

# 变基圆半径渐开线涡旋齿形的修正

唐景春,贾卿晨,李晨凯

(合肥工业大学汽车与交通工程学院, 合肥 230009)

**摘要:**以汽车空调用变基圆渐开线涡旋压缩机为研究对象,采用圆弧加直线的修正方法对涡旋齿起始端进行了修正,推导了变基圆渐开线齿端修正部分的面积计算公式,进行了涡旋几何修正参数及齿端面积的实例计算,分析并通过实验验证了修正角对涡旋齿端修正面积及内压缩比的影响规律。研究结果表明,修正角的取值直接影响到涡旋压缩机的内压缩比大小。在确定的渐开线参数情况下,修正角的取值存在着一个合理的区间,其接近下限值时,能够提高涡旋压缩机的内压缩比,改善欠压缩过程,从而提高涡旋压缩机的等熵效率。

**关键词:**变径基圆涡旋盘;齿端面积;修正角;内压缩比

DOI: 10.16711/j.1001-7100.2017.02.014

## The modification on scroll wrap with involutes of variable radii

Tang Jingchun, Jia Qingchen, Li Chenkai

(School of Automobile and Traffic Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

**Abstract:** Taking scroll compressor with involutes of variable radii used in automotive air conditioning as a research target, the end cross-section area of scroll wrap by arcs and lines was modified. The calculation formula of the variable radii area was derived for the modified portions of the scroll wrap. The calculation example of the modified geometric parameters and the end cross-section area of the scroll wrap were presented, and the rules about correction angle influenced on the modified area and compression ratio were analyzed and confirmed by experiment. The study results show that the value of the correction angle affects the compression ratio of scroll compressor directly. There is a reasonable range for the value of the correction angle with certain parameters of scroll compressor involutes. When the value approaches to the lower bound, the compression ratio raises, the inadequate compression process is improved, thus the isentropic efficiency of scroll compressor increases.

**Keywords:** Variable radii scroll plate, End cross-section area, Correction angle, Compression ratio

## 1 引言

基于汽车空调涡旋压缩机小型轻量化的要求,在相同吸气容积的情况下,采用变基圆半径涡旋型线,可以降低涡旋齿的高度,从而减小涡旋盘的倾覆力矩。汽车空调涡旋压缩机一般是按照设计工况进行设计的,而涡旋压缩机的内压缩比是一固定参数,因此,在运行工况偏离设计工况时,涡旋压缩机会出现欠压缩或者过压缩现象,导致其等熵效率下降。其中,欠压缩现象发生于冷凝压力高于压缩机排气压力情况,压缩机排气的瞬间会经历等容压缩(重复压缩)热力工程,引起附加的功率损失<sup>[1-3]</sup>。因此,在汽车空调涡旋压缩机的设计过程中,既要避免发生过压缩现象,也要

改善欠压缩过程,从而进一步提高和改进涡旋压缩机的热力性能。

在文献[4-12]中,对变基圆半径渐开线涡旋压缩机涡旋齿端的修正进行了研究,阐述了变基圆半径涡旋压缩机的理论优势,但对涡旋齿端修正中的参数变化规律并没有进行深入的讨论与研究。

本文以28ml汽车空调涡旋压缩机为研究对象,通过涡旋压缩机的实例计算,研究了修正角在涡旋齿端修正中对其它修正参数、齿端面积以及内压缩比的影响规律,以便于涡旋压缩机热力、动力性能的进一步优化。

