

基于 NURBS 曲线的螺杆转子型线反向设计研究

Study on inverse design of screw rotor profile based on NURBS curve

黄海楠¹

何雪明¹

张荣²

姜振钢¹

HUANG Hai-nan¹ HE Xue-ming¹ ZHANG Rong² JIANG Zhen-gang¹

(1. 江南大学江苏省食品先进制造装备技术重点实验室, 江苏 无锡 214122; 2. 江南大学理学院, 江苏 无锡 214122)

(1. Jiangsu Key Laboratory of Advanced Food Manufacturing Equipment and Technology, Jiangnan University, Wuxi, Jiangsu 214122, China; 2. School of Science, Jiangnan University, Wuxi, Jiangsu 214122, China)

摘要:提出基于啮合线法和 NURBS 曲线的螺杆转子型线设计方法。在啮合线法求转子型线过程中, 结合龙贝格求积公式, 求解 NURBS 曲线的包络条件, 实现只由控制点、权因子和节点矢量决定的整段式的 NURBS 曲线啮合线的反向设计。通过该方法得到误差在 $0.5\ \mu\text{m}$ 以内的复盛型线, 验证了利用 NURBS 曲线进行螺杆转子反向设计的可行性。并利用 NURBS 曲线的局部修改性对型线进行性能优化, 使转子的泄露三角形面积减少了 5%, 面积利用系数上升了 1%。为双螺杆压缩机转子型线优化设计提供了一种理论和方法。

关键词: 螺杆转子型线; 啮合线法; NURBS; 性能优化

Abstract: The design method of screw rotor based on meshing method and NURBS curve is proposed. In the process of the designing, the formula of the quadrature was obtained. This paper solved the envelop condition of NURBS curve, and realizes the reverse design of the whole line of NURBS curve which was determined by the control point, weight factor and node vector. Through this method, the compound line of the error was obtained within $0.5\ \mu\text{m}$ microns and the relation between the performance and meshing lines is explored. The feasibility of reverse design of screw rotor by using NURBS curve was verified. Using the local modification of NURBS curve to optimize the type line, the leakage triangle area of the rotor was reduced by 5%, and the area utilization coefficient increased by 1%. The theory and method for the optimization design of rotor line of double screw compressor is provided.

Keywords: Screw rotor profile; meshing line method; NURBS; performance optimization

双螺杆压缩机因为性能优良、运行平稳、噪声低、体积

小、维护方便等, 被广泛应用于制冷^[1-2]、食品^[3-4]、石油、化工等行业, 其核心零件为内部的一对阴阳转子。转子型线作为螺杆转子形状的重要特征, 很大程度上决定了压缩机的工作性能及转子的加工制造性能。

目前转子型线的设计方法使用比较广泛的是正向设计: 首先设计出阴转子(或者阳转子)的型线, 再通过解析包络法推导出另一个转子的型线。Stosic 等^[5]根据齿条的啮合原理提出了由齿廓线到转子型线的设计方法, 并开发了 N 型线; Su 等^[6]设立转子接触线长度、泄露三角形面积等性能参数作为目标, 实现对转子型线的优化; Wu 等^[7]提出了基于标准齿条生成系统的螺杆转子轮廓设计方法, 并通过对比论证阐释了该方法的优越性; 何雪明等^[8]提出了以自由曲线作为组成曲线的转子设计方法, 丰富了转子型线线型的种类。

正向设计虽然比较成熟, 但要判断所设计的转子型线及压缩机性能的优劣, 必须在得到阴阳转子型线后, 继续推导得到啮合线再做出判断, 设计过程十分繁琐。针对正向设计的多个弊端, Zaytsev 等^[9-10]提出了反向设计转子型线的“啮合线法”, 该方法是从啮合线出发推导出转子轮廓线, 并通过实例验证了该方法的可行性; 卜啸华等^[11]推导了当啮合线曲线类型为圆弧、内摆线和外摆线时的螺杆转子型线计算公式; 何雪明等^[12]分别采用直线、圆弧、三次 B 样条曲线为啮合线段进行阴阳转子的反向设计。由此, 啮合线推导转子型线的反向设计方法逐渐发展起来。

在反向设计的线型选择方面, 现在已经发展到比较高级的 B 样条曲线, 但 B 样条曲线的根基是多项式参数曲线, 并不能表达基本的二次曲线, 如圆弧、椭圆弧等。而 NURBS 曲线拥有更高的自由度和局部修改性, 可以精确地表达圆弧、椭圆弧等二次曲线。本研究拟将 NURBS 曲线运用到反向设计中, 旨在实现设计曲线线型的统一, 并利用灵活的曲线修改手段进行转子型线优化设计。

1 啮合线法设计原理

已知双螺杆转子的啮合线的方程式是 x_0 、 y_0 关于参数 t

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(编号: 51275210)

