

# 基于模糊多目标规划、统计分析的生产原材料订购及 转运方案研究

## 摘要

本文针对生产原材料订购及转运问题,以模糊多目标规划和统计分析为基础,建立了企业生产在不同目标下的优化模型,分别制定生产企业订购和原材料转运的最优方案,对生产实践具有重要。

**针对问题 1**,通过 Matlab 处理 402 家企业供货量数据,从中提炼**数量弹性、违约次数、大额订单率**等 10 个具有供货特征的指标,对大量订单的占比等指标,从多维度构建指标评价,使用**熵权法**确定权重,从权重上看,**总供货量和订单总量**是两个最重要的评价指标。并利用**改进的 TOPSIS 模型**建立供应商供货特征评价体系,从而确定 S361, S151 等 50 家最重要的供应商。

**针对问题 2**,基于问题 1,运用**隐枚举法**确定满足企业生产的供应商至少为 72 家(包含问题 1 中的 50 家供应商)。结合供应商数量、原材料生产成本及转运损耗率 3 个模糊变量,分别建立了**模糊多目标规划模型及 0-1 线性整数规划模型**,求得最优解,由此设计出未来 24 周最经济的订购方案和损耗最少转运方案,最后通过对比不同方案间的变异系数差异值水平较小,表明了方案的合理性。

**针对问题 3**,该问题建立在问题 2 的基础上,在目标条件相同的情况下,以压缩生产成本为目的,通过对比矩阵的特征向量和特征值来得到三类原材料对应的权重。再利用 A,C 两类原料的**方差期望**作为约束中的判别条件,得到问题 2 中的模糊多目标规划的**改进模型**,进而得到新的方案。

**针对问题 4**,基于问题 2 的优化模型,忽略一些问题 2 中的约束条件,得到约束更加松弛的多目标优化模型。利用遗传算法求解,得到每周供货总量,进而确定该企业每周产能提高 **17.3%**,即产能最大可提高到 **3.30786 万立方米**,并设计了未来 24 周的订购和转运方案。

**关键词:** 改进 TOPSIS, 多目标规划, 0-1 线性整数规划, 遗传算法

# 一、问题重述

## 1.1 问题背景

制造业企业的经济效益与原材料密不可分，包括原材料的订购、转运、存储和生产等重要环节。设计这些环节中的合理方案是保证产能、压缩成本及提高效益的关键，更是市场竞争中企业立足的根本。因此，该研究具有重要的应用价值。

## 1.2 待解决的问题

在模型的建立过程中，主要解决的问题有 4 个。

1.问题 1 要求通过附件中的数据建立企业供货特征的评价模型，根据不同供应商的评价结果给出 50 家重要的供应商。

2.基于问题 1，建立关于供应商、企业效益和运输损耗的优化模型。根据求解的最优解给出未来 24 周企业的订购和运输方案，给出未来 24 周企业订购数据填入附件 A。

3.根据问题 2 的订购方案确定原材料 A 和 C 产量的权重，借助问题 2 的优化模型给出合理的优化方案，同样将得到的未来 24 周数据填入附件 A。

4.假设企业有足够大的潜力进行生产来提高产能，在所给供应商和转运商实际能力的条件下给出企业的增产量，并将未来 24 周订购数据填入附件 B。

# 二、问题分析

## 2.1 问题 1 的分析

对附件 1，2 中的数据进行预处理，并对附件 1 中的供应商和转运量数据进行基本统计分析，基于附件 2 数据给出转运商损耗率数据变化数据。以质量成本、交易成本、违约次数为考评指标，建立基于熵权法改进的 TOPSIS 供应商综合评价选择模型。根据综合评价得分结果给出 50 家最重要的供应商。

## 2.2 问题 2 的分析

需要建立一个多目标优化模型。首先，分别以供应商数量最少、原材料生产成本最低和转运损耗率最少为目标函数，根据相应的约束条件建立基于隐枚举法的 0-1 单目标优化模型、基于遗传算法的企业生产成本最低优化模型和基于运输

最低损耗的 0-1 规划模型。其次，将上述三种模型转换成模糊多目优化模型求得最优解，给出企业原材料订购方案和最少转运方案。最后，通过比较方案的变异系数离散趋势给出方案的合理性。

## 2.3 问题 3 的分析

在问题 2 的基础上，以尽量多地采购 A 和 C 为条件来压缩成本，建立多目标优化模型。首先，利用 A、B、C 三类原材料的单价为基准，对三者之间的相对强度进行分析，建立对比矩阵，通过求其特征值和特征向量获得 A、B、C 的权向量，进而得到 A、B、C 权重。结合希望转运商的转运损耗率尽可能的少，利用方差期望分析对供货量大的供应商由损耗率低的转运商运输。

分别以供应商数量最少、原材料生产成本最低和转运损耗率最少为目标函数，根据相应的约束条件建立基于隐枚举法的 0-1 单目标优化模型、基于蚁群算法的企业生产成本最低优化模型和基于运输最低损耗的 0-1 规划模型。再将上述三种模型转换成模糊多目优化模型求得最优解，给出企业原材料新的订购方案和最少转运方案。最后利用蚁群算法求解模型，分别得出最终订购方案和转运方案。

## 2.4 问题 4 的分析

该企业通过技术改造提高产能，即考虑每周产量不再局限于 2.82 万立方米，在问题 2 模型的基础下，去掉非必要的约束条件，例如存储成本无增加，每周存货无剩余等理想条件下，探究产能提高。以产能最大为目标，无限制选取供应商，并保持已有的条件下，建立多目标优化的模型。

# 三、模型假设

- 3.1 假设所有供应商能够保证准时交货；
- 3.2 假设所有供应商提供的产品质量相同；
- 3.3 假设原材料在仓库存储无损耗；
- 3.4 假设企业对供应商提供的所有原材料全部收购。

## 四、符号说明

符号	说明
$Q_i$	四分位数
$S_j$	运转损耗率
$P_i, i = 1, 2, 3$	原材料产能
$\beta$	供给货物总量
$E_{i,j,k}(Q)$	供货量期望值
$\varphi$	供货量的信任率
$F$	供应商的数量弹性
$U_i$	相应供应商分值理想解
$c_0$	原材料运输和存储单位费用
$x_m$	提供 A 类原材料的第 $m$ 家供应商
$y_n$	提供 B 类原材料的第 $n$ 家供应商
$z_q$	提供 C 类原材料的第 $q$ 家供应商

## 五、模型的建立和求解

### 5.1 数据的基础分析

附件 1 中提供的信息是 240 周企业向已有的 402 家供应商订货的量和供应商出货的量，附件 2 中数据是 8 家供应商 240 周转运原材料损耗率。根据已有的这两个附件信息，进行基本数据统计分析。

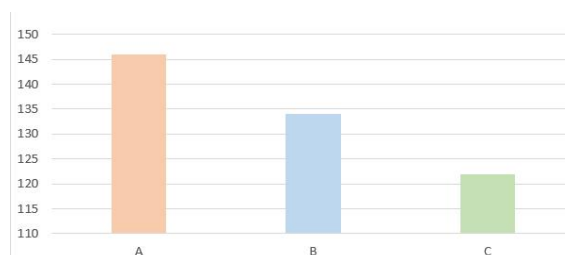


图 1 三种原材料供应商数量

由附件 1 数据可知，每家供应商只能供应 A、B、C 三种原材料的一种，且

402 家供应商中三种原材料数量并不相同(见图 1)。依据这一特征统计三类原材料供应商数量分别为 146、134、122，进而统计三种原材料类型的极值。随机抽取 10 家原材料供应商，绘制 240 周出货量(见图 2)。

