

拖拉机涡旋压缩装置内部流场 CFD 分析

杨立云, 李文涛, 张良贵, 景娟红

(河北机电职业技术学院, 河北 邢台 054000)

摘要: 以拖拉机涡旋压缩装置为研究对象, 利用 MatLab 建立了一种涡旋压缩装置的复杂组合式涡旋线数学模型, 该涡旋线由基圆渐开线、高次曲线及圆弧组成。进一步借助 CFD 对涡旋压缩装置的内部流场进行数值模拟, 得出该组合式涡旋曲线压缩腔的内部流场分布及内部流场与涡旋线曲率的关系, 为进一步研究组合式涡旋线压缩装置的设计方法提供理论支持。

关键词: 涡旋压缩装置; 涡旋线; 数值模拟; CFD; 流场

中图分类号: S219.03

文献标识码: A

文章编号: 1003-188X(2021)07-0260-04

DOI:10.13427/j.cnki.njyi.2021.07.045

0 引言

涡旋压缩装置实现气体压缩原理是在工作过程中动涡旋盘与静涡旋盘的周期性啮合, 腔体容积周期性变化, 实现腔体气体压缩的流体机械装置^[1-3]。容积的大小与动涡旋盘和静涡旋盘型线和参数有关^[4-5]。涡旋压缩装置在运转过程中, 具有噪音低、能量消耗少、压缩效率高及可靠性高的特点, 在制冷和压缩领域得到了广泛的应用。

现阶段, 在动力学领域和热力学领域对涡旋压缩装置进行了大量的理论分析^[6], 但对于组合涡旋型线腔体及内部流体的数值计算研究不足, 且未进行型线参数与内部流体之间相互关系的研究。

为此, 利用 MatLab 建立了涡旋压力装置内部复杂组合型线的数学控制方程, 采用法向等距切割的方法, 对涡旋压力装置的型线数学方程进行拟合, 得到型线的连续性数学方程^[7-10]; 同时, 建立涡旋型线腔体内的动量方程和能量方程, 形成压缩腔流体的基本控制方程^[11]; 最后, 运用 CFD 软件对动量方程及能量方程进行数值模拟, 得到腔体内部的流场分布和内部流场与涡旋型线之间的关系。

1 组合涡旋型线数学控制方程

涡旋压缩装置内部腔体为组合涡旋型线, 由变截面圆渐开线、高次曲线及连接圆弧组成。涡旋型线的

通用表达式为

$$\begin{cases} x = R_g \cos\varphi + R_s \sin\varphi \\ y = R_g \sin\varphi - R_s \cos\varphi \end{cases}$$

其中, R_g 和 R_s 为型线基线参数; φ 为型线展开角。

1.1 圆渐开线型线数学控制方程

变截面圆渐开线基线的组成为 3 段不同直径的涡旋型线, 其数学控制方程为

$$\begin{cases} a_1 & 0 \leq \varphi \leq 2\pi \\ a_2 & 2\pi < \varphi \leq 4\pi \\ a_3 & 4\pi < \varphi \leq 6\pi \end{cases}$$

其中, a_1 、 a_2 、 a_3 分别为 3 段基圆半径。

1.2 高次曲线型线数学控制方程

高次曲线型线数学控制方程为

$$\begin{cases} x = R_g \cos\varphi + R_s \sin\varphi \\ y = R_g \sin\varphi - R_s \cos\varphi \end{cases}$$

$$\begin{cases} R_g = c_1 + 2c_2\left(\varphi - \frac{\pi}{2}\right) + 3c_3\left(\varphi - \frac{\pi}{2}\right)^2 \\ R_s = c_0 + c_1\left(\varphi - \frac{\pi}{2}\right) + c_2\left(\varphi - \frac{\pi}{2}\right)^2 + c_3\left(\varphi - \frac{\pi}{2}\right)^3 \end{cases}$$

其中, c_0 、 c_1 、 c_2 、 c_3 分别为型线控制参数。

1.3 涡旋型线数学控制方程

为得到不同涡旋型线的连续控制方程, 假设各型线参数数值如表 1 所示。将表 1 数据代入型线数学控制方程, 并在 MatLab 中绘制该组合涡旋型线, 生产涡旋压缩装置的基本物理模型。图 1 为组合型线压缩装置内部腔体流体区域示意图。当动涡旋盘与静涡旋盘啮合时, 压缩腔体区域如图 1 中阴影位置。

收稿日期: 2019-09-23

基金项目: 河北省高等学校科学研究计划项目(QN2016260)

