

模糊正交法及其在食品加工工艺优化中的应用研究

肖怀秋,李玉珍

(湖南化工职业技术学院应用化学系,湖南 株洲 412004)

摘要: 多因素、多水平和多目标研究过程中,传统的正交方法无法满足研究需要,模糊数学通过将正交试验结果模糊化并进行矩阵转换,可以对工艺参数进行优化并获得最优试验条件。从模糊数学的基本原理、模糊正交试验建立的步骤及其在食品加工工艺优化中的应用研究等方面进行了综述并进行了展望。

关键词: 模糊正交; 参数优化; 食品加工工艺; 研究进展

中图分类号: TP27; TP15; TS201

文献标识码: B

文章编号: 1001-9286(2010)04-0073-03

Fuzzy Orthogonal Method & Its Application in the Optimization of Food Processing Techniques

XIAO Huai-Qiu and LI Yu-Zhen

(Applied Chemistry Department of Hu'nan Chemical Industry and Vocational Techniques College, Zhuzhou, Hu'nan 412004, China)

Abstract: Conventional orthogonal design could not meet the requirements for multiple-factors, multiple-levels and multiple-subjects research. Fuzzy orthogonal method could be used to optimize food processing techniques to obtain the optimum technical parameters through the fuzzification of orthogonal results and matrix transformation. In this paper, the basic principles of fuzzy mathematics, the establishing procedures of fuzzy orthogonal experiment, and its application in the optimization of food processing techniques were reviewed.

Key words: fuzzy orthogonality; parameter optimization; food processing techniques; research progress

在食品加工和相关科研中,经常需要对加工工艺参数进行优化试验,比较常见的方法主要有单因素试验、正交试验、回归正交试验等,其中单因素试验一般用于试验条件初步优化,用以估算因素影响的大致范围,每次只能考察一个因素不同水平对试验的影响,且无法考察因素间的交互作用,当影响因素较多时,需要进行大量试验研究才能获得满意的结果,有时得出的结论可能是错误的。通常情况下,在获得因素水平影响的大致范围后,对工艺参数的进一步优化可以选用正交方法,正交试验结果的处理通常采用直观分析法和方差分析法^[1],提供的信息量都较少。在正交试验中,当考察 2 个或 2 个以上响应值时,常常会碰到多个响应值评价指标得到的优化条件不一致的现象,从而影响最终优化条件的评判。目前,对多指标正交试验的结果分析常用综合评分法和综合平衡法。尽管综合平衡法能清楚反映各因素对指标的影响,但操作起来比较困难,也无法较好地解决复杂的多指标问题。一般情况下,综合评分法只要给出评分方法,分析计算较为方便,但由于指标间性质不一,排队评分、公式评分或回归评分等方法在对指标的认同概念上,一般都无法给出统一的评分体系和合理的评分度量,另外加上权重因素的影响,因此各次试验的综合评分之和就无法正确、有效地反映情况,分析得到的结论就可能不可靠。为

解决上述问题,先后发展了其他的试验多指标归一化方法,如功效系数法^[2]、理想点法^[3]、重点指标法^[4]等,这些方法或是在运用的普遍性上,或是在单个指标试验结果与多指标试验总体效果的相互关系的认识上都存在一定的缺陷。采用模糊正交法,通过用模糊数学的理论和方法处理试验的评价指标值,使其模糊化,建立一个多目标评价的模糊综合评价函数,然后根据最大隶属度原则确定各因素对综合评价的影响程度,就能解决两个或多个评价指标得到的优化条件不一致的问题。对于多目标、多因素、多水平的试验,为了更好地分析试验结果可应用模糊正交法,通过正交试验结果模糊化,然后用模糊数学的理论和方法处理试验数据,不仅能估计主效应因子,还可以估计因素间最佳搭配,能在同样试验工作量情况下获得更多有用的信息,尤其在处理多目标、多因素、多水平问题方面更具有独特的优势^[5]。自 1965 年, L.A.Zadeh 首次发表模糊数学相关论文以来^[6],模糊数学方法在众多领域获得了一定的运用,近年来也逐渐在多指标正交试验中运用^[7-8],但限于具体方法的运用,对理论体系没有进行深入的探讨。本文从模糊数学基本原理、模糊正交试验方法建立的步骤以及在食品加工工艺参数优化中的应用等方面进行综述,以期对模糊正交方法更广泛地应用起到抛砖引玉的作用。

