在原生产计划模型基础上引入了参数变量，改进了原有模型，而且仿真计算方面更体现出各类场景、更逼真于收砍旺季期间大规模的生产计划编制情形。

2 问题描述与生产计划数学规划建模

2.1 问题描述

中国南方某甘蔗种植与生产基地专业生产蔗糖。甘蔗在收砍后将通过相同类型的货车运输到制糖企业。每辆货车运输量的多少、能够生产出来的蔗糖品质与产量等都取决于甘蔗收购的空间地理位置、以及各类品质的蔗糖成熟度。因为收砍后甘蔗的含糖量将因发酵而随时降低，所以含糖分的损失量将随时间而增加。蔗糖企业生产主管期望编制一个生产周期（如自然日）内的压榨生产计划编制方案，使得总蔗糖损失降到最低[8, 9]。

2.2 运筹学二次规划建模

假设有 n 辆货车到达企业等候加工生产，企业内共有 m 条固定生产线，每辆货车甘蔗的平均加工时间为 t 小时。考虑到收割后甘蔗糖分的损失量不仅与甘蔗种植品种[10-12]还与运输时间、受空间地理位置的环境温度与湿度等因素[12-14]影响，所以生产计划建模过程中暂且不考虑运输时间、环境温度、湿度等因素影响，甘蔗品种因素则体现在损失率数据上。货运甘蔗至企业准备压榨生产，设日生产周期 T 小时，最早加工时间为 0，将生产周期 T 的生产分割成 $k=T/t$ 个子时段，分别称为时段 1、时段 2、...时段 $k=T/t$ 。

设二进制 0-1 变量 x_{ij} 表示第 i 辆货车是否在第 j 个时段上加工，即 $x_{ij}=1$ 表示第 i 辆货车开始在第 j 个时段加工， $x_{ij}=0$ 表示其他情况；第 i 辆货车的剩余时间为 b_i ，损失率为 p_i ($i=1, 2, \dots, n$)，目标函数是使总蔗糖损失降到最低，数学描述可表示为甘蔗损失时间与损失率之积 $\min Z = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^k t p_i x_{ij}$ ，约束条件为 [1, 2]:

(1). 每辆货车必须编制在生产周期 T 内的 k 个子时段至少 1 次且仅 1 次的限制，即表示在生产周

期 T 小时内必须完成加工： $\sum_{j=1}^k x_{ij} = 1$ 。

(2). m 条固定生产线同时运转，每个子时段最多只

能允许 m 辆货车加工，可表述为 $\sum_{i=1}^n x_{ij} \leq m$ 。

(3). 每车蔗糖平均加工时间为 t 小时，所有车辆甘蔗必须在质量寿命结束前完成加工，可表述为

$$t \sum_{j=1}^k j x_{ij} \leq b_i。$$

改进后的参数二次规划生产计划模型描述如下：

$$\min Z = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^k t p_i x_{ij}$$

$$\textcircled{1} k = T / t$$

$$\textcircled{2} \sum_{j=1}^k x_{ij} = 1 \quad i = 1, 2, \dots, n$$

$$\textcircled{3} \sum_{i=1}^n x_{ij} \leq m \quad j = 1, 2, \dots, k$$

$$\textcircled{4} t \sum_{j=1}^k j x_{ij} \leq b_i \quad i = 1, 2, \dots, n$$

$$\textcircled{5} x_{ij} = 0 \text{ 或 } 1 \quad i = 1, 2, \dots, n \quad j = 1, 2, \dots, k$$

每车甘蔗平均压榨加工时间 t 都是参数变量, 生产周期内的加工子时段 k 也相应为参数变量; 约束②③是线性约束, 另两个约束④⑤则为非线性约束, 按照求解非线性 0-1 二次规划模型的 NCP 函数法思想方法[15]可约束⑤等价转化为非线性不等式与等式约束, 即

$$x_{ij} \in \{0, 1\} \Leftrightarrow x_{ij} \geq 0, \quad 1 - x_{ij} \geq 0, \quad x_{ij}(1 - x_{ij}) = 0 \\ \forall i = 1, 2, \dots, n \quad \forall j = 1, 2, \dots, k$$

