

双齿气体循环泵基本几何理论和容积计算

冯诗愚¹, 周利彪¹, 朱珍昱², 高秀峰²

(1. 南京航空航天大学 航空学院

飞行器环境控制与生命保障工业和信息化部重点实验室, 南京 210016;

2. 西安交通大学 化学工程与技术学院, 西安 710049)

摘 要: 以数学几何理论为基础,通过坐标变换和包络条件推导了阴阳转子的基本型线方程,建立了双齿气体循环泵的数学模型。研究了阴阳转子相互啮合时啮合点位置随阴转子转角的变化关系。采用了线积分的计算方法推导出工作容积的基元面积随转角的变化关系,可简化工作容积的计算难度。结果表明:在转角为 0 和 π 的时候,阴阳转子会形成一个封闭的无效区域导致了工作腔的基元面积随转角变化过程中的突升和突降。在吸气结束时,由于吸气腔相较于排气腔多了一个与吸气口相连的部分导致了基元面积的突降。这些基本几何理论的建立可为双齿气体循环泵的应用打下一定的理论基础。

关 键 词: 阴阳转子型线; 双齿气体循环泵; 啮合点; 工作腔; 基元面积; 阴转子转角

中图分类号: V219; TH45 **文献标志码:** A

Basic geometric theory and volume calculation of double-tooth gas circulation pump

FENG Shiyu¹, ZHOU Libiao¹, ZHU Zhenyu², GAO Xiufeng²

(1. Key Laboratory of Aircraft Environment Control and Life Support of Ministry of Industry and Information Technology, College of Aerospace Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China;

2. School of Chemical Engineering and Technology, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: Based on the mathematical geometry theory, the basic profile equations of the female-male rotor were derived through coordinate transformation and envelope conditions, and the mathematical model of the double-tooth gas circulation pump was established. The relationship between the position of the meshing point and the rotor angle of the female rotor with the meshing of the male and female rotors was studied. The calculation method of line integral was used to derive the relationship between the elementary area of the working volume and the rotor angle, which can simplify the calculation difficulty of the working volume. Results showed that when the rotor angles were 0 and π , the female and male rotors formed a closed invalid area, which led to the sudden rise and fall of the element area of the working cavity during the change of the rotor angle. At the end of inhalation, the suction chamber had an additional part connected to the suction port compared with the exhaust chamber,

收稿日期:2020-02-27

基金项目:南京航空航天大学研究生创新基地(实验室)开放基金(kfj20190110); 江苏高校优势学科建设工程基金

作者简介:冯诗愚(1974—),男,副教授,博士,主要从事飞行器环境控制和燃油系统研究。

引用格式:冯诗愚,周利彪,朱珍昱,等. 双齿气体循环泵基本几何理论和容积计算[J]. 航空动力学报,2020,35(9):1936-1942.
FENG Shiyu,ZHOU Libiao,ZHU Zhenyu,et al. Basic geometric theory and volume calculation of double-tooth gas circulation pump[J]. Journal of Aerospace Power,2020,35(9):1936-1942.

resulting in a sudden drop in the element area. The establishment of these basic geometric theories can lay a certain theoretical foundation for the application of double-tooth gas circulation pumps.

Key words: female-male rotor profile; double-tooth gas circulation pump; meshing point; working chamber; area of element; female rotor angle

近几年来,人为排放的温室气体达到历史最高,人类对气候系统的影响已经对人类和自然界产生了影响。因为对污染的担忧、不断增长电力的需求、减少 CO₂ 排放量以实现《京都议定书》中设定的目标和保障能源安全,德国目前的预测是到 2020 年发电量增加到 20%,使用的燃料量将与现在差不多^[1]。国际能源机构(IEA)预计,到 2021 年全球可再生能源发电量增长了 42%。但是,他们的报告说,运输和供热部门的过渡仍然很缓慢,主要是由于化石燃料不足,价格等。

