

doi:10.11835/j.issn.1000-582X.2016.03.002

# 用遗传算法进行 RFD 装置优化设计

李江云,汪 慧,盛 旺,陈稳稳

(武汉大学 土木建筑工程学院,武汉 430072)

**摘 要:**免维修流体输送装置 RFD 由压缩空气做动力,通过气液换能驱动被输送液体间歇性出料。该装置不含运动部件,其优化设计是关系到装置高效稳定运行的关键理论。文中分析了传统枚举法和边际效用法在方案搜索中存在的问题,重点讨论了遗传算法在多目标高维优化问题中的应用,通过计算实例比较了 3 种方法的计算结果,得出遗传算法在本问题求解中的优势。最后,针对流量和扬程需求,采用遗传算法进行了装置的系列化设计,并分析了有关结构参数和运行参数的变化规律,进一步给出了不同密度和粘度下,RFD 装置输送流量的换算关系,为 RFD 装置的工业设计打下坚实的基础。

**关键词:**RFD 装置;遗传算法;枚举法;边际效用

**中图分类号:**TV136

**文献标志码:**A

**文章编号:**1000-582X(2016)03-013-08

## Optimization design of RFD set based on genetic algorithm

LI Jiangyun, WANG Hui, SHENG Wang, CHEN Wenwen

(Department of Civil Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, P.R.China)

**Abstract:** RFD(reverse flow divert) set is a kind of maintenance-free delivery system driving by compress-air. It intermittently discharges through its delivery pipe. RFD set has no moving part, and its optimized design is critical to efficient and stable operation. The deficiencies in optimization of traditional enumeration algorithm and the marginal utility method were indicated. Then, as a mainly point of the paper, using the genetic algorithm (GA) to solve the multi-objective multidimensional optimization problem was discussed. By comparing the results of the three optimization methods, the superiority of GA can be drawn. Based on the industrial needs for flow and head, a serialization design of RFD was done by using GA and the relationships of the structural parameters and the operational parameters were analyzed. And the conversion relationships of RFD average flow in different densities and viscosities were provided. The promoted approach will be benefit for the RFD set design in industry.

**Keywords:** RFD set; genetic algorithm; enumeration algorithm; marginal utility method

RFD 是一种可用于输送含放射性、高温、剧毒、剧腐蚀等危险流体的免维修流体输送设备,其装置由脉冲气体发生单元、气液换能单元和流体输送单元组成。该装置以压缩空气为动力,由交替工作的喷射器产生脉冲气体并通过气液活塞运动产生脉冲液体,最终通过流体输送单元的 RFD 元件实现流动换向输出液体。周期性输送过程一般分为 2 个阶段,即反吸阶段将液料经由 RFD 先进入换能筒蓄能,压冲阶段再将换能筒中液料通过 RFD 直接送入出料管出料。由于完全依靠流体动力做功,不需要运动部件,设备低磨损,因此可以满足设计年限内免维修的要求,在核工业乏燃料后处理废液等危险流体的输送中具有广阔的应用前

**收稿日期:**2015-10-08

**基金项目:**国家自然科学基金资助项目(51179133/E0906)。

Supported by National Natural Science Foundation of China(51179133/E0906).

**作者简介:**李江云(1967-),女,教授,博士,主要从事流体输送及运行研究,(E-mail)lijy@whu.edu.cn。

景<sup>[1-3]</sup>。然而正是由于流体传能做功的特点,系统中各部件过流断面及其结构尺寸的设计至关重要,整个系统可按流体类别分为喷射器组及换能输送单元的换能筒、RFD、出料管以及液料箱输送管,前者是脉冲气体,通过脉冲压力控制后面液体段的脉冲运动,2部分相对独立。因此,为降低优化设计的维数和状态方程的复杂性,可考虑单独对液体段进行优化设计。由于优化目标包括效率和规模两方面因素,在限定设备尺寸的前提下,如何正确配套结构参数和运行参数,是获得最佳输送性能及稳定运行的关键。前期研究中,采用了枚举法和“边际效用”方法<sup>[4-5]</sup>,前者在解决维数较高的优化问题中,计算时间较长;后者改进了参数优选机制,优先选择对优化目标影响较大的参数,使方案收缩范围大大缩小,计算速度提高,但由于仅考虑单因素变化的关系,对于协同效应产生的最优方案很难获得,且在确定各参数的成本优化步长时,过于依赖设计者的意图或经验,很难科学量化<sup>[6]</sup>;综上所述,仍需要对寻优方法进行改进,文中将讨论采用遗传算法解决上述问题<sup>[7-9]</sup>。

