DOI: 10.3901/JME.2014.03.151

干式气体密封端面型槽仿生设计的相关性^{*}

彭旭东 江锦波 白少先 李纪云

(浙江工业大学过程装备及其再制造教育部工程研究中心 杭州 310014)

摘要: 基于统计学原理和气体润滑理论, 建立飞鸟翼翅外形结构特征与干式气体密封端面型槽特征两者的相关性数学模型, 建立干式气体密封端面膜压控制方程; 基于模糊数学知识提出界定端面型槽几何结构特征的隶属度参数及其计算表达式, 并依据隶属度参数对干式气体密封进行分类; 采用有限差分法求解密封端面膜压控制方程, 获得了端面气膜刚度, 对比分析飞鸟翼翅长短和宽窄与飞行速度之间的相关性及端面型槽长短和宽窄与不同运行转速下干式气体密封运行稳定性的相关性。结果表明: 表征端面型槽或飞鸟翼翅的长短和宽窄程度与其运行或飞行速度之间呈中度正相关关系, 即长翼翅的鸟类具有较好飞行稳定性, 而细长翼翅的飞鸟具有更佳的高速飞行稳定性; 相应地, 长槽端面干式气体密封具有良好的运行稳定性, 而细长槽则具有更好的高速运行稳定性。结果揭示了飞鸟生物模型和干式气体密封工程模型之间的相互关联规律, 证明基于飞鸟翼翅外形结构特征的端面型槽仿生设计的可行性, 为密封的仿生设计提供重要理论依据。

关键词: 仿生设计; 干气密封; 稳定性; 统计学; 模糊数学

中图分类号: TH117

Correlational Research of Bionics Design of Dry Gas Face Seal Groove

PENG Xudong JIANG Jinbo BAI Shaoxian LI Jiyun

(Engineering Research Center of Process Equipment and Its Re-manufacturing of Ministry of Education, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310014)

Abstract: Based on statistical method and gas lubrication theory, the correlation mathematical models of outline constructional feature of a bird wing and face groove feature of a dry gas seal (DGS) are established, and the film pressure controlling equation of a DGS is set up. The membership grades and their calculation expressions used to define face groove geometrical feature of a DGS are presented based on fuzzy mathematics, and DGSs are classified according to the membership grades. The gas film pressure control equations are resolved by use of finite difference method, and the gas film stiffness of a DGS is obtained. The correlation between the constructional feature parameters of bird wing outlines and flight speed and the correlation between face groove geometric parameters and operational stability of a DGS at different speeds are comparatively analyzed. Results show that the correlations between the geometric constructional feature parameters of bird wing outlines or face grooves and their flight speeds or operational speeds are in moderate degree. That is to say long wings give a bird stability, and long narrow wings give a bird more stability at high flight speeds, and long grooves give a DGS stability, and long narrow grooves give a DGS more stability at high operational speeds, correspondingly. Results also reveal that the relationship between a bird biological model and a DGS engineering model exists exactly. The feasibility of bionic design of face groove based on the geometric characteristics of bird wing outlines is demonstrated. The important theory basis is provided for the bionic design of a DGS.

Key words: bionic design; dry gas seal; stability; statistics; fuzzy mathematics

0 前言

为解决螺旋槽干气密封(Spiral groove dry gas seal, S-DGS)端面槽内压力分布不均、运行稳定性不佳等问题而开发的一系列端面型槽结构已呈现出明

显的仿生设计特征^[1]。如带内环槽的螺旋槽结构, 尽管其在高速条件下稳定性不如单纯螺旋槽结构, 但是其开启特性和低速稳定性却表现较优^[2-4]; 又如形似飞行大雁的雁型槽结构, 与单纯螺旋槽相比其不仅具有较高的稳定性和好的密封性能, 而且更适用于高速高压场合^[5-6]; 工程实际应用经验表明, 形似雨燕叉形尾翼的燕尾螺旋槽结构综合了不同转速的需求, 其中短尾型槽适合于干气密封启动和停车操作, 而长尾型槽适合于高速运转的稳定^[7-8]; John

