

研
究
开
发错齿式迷宫密封空腔尺寸
对泄漏量的影响

王 琰, 张开林, 王丽娜

(西南交通大学 牵引动力国家重点实验室, 四川 成都 610031)



作者简介: 王 琰 (1987-), 男, 硕士研究生, 主要从事机车车辆理论及设计研究。

摘 要: 以某型大功率机车传动齿轮箱轴端迷宫密封为研究对象, 采用 GAMBIT 软件建立错齿式迷宫通道的二维结构化网格模型, 应用 Fluent 软件计算迷宫密封空腔深宽比和齿尖相对厚度对流场和泄漏量的影响。研究结果表明: 随着空腔深宽比的增加, 泄漏量先减小后增加, 最佳深宽比在 0.9 左右; 空腔宽度越大, 深宽比对泄漏量的影响越明显; 随着齿尖相对厚度的增加, 泄漏量先增加然后缓慢递减。

关键词: 传动齿轮箱; 迷宫密封; 流场; 泄漏量

中图分类号: U260.332

文献标识码: A

文章编号: 1000-128X(2012)01-0030-03

The Influence of Interlocking Labyrinth Seal Cavity Dimension on Leakage

WANG Yan, ZHANG Kai-lin, WANG Li-na

(Traction Power State Key Laboratory, Southwest Jiaotong University, Chengdu, Sichuan 610031, China)

Abstract: Taking the labyrinth seal of the transmission gearbox for a certain type of high-power locomotives as researching object, two-dimensional structured grid model of the interlocking labyrinth channel was set up by means of software GAMBIT. The software Fluent was used in calculating labyrinth seal flow field and leakage flow rate, which were effected by the depth to width ratio and the tooth thickness to clearance ratio. The results showed that: the leakage decreased first and then increased with the increase of the depth to width ratio, the optimum depth to width ratio was about 0.9. Larger the width of cavity, the depth to width ratio effected leakage more obviously; the leakage increased first and then decreased slowly with the increase of the tooth thickness to clearance ratio.

Key words: transmission gearbox; labyrinth seal; flow field; leakage

传动齿轮箱是高速机车转向架的关键部件之一, 其密封性能的好坏直接影响到高速机车运行的可靠性以及齿轮和轴承的使用寿命。随着车速的不断提高, 齿轮箱内齿轮转速加快, 使轴承与润滑油温升偏高, 导致箱内形成分布极不均匀的油气压, 引起齿轮箱漏油、甩油、窜油等问题, 严重影响了传动齿轮箱的工作性能。为了减小泄漏损失, 维持各腔室的工作压力, 保证齿轮箱高效工作, 通常对齿轮箱轴端采用非接触式迷宫密封。迷宫密封具有结构简单、使用寿命长、没有磨损等优点, 特别适用于高温和高速场合, 其密封原理是静子与转子间形成一系列节流间隙与膨胀空腔, 依靠节流间隙的节流作用(压力能转化为动能)和介质在密封空腔中的动能耗散作用(动能转化为热能)

达到密封效果^[1-2]。

国内外学者对迷宫密封空腔结构尺寸的研究主要采用数值模拟和试验研究相结合的方法。文献[3]试验研究了直通式迷宫密封的静态工作特性, 发现随着齿尖相对厚度的增加, 泄漏量先减小后增加, 过分地增加空腔深度并不能提高迷宫的密封性, 空腔深度与宽度存在着最佳匹配值; 文献[4]作者认为: 矩形腔室的最佳深宽比为 0.2~0.3, 当深宽比等于 1.0 时泄漏速率最大, 并且与间隙宽度、齿数和压比无关, 当为刃形齿(三角形腔室)时, 最佳深宽比等于 0.5; 如为螺纹形齿(三角形腔室), 最佳深宽比的存在不明显。

本文以速度为 200 km/h 的某高速机车齿轮箱轴端迷宫密封为原型, 建立错齿式迷宫密封二维轴对称模型, 应用 Fluent 软件, 结合计算流体力学相关理论, 研究了空腔深宽比和齿尖相对厚度对流场及泄漏特性的

收稿日期: 2011-11-04

基金项目: 国家自然科学基金项目(51075339)

