

多源微传感器嵌入的轧机智能轴承设计与力学性能分析

吝水林^{1,2} 胡博文^{1,2} 邢建康^{1,2} 周美华³ 孙建亮^{1,2} 彭艳^{1,2,4}

(1. 燕山大学 机械工程学院, 秦皇岛 066004)

(2. 燕山大学 国家冷轧板带装备及工艺工程技术研究中心, 秦皇岛 066004)

[3. 北轴(洛阳)科技有限公司, 洛阳 471000]

(4. 燕山大学 起重机械关键技术全国重点实验室, 秦皇岛 066004)

摘要: 针对现在监测方法在轧机轴承早期故障诊断精度上的局限性, 提出了一种基于嵌入式多源微传感器的轧机智能轴承结构设计方法, 开发了集成温度和加速度信号的多源微传感器模块, 并设计了轴承座轴向传感引线优化布局结构, 突破了传统轴承空间受限下的传感集成瓶颈。建立了开槽结构的力学性能评估体系, 通过强度校核与寿命计算验证了智能结构的可靠性。结果表明, 开槽区域为10 mm×5 mm时的等效应力最大为99.71 MPa, 较材料屈服极限具有充分安全裕度; 结构整体最大变形量仅为0.24 mm且局部变形量小于0.02 mm, 理论寿命与常规轴承保持一致。优化后的智能轴承在保证监测功能的同时, 结构强度与寿命均满足工业应用要求。研究成果不仅为极端工况下轧机轴承早期故障诊断提供了高精度监测手段, 更通过嵌入式设计实现了“监测-结构”一体化流程, 其强度校核标准与寿命评估方法可直接指导工业现场智能轴承的改造升级, 对提升轧制生产线运维效率具有重要工程价值。

关键词: 轧机智能轴承; 结构设计; 嵌入式传感; 有限元计算; 力学性能

中图分类号: TG133.33 **DOI:** 10.16579/j.issn.1001.9669.2025.09.013

0 引言

随着钢铁工业向智能化、高效化转型, 连续化轧制工艺对设备可靠性提出了更高要求^[1]。轧机轴承作为其核心传动部件, 长期服役于极端复杂的多物理场耦合工况, 如需承受3 000 t级轧制载荷, 20 m/s以上高线速度, 150 °C高温热负荷, 同时面临冷却水介质侵蚀和轧制振动冲击^[2]。这种极端服役环境极易诱发轧机轴承出现剥落、裂纹等故障, 从而导致滚动体、套圈等元件失效, 进而引发传动、液压等子系统甚至主机装备的功能退化, 造成轴承烧损、堆钢等重大生产安全隐患^[3]。因此, 如何准确、及时预报轧机轴承早期故障, 对于保障整机装备全生命周期可靠运行、实现钢铁工业智能化转型升级具有重要意义。

近年来, 微型传感技术、嵌入式系统及物联网技术的快速发展推动了智能轴承技术的进步, 使其成为装备状态监测领域的重要研究方向^[4-5]。根据传感器集成方式的不同, 智能轴承可分为外挂式和嵌入式两种类型。智能轴承技术可追溯至20世纪80年代, 当

时出现的“带ABS防抱死系统传感器的汽车轮毂轴承”被视为智能轴承的雏形, 也被称为“带传感器轴承”^[6-7]。到20世纪90年代后期, GAO等^[8]首次提出智能轴承的设想, 并与斯凯孚轴承公司合作研制出第一代智能轴承产品。同期, 斯凯孚公司开发了用于轴承状态管理的洞悉技术^[9]。舍弗勒公司还推出了可灵活组态的系列智能轴承, 根据需求灵活配置相应监测模块完成多种物理量的监测。

在智能轴承的技术发展过程中, 国内外学者在理论探索、结构设计、试验验证方面开展了大量创新性研究。SHAO等^[10-11]创新性地提出了半嵌入式多参量传感器的智能轴承结构, 该设计利用轴承外圈槽式结构, 将复合传感器与轴承端面进行嵌入式结合, 能够同时采集轴承运转过程中水平和垂直两个方向的信号。此外, 陈景伟^[12]以单列滚子轴承为研究对象, 开展了新型智能轴承的专项设计与研究, 进一步拓展了智能轴承的应用范围。在嵌入式智能轴承研究方面, 学者针对结构设计和传感器安装进行了深入探索。沈邵伟^[13]系统地研究了轴承外圈在不同位置开槽时

收稿日期: 2025-07-13

基金项目: 国家重点研发计划(2024YFE0114600); 国家自然科学基金项目(52475409); 河北省自然科学基金项目(E2025203126); 河北省教育厅科学研究项目(ZD2022044)

作者简介: 吝水林, 男, 1991年生, 河北邯郸人, 博士, 讲师, 硕士研究生导师; 主要研究方向为轴承故障机制与动力学; E-mail: linshuilin@ysu.edu.cn.

引用格式: 吝水林, 胡博文, 邢建康, 等. 多源微传感器嵌入的轧机智能轴承设计与力学性能分析[J]. 机械强度, 2025, 47(9): 138-145.