^{*} 国家自然科学基金(51175740, 51275473)、浙江省杰出青年科学基金(R1090833)和高等学校博士学科点专项科研基金(20103317110002)资助项目。20130307收到初稿, 20130723收到修改稿

Crane 公司还提出一种形似圣诞树外形的枞树槽^[9], 研究表明这种适于双向旋转的树型槽具有较好的动压效应^[10]; PECHT 等^[11-12]介绍了一种短粗型 S-DGS 在低速反应釜上的成功应用, 其型槽形状恰似低速翱翔的鹰、鹭等鸟类的宽阔翅外形; SAXENA^[13]介绍了一种细长型 S-DGS 在高速离心压缩机上的应用, 其型槽形状恰似高速飞行的军舰鸟、雨燕等鸟类的细长翼翅外形, 诸如此类的实例还有不少。任露泉等^[14]指出, 对密封表面进行非光滑处理, 将会增加密封件的承载能力、油膜刚度同时降低其摩擦与磨损, 是未来机械密封件的发展方向。综上所述, 干气密封端面型槽与飞鸟翼翅外形结构特征之间存在的某种不明确的必然关系, 但是, 截至目前自作者明确提出开展干气密封端面型槽的仿生设计概念以来^[1], 很少见到关于飞鸟翼翅外形结构特征在干气密封型槽应用方面的理论研究, 因此开展相关研究并构建干气密封端面结构的仿生设计理论与方法具有重要意义。

文中通过应用统计学方法研究飞鸟翼翅长短宽窄与飞行速度的相关性, 并以螺旋槽为研究对象, 分析其长短宽窄与不同转速下运行稳定性的相关性, 最后对比分析型槽的仿生模型与工程模型之间的关联关系。

1 相关性数学模型

1.1 翼翅和型槽模型

根据翅形不同可将鸟分为椭圆翅、高速翅、宽阔翅和细长翅 4 大类^[15]。椭圆翅鸟的翼翅短小, 展弦比较小, 如麻雀、啄木鸟等; 高速翅鸟的翼翅细而尖长, 展弦比较大, 这类鸟飞行速度一般较快, 如雨燕、鸽子等; 宽阔翅鸟的翼翅长而宽阔, 且有适度的展弦比, 这类鸟一般以较低的飞行速度翱翔于陆地上空, 如鹰、鹭等; 细长翅鸟的翼翅有很大的展弦比, 翅膀很长, 这类鸟大都在海面上飞行, 速度快, 抗风浪能力强, 如信天翁、军舰鸟等。

图 1a 所示是飞鸟翼翅的几何模型, 其中 L_w 表示翼翅长度, w_b 表示鸟的躯体宽度, w_w 表示翼翅宽度。观察发现, 具有不同飞行速度能力的鸟类其翼翅长短和宽窄程度差异很大, 为方便飞鸟翼翅外形结构特征和干气密封型槽之间的仿生类比研究, 故定义鸟翅的翼长比 R_{lb} 和展弦比 R_{lw} 两个量纲一参数分别来表征翼翅长短和宽窄程度等翼翅几何外形结构

$$R_{lb} = L_w / w_b \quad (1)$$

$$R_{lw} = L_w / w_w \quad (2)$$

理论研究表明^[16], 对数螺旋线螺旋槽产生的流体动压效应最强, 将其作为干气密封动压槽所形成的气膜刚度最大, 密封稳定性最佳, 故选择螺旋槽作为研究对象。图 1b 是 S-DGS 开槽端面的几何模型, 图 1b 中 r_i 、 r_o 分别为端面内、外半径, r_g 为槽底半径; β 为螺旋角, θ_1 为螺旋槽外径圆弧夹角, θ_g 和 θ_o 分别为某螺旋线的起始角和终止角。在极坐标系下, 对数螺旋线方程为 $r = r_g \exp(\theta \tan \beta)$, 其中 r 为极径, θ 为极角。为表征螺旋槽的长短和宽窄程度, 分别引入槽长比 ε (螺旋槽长度和密封端面宽度之比) 和槽长宽比 λ (螺旋槽长度与外圆上的槽宽度之比)。

