基于蜂群算法的等压灌装阀阀口流道结构优化

李全来

(北京工商大学,北京 100048)

摘要:目的 为了改善等压灌装阀的灌装性能,分析阀口流道结构参数对液料流场的影响,求解流道内 最大压力损失、最大液料流速和最大湍动能均最小化的约束多目标优化问题。方法 基于正交试验设计 和 Fluent 流场仿真软件对灌装阀阀口流道流场进行数值模拟,并通过回归分析建立以阀口流道结构参数 为自变量的最大压力损失、最大液料流速和最大湍动能的经验方程,进而建立阀口流道结构参数约束多 目标优化模型,采用约束多目标人工蜂群算法对优化模型进行求解。结果 流道内最大压力损失最小化、 最大液料流速最小化和最大湍动能最小化这3个目标之间存在冲突,无法同时达到最优,基于多目标人 工蜂群算法获得了阀口流道结构参数的最优 Pareto 解集。结论 约束多目标人工蜂群算法能有效用于等 压灌装阀阀口流道结构参数的优化。

关键词:等压灌装阀;阀口流道;流场;人工蜂群算法;优化 中图分类号:TB487 文献标识码:A 文章编号:1001-3563(2017)23-0133-07

Structure Optimization of Isobaric Filling Valve Port Flow Channel Based on Bee Colony Algorithm

LI Quan-lai

(Beijing Technology and Business University, Beijing 100048, China)

ABSTRACT: The work aims to analyze the effect of valve port flow channel structure parameter on the liquid flow field to solve the constrained multi-objective optimization problem of minimizing the maximum pressure loss, maximum liquid flow rate and maximum turbulent kinetic energy, for the purpose of improving the filling performance of isobaric filling valve. Based on the orthogonal experimental design and flow field simulation software Fluent, the flow field of filling valve port flow channel conducted the numerical simulation. Through the regression analysis, the empirical equation of maximum pressure loss, maximum liquid flow rate and maximum turbulent kinetic energy was developed with the valve port flow channel structure parameters as the independent variables. Then, the constrained multi-objective optimization model of valve port flow channel structure parameters was established. The multi-objective artificial bee colony algorithm was used to solve the optimization model. There was a conflict among the minimizing could not be optimized at the same time. The optimal Pareto solution set of valve port flow channel structure parameters was obtained based on the multi-objective artificial bee colony algorithm. In conclusion, the multi-objective artificial bee colony algorithm can be effectively used for the optimization of the isobaric filling valve port flow channel structure parameters.

KEY WORDS: isobaric filling valve; valve port flow channel; flow field; artificial bee colony algorithm; optimization

灌装机是将液料按预定量充填到玻璃瓶、易拉罐 及塑料瓶等包装容器内的常用包装机械,可分为常压 灌装机、负压灌装机、等压灌装机和压力灌装机^[1-3]。 等压灌装机主要用于啤酒、碳酸饮料及其他含气液料 的灌装,与人们的生活息息相关、密不可分。灌装阀 是等压灌装机的核心部件,是包装容器和储液箱之间

收稿日期: 2017-06-04

基金项目:北京市教育委员会科技发展计划面上项目(KM201510011005);北京工商大学两科基金(19008001273) 作者简介:李全来(1982—),男,博士,北京工商大学讲师,主要研究方向为包装机械设计。

液料通路的开关^[4]。灌装阀的阀芯、阀座和回气管之间 形成的阀口流道对灌装精度和灌装质量有重要影响^[5]。 孙智慧^[5]分析了等压灌装阀阀口流道内的流场,结果表 明,随着阀口开度的减小,液料最大流速、压力损失、 能量耗散率均增大。在阀芯凸台拐角处增加过渡圆弧, 可以减小漩涡的尺寸和能量耗散率。殷水忠^[6]分析了盒 中袋灌装阀阀芯拐角和阀芯下降高度对液料流场的影 响,并优化了阀芯拐角。黄川^[7–8]等分析了易拉罐等压 灌装阀阀口流道内液料的流动状态,优化了流道结构, 提高了灌装阀的抗冲击性能,以及灌装阀出口处液料流 速分布的均匀性。目前有关等压灌装阀阀口流道结构优 化理论的研究仍然较少,限制了流道结构的有效改善, 不利于提高灌装阀的性能。