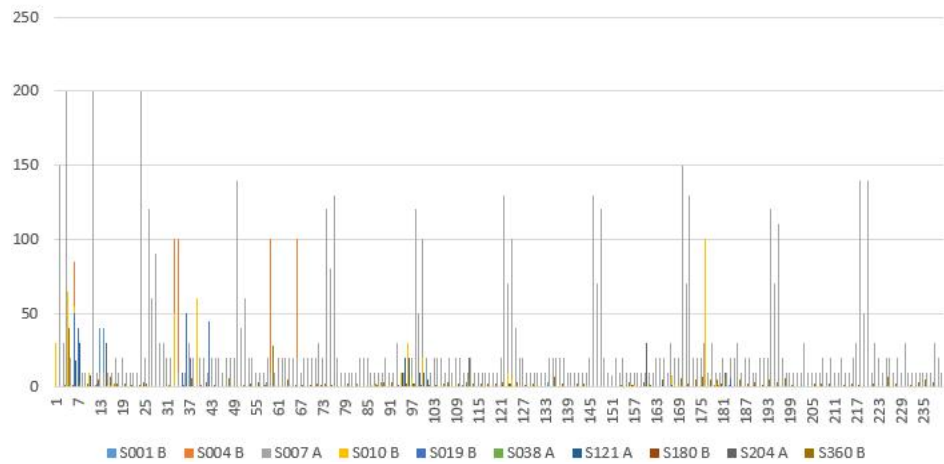


图 2 10 家物流供应商出货量

从图 2 中可以看出部分供应商每周出货量的波动性较大，并且极值偏差高等，单一只看供应商出货量可能不易准确描述企业生产所需原材料的具体情况，因此考虑企业向供应商定原材料的数据，两者均分析，去构造指标来衡量供货商整体供货情况。

分析附件 2 的转运商损耗率，给出其随周数变化的数据(见图 3)。

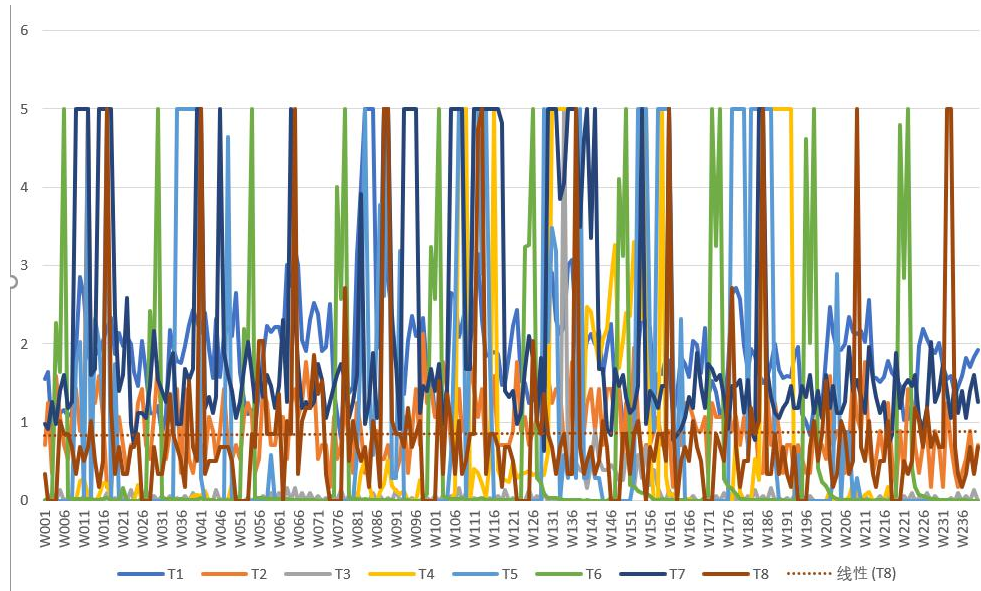


图 3 转运商损耗率随周数变化

观察数据可知，T3、T4、T5 三家供应商波动程度下，且损耗率偏低。

## 5.2 问题 1 模型的建立与求解

### 5.2.1 指标选取原则和特征确定

供应商的违约概率，与供应商自身实力、供给稳定情况等有关，同时也受整体经济环境、国家政策等因素的影响。为了更加科学的评估供应商的供应能力，选取更稳定的供货商，应遵循科学性、目的性原则、灵活可操作性、系统性、可比性等原则、全面性综合各方面考虑供应商能力<sup>[1]</sup>。

由假设可知，通过战略性选择策略，建立供应商体系标准，尽可能与需求更加紧密，减少断供的风险，让企业稳定高效的进行日常生产。本文以单一企业和多供应商组成的供应链为研究对象，对 10 个指标及影响因素进行系统分析，构建面向各指标的评价模型。

### 5.2.2 指标特征的选取

**数量弹性：**供货弹性主要表现为数量弹性，该指标反映供应商对企业需求数量变化的适应能力。设企业每周平均需求为 $\bar{S}$ ，企业向供应商发出超出 $\bar{S}$ 的紧急订货需求，供应商在企业期望的前提期内满足供应量 $S$ ，则供应商的数量弹性为

$$F = \frac{S - \bar{S}}{\bar{S}} \times 100\%. \quad (1)$$

**信任率：**由附件 1 信息看出，本体重点研究多源采购问题，筛选出从各个供应商那里最优采购数量是多少，通过可信度这一指标的筛选，在决策过程中，决策者通过对某家供应商进行目标评估，得出概率型指标，同时结合其他多指标进行多因素分析，运用 TOPSIS 模型，得出最佳供货商排名。设向某家企业订货次数为 $L$ ，供货商的信任率为 $\varphi$ ，则信任率可表示为

$$\varphi = \frac{L}{240} \times 100\%. \quad (2)$$

由此给出如下信任率正态分布检验图如图所示。

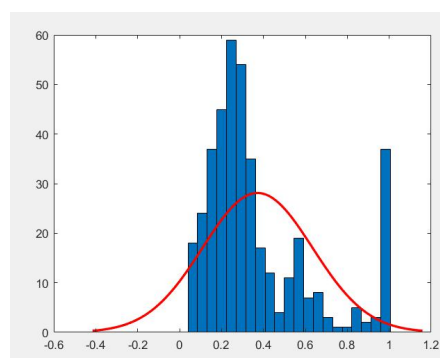


图 4 信任率分布正态检验图

由图 4 可知供应商供货量在 0.2 附近异常显著,在持续下降后 1 处突然变陡。因此样本供应商的分布不符合正态分布,他的信任率有所偏向于一部分特定的供应商,即供应商具有一定可选择性。

**供给货物总量:** 设产能为  $M$ , 原材料消耗量为  $N$ , 供给货物总量为  $\beta$ , 则供给货物总量为

$$\beta = \frac{M}{N \times 240}. \quad (3)$$

**供给四分位距:** 四分位距是描述统计的一种方法,可以通过某家供应商供货数据确定第三四分位数和第一四分位数的区别,通过三个点将供给量相等的 4 个部分。虽然他与方差,标准差有相同的作用,表示供应商中供货的分散情况,但选取供给四分位距作为指标则得出的评价体系则更加稳健,能够较为全面的考虑多源采购问题的平均供货率。设四分位差分别为  $Q_1$  和  $Q_3$ , 则供给四分位距可表示为

$$IQR = Q_3 - Q_1. \quad (4)$$

### 5.2.3 基于熵权法改进的 TOPSIS 供应商综合评价选择模型

依据供应商供货信息以及企业订货信息,将附件 1 中大量数据量化分析变成利于评价的指标信息,建立对保障企业生产重要性的数学指标,从供货的稳定性和足够多的供货量等多方面入手,指标的选择遵循全面性、科学性、公正性和可操作性等原则,并以此构建相应的评价指标体系,指标的描述(见表 1)。