(a) 飞鸟翼翅

(b) 螺旋槽

图 1 飞鸟翼翅和气体密封型槽几何模型

螺旋槽长度 l 计算式为

$$l = \int_{\theta_g}^{\theta_o} (r / \cos \beta) d\theta \quad (3)$$

外圆周上螺旋槽宽度 w 计算式

$$w = r_o \theta_1 \quad (4)$$

则螺旋槽的槽长比 ε 和槽长宽比 λ 分别为

$$\varepsilon = \frac{l}{r_o - r_i} = \frac{\int_{\theta_g}^{\theta_o} (r / \cos \beta) d\theta}{b} \quad (5)$$

$$\lambda = \frac{l}{w} = \frac{\int_{\theta_0}^{\theta_1} (r/\cos\beta) d\theta}{r_0\theta_1} \quad (6)$$

假设 S-DGS 端面间是层流、等温的等黏度气体，则计算端面气膜压力的量纲一雷诺方程为^[3,6]

$$\frac{1}{\bar{r}^2} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\bar{p} H^3 \frac{\partial \bar{p}}{\partial \theta} \right) + \frac{1}{\bar{r}} \frac{\partial}{\partial \bar{r}} \left(\bar{r} \bar{p} H^3 \frac{\partial \bar{p}}{\partial \bar{r}} \right) = \Lambda \frac{\partial}{\partial \theta} (\bar{p} \bar{h}) \quad (7)$$

式(7)中，各量纲一参数分别定义为

$$\bar{r} = r/r_i \quad \bar{h} = h/h_0 \quad \bar{p} = p/p_i \quad \Lambda = 6\mu\omega r_i / (p_i/h_0^2) \quad (8)$$

式中， p 为端面间的气膜压力； p_i 为内径处压力； h_0 为端面非开槽区气膜厚度； h_i 为螺旋槽槽深； h 为端面任意处膜厚，在端面非开槽区域， $h=h_0$ ，在端面开槽区域， $h=h_i+h_0$ ； Λ 为密封压缩数， μ 为气体黏度， ω 为角速度。

获得 p 分布后，便不难求出 S-DGS 的端面开启力 F_0 和气膜轴向刚度 k_z ，计算式分别如下^[3,6]

$$F_0 = \int_0^{2\pi} \int_{r_i}^{r_0} p r dr d\theta \quad (9)$$

$$k_z = \frac{\partial F_0}{\partial h} \quad (10)$$

1.2 相关性研究方法

1.2.1 统计学方法

为研究翼翅的长短宽窄与飞行速度之间的相关性，需要获得不同鸟类的翼长比 R_{lb} 和展弦比 R_{lw} 等结构参数值及平均飞行速度 v ，而这些有关数据需要通过对大样本数据的统计分析获得。

基于大量样本数据^[17-18]的统计分析结果，表 1 给出了椭圆翅、高速翅、细长翅和宽阔翅 4 大类鸟的翼长比 R_{lb} 和展弦比 R_{lw} 平均值。从 R_{lb} 值来看，细长翅>宽阔翅>高速翅>椭圆翅；从 R_{lw} 值来看，细长翅>高速翅>宽阔翅>椭圆翅。

表 2 所示为常见鸟类的飞行速度范围^[19]。在分析翼翅外形结构参数与飞行速度的相关性时，取飞行速度范围的中间值作为该类鸟的平均飞行速度。可以看出，椭圆翅和宽阔翅鸟类的飞行速度较低，而高速翅和细长翅鸟类的飞行速度较高。

