

DOI:10.3969/j.issn.1003-5060.2024.05.004

初始裂纹倾角对圆柱滚子轴承次表面裂纹扩展的影响

章凯羽, 么永政, 徐伟, 吴喆

(合肥工业大学 机械工程学院, 安徽 合肥 230009)

摘要:为探究次表面裂纹倾斜角度对圆柱滚子轴承应力分布及裂纹扩展的影响,文章基于断裂力学、损伤力学等理论基础,应用扩展有限元法建立圆柱滚子轴承的有限元模型,模拟滚道次表面不同倾角的初始裂纹在外力载荷下的动态扩展过程,分析讨论次表面裂纹尖端的应力随裂纹倾角的变化情况以及裂纹尖端的应力对裂纹扩展的影响。模拟结果表明:在圆柱滚子压力载荷作用下,初始倾角在 $0^\circ \sim 30.0^\circ$ 范围内的次表面裂纹扩展主要受水平方向应力 S_{11} 的影响,次表面水平裂纹两端处的扩展同步对称进行;随着初始次表面裂纹逆时针旋转后倾角的增加,裂纹扩展速率增大,裂纹左端扩展长度增长,且增幅均由快到慢并趋于稳定状态,裂纹左端扩展角度增大,裂纹右端的扩展受到抑制。次表面裂纹的扩展速率、扩展长度、扩展角度比较结果表明,水平或较小角度的次表面裂纹扩展对损伤轴承寿命的影响较小。

关键词:滚动轴承;次表面裂纹;裂纹动态扩展;应力分布;扩展有限元法

中图分类号:TH133.332

文献标志码:A

文章编号:1003-5060(2024)05-0596-10

Effect of initial crack inclination angle on subsurface crack propagation of cylindrical roller bearing

ZHANG Kaiyu, YAO Yongzheng, XU Wei, WU Zhe

(School of Mechanical Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

Abstract: In order to explore the influence of the inclination angle of the subsurface crack on the stress distribution and crack propagation of the cylindrical roller bearing, based on the theories of fracture mechanics and damage mechanics, the finite element model of the cylindrical roller bearing was established by using the extended finite element method (XFEM), and the dynamic propagation process of the initial crack with different inclination angles on the subsurface of the raceway under external load was simulated. The change of stress at the tip of the subsurface crack with crack inclination angles and the influence of stress at the tip of the crack on crack propagation were analyzed. The simulation results show that the propagation of subsurface cracks with an initial inclination angle of $0^\circ \sim 30.0^\circ$ is mainly affected by the horizontal stress (S_{11}) under the pressure load of a cylindrical roller. The propagation of subsurface horizontal cracks at both tips is synchronous and symmetrical. However, with the increase of the inclination angle of the counterclockwise rotation of the initial subsurface crack, the crack propagation rate increases, the crack propagation length at the left tip increases, and the growth rate tends to stabilize from fast to slow; the propagation angle of the left tip of the crack increases; the propagation of the right tip of the crack is inhibited. By comparing the propagation rate, propagation length, and propagation angle of subsurface cracks, it can be seen that horizontal or small-angle subsurface crack propagation has little impact on damaged bearing life.

Key words: rolling bearing; subsurface crack; dynamic crack propagation; stress distribution; extend-

收稿日期:2023-02-24;修回日期:2023-04-03

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51704090)

作者简介:章凯羽(1984—),女,江西南昌人,博士,合肥工业大学讲师,硕士生导师。

ed finite element method(XFEM)

0 引言

在机械传动领域,轴承作为支撑机械旋转运动的载体,在传递运动过程中起到不可或缺的作用。圆柱滚子轴承是最具代表性的滚子轴承,具有结构紧凑、径向承载能力大、受载变形小、摩擦系数小等优点,被广泛应用于电机、汽车、航天等各个方面^[1-3]。若轴承在运行过程中丧失其设定功能,则会导致整个旋转系统无法正常工作。据不完全统计,因轴承失效而引起的机械故障约占30%^[4-5],因此,了解轴承的失效机理是十分必要的。