LIN Shuilin, HU Bowen, XING Jiankang, et al. Design and mechanical performance analysis of intelligent bearings for rolling mills embedded with multi-source microsensors[J]. Journal of Mechanical Strength, 2025, 47(9): 138-145.

的受力变形特性及信号采集效果,为传感器集成位置的优化设计提供了重要依据。为进一步提升传感器集成度,张文远等^[14]则从嵌入式结构分析和振动监测系统设计角度出发,确定了滚动轴承外圈径向开槽结构。肖嘉伟等^[15]针对智能轴承结构和感知单元集成中的信息感知测点综合最优选取困难的问题,提出了嵌入式智能轴承信息感知测点优化方法。崔宝珍等^[16]针对旋转机械智能运维实时监测的工作需求,提出了一种智能轴承自供电结构,为智能轴承的结构设计与优化奠定基础。在轧机轴承方面,白可等^[17]设计了用于安装在轧机牌坊和上工作辊轴承座之间的液压智能衬板,为智能轴承的结构设计提供了参考。郭鑫^[18]分析了支撑辊受载时四列滚子轴承各列的变形和应力分布,为四列滚子轴承温度场模型建立和轴承座开槽设计提供了依据。

尽管国内外学者在智能轴承研究方面已取得显著进展^[19],开发了包括外挂式、嵌入式等多种传感器集成方案,但现有技术仍难以满足轧机轴承的特殊需求。由于轧机轴承普遍采用高刚度、小体积的紧凑型设计,传统基于开槽的传感器集成方法面临严峻挑战。首先,在重载工况下,开槽结构会削弱轴承的承载能力,影响其使用寿命;其次,有限的空间严重制约了传感器的合理布局,使得多参数监测系统的集成变得极为困难。基于此,本文开发了一种面向极端轧制工况的嵌入式多源微传感器的智能轴承结构,针对开槽后的轴承结构进行了力学性能分析和强度校核,并计算了开槽后智能轴承的理论寿命。研究成果不仅为智能轴承在轧制设备中的应用提供了可靠的结构设计方案,更为推动钢铁行业智能化、数字化转型提供了关键技术支持。

1 结构设计

轧辊轴承需在严格径向尺寸空间约束下承受极高的轧制载荷,因此普遍采用多列滚子轴承解决方案。其中,四列圆柱滚子轴承凭借其径向尺寸小、承载能力大、允许转速高等优势,在现代轧机上广泛使用。本文以高速板带冷轧机支承辊四列圆柱滚子轴承为研究对象进行智能轴承结构设计,针对其特殊服役工况要求,提出了一套完整的智能轴承结构设计。该方案从传感器选型与封装、机械结构优化两个维度进行系统设计,实现了在极端轧制工况下的可靠监测功能。

1.1 嵌入式多源传感器集成设计

考虑到轧机轴承特殊的服役环境(重载、高温、强振动等),本方案采用先进的微传感器技术开发了温

度和加速度等多参数集成的传感器模块。该传感器将温度传感单元与三轴加速度计集成于一体,采用航空级钛合金外壳进行封装,确保在高温环境和轧制载荷下能够稳定工作。独特的螺纹紧固结构设计不仅实现了传感器与轴承油孔的可靠连接,还保证了良好的热传导性能,封装后的多源传感器结构如图 1 所示。在信号传输方面,采用多芯屏蔽线缆集成供电与数据传输功能,通过特殊的结构设计消除应力,有效避免了线缆在长期工作环境下的疲劳断裂问题。

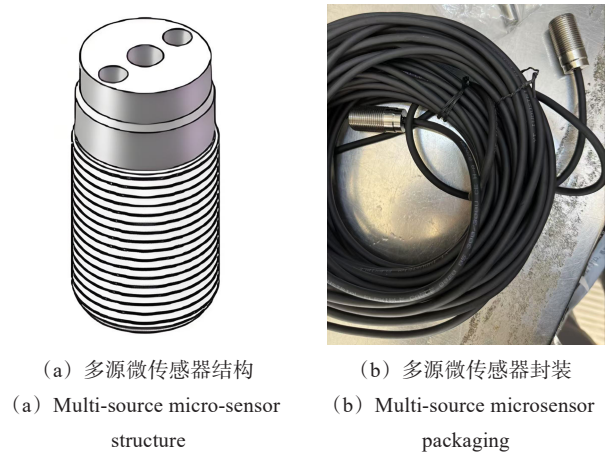


图 1 多源微传感器

Fig. 1 Multi-source microsensor

1.2 轴承结构优化设计

四列圆柱滚子轴承在轧辊一端与辊颈配合,另一端由止推轴承或轴承座完成轴向自由度固定。轧机轴承安装空间紧凑,智能轴承的实现须对现有轧机轴承装置及辊系结构做改造,轴承部分参数如表 1 所示。轧机轴承及辊系结构如图 2 所示。

表 1 轧机轴承结构参数

Tab. 1 Structural parameters of the rolling mill bearing

参数 Parameter	值 Value
内径 Inner diameter/mm	770
外径 Outer diameter/mm	1 075
宽度 Width/mm	770
滚动体直径 Rolling element diameter/mm	80
滚动体宽度 Rolling element width/mm	147
滚动体个数 Number of rolling elements	147