表 1 四类飞鸟翼翅的翼翅结构参数平均值

翼翅类型	椭圆翅	高速翅	宽阔翅	细长翅
翼长比 R_{lb}	3.16	3.83	4.75	5.44
展弦比 R_{lw}	1.98	2.86	2.58	4.57

统计学中用于表示两个变量之间相关性的常用方法有散点图法和相关系数法。散点图法可用于

表示因变量随自变量变化的大致趋势，是描述两个变量之间相关性的一种直观定性方法；而相关系数 r_1 可以定量地度量两个变量之间的线性相关程度，定义相关系数

$$r_1 = \frac{\sigma_{xy}^2}{\sqrt{\sigma_x^2 \sigma_y^2}} \quad r_1 \in [-1, 1] \quad (11)$$

式中， σ_{xy}^2 为协方差，用于测度 x 与 y 的相关性； σ_x^2 、 σ_y^2 分别为随机变量 x 、 y 的方差，分别定义如下

$$\sigma_{xy}^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y}) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i y_i - \bar{x} \bar{y} \quad (11a)$$

$$\sigma_x^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i^2 - \bar{x}^2 \quad (11b)$$

$$\sigma_y^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2 - \bar{y}^2 \quad (11c)$$

一般规定^[20]，若 $0 < r_1 < 1$ ，表示 x 和 y 有正相关关系；若 $-1 < r_1 < 0$ ，表示 x 和 y 有负相关关系。当 $|r_1| > 0.8$ 时，为高度相关；当 $0.5 \leq |r_1| < 0.8$ 时，为中度相关；当 $|r_1| < 0.3$ 时，为不相关。

表 2 常见鸟类的迁飞速度表

所属翼翅类型	鸟类名称	迁飞速度 $v/(km/h)$	所属翼翅类型	鸟类名称	迁飞速度 $v/(km/h)$
椭圆翅	雀类	32~60	高速翅	雨燕	110
宽阔翅	隼类	65~78	高速翅	雁类	68~90
高速翅	鹞类	66~85	高速翅	鸭类	75~95
高速翅	鸢类	65~82	细长翅	鸥类	50
高速翅	鸽类	48~86	细长翅	信天翁	110
高速翅	鸦类	50~72	细长翅	军舰鸟	150

1.2.2 长短和宽窄的模糊判定

模糊数学是用确定的表达式来描述不确定的关系。对应于在飞鸟翼翅几何模型中采用翼长比和展弦比分别来表征翼翅的长短程度及长短宽窄程度，为研究螺旋槽的长短和宽窄程度与不同转速下密封稳定性之间的相关性，借鉴模糊数学中的隶属函数，分别引入长槽隶属度 $A(\varepsilon)$ 和细长槽隶属度 $A(\lambda)$ 来分别表征型槽隶属于长槽和细长槽的程度。

取槽长比 $\varepsilon=1$ 作为长槽和短槽的模糊分界线，即当 $\varepsilon=1$ 时，长槽隶属度 $A(\varepsilon)=0.5$ 。长槽隶属函数的模糊分布近似为正态分布，则长槽隶属函数可表示如下^[21]：当 $\varepsilon \leq a_1$ 时

$$A(\varepsilon)=0 \quad (12a)$$

当 $\varepsilon > a_1$ 时

$$A(\varepsilon) = 1 - \exp \left[- \left(\frac{\varepsilon - a_1}{a_1} \right)^2 \right] \quad (12b)$$

由当 $\varepsilon=1$ 时, $A(\varepsilon)=0.5$ 可求得 $a_1=0.55$ 。其中 a_1 为 $A(\varepsilon)=0$ 和 $A(\varepsilon)>0$ 的分界线。

