

DOI:10.3969/j.issn.1003-5060.2021.01.002

# 变壁厚涡旋膨胀机型线参数的优化分析

彭斌, 蒋龙

(兰州理工大学机电工程学院, 甘肃兰州 730050)

**摘要:**为深入研究变壁厚涡旋膨胀机的型线参数,文章以高次曲线组合型线和圆弧组合型线为例,建立了一种新的优化模型-涡旋型线占积比;讨论分析了型线参数对型线面积和占积比的影响;运用单目标遗传算法对占积比取得极值时的2种组合型线参数取值进行了优化,并运用多目标遗传算法讨论了型线面积和占积比同时优化时的非劣解集及对应参数的选取。该文的研究为变壁厚涡旋膨胀机型线参数的选取提供了一定的参考。

**关键词:**组合型线;膨胀机;遗传算法;优化

**中图分类号:**TH45

**文献标识码:**A

**文章编号:**1003-5060(2021)01-0007-07

## Optimization analysis of profile parameters of variable wall thickness scroll expander

PENG Bin, JIANG Long

(School of Mechanical and Electrical Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China)

**Abstract:**In order to further study the profile parameters of variable wall thickness scroll expander, a new optimization model of the scroll profile area ratio is established by taking the combined profile of high-order curve and circular arc as examples. The influence of profile parameters on the profile area and area ratio is analyzed. The single objective genetic algorithm is used to optimize the parameters of two combined profiles when the area ratio reaches the extreme value. The multi-objective genetic algorithm(MGA) is used to discuss the non-inferior solution set and the selection of the corresponding parameters when the area and the proportion of the profile are optimized simultaneously. It provides a reference for the selection of the profile parameters of the scroll expander with variable wall thickness.

**Key words:**combined profile; scroll expander; genetic algorithm; optimization

### 0 引言

涡旋机械以其良好的结构特性和力学特性被广泛地应用于制冷、增压机、涡旋泵等领域。对涡旋机械的研究可以追溯到19世纪末,并且一直在不断地发展进步。现阶段,根据所用领域的尺寸要求和性能要求的不同,涡旋机械依旧在不断地改进当中。

作为涡旋机械的核心,涡旋型线的设计优化是涡旋机械设计研究的重点,因此国内外众多学

者对其进行了广泛深入的研究。

在圆渐开线涡旋型线的几何参数研究方面:文献[1]提出等效缸径的概念,把型线高度、齿宽、壁厚化为3个独立准则数;文献[2]提出了一种摩擦功耗和泄漏损耗较小的几何参数设计方法;文献[3]对比分析了涡旋型线几何参数和结构参数之间的关系,并计算了动涡旋盘所受的气体力;文献[4]提出了一种用于容积分析描述的新型涡旋压缩机几何模型;文献[5]分析了涡旋压缩机的几何和动态特性,研究了几何连续性对涡旋压缩机

收稿日期:2019-12-26;修回日期:2020-02-27

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51675254)

作者简介:彭斌(1976—),男,新疆伊宁人,博士,兰州理工大学教授,博士生导师。

性能的影响;文献[6]、文献[7]分别对几何模型进行了优化分析。

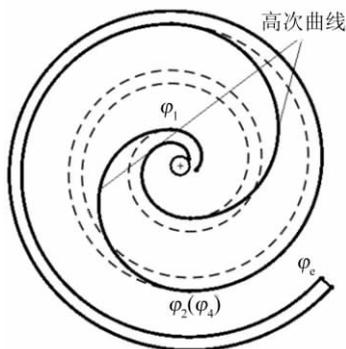
通过上述文献可以看出,对圆渐开线涡旋型线几何模型的研究主要以泄漏、气体力、动态特性等为目标,为变壁厚涡旋型线的研究方向提供了参考。

在变截面涡旋型线几何参数研究方面:文献[8]研究了多种渐开线的性能特点,提出了涡旋型线啮合的计算方法;文献[9]研究了采用三点弧近似法对变壁厚涡旋的加工;文献[10]提出了基于泛函理论的变壁厚涡旋型线设计理论及其优化设计方法,建立了变壁厚涡旋型线优化数学模型;文献[11]提出了包括渐开线等微分条件、基于复合网格划分误差和涡旋型线的啮合间隙来定义型线的误差灵敏度;文献[12]提出了利用椭圆渐开线和双包络法设计涡旋型线,并进行了建模分析;文献[13]建立了多种齿头修正后的几何模型,通过定义的几何参数对吸气容积进行了计算;文献[14]提出了双圆弧加直线单元组合型线,推导了该组合型线的工作腔容积,研究其变化规律。