表 1 各指标的构造与描述

指标	指标类型	指标描述
违约次数 $x_{1i}$	极小型	240 周内未按订货量发货次数
批量遵守率 $x_{2i}$	区间型	供应商的交货数量刚好等于订货数量
企业订货总量 $x_{3i}$	极大型	在 $T$ 时间段内, 企业订货量的和
供应商供货总量 $x_{4i}$	极大型	在 $T$ 时间段内, 共应商供货量的和
数量弹性 $x_{5i}$	中间型	供应商企业需求数量变化的适应能力
信任率 $x_{6i}$	区间型	订货商对某一供应商的信赖程度

违约总量 $x_{7i}$	中间型	在 $T$ 时间段内，没有按照订货量发货的总次数
大额订单率 $x_{8i}$	区间型	订货商在 240 周内订货量异常偏大的概率
订货四分位距 $x_{9i}$	区间型	统计订货量的分散情况
供货四分位距 $x_{10i}$	区间型	统计供货量的分散情况

由表 1，针对该模型建立了 10 个评价指标，分别为违约次数、批量遵守率、企业订货总量、供应商供货总量、数量弹性、信任率、违约总量、大额订单率。考虑到供应商供应量、供应信任程度、供应量的数值分布、数量弹性、对于大量订单的占比等指标，从多维度构建指标评价体系。

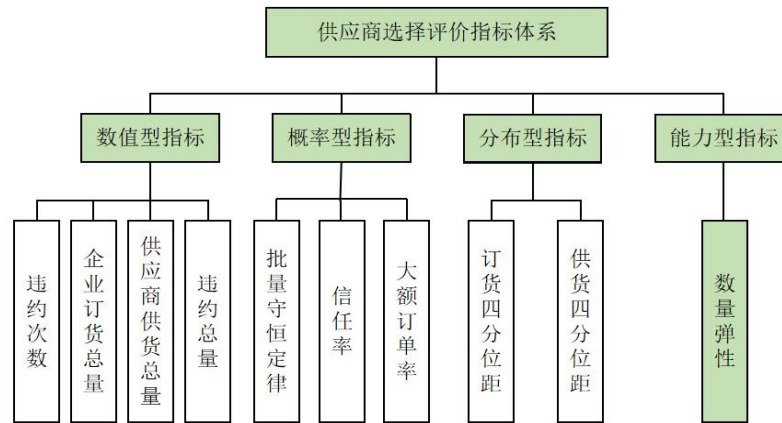


图 5 供应商评价体系分析

由图 5 可知，评价指标可分为数值型指标，概率型指标，分布型指标和能力型指标<sup>[2]</sup>，通过构造多指标来保障企业生产。

#### 算法 1 基于熵权法改进的 TOPSIS

##### step1: 构建初始矩阵

令  $x_{ij}$  为供应商  $j$  的第  $i$  类指标， $n$  为供应商的数量， $m$  为供应商评估指标的数量，构建如下初始矩阵  $X = (x_{ij})_{m \times n}$ 。

##### step2: 归一化处理

各项所构建的指标存在度量单位不一致的情况，而要对各项指标进行综合评价则需要对其行归一化处理，通过函数变换将其限定在 (0,1) 范围内。变换方式为



$$Y = (y_{ij})_{m \times n} = \left[ x_{ij} \cdot \left( \sum_{j=1}^n x_{ij} \right)^{-1} \right]_{m \times n}.$$

### step3: 熵权法确定权重

在归一化矩阵  $Y$  的基础上, 利用信息熵公式得到各项参与评价供应商指标的熵, 则第  $i$  类指标的熵计算公式为

$$H_i = -\frac{1}{\ln n} \left( \sum_{j=1}^n y_{ij} \ln y_{ij} \right).$$

各项反应供应商的评估指标的权重  $\alpha_i$  计算公式为

$$\alpha_i = \frac{1 - H_i}{\sum_{k=1}^m (1 - H_k)}.$$

### step4: 构建加权矩阵

用归一化矩阵  $Y$  中的各元素乘以与之对应的公因数权重, 得到供应商的加权矩阵  $V = (v_{ij})_{m \times n}$ .

### step5: 开展 TOPSIS 综合评价

以  $U_i^+$  来表示第  $i$  类供应商的指标的正理想解,  $U_i^-$  来表征第  $i$  类供应商指标的负理想解, 则有

$$U_i^+ = \max_{1 \leq j \leq n} (v_{ij}), \quad U_i^- = \min_{1 \leq j \leq n} (v_{ij}).$$

供应商  $j$  与正理想解的距离和负理想解的距离

$$d_j^+ = \sqrt{\sum_{i=1}^m (U_i^+ - v_{ij})^2}, \quad d_j^- = \sqrt{\sum_{i=1}^m (U_i^- - v_{ij})^2}.$$

计算供应商  $j$  与理想解的相对接近度即网控阈值为

$$\omega_j = \frac{d_j^-}{d_j^+ + d_j^-}$$

网控阈值  $\omega_j$  越大, 则供应商对指标影响越甚。

## 5.2.4 计算结果

利用 Matlab 软件对上述模型进行计算, 得到各系数权重值(见表 2)。

表 2 各指标权重系数

违约次数	大额订单率	企业订单总量	供给货物总量	数量弹性	信任率	超出\违约总量	平均每周超出/违约总量	订货四分位距	供货四分位距
0.0083	0.0083	0.2496	0.2806	0.0424	0.0173	0.0004	0.0004	0.2342	0.1583

依据计算得到的综合评价得分结果，按三类原材料的占比成比例确定 50 家供应商作为最重要的供应商(见表 3)。

表 3 选取的 50 家供应商按原材料类型排列表

A		B		C	
供应商编号	评分	供应商编号	评分	供应商编号	评分
S229	0.010463731	S108	0.010530514	S361	0.011636
S275	0.009498673	S340	0.009734653	S151	0.010655
S329	0.009462385	S308	0.009371827	S306	0.008952
S348	0.008461651	S330	0.009293616	S284	0.007711
S352	0.008376312	S131	0.009131949	S268	0.007507
S143	0.00830942	S140	0.008187758	S356	0.006678
S395	0.005563193	S367	0.006210368	S080	0.006215
S282	0.005200609	S139	0.005194169	S194	0.005895
S201	0.005188842	S031	0.003995516	S003	0.005004
S005	0.004853785	S040	0.003575017	S037	0.004612
S189	0.004562137	S364	0.003520281	S218	0.004568
S292	0.00445261	S174	0.003465655	S247	0.00444
S273	0.00420256	S169	0.00341515	S210	0.004273
S307	0.003722715	S175	0.003413789	S244	0.004138
S221	0.003417286	S346	0.003365645	S365	0.004132
S078	0.00336107	S092	0.003238439		
S237	0.003347075	S324	0.003230703		
S208	0.003178357				

### 5.2.5 结果分析

以保障企业生产重要性为前提，通过网络分析法选取指标来综合衡量其供应商的供货商的体量、供货稳定性、信任程度等，得到企业评分排序，并按三类原材料比例来选取各类供应商数目，确定 50 家供应商。基于反应供应商体量的指标，企业订单总量和供应商供货总量如下图。