作者简介: 杨立云(1979-), 女, 河北迁安人, 副教授, 硕士, (E-mail)

jgxumxi2@163.com。

表1 动力及力学参数

Table 1 Dynamic and mechanical parameters

型线系数	基圆半径 a/mm	方程控制 系数 c	圆回转半径 R_{or}/mm
等截面圆渐开线	a_0	2.069	2.651
变截面圆渐开线	a_1	2.885	5.063
	a_2	4.163	
	a_3	2.885	
高次曲线	c_0	11.741	2.612
	c_1	-3.891	
	c_2	1.121	
	c_3	-0.056	

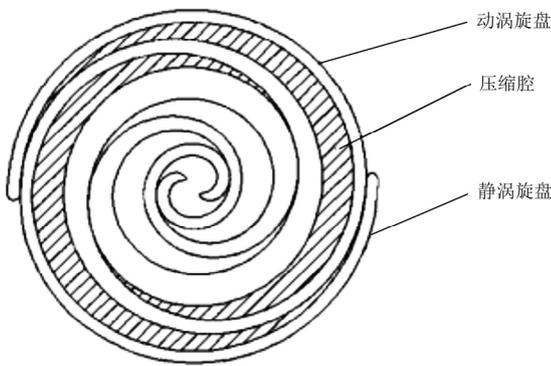


图1 压缩腔示意图

Fig.1 The chart of of compression cavity

2 压缩腔体容积

2.1 变截面圆容积

变截面圆渐开线型线由3段不同半径的圆渐开线组成,半径分别为 a_1 、 a_2 、 a_3 ,由此可以得出基线 L 及腔体容积的表达式为

$$\begin{cases} L = \int_{4\pi}^{\varphi_{end}-\varphi} a_1 \varphi d\varphi + \int_{\varphi_{end}-\theta-2\pi}^{4\pi} a_2 \varphi d\varphi \\ V = 2hR_{or} [L + R_g(\varphi_{end} - \theta - 2\pi) - R_g(\varphi_{end} - \theta)] \end{cases}$$

其中, h 为涡旋齿高度; R_{or} 为动涡旋盘当量回转半径; θ 为涡旋压缩装置主轴回转角度; φ_{end} 为型线展开角终止角度。

2.2 变截面高次曲线容积

变截面高次基线 L 及腔体容积的高次曲线表达式为

$$\begin{cases} L = \int_{\varphi_{end}-\theta-2\pi}^{\varphi_{end}-\theta} \sqrt{x^2 + y^2} d\varphi \\ V = 2hR_{or} [L + R_g(\varphi_{end} - \theta - 2\pi) - R_g(\varphi_{end} - \theta)] \end{cases}$$

3 压缩腔压力和温度

假设 V_s 为组合涡旋型线腔体内初始状态体积, $V(\theta)$ 为组合涡旋型线腔体内终止状态体积, p_s 为组合涡旋型线腔体内初始状态压力, $p(\theta)$ 为组合涡旋型线腔体内终止状态压力, T_s 为组合涡旋型线腔体内初始状态温度, $T(\theta)$ 为组合涡旋型线腔体内终止状态温度, k 为压缩多变指数,则组合涡旋型线腔体内终止状态压力压力和工作温度可表示为

$$\begin{cases} p(\theta) = p_s \left[\frac{V_s}{V(\theta)} \right]^k \\ T(\theta) = T_s \left[\frac{V_s}{V(\theta)} \right]^{(1-\frac{1}{k})} \end{cases}$$

4 CFD数值计算

4.1 基本控制方程

对组合涡旋型线腔体内流体进行CFD数值,在求解控制方程时,采用网格划分法对控制方程在空间域内进行离散化处理。

引入变量 Φ 建立组合涡旋型线腔体内基本控制方程,表达式为

$$\frac{\partial(\rho\Phi)}{\partial t} + \text{div}(\rho u\Phi) = \text{div}(\Gamma \text{grad}\Phi) + S$$

其中, Φ 为通用变量; Γ 为广义范围内扩散系数; S 为广义范围内控制方程源项。

4.2 基本控制参数

在使用组合涡旋型线腔体内基本控制方程进行各种物理参数求解时,根据不同的目标变量 Φ ,引出相应的物理属性表达式,选取初始条件和边界限制物理条件,即可对组合涡旋型线腔体内流场的基本控制方程进行求解。由此可得出通用控制方程内各项的表达式,如表2所示。

表2 通用控制方程各项表达式

Table 2 The various expressions of general governing equation

控制方程	Φ	Γ	S
连续性方程	1	0	0
动量方程	u_i	μ	$-\frac{\partial(\rho)}{\partial x_i} + S_i$
能量方程	T	$\frac{k}{c}$	S_T