为实现微传感器的无缝嵌入,在安装该智能轴承的轴承座对应位置,即传感器安装点附近,沿轴向加工出专门用于容纳传感器引线的凹槽。开槽宽度和深度依据多源传感器的引线尺寸进行设计,如图 3 所示。本文选取的开槽宽度和深度分别为:5 mm×5 mm、5 mm×10 mm、10 mm×5 mm,3 个尺寸分别依据传感器嵌入数量进行开槽加工。凹槽从轴承座侧盖处延伸至轴

承传感器安装点。

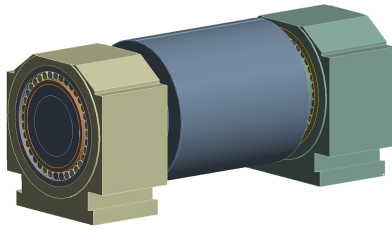
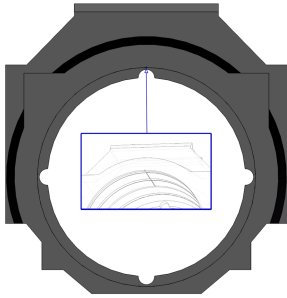


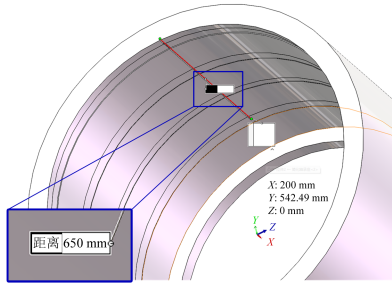
图2 轧机轴承及辊系结构

Fig. 2 Structure of the rolling mill bearing and roll system



(a) 承载区开槽结构

(a) Slotted structure in the load-bearing area



(b) 开槽尺寸

(b) Slotting size



(c) 开槽引线

(c) Slotted lead wire

图3 整体开槽结构

Fig. 3 Overall slotted structure

2 力学性能分析

由第1节分析可知,嵌入式传感器的集成需要在轴承座上开设特定槽型结构,这一结构改造将直接影响轴承的整体力学性能。为确保智能轴承在重载轧制工况下的可靠性,本节采用有限元仿真技术,对开槽后的轴承结构进行系统性力学性能评估。通过建立包含精确材料参数、接触边界条件和实际载荷工况的有限元

模型,重点分析不同槽型结构对轴承应力分布、变形特征以及疲劳寿命的影响规律。研究将综合考虑静态承载能力、动态刚度特性以及长期服役性能等关键指标,为智能轴承的结构优化设计提供依据和数据支撑。

为系统评估开槽结构对轴承力学性能的影响机制,本研究基于实际结构参数和有限元分析框架,构建了高保真度的三维仿真模型,如图4所示。该模型精确还原了智能轴承的关键承载结构:①集成传感器安装孔的外圈组件;②开槽优化的轴承座本体;③简化的内圈-轧辊轴颈耦合系统。所有几何特征均采用实际工程图纸参数化建模,特别针对开槽区域采用0.1 mm精度的曲面重构技术,确保准确捕捉结构不连续性导致的应力梯度变化(预计局部网格密度达0.5 mm单元尺寸)。

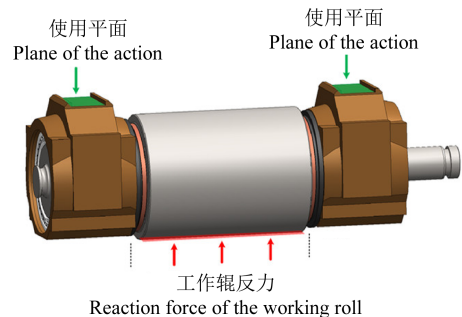


图4 高保真三维模型

Fig. 4 High-fidelity 3D model

表2中列出了该支撑辊轴承的工况参数,包括最大轧制力、最大轧制速度、润滑方式以及典型工作温度等。轧制力通过液压缸对称作用于支承辊轴承座。图5所示的简化力学模型中,采用Saint-Venant原理处理载荷分布,将实际接触压力转化为等效节点力施加。在有限元求解设置(图5)中采用多尺度接触算法:轴承座-轴承配合面定义为非线性摩擦接触($\mu=0.15$),开槽区域周边设置自适应接触;轴承内圈加载面施加极限轧制载荷,模拟实际轧制过程的冲击特性。为平衡计算精度与效率,模型采用混合单元技术(六面体核心区+四面体过渡区),经网格独立性验证,最终单元数控制在120万左右,计算误差 $<3\%$,如图6所示。这种精细化的建模策略,为后续强度校核和疲劳分析提供了可靠的数值试验平台。

在材料属性方面,本研究根据实际工程材料参数进行定义。轴承外圈采用GCr15轴承钢,轴承座选用ZG270-500中碳铸钢。考虑到静力学分析需求,所有部件均设置为线弹性材料模型。在温度设置方面,充分考虑了温度对材料性能的影响,以确保分析结果能够准确反映轴承在实际高温工况下的力学性能。主要参数如表3所示。