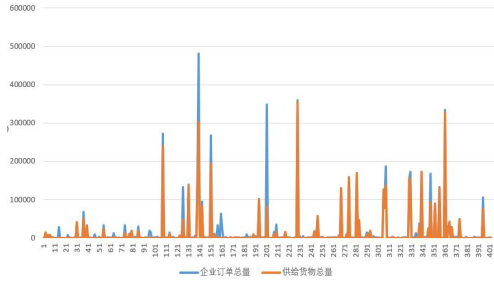


图 6 选择前两者总量

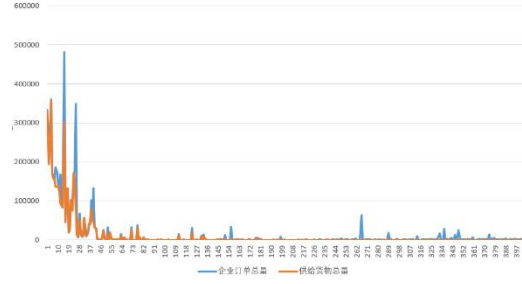


图 7 排序选择后两者总量

由图 6-7 可见，在供应商体量这一维度上，排序结果十分有效，也完全符合事实，因此该评价模型是合理的。

## 5.3 问题 2 模型的建立与求解

### 5.3.1 供货量期望计算

选择合理的供应商提供原材料是使得满足生产需求、保障企业良好产能的必备条件。假设企业与 420 家供应商长期合作，根据 240 周不同供应商向企业提供的三类原材料的数量，设  $g_i(x)$  为某供应商供货量的概率函数， $G_i(x)$  为其对应的累积函数， $Q_i$  为供货商相应时间的供货量，则三种原材料某供应商供货量期望值分别为

$$E_i(Q) = \int_0^{Q_i} x f_i(x) dx + \int_{Q_i}^{+\infty} Q_i f_i(x) dx = Q_i - \int_0^{Q_i} x F_i(x) dx, \quad (5)$$

$$E_j(Q) = \int_0^{Q_j} y f_j(x) dx + \int_{Q_j}^{+\infty} Q_j f_j(x) dx = Q_j - \int_0^{Q_j} y F_j(x) dx, \quad (6)$$

$$E_k(Q) = \int_0^{Q_k} z f_k(x) dx + \int_{Q_k}^{+\infty} Q_k f_k(x) dx = Q_k - \int_0^{Q_k} z F_k(x) dx. \quad (7)$$

### 5.3.2 基于隐枚举法的 0-1 单目标优化模型

基于问题 2 第 1 问的结果，将得到的 50 家重要供应商根据评分从高到低排列建立指标集  $\Lambda_1$ 。设提供三类原材料供应商数量分别有为  $m$ 、 $n$ 、 $q$ ，同时分别记三类原材料产能为  $P_1$ 、 $P_2$  和  $P_3$ ，根据企业对三种原材料生产所需，结合(5)~(7)式，各原材料产能为

$$P_1 = \frac{1}{0.6} \sum_{i=1}^m E_i(Q), \quad (8)$$

$$P_2 = \frac{1}{0.66} \sum_{j=1}^n E_j(Q), \quad (9)$$

$$P_3 = \frac{1}{0.72} \sum_{k=1}^q E_k(Q). \quad (10)$$

将符合要求的供应商计数,建立关于供应商数量最少的0-1单目标优化模型。  
基于以上变量,给出如下建立单目标优化模型的一般流程

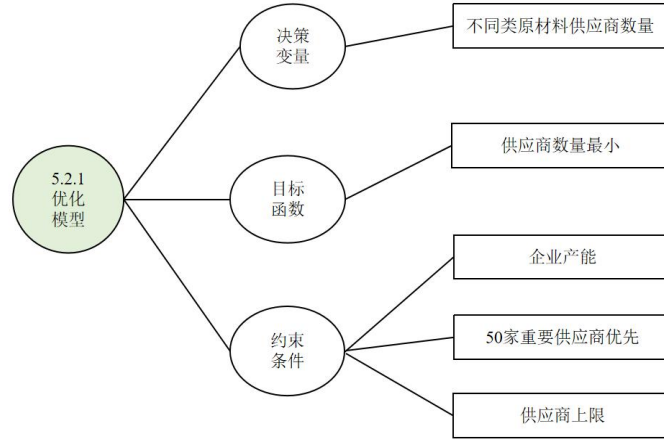


图 8 单目标优化模型建立思路

通过以上分析,目标决策函数可以表示为

$$\min \sum_{i=1}^m x_i + \sum_{j=1}^n y_j + \sum_{k=1}^q z_k \quad (11)$$

根据题目要求,企业每一次的进货量需要维持至少两周的生产,且企业在选择供应商时应当优选选择问题 1 中的 50 家重要供应商。为了避免最后求解的结果会收到所需原材料少和多次选择同一供应商数据的影响,给出所需要三种原材料上界  $M$  避免结果出现较大的误差。

$$M = \frac{146}{402} \max W_{t_1} + \frac{134}{402} \max W_{t_2} + \frac{122}{402} \max W_{t_3}. \quad (12)$$

于是,基于供应商数量最少建立如下 0-1 单目标优化模型

$$\begin{aligned} \min h_1 &= \sum_{i=1}^m x_i + \sum_{j=1}^n y_j + \sum_{k=1}^q z_k \\ s.t. &\begin{cases} \sum_{i=1}^3 P_i \geq 2.82 \times 2 \times 10^4, \\ i, j, k \in \wedge_1(first), \\ i, j, k \in \neg \wedge_1, \\ x_i, y_j, z_k \in \{0,1\}, \\ \sum_{i,j,k} E_*(Q) \leq M. \end{cases} \end{aligned} \quad (13)$$

运用隐枚举法求解优化模型(9),具体算法如下

算法 2 供应商数量隐枚举法

输入：各个供应商在 240 周内提供企业原材料的数量；

输出：三种原材料的个数。

step1: 极小化处理： $\sum_{i,j,k} -E_*(Q) \geq -M$ 。

step2: 将各个变量根据问题 1 评价结果从高到低重新排序。

step3: 令  $x_i, y_j, z_k = 0$ ，采用分支定界原理，构建供应商决策树(见图 9)。

step4: 找到可行解时(满足所有约束条件)，停止分支<sup>[3]</sup>。

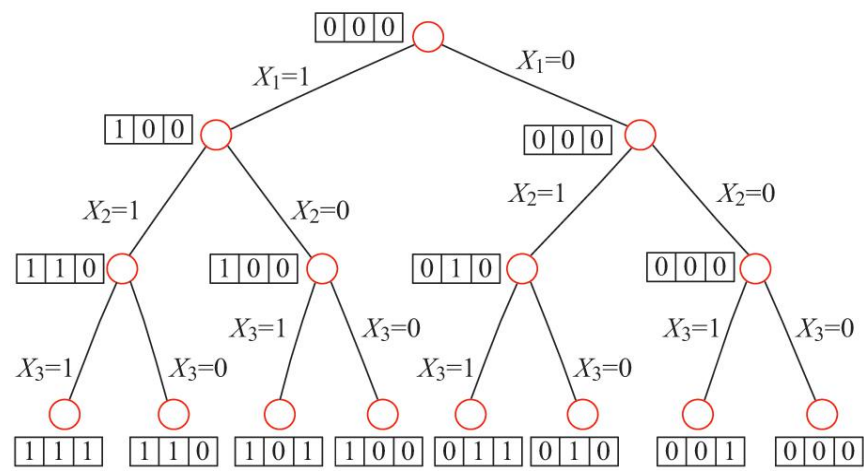


图 9 供应商决策分支示意图

通过求解得到  $m$ 、 $n$ 、 $q$  的局部最优值以及最少供应商数量为 72(见表 4)。

表 4 三种原材料供应商数量结果

类型	$m$	$n$	$q$	$\Sigma$
数量	22	24	26	72

5.3.3 基于遗传算法的企业生产成本最低优化模型

设 C 类原材料的单价为  $\alpha$ ，原材料的运输和储存单位费用为  $c_0$ ，记 5.3.2 中得到的供应商构成指标集  $\Lambda_2$ ，由题目要求得到三类原材料的生产成本(见表 5)。