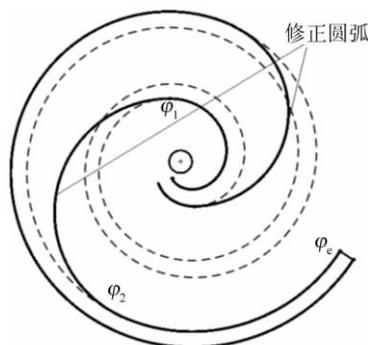
目前,关于变壁厚涡旋型线的研究主要集中在变壁厚涡旋型线几何模型的问题、数学模型的构建以及相关模型的模拟上,而关于几何模型中各参数对型线的影响和对几何模型的优化分析涉及较少。

本文从变壁厚涡旋膨胀机的几何特性出发,以涡旋型线占积比(即型线面积所占盘的面积比)为优化模型,对圆渐开线、圆渐开线-高次曲线-圆渐开线、圆渐开线-圆弧-圆渐开线 3 种型线进行对比分析,并运用遗传算法分别对高次曲线、圆弧组合型线的参数选取进行了优化,为今后变壁厚涡旋膨胀机的设计提供一定的参考。

组合型线示意图如图 1 所示。



(a) 高次曲线组合型线



(b) 圆弧组合型线

图 1 组合型线示意图

## 1 涡旋型线的方程

### 1.1 圆渐开线-高次曲线-圆渐开线

圆渐开线-高次曲线-圆渐开线组合型线的齿的开始部分与结束部分为圆渐开线,中间连接段为幂级数形式的高次曲线,其中齿头采用双圆弧加直线修正,如图 1a 所示,其公式<sup>[15]</sup>描述如下。

圆渐开线母线公式为:

$$\begin{cases} x = R_{g1} \cos \varphi + R_{s1} \sin \varphi, \\ y = R_{g1} \sin \varphi - R_{s1} \cos \varphi \end{cases} \quad (1)$$

其中:  $\varphi \in (0, \varphi_1) \cup (\varphi_2, \varphi_3)$ ;  $\varphi$  为型线的展角;  $R_g = a$ ;  $R_s = a\varphi$ ,  $a$  为基圆半径。

高次曲线母线公式为:

$$\begin{cases} x = R_{g2} \cos \varphi + R_{s2} \sin \varphi, \\ y = R_{g2} \sin \varphi - R_{s2} \cos \varphi \end{cases} \quad (2)$$

其中

$$\varphi \in (\varphi_1, \varphi_4);$$

$$R_{g2} = c_1 + 2c_2(\varphi - \pi/2) + 3c_3(\varphi - \pi/2)^2;$$

$$R_{s2} = c_0 + c_1(\varphi - \pi/2) + c_2(\varphi - \pi/2)^2 + c_3(\varphi - \pi/2)^3.$$

根据涡旋型线的啮合原理<sup>[16]</sup>可得:

$$\begin{cases} R_{g1}(\varphi_1) = R_{g2}(\varphi_1), \\ R_{s1}(\varphi_1) = R_{s2}(\varphi_1); \\ R_{g1}(\varphi_2) = R_{g2}(\varphi_4), \\ R_{s1}(\varphi_2) = R_{s2}(\varphi_4) \end{cases} \quad (3)$$

### 1.2 圆渐开线-圆弧-圆渐开线

圆渐开线-圆弧-圆渐开线组合型线与高次曲线的组合曲线类似,只是齿中间段由圆弧替代了圆渐开线,如图 1b 所示。但圆弧和啮合点的确定与高次曲线有很大差别,圆弧欲满足啮合要求和连续性要求,需满足一个必要条件,即

$$\lambda/2 + n\pi = \tan(\lambda/2) \quad (4)$$

其中:  $\lambda$  为圆弧中心角;  $n$  为圆渐开线被代替的圈数。

圆渐开线的母线与高次曲线组合型线相同,不再赘述,圆弧的相关参数确定如下所述。

静盘外壁圆弧中心  $O_2$  的坐标为:

$$\begin{cases} x_{O_2} = -a\cos(\varphi + \lambda/2)/\cos(\lambda/2) \\ y_{O_2} = -a\sin(\varphi + \lambda/2)/\cos(\lambda/2) \end{cases} \quad (5)$$