取槽长宽比 $\lambda=1.5$ 为细长槽和粗短槽的模糊分界线, 即当 $\lambda=1.5$ 时, 细长槽隶属度 $A(\lambda)=0.5$ 。细长槽隶属函数的模糊分布也近似为正态分布, 则细长槽隶属度可表示如下: 当 $\lambda \leq a_2$ 时

$$A(\lambda)=0 \quad (13a)$$

当 $\lambda > a_2$ 时

$$A(\lambda)=1-\exp\left[-\left(\frac{\lambda-a_2}{a_2}\right)^2\right] \quad (13b)$$

由当 $\lambda=1.5$ 时, $A(\lambda)=0.5$ 可求得 $a_2=0.82$ 。其中 a_2 为 $A(\lambda)=0$ 和 $A(\lambda)>0$ 的分界线。

借鉴模糊数学中的模糊聚类分析, 根据型槽的槽长比 ε 值不同可分为短槽、长槽和超长槽 3 类, 根据型槽的槽长宽比 λ 值不同可分为粗短槽、细长槽和超细长槽 3 类。表 3 所示为各种型槽类型、隶属度范围及对应的槽长比和槽长宽比范围。由于自然条件的限制, 飞鸟翼翅的长度总是有限的, 类似地, 在进行相关性分析时也应选取一定长度范围内的型槽, 且大量数值分析结果表明, 超长槽和超细长槽的稳定性均很差, 故在进行统计分析时应去除这些数据点, 以免影响整体规律的反映, 下文如无特别说明, 都已将超长槽和超细长槽的数据剔除。

表 3 各型槽的隶属度、槽长比或槽长宽比范围

型槽类型	短槽	长槽	超长槽
长槽隶属度 $A(\varepsilon)$	0~0.50	0.50~0.99	0.99~1.00
槽长比 ε	0~1.00	1.00~1.80	>1.80
型槽类型	粗短槽	细长槽	超细长槽
细长槽隶属度 $A(\lambda)$	0~0.50	0.50~0.99	0.99~1.00
槽长宽比 λ	0~1.50	1.50~2.60	>2.60

2 结果分析与讨论

计算时所采用密封环的几何参数和操作参数为^[3-6]: $r_i=58.42$ mm, $r_o=77.78$ mm, 槽数 $N_g=12$, 槽深 $h_i=5$ μm , $h_o=3$ μm ; 螺旋角 $\beta=5^\circ$ 、 15° 、 30° 和 60° , 槽坝比 $\alpha_g=0.25$ 、 0.5 、 1.0 、 2.0 、 4.0 , 槽台宽比 $\delta=0.25$ 、 0.5 、 1.0 、 2.0 、 4.0 ; 端面内侧压力 $p_i=0.1$ MPa, 外侧压力 $p_o=1.1$ MPa。

2.1 密封端面的压力分布

图 2 所示为当 $n=10\ 000$ r/min 时, 典型粗短螺旋槽和细长螺旋槽 S-DGS 的端面量纲一气膜压力 $\bar{p}$ 分布等值线图。可以看出: 粗短螺旋槽和细长螺旋槽的槽根处都存在着明显的高 $\bar{p}$ 区, 但细长螺旋槽密封端面压力梯度较粗短螺旋槽要小, $\bar{p}$ 分布更

为均匀。粗短螺旋槽的 $\bar{p}$ 沿径向下降很快, 这样在高速条件下运行稳定性会较差; 细长螺旋槽的 $\bar{p}$ 沿径向下降速度与粗短螺旋槽相比较缓慢, 因此其高速稳定性较好^[4]。

图 2 不同类型螺旋槽端面的量纲一气膜压力等压线

2.2 翼翅长短及型槽长短对稳定性的影响

图 3 所示为飞鸟翼长比 R_{lb} 与飞行速度 v 的散点图。可以看出, v 随 R_{lb} 值的增大呈现增大趋势, 两者之间表现为正相关关系; 与短翅鸟类相比, 长翅鸟类更适合高速飞行; 进一步, 计算得 R_{lb} 与 v 间的相关系数 $r_1=0.60$, 表明 R_{lb} 与 v 之间为中度正相关。大自然已经证明, 拥有长而宽翼翅的宽阔翅鸟类具有较好的低速飞行稳定性, 拥有细而长翼翅的细长翅鸟类拥有较好的高速飞行稳定性。

