

(12) 按照专利合作条约所公布的国际申请

(19) 世界知识产权组织
国际局

(43) 国际公布日
2019 年 6 月 27 日 (27.06.2019)



(10) 国际公布号
WO 2019/119503 A1

- (51) 国际专利分类号:
F04C 2/16 (2006.01) *F04C 18/16* (2006.01)
- (21) 国际申请号: PCT/CN2017/119422
- (22) 国际申请日: 2017 年 12 月 28 日 (28.12.2017)
- (25) 申请语言: 中文
- (26) 公布语言: 中文
- (30) 优先权:
201711371154.1 2017 年 12 月 19 日 (19.12.2017) CN
- (71) 申请人: 江南大学(JIANGNAN UNIVERSITY) [CN/CN]; 中国江苏省无锡市蠡湖大道 1800 号耿晓岳, Jiangsu 214122 (CN)。
- (72) 发明人: 何雪明(HE, Xueming); 中国江苏省无锡市蠡湖大道 1800 号耿晓岳, Jiangsu 214122 (CN)。
施国江(SHI, Guojang); 中国江苏省无锡市蠡

湖大道 1800 号耿晓岳, Jiangsu 214122 (CN)。黄涛涛(HUANG, Taotao); 中国江苏省无锡市蠡湖大道 1800 号耿晓岳, Jiangsu 214122 (CN)。黄海楠(HUANG, Hainan); 中国江苏省无锡市蠡湖大道 1800 号耿晓岳, Jiangsu 214122 (CN)。陈小飞(CHEN, Xiaofei); 中国江苏省无锡市蠡湖大道 1800 号耿晓岳, Jiangsu 214122 (CN)。

(74) 代理人: 哈尔滨市阳光惠远知识产权代理有限公司(HARBIN SHINEIP INTELLECTUAL PROPERTY AGENCY CO., LTD.); 中国黑龙江省哈尔滨市松北区科技一街 99 号 18 栋 E501 耿晓岳, Heilongjiang 150028 (CN)。

(81) 指定国(除另有指明, 要求每一种可提供的国家保护): AE, AG, AL, AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BN, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DJ, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB,

(54) Title: METHOD FOR MODIFYING PERFORMANCE OF ROTOR PROFILE BY ADJUSTING MESHING LINE SEGMENTS

(54) 发明名称: 一种调节啮合线段修改转子型线性能的方法

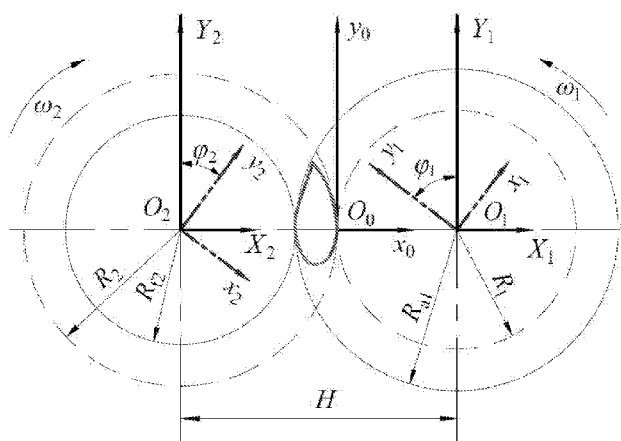


图 1

(57) Abstract: A method for modifying performance of a rotor profile by adjusting meshing line segments, comprising the following steps: step 1, dividing a meshing line of a bilateral profile into 8 functional segments; step 2, constructing each functional segment by using a cubic NURBS curve; and step 3, locally adjusting the functional segments of the meshing line by adjusting a control point or a weight factor of the NURBS curve, and observing the corresponding change of the rotor profile so as to adjust corresponding geometrical parameters. The method is flexible and convenient in design means, the change of the profile is controlled by adjusting the free curve, and the change trend of the male and female rotor profiles, particularly the change trend of the leakage triangle, the contact line length, the inter-tooth space and the area utilization coefficient, is observed by locally adjusting the meshing line with reference to the correspondence between the meshing line and the rotor profile, so that the design efficiency of the rotor profile of a twin-rotor screw compressor can be improved, and therefore the defect that a profile cannot be locally modified in the conventional rotor profile design can be overcome.

GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IR, IS, JO, JP, KE, KG, KH, KN, KP, KR, KW, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LU, LY, MA, MD, ME, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PA, PE, PG, PH, PL, PT, QA, RO, RS, RU, RW, SA, SC, SD, SE, SG, SK, SL, SM, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, ZA, ZM, ZW。

(84) 指定国 (除另有指明, 要求每一种可提供的地区保护): ARIPO (BW, GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ, NA, RW, SD, SL, ST, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), 欧亚 (AM, AZ, BY, KG, KZ, RU, TJ, TM), 欧洲 (AL, AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, MK, MT, NL, NO, PL, PT, RO, RS, SE, SI, SK, SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, KM, ML, MR, NE, SN, TD, TG)。

本国际公布:

— 包括国际检索报告 (条约第21条(3))。

(57) 摘要: 一种调节啮合线段修改转子型线性能的方法, 包括以下步骤: 步骤1、将双边型线的啮合线分成8个功能段; 步骤2、每个功能段利用三次NURBS曲线进行架构; 步骤3、通过调整NURBS曲线的控制点或权因子来局部调整啮合线功能段, 观测相应的转子型线变化, 从而调整相应的几何参数。该方法设计手段灵活方便, 通过调节自由曲线来控制型线变化, 结合啮合线与转子型线的对应关系, 局部调整啮合线观测对应的阴阳转子型线变化趋势, 特别是泄漏三角形、接触线长度、齿间面积以及面积利用系数的变化情况, 提升双螺杆压缩机转子型线的设计效率, 避免了以往转子型线设计不能局部修改型线的弊端。

一种调节啮合线段修改转子型线性能的方法

技术领域

本发明属于压缩机技术领域，特别是涉及一种调节啮合线段修改转子型线性能的方法。

背景技术

螺杆转子型线从发展之初，就有学者一直在探索其新的设计方法和计算方式。就设计方法而言，根据初始设计对象的不同一般可分两种：正向设计和反向设计。在螺杆式压缩机出现之后的几十年里，人们基本上采用的都是正向设计方法，即从一个螺杆转子型线的已知数据，推导计算出另一个螺杆转子的型线。正向设计理论目前已经很成熟，但是压缩机的工作性能无法直接通过转子型线预知，必须通过阴阳转子的啮合线才能判断，若要获得一条完整的性能较好的螺杆转子型线通常需要经历反复修改与验证，整个设计过程十分繁杂。良好的转子型线应具备较大的流动横截面积、较短的空间接触线和较小的泄漏三角形，而这些几何性能参数可以通过调整啮合线来直观地观测其大小变化。目前转子型线的设计和优化大都局限于采用点、直线和二次曲线等简单曲线，生成的螺杆转子流线型不好，造成压缩机在运转过程中出现较大的气动损失，而且在正、反向设计中不易于调整局部曲线来达到优化曲线的目的。现有的螺杆转子型线设计方法仍然集中于正向设计，对于反向设计过程的探索很少，没能将啮合线进行系统的划分，研究啮合线的局部变化对转子型线变化规律的影响。

发明内容

本发明为了解决现有的技术问题，提出一种调节啮合线段修改转子型线性能的方法。本发明根据设计要求在螺杆转子型线反向设计过程中局部调整啮合线来实时观测流动横截面积、空间接触线和泄漏三角形的大小变化，以便对转子型线进行优化设计。

本发明的目的通过以下技术方案实现：一种调节啮合线段修改转子型线性能的方法，包括以下步骤：

步骤 1、将双边型线的啮合线分成 8 个功能段；

步骤 2、每个功能段利用三次 NURBS 曲线进行架构；

步骤 3、通过调整 NURBS 曲线的控制点或权因子来局部调整啮合线功能段，观测相应的转子型线变化，从而调整相应的几何参数。

进一步地，所述 8 个功能段包括 af 、 fo_0 、 o_0b 、 bc 、 cd 、 do_0 、 o_0e 、 ea ，其中， a 点为啮合线与 x_0 轴在最右侧交点，即阴转子齿顶圆与阳转子齿根圆的相切点， b 点为啮合线在