静盘内壁圆弧中心  $O_1$  的坐标为:

$$\begin{cases} x_{O_1} = -x_{O_2} \\ y_{O_1} = -y_{O_2} \end{cases} \quad (6)$$

静盘内、外壁圆弧半径  $R, r$  为:

$$\begin{cases} R = a[\varphi + \pi - \alpha + \tan(\lambda/2)], \\ r = a[\varphi + \alpha + \tan(\lambda/2)] \end{cases} \quad (7)$$

其中: $a$  为基圆半径; $\alpha$  为渐开线发生角; $\varphi$  为连接处初始展角。

### 1.3 涡旋型线的占积比

圆渐开线涡旋型线在基圆一定、最终展角一定的情况下,型线的面积是定值,因此无法进行优化选择,组合型线则能很好地改善这一状况。对于组合型线的面积计算,可以以各连接段的接点为求解范围,分别求出各段面积后进行相加求得,但这样的计算分段过多,且内、外壁型线的类型存在不相同的情况,导致计算相对复杂。

本文提出一种新的几何模型-涡旋型线占积比,即涡旋型线占有有效盘面积的比值。由于在渐开线初始条件一定的情况下,无论是高次曲线组合型线还是圆弧组合型线,其最终啮合所需直径都与圆渐开线相同,在这种情况下,涡旋型线面积越小即占积比越小,有效容积越大。因此讨论占积比可以间接反映各组合型线的膨胀性能。

首先整体求解外壁型线面积和内壁型线面积;然后用外壁型线面积减去内壁型线面积的方法,进行型线面积的计算。

(1) 圆渐开线-高次曲线-圆渐开线组合型线。圆渐开线面积增量为  $dS_o = \frac{1}{2}l dL$ ;  $l$  为增量弧线半径,其值为  $l = \int_a^t a d\varphi = a(t - \alpha)$ ;  $dL$  为弧线增量,其值为  $dL = l d\varphi = a(t - \alpha) d\varphi$ 。因此圆渐开线的面积增量为:

$$dS_o = \frac{1}{2}l dL = \frac{1}{2}[a(t - \alpha)]^2 d\varphi \quad (8)$$

高次曲线面积增量为  $dS_g = \frac{1}{2} l dL, l = \sqrt{x^2 + y^2}, dL = \sqrt{x'^2 + y'^2} d\varphi$ 。因此计算可得高次曲线的面积增量为:

$$dS_g = \frac{1}{2}l dL = \frac{1}{2} \sqrt{x^2 + y^2} \sqrt{x'^2 + y'^2} d\varphi \quad (9)$$

由(2)式可得  $\sqrt{x^2 + y^2} = \sqrt{R_{g2}^2 + R_{s2}^2}, \sqrt{x'^2 + y'^2} = \sqrt{(R_{g2}' + R_{s2}')^2} = R_{g2}' + R_{s2}$ , 则有:

$$dS_g = \frac{1}{2} \sqrt{R_{g2}^2 + R_{s2}^2} (R_{g2}' + R_{s2}) d\varphi \quad (10)$$

双圆弧加直线修正面积<sup>[17]</sup>为:

$$S_x = 0.5(R^2 - r^2)(\tau - \sin \tau) \quad (11)$$

其中: $\tau = 0.5\pi - \gamma - \theta, \gamma$  为修正角,  $\theta$  为连接点展开角; $R$  为大圆弧半径; $r$  为小圆弧半径。