## 1 RFD 装置优化设计模型

RFD 装置作为一种流体输送设备,由脉冲气体发生单元、气液换能单元和流体输送单元组成(见图 1)。其设计的优化目标是以最小的系统规模达到最佳的输送性能。考虑单独对液体段进行优化设计的计算图如图 2 所示。对于多目标问题,应根据用户需要进行权衡。首先,输送性能应满足用户流量和扬程指标,尽量保持较高效率;其次,系统规模主要体现在装置造价以及布置安装的限制方面,相比于输送性能,其重要性较弱,规模可以根据用户需要进行设置。综上所述,在 RFD 系统的优化设计过程中,将着重考虑系统输送性能的优化,同时兼顾系统规模的控制。具体做法是,以满足用户指定平均流量、扬程及参数约束条件的方案为有效方案,其输送性能和规模分别用效率  $N$  和运行周期  $T$  反映,提出复合优化判据

$$K = N / T^n, \quad (1)$$

式中: $N$  为系统效率; $T$  为系统周期,作为系统规模大小的衡量标准; $n$  为装置规模指数,其值取  $0 \sim 1$ ,越大表明装置越小。复合判据  $K$  越大,表明设计结果不仅能满足应用指标要求(流量、扬程、规模)且效率较高。由此,通过复合优化判据将多目标问题简化为单目标问题。现将 RFD 装置运行数学模型简述如下<sup>[1-2]</sup>。

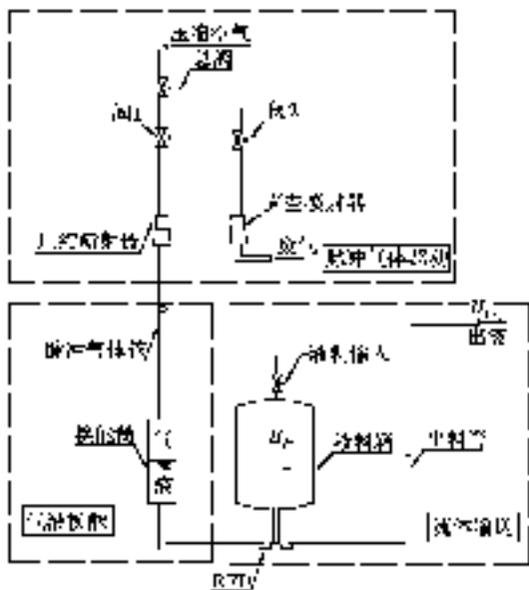


图 1 RFD 装置组成示意图

Fig. 1 Schematic of RFD set

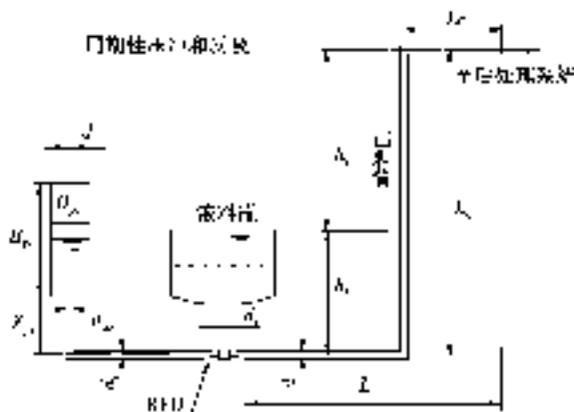


图 2 RFD 装置计算简图

Fig. 2 Schematic for calculation of RFD set

### 1.1 流量计算

首先将 RFD 系统简化为孔口出流模型,然后计算 RFD 系统运行 1 个周期所输送的流体体积,除以周期而得出平均流量

$$Q_{ra} = \frac{V_o - V_r}{\Delta t_p + \Delta t_{rf}}, \quad (2)$$

式中: $V_o$ 为压冲阶段出料管出流体积; $V_r$ 为倒流体积; $\Delta t_p$ 、 $\Delta t_{rf}$ 分别为压冲、反吸阶段时间,其和为周期 $T$ ,其中,压冲时间为

$$\Delta t_p = \sqrt{2/g} \frac{A_{pc}}{C_d A_t} \left[ \frac{h_{pc}}{2 \sqrt{\frac{P_i - P_t}{\rho g} + \frac{h_{pc}}{2}}} \right], \quad (3)$$

