

文章编号: 1000-8055(2000) 03-0255-05

磁流体密封结构参数对密封能力的影响

赵国伟 池长青 王之珊 王广振
(北京航空航天大学 机械工程及自动化学院, 北京 100083)

摘要: 在采用磁场分析法, 并利用不等间距网格的有限差分数值方法对磁流体密封装置中稳态磁场进行分析^[1]的基础上, 研究了矩形齿磁流体密封装置结构参数对密封能力的影响, 并根据磁路分析方法定性解释了参数对密封能力的影响规律(参数包括密封间隙、极齿结构参数、永磁体结构参数以及极齿齿数)。根据分析计算的结果, 对磁流体密封进行了优化设计和实验验证, 优化设计出的装置体积和重量降低了 50% 以上。

关键词: 磁流体; 结构参数; 密封

中图分类号: T B42 文献标识码: A

1 引言

磁流体密封的“无磨损”和“零泄漏”两大优点使其在航空航天技术中有着广阔的应用前景。而重量和尺寸是空间装置设计的重要技术指标, 这要求磁流体密封的设计中实现最优化, 即在保证设计压力要求的前提下, 获得重量最轻、尺寸最小的密封装置。本文利用文献[3]中所采用的磁场法计算模型和压力估算模型, 研究了矩形齿磁流体密封装置结构参数对装置密封能力的影响。结果表明密封装置的密封能力与结构参数密切相关, 有些参数的小的差别会导致密封能力的大幅度下降, 在此基础上考虑了结构参数间的匹配关系, 对装置进行了优化设计, 并对理论优化设计结果进行了实验验证。

2 装置的磁材料和结构参数

采用了剩磁感应强度 $B_r=1.13T$, 矫顽力 $H_c=8.40\times10^5\text{ A/m}$ 的钕铁硼永磁体, 磁极靴和密封轴材料均为电工纯铁, 磁流体采用饱和磁化强度为 34616 A/m 的 BH-1 型磁流体。

本文中计算采用了磁能不足的弱磁和磁能过剩的强磁两种结构, 在保证其余结构参数不变的情况下, 改变单一参数, 分析了 8 个结构参数对密封能力的影响规律。表 1 为计算所采用的结构参

数, 图 1 为磁流体密封装置简图。

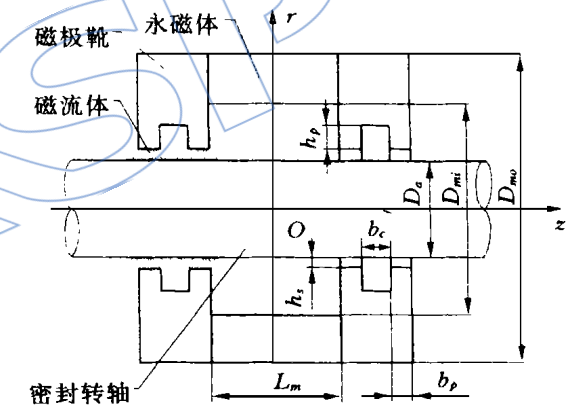


图 1 磁流体密封装置简图

表 1 计算结构参数表

参 数	符号	强磁结构(mm)	弱磁结构(mm)
转轴直径	D_a	30	30
永磁体外径	D_{mo}	68	50
永磁体内径	D_{mi}	42	40
永磁体厚度	L_m	14	6
极齿厚度	b_p	1	2
极齿高度	h_p	2	2
齿槽宽度	b_c	3	2
密封间隙	h_s	0.1	0.1

3 结构参数对密封能力的影响

若单个参数在弱磁结构中对密封能力的影响与在强磁结构中规律相同, 则只以强磁结构为例给出了结果。

3.1 密封间隙的影响

图 2 表明, 随着密封间隙的增加, 密封能力相

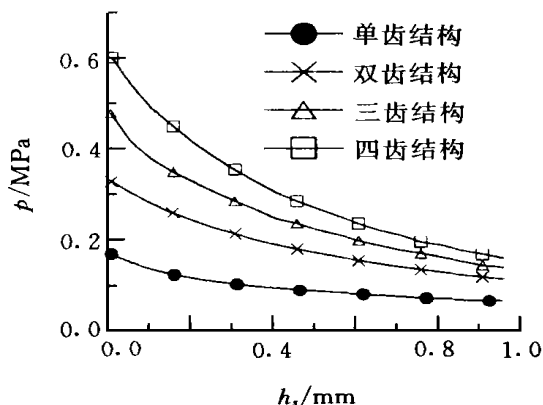


图 2 密封间隙对密封能力的影响(强磁结构)