内、外壁弧长示意图如图 2 所示。

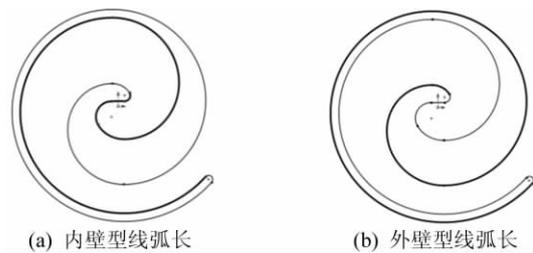


图 2 内、外壁弧长示意图

可得内、外弧线所围成的面积  $S_n, S_w$  和涡旋型线的面积  $S$  为:

$$S_o = \int_{\varphi_0}^{\varphi_1} \frac{1}{2} [a(t - \alpha)]^2 d\varphi + \int_{\varphi_2}^{\varphi_3} \frac{1}{2} [a(t - \alpha)]^2 d\varphi \quad (12)$$

$$S_g = \int_{\varphi_1}^{\varphi_4} \frac{1}{2} \sqrt{R_{g2}^2 + R_{s2}^2} (R_{g2}' + R_{s2}) d\varphi \quad (13)$$

$$S_w = S_o + S_g \quad (14)$$

$$S_n = S_o + S_w + S_x \quad (15)$$

$$S = S_w - S_n \quad (16)$$

(2) 圆渐开线-圆弧-圆渐开线组合型线。该组合型线中,圆渐开线型线所围成的面积的计算与高次曲线组合型线相同,圆弧的内、外面积  $S_n, S_w$  和涡旋型线面积  $S$  计算如下:

$$S_w = \frac{1}{2} \lambda r^2 \quad (17)$$

$$S_n = \frac{1}{2} \lambda R^2 \quad (18)$$

$$S = S_w - S_n \quad (19)$$

(3) 型线占积比模型的建立。型线的占积比就是型线面积与有效盘面积的比值。其中,动静涡旋啮合后,动涡旋以回转半径  $R_{or}$  为运动半径进行公转平动,有效盘面积取最终展角时弧线半径加  $R_{or}$  为半径进行计算,即

$$\begin{aligned} r_p &= a(Be - A) + R_{or}, \\ S_p &= \pi r_p^2 \end{aligned} \quad (20)$$

根据(16)式、(19)式可得型线的占积比为:

$$\delta = \frac{S}{S_p} \quad (21)$$

## 2 各参数的影响分析

由(8)~(21)式可知,高次曲线组合型线和圆弧组合型线的型线面积都与基圆半径  $a$ 、回转半径  $R_{or}$ 、最终展角  $\varphi_e$  有关,运用控制变量法研究以上各参数对占积比的影响。

### 2.1 基圆半径对占积比的影响

基圆半径对型线面积和占积比的影响如图 3 所示,其中基圆半径从 3 mm 增加至 5 mm,回转半径与最终展角保持不变。从图 3 可以看出:在相同基圆半径下,圆渐开线的型线面积远远大于组合型线的型线面积,而高次曲线组合型线的型线面积略低于圆弧组合型线的型线面积;圆渐开线的占积比约为其他 2 种组合型线占积比的 2 倍,高次曲线组合型线的占积比略低于圆弧组合型线的占积比。

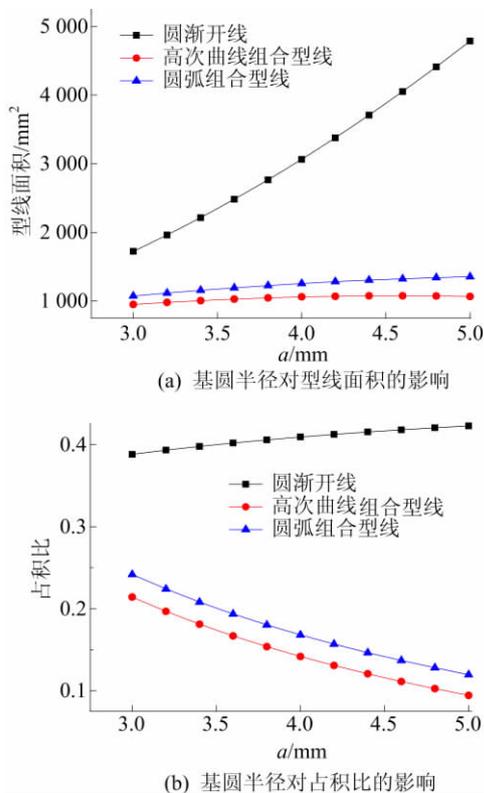


图 3 基圆半径对型线面积和占积比的影响

由图 3 可知:随着基圆半径的不断增大,圆渐开线的型线面积近乎于直线上升,其型线占积比也有所升高,这是因为随着基圆半径的增加,型线的齿厚增加,导致型线面积大幅度增长,所以型线占积比也变大;其余 2 种组合型线的型线面积有

