

•测试、试验与仿真•

减少迷宫密封泄漏量的分析、设计与试验

孟庆祎¹, 夏 洸²

(1.中国电子科技集团公司光电研究院,天津 300000;2.锦州英凡化工设备有限公司,辽宁 锦州 121001)

摘要:通过迷宫密封泄漏量的计算,阐述了影响泄漏量的因素。分别对三种特性因素:密封齿形、节流间隙和节流口数进行分析。结果表明,圆形齿产生的泄漏量较大,尽量避免使用;节流间隙与泄漏量呈线性关系,取较小值密封效果较好;节流口数越多,泄漏量越小,但是随着节流口数增多,节流效果增加越不明显,并且经济成本较高,设计时需合理选用节流口数。试验也验证了光电转台迷宫密封满足工程应用要求。

关键词:迷宫密封;泄漏量;密封齿形;节流间隙;节流口数

中图分类号:TP802

文章标识码:A

文章编号:1673-1255(2014)-03-0081-04

Analysis Design and Test of Reducing Leakage Rate of Labyrinth Seal

MEGN Qing-yi¹, XIA Guang²

(1. Academy of Opto-Electronics, China Electronics Technology Group Corporation (AOE CETC), Tianjin 300000, China;

2. Jinzhou Yingfan Chemical Engineering Equipment Ltd. Co., Jinzhou 121001, China)

Abstract: Based on the calculation of labyrinth seal leakage rate, the factors influencing the leakage rate are described. Three characteristics such as seal profile, throttling gap and number are analyzed respectively. The results show that round profile is avoided for higher leakage rate. Better seal effect is got to choose a smaller seal value for throttling gap changing linearly with leakage rate. The more is throttling number, the fewer is leakage rate. But with the increasing of throttling number, throttling effect is not better and the economic cost is higher. So the appropriate throttling number is needed to be chosen in the design. Experimental results show that engineering application demands are met by electro-optical turret labyrinth seal design.

Key words: labyrinth seal; leakage rate; seal profile; throttling gap; throttling number

迷宫密封是在密封件转轴周围设若干个依次排列的环形密封齿,密封齿与齿之间形成一系列节流间隙与膨胀空腔^[1],密封腔内的密封介质经过节流间隙和膨胀空腔时产生节流效应和动能耗散减小泄漏量实现密封。迷宫密封的性能则由这两个流动过程中的能量损失来决定。分析密封齿形、节流间隙和节流口数三种特性尺寸发生变化时迷宫密封内部流动规律和特点,充分发挥湍流流动的能量耗散作用,研究减小迷宫密封泄漏量的设计方法,提高密封效率。由此得出的分析结果,对指导迷宫设计有实践意义^[2]。

1 泄漏量的计算

将节流口依次串联起来,节流口间距的大小足以使间隙中形成的动能由于涡流的产生而消失,形成迷宫密封。对于不可压缩工作介质,动能在空腔中一部分转化为热能,一部分转化为进入下一个节流口的预速度。假定 C 为流体质子从间隙中流出的速度,由于流体质子在迷宫空腔中的碰撞,损耗掉了一部分速度,使流体质子速度减慢到 C' ,在间隙中产生速度的落差。

实际上在间隙中转化为速度的落差比理论的

间隙落差要大一个预速度的速度头和一个压力增益的落差。

附加的间隙落差为

$$H_{\text{附加}} = \frac{C_v^2}{2g} + \frac{C'}{g}(C - C') \quad (1)$$

式中, C 为流体质子从间隙中流出的速度; C' 是使流体质子减慢的速度。

按照连续方程, 所有节流口的落差都必须相等, 则在第一个间隙中的落差增值由总落差弥补。

节流口落差为

$$H_{\text{间隙}} = \frac{H_{\text{总}} - H_{\text{附加}}}{n} + H_{\text{附加}} \quad (2)$$

式中, H 为流体落差; n 为节流口数。

泄漏量为

$$G = \alpha d r n \pi h \sqrt{2g \left(\frac{H_{\text{总}} - H_{\text{附加}}}{n} + H_{\text{附加}} \right)} \quad (3)$$