## 2 齿端修正方法

### 2.1 变基圆渐开线修正

收稿日期: 2016-11-03

资金项目: 合肥工业大学博士学位专项资助基金(JZ2016HGBZ0748)。

作者简介: 唐景春(1966-),男,博士,副教授,主要从事制冷压缩机热动力学研究。

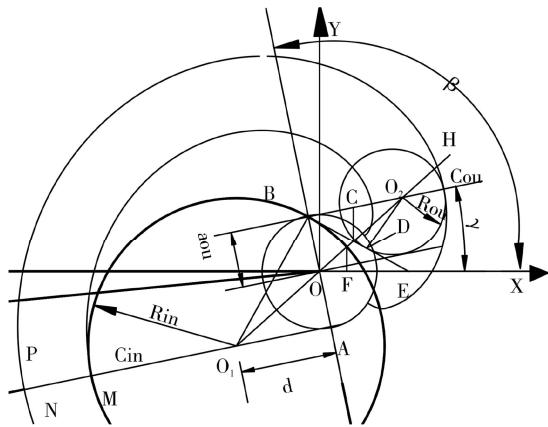


图 1 变基圆半径渐开线的修正

Fig. 1 The modification on involutes of variable radii

如图 1 所示,把涡旋齿中心部分的内、外涡旋线用两段圆弧和与圆弧公切的线段来代替,动静涡旋盘上的对应侧涡旋线采用相同的修正参数,

$$d = \frac{[a_0(\alpha + \beta) + (-1)^{\kappa+2} \frac{\delta_0}{\kappa+1} (\alpha + \beta)^{\kappa+1} + \frac{r_{ob}}{2}]^2 - [a_0 + \delta_0(\alpha + \beta)^\kappa]^2}{2[a_0(\alpha + \beta) + (-1)^{\kappa+2} \frac{\delta_0}{\kappa+1} (\alpha + \beta)^{\kappa+1} + \frac{r_{ob}}{2}]}$$

$$\gamma = \beta - \tan^{-1}\left(\frac{d}{a_{ou}}\right), \quad \rho_{ou} = \rho_{ou}(\phi) = a_0\phi + \frac{\delta_0}{\kappa+1}\phi^{\kappa+1} = a_0(\alpha + \beta) + \frac{\delta_0}{\kappa+1}(\alpha + \beta)^{\kappa+1}$$

$$\rho_{ou} - d = R_{ou}, \quad R_{in} = R_{ou} + r_{ob},$$

$$r_{ob} = a_0(\pi - \alpha_{in} - \alpha_{ou}) + \frac{\delta_0}{\kappa+1}(-1)^{\kappa+2}(\pi - \alpha_{in} - \alpha_{ou})^{\kappa+1}$$

## (2) 修正直线

$$|O_1O| = \sqrt{a_{ou}^2 + d^2}, \quad |O_1B| = R_{in}, \quad \cos \angle BO_1A = \frac{d}{R_{in}}, \quad \angle BO_1O = \angle BO_1A - \angle O_1OA,$$

$$\angle O_1OA = \gamma + \frac{\pi}{2} - \beta$$

$$\cos \angle BO_1O = \cos(\angle BO_1A - \angle O_1OA) = \cos(\arccos(\frac{d}{R_{in}}) - (\gamma + \frac{\pi}{2} - \beta)) = \frac{d^2 + R_{in}^2 + a_{ou}^2 - |\overline{OB}|^2}{2R_{in}\sqrt{a_{ou}^2 + d^2}}$$

$$\tan \angle O_1OA = \frac{a_{ou}}{d}, \quad |\overline{BC}| = R_{in} \tan \angle BO_1O, \quad \angle BEO = \pi - (\beta + \angle BO_1A)$$

则修正直线 BE 的斜率为:

$$\tan(\angle BO_1A + \beta) = \tan\left(\cos^{-1}\left(\frac{d}{R_{in}}\right) + \beta\right)$$

修正直线 BE 的方程为:

$$y = x \tan\left(\cos^{-1}\left(\frac{d}{R_{in}}\right) + \beta\right) + \tan\left(\cos^{-1}\left(\frac{d}{R_{in}}\right) + \beta\right) \cdot |\overline{OB}| \cos\left(\beta - \frac{\pi}{2}\right) + |\overline{OB}| \sin\left(\beta - \frac{\pi}{2}\right)$$

$$\text{点 B 的坐标为: } \left[-|\overline{OB}| \sin\left(\beta - \frac{\pi}{2}\right), |\overline{OB}| \cos\left(\beta - \frac{\pi}{2}\right)\right]$$

$$\text{另有: } \angle BO_1O = \arccos\left(\frac{d}{R_{in}}\right) - \gamma - \frac{\pi}{2} + \beta; \quad \cos \angle BO_1O = \frac{d^2 + R_{in}^2 + a_{ou}^2 - |\overline{OB}|^2}{2R_{in}\sqrt{a_{ou}^2 + d^2}};$$

因而动静涡旋盘上内外侧修正部分同时进入啮合,同时退出啮合,这种修正称为等角对称圆弧加直线修正,即 EA - SA L 修正。

O 为坐标原点(基圆的圆心),  $O_1$  为内型线修正圆弧的圆心,  $O_2$  为外型线修正圆弧的圆心, A 为内型线在点  $C_{in}$  处的法线和直线 AB 的交点, B 为内型线修正圆弧与直线 BE 的切点, C 为直线 BE 和直线  $O_1O_2$  的交点, D 为外型线修正圆弧与直线 BE 的切点, E 为直线 BE 与 X 轴的交点, F 为直线  $O_1O_2$  内型线修正圆弧的交点。