表 5 三种原材料生产成本

类型	A	B	C
单价	$1.2\alpha$	$1.1\alpha$	$\alpha$
生产所需	0.6	0.66	0.72
生产成本	$0.72\alpha$	$0.726\alpha$	$0.72\alpha$

根据三种原材料生产成本建立了企业总生产成本最低的优化模型如下。

$$\begin{aligned} \min h_2 = & \sum_{i=1}^m E_i(Q)0.72\alpha + \sum_{j=1}^n E_j(Q)0.726\alpha + \sum_{k=1}^q E_k(Q)0.72\alpha + c_0 \\ \text{s.t.} \quad & \begin{cases} \sum_{i=1}^3 P_i \geq 2.82 \times 2 \times 10^4, \\ i, j, k \in \wedge_2, \\ m + n + q = (h_1)_{\min}, \\ \sum_{i,j,k} E_*(Q) \leq M. \end{cases} \end{aligned} \quad (14)$$

运用遗传算法对优化模型(14)进行求解。遗传算法是一种自适应全局优化搜索方法，将若干种供应商的组合应用到模型中求解最优解<sup>[4]</sup>，具体算法流程为

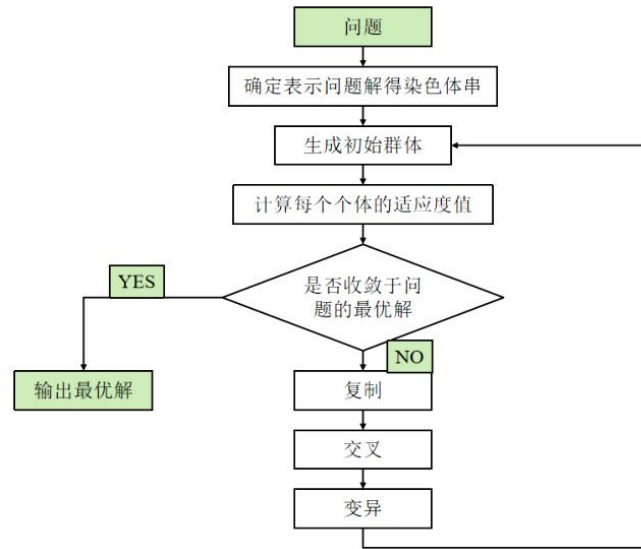


图 10 遗传算法流程示意图

---

### 算法 3 企业生产成本最低遗传算法

---

**输入：** 满足优化模型(13)的各种供应商组合；

**输出：** 企业最低生产成本。

**step1:** 将模型(13)的最优解组合进行编码，记录企业对某供应商需求的次数。

**step2:** 根据算法参数表对数据初始化，且满足  $P_1 + P_2 + P_3 \geq 2.82 \times 2 \times 10^4$ 。

**step3:** 构建适应度函数  $Fitness(i) = (\min h_2)^{-1}$ 。

**step4:** 将每次迭代得到的最优解进入下一代，引入变异算子，扩大搜索空间。

**step5:** 迭代到最大的进化情况停止。

---

在该问题当中为了确定企业最低生产成本，根据表 1 结果取群体规模为 72，实验中分别取交叉概率 0.6 和 0.7，变异概率 0.001 和 0.01，进化代数取 400，两种结果进行对比如下图所示。

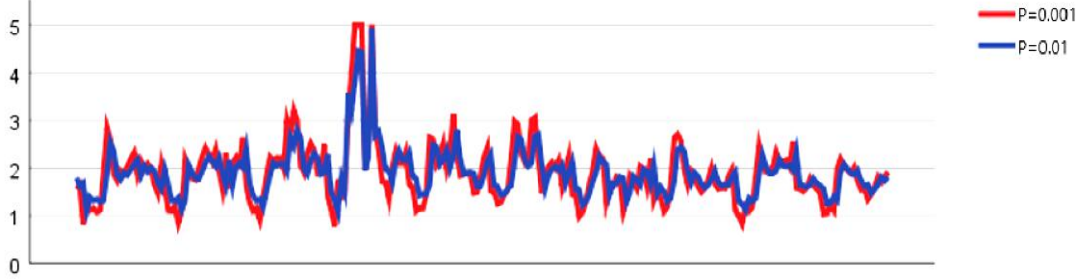


图 11 遗传算法不同变异概率结果对比预测示意图

根据对比结果，当进化代数相同时用的时间最少且企业生产成本的最小值为  $4.7 \times 10^5 \alpha + c_0$  元，除了第一问 50 家重要的供应商外还选择 S076, S074, S237, S294, S113, S092, S324, S098, S141, S172, S025, S392, S208, S310, S075, S266, S178, S318, S206, S253, S256, S055。

#### 5.3.4 基于运输最低损耗的 0-1 规划模型

首先将 402 家供应商供应数量为横轴，8 家运输商为纵轴，建立一个元素只有 0 和 1 的决策矩阵  $A = (a_{ij})_{402 \times 8}$ 。设 8 家运输商的损耗率为  $S = (S_j)^T, j = 1, \dots, 8$ 。基于运输最低损耗，建立如下 0-1 规划模型

$$\begin{aligned} \min h^* &= \sum_{j=1}^8 \sum_{i=1}^{402} S_j a_{ji} \\ \text{s.t.} &\begin{cases} \sum_{i=1}^3 P_i \geq 2.82 \times 2 \times 10^4, \\ a_{ji} \in \{0,1\}, \\ \|A\|_1 \leq 1, \\ E_{i,j,k}(Q) \leq 6000. \end{cases} \end{aligned} \quad (15)$$

其中  $\|A\|_1 \leq 1$  是为了保证在运输商能力范围之内时，一周之内一家供应商由一家转运商运输。对于单次供货量超过 6000m<sup>3</sup> 的供应商，选择时以损耗率低的运输商分批运送。

#### 5.3.5 模糊多目标优化模型

根据优化模型(13)、(14)和(15)，将供应商的最少数量、企业最低生产成本以

及运输过程中最低损耗率同时作为目标函数，建立如下模糊多目标优化模型。

$$\begin{cases}
 \min \sum_{i=1}^m x_i + \sum_{j=1}^n y_j + \sum_{k=1}^q z_k \geq 50 \\
 \min \sum_{i=1}^m E_i(Q)0.72\alpha + \sum_{j=1}^n E_j(Q)0.726\alpha + \sum_{k=1}^q E_k(Q)0.72\alpha + c_0 \geq Q_1 \\
 \min \sum_{j=1}^8 \sum_{i=1}^{402} S_j a_{ji} \\
 s.t. \begin{cases}
 \sum_{i=1}^3 P_i \geq 2.82 \times 2 \times 10^4, \\
 i, j, k \in \wedge_1, \\
 \sum_{i,j,k} E_*(Q) \leq M, \\
 m + n + q \geq h_1, \\
 E_{i,j,k}(Q) \leq 6000.
 \end{cases}
 \end{cases} \quad (16)$$