对于轴承来说,轴承套圈是采用辗环技术制造的,但该技术通常会导致滚道次表层材料的力学性能变得薄弱^[6-7]。轴承在运行时,由于滚动体在内外圈滚道表面之间周期性滚动,会产生周期性的接触应力,从而导致轴承滚动接触疲劳。滚子的周期性滚动易产生疲劳损伤^[8-9],而疲劳损伤的累积会引发裂纹的萌生和扩展,根据赫兹接触理论,轴承由于滚子与滚道接触产生过大的正交切应力,导致在次表面材料的薄弱处产生初始裂纹。如果在裂纹萌生后继续使用轴承,那么在正交切应力的作用下初始裂纹会向表面扩展,最终导致表面材料剥落,这是轴承元件失效的主要原因,严重影响轴承的工作寿命。此外,轴承的表面缺陷会影响机械设备的制造精度,可能导致巨大的经济成本,因此,了解轴承次表面裂纹的扩展有助于保证轴承的工作可靠性^[10-15]。

为了延长轴承的服役寿命,国内外学者对轴承次表面裂纹的扩展开展了大量的研究工作。文献^[16]将损伤力学引入有限元方法中,对轴承内部裂纹的萌生、扩展、相交进行了仿真,并计算了裂纹在扩展时释放的能量;文献^[17]基于连续损伤力学建立模型,研究了静态接触、滚动接触、起始损伤引发的几种不同的散裂模式,模拟了导致表面剥落的疲劳裂纹的萌生和扩展,发现疲劳裂纹首先萌生于次表面,当平行于表面并扩展到一定长度后,才会向表面延伸;文献^[18]通过将损伤力学与线性弹塑性有限元模型结合,分析了圆柱滚子轴承次表面裂纹的萌生及扩展规律,结果表明裂纹尖端的塑性应变累积导致的疲劳损伤驱动了裂纹扩展;文献^[19]采用线性有限元模型揭示了球轴承次表面裂纹的扩展规律,随着裂纹长度

与裂纹深度之比的增加,次表面裂纹向其表面扩展的趋势变得更强;文献^[20]建立了圆柱滚子轴承次表面含倾斜裂纹的等效接触模型,讨论了裂纹的倾斜角度对应力分布范围的影响规律,随着次表面裂纹的倾斜角度逐渐增大,裂纹所在的应力区域的宽度和深度随之减小。以上工作主要研究了次表面裂纹的萌生、扩展以及应力分布,而裂纹的扩展与裂纹的萌生状态和初始裂纹形态密切相关。

二维模型中的裂纹根据角度可分为水平和倾斜两类,目前国内外关于轴承次表面裂纹的研究仅限于水平的裂纹形态,而对于含有倾斜角度的裂纹研究很少。在相同受力情况下,与水平裂纹相比,具有倾斜角的裂纹两端应力分布是不同的,导致裂纹两端的扩展情况不一致。因此,研究次表面不同初始倾斜角度的直线裂纹扩展是很有意义的。

为了探究滚动轴承内部初始次表面裂纹倾斜角度对裂纹扩展规律的影响,本文以圆柱滚子轴承为原型建立有限元模型,在轴承内滚道次表面设置了不同倾角的初始裂纹,模拟轴承的受压工况;运用扩展有限元法(extended finite element method, XFEM)中的牵引分离准则和断裂力学、损伤力学等知识模拟不同倾角的初始裂纹的扩展规律,探查轴承滚道应力分布与裂纹扩展的相互作用关系,并分析裂纹扩展对轴承工作寿命产生的影响,为提高轴承寿命的预测提供参考。

1 仿真模型的建立

1.1 圆柱滚子轴承物理模型

以圆柱滚子轴承 N306 为研究对象,该轴承模型如图 1 所示,由轴承内圈、轴承外圈、保持架和滚动体组成。

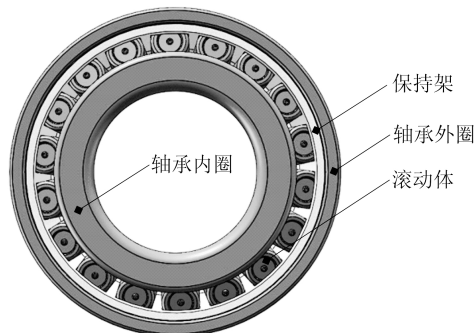


图1 圆柱滚子轴承物理模型

圆柱滚子轴承的几何参数见表 1 所列^[20]。

表 1 圆柱滚子轴承 N306 的几何参数 单位:mm

参数	数值
内滚道直径	40.50
外滚道直径	62.50
节圆直径	51.50
滚子直径	11.00
滚子有效接触长度	11.40
内套圈厚度	5.25
外套圈厚度	4.75

