

# 有限元法在热轧机工作辊轴承座热特性分析中的应用

张思成<sup>1</sup>, 王建梅<sup>2</sup>, 徐春园<sup>1</sup>

(1. 兰州理工大学, 甘肃 兰州 730050; 2 太原科技大学, 山西 太原 030024)

**摘要:**以某热轧机工作辊轴承座的热变形故障作为研究对象, 通过分析轴承系统摩擦热的分析, 建立了合理的有限元计算模型, 采用有限元法分析了轴承座的热特性。

**关键词:**轴承座; 热特性; 有限元模型

**中图分类号:** TH133.3

热轧机工作辊轴承系统由上、下工作辊、工作辊轴承和轴承座组成。在生产过程中多次发生工作辊轴承熔烧失效、轴承座大变形事故, 每发生一次事故, 不仅造成巨大经济损失, 而且严重影响轴承国产化过程。前人多次分析了轴承套圈的温度场变化规律以及提出许多改进轴承座结构的方案, 但并没有减少轴承事故的发生。面对该难题, 关键的是采用什么合理的方法对轴承座的热变形作恰当的理论分析计算?

传统的数学物理方法是用来求解工程技术问题的一大科学成果, 目前虽已具有完整的理论, 对微分方程能够求出它的已给边界条件下的精确解, 但是真正能够解出只有极少数的几种简单情况, 对于二维或三维更是如此。所以对于复杂形状的分析, 不可能用有限的解析函数来描述, 为了满足生产和工程上的需要必须采用近似计算。目前, 正在被广泛应用的两种近似算法是有限差分法和有限单元法。在有限差分法的离散计算中, 可以适当地在整个实体模型上划分均匀的正方形网格, 但是边界变成了阶梯形, 就不能很好地适合实际情况, 相反, 有限单元法特别适合于具有复杂形状和条件的物体, 其划分的单元形状和疏密程度可以是任意变化的, 所以采用有限单元法, 通过建立有限元模型对轴承座进行热分析计算<sup>[2]</sup>。

## 1 轴承座有限元模型的建立原则

建立有限元计算模型主要包括几方面的内容: 真实结构的简化、单元类型的选取、简化结构的离散化、载荷处理以及边界条件处理等。其总体原则是尽可能地从结构的几何特性、力学特性、边界条件及载荷环境等方面逼近真实结构, 使计算模型与原结

构在弹性及惯性特征方面尽量一致。在几何特征一致方面, 不要刻意追求有限元模型与原结构的完全一致性, 在某些截面变化部位及特殊外形部位, 如果完全逼近原结构, 往往会出现畸形单元, 这时就有必要改变原结构的外形, 同时, 在某些截面变化较大的部位, 要进行完全一致的逼近, 会增加单元数目, 但计算精度提高甚微, 所以此时也有必要改变原结构的外形。此外, 可以对计算结果影响不大的孔、槽、台肩等适当处理或删除, 以免无谓增大计算规模; 对于结构对称、载荷也对称的结构可取其一半或四分之一来计算, 根据上述一些原则, 选择合适的单元类型或单元组合划分合理的网格, 处理好约束条件, 使有限元模型结构尽量与原结构一致<sup>[1]</sup>。

## 2 轴承座结构的简化及模型离散化

### 2.1 轴承座结构的简化及假设

分析工作辊轴承座的零件图和零部件图, 轴承座具有众多的油孔、台肩及小圆角、起吊孔等, 根据圣维南定理, 忽略油孔等只对局部应力有影响, 但对整体应力的分布没有影响, 因而对轴承座进行必要的简化(见图 1), 将油孔、起吊孔、螺栓孔去掉, 将小圆角改为直角, 轴承孔端盖的影响折算到轴承座本体上, 又因其结构对称, 只取轴承座结构的一半建立有限元模型。

### 2.2 离散化的有限元模型

将上述轴承座半体离散成八节点、六面体单元。为满足计算精度, 又不致网格过多, 在轴承座薄壁部位划分网格密, 在壁厚且远离轴承座内孔部位划分网格疏。

整个有限元模型包括 1108 个节点, 706 个单

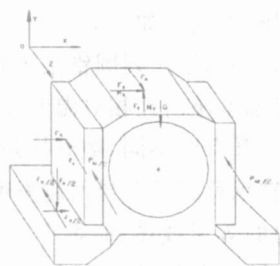


图 1 简化后的轴承座结构图

元,是一个较大的分析模型。工作辊轴承座的有限元模型如图 2 所示。

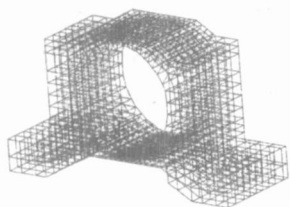


图 2 工作辊轴承座的有限元离散结构图

### 3 轴承系统的摩擦热计算分析

在轴承系统中,如果热交换不好,轴承的温度将会很高,严重影响轴承的工作性能和寿命<sup>[2]</sup>,例如,轧辊辊颈与轴承内圈由于大量摩擦热而发生焊合,轴承与轴承座由于热变形无法拆离等。因此,有必要弄清轴承系统的热源。