第III象限的最低点, c 点为啮合线上在水平方向上距离坐标原点 O_0 最远的点, 即阳转子齿顶圆与阴转子齿根圆相切点, d 点为啮合线在第II象限的最高点, e 点为啮合线在第IV象限的最低点, f 点为啮合线在第I象限的最高点。

进一步地, 所述步骤2具体包括以下步骤:

步骤2.1、建立反向设计坐标系, 确立阴阳转子坐标系与啮合线静坐标系之间的转换关系式;

步骤2.2、根据齿廓法线法, 确立啮合条件关系式, 建立转子转角与设计参数之间的一一映射关系, 即包络条件式:

$$\varphi_1 = -\int_{t_0}^t \frac{y_0 y_0' + x_0 x_0'}{R_1 y_0} dt + \varphi_0$$

式中, R_1 为阳转子节圆半径; φ_1 为阳转子初始转过的角度, 称为转角参数; φ_0 为常数, 是上一段曲线终点的积分结果, 对于啮合线的第一段曲线, 是啮合的起始角度, 取 $\varphi_0 = 0$;

步骤2.3、设计啮合线三次 NURBS 样条曲线段, 其参数方程通过指定的型值点和两端点处的导矢插值得到; 设定一段啮合线的 NURBS 曲线段的参数方程为:

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

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

其中, k 是曲线次数; P_i 为控制点, 数量为 $n+1$ 个; w_i

是控制点 P_i 的权因子, 决定了控制点偏离曲线的程度, 且所有 $w_i > 0$; $N_{i,k}(u)$ 是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, 数量为 $m+1$ 个, 其中 a 、 b 的个数为 $k+1$ 个, 且 $m = n + k + 1$; 取 $a = 0$, $b = 1$;

将参数方程代入包络条件式中可以得到如下式子:

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

$$\text{令 } f(u) = \frac{C_y(u)C_y'(u) + C_x(u)C_x'(u)}{C_y(u)}, \text{ 则: } \varphi_1 = -\frac{1}{R_1} \int_0^u f(u) dt + \varphi_0;$$

将啮合线上任意一点的数值积分结果代入到啮合条件关系式即可得到转子转角与设计参

数之间的一一映射关系;

步骤 2.4、联立啮合条件关系式和阴阳转子转动坐标系与啮合线静坐标系之间转换关系式, 从而得到 NURBS 样条曲线段啮合线对应的阴、阳转子型线方程。

进一步地, 所述 $f(u)$ 利用龙贝格求积公式进行求解, 龙贝格求积公式为:

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

式中, $T_m^{(k)} = I_{m+1}(\frac{b-a}{2^k})$; $I = \int_a^b f(u)dx$, 将区间 $[a, b]$ 分成 2^k 等分;

具体步骤如下:

A. 根据 NURBS 曲线参数方程确定啮合线段上相应的被积函数 $f(u)$, 并令 $a=0$ 和 $b=u$, 以及设置求解精度 ε ;

B. 设置初始步长 $h=b-a$, $T_0^{(0)} = \frac{h}{2}[f(a)+f(b)]$, 并初始化 $k=1$;

C. 计算迭代公式, 利用公式计算:

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

然后再依次计算:

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

D. 判断是否达到精度要求, 通过比较判断前后迭代结果差值是否小于精度值, 即 $|T_m^{(0)} - T_{m-1}^{(0)}| < \varepsilon$; 若满足要求, 则停止计算, 输出 $T_k^{(0)}$; 若不满足要求, 则令 $h = \frac{h}{2}, k = k+1$, 然后返回第 C 步;

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 $C'_x(u_0)=0$, 在该点的函数值采用极限值代替进行求解; 利用洛必达法则可得:

$$f(u) = \begin{cases} \lim_{u \rightarrow u_0} \frac{C_x(u)C'_x(u) + C_y(u)C'_y(u)}{C_y(u)} = \frac{C'_x(u)C'_x(u)}{C'_y(u)} + C'_y(u), & C_x(u_0)=0 \\ \lim_{u \rightarrow u_0} \frac{C_x(u)C'_x(u) + C_y(u)C'_y(u)}{C_y(u)} = \frac{C_x(u)C''_x(u)}{C'_y(u)} + C'_y(u), & C'_x(u_0)=0 \end{cases}.$$

进一步地, 所述步骤 3 具体为: 分别调节 af 、 fo_0 、 o_0b 、 bc 、 cd 、 do_0 、 o_0e 、 ea 共 8

个啮合线功能段的控制顶点来观测相应的转子型线变化，或微调每个功能段 NURBS 曲线控制点的权因子 w_i 来控制啮合线局部曲线变化量，从而调节转子型线并观测泄漏三角形、接触线长度、齿间面积以及面积利用系数的变化情况。

本发明从转子型线反向设计方法入手，将双边型线的啮合线分成 8 个功能段，并选择 NURBS 曲线架构啮合线段，通过局部调整啮合线段来修改相应的转子型线变化，通过此手段，根据设计需要进而设计出满足性能要求的型线。设计手段灵活方便，通过调节自由曲线来控制型线变化，结合啮合线与转子型线的对应关系，局部调整啮合线观测对应的阴阳转子型线变化趋势，特别是泄漏三角形、接触线长度、齿间面积以及面积利用系数的变化情况，提升双螺杆压缩机转子型线的设计效率，避免了以往转子型线设计不能局部修改型线的弊端。

附图说明

图 1 为反向设计方法中的坐标转换关系图；

图 2 (a) 为啮合线分段图；

图 2 (b) 为啮合线分段图对应的转子齿形图；

图 3 为啮合线段 af 移动前后的啮合线形状图，其中 1 代表移动前，2 代表移动后；

图 4 为啮合线段 af 移动前后对应的转子型线变化情况图，其中 1 代表移动前，2 代表移动后；

图 5 为复盛型线的阴阳转子型线；

图 6 为复盛型线的啮合线；

图 7 为复盛型线的啮合线 A_0B_0 段用不同阶数的 NURBS 架构的曲率梳，其中(a)图为三次 NURBS 曲线，(b)图为四次 NURBS 曲线，(c)图为五次 NURBS 曲线，(d)图为六次 NURBS 曲线；

图 8 为复盛型线的啮合线 A_0B_0 加分段点后的曲率梳；

图 9 为 NURBS 曲线架构复盛啮合线的控制点分布效果图；

图 10 为 NURBS 曲线架构复盛啮合线的整体曲率梳图；

图 11 为 NURBS 曲线反向设计复盛型线的最终效果图，其中(a)图为啮合线，(b)图为生成的阴阳转子型线；

图 12 为啮合线改进优化前后的控制点对比图；

图13为型线改进优化前后的对比图。

具体实施方式

下面将结合本发明实施例中的附图对本发明实施例中的技术方案进行清楚、完整地描述，显然，所描述的实施例仅仅是本发明一部分实施例，而不是全部的实施例。基于本发明中的实施例，本领域普通技术人员在没有做出创造性劳动前提下所获得的所有其他实施例，都属于本发明保护的范围。

实施例 1

结合图 1-图 4，图 1 为反向设计方法中的坐标转换关系图，其中 $O_0x_0y_0$ 为啮合线静止坐标系， $O_1x_1y_1$ 为阳转子转动坐标系， $O_2x_2y_2$ 为阴转子转动坐标系， $O_1X_1Y_1$ 为阳转子静止坐标系， $O_2X_2Y_2$ 为阴转子静止坐标系， φ_2 、 φ_1 分别为阴阳转子转动坐标系 $O_2x_2y_2$ 、 $O_1x_1y_1$ 相对于阴阳转子静止坐标系 $O_2X_2Y_2$ 、 $O_1X_1Y_1$ 的转动量， ω_2 、 ω_1 分别为阴阳转子转速， R_2 、 R_1 分别为阴阳转子节圆半径， R_{a1} 是阳转子齿顶圆半径， R_{f2} 是阴转子齿根圆半径，满足 $R_{a1} + R_{f2} = H$ 。