这里用 Fluent 流场仿真软件对等压灌装阀阀口 流道内的液料流场进行数值模拟,分析阀口流道结构 参数对流道内最大压力损失(即最大静压力与最小静 压力之差)Δpmax、最大流体流速 vmax 和最大湍动能 E 的影响。建立等压灌装阀阀口流道结构参数的约束多 目标优化模型,用人工蜂群算法优化阀口流道结构参 数,提高灌装速度,减小能耗,为等压灌装阀阀口流 道结构优化设计提供依据。

1 Fluent 仿真模型的建立

1.1 几何模型



图 1 啤酒灌装阀阀口流道结构 Fig.1 Beer filling valve port flow channel structure 优化阀口流道结构参数。阀口开度为 6.5 mm, 密封 面设计锥角为 45°, 流道出口宽度为 4.5 mm, 回气管 外径为 4 mm^[5]。在流道结构优化设计中,分析 L_1 , L_2 , L_3 , R 这 4 个因子对流场的影响,因子的水平见 表 1。采用正交试验法,共有 16 种流道结构尺寸组 合。用 Fluent 仿真分析不同阀口流道结构参数组合对 液料流场的影响。

	表 1	等压灌装阀阀口流道结构参	シ数
Tab.1	Structure	parameters of isobaric filling	ng valve por
		flow channel	mm

水平	L_1	L_2	L_3	R
1	8	0	1	1.5
2	8.5	3	1.4	2
3	9	6	1.8	2.5
4	9.5	9	2.2	3

啤酒在流道内的流动为三维流动,一个典型流道的三维实体模型见图 2,其中 L_1 =9 mm, L_2 =3 mm, L_3 =2.2 mm, R=1.5 mm。



图 2 流道三维实体模型 Fig.2 Three-dimensional solid model of flow channel

1.2 网格划分

用非结构化的四面体网格对求解区域进行网格 划分,一个典型的有限元网格见图 3,其中 $L_1=9$ mm, $L_2=3$ mm, $L_3=2.2$ mm, R=1.5 mm, 网格单元总数约 为 230 000。



图 3 网格划分 Fig.3 The mesh generation

1.3 边界条件设置

等压灌装阀的流体介质为啤酒,其密度和粘度与

水接近,因而用水的密度和粘度代替啤酒,即流体的 密度为 998.3 kg/m³,粘度为 1.003×10⁻³ μPa·s^[5]。参考 压力为 0.4 MPa,采用速度入口边界条件,入口处通 流截面上流体平均速度为 0.15 m/s^[5]。出口采用压力 出口边界条件,在阀芯、阀座和回气管壁面上采用无 滑移固体壁面条件。

1.4 基本控制方程

流道内流体的流动为不可压缩单相湍流流动。湍流 核心区流体流动采用重正化群 k-c 模型,该模型适用于 充分发展的湍流,即高雷诺数的湍流模型^[9]。在近壁区, 流体流动的雷诺数较低,湍流发展不充分,采用标准壁 面函数法计算,其计算量较小,精度较高^[9]。

2 灌装阀阀口流道内流场的仿真结果

Fluent 数值模拟结果表明,改变阀口流道结构参数时流道内最大压力损失 Δp_{max} 为 295.3528~324.2502 Pa,液料最大流速 v_{max} 为 0.6305~0.6410 m/s,最大湍流动能 *E* 为 0.0214~0.0286 mm²/s²。流道结构参数对 Δp_{max} 的影响见表 2,可知随着 *L*₁的增加, Δp_{max} 逐渐减小。当 *L*₂由 0 增大至 3 mm 时, Δp_{max} 迅速增大,而由 3 mm 增大至 5 mm 时变化不明显,当 *L*₂由 6 mm 增大至 9 mm 时, Δp_{max} 又迅速增大。随着 *L*₃的增大, Δp_{max} 逐渐增大。随着 *R* 的增加, Δp_{max} 先减小后增大。