作者简介: 黄海楠, 男, 江南大学在读硕士研究生。

通信作者: 何雪明(1966—), 男, 江南大学教授, 博士。

E-mail: hxuem2003@163.com

收稿日期: 2017-10-08

的方程,通过啮合线法求解转子轮廓线,需要建立如图1所示的坐标系,包括阳转子静坐标系 $O_1X_1Y_1$ 和阴转子静坐标系 $O_2X_2Y_2$ 、随转子转动的阳转子动坐标系 $O_1x_1y_1$ 和阴转子动坐标系 $O_2x_2y_2$,以及一个固结于机壳上的啮合线坐标系 $O_0x_0y_0$ 。其中阳转子逆时针转动,阴转子顺时针转动。图1中 R_{a1} 是阳转子齿顶圆半径, R_{f2} 是阴转子齿根圆半径,满足 $R_{a1} + R_{f2} = H$ 。以下下标为1都是指代阳转子坐标系中的参数,下标为2的指代阴转子坐标系中的参数。

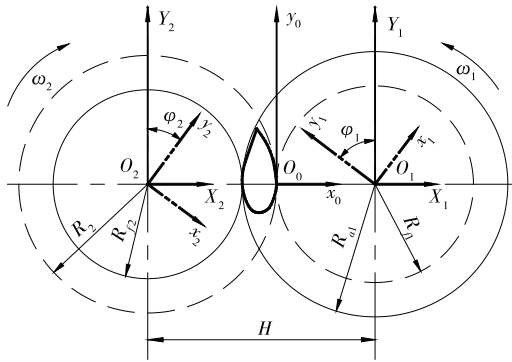


图1 转子法中的坐标关系

Figure 1 Relationships of coordinates in the rotor method

根据转子间的啮合传动原理可得:

$$\frac{\varphi_2}{\varphi_1} = \frac{n_2}{n_1} = \frac{\omega_2}{\omega_1} = \frac{R_1}{R_2} = \frac{z_1}{z_2} = i, \quad (1)$$

$$\varphi_1 + \varphi_2 = (1+i)\varphi_1 = k\varphi_1, \quad (2)$$

$$R_1 + R_2 = H, \quad (3)$$

式中:

φ_2, φ_1 ——阴、阳转子旋转角度, $(^\circ)$;

n_2, n_1 ——阴、阳转子的转速, r/min;

ω_2, ω_1 ——阴、阳转子转动角速度, rad/s;

R_2, R_1 ——阴、阳转子节圆半径, mm;

z_2, z_1 ——阴、阳转子齿数;

i ——阴转子和阳转子的传动比;

H ——阴、阳转子中心距, mm。

根据上述的等式以及坐标转动中的几何关系,可以推导出下列几项坐标系之间的变换关系:

(1) 阳转子动坐标系 $O_1x_1y_1$ 与啮合线坐标系 $O_0x_0y_0$ 关系:

$$\begin{cases} x_1 = x_0 \cos \varphi_1 + y_0 \sin \varphi_1 - R_1 \cos \varphi_1; \\ y_1 = -x_0 \sin \varphi_1 + y_0 \cos \varphi_1 + R_1 \sin \varphi_1. \end{cases} \quad (4)$$

(2) 阴转子动坐标系 $O_2x_2y_2$ 与阳转子动坐标系 $O_1x_1y_1$ 之间的变换关系:

$$\begin{cases} x_2 = x_1 \cos k\varphi_1 - y_1 \sin k\varphi_1 + H \cos i\varphi_1; \\ y_2 = x_1 \sin k\varphi_1 + y_1 \cos k\varphi_1 + H \sin i\varphi_1. \end{cases} \quad (5)$$

根据包络条件可以得到 φ_1 关于参数 t 的等式^[13]:

$$\varphi_1 = -\int_{t_0}^t \frac{y_0 y_0' + x_0 x_0'}{R_1 y_0} dt + \varphi_0. \quad (6)$$

2 啮合线法的 NURBS 曲线包络条件

2.1 包络条件的求解

一段 k 次 NURBS 曲线的函数定义为^[14]:

$$C(u) = \frac{\sum_{i=0}^n N_{i,k}(u) w_i P_i}{\sum_{i=0}^n N_{i,k}(u) w_i} \quad (a \leq u \leq b), \quad (7)$$

式中:

k ——曲线次数;

P_i ——控制点;

w_i ——控制点 P_i 的权因子, 决定了控制点偏离曲线的程度, 所有 $w_i > 0$;

$N_{i,k}(u)$ ——定义在非周期且非均匀节点矢量 $U = \{a, \dots, a, u_{k+1}, \dots, u_{m-p-1}, b, \dots, b\}$ 上的 k 次 B 样条基函数。