本发明提出一种调节啮合线段修改转子型线性能的方法，包括以下步骤：

步骤 1、将双边型线的啮合线分成 8 个功能段；所述 8 个功能段包括 af 、 fo_0 、 o_0b 、 bc 、 cd 、 do_0 、 o_0e 、 ea ，其中， a 点为啮合线与 x_0 轴在最右侧交点，即阴转子齿顶圆与阳转子齿根圆的相切点， b 点为啮合线在第 III 象限的最低点， c 点为啮合线上在水平方向上距离坐标原点 O_0 最远的点，即阳转子齿顶圆与阴转子齿根圆相切点， d 点为啮合线在第 II 象限的最高点， e 点为啮合线在第 IV 象限的最低点， f 点为啮合线在第 I 象限的最高点。当研究的是单边型线的啮合线时， a 点将与坐标系原点重合。单边型线的啮合线只存在于啮合线静坐标系的第二、三象限，而双边型线的啮合线在静坐标系的四个象限均有分布。

步骤 2、每个功能段利用三次 NURBS 曲线进行架构；所述步骤 2 具体包括以下步骤：

步骤 2.1、建立反向设计坐标系，确立阴阳转子坐标系与啮合线静坐标系之间的转换关系式；由图 1 得啮合线静止坐标系 $O_0x_0y_0$ 转换到阳转子转动坐标系 $O_1x_1y_1$ ：

$$\begin{cases} x_1 = x_0 \cos \varphi_1 + y_0 \sin \varphi_1 - R_1 \cos \varphi_1 \\ y_1 = -x_0 \sin \varphi_1 + y_0 \cos \varphi_1 + R_1 \sin \varphi_1 \end{cases}$$

从啮合线静止坐标系 $O_0x_0y_0$ 转换到阴转子转动坐标系 $O_2x_2y_2$ ：

$$\begin{cases} x_2 = x_0 \cos \varphi_2 - y_0 \sin \varphi_2 + R_2 \cos \varphi_2 \\ y_2 = x_0 \sin \varphi_2 + y_0 \cos \varphi_2 + R_2 \sin \varphi_2 \end{cases}$$

步骤 2.2、根据齿廓法线法，确立啮合条件关系式，建立转子转角与设计参数之间的一一

映射关系, 即包络条件式:

$$\varphi_1 = -\int_{t_0}^t \frac{y_0 y_0' + x_0 x_0'}{R_1 y_0} dt + \varphi_0$$

式中, R_1 为阳转子节圆半径; φ_1 为阳转子初始转过的角度, 称为转角参数; φ_0 为常数, 是上一段曲线终点的积分结果, 对于啮合线的第一段曲线, 是啮合的起始角度, 取 $\varphi_0=0$;

步骤 2.3、设计啮合线三次 NURBS 样条曲线段, 其参数方程通过指定的型值点和两 endpoint 处的导矢插值得到; 设定一段啮合线的 NURBS 曲线段的参数方程为:

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

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

其中, k 是曲线次数; P_i 为控制点, 数量为 $n+1$ 个; w_i 是控制点 P_i 的权因子, 决定了控制点偏离曲线的程度, 且所有 $w_i > 0$; $N_{i,k}(u)$ 是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, 数量为 $m+1$ 个, 其中 a 、 b 的个数为 $k+1$ 个, 且 $m=n+k+1$; 取 $a=0$, $b=1$;

将参数方程代入包络条件式中可以得到如下式子:

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

$$\text{令 } f(u) = \frac{C_y(u)C_y'(u) + C_x(u)C_x'(u)}{C_y(u)}, \text{ 则: } \varphi_1 = -\frac{1}{R_1} \int_0^u f(u) dt + \varphi_0;$$

将啮合线上任意一点的数值积分结果代入到啮合条件关系式即可得到转子转角与设计参数之间的一一映射关系;

所述 $f(u)$ 利用龙贝格求积公式进行求解, 龙贝格求积公式为:

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

式中, $T_m^{(k)} = I_{m+1}(\frac{b-a}{2^k})$; $I = \int_a^b f(u) dx$, 将区间 $[a, b]$ 分成 2^k 等分;

具体步骤如下:

A. 根据 NURBS 曲线参数方程确定啮合线段上相应的被积函数 $f(u)$, 并令 $a=0$ 和 $b=u$,

以及设置求解精度 ε ;

B. 设置初始步长 $h = b - a$, $T_0^{(0)} = \frac{h}{2}[f(a) + f(b)]$, 并初始化 $k = 1$;

C. 计算迭代公式, 利用公式计算:

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

然后再依次计算:

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

D. 判断是否达到精度要求, 通过比较判断前后迭代结果差值是否小于精度值, 即 $|T_m^{(0)} - T_{m-1}^{(0)}| < \varepsilon$; 若满足要求, 则停止计算, 输出 $T_k^{(0)}$; 若不满足要求, 则令 $h = \frac{h}{2}, k = k + 1$, 然后返回第 C 步;

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 $C'_x(u_0) = 0$, 在该点的函数值采用极限值代替进行求解; 利用洛必达法则可得:

$$f(u) = \begin{cases} \lim_{u \rightarrow u_0} \frac{C_x(u)C'_x(u) + C_y(u)C'_y(u)}{C_y(u)} = \frac{C'_x(u)C'_x(u)}{C'_y(u)} + C'_y(u), & C_x(u_0) = 0 \\ \lim_{u \rightarrow u_0} \frac{C_x(u)C'_x(u) + C_y(u)C'_y(u)}{C_y(u)} = \frac{C_x(u)C'_x(u)}{C'_y(u)} + C'_y(u), & C'_x(u_0) = 0 \end{cases}.$$

步骤 2.4、联立啮合条件关系式和阴阳转子转动坐标系与啮合线静坐标系之间转换关系式, 从而得到 NURBS 样条曲线段啮合线对应的阴、阳转子型线方程。

步骤 3、通过调整 NURBS 曲线的控制点或权因子来局部调整啮合线功能段, 观测相应的转子型线变化, 从而调整相应的几何参数。所述步骤 3 具体为: 分别调节 af 、 fo_0 、 o_0b 、 bc 、 cd 、 do_0 、 o_0e 、 ea 共 8 个啮合线功能段的控制顶点来观测相应的转子型线变化, 或微调每个功能段 NURBS 曲线控制点的权因子 w_i 来控制啮合线局部曲线变化量, 从而调节转子型线并观测泄漏三角形、接触线长度、齿间面积以及面积利用系数的变化情况。

图 2 为啮合线分段及其对应的转子型线, 其中(a)图为啮合线分段图, 啮合线分别由 a 、 b 、 c 、 d 、 e 、 f 这 6 个控制点和坐标原点分成 8 个功能段, (b)图为啮合线对应的转子齿形图。基于上述推导的 NURBS 转子啮合线表达式, 用三次 NURBS 分别表达各啮合线功能段, 然后可以分别调节每段啮合线的形状来观测对应的转子齿形变化。图 3 为啮合线段 af 移动前后

的啮合线形状，其中 1 代表移动前，2 代表移动后。图 4 为啮合线段 af 移动前后对应的转子型线变化情况，其中 1 代表移动前，2 代表移动后。可以发现，当啮合线 af 段向右上方移动一段距离后，阴转子齿顶附近靠近机壳内壁的高压侧型线将往增加其齿顶厚度的方向变化，同时这部分齿形的曲率将增大，其齿间面积减小。同样地，当啮合线 af 段向右上方移动一段距离后，阳转子齿槽底部的高压侧型线往增加其齿槽底部宽度的方向变化，对应阳转子齿形的曲率也将增大，同时其齿间面积得到增大。反之，如果啮合线 af 段往左下方移动，以上所述阴阳转子型线将往相反方向变化。

同理，可对其余 7 段采用同样的方法进行研究。若规定啮合线调整后使得其所围面积增大的趋势方向为向“外”，反之则为向“内”。最后得出各段啮合线对转子型线性能参数的影响如表 1 所示。