影响。

1 数值计算模型

迷宫内部的流动可以认为是二维稳态湍流流动。考虑到迷宫密封的密封间隙比较小和气体的粘性、可压缩性等,在计算时采用雷诺平均Navier-Stokes方程和标准 $k-\varepsilon$ 湍流模型来描述^[5]。其中包括连续性方程、动量方程、湍动能方程、耗散率方程以及能量方程。其控制方程可写成如下通用形式^[6]：

$$\frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t} + \text{div}(\rho u\phi) = \text{div}(\Gamma \text{grad}\phi) + S \quad (1)$$

式中： ϕ —通用变量； Γ —广义扩散系数； S —广义源项。

当 ϕ , Γ , S 取不同的值时,式(1)分别代表连续方程、能量方程、动量方程、湍动能方程以及耗散率方程。对式(1)的离散采用有限体积法,连续方程、能量方程和动量方程的离散格式为二阶迎风格式,湍动能和耗散率方程采用一阶迎风格式。压力插值格式采用标准插值,压力速度耦合采用SIMPLE算法。

当连续方程、速度、湍动能及耗散率的残差都小于 1×10^{-3} 时,能量方程的残差小于 1×10^{-6} ,进出口流量相差小于0.1%,认为计算收敛。

2 计算结果及分析

2.1 空腔深宽比对泄漏量的影响

在分析空腔深宽比对泄漏量的影响时,选取4种不同的空腔宽度,其他条件不变,考虑空腔深宽比的变化对泄漏量的影响。几何模型如图1所示,参数为:齿厚 $B=2$ mm,间隙 $C=0.5$ mm,转子半径 $R=210$ mm,介质进口温度

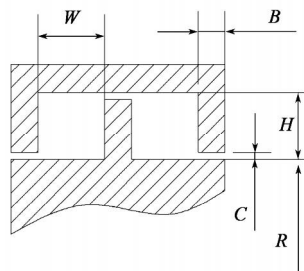


图1 锯齿式迷宫密封模型

$T=300$ K,进口压力 $P_a=141\ 855$ Pa,出口压力 $P_b=101\ 325$ Pa,转速660 r/min,工作介质为理想气体。

图2显示了泄漏量随深宽比变化趋势,从图中可以看出:①随着空腔深宽比的增加,泄漏量先减小后增加;②存在一个最佳深宽比值,使泄漏量达到最小,对于本文的计算模型,最佳深宽比在0.9左右;③随着空腔宽度的变大,深宽比对泄漏量的影响变得更加明显,最优值存在的范围更小。

图3显示了部分不同深宽比时空腔内流场分布情况。分析流场图可以发现:图3(a)中,空腔深宽比很小,流体与空腔内介质的质量和能量交换很少,没有形成有效的回流漩涡,大部分流体直接流向了下一个节流齿,导致密封性能较差。图3(b)中,射流进入空腔后发生扩散,与空腔内的介质发生质量及能量的交换,产

生中心回流漩涡,并且在中心主漩涡的带动下,壁面夹角处形成与主漩涡流动方向相反的小涡。在空腔出口处,一部分流体向左偏转增强主漩涡流动,从而增加能量耗散,一部分向右偏转加剧了出口通道的断面收缩,这些综合效应使得泄漏量减少,因而密封性能较好。图3(c)和图3(d)中,由于空腔深宽比较大,在空腔内涡流的作用下,空腔底部的流动滞止,动能耗散的程度降低,因此虽然空腔回流区的面积较大,但综合的能耗效应较小,密封性能反而较差。