运输的 CO₂ 排放量占全球能源 CO₂ 排放量的 23%。在过去的 15 年里,航空排放的增长速度达到 95%,高于道路运输 64%^[2],燃料电池是在航空领域应对排放增加的一项有前途的技术。它是一种将燃料的化学能直接转化成电能的发电装置,与燃气轮机和内燃机发电相比,它不受卡诺循环理论对能量转换效率上限的限制,能量转换率高 60%~80%,实际使用效率则是普通内燃机 2~3 倍^[3-4],排放远低于燃气轮机和内燃机,并具有对环境污染小、红外辐射小、没有运动部件、噪声小等特点,是理想的洁净动力源。在航空推进领域,也有着广泛的应用前景^[5]。

2002 年 8 月,美国国家航空航天局(NASA)即展示了一台采用燃料电池驱动的电动飞机样机,质量达到 150 kg。2002 年 9 月,美国波音公司与美国国防部签订研发合同,开发了一套基于燃料电池的无人机推进系统^[6]。2003 年,该公司建成并演示了完整的燃料电池动力系统。2005 年 5 月,美国航空环境公司的“全球探测者”氢燃料电池推进的无人机首飞成功。2009 年 7 月,全球首架采用燃料电池驱动的有人驾驶飞机在德国北部城市汉堡得以试飞成功^[7],其设计的飞行高度约为 2550 m^[8]。2009 年 10 月美国海军研究实验室研制出的一款氢动力燃料电池飞机“离子虎”完成了 23 h 17 min 的飞行,创造了非官方燃料电池动力飞机的记录。

国内这方面的研究起步晚,2012 年 12 月同济大学航空航天与力学学院与上海奥科赛飞机公司历时 1 年多时间共同研制的中国第一架纯燃料

电池无人机“飞跃一号”已在上海奉贤首次试飞成功。2017 年 1 月,中国科学院大连化学物理研究所研制的 20 kW 燃料电池系统为动力电源的国内第一架有人驾驶燃料电池试验机首次试飞成功,标志着我国航空用燃料电池技术取得突破性进展,成为继美、德之后第 3 个拥有该技术的国家^[9]。

在燃料电池中,氢和氧发生化学反应产生电流。因此,燃料电池需要一个空气供应系统。它是由空气过滤器、空气压缩机、电动机等组成^[10]。其中,空气压缩机能够为燃料电池提供所需的压力和流量的干净空气,同时还能改善系统的水平衡^[11-12]。目前,燃料电池主要的空气压缩机为涡旋式、螺杆式、离心式、罗茨式等。在航空领域,由于离心式空气压缩机转速高,体积与质量小得到广泛的应用。但是,离心式还会存在一些问题。如在低流量状态下,会产生喘振现象,这样会对系统性能和寿命产生严重的影响^[13-15]。