收稿日期:2010-01-27

作者简介:肖怀秋(1981-),男,苗族,湖南武冈人,硕士,主要从事生物制药的教学与科研工作。

1 模糊数学的基本原理

通常情况下,对有限论域 $U=\{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ 里的某一模糊集 A 可以用向量矩阵 $A=(a_1, a_2, \dots, a_n)$ 表征,其中 $a_1, a_2, \dots, a_n [a_i \in (0, 1)]$ 是相应的隶属度,代表综合评判各因素对应权重的集合,且满足条件:

$$\sum_{i=1}^n a_i = 1 \quad (1)$$

另设模糊关系矩阵 (即参加综合评判的各因素根据相应隶属度所组成的评判结果的集合)为:

$$\tilde{R} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \cdots & r_{1m} \\ r_{21} & r_{22} & \cdots & r_{2m} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ r_{n1} & r_{n2} & \cdots & r_{nm} \end{bmatrix} \quad (2)$$

将式(2)与式(1)进行线性变换,即得到模糊线性加权结果 $\tilde{B}$ (式(3)),如下:

$$\begin{aligned} \tilde{B} &= A \cdot \tilde{R} = (a_1, a_2, \dots, a_n) \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \cdots & r_{1m} \\ r_{21} & r_{22} & \cdots & r_{2m} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ r_{n1} & r_{n2} & \cdots & r_{nm} \end{bmatrix} \\ &= (b_1, b_2, \dots, b_m) \end{aligned} \quad (3)$$

$$\text{其中, } b_i = \sum_{k=1}^n a_k r_{ki} (i=1, 2, \dots, m)。$$

2 模糊正交综合评价建立的步骤

模糊正交试验所考虑的因素需要建立在预备试验或查阅文献基础上才能科学提出,根据预备试验(如单因素试验、Plackett-Burman 试验结合爬陡坡试验等)结果,合理地选择和确定因素的水平范围,设计正交试验,评价指标常以多目标函数形式表示,以模糊综合评价值为综合评价指标。

2.1 评价指标集和对象集的确定

根据研究中的评价指标的个数(假设为 x),则把 x 个指标综合起来作为评价的指标集,分别记为: $Y_1, Y_2, \dots, Y_x$ 。 $U=\{Y_1, Y_2, \dots, Y_x\}$ 。以正交试验设计的 n 组试验为评价对象集。 $D=\{d_1, d_2, \dots, d_n\}$ 。

2.2 隶属函数的建立

建立评价指标集 U 对评价集的隶属函数使根据隶属函数计算得到的隶属度值的大小与该项指标在综合评价中的重要性相适应,隶属函数为单调函数,隶属度 r_{mn} 在 $0 \sim 1$ 之间, $m=1, 2, \dots, m; n=1, 2, \dots, n$ 。

$$\begin{aligned} r_{1n} &= \frac{Y_{1n} - \text{Max}(Y_{1n})}{\text{Min}(Y_{1n}) - \text{Max}(Y_{1n})}, \quad r_{2n} = \frac{Y_{2n} - \text{Max}(Y_{2n})}{\text{Min}(Y_{2n}) - \text{Max}(Y_{2n})}, \\ \cdots, \quad r_{mn} &= \frac{Y_{mn} - \text{Max}(Y_{mn})}{\text{Min}(Y_{mn}) - \text{Max}(Y_{mn})} \end{aligned}$$

通过隶属度构成模糊关系矩阵:

$$\tilde{R} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \cdots & r_{1n} \\ r_{21} & r_{22} & \cdots & r_{2n} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ r_{m1} & r_{m2} & \cdots & r_{mn} \end{bmatrix} = (r_{mn})_{m \times n} \quad (4)$$

2.3 确定权重分配集 $\tilde{A}$

$\tilde{A}$ 是指标集 U 上的模糊子集,又称为权重分配集,该集可体现各指标的重要程度,在上述假设中,有 x 个因素,则模糊子集 $\tilde{A}$ 可确定为: $\tilde{A}=\{a_1/Y_1, a_2/Y_2, \dots, a_x/Y_x\}$ ($a_1, a_2, \dots, a_x$ 分别表示指标在总和中所占百分比, $a_1+a_2+\dots+a_x=1$),可记为: $\tilde{A}=(a_1, a_2, \dots, a_x)$ 。

2.4 模糊综合评价值的计算

在评价集中引入模糊子集 $\tilde{B}$,称为评价级,它的模糊评价 $\tilde{B}=\{b_1, b_2, \dots, b_m\}$,由模糊矩阵 $\tilde{R}$ 与权重分配集 $\tilde{A}$ 通过模糊变换,可得到: $\tilde{B}=\tilde{A} \cdot \tilde{R}$ 。模糊运算的方法有很多种^[9]。