图 3 飞鸟翼长比与飞行速度的散点图

图 4 所示为一般速度、高速和超高速工况下槽长比 ε 与气膜刚度 k_z 的散点图。从图 4 可看出, ε 与不同转速下的 k_z 呈正相关关系。进一步, 在 $n=2\ 000$ r/min、 $10\ 000$ r/min 和 $40\ 000$ r/min 时, 计算

得 ε 与 k_z 之间的相关系数分别为 0.78、0.72 和 0.63, 可见两者之间的相关系数都介于 0.5 和 0.8 之间, 呈现中度正相关关系。为使 S-DGS 在高速和超高速工况下获得较大的气膜刚度值, 取槽长比 $\varepsilon > 1.1$ 为宜。

图 4 槽长比与不同转速下气膜刚度散点图

在一定转速范围内的 ε 与 k_z 之间都呈中度正相关关系, 这说明在给定转速范围内, 型槽越长, 密封运行稳定性越好。在鸟类中, 拥有细长翼翅的细长翅鸟类往往具有较好的高速飞行稳定性, 拥有宽长翼翅的宽阔翅鸟类具有较好的低速飞行稳定性, 而拥有短小翼翅的椭圆翅鸟类则无法在风雨或风浪中稳定飞行。

上述对比结果说明: 飞鸟翼翅长短对不同飞行速度下其飞行稳定性的影响与端面型槽长短对不同转速下 S-DGS 运行稳定性的影响具有异曲同工的作用和影响规律, 为今后不同运行速度下干气密封的设计与选型提供了理论依据。

2.3 翼翅长宽比及型槽长宽比对稳定性影响

图 5 所示为飞鸟翼翅展弦比 R_{lw} 与飞行速度 v 的散点图。可以看出, v 随 R_{lw} 的增大也呈现增大趋势, 两者之间呈正相关关系, 这说明与粗短翼翅鸟类相比, 拥有细长翼翅的鸟类更适合高速飞行。随着飞鸟翼翅的加长, 升阻比增大, 翼尖涡流减小, 故细长翼翅具有较好的高速动力学性能^[22]。进一步计算得 R_{lw} 与 v 的相关系数 $r_2=0.76$, 表明 R_{lw} 与 v 之间为中度正相关关系。

图 5 翼翅展弦比与飞行速度散点图

图 6 所示为低速、高速和超高速工况下槽长宽比 λ 与气膜刚度 k_z 的散点图。可以看出, 不同转速下 λ 与 k_z 之间呈正相关关系。当 $n=2000$ r/min 时, 最大气膜刚度 k_{zmax} 对应的 $\lambda=1.50$, 该型槽属于粗短槽; $n=10000$ r/min 时, k_{zmax} 对应的 $\lambda=1.85$, 该型槽属于细长槽; $n=40000$ r/min 时, k_{zmax} 对应的 $\lambda=2.44$, 该型槽也属于细长槽。这说明在给定转速范围内, 型槽越细长(不包括超细长槽), 其在较高转速下获得的稳定性越好。为使 S-DGS 在高速和超高速工况下获得较大的气膜刚度值, 取槽长宽比 $\lambda > 1.7$ 为宜。