应下降。其原因在于: 密封间隙增加, 磁回路磁阻增加, 使得永磁体工作点下降, 磁路磁通总量减小, 导致间隙磁场强度下降, 从而降低了装置的密封能力。

3.2 极齿参数的影响

3.2.1 极齿厚度的影响

图 3 表明, 随着极齿厚度的增加, 起初密封能

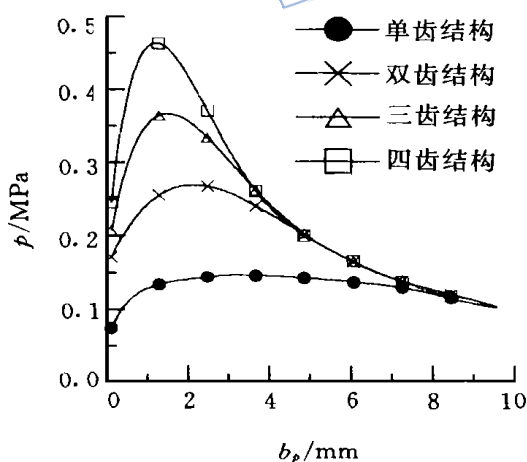


图 3 极齿厚度对密封能力的影响(强磁)

力增加很快, 达到最大值后, 较缓慢地下降。其原因在于: 极齿厚度太小, 磁回路磁阻很大, 永磁体工作点低, 磁路磁通量小, 密封间隙磁场较弱, 密封能力低; 当极齿厚度超过某个值时, 永磁体工作

点上升缓慢(已接近永磁体剩磁点), 磁回路磁通量几乎不再增加, 因而, 随着极齿宽度的增加, 密封间隙中磁通密度减小, 即磁场强度减弱, 导致密封能力下降。极齿数越多, 密封能力下降越快, 最后逐渐趋于同一极限表明多齿和单齿的差别逐渐消失。所以只有在较薄的齿厚下, 多齿才显出其应有的密封能力。

3.2.2 极齿高度的影响

图 4 和图 5 表明, 强磁结构中, 随着齿高的增

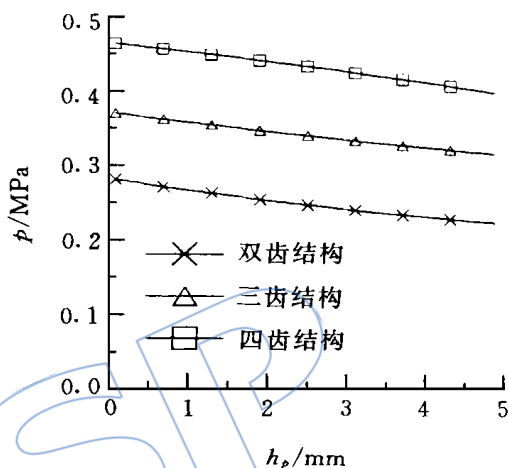


图 4 极齿高度对密封能力的影响(强磁)

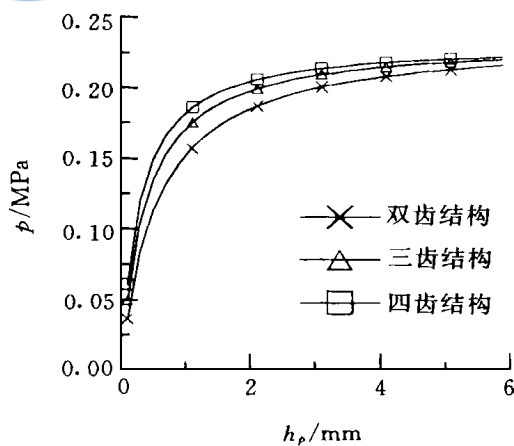


图 5 极齿高度对密封能力的影响(弱磁)

加, 密封能力变化很小; 在弱磁结构中, 随着极齿高度的增加, 密封能力经过一段上升后变化也很小。其原因在于: 齿高为零时, 多齿密封能力降为单齿密封能力, 密封能力低; 当齿高增加时, 在弱磁结构中, 磁通量不会发生很大变化, 但齿高增高时, 齿槽中的磁通量下降很快, 因此密封能力很快增加, 进一步增加齿高时, 齿槽中磁通量已经很小, 没有更大降低的余地, 故带来密封能力缓慢的增长; 在强磁结构中, 齿高增加导致了磁回路磁阻

