

罗茨真空泵偏心大圆弧转子型线设计及分析

李正清, 李小金, 杨建斌, 刘筱文, 韩仙虎, 蔡宇宏, 王毅, 李晓霞
(兰州空间技术物理研究所, 兰州 730000)

摘要: 转子型线的设计是罗茨泵研究的重要内容之一。偏心大圆弧转子型线由圆心位于节圆内横坐标负半轴的圆弧、销齿圆弧及其共轭曲线组成。首先确定转子偏心大圆弧、顶部销齿圆弧以及偏心大圆弧对应的共轭曲线, 完成了理论型线的设计; 然后根据理论型线和实际型线的转换关系, 获得实际型线的设计方法; 最后在给定的罗茨泵抽速、转子中心距和间隙下, 完成了转子的型线设计。研究发现, 当节圆半径和顶圆半径相同时, 偏心大圆弧转子型线的容积利用系数高于圆弧转子型线的容积利用系数。研究为偏心大圆弧转子罗茨泵的制造奠定了基础。

关键词: 罗茨真空泵; 偏心大圆弧; 共轭曲线; 转子型线

中图分类号: TB752

文献标志码: A

文章编号: 1006-7086(2022)06-0699-06

DOI: 10.3969/j.issn.1006-7086.2022.06.011

Design and Analysis of Eccentric Large Arc Rotor Profile of Roots Vacuum Pump

LI Zhengqing, LI Xiaojin, YANG Jianbin, LIU Xiaowen, HAN Xianhu, CAI Yuhong, WANG Yi, LI Xiaoxia
(Lanzhou Institute of Physics, Lanzhou 730000, China)

Abstract: Roots pump rotor profile design is the important contents of Roots pump research. The profile of the eccentric large arc rotor is composed of the arc whose center is located on the negative semi-axis of abscissa in the pitch circle, the pin tooth arc and its conjugate curve. First, the design parameters and range of the eccentric large arc, and the pin tooth arc on the top of the rotor are determined, and the conjugate curve is obtained corresponding to the eccentric large arc from the meshing characteristics. Then, according to the conversion relationship between the theoretical profile and the actual profile of the rotor, the design method of the actual profile is analyzed. Finally, according to the pumping speed, rotors center distance and rotors gap of the Roots pump, the theoretical and actual profiles of the rotor are designed. The study found that the volume utilization rate of the eccentric large arc rotor profile is higher than that of the circular arc rotor profile when the pitch radius and tip circle radius are the same.

Key words: Roots vacuum pump; eccentric large arc; conjugate curve; rotor profile

0 引言

罗茨泵具有启动快、功耗小、抽速大、效率高、维护费用低等特点, 被广泛应用于半导体、冶金、化工、医药等行业中。罗茨泵是一种双转子回转式容积真空泵。工作过程中罗茨泵的一对转子相向转动, 将气体由进口端输运至出口端实现抽气, 转子在运转过程中相互啮合, 以减少气体逆向流动形成

的返流。罗茨泵转子型线的啮合设计非常重要, 直接关系到真空泵的各项性能指标^[1-2]。

常见的转子型线主要分为3类: 摆线型、渐开线型和圆弧型^[3-11]。在不同的顶圆半径和节圆半径下设计及分析常见转子型线, 应用于罗茨泵产品的设计是型线研究的重要内容^[3-5]。张帅等^[6]应用该方法分析罗茨泵转子外摆线和内摆线, 设计了双叶型罗

收稿日期: 2021-12-21

基金项目: 甘肃省科技重大专项(21ZD4GA004)

作者简介: 李正清, 高级工程师, 主要从事真空泵设计及试验研究。E-mail: ahanda-nwpu@163.com

引文信息: 李正清, 李小金, 杨建斌, 等. 罗茨真空泵偏心大圆弧转子型线设计及分析[J]. 真空与低温, 2022, 28(6): 699-704.

LI Z Q, LI X J, YANG J B, et al. Design and analysis of eccentric large arc rotor profile of roots vacuum pump[J]. Vacuum and Cryogenics, 2022, 28(6): 699-704.