表 2 工况参数

Tab. 2 Operating condition parameters

参数 Parameter	值 Value
最大轧制力 Maximum rolling force/t	2 200
最大轧制速度 Maximum rolling speed/(m/min)	1 250
支撑辊直径范围 Diameter range of the support roll/mm	1 150~1 300
轴承使用温度 Operating temperature of the bearing/°C	50~80
轴承润滑方式 Lubrication method of bearings	稀油循环润滑 Thin oil circulation lubrication
支撑辊更换周期 Replacement cycle of support roll/d	21
径向游隙 Radial clearance/mm	0.22~0.32

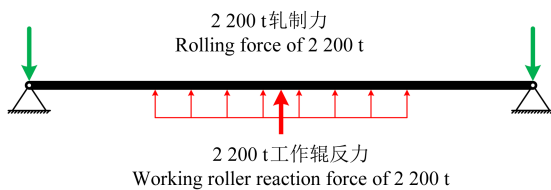


图 5 简化梁系统受力

Fig. 5 Force of the simplified beam system

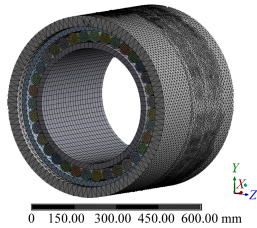


图 6 有限元模型网格划分

Fig. 6 Meshing of the finite element model

表 3 材料属性

Tab. 3 Material property

参数 Parameter	中碳铸钢 Medium carbon cast steel (ZG270-500)	轴承钢 Bearing steel (GCr15)
弹性模量 Elastic modulus/MPa	2.1×10^5	2.08×10^5
泊松比 Poisson ratio	0.3	0.3
密度 Density/(kg/mm ³)	7.8×10^{-6}	7.8×10^{-6}
体积模量 Volume modulus/MPa	1.75×10^5	1.73×10^5
剪切模量 Shear modulus/MPa	80 769	80 000

图 7 所示为模型整体的变形分布,主要变形区域为载荷直接作用的轴承结构,开槽区域变形不明显。不同开槽尺寸对轴承座应力分布的具体影响如图 8~图 10 所示。对比 3 个几何模型的有限元计算结果,应力最大值均出现在开槽结构与油槽相交处。下面以开槽尺寸 10 mm×5 mm(图 10)为例进行讨论分析,其他尺寸的分析结果类似。

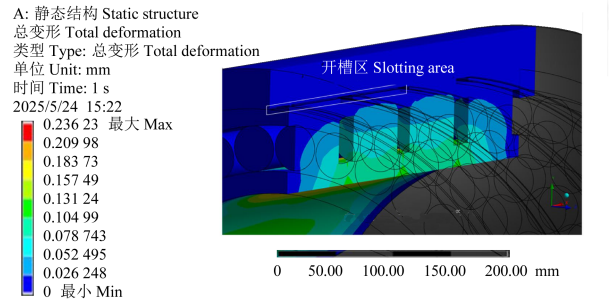
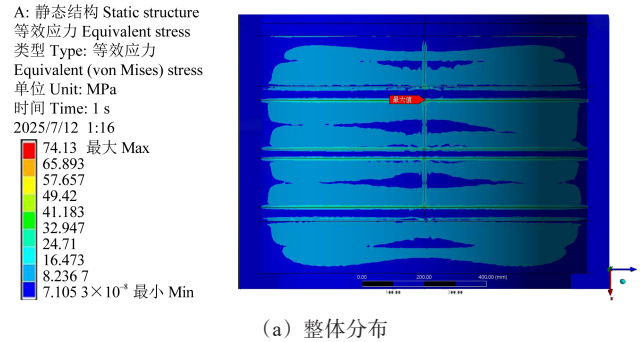