## 2.2 齿端修正参数计算

对图 1 中所示的涡旋修正相关参数计算如下:

### (1) 修正圆弧

$$a_{ou} = [a_0 + \delta_0(\alpha + \beta)^\kappa]$$

$$\tan \angle BO_1O(R_{in} + R_{ou}) = |\overline{BD}|; |\overline{BC}| = \tan \angle BO_1O \cdot R_{in}; |\overline{CD}| = |\overline{BD}| - |\overline{BC}|$$

式中:  $a_0$  为初始基圆半径, mm;  $\alpha$  为渐开线起始角, rad;  $\beta$  为内外渐开线修正角, rad;  $\kappa$  为多变指数;  $\delta_0$  为修正增量, mm;  $d$  为修正圆弧与直线的距离, mm;  $r_{ob}$  为回转半径, mm;  $\rho$  为曲率半径, mm;  $\phi$  为渐开线角度; 下标 in、out 表示内、外渐开线。

### 3 齿端面积

如图 2 所示, 修正型线是由大圆弧 BC<sub>in</sub>、小圆弧 DC<sub>ou</sub>、直线 BD、渐开线 C<sub>in</sub>M 和渐开线 C<sub>ou</sub>N 组成, 修正涡旋齿由渐开线部分 S<sub>j</sub> (图 2 中阴影部分) 和修正部分 S<sub>x</sub> (图 2 中无阴影部分) 组成。因此只需要得修正部分的面积就可以确定整个涡旋齿的面积。为了便于计算, 首先将修正部分划分为 6 个部分, 包括 2 个扇形部分 DO<sub>2</sub>C<sub>ou</sub>D (S<sub>1</sub>)、BO<sub>1</sub>C<sub>in</sub>B (S<sub>3</sub>), 2 个渐开线扇形部分 HO<sub>2</sub>C<sub>ou</sub>H (S<sub>2</sub>)、PO<sub>1</sub>HP (S<sub>4</sub>), 1 个三角形部分 CO<sub>2</sub>D (S<sub>5</sub>), 1 个曲边三角形部分 BCFB (S<sub>6</sub>), 修正面积为  $S_x = S_1 + S_2 - S_3 + S_4 + S_5 - S_6$ 。

最终展角  $\varphi_e$  的修正涡旋齿的总面积为  $S_x + S_j$ 。

如图 2 所示, 定义任意展角  $\varphi$  处的涡旋齿横截面面积为齿厚线段对应的涡旋齿收缩侧的涡旋

$$V(\varphi) = -\left(\frac{h}{6}\right)\pi(\pi - 2\alpha)[-2a_0 + (\pi - 2\alpha)\delta_0] \cdot \\ \{ -6a_0(\pi + 2\alpha - 2\varphi_e) + \delta_0[5\pi^2 + 12\pi(\alpha - \varphi_e) + 6(\varphi_e^2 - 2\alpha^2)] \}$$

式中:  $h$  为涡旋体高度, mm;  $\varphi_e$  为渐开线最终展角, rad。

$$\text{内压缩比为: } \varepsilon = V_i = \frac{V(\varphi_e)}{V(\varphi_D)} = \frac{S(\varphi_e)}{S(\varphi_D)}$$

现以 28ml 汽车空调用变基圆半径渐开线涡旋压缩机的齿端修正为实例, 取涡旋型线的基本参数  $a_0 = 2.3$  mm,  $\alpha = 0.6589$  rad,  $\gamma = 0.7658$  rad,  $\varphi_e = 18$  rad,  $\beta = 1.772$  rad,  $\delta_0 = -0.02$  mm,  $\kappa = 1$ ,  $h = 15.75$  mm, 涡旋圈数  $m = 2.85$ , 由此可得其吸气容积  $V(\varphi_e) = 25.113$  ml, 其吸气终了面积  $S(\varphi_e) = 1599.706$  mm<sup>2</sup>。

由  $S_x$  的计算方法可知, 涡旋齿修正面积仅与  $\beta$ 、 $\gamma$ 、 $d$ 、 $R_{in}$ 、 $R_{ou}$  等参数相关, 通过上述变基圆渐开线修正计算可知,  $\gamma$ 、 $d$ 、 $R_{in}$ 、 $R_{ou}$  的值, 在  $a_0$ 、 $\alpha$ 、 $\delta_0$ 、 $\kappa$ 、 $r_{ob}$  等基本参数确定后, 仅由修正角  $\beta$  决定。所