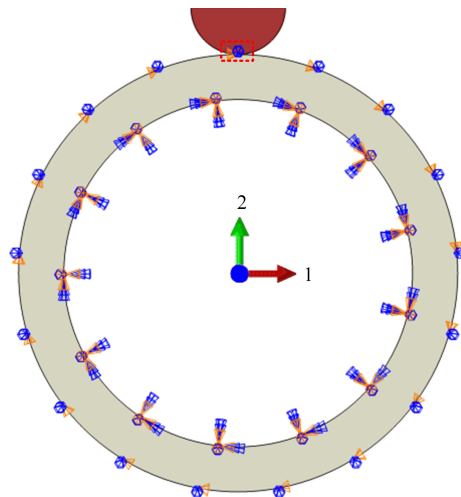
各部件材料均选择 GCr15 轴承钢,材料参数^[2]见表 2 所列。

表 2 圆柱滚子轴承 N306 材料参数

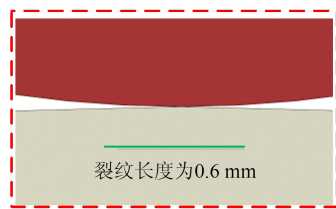
参数	密度/ (kg/m ³)	弹性模量/ GPa	泊松 比	抗拉强度/ MPa	屈服强度/ MPa
数值	7 930	210	0.3	1 617	1 459

1.2 圆柱滚子轴承有限元模型

在 ABAQUS 软件中建立有限元模型,如图 2 所示。



(a) 圆柱滚子轴承有限元模型



(b) 次表面裂纹在模型中的位置

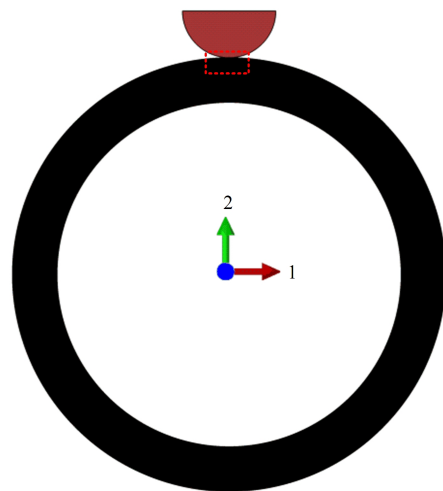
图 2 有限元模型

本文仅研究轴承内圈的裂纹扩展,将圆柱滚子设置为刚体,内圈仅与圆柱滚子保持接触,不与

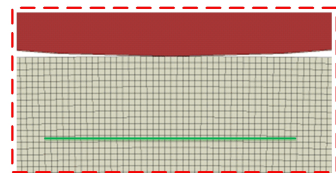
外圈和保持架有接触关系。因此,在模型中仅考虑轴承内圈和滚子,忽略轴承外圈和保持架^[20],如图 2a 所示,轴承内圈内侧上的符号表示内侧完全固定,轴承内圈外侧上的符号表示外侧约束沿切向移动的自由度和绕内圈中心转动的自由度,仅释放沿法向移动的自由度。

本文研究初始次表面裂纹倾斜角度(裂纹绕水平裂纹中心逆时针旋转的角度定义为裂纹倾斜角度)为 0°、7.5°、15.0°、22.5°、30.0°时,对轴承次表面应力分布及次表面裂纹扩展规律的影响。水平次表面裂纹所在位置(绿线表示初始次表面裂纹)如图 2b 所示,次表面裂纹长度为 0.6 mm,次表面裂纹中心距离圆柱滚子表面 0.2 mm^[20]。通过圆柱滚子中心施加竖直向下 5 000 N 的外力载荷。

在进行次表面裂纹扩展过程计算时,有限元模型的网格划分对计算结果有重要影响。有限元模型网格划分如图 3 所示。



(a) 圆柱滚子轴承有限元模型网格划分



(b) 次表面裂纹周围区域的网格划分

图 3 有限元模型网格划分

本文采用 ABAQUS 中四节点双线性平面应力四边形单元,整个模型共有 321 784 个四边形控制单元。圆柱滚子设为刚体,不需要划分网格,仅需要对轴承进行网格划分,如图 3a 所示。次表面裂纹周围的区域是应力集中位置,对初始次表面裂纹附近的网格进行细化处理,如图 3b 所示,

初始次表面裂纹附近的网格尺寸为 0.018 mm, 其余位置的网格尺寸为 0.050 mm。

2 裂纹扩展技术

2.1 XFEM 方法

传统有限元方法对不连续力学问题(如裂纹)进行建模时,要求网格符合几何不连续性,单元界面必须与不连续界面(裂纹面)重合,裂纹尖端与单元节点重合,而且由于裂纹尖端局部区域存在应力奇异性,必须对裂尖处的网格进行加密。若建模一个不断扩展的裂纹,网格划分则更加繁琐,这是由于随着裂纹的扩展,网格必须不断更新以匹配不连续的几何结构。