一段啮合线的 NURBS 曲线段的参数方程为:

$$\begin{cases} x_0 = C_x(u); \\ y_0 = C_y(u), \end{cases} \quad 0 \leq u \leq 1. \quad (8)$$

将式(8)代入式(6)中可以得到:

$$\varphi_1 = -\int_0^u \frac{C_y(u)C_y'(u) + C_x(u)C_x'(u)}{R_1 C_y(u)} dt + \varphi_0. \quad (9)$$

$$\text{令 } f(u) = \frac{C_y(u)C_y'(u) + C_x(u)C_x'(u)}{C_y(u)}, \text{ 则:}$$

$$\varphi_1 = -\frac{1}{R_1} \int_0^u f(u) dt + \varphi_0. \quad (10)$$

φ_0 是啮合的起始角度, 对于啮合线的第一段曲线, 取 $\varphi_0 = 0$ 。

若啮合线段上的点在 x 轴上, 则 $C_y(u_0) = 0$, 该点为函数 $f(u)$ 的第一类间断点。根据啮合线设计要求, 啮合线上经过 x 轴的点必须满足 $C_x(u_0) = 0$ 或者 $C_x'(u_0) = 0$, 此时 $f(u)$ 是“0/0”型不定式极限, 在该点的函数值可采用极限值代替进行求解。利用洛必达法则可得:

$$f(u) = \begin{cases} \lim_{u \rightarrow u_0} \frac{C_x(u)C_x'(u) + C_y(u)C_y'(u)}{C_y(u)} = \\ \lim_{u \rightarrow u_0} \frac{C_x'(u)C_x'(u)}{C_y'(u)} + \lim_{u \rightarrow u_0} C_y'(u) \\ \lim_{u \rightarrow u_0} \frac{C_x(u)C_x'(u) + C_y(u)C_y'(u)}{C_y(u)} = \\ \lim_{u \rightarrow u_0} \frac{C_x(u)C_x''(u)}{C_y'(u)} + \lim_{u \rightarrow u_0} C_y'(u) \end{cases}. \quad (11)$$

由于被积函数 $f(u)$ 的原函数无法用初等函数表达, 因此需要采用数值积分法, 本设计方法采用的是龙贝格(Romberg)求积公式^[15-16], 也称为逐次分半加速法。龙贝格求积公式用的是一种外推算法, 相比于其他计算方式, 其计算量相对较小、精度较高, 且易于编程计算。龙贝格求积公式为:

$$T_m^{(k)} = \frac{4^m T_{m-1}^{(k+1)} - T_{m-1}^{(k)}}{4^m - 1} \quad (m=1, 2, \dots, k=0, 1, 2, \dots), \quad (12)$$

其中两个初始值的计算公式为:

$$T_0^{(0)} = \frac{h}{2} [f(a) + f(b)], \quad (13)$$

$$T_0^{(k)} = \frac{1}{2} \left\{ T_0^{(k-1)} + h \sum_{i=0}^{2k-1} f[a + (i + \frac{1}{2})h] \right\}. \quad (14)$$

由此得到 φ_1 值后,再将值代入式(4)、(5)就得到了阴转子和阳转子对应的齿曲线段。

2.2 NURBS 曲线的求导

对 $f(u)$ 求解需要对 NURBS 进行一阶和二阶求导,有理函数的求导比较复杂,牵涉到分母的高次幂,以下探讨对 NURBS 的求导过程。令 $A(u) = \sum_{i=0}^n N_{i,p}(u)w_i P_i$, $K(u) = \sum_{i=0}^n N_{i,p}(u)w_i$, NURBS 曲线 $C(u)$ 的一阶导数和二阶导数可由式(15)、(16)求得:

$$C'(u) = \frac{K(u)A'(u) - K'(u)A(u)}{K(u)^2} =$$

$$\frac{K(u)A'(u) - K'(u)K(u)C(u)}{K(u)^2} = \frac{A'(u) - K'(u)C(u)}{K(u)}, \quad (15)$$

$$C''(u) = \frac{A''(u) - \sum_{i=1}^2 \binom{2}{i} K^{(i)}(u)C^{(2-i)}(u)}{K(u)} =$$

$$\frac{A''(u) - 2K'(u)C'(u) - K''(u)C(u)}{K(u)}. \quad (16)$$

而 $A(u)$ 与 $K(u)$ 的导数都可以转换成关于基函数的导数,由式(17)~(20)求得:

$$A'(u) = \sum_{i=0}^n N'_{i,k}(u)w_i P_i, \quad (17)$$

$$K'(u) = \sum_{i=0}^n N'_{i,k}(u)w_i, \quad (18)$$

$$A''(u) = \sum_{i=0}^n N''_{i,p}(u)w_i P_i, \quad (19)$$

$$K''(u) = \sum_{i=0}^n N''_{i,p}(u)w_i. \quad (20)$$

式(17)~(20)中的基函数的一阶导数和二阶导数可以由式(21)求得。

$$N'_{i,k}(u) = \frac{k}{u_{i+k} - u_i} N_{i,k-1}(u) - \frac{k}{u_{i+k+1} - u_{i+1}} N_{i+1,k-1}(u), \quad (21)$$

$$N''_{i,p}(u) = \frac{p}{p-2} \left[\frac{u - u_i}{u_{i+p} - u_i} N''_{i,p-1}(u) - \frac{u_{i+p+1} - u}{u_{i+p+1} - u_{i+1}} N''_{i+1,p-1}(u) \right]. \quad (22)$$

可以看到式(21)~(22)是类似于求解基函数的一个递推公式,可以从低到高一阶一阶地计算出基函数导数的值。由此便可计算出 NURBS 曲线的一阶导数和二阶导数。

3 NURBS 曲线啮合线的设计与优化

本研究针对用 NURBS 曲线对复盛型线^[17]的啮合线进行反向设计,并通过误差分析,验证基于 NURBS 曲线的反向设计方法的可行性,并在此基础上,利用 NUBRS 的局部可调性对啮合线进行了优化设计。

3.1 NURBS 曲线啮合线设计流程

NURBS 曲线设计啮合线设计流程如图 2 所示,首先必须确定阴阳转子的中心距,然后利用 NURBS 直接设计出啮合线,根据 NURBS 曲线的数据推导出阴、阳转子型线数据,如果符合设计要求,则输出型线数据,不符合则需要修改设计参数,重新计算。

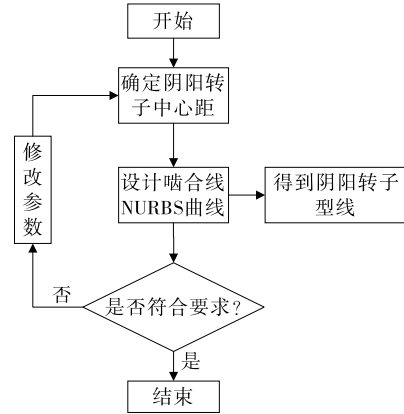


图 2 NURBS 曲线反向设计流程

Figure 2 Reverse design process with NURBS curve

3.2 复盛型线的反向设计

复盛型线转子型线由圆弧、椭圆弧及其对应的包络线设计而成,见图 3。圆弧以参数方程的形式表达为:

$$\begin{cases} x = r \cos t + c_1; \\ y = r \sin t + c_2, \end{cases} \quad (23)$$

式中:

r ——圆弧的半径,mm;

c_1, c_2 ——圆心横坐标和纵坐标,mm。

椭圆弧以参数方程的形式表达为:

$$\begin{cases} x = a \cos t + c_1; \\ y = b \sin t + c_2, \end{cases} \quad (24)$$

式中:

a, b ——椭圆的长短轴长,mm;

c_1, c_2 ——椭圆中心横坐标和纵坐标,mm。

复盛型线的各段齿曲线的详细设计参数见表 1。其啮合线由阴阳转子齿曲线通过啮合条件式计算所得,表 2 给出了啮合曲线段和转子齿曲线段的对应关系,生成的啮合线见图 4。

根据复盛的啮合线数据,利用高精度的 NURBS 曲线来代替原有的啮合线[见图 5(a)~(d)]进而得到了该啮合线每一段的控制点与权因子;然后将每一段啮合线的端点作为 NURBS 曲线的节点,利用累积弦长法计算出整段型线的节点矢量,使其成为一段式的啮合线[见图 5(e)],最终设计的这段啮合线只由控制点、权因子和节点矢量决定。进一步利用上文推出的 NURBS 曲线包络条件,得到了对应的阴阳转子型线,生成的型线误差数据见表 3。

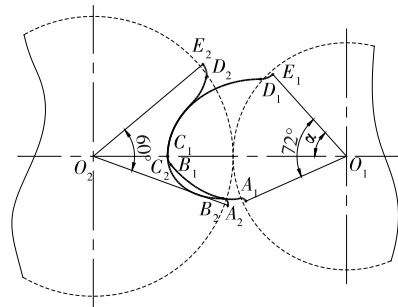


图 3 复盛型线转子型线

Figure 3 Rotor lines of Fusheng Profile

分析表3中数据可以发现:啮合线的最大精度误差出现在 A_0B_0 段,为 $0.092\text{ }\mu\text{m}$;阳转子的最大精度误差在 D_1E_1 段,为 $0.442\text{ }\mu\text{m}$;阴转子的最大精度误差出现在 D_2E_2 段,为 $0.443\text{ }\mu\text{m}$ 。可以看出虽然各部分都存在精度误差,但都控制在 $0.5\text{ }\mu\text{m}$ 以下,是能接受的范围。所以该实例验证了结合NURBS曲线和啮合线法设计转子型线方法的可行性。