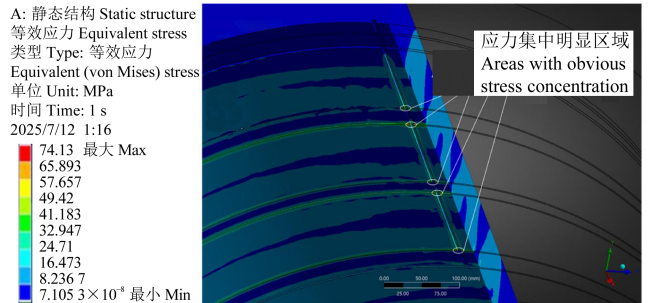
图 7 总变形结果

Fig. 7 Total deformation result



(a) 整体分布

(a) Overall distribution



(b) 局部剖视

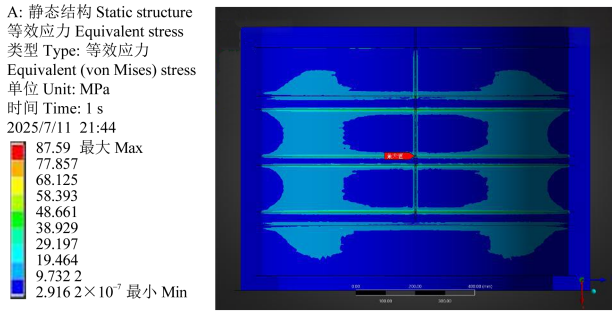
(b) Partial dissection

图 8 开槽尺寸为 5 mm×5 mm 时的局部应力分布

Fig. 8 Local stress distribution when the slotting size is

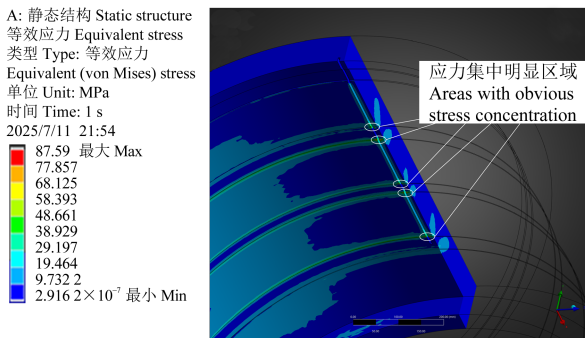
5 mm×5 mm

图 7 所示为上支撑辊操作侧轴承座开槽位置在承受 2 200 t 轧制力持续作用后的变形分布情况。由图 7 可知,结构变形主要集中在直接承受载荷的轴承接触区域,最大变形量为 0.23 mm,而开槽部位的变形量仅为 0.02 mm,表明该区域刚度设计合理。图 10 所示为开槽尺寸 10 mm×5 mm 的应力分析,结果表明,开槽区域的最大等效应力为 99.71 MPa,出现在轴承座开槽结构与轴承中挡圈的配合过渡位置,该应力值远小于材料屈服强度,具有足够的安全裕度。值得注意的是,在轴承座开槽与轴承外圈凸台结构的配合边缘处存在局部应力集中现象,这是为了节约计算资源和计算时间进行的模型结构简化。整体而言,在额定工况下,开槽结构的强度和刚度均满足使用要求,不会产生塑性变形或影响轴承的正常运转。



(a) 整体分布

(a) Overall distribution



(b) 局部剖视

(b) Partial dissection

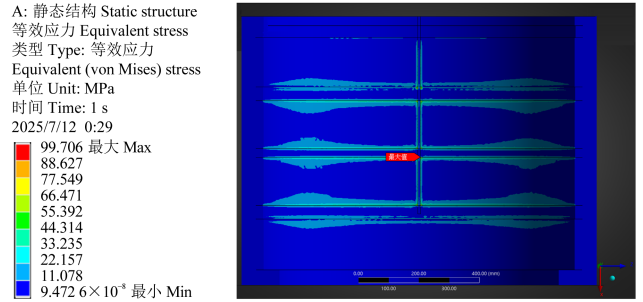
图9 开槽尺寸为 5 mm×10 mm 时的局部应力分布

Fig. 9 Local stress distribution when the slotting size is 5 mm×10 mm

值得注意的是,局部应力集中可能引发两方面长期效应:①在交变载荷作用下,应力集中区域可能成为疲劳裂纹的优先萌生位置;②高温环境会加速应力集中区域的蠕变损伤累积。为降低这些风险,可采用变曲率过渡设计重构开槽边缘几何形貌、在开槽表面实施微喷丸强化处理、优化传感器模块嵌入式安装方式等措施来缓解局部应力集中。

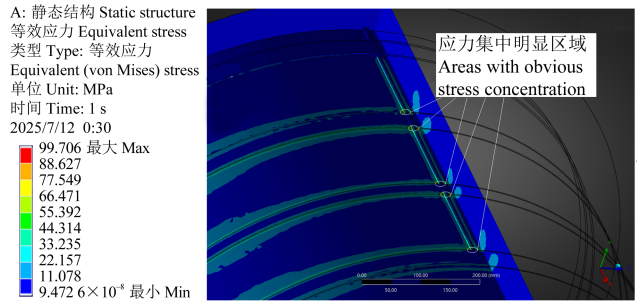
此外,以开槽尺寸为 10 mm×5 mm 的智能轴承结构为例,本研究采用多尺度网格划分方法,系统考察了不同局部网格密度对有限元计算结果的影响。如表 4 所示,通过对比 0.3、0.5、0.8 mm 这 3 种典型网格尺寸的仿真结果,发现当网格尺寸细化至 0.5 mm 时,最大等效应力值趋于稳定 $[(99.71 \pm 0.45) \text{ MPa}]$,继续减小网格尺寸至 0.3 mm 时应力变化率小于 1%,表明计算结果已达到收敛要求。3 种开槽尺寸几何模型的有限元最大应力均发生在轴承座上,各开槽尺寸与轴承座材料的屈服极限强度对比结果如表 5 所示。

通过有限元分析,对轧机智能轴承结构进行了全面的强度校核,结果表明,该系统在 2 200 t 最大轧制力工况下完全满足使用要求。由表 5 可知,在 2 200 t 的极限轧制力下,开槽尺寸为 10 mm×5 mm 时开槽处最大应力为 99.71 MPa,远小于材料的屈服极限和强度极