式中: $A_{pc}$ 、 $A_t$ 分别为换能筒横截面积和RFD喷嘴面积; $C_d$ 压冲流量系数,由试验装置确定; $P_t$ 为RFD浸没压力。反吸时间为

$$\Delta t_{rf} = \sqrt{2/g} \frac{A_{pc}}{C_{drf} A_t} \left[ \sqrt{h_f - \sqrt{h_f - h_{pc}}} \right], \quad (4)$$

式中 $C_{drf}$ 为反吸流量系数。

压冲阶段出料体积为

$$V_o = Q_o \Delta t_p, \quad (5)$$

式中 $Q_o$ 为压冲阶段出料管出流流量:

$$Q_o = \frac{A_t}{\sqrt{1 - C_p}} \sqrt{2(P_i - P_o)/\rho}, \quad (6)$$

式中: $P_o$ 为RFD下喷嘴后端压力; $C_p$ 为扩散管阻力系数。

$$P_o = \rho g h_o + \left[ f \left( \frac{h_o + L_o}{d_o} \right) + K \right] \frac{Q_o^2 \rho}{2A_o^2}, \quad (7)$$

式中: $h_o$ 为出料管垂直高度; $L_o$ 为出料管水平长度; $f$ 为沿程阻力系数; $K$ 为局部阻力系数; $A_o$ 为出料管过流面积。

压冲阶段结束后,出料管回流体积

$$V_r = A_o (h_o + L_o). \quad (8)$$

结合式(2)~式(8),即可得到系统的平均流量 $Q_{ra}$ 。

## 1.2 效率计算

效率实际上是指能量的利用率,即周期内的平均效率等于有用功与输入总功之比,可推导出RFD装置做功平均效率为

$$N = \frac{\rho g h_o (Q_o \Delta t_p - V_r)}{[P_i \cdot V_{pc} + \rho g V_{pc} (H_{pch} + 0.5 h_{pc})]}, \quad (9)$$

式中: $V_{pc}$ 为换能筒体积; $H_{pch}$ 为换能筒底部距RFD喷嘴的高度;其余同上。

针对上述水力模型及优化目标,以 $W$ 和 $M$ 分别表示系统性能和规模。根据数值仿真和试验,如图2所示,需要优化的参数有:换能筒直径 $D_{pc}$ 、换能筒高度 $h_{pc}$ 、RFD浸没深 $h_f$ 、压冲压力 $P_i$ 、反吸压力 $P_r$ 、喷嘴直径 $d_t$ 、出料管直径 $d_o$ ,将RFD的输送性能和系统规模可以表述为上述自变量的函数,即状态方程:

$$\begin{aligned} W &= f(D_{pc}, h_{pc}, h_f, P_i, P_r, d_t, d_o), \\ M &= f(D_{pc}, h_{pc}, h_f, P_i, P_r, d_t, d_o). \end{aligned} \quad (10)$$

以上各个参数根据实际工程应用要求都有着各自的定义域,同时考虑到参数配套尺寸约束,优化目标是在满足流量的前提下使得效率最高且规模最小,数学模型如下:

$$\begin{aligned} \max W &= \max f(D_{pc}, h_{pc}, h_f, P_i, P_r, d_t, d_o) \\ \min M &= \min f(D_{pc}, h_{pc}, h_f, P_i, P_r, d_t, d_o) \\ \text{s.t.} &\begin{cases} 0 < D_{pc} \leq 2\,000 \text{ mm} \\ 0 < h_{pc} \leq 5 \text{ m} \\ 0.2 < h_f \leq 5 \text{ m} \\ 1 < P_i \leq 10 \text{ atm} \\ -1 \leq P_r < 0 \text{ atm} \\ 0 < d_t \leq 100 \text{ mm} \\ d_o \geq d_t \end{cases}, \end{aligned} \quad (11)$$