小幅度增长,而型线占积比却有所下降,这是因为当基圆半径增加时,高次曲线与圆弧的弧长增长幅度很小,而圆渐开线部分齿厚虽然有所增长,但节距也随之增加,在回转半径和最终展角保持不变的情况下,有效盘面积中的圆渐开线面积减小,所以占积比有所下降。

从图 3b 还可以看出,在基圆半径、回转半径、最终展角相同时,高次曲线组合型线和圆弧组合型线的占积比相差不多,且都要优于圆渐开线的占积比。

### 2.2 最终展角对涡旋型线的影响

最终展角对涡旋型线的影响如图 4 所示,其中最终展角由 12.56 rad 增加至 18.06 rad,基圆半径和回转半径保持不变。

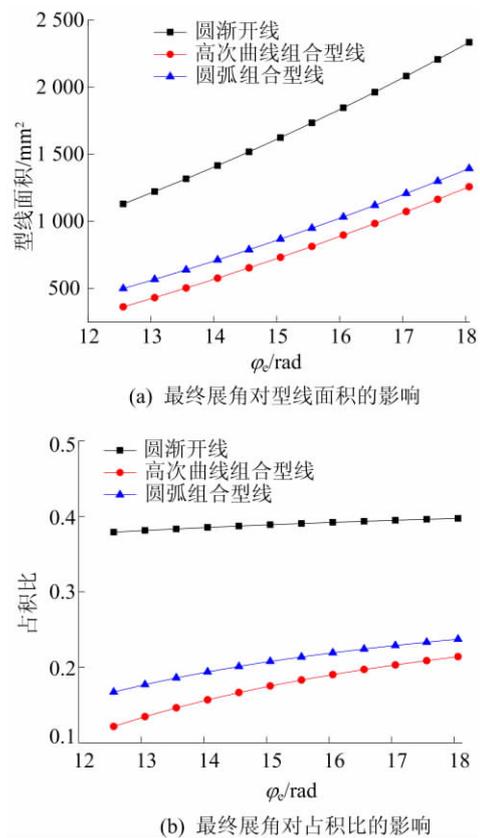


图 4 最终展角对型线面积和占积比的影响

从图 4 可以看出:当最终展角增加时,圆渐开线、高次曲线组合型线、圆弧组合型线的型线面积都有明显的增加,且趋势也近似;但圆渐开线的占积比几乎没有增加,这是因为当最终展角增加时,型线齿厚增加,面积增加,同时有效盘面积也增加,且增长率近似,所以占积比没有明显增加;而高次曲线组合型线和圆弧组合型线的占积比有所增加,这是因为当最终展角增加时,高次曲线部分

和圆弧部分皆无变化,但圆渐开线部分弧线增加,即圆渐开线型线面积所占比例增加,所以占积比有所增加。

从上述对基圆半径、最终展角的分析可知:在相同条件下,高次曲线组合型线和圆弧组合型线的型线面积、占积比都远远小于圆渐开线;而 2 种组合型线相差不大,且变化趋势相近。

### 3 高次曲线组合型线参数的优化选取

#### 3.1 遗传算法理论

遗传算法是运用仿生学中基因的遗传、变异等原理,将已知边界条件的优化参数看作一段“基因”,通过选择保存每一代的最小值,经过一定概率的重组变异,产生新一代“基因”,如此循环,直至达到预设目标或者遗传代数达到预设而终止。

遗传算法流程如图 5 所示。

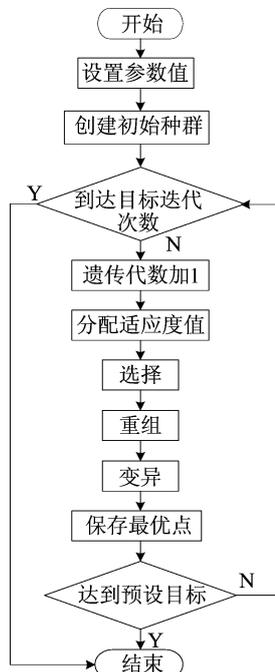


图 5 遗传算法流程

本文主要以型线面积  $S$  和占积比  $\delta$  为优化目标,其求解方式为(16)式、(19)式和(21)式。由型线面积的定义可知, $S > 0$  且  $S \ll S_p$ ;由占积比定义可知, $0 < \delta < 1$ 。