2.5 主效应分析

假设正交试验中待优化的工艺参数有 C_i 个,其论域为 X_i ,则有:

$$X_i = \{C_{ij}\} \quad (5)$$

式中, i 为工艺参数组成的因素个数, j 为各因素水平数。

为方便比较各水平,将因素 C_i 各水平的 C_{ij} 的模糊

评价进行归一化处理^[10]。得到 $(\sum b_{ij})'$, $(0 \leq (\sum b_{ij})' \leq 1)$,它表示了因素在该水平条件下对模糊综合评价值的影响程度,代表了 C_i 在 j 水平 $C_{ij} \in X_i$ 处的隶属度,即 C_{ij} 属于模糊集 C_i 的程度,也是定义在论域 X_i 上的,因此,可

以将 $(\sum b_{ij})'$ 表示为 X_i 上的模糊子集,即有:

$$\begin{aligned} \tilde{C}_1 &= [(\sum b_{11})', (\sum b_{12})', \dots, (\sum b_{1j})'] \\ \tilde{C}_2 &= [(\sum b_{21})', (\sum b_{22})', \dots, (\sum b_{2j})'] \\ &\quad \cdots \quad \cdots \quad \cdots \quad \cdots \\ \tilde{C}_i &= [(\sum b_{i1})', (\sum b_{i2})', \dots, (\sum b_{ij})'] \end{aligned}$$

根据最大隶属度原则进行计算,确定各因素对多因素综合评价值的影响程度。

2.6 因素水平间交互效应的考察分析

根据最大隶属度原则,在考察因素交互作用(reciprocal action)的情况下,各因素最佳组合为 C_i 中隶属度最大的水平搭配,其组合的隶属度为:

$$\text{Max}[(\sum b_{1j})'] \wedge \text{Max}[(\sum b_{2j})'] \wedge \cdots \wedge \text{Max}[(\sum b_{ij})']$$

3 模糊正交法在食品加工工艺优化中的应用

张钟^[11]等应用多因素正交设计和模糊综合评价法评判蒸煮法制作米粉工艺,对米粉中添加玉米膳食纤维的配方进行优化选择,研究发现,当玉米膳食纤维为 3%、大豆粉为 3%、低聚果糖为 0.5% 时,效果最好。崔群法^[12]等人应用模糊数学方法综合评判绿豆糕产品的感官质量,运用回归分析方法对主要因素进行了分析,从而控制

产品的质量,取得良好效果。陈国刚^[13]等在正交试验 $\{L_{16}(4^5)\}$ 结果的基础上,用随机抽样的方法,抽取产品并采用模糊数学综合评判法对婴幼儿食用胡萝卜泥辅助食品进行感官质量的评价,选择了评定论域(U =色泽、气味、滋味和组织形态)、评结论域(V =很欢迎、欢迎、不太欢迎和不欢迎),并对色泽、气味、滋味和组织形态分别赋予权重构成权重分配集 A ,通过模糊数理计算(归一化处理),获得了最优产品峰值0.368,表明产品受消费者欢迎。冯耐红^[14]等研究了一种小米南瓜复合饮料的制备方法,将小米用淀粉酶和蛋白酶(木瓜蛋白酶)限制性酶解,然后与不同营养风格的南瓜混合,通过模糊数学与多层综合评价确定了最优加工工艺,加工成稠稀适中、色泽鲜艳、口感舒爽的高硒低糖复合饮料。张钟^[15]等用模糊正交法研究了以小麦为主要原料,加入仙人掌、砂糖和奶油等成分制作植物类营养饼的生产工艺过程,选择了 $L_{16}(3^4)$ 正交表和模糊综合评价评价产品感官质量,获得了最优化的工艺条件。吴贾锋^[16]等应用正交回归试验($N=16$)结合模糊数学矩阵法研究了以姜精油和姜辣素为主要原料,以加白砂糖和柠檬酸配制生姜风味饮料的生产工艺,以感官评定得分为指标获得了最优配方:7.75%绵白糖、0.13%柠檬酸、0.0775%姜精油、1.25 mL/100 g姜辣素。胡青霞^[17]等在正交试验设计结果的基础上,结合模糊数学理论,采用模糊综合评价法对红枣发酵枣醋保健饮料工艺参数进行模糊评价,确定了最佳配方为水600 mL、枣醋300 mL、蛋白糖0.95 g、蜂蜜125 g、甘草浸提液65 mL。郭元新^[18]等利用正交试验和模糊综合评价方法优化了苦荞挂面的生产工艺,研究发现,在苦荞粉:面粉为3:7的比例下,按混合粉质量分别添加1.5%的复合添加剂、35%的水及3%的食盐,经和面、熟化、压面、切条与干燥工艺可制得美味爽口的绿色挂面制品。虎义平^[19]等分别用索氏提取法、超声波辅助提取法从杏仁中提取杏仁油,在进行最佳溶剂筛选的基础上,用正交试验法研究了超声波温度、时间和料液比等因素对提取的影响并测定其理化指标,通过对理化指标进行模糊处理,然后对工艺进行模糊评定,获得了最优的工艺条件。张敏^[20]等用自行研制的干式高油料挤压对油菜籽进行了预处理的基础上,应用正交旋转组合设计获得了较优的油菜籽挤压膨化系数参数,然后应用模糊综合评价法通过频数选优进行了参数的优化组合研究,研究发现,当模孔孔径在10~11 mm、模孔温度为99~111℃、螺杆转速在52~60 r/min、物料含水率为6.4%~8.0%时,可以获得较优的机械生产性能和粕残油率指标。