## 2 遗传算法的应用讨论

鉴于传统枚举法和边际效用方法在寻优方面遇到的问题,笔者拟采用遗传算法求解上述高维优化问题<sup>[10-12]</sup>。目前遗传算法应用中的问题包括:1)适应度值标定方式多种多样,且无简洁、通用的方法;2)由于变异概率过低而产生的早熟现象;3)接近最优解时收敛性不好。为改进实际计算性能通常需要解决以下问题:确定编码方案,标定适应度函数,选择遗传操作方式及相关控制参数,确定停止准则等。文中定义适应度函数如下:①若流量小于 1.1 倍用户要求流量,则适应度值为 10;②若流量大于 1.2 倍用户要求的流量,则适应度值为 5;③若流量介于 1.1~1.2 倍用户要求流量,则适应度值为 4;④若满足条件 3,且倒流比大于 8,则适应度值为 3;⑤若满足条件 4,且换能筒高径比介于 2.0~3.0 之间,则适应度值为 2;⑥若满足条件 5,且分流比介于 0.9~1.1 之间,则适应度值为 1;⑦若满足条件 6 且周期小于 1 000 s,即为有效方案,继续优化判断则利用复合优化判据  $K$  定义适应度值( $-K$ ),该值越小越好。

在运行遗传算法程序时,需要对包括交叉概率、变异概率、种群的大小、染色体长度、代沟、最大进化代数等参数进行设置,它们对遗传算法的性能都有很重要的影响,甚至会影响到整个算法的收敛性。交叉概率一般建议取值范围是 0.4~0.99,文中选择 0.7;变异概率的选取一般受种群大小、染色体长度等因素的影响,通常选取很小的值以避免引起种群的不稳定,但过小易产生未成熟收敛,文中采用高斯变异;种群大小直接影响到遗传算法的收敛性或计算效率,根据实际情况一般在 10~200 之间选定,通过试验,文中选择种群大小为 200,可满足全局收敛到极值点;最大进化代数作为一种算法终止条件,取 2 000 代。

## 3 优化设计算例分析

### 3.1 遗传算法主要参数的确定

计算前,在适应度函数中给定扩散管压力回升参数,喷嘴反吸流量系数,出料管总阻力系数及喷嘴流量系数,输入要设计的 RFD 流量和扬程要求,定义适应度函数,变量个数为 7,种群大小取 200,根据各变量的取值范围定义初始种群的向量范围,交叉概率取 0.7。变异操作选择高斯变异,为了使计算更快收敛到全局最优,参数尺度(scale)取 0.5,压缩系数(shrink)取 1。计算步数取 2 000。

### 3.2 实例及计算结果比较分析

运用遗传算法程序进行优化设计,计算 1 个工况大概耗时为 100 s 左右。以设计参数  $Q=5 \text{ m}^3/\text{h}$ ,  $H=15 \text{ m}$  为例说明遗传算法与枚举法计算结果的差别。如表 1 所示,3 种方法喷嘴直径相差不大(5%);相同条件下,遗传算法一般可得到较小的装置规模和较高的水力效率;边际效用法更适用于中、小规模样机的设计,而此时遗传算法结果与边际效用法接近,且有更高效率;遗传算法所需的压冲压力普遍小于其他算法。因此得到如下结论。

表 1 遗传算法与枚举法计算结果的对比

Table 1 Comparison of the calculation results of genetic algorithm and enumeration method

方法	规模	$d_i/\text{mm}$	$d_o/\text{mm}$	$h_{pc}/\text{m}$	$D_{pc}/\text{mm}$	$P_r/\text{MPa}$	$P_i/\text{MPa}$	$Q_{ra}/(\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1})$	$N/\%$	$N/T^n$
遗传		22	88	2.5	965	5	2.1	5.56	58.2	58.2
边际	$n=0$	23	98	2.9	900	5	2.0	5.74	57.7	57.7
枚举		22	79	2.8	900	5	3.0	5.92	56.5	56.5
遗传		23	71	1.7	659	5	2.2	5.53	52.2	16.5
边际	$n=0.2$	24	98	2.2	800	5	2.0	5.99	53.9	20.3
枚举		22	79	2.1	750	5	3.0	5.73	53	15.3
遗传		23.7	67	1.6	635	5	2.2	5.56	49.5	5.5
边际	$n=0.4$	21	49	1.4	500	5	3.0	5.57	37.5	8.4
枚举		23	79	2.1	750	4.5	3.0	5.86	52.4	4.4