本文采用双齿机构的原理构建燃料电池的空气增压泵和氢气循环泵,其工作原理如图 1 所示。

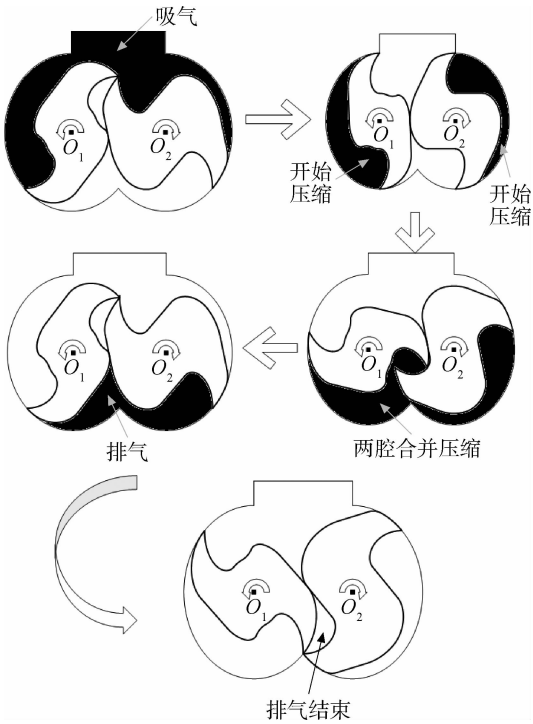


图 1 工作示意图

Fig. 1 Working diagram

圆弧 G_1H_1 的方程

$$\begin{bmatrix} x_{G_1H_1}(t) \\ y_{G_1H_1}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_1 \cos t \\ -r_1 \sin t \end{bmatrix} \tag{7}$$

式中 $t \in [\alpha + \beta, \pi - 2\varphi]$ 。

当阴转子旋转 θ_1 时,阴转子各段型线方程为

$$\begin{bmatrix} x(t, \theta_1) \\ y(t, \theta_1) \end{bmatrix} = \mathbf{M}(\theta_1) \cdot \begin{bmatrix} x(t) \\ y(t) \end{bmatrix} \tag{8}$$

式中 $\mathbf{M}(\theta_1)$ 为旋转矩阵

$$\mathbf{M}(\theta_1) = \begin{bmatrix} \cos \theta_1 & -\sin \theta_1 \\ \sin \theta_1 & \cos \theta_1 \end{bmatrix} \tag{9}$$

式中 r_1 为阴转子的基圆半径, r_2 为阳转子的基圆半径, r_w 为圆弧 D_1E_1 的圆心在 O_1 上的半径, r_h 为两转子中心距与 r_w 之差, φ 为 A_1B_1 与 B_2C_2 不在同一直线时, A_1B_1 与转子连心线 O_1O_2 的夹角。

1.2 阳转子型线

基本的阳转子是由多段圆弧,摆线和直线组成,如图 3 所示,坐标系中心固结一个半径为 r_{2t} 的节圆,圆弧 E_2F_2 的方程可由式(1)经过坐标变换和包络条件得出,其中坐标变换矩阵为

$$\mathbf{M}_1(\theta_1, \theta_2) = \begin{bmatrix} -\cos(\theta_1 + \theta_2) & \sin(\theta_1 + \theta_2) \\ \sin(\theta_1 + \theta_2) & \cos(\theta_1 + \theta_2) \end{bmatrix}$$

由于双齿气体循环泵是一对相互啮合的同步直双齿转子,故阴阳转子的转角 $\theta_1 = \theta_2$,则化简得

$$\mathbf{M}_1(\theta_1) = \begin{bmatrix} -\cos(2\theta_1) & \sin(2\theta_1) \\ \sin(2\theta_1) & \cos(2\theta_1) \end{bmatrix}$$

其中包络条件为

$$\begin{vmatrix} \frac{\partial x_{E_1F_1}}{\partial t} & \frac{\partial x_{E_1F_1}}{\partial \theta_1} \\ \frac{\partial y_{E_1F_1}}{\partial t} & \frac{\partial y_{E_1F_1}}{\partial \theta_1} \end{vmatrix} = 0$$

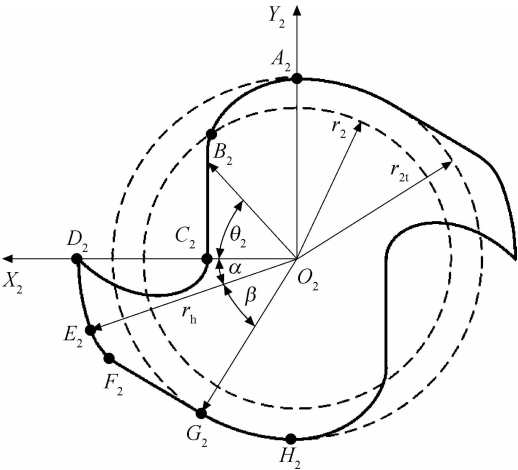


图 3 阳转子基本型线生成
Fig. 3 Male rotor line generation

则 E_2F_2 的方程为

$$\begin{bmatrix} x_{E_2F_2}(t) \\ y_{E_2F_2}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{2t} \cos(\alpha) + r_w \cos(\alpha + t) \\ -r_{2t} \sin(\alpha) - r_w \sin(\alpha + t) \end{bmatrix} \tag{10}$$