1999 年,扩展有限元法 XFEM 被首次提出^[21]。与传统有限元法的主要区别在于,扩展有限元法 XFEM 在单位分解法的基础上增加了富集函数来对不连续位移进行具体描述,从而实现了裂纹与网格独立存在,在模拟裂纹扩展时无需重新划分网格且不需要定义裂纹扩展路径,能方便地分析不连续问题,克服了传统有限元精度较差和收敛速度较低的缺点。

为了详细说明如何将富集函数与有限元方法相结合,考虑了具有强不连续性的简单区域(裂纹)的情况,结果如图 4a 所示,富集区域如图 4b 所示。

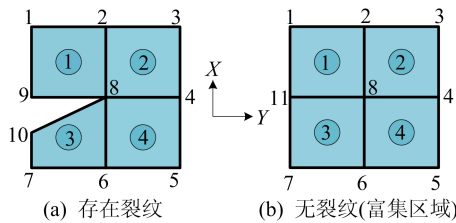


图 4 有限元网格

对于图 4a 中的网格,求解域上的近似位移场表示为:

$$u = \sum_{i=1}^{10} N_i u_i \quad (1)$$

其中: N_i 为有限元方法中的插值形函数; u_i 为单元节点位移。在节点 9 和节点 10 处定义参数 a_1 、 a_2 为:

$$a_1 = \frac{u_9 + u_{10}}{2}, a_2 = \frac{u_9 - u_{10}}{2} \quad (2)$$

可得:

$$u_9 = a_1 + a_2, u_{10} = a_1 - a_2 \quad (3)$$

将式(3)中的 u_9 和 u_{10} 代入式(1),可以推

导出:

$$u = \sum_{i=1}^8 N_i u_i +$$

$$a_1(N_9 + N_{10}) + a_2(N_9 - N_{10})H(x) \quad (4)$$

其中, $H(x)$ 为:

$$H(x) = \begin{cases} -1, & y \leq 0; \\ 1, & y > 0 \end{cases} \quad (5)$$

然而,对于图 4b 中的网格, N_9 和 N_{10} 可以替代为 N_{11} , a_1 可以替代为 u_{11} , 可得:

$$u = \sum_{i=1}^8 N_i u_i + u_{11} N_{11} + a_2 N_{11} H(x) \quad (6)$$

式(6)中最后一项代表强不连续性,不连续富集函数适用于所有被裂纹贯穿的单元节点,可以推广为:

$$u^e = \sum_{j \in \Omega_d} a_j N_j H(x) \quad (7)$$

其中: u^e 为被裂纹贯穿部分的富集函数; Ω_d 为被裂纹贯穿的单元节点的集合。

同样,还可以在裂纹尖端添加富集函数,裂纹区域的最终近似位移场计算公式为:

$$u = \sum_{i \in \Omega} N_i u_i + \sum_{j \in \Omega_d} a_j N_j H(x) + \sum_{i \in \Omega_c} N_i \sum_{j=1}^4 b_j^i F_j(x) \quad (8)$$

其中: $F_j(x)$ 为裂纹尖端富集函数,仅适用于裂尖嵌入单元节点; Ω_c 为裂尖嵌入单元节点的集合; b_j^i 为与裂纹尖端富集函数相对应的附加自由度; Ω 为所有单元节点的集合。

包含任意形状裂纹的计算网格中的富集节点如图 5 所示。

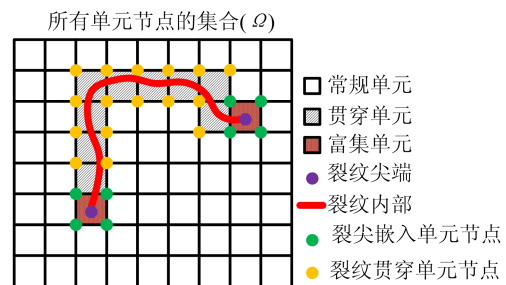


图 5 包含任意形状裂纹的计算网格中的富集节点

为了模拟裂纹扩展,使用了由 Hanbso 等首先引入^[22]并由 Song 等开发的虚拟节点^[23]。虚拟节点叠加在网格划分步骤中获得的原始节点上,并用于强不连续性表示,这些节点与裂纹出现之前的原始节点重合。当裂纹萌生时,一个单元被分成 2 个部分,每一部分代表一个新单元,包含