续表

遗传	22.6	65	1.6	608	5.0	2.3	5.61	49.1	1.8
边际 $n=0.6$	21.0	49	1.4	500	5.0	3	5.64	36.9	3.9
枚举	23.0	79	2.4	700	4.5	3	6.00	51.6	1.3
遗传	22.9	65	1.6	611	5	2.3	5.57	46.7	0.2
边际 $n=1$	23.0	49	1.9	460	3	2.9	5.55	39.3	0.16
枚举	21.0	49	1.4	500	5	3	5.57	37.5	0.11

1)传统枚举法计算结果稳定可靠,对设计参数在取值范围内的所有组合进行了全面计算,但计算精度依赖于步长精度,极大影响计算时长。

2)边际效用方法以影响度最高参数优先“递增”的方式寻优,计算精度依赖于步长,在所需设计规模较小情况,计算结果与枚举法接近,反之偏差较大。由于采用单因素改变方式寻优,无法考虑因素间的协同效应,因此一般难以获得最好的参数组合。

3)遗传算法采用随机方式寻优,设计参数满足约束条件,连续搜索最优解,不存在受步长限制问题,可考虑各因素间的协同优化效果,经过改进计算结果已基本稳定。

### 3.3 根据输送要求设计 RFD 装置及其运行参数

取规模权重  $n=0.5$ ,根据需要流量和扬程进行设计,计算结果如表 2、表 3 所示。由计算结果可知,扬程一定的条件下,随着流量的增大,RFD 的压冲压力  $P_i$  和反吸压力  $P_r$  基本不变,但 RFD 喷嘴直径  $D_i$ 、出料管直径  $D_o$ 、换能筒高  $H_{pc}$  和直径  $D_{pc}$  等关键断面尺寸都有增大的趋势,符合流量变化规律;其次,流量一定时,随着扬程的增大,RFD 所有参数值都有增大的趋势。扬程增大,做功增加,所以压冲压力  $P_i$  必然增大;为了保证系统具有较高的效率,换能筒体积也必然增大。

表 2 扬程一定,不同流量下 RFD 装置设计结果比较

Table 2 Design parameters of RFD sets under different flow rates (fixed head)

扬程/m	流量/( $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ )	$h_t/\text{m}$	$d_o/\text{mm}$	$h_{pc}/\text{m}$	$P_i/\text{MPa}$	$P_r/\text{MPa}$	$D_{pc}/\text{mm}$	$d_t/\text{mm}$
10	3	0.7	48	1.2	2	-0.5	450	16
	5	1.4	59	1.4	2	-0.5	516	20
	10	1.46	80	1.7	2	-0.5	634	29
	15	1.2	97	1.9	2	-0.5	727	36
	20	1.7	106	2	2	-0.5	773	40
15	3	0.2	53	1.4	2.3	-0.5	540	18
	5	0.2	67	1.6	2.3	-0.5	630	23
	10	0.2	89	2.0	2.3	-0.5	750	33
	15	0.4	107	2.2	2.3	-0.5	850	40
	20	1.8	115	2.4	2.6	-0.5	900	40
20	3	0.2	57	1.6	3	-0.5	620	18
	5	0.2	73	1.9	3	-0.5	730	23
	10	0.4	95	2.3	3	-0.5	850	33
	15	0.8	114	2.5	3	-0.5	980	40

表 3 流量一定,不同扬程下 RFD 装置设计结果比较

Table 3 Design parameters of RFD sets under different heads (fixed flow rate)

流量/(m <sup>3</sup> · s <sup>-1</sup> )	扬程/m	$h_f/m$	$d_o/mm$	$h_{pc}/m$	$P_i/MPa$	$P_r/MPa$	$D_{pc}/mm$	$d_i/mm$
3	10	0.7	48	1.2	2	-0.5	450	16
	12	0.2	51	1.3	2	-0.5	490	17
	15	0.2	53	1.4	2.3	-0.5	540	18
	20	0.2	57	1.6	3	-0.5	620	18
5	10	1.4	59	1.4	2	-0.5	516	20
	12	0.2	64	1.5	2	-0.5	580	22
	15	0.2	67	1.6	2.3	-0.5	630	23
	20	0.2	73	1.9	3	-0.5	730	23
10	10	1.46	80	1.7	2	-0.5	634	29
	12	0.2	85	1.8	2	-0.5	700	31.5
	15	0.2	89	2.0	2.3	-0.5	750	33
	20	0.4	95	2.3	3	-0.5	850	33