茨泵摆线转子型线;戴映红等^[7]采用此方法设计了气冷罗茨真空泵转子的摆线-圆弧型线。上述转子型线的设计均采用几何分析的方法,该方法虽然易于理解,但求解过程复杂,计算分析量大。探索新的转子型线,设计分析新型线的特性是转子型线研究的重要内容之一。标准圆弧型转子型线中,圆弧中心均位于转子型线的对称轴上,形成由圆弧及其共轭曲线共同组成的转子型线^[8]。偏心圆弧转子型线由中心位于节圆内的圆弧及顶部密封圆弧构成,能有效提高转子的容积利用率,但在偏心圆弧和顶部密封圆弧间必须采用过渡曲线,使得转子部分位置的间隙偏大^[9]。在偏心大圆弧转子型线中,圆弧中心位于节圆内腰部曲线对应的轴上,圆弧半径远大于传统圆弧转子型线半径。本文首先确定转子的偏心大圆弧及对应销齿圆弧,然后应用转子啮合特性,基于偏心大圆弧参数获得其对应的共轭曲线,形成由偏心大圆弧、销齿圆弧及偏心大圆弧共轭曲线构成的光滑连接的转子型线,使得设计及计算过程简化;其次,应用共轭特性,构建基于理论型线的实际型线设计方法,实现转子均匀间隙的设计。最后,以70 L/s抽速的罗茨泵为目标,完成转子型线设计及分析。

1 转子型线分析

如图1所示,罗茨泵转子型线为中心和轴对称曲线,因此仅须求解整个转子型线的1/4即可。偏心大圆弧转子型线中,节圆半径为 R_1 ;AE为偏心大圆弧,圆心 O_1 位于 x_1 轴负半轴,半径为 R_2 ,F为偏心大圆弧上任一点,半径 O_1F 与节圆相交于D,根据啮合特性, ϕ 角为F点的啮合角; CE 为顶部销齿圆弧,圆心位于节圆上P点,半径为 R_3 ;腰部曲线AG为偏心大圆弧AE对应的共轭曲线,BG为腰部销齿圆弧,圆心位于节圆上H点,半径为 R_3 ;转子的顶圆半径为 R_4 。

1.1 节圆外型线分析

偏心大圆弧转子型线分析如图2所示,连接 O_1A ,在 $\triangle KAH$ 中,AH的长度可表示为:

$$AH = 2R_1 \sin \frac{\pi}{8} \quad (1)$$

假设 O_1K 的长度为 l ,则 O_1H 的长度为 $2R_1 - l$ 。

在 $\triangle O_1AH$ 中,偏心大圆弧AE对应的半径 R_2 由余弦定理可表示为:

$$R_2 = O_1A = \sqrt{(AH)^2 + (2R_1 - l)^2 - 2AH(2R_1 - l)\cos \frac{3\pi}{8}} \quad (2)$$

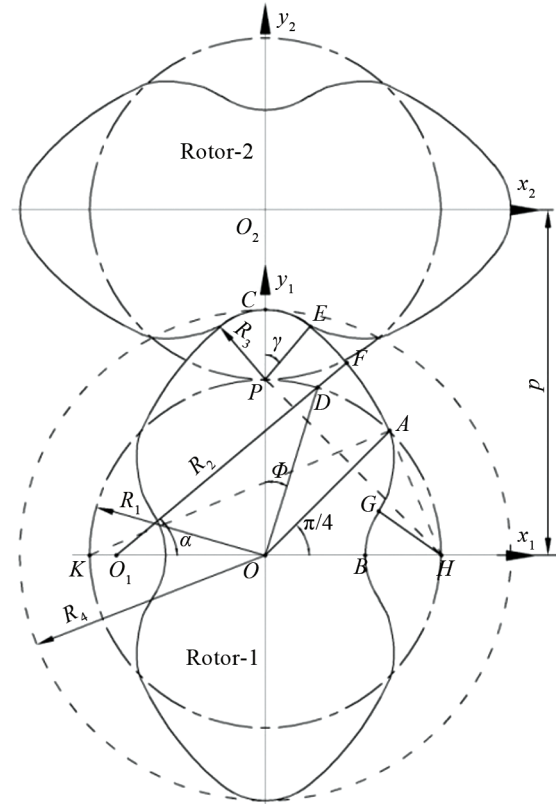


图1 罗茨泵偏心大圆弧转子型线

Fig. 1 Eccentric large arc rotor profile of Roots vacuum pump

圆弧AE的方程可以表示为:

$$\begin{cases} x_1 = -(R_1 - l) + R_2 \cos \alpha \\ y_1 = R_2 \sin \alpha \end{cases} \quad (3)$$