的增加,降低了永磁体工作点,减小了磁回路磁通总量,但是由于是强磁,所以在齿槽中的磁通密度很大,齿高增加,齿槽中的磁通量增加,而密封间隙中的磁通量有所减少,所以强磁结构中密封能力总是随齿高增加而有所下降。

3. 2. 3 齿槽宽度的影响

图 6 表明,随着齿槽宽度的增加,密封装置的

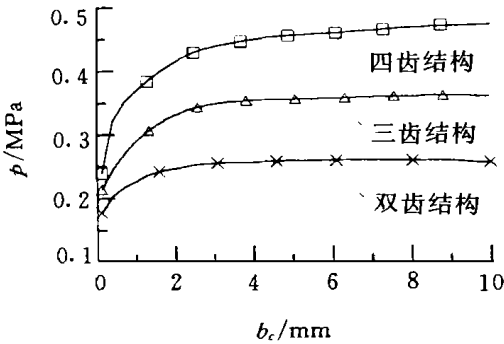


图 6 齿槽宽度对密封能力的影响(强磁)

密封能力起初会增加,之后上升很小。其原因在于:槽宽为零时,多齿结构变为单齿结构,密封能力自然很低;当槽宽增加时,在齿槽内形成的磁场梯度越来越大,导致密封能力上升,齿槽很宽时,齿槽内最低磁场强度已经很低,所以密封能力基本保持不变。

3. 3 永磁体结构参数的影响

3. 3. 1 永磁体外径的影响

图 7 表明,随着永磁体外径的增大,密封能力

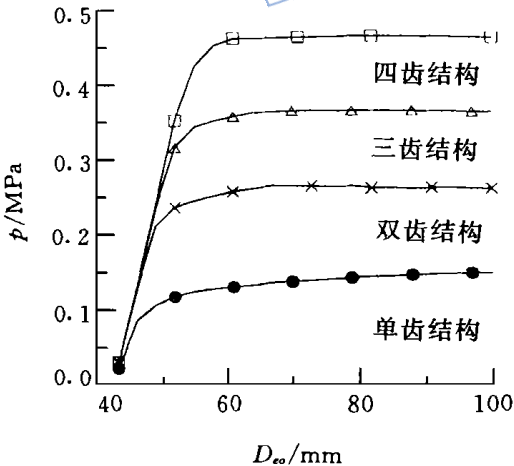


图 7 永磁体外径对密封能力的影响(强磁)

相应增加,当外径继续增大时,密封能力基本保持不变。其原因在于:随着外径增大,磁通总量相应增加,极齿部位逐渐磁饱和或深度饱和,磁路磁阻急剧增高,导致永磁体工作点的下降,使得密封能

力基本保持在一个稳定的水平。

3. 3. 2 永磁体内径的影响

图 8 表明,在强磁结构中,随着永磁体内径的

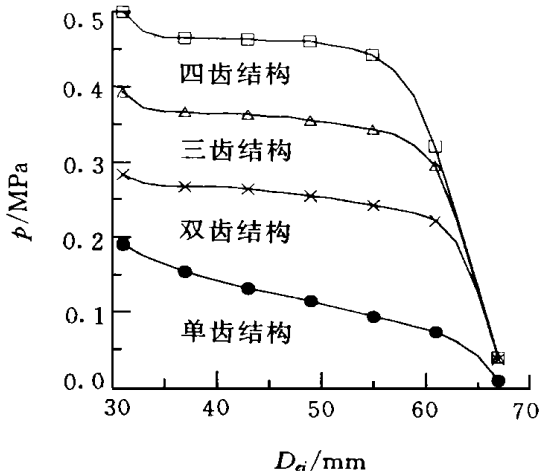


图 8 永磁体内径对密封能力的影响(强磁)

增大,密封能力的变化很小,当内径超过某个值时,密封能力随内径增大而迅速下降。其原因在于:在磁能过剩的状态中,随着永磁体内径增大,永磁体端面面积减小,但永磁体工作点的上升削弱了磁回路磁通量的减少程度,密封能力下降也较慢;当永磁体内径达到一定数值后,永磁体工作点已接近剩磁点,外磁阻的减小不会带来永磁体工作点的大幅度升高,随着永磁体端面面积的减小,磁回路磁通量迅速下降,密封能力也随之迅速降低。