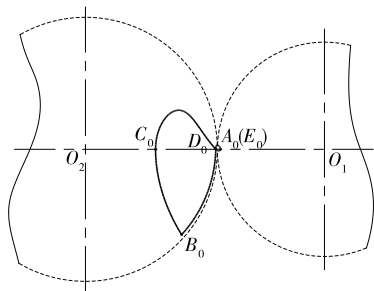


图4 复盛型线啮合线
Figure 4 Meshing lines of Fusheng Profile

表1 复盛型线各段参数取值

Table 1 Value of the parameters of the Fusheng Profile

曲线性质	$R(\text{或 } a, b)$	c_1	c_2	t
A_2B_2 段 圆弧	1.650	41.990	-15.280	$[-0.349, 1.601]$
B_1C_1 段 圆弧	3.992	28.047	0.000	$[3.142, 3.838]$
C_1D_1 段 椭圆弧	30.032, 24.967	54.117	0.000	$[1.571, 3.142]$
D_1E_1 段 圆弧	6.000	54.117	30.967	$[4.712, 5.445]$

表2 复盛型线设计相关数据

Table 2 Design relevant data of Fusheng Profile

段标	阴转子		阳转子		啮合线
	齿曲线	曲线性质	齿曲线	曲线性质	对应齿曲线
1	A_2B_2	圆弧	A_1B_1	圆弧包络线	A_0B_0
2	B_2C_2	圆弧包络线	B_1C_1	圆弧	B_0C_0
3	C_2D_2	椭圆弧包络线	C_1D_1	椭圆弧	C_0D_0
4	D_2E_2	圆弧包络线	D_1E_1	圆弧	D_0E_0
阴阳转子齿数比 $1/i$			6/5		
中心距 H/mm			82		
角度 $\alpha/(\text{ }^\circ)$			48		

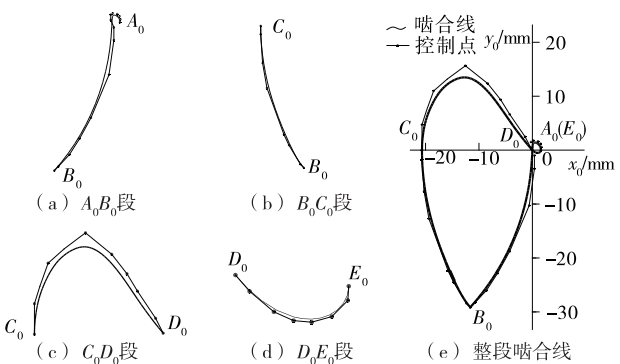


图5 获取复盛啮合线的NURBS曲线参数过程
Figure 5 Process of obtaining the NURBS curve parameters of the complex meshing line is obtained

表3 NURBS曲线啮合线误差数据

Table 3 Error data of NURBS curve meshing line

齿曲线	啮合线		阳转子		阴转子	
	控制点数	精度误差/ μm	对应线段	精度误差/ μm	对应线段	精度误差/ μm
A_0B_0	51	0.092	A_1B_1	0.296	A_2B_2	0.028
B_0C_0	7	0.088	B_1C_1	0.028	B_2C_2	0.095
C_0D_0	28	0.076	C_1D_1	0.387	C_2D_2	0.388
D_0E_0	14	0.018	D_1E_1	0.442	D_2E_2	0.443

3.3 啮合线的优化

根据NURBS曲线的局部修改性,通过移动控制点可以调整啮合线形状,对啮合线进行优化。对啮合线中 b 、 c 、 d 3点进行了微调,阴阳转子的齿曲线发生相应的变化,见图6;转子型线性能参数发生相应的变化,其规律总结见表4^[13]。所以可以根据这些变化规律对啮合线的线段进行修改,以达到优化型线性能的目的。

在不改变原有转子结构的情况下,如阴阳转子的齿顶圆弧大小、齿数比等参数,主要以减小泄漏三角形的面积和增大面积利用系数为目标对型线进行优化。即不移动图6中的 c 点位置,变化 b 和 d 2点的位置。根据表4的规律,将啮合线的控制点 a_5 、 a_6 和 $b_1 \sim b_4$ 向外移动,使得啮合线交点下