同理可得圆弧 A_2B_2 型线的方程

$$\begin{bmatrix} x_{A_2B_2}(t) \\ y_{A_2B_2}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -r_1 \cos(t - \varphi) \\ r_1 \sin(t - \varphi) \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} r_{2t} \sin t \sin(t - \varphi) \\ r_{2t} \sin t \cos(t - \varphi) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 2r_{2t} \cos(t - 2\varphi) \\ -2r_{2t} \sin(t - 2\varphi) \end{bmatrix} \tag{11}$$

式中 $t \in [0, \varphi]$ 。

直线 B_2C_2 型线方程

$$\begin{bmatrix} x_{B_2C_2}(t) \\ y_{B_2C_2}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_w \\ r_w \sin t \end{bmatrix} \tag{12}$$

式中 $t \in [0, \varphi]$ 。

摆线 C_2D_2 型线方程

$$\begin{bmatrix} x_{C_2D_2}(t) \\ y_{C_2D_2}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -r_h \cos(2t) + 2r_{2t} \cos t \\ -r_h \sin(2t) + 2r_{2t} \sin t \end{bmatrix} \tag{13}$$

式中 $t \in [0, \arccos(r_{1t}/r_h)]$ 。

圆弧 D_2E_2 型线方程

$$\begin{bmatrix} x_{D_2E_2}(t) \\ y_{D_2E_2}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_h \cos t \\ r_h \sin t \end{bmatrix} \tag{14}$$

式中 $t \in [-\alpha, 0]$ 。

直线 F_2G_2 型线方程

$$b = \alpha + \beta$$

$$\begin{bmatrix} x_{F_2G_2}(t) \\ y_{F_2G_2}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_2 \cos b + t \sin b \\ -r_2 \sin b + t \cos b \end{bmatrix} \tag{15}$$

式中 $t \in [0, 50 \sin \alpha]$ 。

圆弧 G_2H_2 型线方程

$$\begin{bmatrix} x_{G_2H_2}(t) \\ y_{G_2H_2}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_2 \cos t \\ -r_2 \sin t \end{bmatrix} \tag{16}$$

式中 $t \in [\alpha + \beta, \pi - 2\varphi]$ 。

当阳转子旋转 θ_2 时,阴转子各段型线方程为

$$\begin{bmatrix} x(t, \theta_2) \\ y(t, \theta_2) \end{bmatrix} = \mathbf{M}'(\theta_2) \cdot \begin{bmatrix} x(t) \\ y(t) \end{bmatrix} \tag{17}$$

式中 $\mathbf{M}'(\theta_2)$ 为旋转矩阵

$$\mathbf{M}'(\theta_2) = \begin{bmatrix} \cos \theta_2 & \sin \theta_2 \\ -\sin \theta_2 & \cos \theta_2 \end{bmatrix} \tag{18}$$

1.3 啮合点位置

由文中第 1.1 节和第 1.2 节可知阴阳转子的各段型线方程,则可计算出啮合点的坐标

1) $0 \leq \theta_1 \leq \alpha$, 其啮合点坐标为

$$\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = \mathbf{M}(\theta_1) \cdot \begin{bmatrix} r_w \cos(-\theta_1) \\ r_w \sin(-\theta_1) \end{bmatrix}$$

(19)

D_1E_1 和 D_2E_2 这两段销齿圆弧只是过渡曲线,在转角为 α 的时刻啮合。 C_1D_1 线段是摆线对一个点的啮合,其所包含的容积是无效的,占总体积很小的比例,其啮合的转角范围 $0 \sim \arccos(r_{1t}/r_h)$ 。