5 涡旋压缩装置流场分析

进行CFD数值计算时,采用基于动能 k 与动能耗

散率 ε 的标准 $k - \varepsilon$ 模型进行求解^[12-13]。

在 $k - \varepsilon$ 模型中, u' 为湍流速度, \bar{u} 为平均速度, l 为湍流强度, l 为湍流特征长度, Re_{DH} 为雷诺数, $C_\mu = 0.09$, 则有

$$\begin{cases} k = 1.5(\bar{u}l)^2 \\ \varepsilon = C_\mu \frac{3}{4} \frac{k^2}{l} \\ l = \frac{u'}{\bar{u}} = 0.16 Re_{DH}^{-1/8} \end{cases}$$

由图1所示压缩腔示意图可以提取出组合型线涡旋压缩装置单个压缩腔的二维示意图,如图2所示。

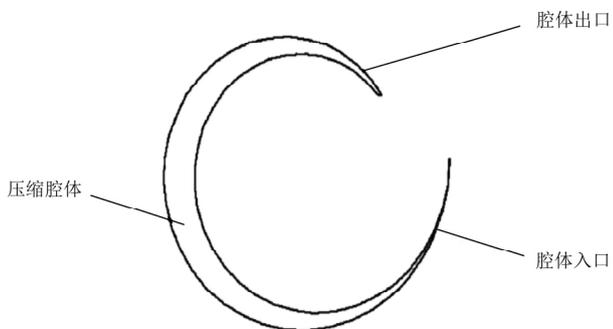


图2 型线二维示意图

Fig.2 The chart of two-dimensional profile

由图2可以看出: 单个压缩腔内存在腔体入口、腔体出口及压缩腔体, 流体由入口进入压缩腔体, 在动涡旋盘与静涡旋盘的啮合作用下, 在腔体内形成周期变化的压力。

1) 腔体入口边界条件: 选取10组平均速度作为涡旋压缩装置腔体入口处速度, 计算得出对应的动能 k 与动能耗散率 ε , 平均速度取值及对应计算结果如表3所示。

表3 通用控制方程各项表达式

Table 3 The various expressions of general governing equation

$\bar{u} / m \cdot s^{-1}$	k	ε
7	1.00	1505.97
17	4.06	7093.40
27	7.12	12 125.50
37	13.23	17 990.60
47	16.28	23 300.37
57	19.33	28 748.96

续表3

$\bar{u} / m \cdot s^{-1}$	k	ε
67	22.39	34 197.56
77	25.45	39 646.17
87	28.50	45 094.76
97	31.56	50 543.36