显然，以上模糊多目标优化模型的解是所有目标函数以及隶属于约束度函数的交集<sup>[5]</sup>，即

$$(x_i, y_j, z_k)^* = \min [\mu_{h_1}(X), \mu_{h_2}(X), \mu_{h^*}(X)] \quad (17)$$

由(17)式的结果，损耗最少的方案是当企业需求不超过 6000 立方米时选择第三家转运商和第四家转运商，若果超过 6000 平方米则选取第五家转运商。

### 5.3.6 方案效果分析

根据前面三个优化模型给出的最优解，结合问题 1 中采用 TOPSIS 法求出的权重，将各个变量同度量化处理<sup>[6]</sup>，即

$$D = \frac{x_{ij} + 0.1}{\sum_{j=1}^n (x_{ij} + 0.1)}. \quad (18)$$

接下来考察不同类型原材料的供应商和满足损耗率最低的运输商的变异系数，离散度情况为



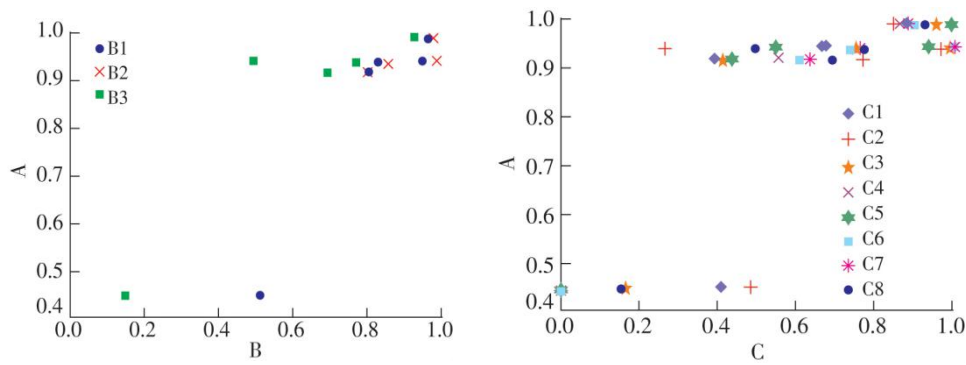


图 12 可行域内供应商和运输商的变异系数离散趋势图

通过图 12 可以得到选取了以上满足优化模型的方案后，供应商数量和不同院材料生产成本趋势稳定，而满足损耗率最低选择运输商方案也可以在 24 周内使得运输效率最高，从而企业生产效益损失大大减少。综上所述，基于不同目标函数的优化模型给出的最优解是合理的，实施方案是有效的。

## 5.4 问题 3 模型的建立与求解

### 5.4.1 模型的建立

为了压缩生产成本，计划尽量多地采购 A 类和尽量少地采购 C 类原材料，因此本问在问题 2 的原材料订购方案基础上考虑 A、B、C 的所占权重。结合 A 类和 B 类采购单价比 C 类原材料高 20%、10%，采用层次分析法来确定 A、B、C 采购单价的相对强度，使得 C 生产成本权重大于 A 生产成本权重，A、B、C 的相对强度分析(见表 6)。

表 6 相对强度分析

尺度 $x_{ij}$	含义
1	$x_i$ 比 $x_j$ 的影响相同
2	$x_i$ 比 $x_j$ 的影响稍强
3	$x_i$ 比 $x_j$ 的影响强
1,1/2,1/3	$x_j$ 比 $x_i$ 的影响之比为 $x_{ij}$ 的互反数

根据尺度表，得到如下 A、B、C 的对比方阵(见表 7)。

表 7 A、B、C 对比方阵

	A	B	C
A	1	1/2	1/5
B	2	1	2/5
C	5	5/2	1

求取对应的特征根  $n$ ，运用归一化的特征向量表示出 A 准层与 B、C 准层的权重，利用 Matlab 得到的特征向量  $x$  与特征值  $y$  (见表 8)。

表 8 准层的特征向量与特征值

	A	B	C
$x$	0.8805	-0.9814	0.2663
	0.4402	0.1240	-0.9121
	0.1761	0.1467	0.3116
$y$	3	0	0
	0	-0.0000	0
	0	0	-0.0000

对特征向量进行归一化得到权向量  $W = (0.1176, 0.2941, 0.5882)^T$  由此得到三类原材料的生产成本及生产成本所占权重(见表 9)。

表 9 三种原材料生产成本及所占权重

类型	A	B	C
单价	$1.2\alpha$	$1.1\alpha$	$\alpha$
生产所需	0.6	0.66	0.72
生产成本	$0.72\alpha$	$0.726\alpha$	$0.72\alpha$
生产成本所占权重	0.1176	0.2941	0.5882

根据以上结果，建立如下优化模型。

$$\begin{aligned}
\min h_2 &= \sum_{i=1}^m E_i(Q) 0.72\alpha \times 0.1176 + \sum_{j=1}^n E_j(Q) 0.726\alpha \times 0.2941 + \sum_{k=1}^q E_k(Q) 0.72\alpha \times 0.5882 \\
s.t. &\begin{cases} \sum_{i=1}^3 P_i \geq 2.82 \times 2 \times 10^4; \\ i, j, k \in \wedge_2; \\ m+n+q = (h_1)_{\min}; \\ \sum_{i,j,k} E_*(Q) \leq M. \end{cases} \quad (19)
\end{aligned}$$

运用蚁群算法对优化模型(15)进行求解，蚁群算法是通过模拟蚁群觅食的过程，进而产生的基于人工蚁群的新型算法，可以解决组合优化类型的问题。根据 C 所占权重较 A 大，为了使得以生产成本为目标函数的值最小，最后得到新的订购方案是：A 类原材料尽量多的采购使得 B 类原材料的采购几乎为零，最终订购方案是选择 A 与 C 类原材料，且 A 的采购量大于 C 的采购量。

### 5.4.3 模型的建立

根据新的订购方案，需要采购 A 与 C 两种原材料，将 268 家供应商供应数量为横轴，8 家运输商为纵轴，同时保证转运商的转运损耗率尽量少，因此建立供货量与损耗率的相对函数  $\psi_i(x)$ ，然后确定出元素只有 0 和 1 的决策矩阵  $A$ 。设 8 家运输商的损耗率为  $S = (S_j)^T, j=1, \dots, 8$ 。

根据 A、C 两类原材料某供应商供货量期望值分别为(5)、(7)，然后再利用某供应商与提供 A 类的所有供应商做期望方差分析，即

$$D(A) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n E(Q_i), \quad D(C) = \frac{1}{q} \sum_{k=1}^q E(Q_k). \quad (20)$$

建立每家供货量与损耗率的相对函数  $\psi_i(x)$  以保证转运商的转运损耗率尽可能的少为

$$\psi_i(x) = \begin{cases} D(A) > \sum_{i=1}^n E(Q_i), & \psi_i(x) = 1, \\ D(C) > \sum_{k=1}^q E(Q_k), & \psi_i(x) = 1, \\ D(A) < \sum_{i=1}^n E(Q_i), & \psi_i(x) = 0, \\ D(C) < \sum_{k=1}^q E(Q_k), & \psi_i(x) = 0. \end{cases} \quad (21)$$

于是，基于运输最低损耗建立如下 0-1 线性规划模型

$$\min h^* = \sum_{j=1}^{268} \sum_{i=1}^{268} S_j a_{ji}$$

$$s.t. \begin{cases} \sum_{i=1}^3 P_i \geq 2.82 \times 2 \times 10^4, \\ \psi_i(x) a_{ji} \in \{0,1\}, \\ \|A\|_1 \leq 1, \\ E_{i,j,k}(Q) \leq 6000. \end{cases} \quad (22)$$