表 1 各段啮合线对转子型线性能参数的影响

啮合线段	调整方向	泄 漏 三 角 形	接 触 线 长 度	阳 转 子 齿 间面积	阴转子齿间 面积	面 积 利 用 系数
af	外	↓	↑	↑	↓	↑
fo_0	外	↓	↑	↑	↓	↑
o_0b	外	↓	↑	↑	↓	↑
bc	内	↑	↓	↓	↑	↓
cd	内	--	↓	↓	↑	↓
do_0	外	--	↑	↑	↓	↑
o_0e	内	--	↓	↓	↑	↓
ea	外	--	↑	↑	↓	↑

同样，调节 NURBS 啮合线控制点的权因子亦可以改变啮合线的调整方向，减小权因子的大小，啮合线在控制点处的变化方向为向内，增大权因子的大小，啮合线在控制点处的变化方向为向外，进而改变权因子大小调整转子性能参数的规律与上表类似。

实施例 2

结合图 5-图 13，图 5 为现有的复盛型线，图 6 为复盛型线对应的啮合线，表 2 为复盛型

线相关的设计数据。

表 2 为复盛型线相关的设计数据

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 $\alpha/(\circ)$			48		

现在以三次 NURBS 曲线反向架构复盛型线，复盛型线的啮合线为双边型线，其啮合线在节圆的两侧，而且右侧区域较小，所以导致啮合线的曲率变化很剧烈，所以需要很多的控制点才能使得满足高精度拟合的要求。以 A_0B_0 段为例，如图 7 所示，在相同的控制点数下，三次至六次的曲率梳，虽然随着次数的增加，曲率渐渐变得平缓，但其变化还是有明显的波动，所以啮合线拟合时需要增加几个分段点，让曲率过渡更加平缓，如图 8 所示，可以看出，加了一个分段点之后， A_0B_0 段的曲率明显变得更加平滑。同理，在其他段曲率容易震荡变化的部分增加分段点，各段架构效果如图 9 所示，最终的拟合结果如图 10 所示，拟合精度如表 3 所示，精度较高，曲率变化也很平稳。

表 3 拟合精度

啮合线			阳转子		阴转子	
齿曲线	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

最后生成的曲线如图 11 所示，其中(a)图为 NURBS 架构的啮合线，(b)图对应的阴阳转子型线。可以发现转子型线与图 5 相差了一个角度，这是由于正、反向设计方法中定义起始啮合点不同的关系，正向中的起始点在阴转子的齿根圆，而反向是在阳转子的齿根圆上，两者

的阳转子相差了 24° ，即阴转子相差了 20° 。

由于啮合线是由 NURBS 曲线组成，根据 NURBS 曲线的局部修改性和本发明提出的一种调节啮合线段修改转子型线性能的方法可以很方便地对啮合线的局部形状进行修改，从而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，可以直接通过移动控制点的位置来改变啮合线的形状，改进前后的啮合线如图 12 所示（其中 a_1 、 a_2 、 a_3 、 a_4 、 a_5 、 a_6 、 a'_1 、 a'_6 ， b_1 、 b_2 、 b_3 、 b_4 、 b_5 、 b'_1 、 b'_2 、 b'_3 、 b'_4 ， c_1 、 c_2 、 c_3 、 c_4 、 c_5 、 c'_1 、 c'_2 、 c'_3 、 c'_4 、 c'_5 均为控制点），及其对应的型线变化前后如图 13 所示，性能参数对比如表 4 所示。可以看出，优化后的型线增加了阴转子的厚度，同时增大了面积利用系数，减小了泄漏三角形的面积。

表 4 性能参数对比

	泄漏三角形面积/ (mm^2)	接触线长度/ (mm)	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	147.732	600.742	618.982	0.454
改进后	4.236	152.140	633.420	602.770	0.460

以上对本发明所提供的一种调节啮合线段修改转子型线性能的方法，进行了详细介绍，本文中应用了具体个例对本发明的原理及实施方式进行了阐述，以上实施例的说明只是用于帮助理解本发明的方法及其核心思想；同时，对于本领域的一般技术人员，依据本发明的思想，在具体实施方式及应用范围上均会有改变之处，综上所述，本说明书内容不应理解为对本发明的限制。

权 利 要 求 书

1、一种调节啮合线段修改转子型线性能的方法，其特征在于：包括以下步骤：

步骤 1、将双边型线的啮合线分成 8 个功能段；

步骤 2、每个功能段利用三次 NURBS 曲线进行架构；

步骤 3、通过调整 NURBS 曲线的控制点或权因子来局部调整啮合线功能段，观测相应的转子型线变化，从而调整相应的几何参数。

2、根据权利要求 1 所述的方法，其特征在于：所述 8 个功能段包括 af 、 fo_0 、 o_0b 、 bc 、 cd 、 do_0 、 o_0e 、 ea ，其中， a 点为啮合线与 x_0 轴在最右侧交点，即阴转子齿顶圆与阳转子齿根圆的相切点， b 点为啮合线在第 III 象限的最低点， c 点为啮合线上在水平方向上距离坐标原点 O_0 最远的点，即阳转子齿顶圆与阴转子齿根圆相切点， d 点为啮合线在第 II 象限的最高点， e 点为啮合线在第 IV 象限的最低点， f 点为啮合线在第 I 象限的最高点。

3、根据权利要求 2 所述的方法，其特征在于：所述步骤 2 具体包括以下步骤：

步骤 2.1、建立反向设计坐标系，确立阴阳转子坐标系与啮合线静坐标系之间的转换关系式；

步骤 2.2、根据齿廓法线法，确立啮合条件关系式，建立转子转角与设计参数之间的一一映射关系，即包络条件式：

$$\varphi_1 = -\int_{t_0}^t \frac{y_0 y_0' + x_0 x_0'}{R_1 y_0} dt + \varphi_0$$

式中， R_1 为阳转子节圆半径； φ_1 为阳转子初始转过的角度，称为转角参数； φ_0 为常数，是上一段曲线终点的积分结果，对于啮合线的第一段曲线，是啮合的起始角度，取 $\varphi_0 = 0$ ；

步骤 2.3、设计啮合线三次 NURBS 样条曲线段，其参数方程通过指定的型值点和两端点处的导矢插值得到；设定一段啮合线的 NURBS 曲线段的参数方程为：

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

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

其中， k 是曲线次数； $\mathbf{P}_i$ 为控制点，数量为 $n+1$ 个； w_i

是控制点 $\mathbf{P}_i$ 的权因子，决定了控制点偏离曲线的程度，且所有 $w_i > 0$ ； $N_{i,k}(u)$ 是定义在非周

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, 数量为 $m+1$ 个, 其中 a 、 b 的个数为 $k+1$ 个, 且 $m=n+k+1$; 取 $a=0$, $b=1$;

将参数方程代入包络条件式中可以得到如下式子:

$$\varphi_1 = -\int_0^u \frac{C_y(u)C'_y(u) + C_x(u)C'_x(u)}{R_1 C_y(u)} dt + \varphi_0$$

$$\text{令 } f(u) = \frac{C_y(u)C'_y(u) + C_x(u)C'_x(u)}{C_y(u)}, \text{ 则: } \varphi_1 = -\frac{1}{R_1} \int_0^u f(u) dt + \varphi_0;$$

将啮合线上任意一点的数值积分结果代入到啮合条件关系式即可得到转子转角与设计参数之间的一一映射关系;

步骤 2.4、联立啮合条件关系式和阴阳转子转动坐标系与啮合线静坐标系之间转换关系式, 从而得到 NURBS 样条曲线段啮合线对应的阴、阳转子型线方程。

4、根据权利要求 3 所述的方法, 其特征在于: 所述 $f(u)$ 利用龙贝格求积公式进行求解, 龙贝格求积公式为:

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

式中, $T_m^{(k)} = I_{m+1}(\frac{b-a}{2^k})$; $I = \int_a^b f(u) dx$, 将区间 $[a, b]$ 分成 2^k 等分;

具体步骤如下:

A. 根据 NURBS 曲线参数方程确定啮合线段上相应的被积函数 $f(u)$, 并令 $a=0$ 和 $b=u$, 以及设置求解精度 ε ;

B. 设置初始步长 $h=b-a$, $T_0^{(0)} = \frac{h}{2}[f(a)+f(b)]$, 并初始化 $k=1$;

C. 计算迭代公式, 利用公式计算:

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

然后再依次计算:

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

D. 判断是否达到精度要求, 通过比较判断前后迭代结果差值是否小于精度值, 即 $|T_m^{(0)} - T_{m-1}^{(0)}| < \varepsilon$; 若满足要求, 则停止计算, 输出 $T_k^{(0)}$; 若不满足要求, 则令 $h = \frac{h}{2}, k = k+1$,

然后返回第 C 步；

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 $C'_x(u_0)=0$ ，在该点的函数值采用极限值代替进行求解；利用洛必达法则可得：

$$f(u) = \begin{cases} \lim_{u \rightarrow u_0} \frac{C_x(u)C'_x(u) + C_y(u)C'_y(u)}{C_y(u)} = \frac{C'_x(u)C'_x(u)}{C'_y(u)} + C'_y(u), & C_x(u_0)=0 \\ \lim_{u \rightarrow u_0} \frac{C_x(u)C'_x(u) + C_y(u)C'_y(u)}{C_y(u)} = \frac{C_x(u)C''_x(u)}{C'_y(u)} + C'_y(u), & C'_x(u_0)=0 \end{cases}.$$

5、根据权利要求 4 所述的方法，其特征在于：所述步骤 3 具体为：分别调节 af 、 fo_0 、 o_0b 、 bc 、 cd 、 do_0 、 o_0e 、 ea 共 8 个啮合线功能段的控制顶点来观测相应的转子型线变化，或微调每个功能段 NURBS 曲线控制点的权因子 w_i 来控制啮合线局部曲线变化量，从而调节转子型线并观测泄漏三角形、接触线长度、齿间面积以及面积利用系数的变化情况。

6、如权利要求 1-5 任一所述的一种调节啮合线段修改转子型线性能的方法的应用。

7、一种基于权利要求 1-5 任一所述的一种调节啮合线段修改转子型线性能的方法的设备。

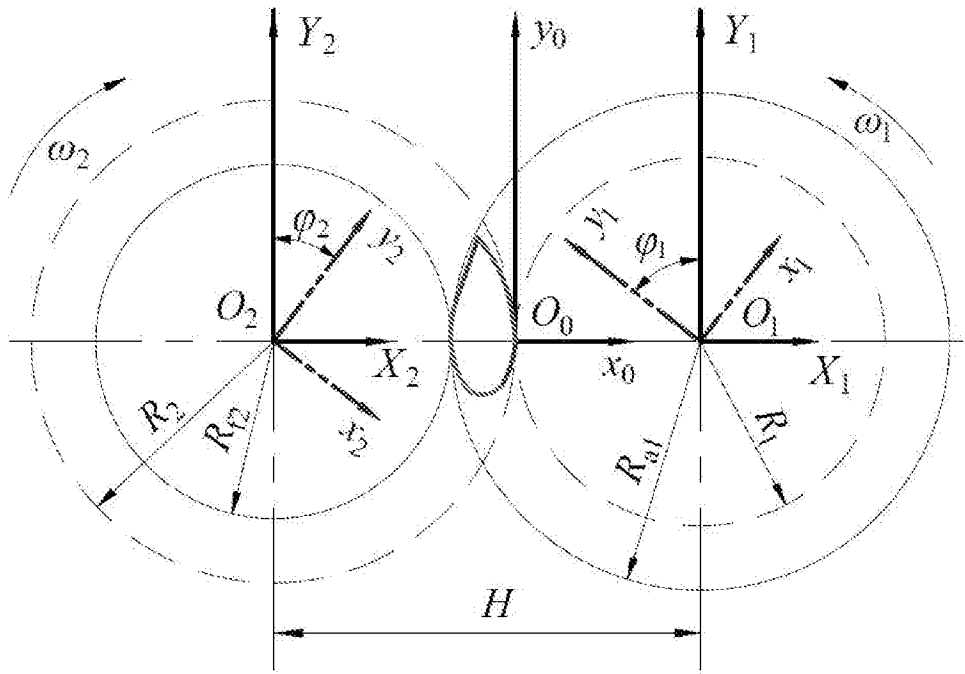


图 1

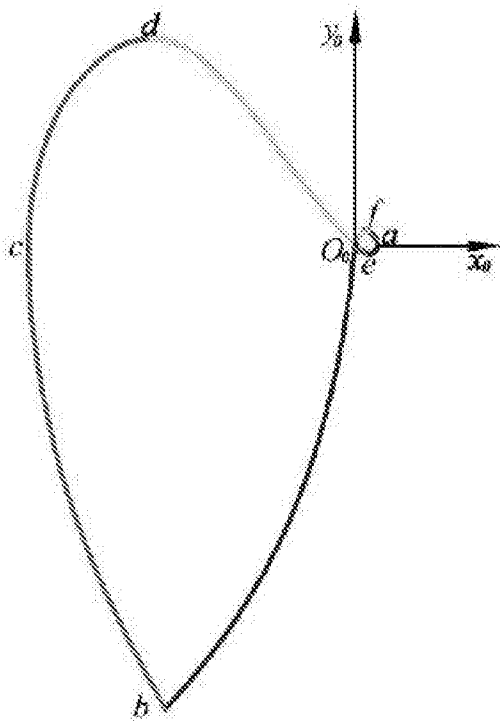


图 2 (a)

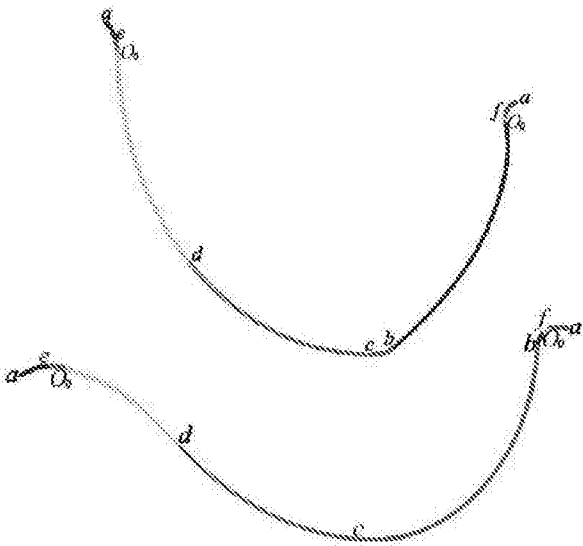


图 2 (b)