表 2 流道结构参数对最大压力损失 Δp_{max}的影响 Tab.2 The effect of flow channel structure parameters on the maximum pressure loss Δp_{max} Pa

水平	$\Delta p_{ m max}$				
	L_1	L_2	L_3	R	
1	314.484	304.127	309.020	316.047	
2	312.640	315.075	312.098	310.148	
3	312.400	314.861	314.290	311.397	
4	311.474	316.936	315.592	313.406	

流道结构参数对 v_{max} 的影响见表 3,可知当 L_1 为 8.5 mm 时, v_{max} 最小。 L_2 对 v_{max} 的影响最显著, 随着 L_2 的增大, v_{max} 逐渐变大。当 L_3 为 1.0 mm 时, v_{max} 最小。R 对 v_{max} 的影响较小。

表 3 流道结构参数对最大流动速度 v_{max} 的影响 Tab.3 The effect of flow channel structure parameters on the maximum flow velocity v_{max} m/s

水亚	$v_{ m max}$			
	L_1	L_2	L_3	R
1	0.6205	0.6089	0.6175	0.6204
2	0.6190	0.6211	0.6228	0.6219
3	0.6226	0.6254	0.6204	0.6201
4	0.6214	0.6282	0.6228	0.6212

流道结构参数对 E 的影响见表 4,可知 E 随着 L₁的增大而减小,当L₁为 9.5 mm 时,E 最小。当L₂ 为 6 mm 时,E 最小。随着 L₃的增加,E 先增大后减 小。随着 R 的增大,E 先减小后增大,当 R 为 2.0 mm 时,E 最小。

表 4 流道结构参数对最大湍流动能 E 的影响 Tab.4 The effect of flow channel structure parameters on the maximum turbulent kinetic energy E

mm /c	
IIIIII / S	

水亚	E				
	L_1	L_2	L_3	R	
1	0.0259	0.0247	0.0235	0.0252	
2	0.0258	0.0260	0.0248	0.0236	
3	0.0255	0.0244	0.0272	0.0264	
4	0.0244	0.0266	0.0260	0.0265	

3 流道结构参数优化模型

孙智慧^[5]通过研究表明,在灌装过程中应使 Δp_{max} 尽量小。流体涡旋的尺度和能量损失随着 v_{max} 的增加而增大,同时液料在流道内的 v_{max} 越大,流体 对阀芯的冲击力也越大,阀芯表面越容易产生腐蚀, 因而选用的流道结构参数应使流体最大流速 v_{max} 尽 量小。液料通过流道过程中的能量损失随着 *E* 的增加 而增大,因而流道结构参数的选用应使 *E* 尽量小^[5]。 从定性分析中可以看出,优化阀口流道结构参数使 Δp_{max} 最小化、 v_{max} 最小化和 *E* 最小化存在冲突,3个 目标无法同时达到最优状态,需要用多目标优化方法 在 3 个目标之间进行折中,尽量使 3 个目标均达到较 优状态。

3.1 流场参数的回归模型

为了获得流道结构优化的目标函数,对 Fluent 数值计算结果进行回归分析,建立 Δp_{max} , v_{max} 和 *E* 的经验方程分别为:

$\Delta p_{\rm max} = 295.11 + 4.108L_2 - 0.1426L_2^2R_3 + 0.294$	$L_1 L_3 R$
	(1)
$v_{\rm max} = 0.60457 + 0.00299L_3 + 0.000495L_1L_2 - 0.000485L_1L_2 - 0.000485L_2 - 0.000485L_1L_2 - 0.000485L_2 - 0.000485L_2 - 0.000485L_2 $	
$0.000029 L_{\mu}L_{\mu}^{2}$	(2)

$$E = 0.02176 + 0.001013L_2R \tag{3}$$

F 检验法用于检验回归模型的显著性^[10]。式 (1-3)的F值($F_{\Delta p_{max}}$, $F_{v_{max}}$ 和 F_E)分别为30.51, 10.85和6.65。 $F_{\alpha}(n_1, n_2 - n_1 - 1)$ 的值可由F分布表查 得,其中 α 为置信水平, n_1 为回归模型中的自变量数, n_2 为试验次数。这里取 α =0.05,则 $F_{0.05}(4, 11)$ =3.36, $F_{\Delta p_{max}}$, $F_{v_{max}}$ 和 F_E 均大于 $F_{0.05}(4, 11)$,说明回归模 型有效。此外,为检验回归模型的回归效果,对残差 进行正态检验^[10]。残差进行正态检验得到的 *P* 值分 别为 0.898, 0.918, 0.487, 均大于 0.05, 这说明残差 服从正态分布,回归模型回归效果良好。