#### 3.2 连接点处展角优化选取

本文以  $\varphi_1$ 、 $\varphi_4$  为优化变量,即 2 对“基因”,以高次曲线的占积比为目标函数进行优化分析。参数选取为:基圆半径  $a = 3.2$  mm;回转半径  $R_{or} = 5.58$  mm;发生角  $\alpha = 2\pi/9$ ;最终展角  $\varphi_e = 16.5478$ ;

圆渐开线展角  $\varphi_2$  满足  $\varphi_2 = \varphi_1 + 2\pi$ 。

高次曲线占积比优化如图 6 所示。通过 50 代的“基因”优化,得到最优解  $\delta = 0.169332$ ,此时  $\varphi_1 = 2.0940$ 、 $\varphi_4 = 6.2832$ 。

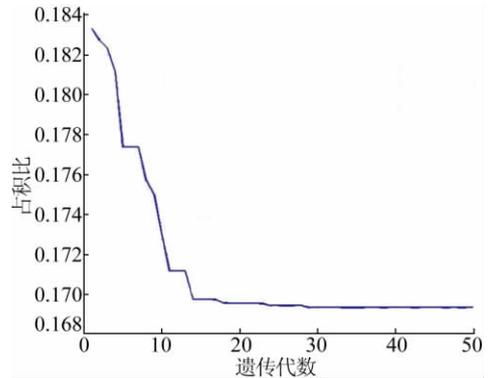


图 6 高次曲线占积比优化

从图 6 可以看出,在基圆半径、渐开线起始角、最终展角等参数不变的前提下,随着  $\varphi_1$ 、 $\varphi_4$  的变化,组合型线高次曲线部分的弧长发生了变化,从而对组合型线高次曲线的占积比产生了一定的影响。

因此,合理选取  $\varphi_1$ 、 $\varphi_4$  对高次曲线组合型线的占积比有一定的优化作用。

#### 3.3 多初始参数优化

初始参数基圆半径  $a$  和最终展角  $\varphi_e$  同时变化时,以占积比  $\delta$  为优化目标,寻求  $\delta$  的极小值及取极值时各初始参数的取值,结果如图 7 所示。

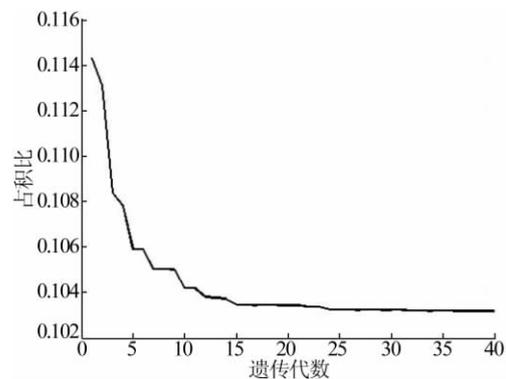


图 7 单目标优化时高次曲线组合型线的多初始参数优化

由图 7 可知,在优化了约 30 代后,占积比取得了极小值,之后保持不变,最终取得极小值  $\delta = 0.103180$ ,此时的基圆半径  $a = 5.2$  mm、最终展角  $\varphi_e = 18.84$  rad。

#### 3.4 多优化目标下基圆半径的优化选取

根据上节对高次曲线-圆渐开线组合型线的

型线面积  $S$  和占积比  $\delta$  随基圆半径  $a$  变化的讨论可知,型线面积随基圆半径的增大而增大,而占积比随着基圆半径的增大而减小。下面讨论以型线面积和占积比为共同优化目标下的基圆半径取值。

多优化目标时高次曲线组合型线的多初始参数优化如图 8 所示。

由图 8 可知,由于 2 个优化目标随基圆半径的变化趋势相反,无法求出极值。图 8 中每个点都是满足非劣条件下的基圆半径的取值,将其中值摘选部分,见表 1 所列。