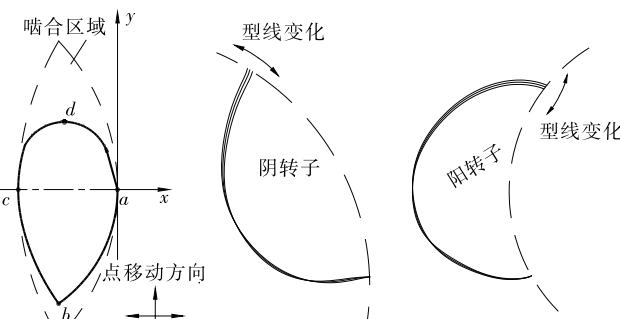


图6 啮合线顶点与阴阳转子型线变化关系
Figure 6 Relationship between the vertices of the meshing line and the yin-yang rotor line

表4 型线性能参数与各顶点移动方向关系[†]

Table 4 Relationship between the linear performance parameters and the direction of each vertex movement

性能参数		移动方向		
		b	c	d
齿心角增加	阴/阳	$+x/+y$	$-x$	$+x/-y$
齿厚增加	阴	$-x/-y$	$+x$	$-x/+y$
	阳	$+x/+y$	$-x$	$+x/-y$
面积利用系数增加	/	$+x/+y$	$-x$	$+x/-y$

[†] “阴”表示阴转子,“阳”表示阳转子,“ $+x$ ”表示向 x 轴正方向移动,“ $-x$ ”表示向 x 轴负方向移动,“ $+y$ ”、“ $-y$ ”拥有类似的含义。

移,但不能超过阴阳转子齿顶圆的范围;然后移动控制点 $c_2 \sim c_5$,使得啮合线最高点下移,控制点移动对比见图 7。优化啮合线后,阴阳转子齿曲线也发生了相应的变化,优化前后的对比见图 8。阵列优化后的阴阳转子齿曲线得到完整的转子型线,见图 9。

将优化前后的转子性能参数进行整理得到表 5。由表 5 可知,优化后的型线增加了阴转子的厚度,阴转子的齿间面积减少了 16.212 mm^2 ,但阳转子齿间面积增加了 32.678 mm^2 ,所以面积利用系数提高了 1% ,而泄漏三角形的面积减少了 5% 。综上,优化后的转子性能得到了提升。

4 结论

(1) 利用龙贝格求积公式来解决啮合线法中原函数不

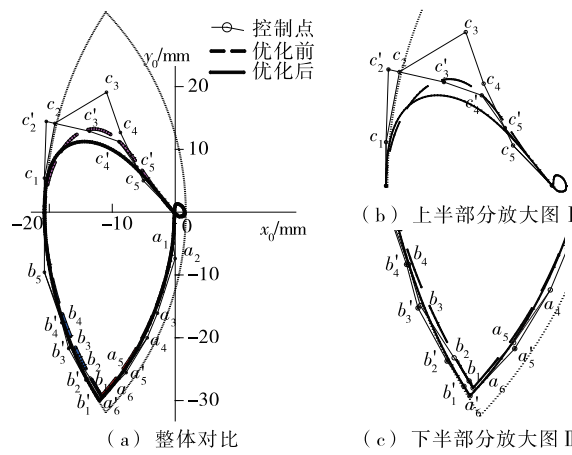


图 7 型线改进优化前后控制点对比

Figure 7 Comparison of control points before and after optimization of meshing lines

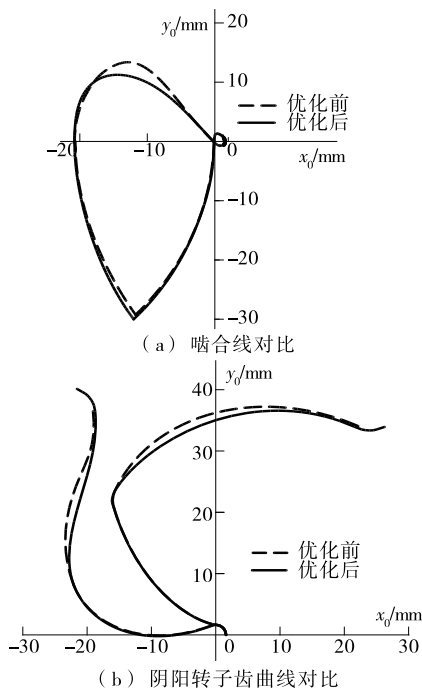


图 8 型线优化前后对比

Figure 8 Comparison of line optimization before and after optimization

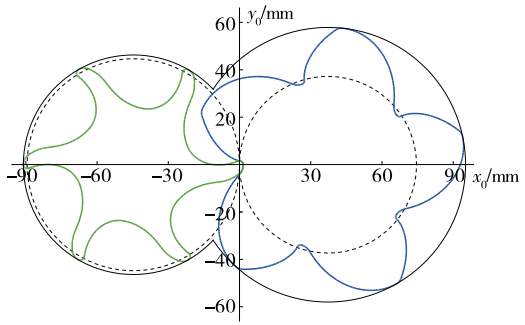


图 9 优化后的阴阳转子型线

Figure 9 Yin-yang rotor profile after optimization

表 5 优化前后性能参数对比

Table 5 Comparison of performance parameters before and after optimization

型线	泄漏三角形 面积/ mm^2	阳转子齿间 面积/ mm^2	阴转子齿间 面积/ mm^2	面积利 用系数
改进前	4.259	600.742	618.982	0.45
改进后	4.236	633.420	602.770	0.46