2) $\alpha \leq \theta_1 \leq \alpha + \beta$,其啮合点坐标为

$$\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = \mathbf{M}(\theta_1) \cdot \begin{bmatrix} -r_2 \cos(\alpha + \beta - \theta_1) \\ -r_2 \sin(\alpha + \beta - \theta_1) \end{bmatrix} +$$

$$\begin{bmatrix} 2r_t \cos(-\theta_1) \\ 2r_t \sin(-\theta_1) \end{bmatrix} +$$

$$\begin{bmatrix} -r_t \sin(-\theta_1 + \alpha + \beta) \sin(\alpha + \beta - 2\theta_1) \\ + r_t \sin(-\theta_1 + \alpha + \beta) \cos(\alpha + \beta - 2\theta_1) \end{bmatrix}$$

(20)

3) $\alpha + \beta \leq \theta_1 \leq \pi - 2\varphi$,其啮合点坐标为

$$\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = \mathbf{M}(\theta_1) \cdot \begin{bmatrix} r_1 \cos \theta_1 \\ -r_1 \sin \theta_1 \end{bmatrix}$$

(21)

4) $\pi - 2\varphi \leq \theta_1 \leq \pi - \varphi$,其啮合点坐标为

$$\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = \mathbf{M}(\theta_1) \cdot \begin{bmatrix} r_1 \cos(2\varphi) \\ r_1 \sin(2\varphi) \end{bmatrix} +$$

$$\begin{bmatrix} r_t \sin(\theta_1 + 2\varphi) \sin \varphi \\ -r_t \sin(\theta_1 + 2\varphi) \cos \varphi \end{bmatrix}$$

(22)

5) $\pi - \varphi \leq \theta_1 \leq \pi$,其啮合点坐标为

$$\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = \mathbf{M}(\theta_1) \cdot \begin{bmatrix} r_w \cos(2\theta_1) + 2r_t \cos \theta_1 \\ -r_w \sin(2\theta_1) - 2r_t \sin \theta_1 \end{bmatrix} +$$

$$\begin{bmatrix} -r_t \sin \theta_1 \sin(2\theta_1) \\ -r_t \sin \theta_1 \cos(2\theta_1) \end{bmatrix}$$

(23)

由于阴阳转子都是 π 旋转形成的,故 $\theta_1 = [\pi, 2\pi]$ 之间啮合点的坐标与 $\theta_1 = [0, \pi]$ 的啮合点坐标是一样的,故不重复计算。其啮合如图 4 所示。

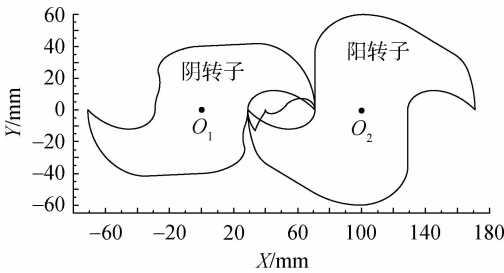


图 4 啮合图

Fig. 4 Meshing diagram

2 工作容积计算

双齿气体循环泵是采用二维型线,其工作腔容积是可以用工作腔的基元面积乘以转子的齿高

求得,故此,必须求工作腔的基元面积。由于循环泵是周期性变化,可将工作腔分为吸气腔,压缩腔和排气腔,其变化如图 1 所示,结构参数如表 1 所示。

表 1 结构参数
Table 1 Structure parameter

参数	数值
r_t/mm	50
r_1/mm	40
r_2/mm	60
r_w/mm	29
r_h/mm	71
α/rad	0.35
φ/rad	$\arccos(0.69)$
β/rad	$\arccos(39/50)$

但是计算基元面积不仅需要各段型线的方程,还需要知道外壳的型线方程,其外壳的方程如下:

$$r_h \leq t \leq r_h + 20$$

$$\begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ t \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} x_2 \\ y_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2r_{1t} \\ t \end{bmatrix}$$