原始节点和虚拟节点的组合。在单元因裂缝存在而分裂后,裂缝周围的虚拟节点和原始节点将不再重合,可以独立移动。原始节点和虚拟节点之间的距离取决于材料的断裂韧性。当达到损伤规定的应力或应变值时,裂纹将开始扩展。

2.2 损伤演化准则

本文采用 XFEM 方法框架中基于牵引分离的黏性行为定义损伤模型,用于模拟裂纹的动态扩展过程。该方法可以用于模拟界面次表面裂纹、层间次表面裂纹或同时模拟两者。失效机理包括损伤初始准则和损伤演化定律两部分。损伤初始准则共有 6 种,可以为损伤萌生设置不同的参数。

本文采用最大主应力准则用于预测损伤起始,描述如下:

$$\frac{\langle \sigma_{\max} \rangle}{\sigma_{\max}^c} = 1 \quad (9)$$

其中: σ_{\max} 为最大主应力; σ_{\max}^c 为最大允许主应力;麦考利括号 $\langle \rangle$ 用于表示纯压应力状态下不会引起损伤,当比值达到 1 时,裂纹萌生并扩展。

裂纹萌生后,损伤演化开始。裂纹两侧的刚度 K 开始退化为:

$$(1 - D)K,$$

其中: K 由 T_x/δ_x 给出, T_x 为牵引力, δ_x 为损伤起始的分离值; D 为根据指数或线性演化计算的损伤参数,即

$$D = \frac{\delta_z(\delta_y - \delta)}{\delta_y(\delta_z - \delta)} \quad (10)$$

其中, δ_z 为完全损伤时的分离值, δ_z 取决于断裂韧性 K_{Ic} 。

若载荷在断裂起始点之前释放,则刚度将恢复到其原始值;若在断裂起始点之后释放,则意味着刚度将降低 $(1 - D)$,当 $D = 0$ 时损伤开始,当 $D = 1$ 时损伤结束。

2.3 断裂参数

由于轴承内圈具有弹性,应该以脆性方式失效,几乎不会屈服,可以选择抗拉强度作为损伤萌生的最大主应力。因此,轴承内圈的最大主应力临界值设置为 1 617 MPa。

ABAQUS 给出了基于位移和能量的 2 种损伤演化形式,本文采用后者,指定断裂能参数来判断单元失效模式。

断裂能是指裂纹扩展单位面积所需要的能量,与断裂韧性的关系如下:

$$G = K_{Ic}^2/E \quad (11)$$

本文中取 GCr15 轴承钢的断裂韧性 K_{Ic} 的值^[24]为 42.8 MPa·m^{0.5},可以计算出模拟需要的断裂能参数为 8.732 kJ/m²。

3 模拟结果分析

3.1 滚道次表面无裂纹时的应力分布

在实际使用条件下,圆柱滚子轴承会承受较大的外力载荷冲击。轴承内圈滚道次表面的应力分布情况可以为预测次表面裂纹形核和扩展提供直观依据。正应力 S_{11} 和 S_{22} 都直接影响次表面裂纹的扩展,本文将重点分析这 2 种应力类型。滚道次表面无裂纹时的正应力分布情况如图 6 所示。

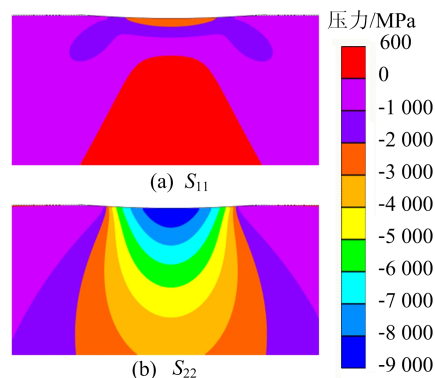


图 6 滚道次表面无裂纹时的应力分布云图

从图 6 可以看出,滚道次表面下方在 S_{11} 方向上处于拉伸状态,滚道次表面及周围在 S_{22} 方向上处于特别显著的压缩状态。次表面裂纹的扩展主要受拉伸应力的作用,这表明正应力 S_{11} 对于滚道次表面的裂纹萌生和扩展起主导作用。

3.2 次表面裂纹扩展过程

轴承次表面裂纹的扩展和合并是导致轴承失效的主要原因。由图 6 可知,裂纹的扩展主要由正应力 S_{11} 决定的,因此研究次表面裂纹扩展前和扩展后裂纹尖端及周围的正应力 S_{11} 的变化至关重要。