能用初等函数表达的问题,实现了 NURBS 曲线的反向型线设计。

(2) 针对典型型线复盛型线的啮合线进行反向设计,啮合线用一整段 NURBS 曲线表达,只由控制点、权因子和节点矢量决定,得到了误差在 $0.5 \mu\text{m}$ 以内的型线,验证了用 NURBS 进行型线设计的可行性。增添了双螺杆压缩机转子型线设计的曲线类型。

(3) 根据啮合线顶点与型线性能的变化关系,利用 NURBS 曲线的局部修改性对型线进行优化。最终得到优化后的型线,增加了阴转子齿厚,增大了面积利用系数,减小了泄漏三角形的面积,整体性能得到了提升。

(4) 结合 NURBS 曲线和“啮合线法”反向设计转子型线,优势在于 NURBS 曲线的便捷的局部调整性,目前该方法只通过调整控制点的方式调控曲线,为了最大化利用 NURBS 曲线的形状调整工具,今后应将调整权因子的手段添加进来。

(5) 螺杆压缩机转子对加工精度要求非常高,所以在制造过程中应选择高精度的铣削或磨削加工方式,在加工过程中应特别关注可避免的加工误差的产生,如刀具的安装、磨损等产生的加工误差。

参考文献

[1] 郭耀君, 谢晶, 朱世新, 等. 超低温制冷装置的研究现状和进展[J]. 食品与机械, 2015, 31(1): 238-243.
[2] STOSIC N, SMITH I K, KOVACEVIC A. A twin screw combined compressor and expander for CO_2 refrigeration systems [C] // STOSIC N. International Compressor Engineering Conference, Proceedings of the 2002. Purdue: Purdue University, 2002: 1 591-1 594.

(下转第 145 页)

从图 3 可以看出,本算法完成各种漏检率所消耗的时间最少,能够解决苹果检测数据处理量大和检测实时性之间的矛盾。

4 结论

(1) 针对基于智能算法苹果表面缺陷识别过程中存在的问题,本试验提出一种基于改进粒子群算法的苹果表面缺陷识别方法。通过缺陷区域选择、定位、阈值分割,然后用改进粒子群算法获得最优分割阈值。试验结果表明,能够识别各种缺陷,漏检率较低,说明该方法在缺陷苹果识别中十分有效。