图 6 细长槽隶属度与气膜刚度散点图

可以看出: 在一般速度、高速和超高速工况下, 表征型槽长短和宽窄程度的 λ 与 k_z 的相关系数都在 0.5~0.8, 如当 $n=2000$ r/min、10000 r/min 和 40000 r/min 时, λ 与 k_z 之间的相关系数分别为 0.54、0.62 和 0.72, 呈现中度正相关关系, 且转速越高, 两者之间的相关系数越大, 相关性越强, 即型槽越细长, 其高速稳定性越好; 而在鸟类中, 翼翅 R_{lw} 与飞行速度 v 呈中度正相关关系, R_{lw} 值大的细长翅鸟类具有好的高速稳定性。此外, 在低速工况下 k_{zmax} 对应的型槽属于粗短槽, 而在高速和超高速工况下 k_{zmax} 对应的型槽属于细长槽; 而在鸟类中, 低速飞行稳定性较好的宽阔翅鸟类平均 $R_{lw}=2.58$, 属于粗短翅, 高速飞行稳定性好的细长翅鸟类平均 $R_{lw}=4.57$, 属于细长翅。

上述对比结果说明: 鸟类翼翅展弦比对不同飞行速度下飞行稳定性的影响与端面型槽长宽比对不同转速下运行稳定性的影响具有相似的规律。

3 结论

(1) 表征翼翅长短程度的翼长比与飞行速度呈中度正相关关系, 综合表征翼翅长宽程度的展弦比与飞行速度也呈中度正相关关系。

(2) 表征干气密封端面型槽长短程度的槽长比

与不同速度下的气膜刚度呈中度正相关关系, 综合表征型槽长宽程度的槽长宽比与不同速度下的气膜刚度也呈中度正相关关系。

(3) 生物模型中的翼翅结构参数与不同飞行速度下稳定性的相关性工程模型中型槽结构参数与不同转速下运行稳定性的相关性之间具有相似的规律, 论证了基于飞鸟翼翅宏观外形的端面型槽仿生的可行性和有效性。