目标函数为非线性 0-1 二次函数, 这是 0-1 二次规划模型[16]应用非线性凸二次规划的内点算法[17, 18]解, 可在数学通用软件 Matlab [19]或运筹学软件 LINGO 中编程[20]得到实现。

表 1 是根据企业往年历史经验数据, 对车辆的损失率(不同品种甘蔗损失率各不一样[10-12])以及剩余时间进行统计后随机生成得到的每辆货车甘蔗属性表。

3 模型分析与仿真计算

模型分析: 约束①为参数变量约束: 生产周期 T 、

表 1 每辆货车甘蔗属性表

Table 1 Property table of sugarcane for each truck

货车编号 n (i)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
损失率 p_i (kg/h)	30	28	19	48	62	54	25	27	37	26	43	45	60	25	38	60	45	26	28	54
剩余时间 b_i (h)	8	6	4	22	10	16	8	8	6	4	8	6	20	4	8	10	20	18	16	8

货车编号 n (i)	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40
损失率 p_i (kg/h)	48	46	40	25	20	38	42	25	28	30	43	26	37	28	13	54	60	50	37	43
剩余时间 b_i (h)	6	16	4	12	10	8	6	10	14	16	22	4	6	8	18	20	4	16	10	14

货车编号 n (i)	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60
损失率 p_i (kg/h)	55	35	30	54	50	40	32	30	28	36	38	40	42	40	50	56	60	64	48	38
剩余时间 b_i (h)	24	16	8	6	12	16	4	8	10	16	18	4	20	4	8	6	2	4	10	12

分如下 10 种编制方案: 方案 1-5 为生产周期 $T=12$, 加工时段 $k=6$ 的场景; 方案 6-10 为生产周期 $T=24$, 加工时段 $k=12$ 的场景。设置约束条件相应参数变量生产线 m , 应用 LINGO 软件编程[20]仿真计算得到甘蔗企

业压榨生产计划编制的最优方案(表 2)、甘蔗企业压榨生产计划编制 10 种方案的比较分析(表 3)、两种不同生产周期与加工时段的总目标最小损失费随生产线 m 的变化趋势结果比较(图 1)。

表 2 甘蔗企业生产计划编制的最优方案

Table 2 The optimal plan for production planning in sugarcane enterprises

蔗糖生产计划模型内点算法仿真计算结果 (n=60, m=10, T=12, t=2h, k=T/t=6)												
决策变量	1-2	3-4	5-6	7-8	9-10	11-12	剩余时间限制 (每车开始加工必须为剩余时间的前 2h)					
货车编号	时段 1	时段 2	时段 3	时段 4	时段 5	时段 6	决策变量	<=	剩余时间 (h)	损失率%	实际损失时间(h)	
1	0	0	0	1	0	0	8	<=	8	30	6	
2	0	0	1	0	0	0	6	<=	6	28	4	
3	0	1	0	0	0	0	4	<=	4	19	2	
4	0	0	0	1	0	0	8	<=	22	48	6	
5	1	0	0	0	0	0	2	<=	10	62	0	
6	0	1	0	0	0	0	4	<=	16	54	2	
7	0	0	0	1	0	0	8	<=	8	25	6	
8	0	0	0	1	0	0	8	<=	8	27	6	