圆弧AE方程中变量 α 在 $\triangle O_1AH$ 中取得最小值,由余弦定理可表示为:

$$\alpha_{\min} = \arccos \frac{R_2^2 + (2R_1 - l)^2 - (AH)^2}{2R_1(2R_1 - l)} \quad (4)$$

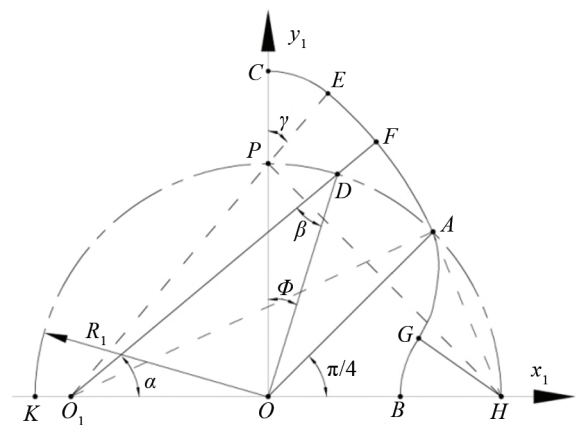


图2 偏心大圆弧转子型线分析

Fig. 2 Eccentric large arc rotor profile analyzes

在 ΔO_1PO 中, O_1P 的长度可以表示为:

$$O_1P = \sqrt{R_1^2 + (R_1 - l)^2} \quad (5)$$

由图2可知, $PH = \sqrt{2} R_1$,因此 α 在 ΔO_1PH 中取得最大值,由余弦定理可以表示为:

$$\alpha_{\max} = \arccos \frac{(O_1P)^2 + (2R_1 - l)^2 - (PH)^2}{2O_1P(2R_1 - l)} \quad (6)$$

顶部圆弧 CE 是以 P 点为圆心,以 PE 为半径的销齿圆弧,因此,销齿圆弧 CE 的方程可以表示为:

$$\begin{cases} x_1 = R_3 \cos\left(\frac{\pi}{2} - \gamma\right) \\ y_1 = R_1 + R_3 \sin\left(\frac{\pi}{2} - \gamma\right) \end{cases} \quad (7)$$

销齿圆弧的半径 $R_3 = R_2 - O_1P$ 。由图2可知,方程(7)中自变量 γ 的最小值为零,在 ΔO_1PO 中可以确定 γ 的最大值为:

$$\gamma = \frac{\pi}{2} - \alpha_{\max} \quad (8)$$

此时转子顶圆半径 $R_4 = R_1 + R_3$ 。

应用啮合特性求解转子共轭曲线对应的型线时,须求解转子的啮合角 ϕ ,啮合角为啮合点法线 O_1F 与节圆的交点 D 和转子中心的连线与坐标轴 y_1 的夹角。

在 ΔO_1DO 中,应用正弦定理, β 可以表示为:

$$\beta = \arcsin\left(\frac{R_1 - l}{R_1} \sin \alpha\right) \quad (9)$$

啮合角 ϕ 可以表示为:

$$\phi = \frac{\pi}{2} - \alpha - \beta \quad (10)$$

1.2 共轭曲线部分

根据罗茨泵转子的啮合特性,共轭曲线的坐标转换关系可表示为^[12]:

$$\begin{cases} x_2 = x_1 \cos 2\phi - y_1 \sin 2\phi + d \sin \phi \\ y_2 = x_1 \sin 2\phi + y_1 \cos 2\phi - d \cos \phi \end{cases} \quad (11)$$