式中, α 为流量系数; h 为间隙宽度; H 为流体落差; n 为节流口数。

假定迷宫节流口的流量系数 $\alpha = 1$, 并且在没有压力的情况下实现完全涡流, 把假定的迷宫与理论

的迷宫加以比较, 其泄漏量为

$$G_0 = d r n \pi h \sqrt{\frac{2gH_{\text{总}}}{n}} \quad (4)$$

其比值 $\varepsilon = \frac{G}{G_0}$, 该系数与结构形状有关, 称为形状系数, 则迷宫密封泄漏量计算公式^[3]如下






$$G = \varepsilon d r n \pi h \sqrt{\frac{2gH_{\text{总}}}{n}} \quad (5)$$

式中, α 为流量系数; h 为间隙宽度; H 为流体落差; n 为节流口数。

2 减少迷宫密封泄漏量的分析

式(5)包含了一部分影响迷宫密封泄漏量的因素: 节流间隙、节流口数和形状系数, 密封齿形是影响形状系数的一个重要结构因素, 密封齿形、节流间隙和节流口数是组成迷宫密封结构的重要参数, 这些尺寸发生变化, 必将对迷宫密封的泄漏量产生影响^[4-7]。

表1 齿形及对应编号

项目	直齿	直角梯形齿	等腰梯形齿	三角形齿	圆形齿
齿形图					
齿形编号	1	2	3	4	5

2.1 齿形的影响

迷宫密封常见的齿形有直齿、直角梯形齿、等腰梯形齿、三角形齿、圆形齿。

分别对各齿形(见表1)进行分析, 模型参数为: 齿厚 $b = 0.5 \text{ mm}$ (三角形齿除外), 齿高 $H = 5 \text{ mm}$, 节流间隙 $h = 2.5 \text{ mm}$, 腔室深度 $W = 10 \text{ mm}$ 。

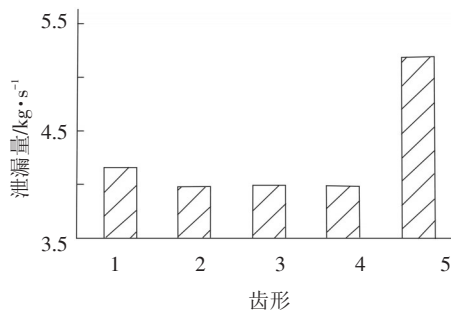


图1 齿形对泄漏量的影响关系图

在各个齿形对应的泄漏量关系图(见图1)中, 第5种齿形的泄漏量最大, 并且与前面几种齿形相比, 泄漏量大很多, 所以在选择齿形时尽可能避免使用圆形齿。第1~4种齿形泄漏量较小, 并且相差不多, 设计时可以根据设计要求合理选用。

2.2 节流间隙宽度的影响

不同的节流间隙宽度(以下简称间隙宽度)对泄漏量及节流效应都有不同的影响^[8], 选取4级迷宫间隙模型, 设定迷宫模型长度为 15 mm , 选取4组不同的间隙宽度进行分析, 间隙宽度分别取 0.2 、 0.3 、 0.4 、 0.5 mm , 其他特性尺寸均取相同参数, 其泄漏量变化见图2, 间隙宽度增大, 泄漏量逐渐增大与式(5)表达的“泄漏量与节流间隙宽度呈线性变化”关系一致。

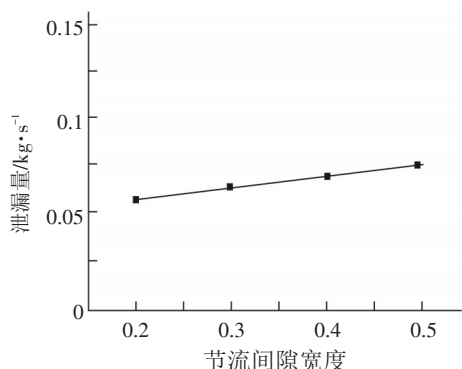


图2 节流间隙宽度对泄漏量的影响关系图

在确定间隙宽度时还需要考虑以下因素:轴承间隙、制造公差、装配误差(注意可能的累计误差)、转子挠度和通过临界转速时的振幅(特别是长转子)、热膨胀和由此产生的变形。因此,在实际应用中需保证转子转动时与密封间留有安全间隙,在保证安全的情况下尽量减小间隙宽度。