#### 5.4.4 模糊多目标优化模型

根据优化模型(11)、(13)、(14)、(19)、(21)和(22)，将供应商的最少数量、企业最低生产成本以及运输过程中最低损耗率同时作为目标函数，建立和(15)同样的模糊多目标优化模型。同理，模糊多目标优化模型的解是所有目标函数以及隶属于约束度函数的交集<sup>[7]</sup>，即

$$(x_i, y_j, z_k)^* = \min[\mu_{h_1}(X), \mu_{h_2}(X), \mu_{h^*}(X)]. \quad (23)$$

由(23)式的结果知，损耗最少的方案仍然是第三家转运商和第四家转运商。

### 5.5 问题 4 模型的建立与求解

#### 5.5.1 企业提高产能下的多目标优化模型调整

本部分将以在控制一定成本为前提情况下来进行考虑，放开一些不是硬性的约束条件。我们依据问题 2 的模型，以供应产能提高作为目标，依据供应链各环节中的可能出现的一些因素，选择采购、转运、入库存储、生产消耗等环节，可以提高企业产能的各项可能因素。

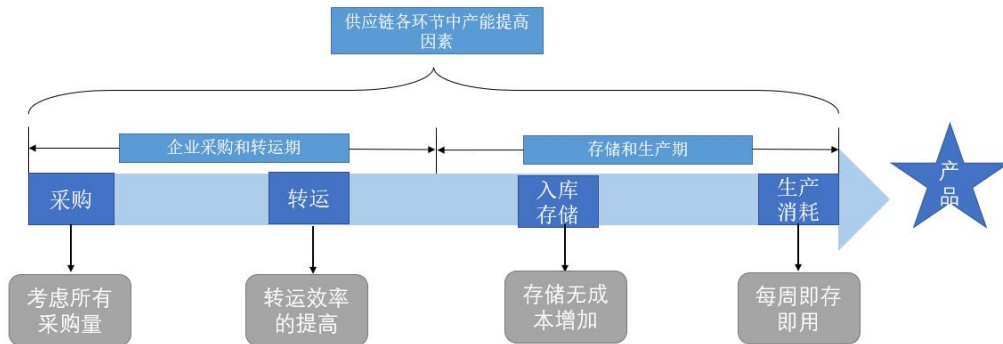


图 13 供应链各环节中产能提高因素分析流程图

以此确定如下约束条件：

- (1) 满足日常生产需求；

- (2) 转运商转运的单周上限为 6000 立方米/周；
- (3) 供货生产上限；
- (4) 决策变量与范围约束。

因此，建立如下多目标规划模型，设由 A、B 和 C 类生产的产品分别为  $x$ ， $y$ ， $z$ 。决策变量为

$$w = \max(x + y + z). \quad (24)$$

考虑选取 402 家供应商供货，依据数据 1 给定的数据，以 240 周的数据为一个周期，建立时序预测模型<sup>[8]</sup>

$$M = \frac{146}{402} \max W_{t_1} + \frac{134}{402} \max W_{t_2} + \frac{122}{402} \max W_{t_3}. \quad (25)$$

于是得到减少约束条件的优化模型

$$\begin{aligned} \min h_1 &= \sum_{i=1}^m x_i + \sum_{j=1}^n y_j + \sum_{k=1}^q z_k \\ s.t. &\begin{cases} \sum_{i=1}^3 P_i \geq 2.82 \times 2 \times 10^4, \\ i, j, k \in \wedge_1(first), \\ x_i, y_j, z_k \in \{0,1\}, \\ \sum_{i,j,k} E_*(Q) \leq M. \end{cases} \end{aligned} \quad (26)$$

### 5.5.2 企业提高产能下的多目标优化模型调整

类似问题 2，使用遗传算法求解进行求解。

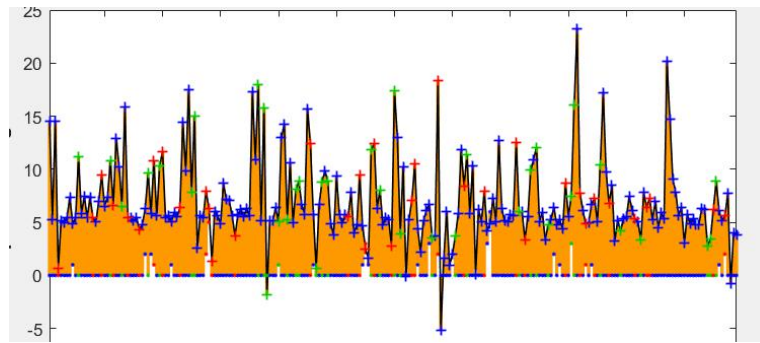


图 14 遗传算法不同变异概率结果对比预测示意图

经过求解得到的企业生产平均每周产能可提高到 17.3%，且计算得到的转运商转运次数统计结果(见图 15)。

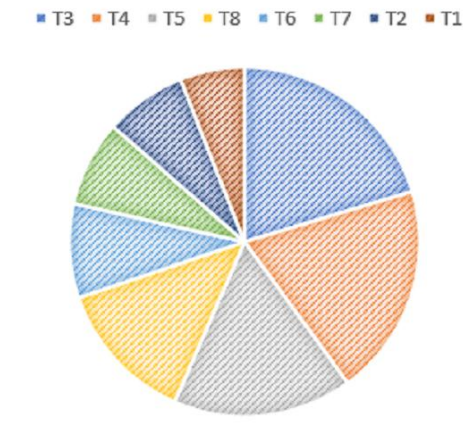


图 15 转运商转运次数分布扇形图

由此看出，对于企业生产产品中，运输约束同样重要，需要制定合理的生产订购方案和运输方案，对企业经济效益提高具有指导作用。

表 10 部分供应商供货数据

供货商ID	W001	W002	W003	W004	W005	...
S108	810	7880	1060	700	980	...
S126	5	1	0	0	1	...
S139	10200	1	9610	7620	7	...
S140	18660	0	7	1	16826.18	...
S201	150	1	0	0	0	...

5.6 结果分析与检验

类似以上四个问题对订购方案和转运方案的检验和分析，最终得到我们的结果是合理的。

六、模型评价与改进

6.1 模型评价

6.1.1 模型优点

- 1. 指标中数量弹性的设定十分巧妙，有效地衡量供货商供货能力的波动性。
- 2.在建立供货特征量化模型中，通过充分论证确定合理、有效、已获取的指

标，用于衡量的指标多，可以有效地量化供货特征。

3. 基于供应商的数量、原材料生产成本、转运损耗均是模糊的，构建合理有效的模糊多目标优化模型，模型切合题意，能够制定最经济的订购方案。并设计 0-1 线性整数规划模型确定转运方案<sup>[9]</sup>。