#### 3.1 轴承系统的热源分析

在轴承系统中,如果热交换不好,轴承的温度将会很高,严重影响轴承的工作性能和寿命<sup>[2]</sup>,例如,轧辊辊颈与轴承内圈由于大量摩擦热而发生焊合,轴承与轴承座由于热变形无法拆离等。因此,有必要弄清轴承系统的热源。

经分析,轴承温升的热源有轴承的摩擦热和来自外部的热,如轧制热、润滑剂的给油温度、密封等。对于大型轧机来说,后几种情况可提供的热量相对很小,可忽略。所以轴承系统的热源主要为轴承的摩擦热。从理论上分析摩擦热的起因,大体可认为滚动体与套圈之间的摩擦(滚动接触摩擦,滑动接触摩擦)及润滑剂引起的摩擦。

##### 滚动接触摩擦

滚动体在力的推动下滚动时,除了在赫兹接触区保持着正压力之外,还存在切向力,从而使接触区分为微观滑动区和粘着区。在粘着区内只有滚动而无滑动,微观滑动区内存在着滑动。滚动摩擦阻力由几个因素构成,如弹性滞后、粘着效应、微观滑动、塑性滞后。

在滚动过程中还存在热弹性滞后,微观滑动,塑性滞后引起的能量损失,它们在滚动摩擦过程中所占比例很小,因此,略去这些能量损失,产生滚动摩擦的主要原因在于弹性滞后,粘着效应。

##### 滑动接触摩擦

滑动接触部分按形式的不同而异,以下部位为滑动接触:保持架与滚动体;保持架由套圈引导—保持架与引导面;用挡边支承保持架的形式—保持架侧面与挡边;无保持架形式—滚动体与滚动体;滚子轴承—滚子端面与挡边。

滑动摩擦强烈地受润滑状态影响,由于速度不同,滑动摩擦有很大变化( $\eta \cdot N/P$  作用变化),接触面的形状,粗糙度对润滑状态有强烈影响。滚子轴承中,滚子端面与挡边之间的  $\eta \cdot N/P$  减小,一端接触时摩擦异常,而且形成润滑不良、烧伤。

##### 润滑剂的搅拌阻力

润滑剂的搅拌引起的摩擦受轴承的速度,温度,质量的影响很大。

经分析,轴承温升的热源有轴承的摩擦热和来自外部的热,如轧制热、润滑剂的给油温度、密封等。对于大型轧机来说,后几种情况可提供的热量相对很小,可忽略。所以轴承系统的热源主要为轴承的摩擦热。从理论上分析摩擦热的起因,大体可认为滚动体与套圈之间的摩擦(滚动接触摩擦,滑动接触摩擦)及润滑剂引起的摩擦。

#### 3.2 轴承系统的精确发热率计算

通过轴承运动学,动力学分析来计算摩擦热,这种算法的结果较准确,但工作量大。

精确的摩擦力分析是建立在轴承运动学和动力学分析基础上。

分析过程设第  $j$  个滚子所受的力分别为:油膜施予的法向载荷  $F_{ij}$ ,  $F_{oj}$ , 切向动拉力  $Q_{ij}$ ,  $Q_{oj}$ , 摩擦力  $T_{ij}$ ,  $T_{oj}$ , 保持架施予的法向压力  $F_{cj}$ , 摩擦力  $T_{cj}$ , ( $\mu$ :库仑摩擦系数), 周围流体介质施予的阻力矩  $M_{ij}$ ; 离心惯心力  $F_{ij}$ , 设辊子质量为  $m_r$ , 内滚道半径为  $R_i$ , 滚子半径为  $r$ , 保持架转速和滚子自转速度分别为  $W_c$  和  $W_{rj}$ , 则根据刚体平面运动微分方程有<sup>[3]</sup>

$$F_{ji} - F_{oj} - T_{cj} + m_r (R_i + r) \omega_c^2 = 0 \quad (4)$$

$$Q_{ij} + T_{ij} - Q_{oj} - T_{oj} - F_{cj} = 0 \quad (5)$$

$$(T_{ij} + T_{oj} - T_{cj}) - M_{ij} = \frac{1}{2} m_r r^2 \omega_c \frac{d\omega_{rj}}{dt} \quad (6)$$