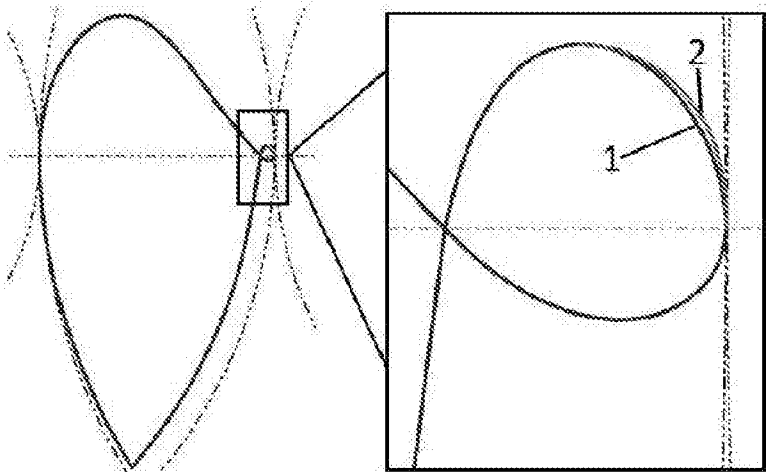


图 3

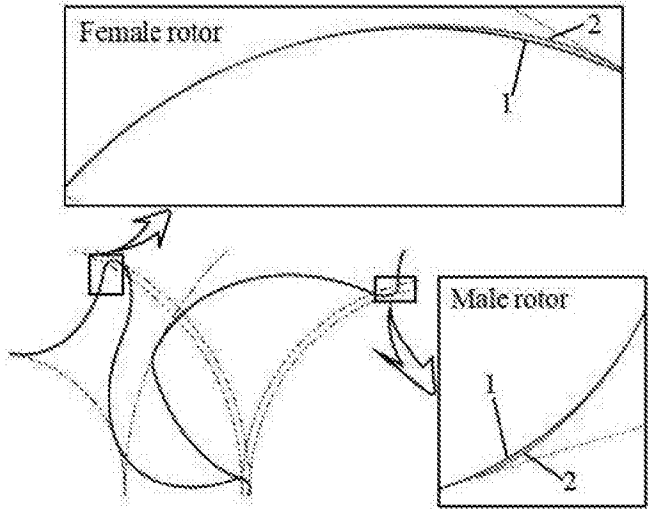


图 4

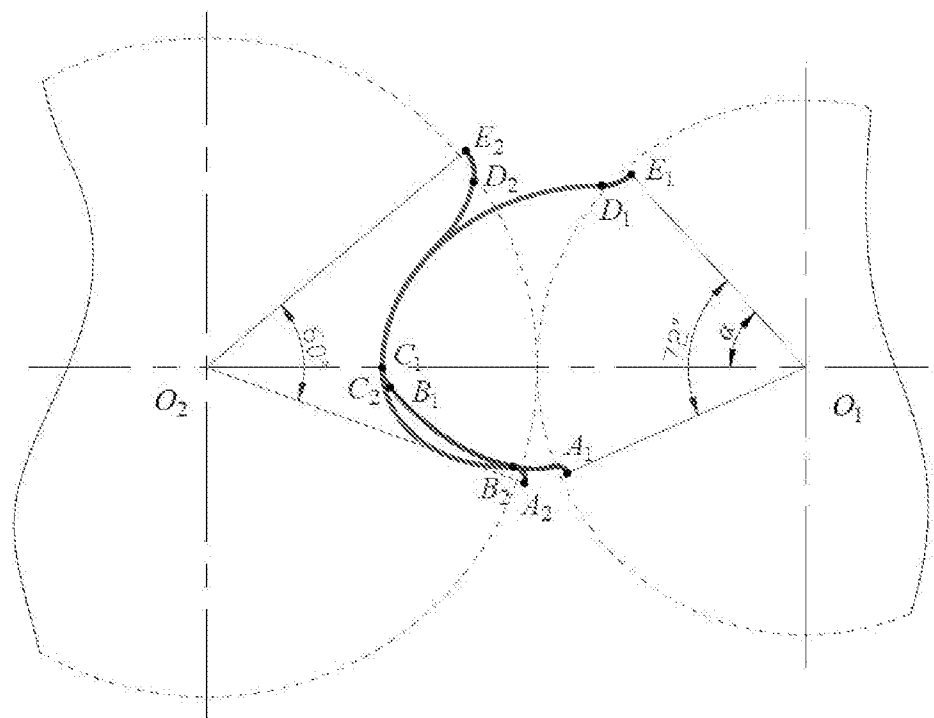


图 5

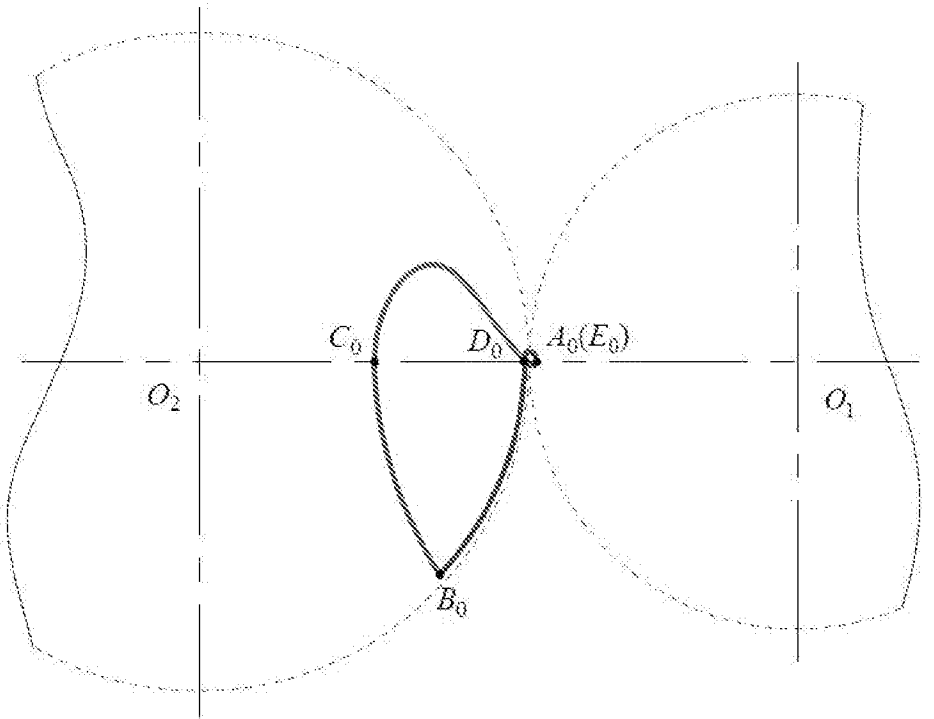


图 6

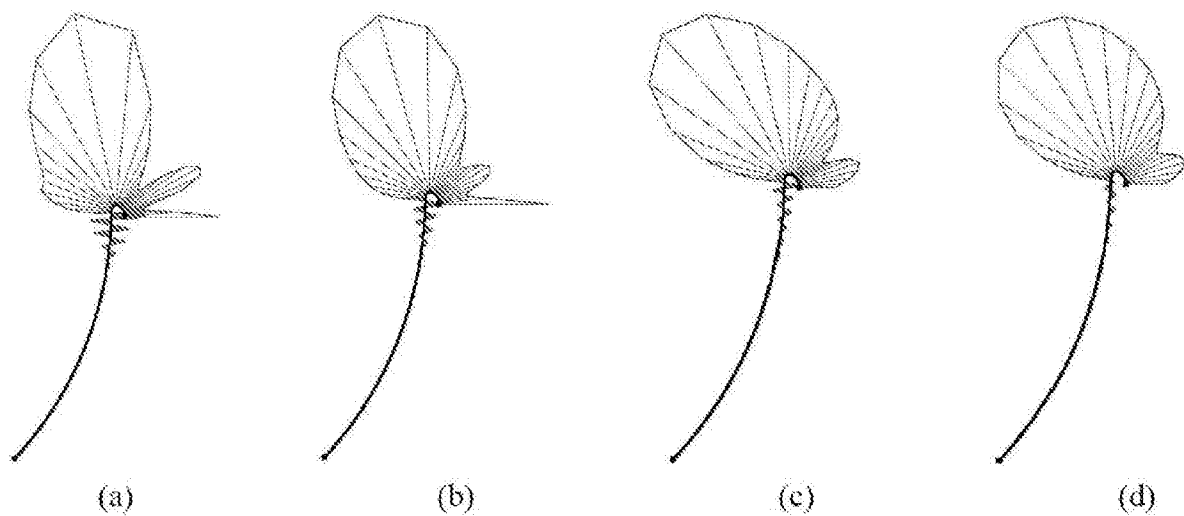


图 7

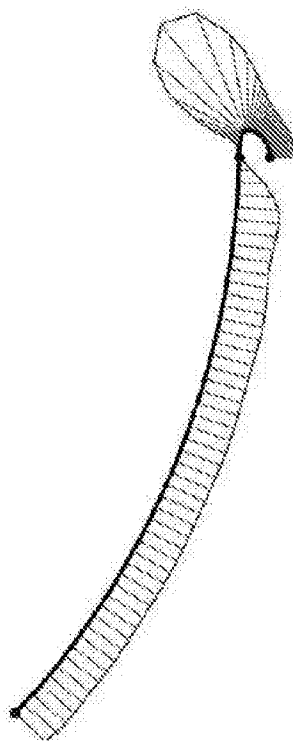


图 8

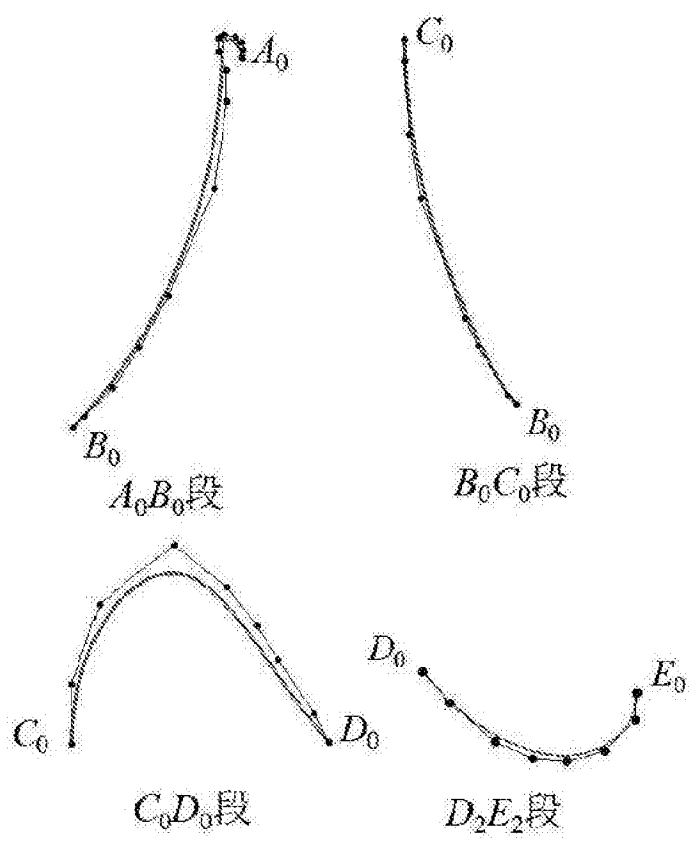


图 9

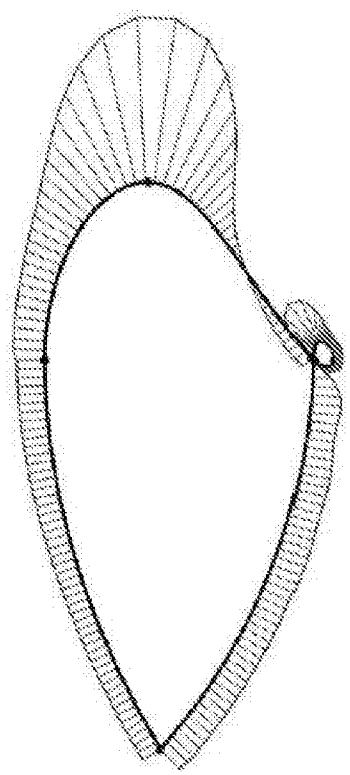