(24)

式中 $t \in [r_h, r_h + 20]$ 。

$$0 \leq t \leq 2r_{1t}$$

$$\begin{bmatrix} x_3 \\ y_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} t \\ r_h + 20 \end{bmatrix}$$

(25)

式中 $t \in [0, 2r_{1t}]$ 。

$$\pi/2 \leq t \leq 2\pi - \arccos\left(\frac{r_{1t}}{r_h}\right)$$

$$\begin{bmatrix} x_4 \\ y_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_h \cos t \\ r_h \sin t \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} x_5 \\ y_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -r_h \cos t + 2r_{1t} \\ r_h \sin t \end{bmatrix}$$

(26)

式中 $t \in [\pi/2, 2\pi - \arccos(r_{1t}/r_h)]$ 。

本文采用线积分方法求解基元面积,即将计算基元面积的二元面积分的问题转化为一元线积分求解,这样只要知道组成工作腔轮廓曲线的方程,就可直接得到工作腔的基元面积。这种方法归一性很好,可以得到任意时刻工作腔的容积,以下以吸气腔计算为例。

根据格林公式,一个封闭区域 σ 的面积 S ,其

面积分可转化为其外轮廓线 L 的第一类线积分^[10],即

$$S = \iint_{\sigma} \left(\frac{\partial Y}{\partial x} - \frac{\partial X}{\partial y} \right) dS = \oint_{+L} (Xdy + Ydx) \tag{27}$$

令 $X=x, Y=0\text{ mm}$, 那么式(19)转化为

$$S = \iint_{\sigma} dx dy = -\oint_{+L} x dy = \oint_{-L} x dy = \sum_{i=1}^n \int_{-L_i} x dy \tag{28}$$

L 是封闭区域的边线,该边线可由多段曲线

组成,正好代表积分沿轮廓线顺时针积分,负号代表逆时针积分。

如图 1、图 2 所示转子是由多段曲线组成,随着转角的转动,对应的共轭曲线不同。当转角 $\theta_1 = [0, \arccos(r_{1t}/r_h)]$, 如图 5 所示。

则吸气腔的基元面积为

$$S = \iint_{\sigma} dx dy = -\oint_{+L} x dy = \oint_{-L} x dy = \sum_{i=1}^{19} \int_{-L_i} x dy \tag{29}$$

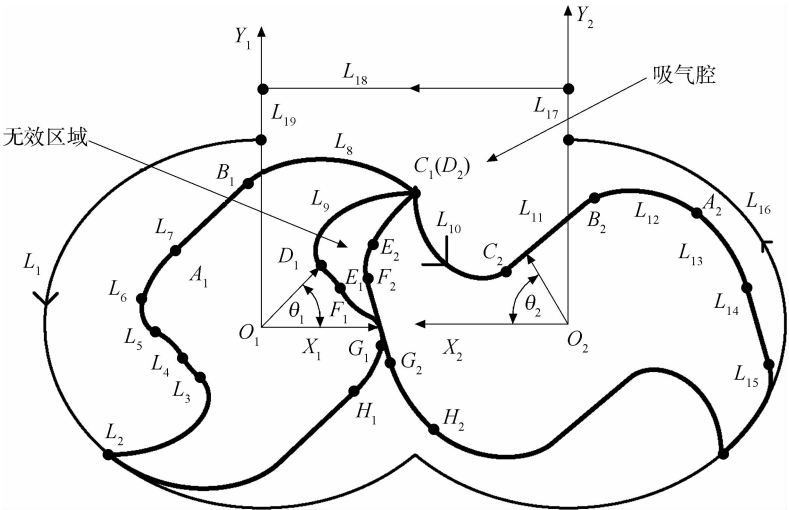


图 5 吸气腔基元面积
Fig. 5 Suction chamber element area

以摆线 C_1D_1 为例,由式(5)可知其方程,对其进行全微分

$$\begin{bmatrix} dx \\ dy \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2r_h \sin(2t - \theta_1) - 2r_{1t} \sin(t - \theta_1) \\ 2r_h \cos(2t - \theta_1) - 2r_{1t} \cos(t - \theta_1) \end{bmatrix} \tag{30}$$