齿横截面面积, 简称齿端面积<sup>[2]</sup>, 用  $S(\varphi)$  表示。由于内壁面上 B 点为开始排气角对应的脱离啮合点, 因此计算涡旋齿端面积时以展角  $\varphi = \varphi^*$  处开始计算。

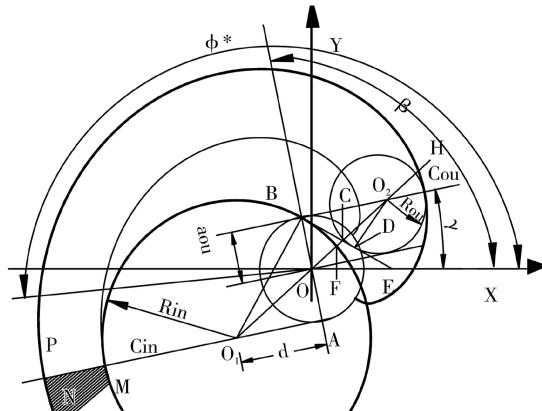


图 2 内壁圆弧修正部分面积计算

Fig. 2 Area calculation of inner wall arc modification portion

### 4 计算与分析

#### 4.1 实例计算

动、静涡旋盘在型线展角  $\varphi$  处所构成的基元容积对的容积为:

以, 涡旋压缩机的排气面积仅与  $\beta$  相关。

#### 4.2 参数分析

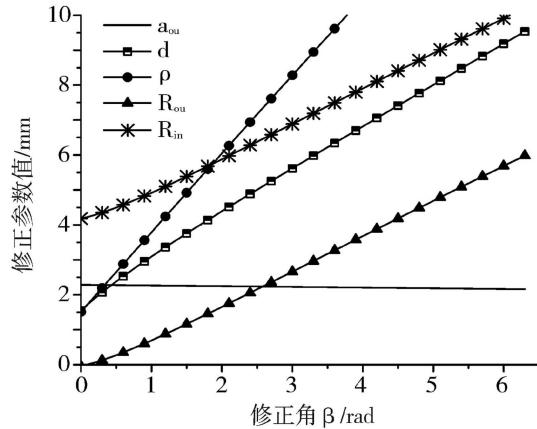


图 3 修正角  $\beta$  对  $a_{ou}$ 、 $d$ 、 $\rho$ 、 $R_{in}$ 、 $R_{ou}$  的影响

Fig. 3 Correction angle  $\beta$  influence on  $a_{ou}$ ,  $d$ ,  $\rho$ ,  $R_{in}$ ,  $R_{ou}$