图 10

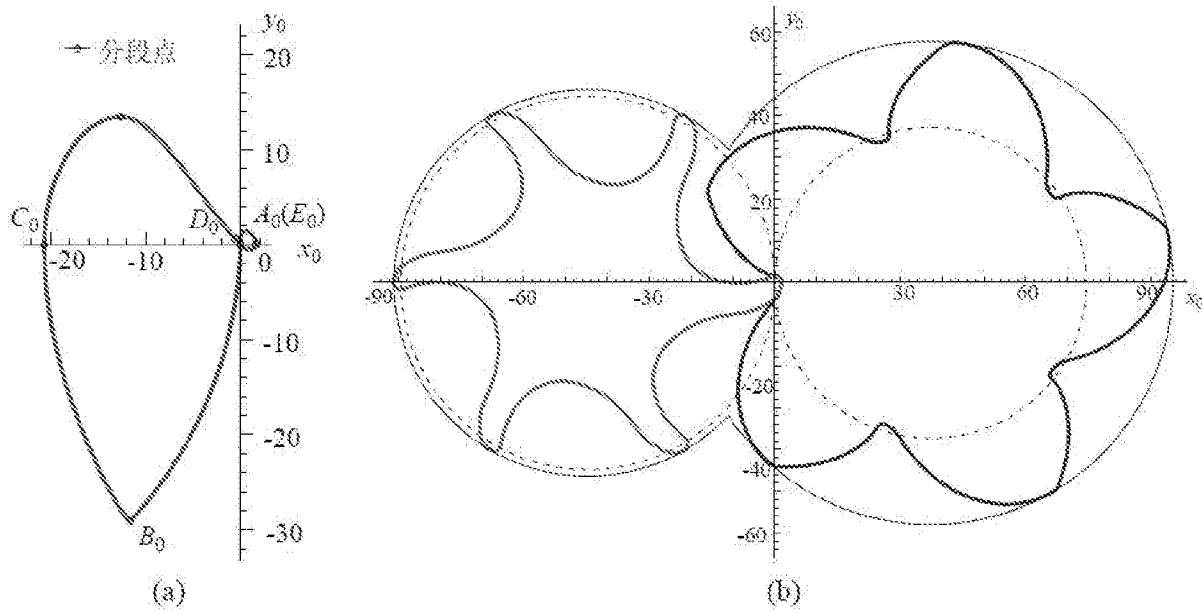


图 11

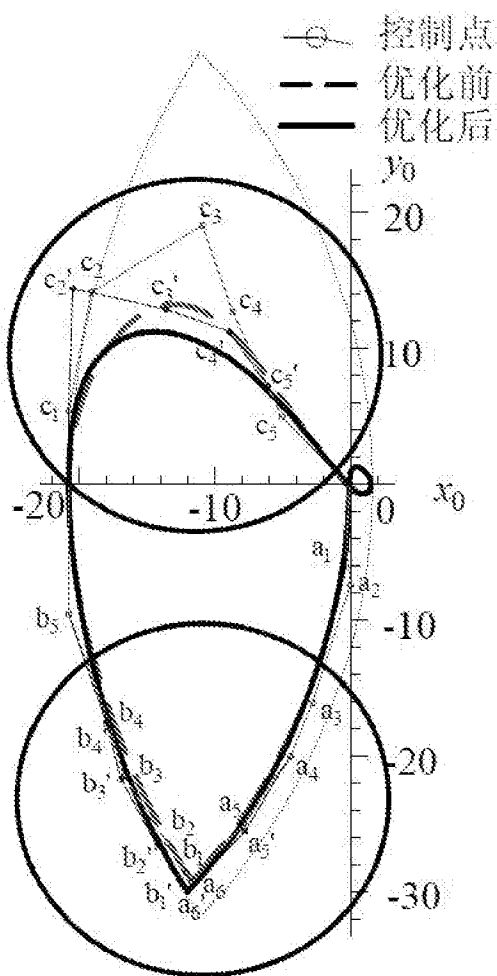


图 12

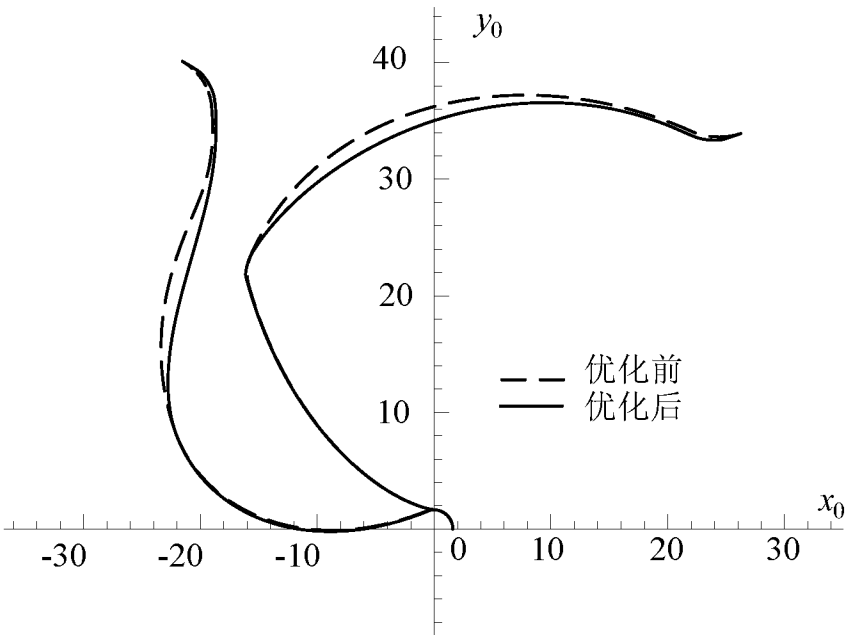


图 13

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/CN2017/119422

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

F04C 2/16(2006.01)i; F04C 18/16(2006.01)i

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)