3.2 多目标优化模型的建立

阀口流道结构参数的约束多目标优化模型为: $f(L_1, L_2, L_3, R) = \min[\Delta p_{m_1}, v_{m_2}, E]$ (4)

约束条件:
$$\begin{cases} L_{1\min} \leq L_1 \leq L_{1\max} \\ L_{2\min} \leq L_2 \leq L_{2\max} \\ L_{3\min} \leq L_3 \leq L_{3\max} \\ R_{\min} \leq R \leq R_{\max} \\ \Delta p_{\max}, v_{\max}, E \geq 0 \end{cases}$$

4 流道结构参数优化模型的求解

4.1 主要步骤

人工蜂群算法^[11-12]将蜂群中的蜜蜂分为 3 类, 即采蜜蜂、观察蜂和侦查蜂。通过这 3 类蜜蜂的分工 协作,找出最优蜜源使整个蜂群采蜜量最大化,蜜源 指的是优化问题的各种候选解。采蜜蜂占蜂群数量的 一半,与所采蜜源一一对应。它存储蜜源的位置和蜜 量信息,将这些信息传递给观察蜂,并搜索蜜源邻域。 观察蜂的数量与采蜜蜂数量相等,它们根据采蜜蜂传 递来的蜜源信息以一定的概率选择某一蜜源并在其 邻域进行进一步的搜索,加快算法的收敛速度。蜜量 越大的蜜源被观察蜂选中的概率越高,每个蜜源都设 定有开采极限次数,若蜜源被持续选中并超过该极限 次数,则认为该蜜源中的蜂蜜消耗完,对应的采蜜蜂 放弃该蜜源并转化为侦查蜂,在整个寻优空间随机地 搜索新蜜源^[11,13]。人工蜂群算法优化阀口流道结构参 数的主要步骤如下所述。

4.1.1 初始化蜜蜂种群

从搜索空间中随机产生 M个蜜源 { $X_1, X_2...X_M$ }, 每个蜜源代表一个候选解。若优化问题的维度为 D,则 第 i 个蜜源可以表示为 $X_i = (x_i^1, x_i^2...x_i^D)$ 。第 i 个蜜源 的第 j 维分量 x_i^i 的计算^[11, 13]为:

$$x_i^j = x_{\min}^j + r_1(x_{\max}^j - x_{\min}^j) \quad j \in (1, 2...D)$$
(5)

式中: x_{max}^{j} 和 x_{min}^{j} 为搜索空间中第 j 维分量的最大值和最小值; r_1 为[0, 1]之间的随机数。

当生成的蜜源不符合约束条件时,再次按式(5) 重新生成蜜源,直至符合约束条件。生成蜜源后,代 入式(4)计算目标函数值。

4.1.2 建立可行解集和非可行解集

基于联赛法建立可行解集和非可行解集。从 M 个蜜源中随机选择 2 个蜜源进行比较, 若 2 个蜜源都 是可行解, 即符合约束条件, 则由 Pareto 支配关系决 定其优劣。Pareto 支配关系可表达为^[13]:若 $f_k(X)$ 为 多目标优化问题的第k个目标函数, X_A 和 X_B 为优化 问题的可行解,当且仅当 X_A 和 X_B 使所有不等式 $f_k(X_A) \le f_k(X_B), k \in (1, 2, 3)$ 成立,且至少存在一个 $f_k(X_A) < f_k(X_B), k \in (1, 2, 3)$ 成立,则称 X_A Pareto 支配 X_B ,或称 X_A 是 Pareto 占优的,记为 $X_A > X_B$ 。 若一个解支配另一个解,则将 Pareto 占优解放入可行 解集 *temp*1,删除另一个解;若2个解互不支配,则 将2个解均放入可行解集 *temp*1。若一个为可行解, 另一个为非可行解,则将可行解放入 *temp*1,删除另 一个解;若它们都是非可行解,计算约束违反程度函数值 $constr(X_1)$ 为:

$$constr(X_{1}) = \frac{1}{3} \{ \frac{\left|\min[\Delta P(X_{1}), 0]\right|}{\max_{1 \le q \le M} \left(\left|\min[\Delta P(X_{q}), 0]\right|\right)} + \frac{\left|\min[v_{\max}(X_{1}), 0]\right|}{\max_{1 \le q \le M} \left(\left|\min[v_{\max}(X_{q}), 0]\right|\right)} + \frac{\left|\min[E(X_{1}), 0]\right|}{\max_{1 \le q \le M} \left(\left|\min[E(X_{q}), 0]\right|\right)} \}$$

(6)

由式(6)可知非可行解的约束违反程度函数 constr的数值均大于0。若2个非可行解的 constr值 不相等,则将 constr值较小的放入非可行解集 temp2, 删除另一个解;若2个非可行解的 constr值相等,则 将这个解均放入非可行解集 temp2。针对余下的蜜源, 重复上述操作,直至所有蜜源均被比较。

4.1.3 建立非劣可行解和非劣非可行解外部档案

研究表明,在约束多目标优化计算中用外部档案 分别存储非劣可行解和非劣非可行解可以获得较好 的优化结果^[15]。这里根据 Pareto 支配关系找出可行解 集 *temp*1 和非可行解集 *temp*2 中所有非劣解,并将它 们分别保存于外部档案 *Rpop*1 和 *Rpop*2 中。

当*Rpop*1中非劣解的数目大于外部档案集容量*N*时,需计算拥挤距离并对非劣解进行裁剪。对于多目标优化问题,第*i*个解的拥挤距离*dis*(*i*)为^[13-15]

$$dis(i) = \sqrt{\sum_{j=1}^{M} dic(i,k)^2} \quad k = 1, 2, 3$$
(7)
式中:

$$dic(i,k) = \begin{cases} (\frac{2(f_k(I+1) - f_k(I))}{(f_{\max}^k - f_{\min}^k)})^2 & I = 1\\ (\frac{2(f_k(I) - f_k(I-1))}{(f_{\max}^k - f_{\min}^k)})^2 & I = 2, 3...M \end{cases}$$

式中: *I* 为解 *i* 按第 *k* 个目标函数值排序后在新 序列中的位置; $f_k(I-1)$, $f_k(I)$ 和 $f_k(I+1)$ 分别为新序列中 第 *I*-1, *I* 和 *I*+1 个解对应的第 *k* 个目标函数的函数值; f_{max}^{k} 和 f_{min}^{k} 分别为第 *k* 个目标函数值中的最大值和最 小值。 在 Rpop1 中首先淘汰拥挤距离最小的解,实现裁 剪。若裁剪后 Rpop1 中非劣解数目仍大于外部档案集 容量,仍需通过拥挤距离继续裁剪。当淘汰一个解后, 处于其邻域上的解的拥挤距离会发生变化,因此需要 再次计算当前 Rpop1 中非劣解的拥挤距离,然后淘汰 拥挤距离最小的解。重复上述操作,直至非劣解数量 等于外部档案集容量。当前的可行解集就为非劣可行 解外部档案集 pop1。当 Rpop2 中非劣解的个数超过 外部档案集容量时,依次逐个淘汰约束违反程度函数 值较大的个体,直至非劣解数量等于外部档案集容 量,当前的非可行解集即为非劣非可行解集 pop2。