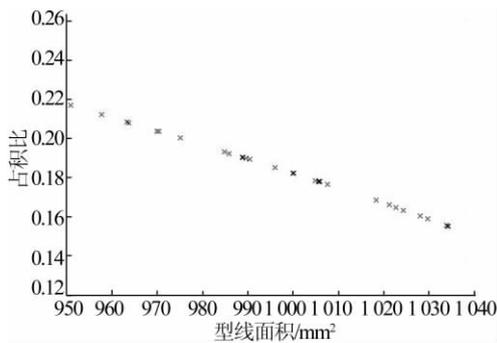


图 8 多优化目标时高次曲线组合型线的多初始参数优化

表 1 多优化目标下高次曲线组合型线基圆半径的非劣解集

基圆半径/mm	型线面积/mm <sup>2</sup>	占积比
3.267 9	989.059 7	0.190 4
3.587 0	1 024.400 6	0.163 7
4.009 2	1 054.419 3	0.134 8
4.343 8	1 064.661 3	0.116 0
5.071 7	1 045.573 2	0.083 5

从图 8 可以看出,相比于图 7 中多个初始参数共同作用时占积比的极值,单个初始参数变化下占积比的极小值要小于多初始参数下的极小值,即多个初始参数共同作用时会影响优化目标极值的取值。

#### 4 圆弧组合型线的优化

##### 4.1 以占积比为优化目标的多初始参数优化

初始参数基圆半径  $a$  和最终展角  $\varphi_e$  同时变化时,以占积比  $\delta$  为优化目标,寻求其极小值以及取极值时各初始参数的取值,结果如图 9 所示。

从图 9 可以看出,在最初几代优化时,占积比迅速减小,在优化 10 代左右以后,变化相对平稳,在遗传至 40 代左右时取得极小值  $\delta=0.139 61$ ,此时的基圆半径  $a=3.499 3$  mm、最终展角  $\varphi_e=12.56$  rad。

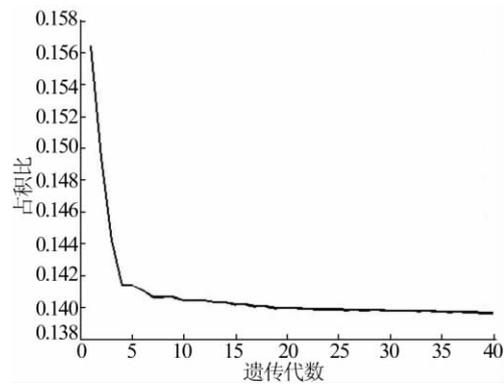


图 9 单目标优化时圆弧组合型线的多初始参数优化

##### 4.2 多优化目标下基圆半径的优化选取

根据上节对圆弧-圆渐开线组合型线的型线面积  $S$  和占积比  $\delta$  随基圆半径  $a$  变化的讨论可知,圆弧-圆渐开线组合型线的变化趋势与高次曲线-圆渐开线组合型线的类似。下面讨论以型线面积和占积比为共同优化目标下的基圆半径取值。

多优化目标时圆弧组合型线的多初始参数优化如图 10 所示。

由图 10 可知:占积比的变化范围为 0.25~0.10,型线面积的变化范围为 1 050~1 350 mm;且在基圆半径取值越大时,占积比的减小率也越大。优化取得一组非劣解集,摘选部分见表 2 所列。

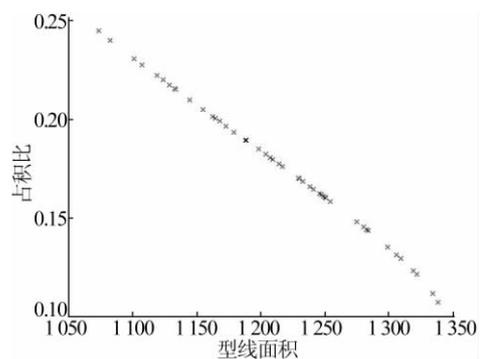


图 10 多优化目标时圆弧组合型线的多初始参数优化

表 2 多优化目标下圆弧曲线组合型线基圆半径的非劣解集

基圆半径/mm	型线面积/mm <sup>2</sup>	占积比
3.284 1	1 132.900 7	0.215 9
3.576 9	1 186.453 3	0.190 6
4.206 3	1 275.278 1	0.148 2
4.385 0	1 293.959 4	0.138 3
4.866 6	1 329.887 1	0.115 4