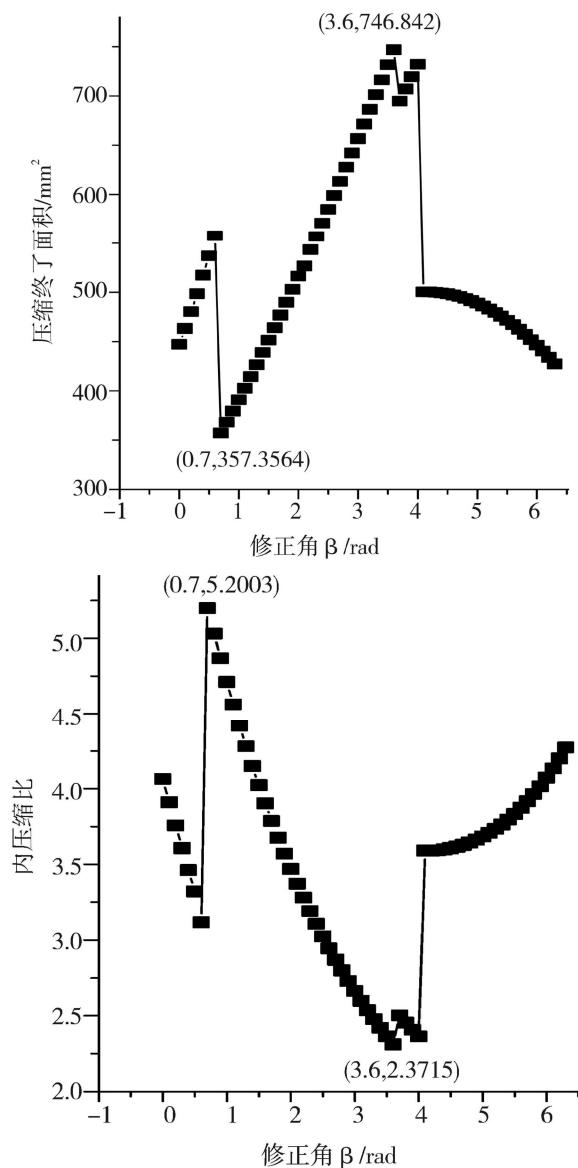
图4 修正角 $\beta$ 对压缩终了面积和内压缩比的影响

Fig. 4 Correction angle  $\beta$  influence on compression ratio and the end of the compression area

根据上述修正圆弧计算公式,可建立  $\beta$  与  $a_{ou}$ 、 $d$ 、 $\rho$ 、 $R_{in}$ 、 $R_{ou}$  的关系式,对  $\beta$  在 0 到  $2\pi$  之间取值,以此计算其他修正参数的变化规律。图 3 为修正角  $\beta$  对上述参数的变化曲线图。图 4 为修正角  $\beta$  对压缩终了面积和内压缩比的影响。

图 3 表明:  $a_{ou}$  随着  $\beta$  的增加,呈现阶梯状减小趋势;  $d$ 、 $\rho$ 、 $R_{in}$ 、 $R_{ou}$  随着  $\beta$  的增大呈现线性递增的趋势。从图 4 中可以看出,压缩终了面积(内压缩比)的变化趋势,在  $\beta = 0.7\text{ rad}$  至  $\beta = 3.6\text{ rad}$  区间,呈现线性增大(减小)的趋势,在  $\beta < 0.7\text{ rad}$  及  $\beta > 3.6\text{ rad}$  时呈现出不规则的变化。

在 28ml 涡旋压缩机齿头修正中,由图 5 和图 6 中涡旋齿的修正图可知,当  $\beta < 0.7\text{ rad}$  时,由于修正角度过小,无法进行进一步的修正;当  $\beta > 3.6\text{ rad}$  时, $\rho > 9\text{ mm}$ ,因基圆圆心至渐开线的距离小于  $\rho < 9\text{ mm}$ ,故  $\rho > 9\text{ mm}$  涡旋齿时修正难度增大。因此,对于 28ml 汽车空调用涡旋压缩机涡旋齿头的修正角  $\beta$ ,应取值在  $0.7\text{ rad}$  至  $3.6\text{ rad}$  的区间,当角度递减时,压缩终了面积降低,内压缩比增大。

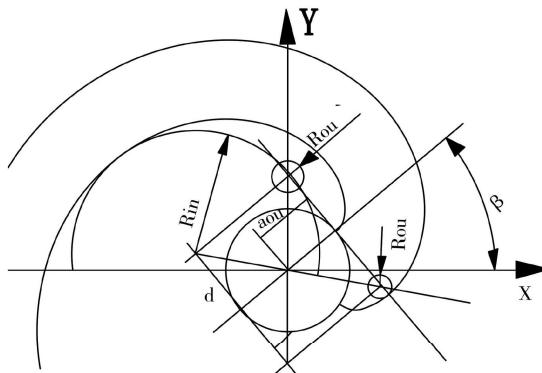


图 5  $\beta = 0.7\text{ rad}$  的齿端修正  
Fig. 5 Top wrap modification with  $\beta = 0.7\text{ rad}$

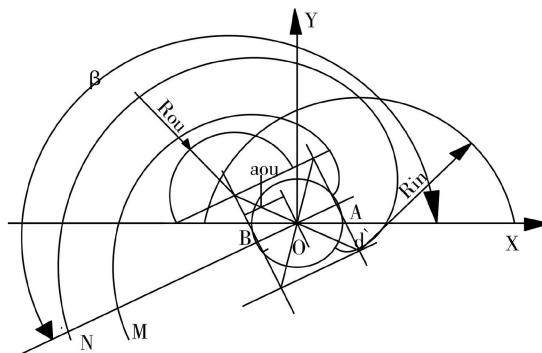


图 6  $\beta = 3.6\text{ rad}$  的齿端修正  
Fig. 6 Top wrap modification with  $\beta = 3.6\text{ rad}$

#### 4.3 对比实验

采用第二制冷剂量热器法,在汽车空调制冷压缩机性能试验台上,对几何容积排量为 28ml 的涡旋压缩机在两种不同修正角  $\beta$  的情况下进行了对比实验,实验条件如表 1 所示。