式中: d 为两坐标系原点间的距离即为2个转子中心的距离,由式(11)可确定转子偏心大圆弧 AE 对应的共轭曲线部分,其中变量 ϕ 值由式(10)确定, (x_1, y_1) 值由偏心大圆弧线式(3)确定。如图1所示,共轭方程式(11)确定的共轭曲线位于 $x_2O_2y_2$ 坐标系中(位于转子2中),需将其平移至转子1中,并逆时针旋转 $\pi/2$ 。顶部销齿圆弧与腰部销齿圆弧 BG 互为共轭曲线,其方程可以表示为:

$$\begin{cases} x_1 = R_1 - R_3 \cos(\pi - \gamma) \\ y_1 = R_3 \sin(\pi - \gamma) \end{cases} \quad (12)$$

自变量 γ 的取值范围为 $(0, \pi/2 - \alpha_{\max})$ 。

综上,根据式(3)(7)(11)和(12)便可获得整个转子型线的1/4,然后由转子的轴对称性,获得整个转子的型线。

1.3 转子实际型线

转子理论型线的设计间隙为零,转子在每个啮合点接触。在实际的转子型线设计中,由于加工误差、应力变形以及热变形的存在,必须设计适当的间隙,确保转子的正常运行。因此,分析求解转子的实际型线是转子型线设计的重要组成部分^[13]。

实际型线求解可分为几何法和解析法。采用几何法,须具体分析建立每种实际型线与理论型线的参数关系;采用解析法仅须对型线方程进行求导计算便可获得实际型线,该方法适用性广,各种型线的求解步骤相同。基于此,采用解析法分析设计偏心大圆弧转子实际型线。

如图3所示,位于节圆外的任一转子型线 AC 的参数方程可表示为:

$$\begin{cases} x_1 = f(\theta) \\ y_1 = g(\theta) \end{cases} \quad (13)$$

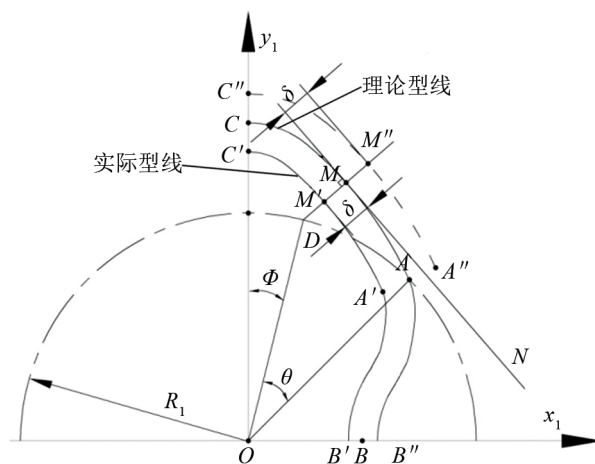


图3 转子理论和实际型线
Fig. 3 Theoretical and actual profile

设 M 为型线 AC 上任一点,过该点转子型线的切线为 MN ,过 M 点做切线的垂线,垂线交节圆于 D 点,设罗茨泵转子间隙为 2δ ,则对于单个转子实际型线需要在法线方向缩进 δ ,如图3中,理论型线上 M 点对应的实际转子型线点为 M' 。

设 M 点的坐标为 (x_1, y_1) ,则过 M 点转子理论型线的切线 MN 的斜率 k_{MN} 可表示为:

$$k_{MN} = \frac{dy_1}{dx_1} = \frac{g'(\theta)}{f'(\theta)} \quad (14)$$

法线 MD 与切线 MN 垂直,因此法线斜率与切线

斜率的乘积为-1,则法线 MD 的斜率 k_{MD} 可表示为:

$$k_{MD} = -\frac{dx_1}{dy_1} = -\frac{f'(\theta)}{g'(\theta)} \quad (15)$$

过 M 点,法线 MD 方向的单位向量可以表示为:

$$\begin{cases} e_{x_1} = -\frac{g'(\theta)}{\sqrt{[g'(\theta)]^2 + [f'(\theta)]^2}} \\ e_{y_1} = \frac{f'(\theta)}{\sqrt{[g'(\theta)]^2 + [f'(\theta)]^2}} \end{cases} \quad (16)$$

由于理论型线和实际型线间的距离为 δ ,因此根据式(14)~(16),图3中已知理论型线 AC 对应的实际型线 $A'C'$ 可以表示为:

$$\begin{cases} x_1 = f(\theta) - \delta e_{x_1} \\ y_1 = g(\theta) - \delta e_{y_1} \end{cases} \quad (17)$$