滚道次表面不同倾角的初始裂纹扩展前和扩展后的正应力 S_{11} 分布云图如图 7 所示。按标注的时间顺序,水平裂纹即将扩展前、左(右)端扩展初期(裂纹扩展长度比较小时定义为裂纹扩展初期)、扩展 1.00 s 的正应力 S_{11} 分布云图如图 7a 所示,初始倾角为 7.5° 的裂纹左端即将扩展前、左端扩展初期、右端即将扩展前、右端扩展初期、扩展 1.00 s 的正应力 S_{11} 分布云图如图 7b 所示;初始倾角为 15.0°、22.5°、30.0° 的裂纹左端即将

扩展前、左端扩展初期、扩展 1.00 s 的正应力 S_{11} 分布云图如图 7c~图 7e 所示。

始裂纹端点的 S_{11} 应力值;次表面裂纹下方的黑色数字是裂纹扩展后新产生的裂纹尖端的 S_{11} 应力值。

图 7 中:次表面裂纹上方的黑色数字是初

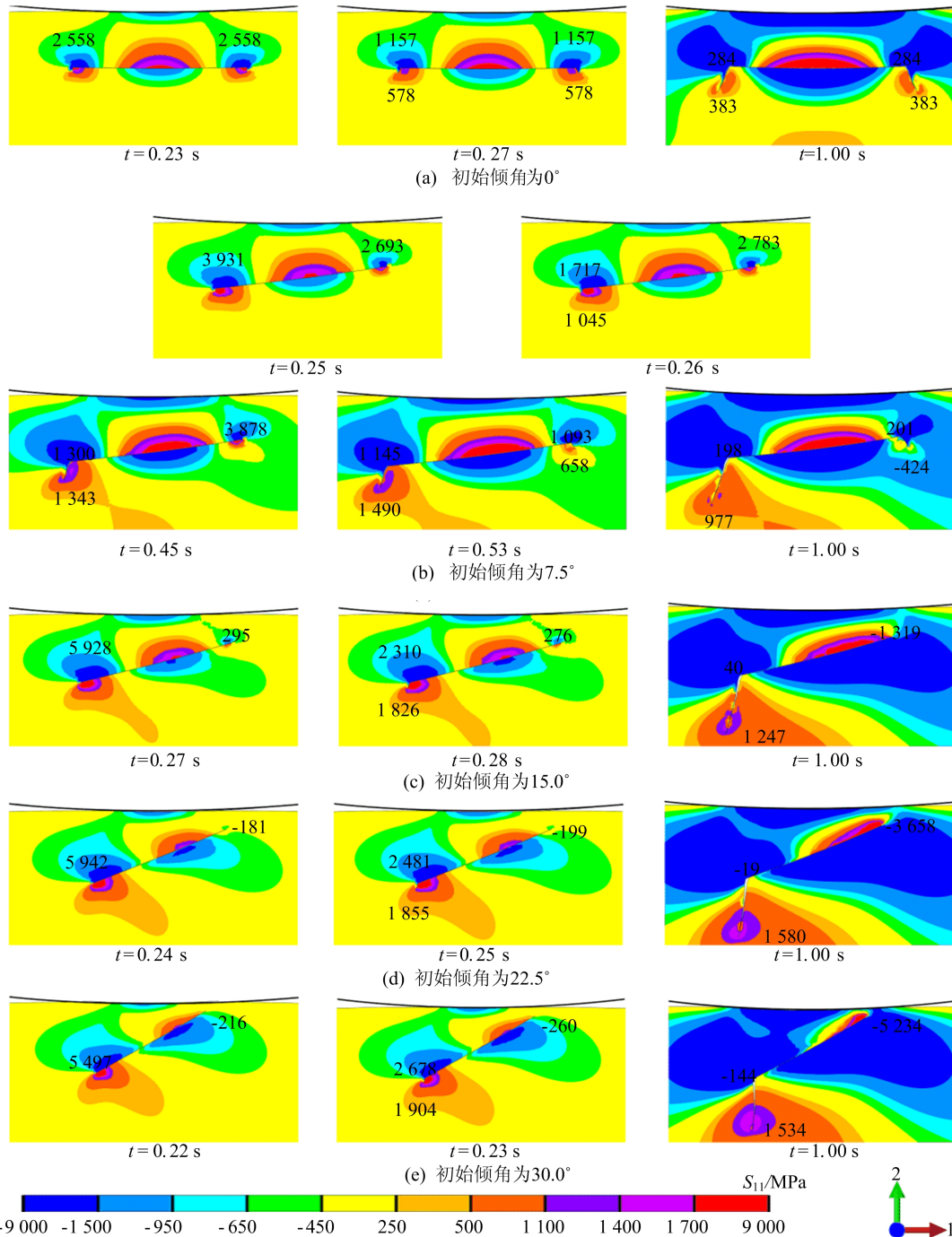


图 7 滚道次表面不同初始倾角的裂纹扩展前和扩展后的正应力 S_{11} 分布云图

对比图 6 与图 7 可以发现,滚道次表面无裂纹时的正应力 S_{11} 分布比较均匀,而在初始裂纹扩展前,裂纹的存在会增加裂纹尖端及其附近位置的应力,导致轴承次表面局部出现应力集中。

从图 7a 可以看出:在水平次表面裂纹即将扩

展前,左、右尖端均存在巨大的应力集中,裂纹尖端处的应力值均为 2 558 MPa($t=0.23$ s),裂纹即将发生扩展;随着次表面裂纹周围的应力尤其是次表面裂纹尖端的应力继续增加,这将导致次表面裂纹尖端的扩展(水平次表面裂纹两端的扩

展是同步进行的);在裂纹扩展初期,初始裂纹尖端应力值减小为 1 157 MPa($t=0.27$ s),这表明次表面裂纹的扩展会使得原来次表面裂纹尖端应力集中现象消失且小范围局部应力大幅度降低;应力集中现象会持续出现在新生成的次表面裂纹尖端,促使次表面裂纹继续扩展,新产生的次表面裂纹尖端处应力值为 578 MPa($t=0.27$ s),但是次表面裂纹扩展 1.00 s 后的尖端处应力值减小为 383 MPa。