3.4 不同物性参数下 RFD 装置运行性能的换算

实际工程应用中,输送介质的密度、温度、粘度对装置的输送性能会产生影响,需要研究运行性能的换算规律。在流量为 3 m<sup>3</sup>/h,扬程为 15 m,装置规模指数  $n=0.5$  的工况下,改变介质密度和粘度值进行 RFD 装置设计发现,结构参数的变化并不明显,但的确影响了装置运行特性。以某 RFD 装置设计结果为例,根据典型工业流体的物性参数,改变密度变化范围 900~1 600 (kg/m<sup>3</sup>),得到装置流量和效率随密度变化曲线,如图 3、图 4 所示。由图可知,密度变大时,虽然扬程不变,但输入能量一定的条件下,平均流量必然递减,而水力效率则呈现先增大后减小的趋势,与管道的输送能力有关,存在一个系统运行高效区。进一步取粘度变化范围:0.1~5( $\times 10^{-6}$  m<sup>2</sup>/s),分别计算出相应的流量和效率,得到装置流量随粘度变化曲线(如图 5、图 6 所示)。由于输送阻力随粘度的增大而增大,能量以摩擦的形式耗散,所以无论是平均流量还是效率都呈现递减的趋势。

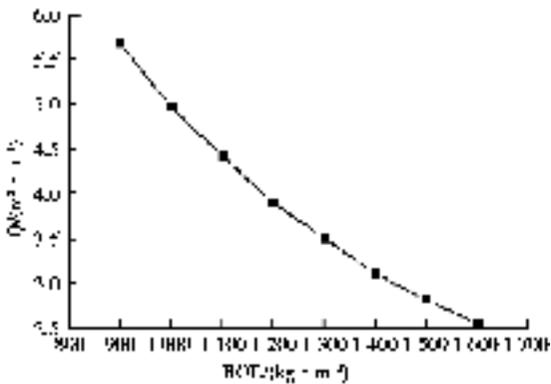


图 3 流量随密度变化图

Fig.3 Variation of flow with density

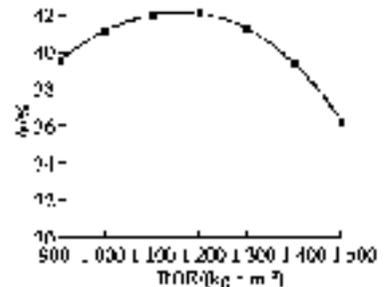


图 4 效率随密度变化图

Fig.4 Variation of efficiency with density

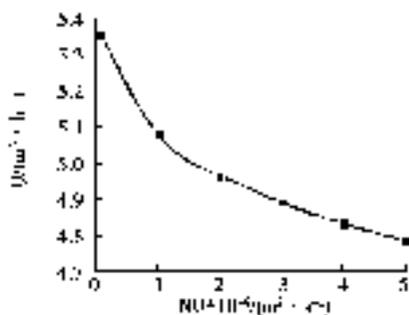


图 5 流量随粘度变化图

Fig.5 Variation of flow with viscosity

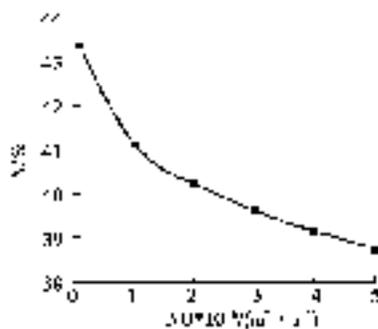


图 6 效率随粘度变化图

Fig.6 Variation of efficiency with viscosity

## 4 结 论

1) 基于遗传算法对 RFD 装置多目标高维优化模型的求解展开研究, 采用了随机方式搜索全局空间, 能获得比枚举法和边际效用法更优的计算结果, 且计算效率大大提高。