基于式(15)~(17),采用解析法可获得转子的实际型线。若共轭曲线也采用这种方法,须将已知型线式(13)和啮合角式(10)代入式(11),然后由式(15)~(17)获得实际型线。显然,将式(13)和(10)代入(11)形成的表达式很复杂,不利于实际型线的求解。为了简化求解过程,根据转子共轭啮合特性,可首先将已知曲线 AC 沿法线向外延长 δ ,然后求解该段曲线对应的共轭曲线即得到腰部实际型线的对应部分。

如图3所示,将转子理论型线 AC 部分向外延伸 δ 得到的曲线 $A''C''$ 可表示为:

$$R_4 = R_1 - \sqrt{2R_1^2 - 2R_1l + l^2} + \sqrt{\left(2R_1 \sin \frac{\pi}{8}\right)^2 + (2R_1 - l)^2 - 4R_1(2R_1 - l)\sin^2 \frac{\pi}{8}} \quad (19)$$

转子 1/4 部分型线的偏心大圆弧 AE 由式(3)确定,顶部圆弧 CE 段由式(7)确定, AE 对应的共轭曲线部分 AG 由共轭方程式(11)确定,腰部销齿圆弧由式(12)确定。当顶圆半径 R_4 取不同值时,首先获得转子 1/4 型线,然后以坐标轴为对称轴将 1/4 转子型线取对称,即获得整个转子理论型线。最后,由 1.3 节中依据理论型线求解实际型线的方法获得转子实际型线。如图4所示(图中为了显示清晰,间隙取值为 2 mm)。偏心大圆弧圆心位置 l ,偏心大圆弧半径 R_2 、销齿圆弧半径 R_3 及转子长度 l_{rotor} 如表1所列。

由表1可知,当节圆半径 R_1 给定时,随着顶圆半径 R_4 减小,偏心大圆弧圆心与节圆的距离 l 增加,半径 R_2 减小,销齿圆弧半径 R_3 减小。由于整机设计抽速不变,随着转子顶圆半径 R_4 减小,转子腔室截面积减小,为保持整机抽速恒定,须增加转子长度 l_{rotor} ,因此转子长度 l_{rotor} 随转子顶圆半径 R_4 减小而增大。

$$\begin{cases} x_1 = f(\theta) + \delta e_{x_1} \\ y_1 = g(\theta) + \delta e_{y_1} \end{cases} \quad (18)$$

将由式(18)确定的曲线 $A''C''$ 的参数代入共轭方程式(11),便可获得对应转子2的共轭曲线。根据啮合特性,转子1的型线向外延长,必然导致转子2型线向内收缩 δ 以保持两者间的啮合关系。然后将其通过平移和旋转移动至转子1中便可获得理论型线 AB 部分的实际型线 $A'B'$ 。

综上,已知型线方程求解实际型线可分为2步:(1)根据式(16)求解型线法向单位向量;(2)根据式(17)求解实际型线。已知型线方程求解其共轭曲线对应的实际型线可分为3步:(1)根据式(16)求解单位向量;(2)根据式(18)求解向外偏置型线;(3)将由式(18)计算得到的参数代入共轭方程式(11)获得实际型线。

2 转子型线设计

2.1 转子理论型线

按照上述分析步骤,设计罗茨泵产品实际抽速为 70 L/s,转速 3 000 r/min,有效抽速为几何抽速的 75%,转子节圆半径为 $R_1=34$ mm,顶圆半径 R_4 取 48~48.5 mm,由式(1)(2)和(5)可得 R_4 与 l 的关系,如式(19)所示。在转子间隙 $\delta=0.1$ mm 的条件下,分析计算转子偏心大圆弧圆心位置 l 、半径 R_2 ,顶部销齿圆弧半径 R_3 和转子长度 l_{rotor} 。