(2) 在苹果表面缺陷的分割图像中,存在多个分割阈值,采用改进粒子群算法能够计算出最优分割阈值,避免了非最优分割阈值的存在,大大地提高了识别结果。

(3) 本试验只是针对苹果表面缺陷进行检测,并未对缺陷作进一步分类,这将是今后研究的一个方向。

参考文献

- [1] 程荣花, 马飞, 石梦. 基于颜色特征的苹果表面质量检测系统设计与实现[J]. 辽宁农业科学, 2014(3): 22-24.
- [2] 李丽娜, 赵武奇, 曾祥源. 苹果的质构与感官评定相关性研究[J]. 食品与机械, 2017, 33(6): 37-41.
- [3] 项辉宇, 薛真, 冷崇杰, 等. 基于 Halcon 的苹果品质视觉检测试验研究[J]. 食品与机械, 2016, 32(10): 123-126.
- [4] 刘燕妮, 张贵仓, 安静. 基于数学形态学的双直方图均衡化图像增强算法[J]. 计算机工程, 2016, 42(1): 215-219.
- [5] 唐伟伟, 陆海林, 葛俊祥. 基于 Prewitt 算子的抗雷达同频干扰法设计与 FPGA 实现[J]. 科学技术与工程, 2015, 15(27): 42-47.
- [6] 文永革, 何红洲, 李海洋. 一种改进的 Roberts 和灰色关联分析的边缘检测算法[J]. 图学学报, 2014, 34(4): 637-641.
- [7] 陈汉武, 朱建锋, 阮越, 等. 带交叉算子的量子粒子群优化算法[J]. 东南大学学报: 自然科学版, 2016, 46(1): 23-29.
- [8] 王飞. 带时间窗车辆调度问题的改进粒子群算法[J]. 计算机工程与应用, 2014, 50(6): 226-229.
- [9] 杨进, 高飞, 马良. 基于改进并行粒子群算法的彩色图像匹配[J]. 计算机应用研究, 2015, 33(10): 35-42.
- [10] 白晓波, 吉晓民, 胡月. 多工况条件下滚针轴承的改进粒子群优化方法[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2014, 26(10): 1 900-1 908.
- [11] 张聪, 汤伟. 基于粒子群优化算法与形态学的纸病图像检测方法[J]. 造纸科学与技术, 2014, 33(2): 60-64.
- [12] 刘慧忠, 汤伟. 基于 FPGA 的纸病检测预处理算法的实现[J]. 中国造纸学报, 2014, 29(1): 53-57.
- [13] 吴一全, 王凯, 曹鹏祥. 蜂群优化的二维非对称 Tsallis 交叉熵图像阈值选取[J]. 智能系统学报, 2015, 10(1): 103-112.
- [14] 王晓文, 张俊伟. TTC 应用于食品菌落总数测定的研究[J]. 辽宁大学学报: 自然科学版, 2011, 38(1): 86-89.
- [15] 曹杨. 纸片法测定细菌总数——TTC 显色浓度试验[J]. 江苏食品与发酵, 2008(4): 39-40.
- [16] 刘睿哲. 食品菌落总数测定中 TTC 做显色剂的探索[J]. 产业与科技论坛, 2011, 10(20): 64-65.
- [17] 贾振宇, 崔英德, 黎新明, 等. 聚丙烯酸钠高吸水性树脂的改性研究进展[J]. 化工进展, 2004, 23(5): 468-471.
- [18] 王静, 陈萍, 任常菲. 以冷水溶性凝胶为载体的细菌快速检测纸片的凝胶剂优化[J]. 卫生研究, 2012, 41(2): 300-302.
- [19] 廖茂彬, 陈向标, 赖明河. 食品中菌落总数的国标法测定注意事项及微生物快速测试卡法检测[J]. 中国食品与营养, 2013, 19(7): 16-18.
- [20] 傅延振, 林雨晨. 无油空压机技术为食品行业带来纯净气源[J]. 食品安全导刊, 2016(7): 72-73.
- [21] 阿特拉斯-科普柯公司. 阿特拉斯-科普柯公司在中国推出全新系列高效能压缩机[J]. 包装与食品机械, 2012, 30(6): 70.
- [22] STOSIC N, SMITH I K, KOVACEVIC A. Screw compressors: Mathematical modeling and performance calculation[M]. Berlin: Springer, 2005: 32-34.
- [23] SU Shyh-haur, TSENG Ching-huan. Synthesis and optimization for rotor profiles in twin rotor screw compressors[J]. Journal of Mechanical Design, 2000, 122(4): 543-552.
- [24] WU Yu-ren, FONG Zhang-hua. Rotor profile design for the twin-screw compressor based on the normal-rack generation method[J]. Journal of Mechanical Design, 2008, 130(4): 42 601-42 608.
- [25] 何雪明, 戴进, 刘洪园. 基于自由曲线的螺杆转子型线的正反向设计[J]. 中国机械工程, 2012, 23(22): 2 752-2 757.
- [26] ZAYTSEV D, FERRIRA C A I. Profile generation method for twin screw compressor rotors based on the meshing line[J]. International Journal of Refrigeration, 2005(28): 744-755.
- [27] ZAYTSEV D, FERRIRA C A I. Screw compressor rotor profile generation method based on pre-defined meshing line[C]// 3rd International Compressor Technique Conference (ICTC 2001). Wuxi: [s.n.], 2001: 117-127.
- [28] 卜啸华, 邹友金, 孟尔镛. 螺杆压缩机型线设计的逆命题法[J]. 上海理工大学学报, 1986(3): 43-51.
- [29] 何雪明, 童洁, 戴进, 等. 双螺杆转子型线的反向优化设计及应用[J]. 机械设计与研究, 2015, 31(4): 151-157.
- [30] 何雪明, 姜振钢, 武美萍, 等. 双螺杆压缩机转子啮合线与型线关系研究[J]. 中国机械工程, 2017, 28(7): 763-770.
- [31] PIEGL L A, TILLER W. 非均匀有理 B 样条[M]. 2 版. 赵罡, 穆国旺, 王拉柱, 等, 译. 北京: 清华大学出版社, 2010: 86-93.
- [32] 邢诚, 王建强, 贾志强, 等. 多种数值积分方法比较分析[J]. 城市勘测, 2010(1): 104-106.
- [33] 刘玉娟, 陈应祖, 卢克功. 龙贝格积分法及其应用编程[J]. 重庆科技学院学报: 自然科学版, 2007, 9(1): 97-99.
- [34] LEE H T. Screw-rotor machine with an ellipse as a part of its male rotor: US, A4890992[P]. 1990-01-02.

(上接第 85 页)

(上接第 97 页)