(a) 整体分布

(a) Overall distribution



(b) 局部剖视

(b) Partial dissection

图 10 开槽尺寸为 10 mm×5 mm 时的局部应力分布

Fig. 10 Local stress distribution when the slotting size is 10 mm×5 mm

表 4 不同网格密度下的最大应力

Tab. 4 Maximum stress under different grid densities

网格密度 Grid density/mm	最大应力 Maximum stress/MPa
0.3	98.92
0.5	99.71
0.8	101.21

表 5 不同开槽尺寸的最大应力

Tab. 5 Maximum stress of different slotting sizes

开槽尺寸 Slotting size/(mm×mm)	最大应力 Maximum stress/MPa
5×5	74.13
5×10	87.59
10×5	99.71

限。最大变形为 0.02 mm,材料延伸率也完全满足标准要求。应力集中主要出现在开槽与挡圈配合处,但所有应力值均处于弹性范围内,不会产生塑性变形。

3 寿命计算

由于轧机轴承的受载不恒定,轧制过程中的轴承主要是受到金属塑性变形时产生的轧制压力,当轧辊未轧制时,轴承只受到轧辊自身的重力。本节主要计算轧机智能轴承在轧制时的理论寿命,并与未开槽和开槽时的理论寿命进行对比。

在法向载荷 Q 作用下,滚子与滚道线接触的寿命 L_{10} 计算式为

$$L_{10} = \left(\frac{Q_c}{Q_e}\right)^4 \quad (1)$$

式中, L_{10} 为轴承的疲劳寿命; Q_c 为滚道额定接触动载荷; Q_e 为当量滚动体载荷。

考虑到滚子边缘受载以及偏心载荷所引起的应力集中现象,引入系数 γ ,则滚道额定动载荷的计算式为

$$Q_c = 552\lambda \frac{(1 \mp \gamma)^{\frac{29}{27}}}{(1 \pm \gamma)^{\frac{1}{4}}} \left(\frac{\gamma}{\cos \alpha}\right)^{\frac{2}{9}} D^{\frac{29}{27}} l^{\frac{7}{9}} Z^{-\frac{1}{4}} \quad (2)$$

其中,符号“-”用于内滚道接触,可求得内滚道额定动载荷 Q_{ci} ,符号“+”用于外滚道接触,可求得外滚道额定动载荷 Q_{co} 。对于线接触, λ 随滚子引导方式而变化,根据相关试验, λ 通常取值为 0.6~0.8,其中 $\gamma = D \cos \alpha / d_m$ 。 D 为滚动体直径; l 为滚动体有限接触长度; Z 为滚动体数量; α 为接触角; d_m 为公称直径。

对于线接触滚道,内滚道当量滚动体载荷计算式为

$$Q_{ci} = \left(\frac{1}{Z} \sum_{j=1}^Z Q_j^4\right)^{\frac{1}{4}} = \left(\frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} Q_\varphi^4 d\varphi\right)^{\frac{1}{4}} \quad (3)$$

式中, Q_j 为第 j 个滚子所受到的载荷; Q_φ 为在角度 φ 处的滚子所受到的载荷。

同理,外滚道当量载荷、外滚道疲劳寿命、线接触

滚子轴承寿命可依次求出。

由于靠近轧辊的一列轴承承受的载荷最大,其变形和应力也最为显著,因此疲劳寿命计算主要针对该列轴承进行。根据有限元分析结果计算滚子载荷分布,并代入寿命计算式后得出:未开槽轴承的理论寿命约为 3.67×10^6 ,而 3 种开槽尺寸轴承的理论寿命分别为 3.63×10^6 、 3.58×10^6 、 3.55×10^6 。对比结果表明,开槽设计对轴承的理论寿命影响较小,本文设计的智能轴承结构在疲劳寿命方面与未开槽轴承结构基本保持一致。

为了更好地评估智能轴承结构的健康状态,便于后续的维护检修,基于机械失效机制的先验知识,可划分为 4 个健康状态等级:健康、良好、轻微故障和严重故障。各阶段的划分依据可靠度与健康指标值进行判定,具体标准如表 6 所示。通过结合可靠度健康指标与健康状态等级划分,可准确掌握轴承的健康状态演变过程。当轴承进入良好状态阶段时,其性能开始出现退化趋势,此时应开展剩余寿命预测等预防性工作;当轴承进入轻微故障状态时,需密切监测其运行状态,并制定相应的维护管理决策,以防止故障进一步恶化;一旦轴承进入严重故障状态,则应立即停机进行故障检查,避免引发重大事故。

表 6 健康状态等级划分

Tab. 6 Classification of health status grades

状态 Status	可靠度 Reliability	状态描述 State description
健康 Health	(0.7, 1]	各项工作指标均在正常范围内 All work indicators are within the normal range
良好 Good	(0.5, 0.7]	各项工作性能开始衰退 Performance of all kinds of work began to decline
轻微故障 Minor fault	(0.3, 0.5]	出现轻微故障,注意维护 In case of minor faults, pay attention to maintenance
严重故障 Serious fault	(0, 0.3]	工作指标异常,出现严重故障 Work indicators are abnormal and serious faults have occurred