4.1.4 采蜜蜂邻域搜索

采蜜蜂邻域搜索指每只采蜜蜂在原蜜源邻域开 采出一个新蜜源,并通过比较新、原蜜源的优劣保留 较好的蜜源。新蜜源 X_{inew} 由原蜜源 X_i 只改变某一维 度的数值而获得。若第 j 维改变后记为 x_{inew}^j ,则新蜜 源可表达为 $X_{inew} = (x_i^1, x_i^2 \dots x_{inew}^j)$ 。采蜜蜂对原蜜 源 X_i 进行邻域搜索时,首先生成一个[0, 1]区间的随机 数 r_2 ,并与可行解集选择概率 p_m 进行比较。若 $r_2 < p_m$, 则从外部档案集 pop1中随机选择一个非劣解,否则 从外部档案集 pop2中随机选择一个非劣解。将选出 的非劣解 X_n 作为全局信息。然后随机选择某一维度 j, 对 X_i 进行邻域搜索^[11, 13]:

$$x_{\text{inew}}^{j} = x_{i}^{j} + r_{3}(x_{n}^{j} - x_{i}^{j})$$
(8)

式中: x_i^j 和 x_n^j 分别为 X_i和 X_n 的第 j 维分量; r₃ 为[-1, 1]之间的随机数。若 X_i和 X_n 为同一蜜源,则 重新在非劣解中随机选择一个蜜源。

判断生成的新蜜源 X_{inew} 是否在搜索空间内,若 X_{inew} 不在搜索空间内,则由式(8)重新生成新蜜源。 与 4.1.2 节中的比较方法相同,根据 Pareto 支配关系 和约束违反程度函数值判断新、原蜜源的优劣。若 $X_{inew} > X_i$,或者 $constr(X_{inew}) < constr(X_i)$,则用 X_{inew} 代替 X_i ,并将搜索次数变量 T值置零。否则保留原蜜 源 X_i ,搜索次数变量 T加 1。重复上述步骤,直至采 蜜蜂对所有蜜源都进行了邻域搜索。

4.1.5 计算收益率

在蜂群算法中,收益率反映蜜源的质量,它可用 轮盘法算出,即蜜源 X_i的收益率 p(X_i)为^[11,13]:

$$p(X_i) = \frac{1}{\sum_{q=1}^{M} \left[\frac{N_d(X_q)}{M}\right]} \left[\frac{N_d(X_i)}{M}\right]$$
(9)

式中: N_i(X_i)为蜜源 X_i可支配的蜜源的数量。

4.1.6 观察蜂邻域搜索

观察蜂根据收益率选择一个蜜源进行邻域搜 索,收益率越大的蜜源被观察蜂选中的概率越高。 对于蜜源 X_i,生成一个[0,1]区间的随机数 r₄。若 r₄ < p(X_i),则观察蜂在 X_i附近进行搜索,搜索过程 与 4.1.4 节中采蜜蜂邻域搜索方式相同。否则针对下 一个蜜源,重复上述步骤,直至观察蜂对所有蜜源 都进行了选择。

4.1.7 侦查蜂全局搜索

若蜜源的搜索次数变量 T 值大于蜜源开采极限 次数 T_{max},则说明该蜜源已被开采完,与之相对应的 采蜜蜂或者观察蜂应放弃该蜜源,转化为侦查蜂,在 搜索空间内随机搜索生成新蜜源,生成方法与 4.1.1 节中蜜源生成方法相同,并用新蜜源代替原蜜源,代 入式(4)计算目标函数值。

4.1.8 外部档案集更新

将当前蜜源集合划分为可行解集和非可行解集 合,根据 Pareto 支配关系,建立非劣可行解集 Npop1 和非劣非可行解集 Npop2。然后将 Npop1 和 Rpop1 合并,将 Npop2 和 Rpop2 合并。再次根据 Pareto 支 配关系找出非劣解,并用拥挤距离和约束违反程度函 数值进行裁剪,获得更新的 pop1 和 pop2。

4.1.9 终止条件判断

迭代次数 C 加 1, 若 C < C_{max},转到 4.1.4 节。否则算法结束,输出当前的 Pareto 最优解集 *pop*1。

4.2 优化结果及验证

将式(1—3)代入式(4)可得出啤酒灌装阀阀口 流道结构优化目标函数的具体表达式。约束条件为:8 mm $\leq L_1 \leq 9.5$ mm; $0 \leq L_2 \leq 9$ mm; 1 mm $\leq L_3 \leq 2.2$ mm; 1.5 mm $\leq R \leq 3$ mm; Δp_{max} , v_{max} , $E \geq 0$ 。优化算法参数设置如 下: M = 100, $T_{max} = 50$, $C_{max} = 150$, m = 3, D = 4, $p_m = 0.2$, N = 100。编写 Matlab 程序进行优化求解, 优化后的 Pareto 最优解集见表 5。