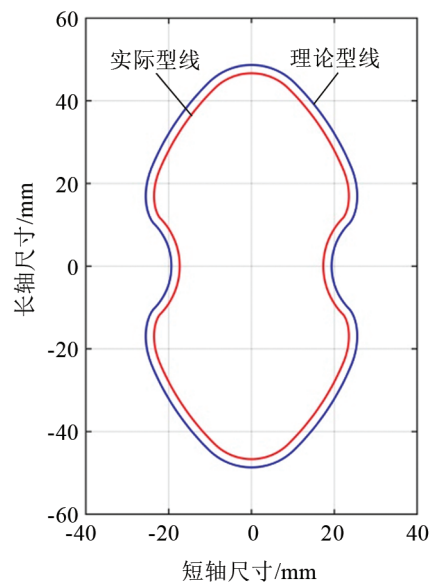


图4 偏心大圆弧转子理论及实际型线

Fig. 4 Theoretical and actual profile of eccentric large arc rotor

表1 不同的 R_4 值下转子设计参数Tab. 1 Design parameters of profile at different R_4

单位: mm					
R_4	R_1	l	R_2	R_3	l_{rotor}
48.5	34	1.09	61.82	14.5	260.42
48.4	34	1.53	61.41	14.4	262.84
48.3	34	1.98	61.00	14.3	265.37
48.2	34	2.38	60.63	14.2	267.72
48.1	34	2.80	60.24	14.1	268.8
48.0	34	3.21	59.87	14.0	271.34

2.2 容积利用系数

罗茨泵转子容积利用系数为转子顶圆面积与截面面积的差值与转子顶圆面积的比值,表征罗茨泵转子的空间利用程度。

$$C = 1 - \frac{B}{\pi R_4^2} \quad (20)$$

式中: C 为罗茨泵转子容积利用系数; B 为罗茨泵转子截面积。

转子参数对应的容积利用系数如图5所示。可以看到,在相同的顶圆半径下,偏心大圆弧转子型线的容积利用系数优于标准圆弧型线的容积利用系数。

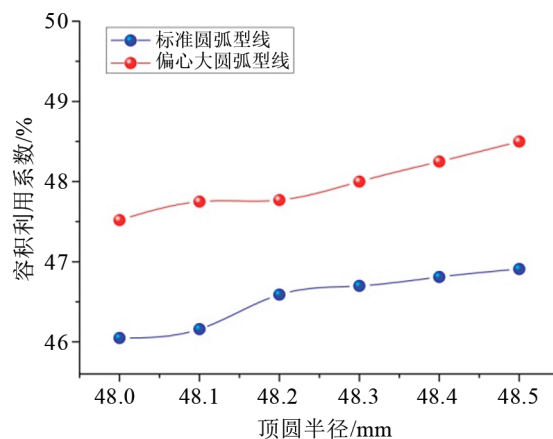


图5 转子型线的容积利用系数

Fig. 5 Volume utilization of profile

2.3 转子型线讨论

从表1可以看出,转子型线上偏心大圆弧的圆心均位于节圆内部。若在节圆半径不变的条件下增加顶圆半径,则偏心大圆弧的圆心将位于节圆外部 x_1 轴上。此时形成的转子型线将出现圆弧线及其共轭曲线的切线斜率不相等的情形,共轭曲线部分变成折线,如图6所示。