F04C

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)

CNABS; CNKI; DWPI; SIPOABS: 螺杆, 压缩机, 转子, 型线, 建模, 三维, screw, compressor, rotor, mold+, model+, profile, line, 3d, mold+, nurbs

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
Y	CN 102828954 A (SHANGHAI QIYAO SCREW MACHINERY CO., LTD.) 19 December 2012 (2012-12-19) see description, paragraphs [0039]-[0085], and figures 1-3	1-2, 6-7
Y	何雪明 等(HE, Xueming et al.). "双螺杆压缩机转子型线设计与数值模拟(Rotor Profiles Design Method and Numerical Simulation for Twin-screw Compressor)" <i>机械强度(Journal of Mechanical Strength)</i> , Vol. 38, No. (2), 31 December 2016 (2016-12-31), ISSN: 1001--966, see page 289, left-hand column, line 8 to page 292, right-hand column, line 39	1-2, 6-7
Y	CN 102352846 A (SHANGHAI GELI FLUID MACHINERY CO., LTD.) 15 February 2012 (2012-02-15) see description, paragraphs [0015]-[0051], and figure 1	1-2, 6-7
A	CN 106194717 A (ZHEJIANG WEILONG MECHANICAL TECHNOLOGY CO., LTD.) 07 December 2016 (2016-12-07) see entire document	1-7
A	US 2011020162 A1 (TOYOTA JIDOSHOKKI K.K.) 27 January 2011 (2011-01-27) see entire document	1-7

☒ Further documents are listed in the continuation of Box C.☒ See patent family annex.

* Special categories of cited documents:

"A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance

"E" earlier application or patent but published on or after the international filing date

"L" document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)

"O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means

"P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed

"T" later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention

"X" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone

"Y" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art

"&" document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search

01 September 2018

Date of mailing of the international search report

17 October 2018

Name and mailing address of the ISA/CN

State Intellectual Property Office of the P. R. China
No. 6, Xitucheng Road, Jimenqiao Haidian District, Beijing
100088
China

Facsimile No. (86-10)62019451

Authorized officer

Telephone No.

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/CN2017/119422

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	CN 107023480 A (CHINA UNIVERSITY OF PETROLEUM (EAST CHINA)) 08 August 2017 (2017-08-08) see entire document	1-7

INTERNATIONAL SEARCH REPORT
Information on patent family members

International application No.

PCT/CN2017/119422

Patent document cited in search report			Publication date (day/month/year)	Patent family member(s)			Publication date (day/month/year)
CN	102828954	A	19 December 2012	CN	102828954	B	17 June 2015
CN	102352846	A	15 February 2012	CN	102352846	B	18 September 2013
CN	106194717	A	07 December 2016	CN	106194717	B	16 March 2018
US	2011020162	A1	27 January 2011	JP	2011026981	A	10 February 2011
				KR	101132894	B1	03 April 2012
				EP	2295801	A3	24 June 2015
				EP	2295801	A2	16 March 2011
				KR	20110009629	A	28 January 2011
				US	8556607	B2	15 October 2013
				CN	101963153	B	11 September 2013
				JP	5353521	B2	27 November 2013
				TW	I408283	B	11 September 2013
				EP	2295801	B1	09 November 2016
				CN	101963153	A	02 February 2011
				TW	201109527	A	16 March 2011
CN	107023480	A	08 August 2017	None			

国际检索报告

国际申请号

PCT/CN2017/119422

A. 主题的分类

F04C 2/16(2006.01)i; F04C 18/16(2006.01)i

按照国际专利分类(IPC)或者同时按照国家分类和IPC两种分类

B. 检索领域

检索的最低限度文献(标明分类系统和分类号)

F04C

包含在检索领域中的除最低限度文献以外的检索文献

在国际检索时查阅的电子数据库(数据库的名称, 和使用的检索词(如使用))

CNABS;CNKI;DWPI;SIPOABS:螺杆, 压缩机, 转子, 型线, 建模, 三维, screw, compressor, rotor, mold+, model+, profile, line, 3d, mold+, nurbs

C. 相关文件

类 型*	引用文件, 必要时, 指明相关段落	相关的权利要求
Y	CN 102828954 A (上海齐耀螺杆机械有限公司) 2012年 12月 19日 (2012 - 12 - 19) 参见说明书第[0039]-[0085]段, 附图1-3	1-2, 6-7
Y	何雪明 等. “双螺杆压缩机转子型线设计与数值模拟” 机械强度, 第38卷, 第2期, 2016年 12月 31日 (2016 - 12 - 31), ISSN: 1001-966, 参见第289页左栏第8行-第292页右栏第39行	1-2, 6-7
Y	CN 102352846 A (上海戈里流体机械有限公司) 2012年 2月 15日 (2012 - 02 - 15) 参见说明书第[0015]-[0051]段, 附图1	1-2, 6-7
A	CN 106194717 A (浙江威隆机械科技有限公司) 2016年 12月 7日 (2016 - 12 - 07) 参见全文	1-7
A	US 2011020162 A1 (TOYOTA JIDOSHOKKI KK) 2011年 1月 27日 (2011 - 01 - 27) 参见全文	1-7
A	CN 107023480 A (中国石油大学华东) 2017年 8月 8日 (2017 - 08 - 08) 参见全文	1-7

☐ 其余文件在C栏的续页中列出。☒ 见同族专利附件。

* 引用文件的具体类型:

“A” 认为不特别相关的表示了现有技术一般状态的文件

“E” 在国际申请日的当天或之后公布的在先申请或专利

“L” 可能对优先权要求构成怀疑的文件, 或为确定另一篇引用文件的公布日而引用的或者因其他特殊理由而引用的文件 (如具体说明的)

“O” 涉及口头公开、使用、展览或其他方式公开的文件

“P” 公布日先于国际申请日但迟于所要求的优先权日的文件

“T” 在申请日或优先权日之后公布, 与申请不相抵触, 但为了理解发明之理论或原理的在后文件

“X” 特别相关的文件, 单独考虑该文件, 认定要求保护的发明不是新颖的或不具有创造性

“Y” 特别相关的文件, 当该文件与另一篇或者多篇该类文件结合并且这种结合对于本领域技术人员为显而易见时, 要求保护的发明不具有创造性

“&” 同族专利的文件

国际检索实际完成的日期

2018年 9月 1日

国际检索报告邮寄日期

2018年 10月 17日

ISA/CN的名称和邮寄地址

中华人民共和国国家知识产权局(ISA/CN)
中国北京市海淀区蓟门桥西土城路6号 100088

受权官员

屈威

传真号 (86-10)62019451

电话号码 (86-10)62085250

国际检索报告
关于同族专利的信息

国际申请号

PCT/CN2017/119422

检索报告引用的专利文件			公布日 (年/月/日)	同族专利			公布日 (年/月/日)
CN	102828954	A	2012年 12月 19日	CN	102828954	B	2015年 6月 17日
CN	102352846	A	2012年 2月 15日	CN	102352846	B	2013年 9月 18日
CN	106194717	A	2016年 12月 7日	CN	106194717	B	2018年 3月 16日
US	2011020162	A1	2011年 1月 27日	JP	2011026981	A	2011年 2月 10日
				KR	101132894	B1	2012年 4月 3日
				EP	2295801	A3	2015年 6月 24日
				EP	2295801	A2	2011年 3月 16日
				KR	20110009629	A	2011年 1月 28日
				US	8556607	B2	2013年 10月 15日
				CN	101963153	B	2013年 9月 11日
				JP	5353521	B2	2013年 11月 27日
				TW	I408283	B	2013年 9月 11日
				EP	2295801	B1	2016年 11月 9日
				CN	101963153	A	2011年 2月 2日
				TW	201109527	A	2011年 3月 16日
CN	107023480	A	2017年 8月 8日	无			

表 PCT/ISA/210 (同族专利附件) (2015年1月)