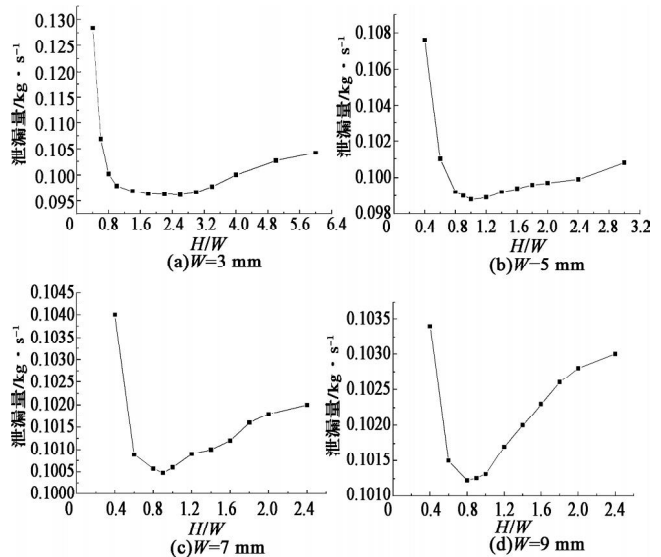


图2 空腔深宽比对泄漏量的影响

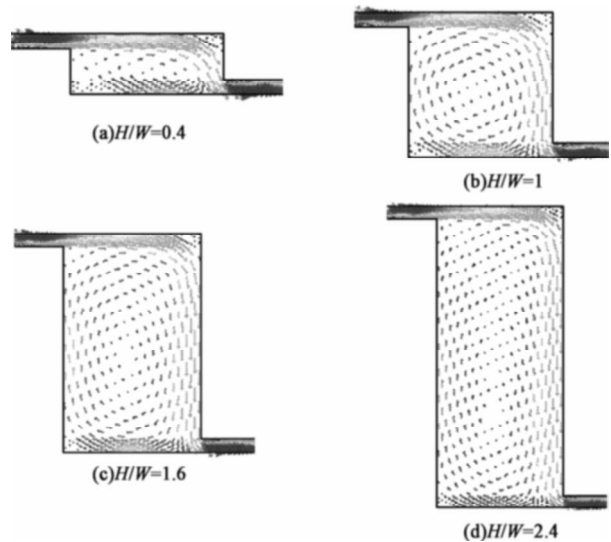


图3 不同深宽比时空腔内流场分布 ($W=5$ mm)

2.2 齿尖相对厚度对泄漏量的影响

在分析齿尖相对厚度对泄漏量的影响时,选取3种不同的间隙宽度,其他条件不变,仅改变 B/C 的值。几何模型如图1所示,空腔深度 $H=5$ mm,空腔宽度 $W=5$ mm,其他参数相同。图4为泄漏量随齿尖相对厚度变化趋势,可以看出:①随着 B/C 的增加,泄漏量先增加然后缓慢递减;②当 $B/C=3$ 时,泄漏量达到最大值;③间隙宽度越小, B/C 对泄漏量的这种影响越明显。

结合图5的流场图可以发现:密封间隙相同时,不

同的齿厚对场中的涡并没有太大的影响,主要是密封齿处流场的变化较大,齿厚较小时,密封齿的节流效果较强,密封性能较好,随着齿厚的增大,节流效果逐渐减弱,泄漏量逐渐上升,但是随着齿厚的继续增大,流体经过密封齿间隙时摩擦损失增加,造成流体的能量损失增加,泄漏量又缓慢减小。

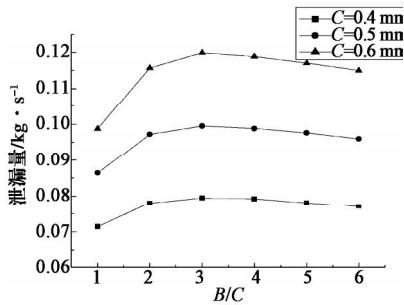


图4 齿尖相对厚度对泄漏量的影响

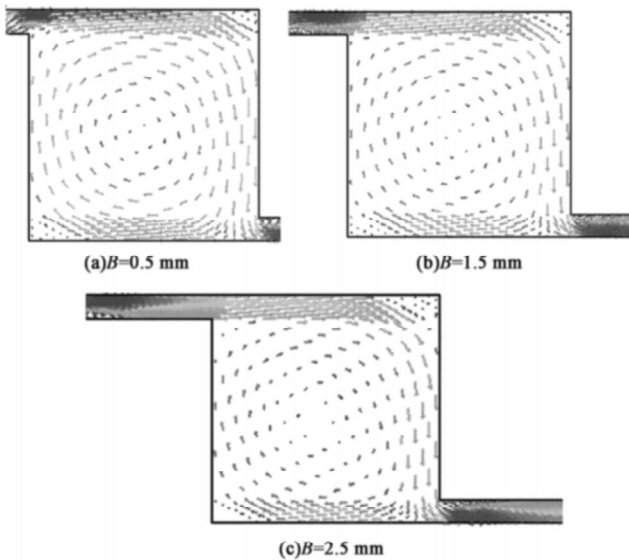


图5 不同齿厚时流场的分布 ($C=0.5\text{ mm}$)