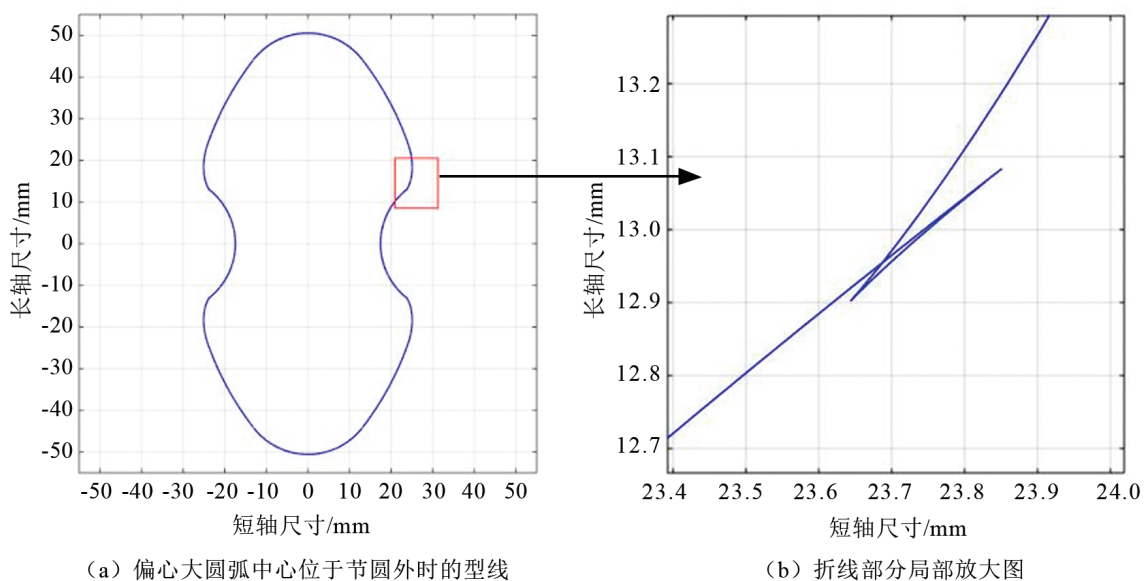


图6 罗茨泵转子型线变成折线

Fig. 6 Rotor profile form undercutting

因此在设计偏心大圆弧转子型线时,偏心大圆弧的圆心不能位于 x_1 轴节圆外。

3 结论

通过将罗茨泵转子型线的圆弧中心设计在腰部曲线对应轴上,进行了偏心大圆弧转子型线设

计;同时,基于共轭特性分析了理论型线和实际型线的转化关系,并以实际抽速为70 L/s的罗茨泵为设计目标,完成了罗茨泵偏心大圆弧转子型线的设计及分析,得到以下结论:

(1)偏心大圆弧转子型线由偏心大圆弧、销齿圆弧及偏心大圆弧对应的共轭曲线三部分构成。

(2)构建了基于转子理论型线的实际型线设计方法,特别是在分析共轭曲线的实际型线时,采用将已知型线向外延伸,然后求解获得共轭曲线的实际型线方法,使得求解过程大幅简化。

(3)以实际抽速为 70 L/s 的罗茨泵为设计目标,分析计算了在节圆半径不变情形下,型线顶圆半径、销齿圆弧半径、转子长度及容积利用系数等参数。

参考文献:

- [1]高树奎,华兴鲁,孟帅,等.罗茨泵内部流场数值模拟研究[J].汽轮机技术,2020,62(2):121-125.
- [2]董笑飏,张仑.罗茨鼓风机圆弧型转子型线方程[J].甘肃工业大学学报,2000,26(4):43-47.
- [3]李海洋,赵玉刚,胡柳,等.渐开线型罗茨泵转子型线的改进研究[J].机床与液压,2011,39(22):37-39.
- [4]李玉龙.罗茨泵高能渐开线新型转子的型线研究[J].机床与液压,2020,48(4):64-67.
- [5]张伟初,吴明亮,李新华,等.三叶罗茨鼓风机宽凸台渐开线叶型设计[J].湖南农业大学学报,2002,28(2):165-166.
- [6]张帅,宋爱平,田德云,等.罗茨泵转子的轮廓型线设计及仿真[J].机械传动,2014,38(3):91-94.
- [7]戴映红,黄智敏,钟云会,等.两叶与多叶转子气冷式罗茨真空泵型线分析[J].流体机械,2011,39(2):30-34.
- [8]刘林林,初嘉鹏,胡建中.罗茨真空泵转子型线的研究[J].机械设计,2007(3):64-66.
- [9]叶仲和,林守峰,魏彪.三叶罗茨鼓风机圆弧型转子型线设计[J].风机技术,2000(4):9-12.
- [10]徐文兵,于振华,胡焕林.偏心圆弧罗茨泵转子型线的研究[J].真空,2006,43(1):6-8.
- [11]谈冶信.滑阀真空泵、罗茨真空泵及其真空机组[J].真空与低温,1997(3):118-120.
- [12]吴序堂.齿轮啮合原理[M].北京:机械工业出版社,1982.
- [13]张铁柱,张洪信,赵红.非接触式转子泵转子理论型线与实际型线设计[J].机械工程学报,2002,38(11):152-155.

(责任编辑:任 妮)