对比实验结果的主要数据列于表 2。

从计算分析结果以及表 2 的实验数据反映出,修正角  $\beta$  取值在  $0.7\text{ rad}$  至  $3.6\text{ rad}$  的区间时,随着角度减小,内压缩比增大,降低甚至消除欠压缩过程带来的能量损耗,使压缩机排气温度降低,提高其容积效率与等熵效率。

表 1 试验工况

Tab. 1 Test conditions

工况项目	物理单位	设定值	工况项目	物理单位	设定值
压缩机吸气温度	℃	10.67	压缩机转速	rpm	5400
压缩机吸气压力	kPa	300.05	蒸发温度	℃	0.67
压缩机排气压力	kPa	1500.00	冷凝温度	℃	55.25
过热度	℃	10.00	过冷度	℃	5.00

表 2 实验结果

Tab. 2 Experimental result

实验项目	物理单位	修正角 $\beta = 0.93\text{rad}$	修正角 $\beta = 3.26\text{rad}$
压缩机输入功率	kW	2.121	2.121
压缩机排气压力	kPa	1504.80	1504.89
被试机环境温度	℃	31.87	30.03
压缩机排气温度	℃	80.71	86.56
容积效率	%	79.079	78.7
等熵效率	%	93.160	91.853

## 5 结论

(1) 修正角  $\beta$  的取值直接影响到涡旋压缩机的内压缩比大小。在确定的渐开线参数情况下,修正角的取值存在着一个合理的区间,其接近下限值时,能够提高涡旋压缩机的内压缩比,改善欠压缩过程,从而提高涡旋压缩机的等熵效率。

(2) 修正角  $\beta$  对涡旋压缩机内压缩比的影响规律,可用于渐开线型涡旋齿结构参数的优化和整机性能的预测评价。

## 参考文献

- [1] 马一太, 刘忠彦, 李敏霞. 可变内容积比压缩机的性能分析 [C] // 2012 国际制冷技术交流会论文集 [C]. 珠海: 中国制冷学会, 2012, 115 – 120.
- [2] 强建国, 刘振全. EA-SAL 修正涡旋齿端面积计算 [J]. 兰州理工大学学报, 2006, 32(5): 36 – 39.
- [3] 刘卫华, 高秀峰, 冯诗愚. 双涡圈涡旋机械修正齿型的基元面积计算 [J]. 西安交通大学学报, 2002, 36(11): 1195 – 1198.
- [4] 王国梁. 基于对称圆弧修正的单元组合型线涡旋压缩机特性研究 [J]. 机械工程学报, 2011, 47(16): 139 – 142.
- [5] 吴昊, 刘向农, 王铁军, 等. 对称圆弧加直线修正型线涡旋压缩机脱啮角与排气角研究 [J]. 制冷学报, 2011, 32(6): 20 – 24.
- [6] Lin Chiachin , Chang Yuchoung , Liang Kunyi, et al. Temperature and thermal deformation analysis on scrolls of scroll compressor [J]. Applied Thermal Engineering, 2005, 25: 1724 – 1739.
- [7] Liu Y, Hung C, Chang Y. Study on involute of circle with variable radii in a scroll compressor [J]. Mechanism & Machine Theory, 2010, 45(11): 1520 – 1536.
- [8] Qiang Jianguo, Liu Zhenquan. A compression process model with integral equations for the scroll mechanism in a scroll compressor [J]. International Journal of Refrigeration, 2014, 44: 101 – 115.
- [9] Qiang J. Study on basic parameters of scroll fluid machine based on general profile [J]. Mechanism & Machine Theory, 2010, 45(2): 212 – 223.
- [10] Liu Yangguang, Tang Yueju, Chang Yuchoung, et al. Optimum design of scroll profiles created from involute of circle with variable radii by using finite element analysis [J]. Mechanism and Machine Theory, 2012, 55: 1 – 17.
- [11] Kra · henbu · hl D, Zwyssig C, Weser H, et al. A Miniature 500000 – r/min Electrically Driven Turbo compressor [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2010, 46(6): 2459 – 2466.
- [12] Morishita E, Kitora Y, Suganami T, et al. Rotating scroll vacuum pump [J]. Proc of 1988 International Compressor Engineering Conference at Purdue [C]. West Lafayette: W Ray Herrick Laboratories, Purdue University, 1988, 198 – 205.