4 结论

以冷轧机支撑辊四列圆柱滚子轴承为研究对象,提出了一种基于嵌入式多源微传感器的轧机智能轴承结构设计方法,分析了其力学性能并进行了强度校核,最后进行了寿命计算并给出了健康状态的划分准则,主要结论如下:

1)设计了一种集成于轴承内部的多源微传感器,通过有限元分析验证了其结构合理性,证明该智能轴承在极限轧制力工况下完全满足使用要求。

2)当开槽尺寸为 $10 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$ 时,开槽部位最大应力为 99.71 MPa ,显著低于材料的屈服极限和强度极限,同时最大变形控制在 1 mm 以内,材料延伸率符

合标准规范。

3)未开槽轴承的理论寿命为 3.67×10^6 ,3 种开槽尺寸轴承的理论寿命分别为 3.63×10^6 、 3.58×10^6 、 3.55×10^6 ,证实了开槽设计对轴承疲劳寿命影响微小,智能轴承结构在寿命、性能方面与传统轴承保持基本一致。

本研究还未充分考虑极端工况下热-力-流多物理场的耦合作用对智能轴承性能的影响,未来将通过多场耦合建模和台架试验进行深入验证。此外,开发基于数字孪生的动态可靠性评估系统以实现智能轴承在全寿命周期内的状态精准预测与自适应优化已成为未来的研究热点。

参考文献(References)

- [1] 彭艳,石宝东,刘才溢,等. 板带轧制装备-工艺-产品质量综合控制融合发展综述[J]. 机械工程学报, 2023, 59(20):96-118.
PENG Yan, SHI Baodong, LIU Caiyi, et al. Review of the integrated development of strip rolling equipment-process-product quality control [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2023, 59 (20):96-118. (In Chinese)
- [2] LIN S L, SUN J L, MA C, et al. A novel dynamic modeling method of defective four-row roller bearings considering the spatial contact correlation between the roller and defect zone [J]. Mechanism and Machine Theory, 2023, 180: 105138.
- [3] 计江,赵琛,王勇勤. 基于VMD-MMPE的轧机轴承滚动体与保持架故障诊断[J]. 振动、测试与诊断, 2023, 43(2):290-297, 409.
JI Jiang, ZHAO Chen, WANG Yongqin. Failure-diagnosis approaches of VMD-MMPE-based rolling elements and cages in rolling-mill bearings [J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2023, 43(2):290-297, 409. (In Chinese)
- [4] 朱永生,张盼,袁倩倩,等. 智能轴承关键技术及发展趋势[J]. 振动、测试与诊断, 2019, 39(3):455-462.
ZHU Yongsheng, ZHANG Pan, YUAN Qianqian, et al. Key technologies and development trend of smart bearing [J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2019, 39 (3) : 455-462. (In Chinese)
- [5] 韩清凯,赵宇来,马树军,等. 感知微系统内嵌式智能轴承关键技术与应用展望[J/OL]. 东北大学学报(自然科学版), 2025: 1-14 (2025-06-24). <https://link.cnki.net/urlid/21.1344.T.20250623.1513.020>.
HAN Qingkai, ZHAO Yulai, MA Shujun, et al. Key technologies and future applications of smart bearing embedded perception microsystems [J/OL]. Journal of Northeastern University (Natural Science), 2025: 1-14 (2025-06-24). (In Chinese) <https://link.cnki.net/urlid/21.1344.T.20250623.1513.020>.
- [6] 蒋兴奇,黄志强. NSK第三代轮毂轴承的开发[J]. 轴承, 2005 (4):46-49.
JIANG Xingqi, HUANG Zhiqiang. Development of NSK third generation hub unit bearings [J]. Bearing, 2005 (4) : 46-49. (In Chinese)
- [7] 杨晓蔚. 滚动轴承产品技术发展的现状与方向[J]. 轴承, 2020 (8):65-70.
YANG Xiaowei. Current situation and direction for technology development of rolling bearing products [J]. Bearing, 2020 (8) : 65-70. (In Chinese)
- [8] GAO R X, JIN Y C, WARRINGTON R O. Microcomputer-based real-time bearing monitor [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 1994, 43(2):216-219.
- [9] 斯凯孚(中国)销售公司. 一种全新的轴承状态监测技术:斯凯孚洞悉(SKF Insight™)[J]. 设备管理与维修, 2013(11): 71.
SKF (China) Sales Company. A brand-new bearing condition monitoring technology: SKF Insight™ [J]. Plant Maintenance Engineering, 2013(11):71.
- [10] SHAO Y M, GE L, FANG J P. Fault diagnosis system based on smart bearing [C]//2008 International Conference on Control, Automation and Systems. New York: IEEE, 2008: 1084-1089.
- [11] 邵毅敏,涂文兵,周晓君,等. 基于嵌入式多参量传感器的智能轴承[J]. 中国机械工程, 2010, 21(21):2527-2531.
SHAO Yimin, TU Wenbing, ZHOU Xiaojun, et al. Smart bearing based on embedded multi-parameter sensors [J]. China Mechanical Engineering, 2010, 21(21):2527-2531. (In Chinese)
- [12] 陈景伟. 集成传感器的高速滚动轴承状态监测装置研制[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2010: 12-15.
CHEN Jingwei. Development of a condition monitoring device for high-speed rolling bearings with integrated sensors [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2010: 12-15. (In Chinese)
- [13] 沈绍伟. 滚动轴承集成微传感器的设计分析及实验研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2012:20-25.
SHEN Shaowei. Design analysis and experimental research of rolling bearings integrated with microsensor [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2012:20-25. (In Chinese)
- [14] 张文远,陈金海,花国然,等. 嵌入式智能轴承结构分析与振动监测系统的设计[J]. 机械强度, 2022, 44(6):1293-1299.
ZHANG Wenyuan, CHEN Jinhai, HUA Guoran, et al. Research on embedded smart bearing structure analysis and vibration monitoring system design [J]. Journal of Mechanical Strength, 2022, 44(6):1293-1299. (In Chinese)
- [15] 肖嘉伟,张艺超,陈市,等. 嵌入式智能轴承信息感知测点优化方法[J]. 轴承, 2023(2):12-18.
XIAO Jiawei, ZHANG Yichao, CHEN Shi, et al. Optimization method for information sensing measuring points of embedded smart bearing [J]. Bearing, 2023(2):12-18. (In Chinese)
- [16] 崔宝珍,王浩楠,彭智慧,等. 智能轴承自供电结构设计及仿真分析[J]. 轴承, 2023(1):17-22.
CUI Baozhen, WANG Haonan, PENG Zhihui, et al. Design and simulation analysis of self-power supply structure of intelligent bearings [J]. Bearing, 2023(1):17-22. (In Chinese)
- [17] 白可,和东平,孙亚波,等. 调整轧机轴承座与机架间隙的智能衬板研究[J]. 重型机械, 2024(3):61-69.
BAI Ke, HE Dongping, SUN Yabo, et al. Research on intelligent liner for adjusting the gap between bearing block and frame of rolling mill [J]. Heavy Machinery, 2024(3):61-69. (In Chinese)
- [18] 郭鑫. 基于温度监测的板带轧机智能滚动轴承设计研究[D]. 秦皇岛:燕山大学, 2023:41-53.
GUO Xin. Research on design of intelligent rolling bearing for strip mill based temperature monitoring [D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2023:41-53. (In Chinese)
- [19] 陈金海,李伟,张文远,等. 智能滚动轴承监测方法与技术研究现状综述[J]. 机械强度, 2021, 43(3):509-516.
CHEN Jinhai, LI Wei, ZHANG Wenyuan, et al. Research status of smart rolling bearing monitoring methods [J]. Journal of Mechanical Strength, 2021, 43(3):509-516. (In Chinese)