蔗糖生产计划模型内点算法仿真计算结果 (n=60, m=10, T=12, t=2h, k=T/t=6)											
决策变量	1-2	3-4	5-6	7-8	9-10	11-12	剩余时间限制 (每车开始加工必须为剩余时间的前 2h)				
货车编号	时段 1	时段 2	时段 3	时段 4	时段 5	时段 6	决策变量	<=	剩余时间 (h)	损失率%	实际损失时间(h)
9	0	0	1	0	0	0	6	<=	6	37	4
10	0	1	0	0	0	0	4	<=	4	26	2
11	0	0	0	1	0	0	8	<=	8	43	6
12	0	0	1	0	0	0	6	<=	6	45	4
13	1	0	0	0	0	0	2	<=	20	60	0
14	0	1	0	0	0	0	4	<=	4	25	2
15	0	0	0	1	0	0	8	<=	8	38	6
16	1	0	0	0	0	0	2	<=	10	60	0
17	0	0	0	0	1	0	10	<=	20	45	8
18	0	0	0	0	0	1	12	<=	18	26	10
19	0	0	0	0	0	1	12	<=	16	28	10
20	0	1	0	0	0	0	4	<=	8	54	2
21	0	0	1	0	0	0	6	<=	6	48	4
22	0	0	0	0	1	0	10	<=	16	46	8
23	0	1	0	0	0	0	4	<=	4	40	2
24	0	0	0	0	0	1	12	<=	12	25	10
25	0	0	0	0	1	0	10	<=	10	20	8
26	0	0	0	1	0	0	8	<=	8	38	6
27	0	0	1	0	0	0	6	<=	6	42	4
28	0	0	0	0	1	0	10	<=	10	25	8
29	0	0	0	0	0	1	12	<=	14	28	10
30	0	0	0	0	0	1	12	<=	16	30	10
31	0	0	0	0	1	0	10	<=	22	43	8
32	0	1	0	0	0	0	4	<=	4	26	2
33	0	0	1	0	0	0	6	<=	6	37	4
34	0	0	0	1	0	0	8	<=	8	28	6
35	0	0	0	0	0	1	12	<=	18	13	10
36	1	0	0	0	0	0	2	<=	20	54	0
37	1	0	0	0	0	0	2	<=	4	60	0
38	0	0	1	0	0	0	6	<=	16	50	4
39	0	0	0	0	1	0	10	<=	10	37	8
40	0	0	0	0	1	0	10	<=	14	43	8
41	1	0	0	0	0	0	2	<=	24	55	0
42	0	0	0	0	0	1	12	<=	16	35	10
43	0	0	0	1	0	0	8	<=	8	30	6
44	1	0	0	0	0	0	2	<=	6	54	0
45	0	0	1	0	0	0	6	<=	12	50	4
46	0	0	0	0	1	0	10	<=	16	40	8
47	0	1	0	0	0	0	4	<=	4	32	2
48	0	0	0	1	0	0	8	<=	8	30	6
49	0	0	0	0	1	0	10	<=	10	28	8
50	0	0	0	0	0	1	12	<=	16	36	10
51	0	0	0	0	0	1	12	<=	18	38	10
52	0	1	0	0	0	0	4	<=	4	40	2
53	0	0	0	0	1	0	10	<=	20	42	8
54	0	1	0	0	0	0	4	<=	4	40	2
55	0	0	1	0	0	0	6	<=	8	50	4
56	1	0	0	0	0	0	2	<=	6	56	0
57	1	0	0	0	0	0	2	<=	2	60	0
58	1	0	0	0	0	0	2	<=	4	64	0
59	0	0	1	0	0	0	6	<=	10	48	4
60	0	0	0	0	0	1	12	<=	12	38	10
每个时段 最多允许 10 辆	10	10	10	10	10	10	内点算法求解总迭代次数 249 次, 总目标最小损失费为 15154 元。				
	<=	<=	<=	<=	<=	<=					
	10	10	10	10	10	10					

表 3 蔗糖生产计划编制 10 种方案的比较

Table 3 Comparison of 10 Schemes for Formulating Production Plans for Cane Cane Enterprises

方案	车辆数 n	生产线 m	生产周期 T	平均加工时间 t	加工时段 k	内点算法总迭代次数	总目标最小损失费
1	60	10	12	2	6	249	15154
2	60	11	12	2	6	244	13860
3	60	12	12	2	6	203	12742
4	60	13	12	2	6	218	11934
5	60	14	12	2	6	202	11204
6	60	8	24	2	12	265	19244

方案	车辆数 n	生产线 m	生产周期 T	平均加工时间 t	加工时段 k	内点算法总迭代次数	总目标最小损失费
7	60	9	24	2	12	258	16912
8	60	10	24	2	12	251	15154
9	60	11	24	2	12	247	13860
10	60	12	24	2	12	229	12742