$j = 1, 2, 3, \dots, z$ ,  $z$  为滚子个数)

稳定状况下,保持架转速为常数,故列如下力矩平衡方程:

$$(R_i + r) \sum_{j=1}^z F_{qj} - Mcf = 0 \quad (7)$$

联系上述系列方程,即可求出滚子受力。

计算轴承中的滚动摩擦功耗  $M$

$$M = M_e + M_a \quad (8)$$

式中:  $M_e$  — 弹性滞后的能量损失  $N \cdot mm$ ;

$M_a$  — 粘着效应的能量损失  $N \cdot mm$ 。

摩擦发热率:

$$Q = 2\pi Mn / 60 \quad (9)$$

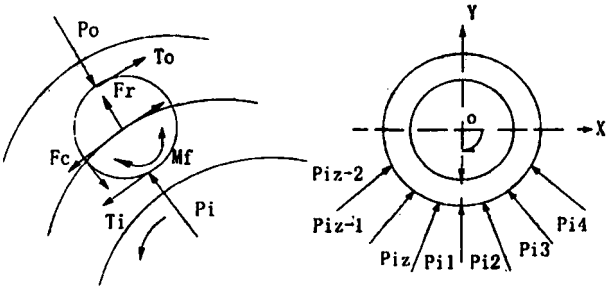


图 3 轴承滚子受力示意图 图 4 轴承套圈受力示意图

### 3 有限元实例分析结论

通过建立合理的有限元模型,本课题采用三维温度场有限元模拟程序求解了轴承座受热温场、热

变形场和应力场,得出了如下的分析结果<sup>[3]</sup>:

(1)由于第二列、第三列圆锥滚子轴承承受较高的轴向力,使得轴承座内孔相对温升高,偏载的分布使得四列轴承温升有所不同,随着换热时间增加,温度场分布会因轴承负载的差异而越发明显。

(2)由得出的等温线图知,薄壁处温升高,壁厚处温升相对低,因而分析热变形主要发生在轴承座内孔的薄壁处,远离轴承座孔的壁厚部分基本不发生变形。可推断其变形孔大致为椭圆形,因轴承座的轴向温度不同,又可根据计算结果推出椭圆度的不均匀分布与温度不均匀分布相一致。

(3)温度梯度小的轴承座部位,其热应力相对小,而且轴承座热变形主要归咎于热应力大的缘故。

参考文献:

- [1] 黄庆学 大型板带轧机工作辊轴承载荷分布实验研究成果 太原重型机械学院学报 2000 Vol 21 No 3 175—179
- [2] 陈志健 冷轧机工作辊轴承载荷分布研究 北京科技大学研究生论文 1986 6—9
- [3] 王建梅 热轧机轴承系统的热平衡分析 太原重型机械学院学报 2001 Vol 22 No 3 179—181
- [4] 孔秉谦著 有限单元法在传热学中的应用 科学出版社 20—25

(上接第 109 页)7)盘点维护系统的准确性

## 2 元器件库存管理和采购成本控制系统的特 点

1)该系统是对实验室元器件进行动态实时管理的一种管理模式。将现代化物流技术JIT 看板,合理地应用于系统中,控制元器件的库存,提出相应的采购计划,提示先进先出合理使用的原则,采用安全库存,经济批量订货策略。

2)采用 ACCESS 建立强大的数据库,采用局域网式互联网共享数据库。建立易操作的人机对话窗口。采用选择代号标准输入,避免繁琐的汉字输入。固定的查询方式、固定的报表方式。对不同用户的需求,程序员可采用 ACCESS 强大的 VBA 为客户设计出相关的程序。

3)所有的库存、维修、使用记录是动态的。它对操作者系统培训要求不高,但只有充分地维护系统,

这套系统才能在元器件管理中发挥最大的作用。

4)系统对不同客户有不同的授权,避免泄密、无意或恶意地修改数据,保持数据库的完善性。

### 3 结束语

元器件的管理是电子中心实验室管理中不可缺少的部分,它们是正常教学和科研非常重要的保证,这套管理系统还处在一个发展的阶段,我们相信,通过不断的完善,不断地发展,它就一定能达到我们预定的目标,为高校实验室的蓬勃发展添砖加瓦。

参考文献:

- [1] 周俊龙,杜晓梅,王权阳,邓安仲. 实验室设备管理数据库设计与开发. 实验室研究与探索. 2004,23(9):48—49.
- [2] 吴清一. 现代物流概论. <http://www.elph.cn>.
- [3] Jettrey Richter et al. Windows. 高级编程指南[M]. 第四版. 北京:清华大学出版社,2002.216—393.