Design and mechanical performance analysis of intelligent bearings for rolling mills embedded with multi-source microsensors

LIN Shuilin^{1,2} HU Bowen^{1,2} XING Jiankang^{1,2} ZHOU Meihua³ SUN Jianliang^{1,2} PENG Yan^{1,2,4}

(1. School of Mechanical Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China)

(2. National Engineering Research Center for Equipment and Technology of Cold Strip Rolling, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China)

[3. Beizhou (Luoyang) Technology Co., Ltd., Luoyang 471000, China]

(4. State Key Laboratory of Crane Technology, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China)

Abstract: Aiming at the limitations of current monitoring methods in the accuracy of early fault diagnosis for rolling mill bearings, a structural design method for intelligent rolling mill bearings based on embedded multi-source microsensors was proposed. A multi-source microsensor module integrating temperature and acceleration signals was developed, and an optimized layout structure of axial sensing leads in the bearing housing was designed, breaking through the bottleneck of sensor integration under the space constraints of traditional bearings. A mechanical performance evaluation system for the slotted structure was established, and the reliability of the intelligent structure was verified through strength check and service life calculation. The results showed that when the slotted area was 10 mm×5 mm, the maximum equivalent stress was 99.71 MPa, which had sufficient safety margin compared with the material yield limit; the maximum overall deformation of the structure was only 0.24 mm, and the local deformation was less than 0.02 mm, with the theoretical service life consistent with that of conventional bearings. The optimized intelligent bearing ensured monitoring functionality while meeting industrial application requirements in terms of structural strength and service life. The research results not only provide a high-precision monitoring method for early fault diagnosis of rolling mill bearings under extreme working conditions but also achieve an integrated "monitoring-structure" process through embedded design. Its strength check standards and service life evaluation methods can directly guide the transformation and upgrading of intelligent bearings in industrial sites, holding significant engineering value for improving the operation and maintenance efficiency of rolling production lines.

Key words: Intelligent bearings for rolling mill; Structural design; Embedded sensing; Finite element calculation; Mechanical property

Corresponding author: LIN Shuilin, E-mail: linshuilin@ysu.edu.cn

Fund: National Key Research and Development Program (2024YFE0114600); National Natural Science Foundation of China (52475409); Natural Science Foundation of Hebei Province (E2025203126); Scientific Research Project of Hebei Provincial Department of Education (ZD2022044)

Received: 2025-07-13