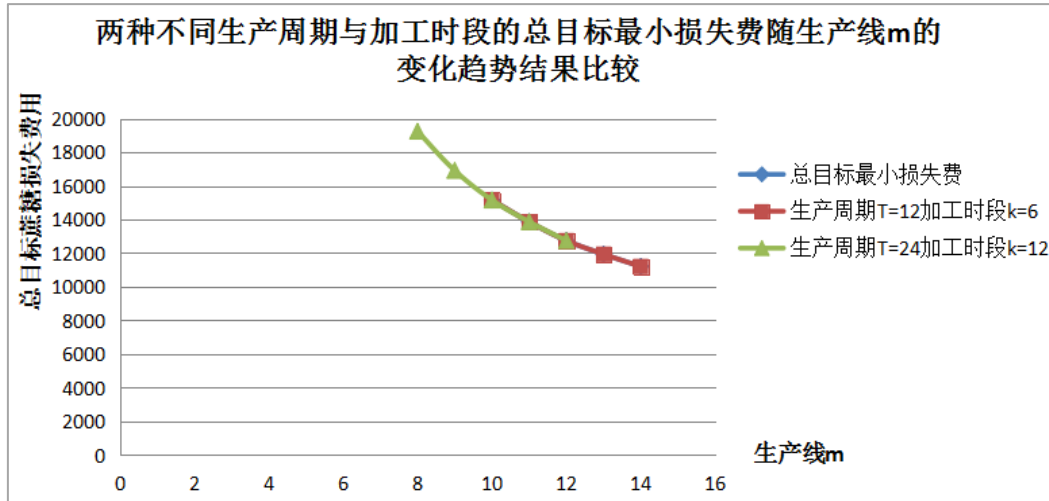


图 1 两种不同生产周期与加工时段的总目标最小损失费随生产线 m 的变化趋势结果比较

Figure 1 Comparison of the Trend Results of the Total Target Minimum Loss Cost with Production Line m for Two Different Production Cycles and Processing Periods

甘蔗企业压榨生产计划编制的最优方案表 2 表明, 生产计划的编制存在优先原则[8, 9]: 损失率越高且剩余时间越短的货车就越优先安排生产; 损失率越低且剩余时间越长的货车就越往后安排生产。

甘蔗企业压榨生产计划编制 10 种方案的比较表 3 和两种不同生产周期与加工时段的总目标最小损失费随生产线 m 的变化趋势结果比较图 1 表明:

- (1). 生产周期为 1 天的计划编制, 按照 $T=12$ 小时来编制比按照 $T=24$ 小时来编制更能显著地降低总蔗糖损失。
- (2). 决策者可根据收砍旺季期需要加工生产的车辆数 n 来适时调整生产线条数 m , 在生产周期 T 、生产线 m 与生产时间、人力成本之间寻找平衡点。
- (3). 车辆数 n 、生产周期 T 、平均压榨加工时间 t 确定不变后, 生产时段 k 也相应地得到确定, 应用内点算法计算过程中总迭代次数随生产线条数的增加而减少。

4 结论

本文是在前文“带损失率约束的甘蔗企业生产计划模型与算例研究”[8]与“基于二次规划建模的甘蔗企

业生产计划与算例研究”[9]基础上做了更进一步的研究: 在原生产计划模型基础上引入了生产周期、单车平均加工时间、生产时间段和生产线等参数变量, 改进了原有模型, 应用内点算法, 通过仿真计算得到不同参数场景下的最优生产计划编制的执行方案, 经过实际应用的效果可验证: 该执行方案更能体现出各类场景、更逼真于收砍旺季期间大规模的生产计划编制; 决策者可根据收砍旺季期需要加工生产的车辆数来适时调整生产线, 在生产周期、生产线与生产时间、人力成本之间寻找平衡点。含参变量甘蔗企业压榨生产计划 0-1 二次规划模型和内点算法在解决收砍旺季期企业大规模化生产具有一定程度的人工智能意义, 能更有效更适时的实现人机交互。

参考文献

- [1] 刘晓雪, 闫彩云等, 广西甘蔗生产关键影响因素及解决路径的调查分析 [J], 中国糖料, 2020, 42(4): 68-75.
- [2] Silva, Renato Rodrigues da; Escarpinati, Mauricio Cunha; Backes, André Ricardo. Sugarcane crop line detection from UAV images using genetic algorithm and Radon transform [J]. Signal, Image and Video Processing, 2021, 15(8): 1723-1730.