3. 3. 3 永磁体厚度的影响

图 9 表明,随着永磁体厚度的增加,密封能力

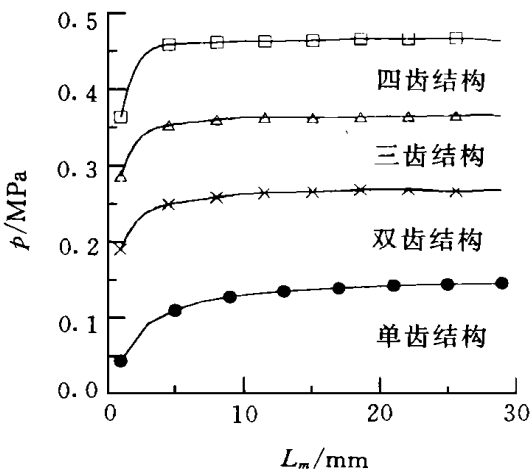


图 9 永磁体厚度对密封能力的影响(强磁)

逐步上升,当永磁体厚度继续增加时,密封能力上升很慢,最后保持不变。其原因在于:在其它结构

参数不变时,随着永磁体厚度的增加,永磁体的退磁场相应减小,永磁体工作点上升,磁回路磁通量增加,密封能力增加;永磁体厚度继续增加,退磁场已很小,永磁体工作点与剩磁点非常接近,工作点的上升的潜力已很小,对磁回路磁通量的增加只能有很小的贡献,因此装置密封能力基本保持稳定。

3.4 齿数的影响

表 2 表明,在强磁结构中,随着齿数的增加,密封能力增加,随齿数增多,平均单个齿密封能力下降。在弱磁结构中,随着齿数的增加,密封能力的增加却很小或几乎不增加(自双齿以后)。

表 2 齿数对密封能力(单位: MPa)的影响

齿数	1	2	3	4	5	6	7	8
A	0.125	0.258	0.354	0.451	0.549	0.647	0.715	0.756
B	0.108	0.197	0.201	0.202	0.204	0.204	0.205	0.205

注:表中 A 为强磁结构;B 为弱磁结构。

其原因在于:强磁结构中的永磁体可以为所增加的极齿提供足够的磁通量,使极靴接近饱和磁化并在间隙中形成较高的磁场,随着齿数的增加,密封能力增加,而齿间密封磁场的叠加效应使得多齿结构中单个齿的平均密封能力有所下降;在弱磁结构中,当齿数足够多时,永磁体的工作点的磁感应强度已接近剩磁感应强度,因此齿数的增加不会带来大量的磁路中磁通量的增加,而齿数增加 n 倍,通过单个齿的磁通量就降为原来的 $1/n$ 倍,单个齿的密封能力也降为原来的 $1/n$,所以总密封能力保持不变。

4 实验验证

4.1 理论计算与实验结果的比较

采用 KP-1 型和 KP-2 型铁磁流体进行了实验,实验装置是在上述分析基础上进行优化设计的,实验转速为 0 到 3380 r/min,实验结果与理论计算结果分别是:KP-1 实验值为 0.225 MPa,计算值为 0.230 MPa;KP-2 实验值为 0.152 MPa,计算值为 0.159 MPa。

4.2 优化结构与非优化结构的比较

实验的目的是验证在本文分析基础上设计重量轻和体积较小的优化结构与非优化结构具有同样的密封能力。两种结构的基本参数列于表 3 中。

优化结构与非优化结构互相比对的指标包

括:实验爆破压差/MPa(25 次实验平均值),单道密封齿平均密封压力/MPa,单位密封压差所需的密封段结构质量/(kg/MPa)和密封体积/(m³/MPa)。实验在零转速下进行的,结果见表 4。

表 3 两种结构的基本参数对照表

	优化结构	非优化结构
密封齿数目	4	8
密封段结构质量/kg	0.224	0.951
密封段结构体积/m ³	0.334×10^{-4}	1.380×10^{-4}
永磁体类型	NdFeB-33SH	NdFeB-33SH
永磁体体积/m ³	0.3144×10^{-5}	3.145×10^{-5}
铁磁流体型号	KP-1	KP-1