2) 腔体出口边界条件: 假设腔体出口处流体带有一定压力。

3) 腔体内壁表面条件: 假设内壁表面对介质无摩擦, 与流体之间不产生滑移。

经过计算, 可以得出组合型线涡旋压缩装置内腔容积变化、压力变化以及温度变化曲线, 如图3~图5所示。

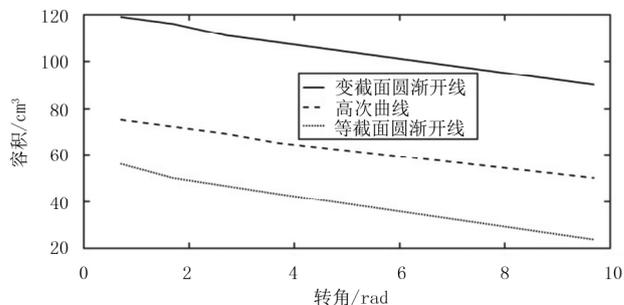


图3 涡旋压缩装置内腔容积变化曲线

Fig.3 Volume change curve vortex compression device cavity

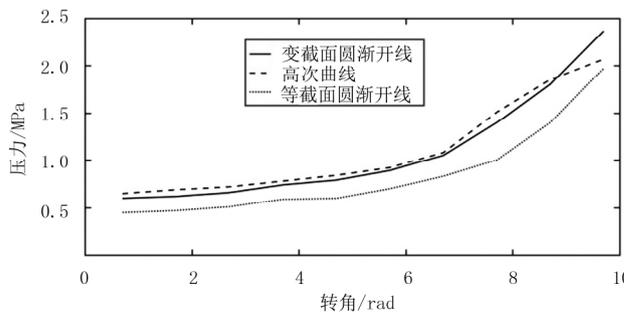


图4 涡旋压缩装置内腔压力变化曲线

Fig.4 Pressure change curve vortex compression device cavity

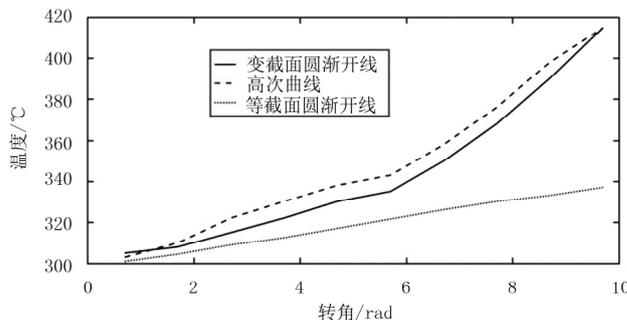


图5 涡旋压缩装置内腔温度变化曲线

Fig.5 Temperature change curve vortex compression device cavity

由图3~图5可以看出:组合型线涡旋压缩装置在不同型线压缩腔内,腔体容积均出现下降趋势,3种型线容积下降的速率基本一致,变截面圆渐开线腔体容积最大,等截面圆渐开线腔体容积最小;腔体压力成上升趋势,转角越大上升幅度越明显,变截面与高次曲线上升幅度基本一致;腔体温度成上升趋势,转角越大上升幅度越明显,变截面与高次曲线上升幅度基本一致,且高次曲线腔体温度略大于等截面曲线腔体温度。

6 结论

1) 利用 MatLab 建立由基圆渐开线、高次曲线及圆弧组成的复杂组合式涡旋线数学模型,并对复杂腔体内的压力与温度进行建模。

2) 借助 CFD 对涡旋压缩装置的内部流场进行数值模拟,得出复杂组合涡旋压缩装置腔体内部容积变化、压力变化及温度变化关系。

3) 随着涡旋压缩装置主轴转角的增大,腔体容积下降,腔体压力与腔体温度均出现上升,转角越大,腔体压力与腔体温度上升趋势越明显。

参考文献:

- [1] 刘涛,李传恒,侯富勇.变截面型线涡旋压缩机的 CFD 流场分析[J].兰州理工大学学报,2017(5):45-49.
[2] 邢恒远,王珍,秦海杰.涡旋压缩机压缩腔流体的 CFD 模

- 拟分析及应用[J].压缩机技术,2014(1):15-17.
[3] 邢恒远.组合型线涡旋压缩机压缩腔流体的 CFD 模拟[J].机械设计与制造工程,2016(12):21-23.
[4] 刘振全,张川.变截面涡旋压缩机型线的研究[J].甘肃工业大学学报,2002,28(4):61-64.
[5] 刘涛,刘振全,郭再新.修正型线涡旋压缩机的内容积比确定方法[J].流体机械,2003,31(10):12-14.
[6] OOI K T, ZHU J. Convective heat transfer in a scroll compressor chamber: a 2-D simulation [J].International journal of thermal sciences, 2014, 43(7):677-688.
[7] 岳向吉,巴德纯,苏征宇,等.基于动网格的滚动活塞压缩机泵腔流动瞬态模拟[J].东北大学学报(自然科学版),2011,32(4):563-566.
[8] 杨科,张远,李雪梅,等.先进绝热压缩空气储能系统的设计计算[J].工程热物理学报,2012,33(5):726-728.
[9] 李超,罗辉,张云豫.不同涡旋型线压缩腔流场的模拟分析[J].压缩机技术,2009(14):11-14.
[10] 董玲,徐蔚,杨素君.基于 Matlab、Excel 和 AutoCAD 的零件三维建模技术[J].机械工程与自动化,2006(1):102-104.
[11] 王君,刘振全.采用圆渐开线修正涡旋压缩机涡齿型线[J].机械工程学报,2006(6):221-226.
[12] 杨骅,屈宗长.涡旋压缩机泄漏研究综述[J].流体机械,2003,31(11):23-26.
[13] 李文华,褚红艳.涡旋压缩机泄漏模型的建立与分析[J].压缩机技术,2007(6):8-10.

Vortex Compression Device for Tractor CFD Analysis of Internal Flow

Yang Liyun, Li Wentao, Zhang Lianggui, Jing Juanhong

(Hebei Institute of Mechanical and Electrical Technology, Xingtai 054000, China)

Abstract: This paper takes the tractor scroll compression device as the research object, and establishes a complex combined mathematical model of scroll compression device by using MATLAB. The scroll line consists of basic circle involute, high order curve and arc. Furthermore, the internal flow field of the scroll compression device is simulated by CFD, and the distribution of the internal flow field and the relationship between the internal flow field and the curvature of the scroll line are obtained. To provide theoretical support for further research on the design method of combined scroll line compression device.

Key words: vortex compression device; vortex line; numerical simulation; CFD; flow field