该段摆线的线积分为

$$\int_{-L_9} x dy = \int_{-C_1D_1} x dy = \int_{t_1}^{t_2} x_{C_1D_1} \cdot [2r_h \cos(2t - \theta_1) - 2r_{1t} \cos(t - \theta_1)] dt \tag{31}$$

式中 t_1, t_2 表示摆线 C_1D_1 两侧端点的中心角,且 t_2 是啮合点随着转角 θ_1 在变化。

同理可得其他轮廓曲线的线积分,其上下限分别代表曲线两侧端点的位置。

从图 4 中可见,不管是吸气腔、压缩腔还是排气腔,都是由多段曲线组成的,这些曲线的线积分含义是它们与 y 轴所包含的面积。故此,多段曲线线积分之和相互抵消就只剩下封闭区域的面

积,其随转角 θ_1 的变化如图 6 所示。

如图 6 所示,在转角为 0 时候阴阳转子处在图 4 的位置,故转角为 0 的基元面积代表的是吸气腔的面积。随着阴阳转子的转动当转子处在图 5 的位置时,由于存在一个封闭的无效区域,随着

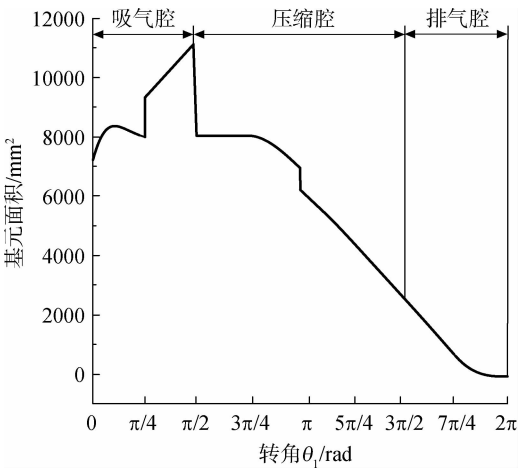


图 6 基元面积随着转角的变化
Fig. 6 Element area changes with the rotor angle

转子的转动,封闭区域的打开会造成一个基元面积的突升。当转角到达 $\pi/2$,循环泵开始压缩。此时基元面积的突降是由于吸气腔对于压缩腔多一个吸气口相连的面积。在压缩过程中会形成一个图 5 所示的封闭的无效区域,从而导致上图的第三个突降。

3 结 论

1) 讨论了双齿气体循环泵的基本结构;以多段圆弧、摆线和直线为阴阳转子的型线,选定了适合的坐标,通过坐标变换和包络条件等,建立了阴阳转子的型线方程。

2) 双齿气体循环泵作为燃料电池用的压缩机时,工作腔容积随转角的变化关系是设计循环泵的基础。本文采用了线积分的方法推导出了其工作腔基元面积的计算方法,而且该方法还可以运用到更复杂型线计算中去。

3) 第一个和第三个基元面积的突升和突降是由于双齿气体循环泵摆线 C_1D_1 与 C_2D_2 在啮合时会形成一个无效的封闭区域,但对整个双齿气体循环泵的耗功并没有什么影响,这个会在后续文章中进一步分析。第二个基元面积突降,是由于吸气腔相对于压缩腔多了一个与吸气口相连的一部分面积。

参考文献:

[1] DIETER B. Hybrid system;a promising way solving future energy problems[J]. Journal of Aerospace Power,2007,22 (4):565-576.

[2] LARSON E D. A review of life-cycle analysis studies on liquid biofuel systems for the transport sector[J]. Energy for Sustainable Development,2006,10(2):109-126.