2) 针对遗传算法在多目标情况下无法得到合理优化结果问题, 通过引入复合优化判据摸索出改善遗传算法稳定性和收敛性的控制参数。

3) 利用遗传算法对 RFD 结构参数和运行参数进行系列化设计, 总结了流量、扬程对 RFD 装置关键尺寸及运行参数的影响规律。

4) 针对不同的介质密度和粘度对 RFD 装置结构参数和运行参数的影响进行了分析, 给出了不同密度和粘度下, RFD 装置输送流量的换算关系。

## 参考文献:

- [1] Morgan J G, Holland W D. Pulsatile fluidic pump demonstration and predictive model application[R]. OAK Ridge National Laboratory, Martin Marietta Energy Systems, INC. for the United States department of energy, April 1986.
- [2] Smith G V, Lewis B E. Design of a pulsed-mode fluidic pump using a venturi-like reverse flow diverter[R]. OAK Ridge National Laboratory, Martin Marietta Energy Systems, INC. for the United States department of energy, February 1987.
- [3] Priestman G H, Tippetts J R. Low pressure high lift fluidic pump[J]. Source: Flucom, 1991, 91:169-174.
- [4] 李江云, 陈友霖, 周其源, 等. RFD 装置优化设计理论及方法研究[C]//中国工程热物理学会流体机械 2009 年学术会议, 2009:1675-1679.  
LI Jiangyun, CHEN Youlin, ZHOU Qiyuan, et al. Research of optimization design theory and method of RFD set[C]//CSET Fluid Machinery Conference in 2009, 2009: 1675-1679. (in Chinese)
- [5] 李江云, 陈友霖, 李阳雨. 边际效用优化设计理论应用研究[C]//中国工程热物理学会流体机械学 2010 年学术会议, 2010.  
LI Jiangyun, CHEN Youlin, LI Yangyu. Application research on marginal utility optimization design theory[C]//CSET Fluid Machinery Conference in 2010, 2010. (in Chinese)
- [6] 樊燕芳, 徐聪, 景山. 可逆流体换向装置性能的数学模型及参数计算[J]. 原子能科学技术, 2009, 43(8): 705-710.  
FAN Yanfang, XU Cong, JING Shan. Mathematics model and parameter calculation for reverse flow diverter[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2009, 43(8): 705-710. (in Chinese)
- [7] 刘艳云. 基于正交遗传算法的概率仿真优化方法[J]. 微电子学与计算机, 2009, 126(10): 203-207.  
LIU Yanyun. Probability simulation optimization method based on orthogonal genetic algorithm[J]. Microelectronics & Computer, 2009, 126(10): 203-207. (in Chinese)
- [8] Long Q. A constraint handling technique for constrained multi-objective genetic algorithm [J]. Swarm and Evolutionary

- Computation, 2014, 15: 66-79.
- [9] Xu Y M, Li K L, Hu J T, et al. A genetic algorithm for task scheduling on heterogeneous computing systems using multiple priority queues[J]. Information Science, 2014, 270: 266-287.
- [10] Thakur M, Meghwani S S, Jalota H. A modified real coded genetic algorithm for constrained optimization[J]. Applied Mathematics and Computation, 2014, 235(25): 292-317.
- [11] Changdar C, Mahapatra G S, Pal R K. An efficient genetic algorithm for multi-objective solid travelling salesman problem under fuzziness[J]. Swarm and Evolutionary Computation, 2014, 15: 27-37.
- [12] Ghiduk A S. Automatic generation of basis test paths using variable length genetic algorithm[J]. Information Processing Letters, 2014, 114(6): 304-316.
- [13] 孙晓燕, 巩敦卫, 徐瑞东. 高级交互式遗传算法理论与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2012.  
SUN Xiaoyan, GONG Dunwei, XU Ruidong. Interactive genetic algorithm: an advanced introduction[M]. Beijing: Science Press, 2012. (in Chinese)
- [14] 玄光男, 程润伟. 遗传算法与工程优化[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004.  
XUAN Guangnan, CHEN Runwei. Genetic algorithm and engineering optimization[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2004. (in Chinese)
- [15] 雷英杰, 张善文, 李续武, 等. MATLAB 遗传算法工具箱及应用[M]. 于歆杰, 周根贵译, 西安: 西安电子科技大学出版社, 2005.  
LEI Yingjie, ZHANG Shanwen, LI Xuwu, et al. Genetic algorithm toolbox in MATLAB: an introduction to theory and application[M]. Xian :Xian University of Electronic Science and Technology Press, 2005. (in Chinese)

(编辑 陈移峰)