4 展望

模糊正交法就是通过将正交试验结果模糊化,然后用模糊数学的理论和方法处理数据,从而对工艺参数进行优化的试验方法,适用于多因素、多水平、多目标的研究过程,可以将复杂的问题简单化。通过模糊转换,有利于获得影响工艺参数的主要因素和水平,通过少量试验

获得大量有用信息,大幅度减少试验研究次数,可降低工作量,快速、高效的得到优化工艺参数。该方法可预测所有因素各水平的全部可能搭配的试验点的试验结果,具有可信度高、方便快捷、准确度高等的优点,然而,目前模糊数学应用于工艺优化的文献报道相对较少,笔者希望,能通过对模糊数学理论的普及和推广,使得在进行多因素、多水平和多目标研究过程中,能很好地将模糊数学理论和方法应用到科研或生产优化中去,从而更好地为科研和生产服务。

参考文献:

- [1] 甄鹏,范晓婧,马良,等.模糊分析法在脂质体正交试验中的应用[J].中国药学,2009,(1):37-42.
- [2] Harrington E C. The desirability function[J]. Industrial Quality Control, 1965,21:494-498.
- [3] Khuri A I, Conlon M. Simultaneous optimization of multiple responses represented by polynomial regression functions[J]. Technometrics, 1981,23:363-375.
- [4] Myers R H, Khuri A I, Cater W H. Response surface techniques for dual response systems [J]. Technometrics, 1973,15:301-317.
- [5] 胡琴,刘清友,刘永兵.模糊正交法在钻头轴承磨损性能研究中的应用[J].石油机械,2005,33(1):11-14.
- [6] Zadeh L A. Fuzzy sets[J]. Information and Control, 1965,(8):338-353.
- [7] 王文侠,原向红,李同声.模糊正交法用于制糖过程工艺参数优化的研究[J].中国甜菜糖业,1998,(3):4-7.
- [8] 王正武,李干佐,刘俊诚,等.模糊变换-正交设计法在配方筛选中的应用[J].日用化学工业,2001,31(3):14-16.
- [9] 扈场.实用模糊数学[M].北京:科学技术文献出版社,1989. 188-190.
- [10] 李世勇.工程模糊数学及应用[J].哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,2004.99-101.
- [11] 张钟,姜全芝.中老年高纤维保健营养米粉研制[J].食品与机械,2005,21(1):37-39.
- [12] 崔群法,李光海.用模糊数学与数理统计方法评价绿豆糕的品质[J].河南工业大学学报(自然科学版),2006,27(2):70-73.
- [13] 陈国刚,崔艳莉.婴幼儿食用胡萝卜泥加工工艺的研究[J].食品工业科技,2007,28(2):185-187.
- [14] 冯耐红,卫天业,郑洪源,等.小米南瓜复合饮料的研制[J].中国食品学报,2006,6(3):65-69.
- [15] 张钟,高雷.仙人掌饼干的配方优化[J].粮油食品科技,2007,15(5):49-51.
- [16] 吴贾锋,杨婷婷,韩露,等.生姜风味饮料配方的优化[J].徐州工程学院学报,2008,23(3):22-26.
- [17] 胡青霞,陈延惠,秦丽娜.发酵枣醋保健饮料最佳配方的研究[J].河南工业大学学报,2008,42(4):443-445.
- [18] 郭元新,石必文.苦荞挂面配方的优化设计[J].安徽科技学院学报,2007,21(1):33-36.
- [19] 虎义平,张清安,钟盛华.利用模糊数学评定杏仁油提取方法的研究[J].河南农业科学,2008,(11):113-115.
- [20] 张敏,张兆国,孙勇.油菜籽挤压膨化系统参数优化试验[J].农业机械学报,2006,37(8):5-9.