这是由于次表面裂纹在扩展过程中,次表面裂纹表面逐渐张开,进一步释放了次表面裂纹周围的局部应力。由图 7a 可知,扩展后的次表面裂纹会明显地改变次表面裂纹周围的应力大小和分布,靠近次表面裂纹两侧大部分区域的 S_{11} 应力明显比次表面裂纹即将扩展前相同位置的 S_{11} 应力要小。

具有倾斜角的初始次表面裂纹扩展前和扩展后的正应力 S_{11} 分布云图如图 7b~图 7e 所示。通过与图 7a 比较可知,具有倾斜角的次表面裂纹扩展同样会降低次表面裂纹附近的 S_{11} 应力。不同的是,次表面裂纹左端扩展前和扩展后的水平方向拉应力值均更大,说明次表面裂纹左侧的扩

展更加剧烈。这是由于具有倾斜角的裂纹与水平裂纹相比,裂纹左半部分与外力载荷(载荷方向竖直向下)的夹角由直角转变为锐角,使得裂纹左端受到更大的水平方向拉应力影响,促进裂纹左端更剧烈的扩展。

当次表面裂纹具有倾斜角度之后,次表面裂纹两端不会再同步扩展,初始裂纹倾角为 7.5° 时(图 7b),次表面裂纹右端仅有小幅度的扩展;当次表面裂纹倾角在 $15.0^\circ\sim 30.0^\circ$ 的范围内(图 7c~图 7e),次表面裂纹右端不再发生扩展。这是由于次表面裂纹存在倾角后,裂纹右半部分与外力载荷的夹角为钝角,使得裂纹右端主要受到水平方向压应力的影响,抑制了裂纹右端的扩展。另外,初始裂纹倾角从 0° 增加到 30.0° 的过程中,观察裂纹即将扩展前这一时刻,裂纹右端水平方向的拉应力先逐渐减小,然后转化为压应力,表明裂纹右端扩展的抑制程度逐渐变强。

正应力 S_{11} 会导致次表面裂纹沿竖直方向扩展,而正应力 S_{22} 会导致次表面裂纹沿水平方向扩展。不同倾角的初始裂纹扩展初期的正应力 S_{22} 分布云图如图 8 所示。