对于汽轮机和压缩机则按以下公式计算间隙宽度^[3]

$$h = A \frac{d}{100} + 0.25 \text{ mm} \quad (6)$$

式中, $A=0.6$,用于压缩机; $A=0.85$,用于铁基体材料的蒸汽汽轮机; $A=1.3$,用于奥氏体材料的蒸汽汽轮机。

对于长转子,则采用公式: $h=1.7 \times 10^{-4} L$, L 为轴承间距。

2.3 节流口数的影响

取5级迷宫模型,其压力分布如图3所示。压力逐齿下降,表明迷宫的几何结构增加了泄漏流动的阻力,流体流经节流齿时,压力减小,在间隙出口处最小。压力降逐齿增加,说明能量耗散逐齿增

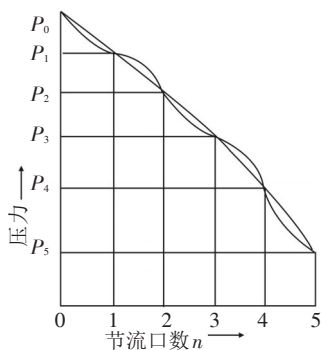


图3 节流口数与压力分布图

加。由能量守恒定理,压力下降后转化为动能,压力下降越大则转化动能越多,进入空腔后动能耗散就越充分,泄漏量下降。

增加节流口数可以降低泄漏量。但是并不是节流口数越多越好。参见文献[3],当 p_0/p_n (其中 p_0 为入口压力, p_n 为出口压力)为定值时,节流口数越多,则末级压比 p_{n-1}/p_n 越小。即节流口数越多,泄漏量减少越不明显。由式(5)也可以推导出这样的关系。并且因增加节流口数带来的经济成本也很大。设计时在满足设计要求的前提下,选择合适的节流口数较为合理。

3 迷宫密封在光电转台中的应用设计

光电转台精度要求高,摩擦是对精度产生影响的一个因素,减小摩擦或者无摩擦成为光电转台各个设计环节的前提。迷宫密封可以实现无摩擦或者少摩擦旋转,在光电转台方位轴系与俯仰轴系的动、静件连接部位采用迷宫密封能够满足设计要求。

依据上述减少迷宫密封泄漏量的理论分析,提出光电转台迷宫密封的设计方案:迷宫密封齿形选用直齿形,直齿迷宫密封工艺性好,便于加工,对于旋转轴来讲,当径向跳动和安装误差同时存在时,直齿迷宫密封便于公差的计算和测量;考虑质量和经济成本,迷宫密封节流口数需合理选用,依据技术指标与使用要求选用4级迷宫密封;节流间隙越小,泄漏量越小,依据节流间隙与泄漏量的关系,并且考虑加工以及装配误差,取节流间隙宽度 $h=1.5 \text{ mm}$,具体见图4。装配后光电转台的方位轴系与俯仰轴系对接处迷宫密封可以实现无摩擦旋转,其密封性能须经试验检测。

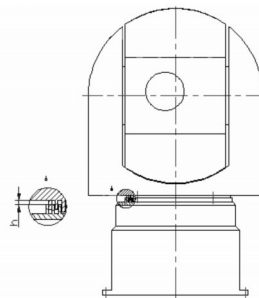


图4 迷宫密封在光电转台中的应用设计图

4 迷宫密封性能检测试验

迷宫密封性能通过淋雨试验进行检测。淋雨试验是一种人工试验环境方法,它模拟受试设备在淋雨条件下,其外壳防止雨水渗透的能力和遭到淋雨时或之后的工作效能。

通常最高的降雨速率发生在雷雨或飓风型暴雨中^[9-10],在暴雨中一般持续时间很短,通常不超过0.5 h,各种等级降雨强度、雨滴和降雨速度关系见表2。

表2 降雨强度与雨滴直径和降雨速度关系表

降雨等级	降雨强度/ cm·h ⁻¹	平均雨滴/ mm	雨滴降落速/ 度 m·s ⁻¹
小雨	0.025~0.1	0.1~1.0	0.25~0.30
中雨	0.1	0.5~1.0	4.0
大雨	1.5	1.0~2.0	5.0
暴雨	4.0	2.0~5.0	6.0
大暴雨	>10	>3.0	7.0