从表 5 可以看出,采用人工蜂群算法得出了 14 组 Pareto 最优解,最优解的多样性较好,能为提高灌 装阀灌装性能提供较多的权衡选择方案。优化结果还 表明, Δp_{max} =312.5025~317.1384 Pa, v_{max} =0.6208~ 0.6283 m/s, *E*=0.0235~0.0266 m/s。与优化前相比, Δp_{max} , v_{max} 和 *E* 三者之间进行了折中,均取得了较小 的值。它们的最大减小量分别为 3.76%, 3.15%, 20.43%,说明优化方法有效。

			•	•			
序号	L_1/mm	L_2/mm	L_3/mm	<i>R</i> /mm	$\Delta p_{ m max}/ m Pa$	$v_{\rm max}/({\rm m}\cdot{\rm s}^{-1})$	$E/(\mathrm{mm}^2\cdot\mathrm{s}^{-2})$
1	8.8285	3.4040	1.4404	1.9707	313.2052	0.6208	0.0246
2	8.0921	8.1439	1.4814	2.7018	312.5348	0.6261	0.0258
3	8.8286	8.9016	1.7010	2.7853	312.5025	0.6283	0.0266
4	8.1422	5.4120	1.3049	1.5050	315.7578	0.6234	0.0237
5	8.3055	7.5550	1.0728	1.6319	317.1384	0.6251	0.0235
6	8.6063	5.2426	1.2556	1.5964	315.4615	0.6238	0.0238
7	8.3712	4.5699	1.1293	2.3618	313.4137	0.6218	0.0245
8	9.0502	3.6029	1.4670	1.8393	313.6853	0.6217	0.0245
9	8.3977	5.1473	1.1035	2.2167	313.9192	0.6228	0.0242
10	8.8436	6.1909	1.1025	2.9512	312.8725	0.6251	0.0251
11	9.0021	3.2645	1.4857	2.0677	313.5089	0.6208	0.0249
12	8.4484	4.9797	1.2502	1.8417	314.7733	0.6231	0.0241
13	8.1231	8.8225	1.1035	1.9267	315.0450	0.6250	0.0239
14	8.3260	4.3730	1.1251	2.6450	313.1462	0.6213	0.0248

表 5 优化后的 Pareto 最优解集 Tab.5 Optimized Pareto optimal solution set

5 结语

用正交试验法和 Fluent 流场仿真软件分析了等 压灌装阀阀口流道结构参数对液料流场的影响,结果 表明流道内最大压力损失最小化、最大液料流速最小 化和最大湍流动能最小化存在冲突,无法同时达到最 优。通过回归分析法建立了最大压力损失、最大液料 速度和最大湍动能的经验方程,以及阀口流道结构参 数的约束多目标优化模型。基于约束多目标人工蜂群 优化算法获得了阀口流道结构参数的最优 Pareto 解 集,结果表明该优化方法有效,能为等压灌装阀阀口 流道的结构参数优化提供依据。

参考文献:

- 蒋兆军. 液体灌装阀的 Fluent 流体动力学分析及优 化设计[J]. 机床与液压, 2015, 43(17): 165—168.
 JIANG Zhao-jun. Fluid Dynamical Analysis and Optimization Design of Liquid Filling Valve Based on Fluent[J]. Machine Tool & Hydraulics, 2015, 43(17): 165—168.
- [2] 吴锦虹,林楚平. 全自动自立袋充填旋盖机送袋机构 及灌装阀的改进[J]. 食品与机械, 2015, 31(6): 117— 119.

WU Jin-hong, LIN Chu-ping. Improvement for Bag Feeding Machine and Filling Valve of Automatic Stand-up Pouch Filling and Capping Machine[J]. Food & Machinery, 2015, 31(6): 117—119.

[3] DU Heng, WU Qiang-bo, CHEN Hui, et al. The Design and Analysis of Novel High-flow Filling Valve Based on Mulit-stage Hydraulic Resistance and Compound Flow Channels[J]. International Journal of Control and Automation, 2014, 7(9): 433–450.