参 考 文 献

- [1] 彭旭东, 呼延晨龙, 白少先, 等. 基于鸟翼轮廓的干式气体密封仿生型槽设计[J]. 摩擦学学报, 2012, 32(6): 563-569.
PENG Xudong, HUYAN Chenlong, BAI Shaoxian, et al. Design of a biomorphic groove dry gas seal based on bird wing outline[J]. Tribology, 2012, 32(6): 563-569.
- [2] SEDY J. Face seal with angled and annular grooves: Europe, 0720709B1 [P]. 2002-03-06.
- [3] 彭旭东, 谭丽丽, 盛颂恩, 等. 带内环槽的螺旋槽干式气体端面密封的静压性能[J]. 摩擦学学报, 2008, 28(6): 507-512.
PENG Xudong, TAN Lili, SHENG Songen, et al. Static analysis of a spiral-groove dry gas seal with an inner annular groove[J]. Tribology, 2008, 28(6): 507-512.
- [4] 黄莉, 彭旭东, 白少先, 等. 不同型槽端面干气密封的性能对比研究[J]. 流体机械, 2010, 38(8): 14-17.
HUANG Li, PENG Xudong, BAI Shaoxian, et al. Comparison study on performance of three types of dry gas seal with different grooves[J]. Fluid Machinery, 2010, 38(8): 14-17.
- [5] 黄莉. 典型螺旋槽干式气体端面密封的性能对比研究[D]. 杭州: 浙江工业大学, 2010.
HUANG Li. Comparison study on performance of dry gas seals with typical spiral grooves[D]. Hangzhou: Zhejiang University of Technology, 2010.
- [6] 彭旭东, 黄莉, 白少先, 等. 雁型槽干式气体端面密封性能的数值分析[J]. 化工学报, 2010, 61(12): 3193-3199.
PENG Xudong, HUANG Li, BAI Shaoxian, et al. Numerical analysis of sealing performance of dry gas seal with goose-grooves[J]. CIESC Journal, 2010, 61(12): 3193-3199.
- [7] GERMAN A B, NICOLAY D F, SERGRY A P, et al. Shaft seal: US, 6213472B1[P]. 2001-04-10.
- [8] JOHN S S. Design, operation and maintenance considerations for improved dry gas seal reliability in centrifugal compressors[R]. New York: Dresser-Rand Company, 1998.
- [9] GOLDSWAIN I M. Mechanical face seals: Europe, 0499370A1[P]. 1992-08-19.
- [10] 马媛媛, 彭旭东, 白少先, 等. 双向旋转树型槽密封端面气膜动压特性[J]. 流体机械, 2012, 40(1): 13-17.
MA Yuanyuan, PENG Xudong, BAI Shaoxian, et al. Analysis of hydrodynamic characteristics of bi-direction fir tree groove gas face seal[J]. Fluid Machinery, 2012, 40(1): 13-17.
- [11] PECHT G G, NETZEL J P. Design and application of non-contacting gas lubricated seals for slow speed services[J]. Lubrication Engineering, 1999, 55(7): 20-25.
- [12] PECHT G G, CZUBEK J P, GABRIEL R P, et al. Gas lubricated slow speed seal: US, 6142478A[P]. 2000-11-07.
- [13] SAXENA M N. Dry gas seals and support systems: Benefits and options [J]. Hydrocarbon Processing, 2003, 11: 37-41.
- [14] 任露泉, 杨卓娟, 韩志武. 生物非光滑耐磨表面仿生应用研究展望[J]. 农业机械学报, 2005, 36(7): 144-147.
REN Luquan, YANG Zhuojuan, HAN Zhiwu. Non-smooth wearable surfaces of living creatures and their bionic application[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2005, 36(7): 144-147.
- [15] 许维枢. 鸟类学-鸟的飞行[J]. 野生动物, 1985(1): 39-40.
XU Weishu. Ornithology-bird flight[J]. Chinese Journal of Wildlife, 1985(1): 39-40.
- [16] GABRIEL R P. Fundamentals of spiral groove noncontacting face seals [J]. Lubrication Engineering, 1994(3): 215-314.
- [17] 赵正阶. 中国鸟类志——雀形目[M]. 长春: 吉林科学技术出版社, 2001.
ZHAO Zhengjie. The avifauna of Chinese passeriformes [M]. Changchun: Jilin Science and Technology Press, 2001.
- [18] 郑作新. 中国动物图谱——鸟类[M]. 北京: 科学出版社, 1966.
ZHENG Zuoxin. Chinese animal map birds [M]. Beijing: Science Press, 1966.
- [19] 郑作新. 鸟[M]. 北京: 科学普及出版社, 1965.
ZHENG Zuoxin. Bird[M]. Beijing: Popular Science Press, 1965.
- [20] 周维义, 王勇. 统计学原理[M]. 成都: 四川大学出版社, 2004.

ZHOU Weiyi, WANG Yong. Principles of statistics[M]. Chengdu: Sichuan University Press, 2004.

- [21] 梁保松, 曹殿立. 模糊数学及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 2007.

LIANG Baosong, CAO Dianli. Fuzzy mathematics and its application[M]. Beijing: Science Press, 2007.

- [22] ULLA M, LINDHE N. Bird flight [J]. Acta Zoologica Sinica, 2004, 50(6): 921-935.

作者简介: 彭旭东, 男, 1964 年出生, 教授, 博士研究生导师。主要研

究方向为流体密封技术和表面微纳结构设计理论与方法。

E-mail: xdpeng@126.com

江锦波, 男, 1989 年出生, 博士研究生。主要研究方向为干气密封的仿生技术。

E-mail: jinbo_110@163.com

白少先, 男, 1976 年出生, 研究员。主要研究方向为干气密封和表面微纳结构设计理论与方法。

E-mail: bsx@zjut.edu.cn

李纪云, 女, 1965 年出生, 教授级高工。主要研究方向为表面微纳结构设计理论与加工技术。

E-mail: lijiyun@zjut.edu.cn