4. 问题环环相扣，在问题 2 建立模型的基础上，通过模型改进求解问题 3。

#### **6.1.2 模型缺点**

1. 本文模型中没有考虑国家政策、突发情况于生产企业等因素。

2. 在建立订购模型和转运模型，没有充分考虑同类原材料供应商供货差异性及其分析。

#### **6.2 模型改进**

1. 可以在订购方案中加入政策因素，在转运方案中加入突发因素的影响。

2. 运用博弈论，在原基础上加上同类原材料供应商的博弈和联系，给出更加精确的订购方案和转运方案。

## 七、参考文献

- [1] 初剑平. IN 公司直接原材料供应商选择评价体系优化研究[D]. 大连理工大学, 2021.
- [2] 陈沛光, 马铭悦, 张志鹏. 基于 AHP-TOPSIS 的电网项目多能互补综合效益评价研究[J]. 电子元器件与信息技术, 2020, 4(08): 98-100.
- [3] 陆崎, 任祖怡, 徐柯, 张俊芳, 白杨, 陈鸿亮. 基于隐枚举法的稳定控制优化切机方法[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(05): 139-144.
- [4] 孙明涛, 曹庆奎. 基于遗传算法的供应链企业订购方案优化模型[J]. 河北建筑科技学院学报, 2004(02): 86-89.
- [5] 杨水利, 周孙福, 李韬奋. 基于 CODP 的大规模定制生产成本测算研究[J]. 预测, 2010, 29(06): 62-66.
- [6] 李勇. 市政工程项目工期—成本优化研究[D]. 长沙理工大学, 2019.
- [7] 王莹. 基于 ANP 和多目标模型的供应商订购策略研究[D]. 哈尔滨工业大学, 2013.
- [8] 沈浩. 基于数据分析方法的供应链网络设计研究[D]. 清华大学, 2019.
- [9] 庞丽璇. Y 公司供应链成本控制优化研究[D]. 西安理工大学, 2020.



## 附录

### 附录 1：支撑材料文件列表

Matlab 文件	data_an.mlx Entropy_weight.m topsis.m typelog.m X.mat yichuan.m Z.mat
数据文件	按比例选取结果.xlsx 附件 A 订购方案数据结果.xlsx 附件 B 转运方案数据结果.xlsx 权重值.xlsx 熵权法 topsis 处理完成数据.xlsx

### 附录 2：所用的软件

系统运行环境：windows10，64 位操作系统

所用软件：Matlab2018a

### 附录 3：指标提取的 matlab 程序段

程序语言	Matlab	环境版本	matlabR2020a
	<pre> clc      % 读取导入数据 clear fpath1 = "F:\gs\data\附件 1 近 5 年 402 家供应商的相关数据.xlsx"; fpath2 = "F:\gs\data\附件 2 近 5 年 8 家转运商的相关数据.xlsx" T1=readtable(fpath1,'ReadRowNames',true); T2=readtable(fpath1,'sheet',2,'ReadRowNames',true); %T3=readtable(fpath2,'ReadRowNames',true); head(T1) head(T2) %head(T3)  t1_a=T1(strcmp(T1.x____,"A"),:)      %企业下订单量  t1_b=T1(strcmp(T1.x____,"B"),:) t1_c=T1(strcmp(T1.x____,"C"),:) t2_a=T2(strcmp(T2.x____,"A"),:)      %供应商出货量 t2_b=T2(strcmp(T2.x____,"B"),:) t2_c=T2(strcmp(T2.x____,"C"),:) % A 146  B 134  C 122 (A-sum(ismissing((t2_a{:,2:end}),0),2))      %批量遵守率 a2=std(t,0,2).^2      %稳定性方差 供货持续度 a1=sum(T1{:,2:end},2)      %企业订单总量 a2=sum(T2{:,2:end},2)      %供给货物总量 a3=(a2-a1)./a1      %数量弹性 a4=(240-sum(ismissing(T1{:,2:end},0),2))/240      %信任率 a5=a2-a1      %超出/违约总量 a6=a5./240      %平均每周超出/违约总量 a7 = iqr(T1{:,2:end},2) %分布情况：四分位距  %订货四分位距 a8 = iqr(T2{:,2:end},2) %供货四分位距 p=T2{:,2:end}      %供货极大值 [a9,ix]=max(p,[],2) </pre>		

#### 附录 4：基于熵权法的 topsis 模型求解 matlab 程序段

程序语言	Matlab	环境版本	matlabR2020a
<pre> Clc  Clear  Laod T.mat  [n,m] = size(T);  Location = input('正则化所在的列: ');    %正则化所在的列  type = input(); %输入所在列即可      for i = 1 : size(Location,2)    %需要正则化的列          T(:,Position(i)) = Positivization(T(:,Location i)),type(i), Location (i));  Z = T ./ repmat(sum(T.*T).^0.5, n, 1);    %标准化 disp('标准化矩阵 Z = ') disp(Z)    %打印标准化矩阵  %熵权法确定权重     if sum(sum(Z&lt;0))&gt;0         for i = 1:n             for j = 1:m                 Z(i,j) = [T(i,j) - min(T(:,j))] / [max(T(:,j)) - min(T(:,j))];             end         end         disp(Z)    %打印重新标准化结果     end     w= Entropy_weight (Z);    %调用计算权重的函数     disp('熵权法确定的权重为: ')     disp(weight)     end  DP = sum([(Z - repmat(max(Z),n,1)).^2] .* repmat(w,n,1),2).^0.5;    % D+ 与最大值的距离向量 DN = sum([(Z - repmat(min(Z),n,1)).^2] .* repmat(w,n,1),2).^0.5;    % D- 与最小值的距离向量 S = DN ./ (DP+DN);     Score= S / sum(S)    %归一化得分 [sortedS,index] = sort(Score,'descend')    %index 是排好序的供应商 ID </pre>			

```

% 计算熵权函数
function [W] = Entropy_weight (Z)
    [n,m] = size(Z);
    D = zeros(1,m);
    for i = 1:m
        x = Z(:,i);
        p = x / sum(x);
        e = -sum(p .* typelog(p)) / log(n); % 计算信息熵
        D(i) = 1 - e; % 计算信息效用值
    end
    W = D ./ sum(D); % 将信息效用值归一化，得到权重
end

%%自定义 log 函数
function [lnp] = typelog(p)
n = length(p);
dpd = zeros(n,1);
    for i = 1:n
        if p(i) == 0
            dpd(i) = 0;
        else
            dpd(i) = log(p(i));
        end
    end
end
end

```

## 附录 5：企业生产成本最低遗传代码

程序语言	Matlab	环境版本	matlabR2020a
<pre> clear; clc;                                % 清屏 close all x_max    = 10; x_min    = 0; x_range = [x_min, x_max]; [num_var,temp] = size(x_range); popsize = 100;                      % 群体大小 chromlength = 20;                   % 字符串长度(个体长度), 需要根据问题求解的精度、变量的取值范围综合判定 pc = 0.7;                           % 交叉概率, 只有在随机数小于 pc 时, 才会产生交叉 一般取 60~100% pm = 0.05;                          % 变异概率, 一般 0.1~10% iter_num    = 200;                  % 遗传代数  pop = initpop(popsize, chromlength, num_var);          % 随机产生二进制编码的初始群体 for i = 1:iter_num     % 计算目标函数     objvalue    = calobjvalue(pop, x_range, chromlength);      % 计算群体中每个个体的适应度     fitvalue    = calfitvalue(objvalue);      % 选择, 复制     newpop      = selection(pop,fitvalue);      % 交叉     newpop1     = crossover(newpop,pc);      % 变异     newpop2     = mutation(newpop1,pm);      % 计算目标函数     objvalue    = calobjvalue(newpop2, x_range, chromlength);      % 计算群体中每个个体的适应度     fitvalue    = calfitvalue(objvalue);      % 平均适应度 </pre>			

```
fitness_ave(i) = calavefitness(fitvalue);

% 求出群体中适应值最大的个体及其适应值
[bestindividual,bestfit]=best(newpop2,fitvalue);

% 返回的 y 是自适应度值，而非函数值
y(i) = bestfit;

% 将自变量解码成十进制
x(i,:) = decodechrom(bestindividual, x_range, chromlength);

% 更新种群
pop = newpop2;
end
```