- [4] 李红果, 叶岷, 曹瑞, 等. 中心小流量上开阀式灌装阀[J]. 包装工程, 2017, 38(7): 155—158.
 LI Hong-guo, YE Min, CAO Rui, et al. Central-small-flow Filling Valve Opened with Valve Stem Moving up[J]. Packaging Engineering, 2017, 38(7): 155—158.
- [5] 孙智慧,姚炳兴. 等压灌装阀阀座流道流场分析及 结构优化研究[C]// 2007 年全国包装与食品工程学术 年会, 2007.
 SUN Zhi-hui, YAO Bing-xing. Pressure Filling Valve Seat of Flow Field Analysis and Optimization[C]// 2007 Annual Conference of the National Packaging and Food Engineering, 2007.
- [6] 殷水忠,黄晓华,杨弟洲,等.果粒饮料盒中袋灌装
 阀阀道结构分析与优化[J].包装工程,2016,37(13):
 121—127.
 YIN Shui-zhong, HUANG Xiao-hua, YANG Di-zhou,

et al. The Structure Analysis and Optimization of Bag-in-box Filling Valve Pipe of Fruit Drink[J]. Pack-aging Engineering, 2016, 37(13): 121—127.

- [7] 黄川,李东波,刘延友,等. 基于 FLUENT 的易拉罐 灌装阀阀道流场分析与结构优化[J]. 机械设计与制 造工程, 2014(8): 27—31.
 HUANG Chuan, LI Dong-bo, LIU Yan-you, et al. The Flow Distribution Analysis and Structure Optimization of Cans Filling Road Based on Fluent[J]. Machine Design and Manufacturing Engineering, 2014(8): 27—31.
- [8] 黄川. 面向灌装精度的灌装阀数值模拟与优化[D].

南京: 南京理工大学, 2015.

HUANG Chuan. Numerical Simulation and Optimization of Filling Valve for Filling Accuracy[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2015.

- [9] 朱红钧. FLUENT 15.0 流场分析实战指南[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2015.
 ZHU Hong-jun. Practical Guide for Flow Field Analysis for FLUENT 15.0[M]. Beijing: Posts and Telecommunications Press, 2015.
- [10] 马逢时,周暐,刘传冰. 六西格玛管理统计指南—— MINITAB 使用指导[M]. 北京:中国人民大学出版 社, 2013.
 MA Feng-shi, ZHOU Wei, LIU Chuan-bing. Six Sigma Management Statistics Guide-Use Guidance for

MINITAB[M]. Beijing: China Renmin University Press, 2013.

- [11] KISHOR A, SINGH P K, PRAKASH J. NSABC: Non-dominated Sorting Based Multi-objective Artificial Bee Colony Algorithm and Its Application in Data Clustering[J]. Neurocomputing, 2016, 216: 514–533.
- [12] ADARYANI M R, KARAMI A. Artificial Bee Colony

Algorithm for Solving Multi-objective Optimal Power Flow Problem[J]. Electrical Power and Energy Systems, 2013, 53: 219–230.

- [13] 江铭炎, 袁东风. 人工蜂群算法及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 2014.
 JIANG Ming-yan, YUAN Dong-feng. Artificial Bee Colony Algorithm and Its Application[M]. Beijing: Science Press, 2014.
- [14] 毕晓君,王艳娇.约束多目标人工蜂群算法[J]. 吉林大学学报,2013,43(2):397—403.
 BI Xiao-jun, WANG Yan-jiao. Constraint Mult-objective Evolutionary Algorithm Based on Artificial Bee Colony Algorithm[J]. Journal of Jilin University, 2013, 43(2):397—403.
- [15] 张勇, 巩敦卫, 任永强, 等. 用于约束优化的简洁多 目标微粒群优化算法[J]. 电子学报, 2011(6): 1436— 1440.

ZHANG Yong, GONG Dun-wei, REN Yong-qiang, et al. Barebones Multi-objective Particle Swarm Optimizer for Constrained Optimization Problems[J]. Acta Electronica Sinica, 2011(6): 1436—1440.