[3] 王诚. 燃料电池技术开发现状与发展趋势[J]. 新材料产业,2012(2):37-43.

WANG Cheng. Fuel cell technology development status and development trend[J]. New Material Industry,2012 (2):37-43. (in Chinese)

[4] 高鹏,徐玉梁. 质子交换膜燃料电池的研究与应用[J]. 小型内燃机与摩托车,2005,34(2):22-25.

GAO Peng,XU Yuliang. Research and application of proton exchange membrane fuel cell[J]. Journal of Small Internal Combustion Engine and Motorcycle,2005,34(2): 22-25. (in Chinese)

[5] 许震宇,卢强. 燃料电池轻型飞机起飞质量估算方法[J]. 飞机设计,2011,31(3):6-8,23.

XU Zhenyu,LU Qiang. Estimation method of the take-off

weight of fuel cell powered light aircrafts[J]. Journal of Aircraft Design,2011,31(3):6-8,23. (in Chinese)

[6] 杜宗濤. 波音公司研究燃料电池飞机[J]. 电世界,2008,49 (1):53.

DU Zongying. Boeing researches fuel cell aircraft[J]. Electric World,2008,49(1):53. (in Chinese)

[7] ÖHLMANN D,KALLO D J. Flying with Antares DLR-H2;from stereo images to multi view[R]. Journal of Physics,2013,415(1):25-29.

[8] RENOUARD-VALLET G,SABALLUS M,SCHUMANN P,et al. Fuel cells for civil aircraft application;on-board production of power,water and inert gas[J]. Chemical Engineering Research and Design,2012,90(1):3-10.

[9] 伍赛特. 燃料电池应用于航空推进领域的前景展望[J]. 能源研究与管理,2018,37(4):91-93,107.

WU Saite. Prospects for application of fuel cell in feild of aircrafts propulsion[J]. Journal of Energy Research and Management,2018,37(4):91-93,107. (in Chinese)

[10] SMITH I K,STOSIC N,KOVACEVIC A. Optimisation of screw compressors [J]. Applied Thermal Engineering, 2003,23(10):1177-1195.

[11] CUNNINGHAM J M. Air system managenment for fuel cell vechicle applications[D]. Berkeley, California, USA: University of California,2001.

[12] GELFI S,STEFANOPOULOU A G,PUKRUSHPAN J T,et al. Dynamics of low-pressure and high-pressure fuel cell air supply system[C] // Proceedings of the American Control Conference. Denver, USA;IEEE,2003:2049-2054.

[13] 杨启超,李连生,赵远扬. 燃料电池供气系统中空气压缩机的研发现状[J]. 通用机械,2008(1):32-37.

YANG Qichao,LI Liansheng,ZHAO Yuanyang. Research and development status of air compressor in fuel cell gas supply system[J]. General Machinery,2008(1):32-37. (in Chinese)

[14] 张毅. 燃料电池车用空气压缩机的发展现状及趋势分析 [J]. 内燃机与配件,2019(2):201-202.

ZHANG Yi. Development status and trend analysis of fuel cell vehicle air compressor[J]. Internal Combustion Engine and Accessories,2019(2):201-202. (in Chinese)

[15] 赵冬冬,华志广,梁艳. 飞机燃料电池的离心空气压缩机特性研究[J]. 航空科学技术,2017,28(2):64-68.

ZHAO Dongdong,HUA Zhiguang,LIANG Yan. Research on centrifugal air compressor characteristics of aircraft fuel cell[J]. Aviation Science and Technology,2017,28(2):64-68. (in Chinese)

[16] 小林昭七. 曲线与曲面的微分几何[M]. 王运达,译. 北京: 机械工业出版社,1984.

[17] 苏步青,华宣积,忻元龙. 实用微分几何引论[M]. 北京: 科学出版社,1986:150-151.

[18] 彭学院,张卫星,冯健美,等. 一种双齿压缩机转子型线: CN201610004152. 8[P]. 2016-06-08.