从图 10 可以看出,相比于图 9 中多个初始参数共同作用时占积比的极值,单个初始参数变化

下占积比的极小值要小于多初始参数下的极小值。

## 5 结 论

本文以高次曲线组合型线和圆弧组合型线为优化对象,以型线面积和占积比为优化目标,运用遗传算法对其进行了优化分析。

分析得到基圆半径与型线面积成正比、与占积比成反比,最终展角与型线面积和占积比都成正比。在单目标遗传算法的优化下得到高次曲线组合型线占积比最优解为  $\delta = 0.169\ 332$ , 此时  $\varphi_1 = 2.094\ 0$ 、 $\varphi_4 = 6.283\ 2$ ; 圆弧组合型线最优解为  $\delta = 0.139\ 610$ , 此时基圆半径  $a = 3.499\ 3\ \text{mm}$ 、 $\varphi_c = 12.56\ \text{rad}$ 。以占积比和型线面积为共同优化目标,在多目标遗传算法的优化下,得到了 2 个优化目标的一组非劣解集以及与之对应的基圆半径值。

本文的研究为高次曲线组合型线和圆弧组合型线的参数选取提供了一定的参考。

## [参 考 文 献]

- [1] 司玉宝,屈宗长,王迪生. 涡旋压缩机型线设计准则及其优选策略[J]. 流体机械,2000,28(9):14-17.
- [2] 刘兴旺,马小礼,刘振全,等. 涡旋压缩机型线几何参数的优化设计方法研究[J]. 流体机械,2005,33(11):53-56.
- [3] 彭斌,朱兵. 涡旋型线对涡旋压缩机性能的影响[J]. 流体机械,2016,44(6):17-23.
- [4] BLUNIER B,CIRRINCIONE G,MIRAOUI A. Novel geometrical model of scroll compressors for the analytical description of the chamber volumes[C]//International Compressor Engineering Conference. [S. l.]:ICEC,2006:1745.
- [5] LIU T,WU Z. Modeling of top scroll profile using equidistant-curve approach for a scroll compressor[J]. Mathematical Problems in Engineering,2015,1155:1-8.
- [6] GELKE W,BAUMGART R,AURICH J. Geometric optimization of scroll compressors[C]//International Compressor Engineering Conference. [S. l.]:ICEC,2018:2609.
- [7] IAN H,ECHARD A,JAMES E,et al. Derivation of optimal scroll compressor wrap for minimization of leakage losses [C]//International Compressor Engineering Conference. [S. l.]:ICEC,2012:1317.
- [8] WANG L C,CHEN J,ZHAO Y Y,et al. Research on the natural meshing mechanism and testing analysis of scroll profiles for refrigeration scroll compressor[J]. Science China Technological Sciences,2010,10:2783-2791.
- [9] LIU T,WANG XQ,WU J,et al. Numerical control machining of scroll with variable thickness[J]. Applied Mechanics and Materials,2014,490:288-293.
- [10] 王立存,陈进,张贤明,等. 基于泛函的制冷涡旋压缩机变壁厚涡旋型线理论及形状优化[J]. 中国机械工程,2010,21(16):1898-1901.
- [11] QIANG J G,LIU Z Q. Scroll profiles in scroll compressors: general criteria and error sensitivity[J]. International Journal of Refrigeration,2013,36:1796-1808.
- [12] HWANG S J,LI S T,HWANG Y L,et al. Study on scroll profile design using involute of elliptic for scroll compressor [J]. Applied Mechanics and Materials,2013,319:622-628.
- [13] BRYCE R,ECKHARD A. Variable wall thickness scroll geometry modeling with use of a control volume approach [J]. International Journal of Refrigeration, 2013, 36: 1809-1820.
- [14] 王国梁. 采用双圆弧加直线单元组合型线的涡旋压缩机理论及试验研究[J]. 机械工程学报,2010,46(10):144-147.
- [15] 张臣. 型线对涡旋膨胀机性能影响的研究[D]. 北京:北京理工大学,2015.
- [16] 刘振全. 涡旋式流体机械与涡旋压缩机[M]. 北京:机械工业出版社,2009.
- [17] 张朋成. 变截面涡旋膨胀机性能研究[D]. 兰州:兰州理工大学,2017.

(责任编辑 胡亚敏)