表 4 两种结构实验测试结果对照表

参 数	优化结构	非优化结构
实验爆破压差/MPa	0.22	0.40
平均密封压力/MPa	0.055	0.05
结构质量/(kg/MPa)	1.018	2.376
结构体积/(m ³ /MPa)	1.52×10^{-4}	3.45×10^{-4}

由表 4 可以看到具有相同密封能力的优化结构可以降低 50% 以上的质量和体积。

5 结 论

流体密封装置结构参数对密封能力有着很大的影响,其中密封间隙、极齿厚度、永磁体结构参数以及密封齿数对密封能力的影响尤为显著。其规律为:

- (1) 其中密封间隙越小,密封能力越高;
- (2) 对于给定永磁体的结构,极齿厚度存在一个最优尺寸可使装置达到一个密封能力极大值;
- (3) 极齿高度在大于一定值后,对密封能力的影响很小;
- (4) 齿槽宽度主要影响齿槽中的磁场分布,当槽宽大于一定值后对密封能力影响很小;
- (5) 永磁体外径、内径通过改变磁路磁通总量而影响了装置密封能力,在给定齿宽和齿数的情况下,当内外径差大于一定值后密封能力趋近于一个极限值,而不再随其差值增大而增大了;
- (6) 永磁体厚度主要影响密封装置中永磁体的工作点,当该工作点较高时,增加永磁体厚度对密封能力的贡献很小;
- (7) 在密封装置中,如果永磁体还存在提供磁

通的潜力,则随着齿数的增加,密封能力几乎可以按倍数相应增加(单个齿平均密封能力有很小的下降)。否则,齿数的增加并不能带来密封能力的相应增加。因此,在其它结构参数确定后,存在一个完全发挥密封装置能力的最小齿数;

(8)密封装置参数间匹配关系非常密切,需对其参数间匹配关系进行研究,这对整个装置结构参数总体优化十分重要。

同时,也表明了不考虑永磁体和磁极靴的合理匹配而认为永磁体越大、极靴齿数越多密封能

力越强是对磁流体密封的误解。

参 考 文 献

1 孙雨施,王素菊,曲民兴,沈世尧. 直流磁系统的计算与分析 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1987

2 池长青,王之珊,赵不智. 铁磁流体力学[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 1993

3 赵国伟,池长青,王之珊. 矩形齿磁流体密封装置的磁场计算 [J]. 北京: 北京航空航天大学学报, 2000:

(责任编辑 王震华)

The Effects of Structural Parameters
on Sealing Performance of Magnetic Fluid Seal

Zhao Guowei, Chi Changqing, Wang Zhishan, Wang Guangzhen

(College of Mechanical Engineering and Autormation

Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

Abstract: The effects of structural parameters on the performance of magnetic fluid seal are researched on the basis of magnetic field analysis. The parameters include seal gap, structural parameters of pole tooth, structural parameters of permanent magnet and the number of teeth on the pole. In the process of magnetic field analysis, magnetic field method and unequally spaced net finite difference method are used to obtain accurate data. A qualitative explanation to the data is given by magnetic circuit analysis. In order to testify the theoretical research, an optimized magnetic fluid seal has been designed and tested. The experiment results show that the weight and size of the optimized seal are reduced by more than 50 percent.

Key words: magnetic fluid; structural parameter; sealing

(The Chinese text of the following abstract is prited in PP251- 254)

Experimental Investigation
of Turbulence Characteristics in a Turbine Vane Cascade

Dong Zhirui, Guo Tao, Zhu Huiren, Liu Songling

(7th Dept. Northwest Polytechnic University, Xi'an 710072, China)

Abstract: The characteristics of turbulent flow in a high pressure turbine cascade were investigated experimentally. The mean velocity, fluctuating velocity and the correlation factor of Reynolds shear stress were measured by means of two-dimensional hot-wire, within the several pitch/streamwise planes. The test Reynolds number based on the incoming flow and the blade chord was 100000. The measured results were analyzed in conjunction with the flow fields mapped by using five-hole probe. In result, the distribution of turbulence parameters in the passage of cascade was found. The experimental results show that the turbulent flow near the endwall of the turbine cascade is to be fairly isotropic. There are turbulence cores within the passage vortex and horseshoe vortex, in which the turbulence intensity and Reynolds shear stress are quite high.

Key words: cascades; turbulence; experiments