设备无防护措施露天工作,须经受大暴雨考验。有风源淋雨试验标准:降雨强度最小10 cm/h,雨滴直径0.5~4.5 mm,试验时间30 min^[11]。参照有风源淋雨试验标准进行淋雨试验满足使用要求。

试验前需对试验设备进行预处理。将设备紧固,并且将试验设备放置在正常的试验大气条件下,直至达到温度稳定。对设备进行电性能,机械性能检测,并且检查外观,记录检测数据。

将设备放在淋雨室(见图5),按照有风源淋雨试验标准进行试验。试验完毕,将设备表面水擦

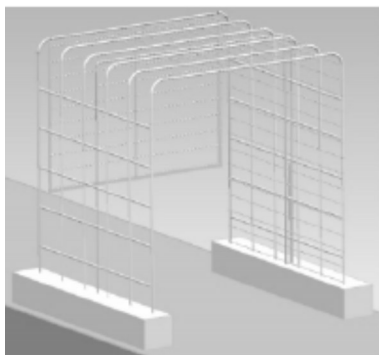


图5 淋雨室三维示意图

掉,并且在正常的试验大气条件下恢复直至试验样品达到温度稳定。打开设备外壳查看内部是否进水,确定无进水状况加电调试,电性能稳定,试验成功,表明光电转台用迷宫密封性能良好。

5 结论

根据分析结果,迷宫密封设计齿形应优先选择直齿、直角梯形齿、等腰梯形齿和三角形齿,圆形齿泄漏量较大,尽量避免使用;节流间隙宽度与泄漏量呈线性关系变化,在保证转子安全旋转的前提下,应采用较小的节流间隙宽度;迷宫密封腔内的泄漏量随着节流口数增加而下降,但节流口数并不是越多越好,考虑经济成本,在满足使用要求的前提下合理选择节流口数。经试验验证,合理选择迷宫密封参数可以使光电转台满足设计要求。

参考文献

- [1] 王丽娜,张开林,张俊. 错齿式迷宫密封齿形对泄漏量的影响[J]. 内燃机车, 2012, 8(462): 4-6.
- [2] 朱高涛,刘卫华. 迷宫密封泄漏量计算方法的分析[J]. 润滑与密封, 2006, 4(176): 123-126.
- [3] K.塔鲁达纳夫斯基.非接触密封[M]. 北京:机械工业出版社, 1986: 84-86, 117, 314.
- [4] 丁学俊,杨彦磊,肖国俊,等. 迷宫密封流场与泄露特性研究[J]. 流体机械, 2006, 34(4): 14-18.
- [5] 王琰,张开林,王丽娜. 错齿式迷宫密封空腔尺寸对泄漏量的影响[J]. 机车电传动, 2012, 10(1): 30-32.
- [6] 汤臣杭,杨惠霞,王玉明. 直通式迷宫密封的数值分析[J]. 流体机械, 2006, 34(12): 21-24.
- [7] 林丽,刘卫华. 齿形夹角对迷宫密封性能影响的数值研究[J]. 润滑与密封, 2007, 32(3): 47-50.
- [8] 巴鹏,李旭,任希文,等. 迷宫密封内部结构尺寸变化对泄漏量的影响[J]. 润滑与密封, 2011, 36(3): 101-104.
- [9] ABTRES D F. Design and calculate for certain raining test equipment [J]. IEEE, 2002(2): 328-332.
- [10] 马志宏,李金国,赵书平,等. 耐淋雨试验系统的研制[J]. 装备环境工程, 2010, 7(6): 256-259.
- [11] QJ1239.6-87. 电子设备环境试验条件和方法 淋雨试验[S].