3 结论

①随着空腔深宽比的增加,泄漏量先减小后增加,存在一个最佳深宽比值,使泄漏量达到最小,对于本文的计算模型,最佳深宽比在0.9左右。随着空腔宽度的变大,深宽比对泄漏量的影响变得更加明显,最优值存在的范围更小。

②随着齿尖相对厚度的增加,泄漏量先快速增加然后缓慢减少。较小的齿厚无法满足强度的要求,齿厚较大时会减小空腔宽度和空腔数量,因此应该选择合适的密封齿厚度,既能保证良好的密封性能,又能满足工艺要求。

参考文献:

- [1] CHUPP R E, HENDRICKS R C, LATTIME S B, et al. Sealing in Turbomachinery [J]. Journal of Propulsion and Power, 2006, 22 (2):313-349.
- [2] CHUPP R E, GHASRIPOOR F, TURNQUIST N A, et al. Advanced seals for industrial turbine applications: dynamic seal development [J]. Journal of Propulsion and Power, 2002, 18(6): 1260-1266.
- [3] 王建中, 黄守龙. 直通式迷宫密封的静态工作特性 [J]. 武汉工业大学学报, 1994, 16 (4): 86-90.
- [4] 小茂鸟和生. Leakage of Air through Labyrinth Paeking [C] // 日本机械学会, 日本机械学会论文集. 1955:605-613.
- [5] David LRhode, Richard G Adams. Rub-Groove Width and Depth Effects on Flow Predictions for Straight-Through Labyrinth Seals [J]. Journal of Tribology, 2004, 126: 781-787.
- [6] 王福军. 计算流体动力学分析 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2004.

(上接第29页)

式处理方法,设计了在执行器发生故障情况下的鲁棒 H_{∞} 容错控制器,并将所设计的容错控制器应用于磁悬浮列车悬浮系统中,对悬浮间隙的变化情况进行了仿真。仿真结果表明所设计的控制器在执行器故障条件下能够使得磁悬浮列车稳定悬浮与运行,验证了上述所提各方法的有效性,为磁悬浮列车悬浮系统的容错控制提供了一种安全可靠且具有工程实际意义的研究方法。

参考文献:

- [1] 龙志强, 陈慧星, 常文森. 考虑电磁铁故障的磁浮列车单悬浮模块的容错控制 [J]. 控制理论与应用, 2007, 24(6): 1033-1037.
- [2] 龙志强, 薛松, 陈慧星. 基于LMI的磁浮列车悬浮系统被动容错控制 [J]. 计算机仿真, 2008, 25(2): 265-268.
- [3] 李云, 龙志强. 磁悬浮系统网络化控制器的设计与实现 [J].

系统仿真学报, 2009, 21(14): 4420-4423.

- [4] Teng Q F, Fan D W, Gao F. Design of Delay Dependent Robust H_{∞} Reliable Controller for Uncertain Time Varying Delay Systems against Actuator Failure [C] // Automation Institute of Ludong University, Proceedings of the 20th Chinese Control and Decision Conference. Yantai: IEEE Press, 2008: 504-509.
- [5] Sung H K, Cho H J, Yoo M H. Fault-tolerant Control of Electromagnetic Levitation System [C] // Institute of Electrical Engineering Chinese Academy Sciences, Proceedings of the 18th International Conference on Magnetically Levitated System and Linear Drives. Shanghai: IEEE Press, 2004: 676-689.
- [6] 孙金龙, 滕青芳, 王国林. 输入滞后结构振动系统的 H_{∞} 可靠控制 [J]. 控制工程, 2010, 17(3): 279-282.
- [7] 薛松. 低速磁浮列车悬浮系统的故障诊断与容错控制技术 [D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2007.
- [8] 柴琳, 费树岷. 一类改进的输入时滞的线性时滞系统的 H_{∞} 控制 [J]. 控制理论与应用, 2006, 23(5): 800-804.
- [9] 俞立. 鲁棒控制-线性矩阵不等式处理方法 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2002.