- [3] 常慧杰, 范稚莲等. 广西甘蔗生产规模比较优势空间格局特征及影响因素分析 [J], 南方农业学报, 2021, 52(5): 1405-1413.
- [4] Teixeira, Eduardo dos Santos; Rangel, Socorro; Florentino, Helenice de O; de Araujo, Silvio Alexandre. A review of mathematical optimization models applied to the sugarcane supply chain [J], International Transactions in Operational Research, 2023, 30(4): 1755-1788.
- [5] 魏学勇. 关于甘蔗制糖企业工控系统网络安全纵深防御体系构建与实现 [J], 甘蔗糖业, 2021, 50(2): 115-120.
- [6] 潘莉莉, 石宝雄等. 甘蔗收获机械化的制糖工艺思考 [J], 甘蔗糖业, 2020, 6(3): 1-6.
- [7] Aliano Filho, Angelo; A. Oliveira, Washington; Melo, Teresa. Multi-objective optimization for integrated sugarcane cultivation and harvesting planning [J], European Journal of Operational Research, 2023, 309(1): 330-344.
- [8] 冯德鸿. 带损失率约束的甘蔗企业生产计划模型与算例研究 [J], 应用数学进展, 2021, (9): 3129-3133.
- [9] 冯德鸿. 基于二次规划建模的甘蔗企业生产计划与算例研究 [J], 中国糖料, 2022, 44(2): 85-88.
- [10] 陈优强. 甘蔗品种砍收后蔗糖分转化及蔗糖转化率的建立 [J], 甘蔗糖业, 1999, 6(3): 19-22.
- [11] 谭芳, 莫磊兴等. 甘蔗砍收后品质变化情况分析 [J], 安徽农业科学, 2008, 36(25): 10817-10819.
- [12] 蒋春云, 王伦旺等. 广西甘蔗品种 (系) 2019 年区试柳城点新植试验初报 [J], 中国种业, 2021, 1(1): 79-82.
- [13] 王先, 赵先笔等. 国家第 14 轮甘蔗品种区试德宏点综合评价 [J], 甘蔗糖业, 2022, 51(3): 14-19.
- [14] 钱文英, 李媛甜等. 云南省第 16 轮甘蔗品种区试德宏点评价 [J]. 甘蔗糖业, 2022, 51(5): 6-13.
- [15] 李艳艳. 0-1 规划问题的连续化方法研究及应用 [D]: [博士学位论文] 大连: 大连理工大学, 2009: 44-45.
- [16] 张雄, 周济. 基于内点二次规划的最优化方法 [J], 华中理工大学学报, 1995, 23(9): 1-5.
- [17] 雍龙泉. 二次规划的算法研究 [D]: [硕士学位论文] 西安: 西安电子科技大学, 2005: 15-20.
- [18] 王瑞, 陈伟. 二次 0-1 规划问题的全局最优条件 [J], 应用数学与计算数学学报, 2018, 32(3): 541-552.
- [19] 唐冲. 基于 Matlab 的非线性规划问题的求解 [J], 计算机与数字工程, 2013, 41(7): 1100-1102, 1185.
- [20] 司守奎, 孙玺菁. LINGO 软件及应用 [M], 国防工业出版社, 2017 年 5 月: 100-114.

作者简介

冯德鸿

1969 年生, 副教授, 硕士. 研究方向为生产计划与调度、系统建模与仿真、GIS 空间大数据分析.

E-mail: ctguf@sina.com

杨灿

2003 年生. 研究方向为系统建模与优化、智能优化算法与仿真.

E-mail: yangcan2125@163.com