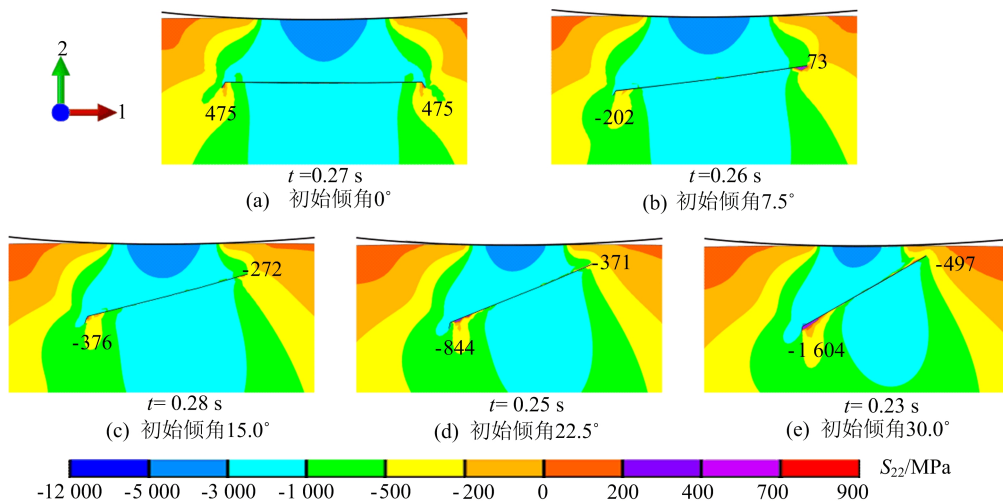


图 8 滚道次表面无不同初始倾角的裂纹扩展初期的正应力 S_{22} 分布云图

在水平次表面裂纹扩展的初期(图 8a),次表面裂纹两端的竖直方向应力值均为正值($t=0.27$ s)。当初始次表面裂纹存在倾角后,次表面裂纹两端的竖直方向应力状态由拉应力缓慢减小直至转化为压应力。一定范围内的压应力对裂纹扩展起抑制作用,因此,随着倾斜角度的增加,裂纹水平方向的扩展会受到抑制,这会改变裂纹的扩展方向,从图 8 可以看出裂纹的扩展方向逐渐偏向竖直。

对比图 7 与图 8 可以发现,同时刻下次表面

裂纹尖端处的正应力 S_{22} 远小于正应力 S_{11} 。这表明轴承次表面存在初始裂纹后,正应力 S_{11} 仍对裂纹扩展起主导作用,裂纹主要在正应力 S_{11} 的作用下沿竖直方向扩展,这与裂纹的最终扩展路径基本保持一致。

3.3 次表面裂纹扩展速率及扩展角度

初始次表面裂纹倾角与次表面裂纹扩展速率之间的关系如图 9 所示。

由图 9 可知:初始次表面裂纹为水平次表面裂纹时次表面裂纹扩展速率最低,为 0.20 mm/s;

随着次表面裂纹倾角从 0°增加到 7.5°,次表面裂纹扩展速率快速增加至 0.24 mm/s,次表面裂纹扩展速率增加幅度为 0.005 30 mm/[s·(°)];次表面裂纹倾角从 7.5°增加到 22.5°的过程中,次表面裂纹扩展速率缓慢增加至 0.26 mm/s,裂纹扩展速率增加幅度为 0.002 65 mm/[s·(°)],比之前减小了 1 倍;当次表面裂纹倾角大于 22.5°后,次表面裂纹扩展速率保持在稳定状态。

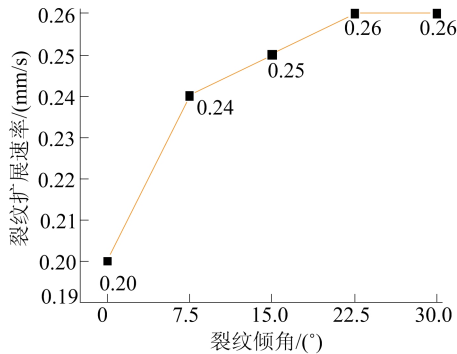


图 9 不同初始倾角的次表面裂纹扩展速率

为了深入探究这一现象,观察不同初始倾角的次表面裂纹扩展初期的正应力 S_{11} (见图 7) 可以发现:在水平次表面裂纹扩展初期,新产生的次表面裂纹尖端处的应力值为 578 MPa;当次表面裂纹初始倾角为 7.5°时,其扩展初期时的应力值为 1 400 MPa 左右,应力值增加了 822 MPa;而随着次表面裂纹倾角增加至 22.5°的过程中,扩展初期时的应力值仅增加了 400 MPa 左右,增幅减小了 1 倍;次表面裂纹倾角继续增加后,次表面裂纹尖端处的应力值的增加较小,可以忽略。这揭示了随着初始裂纹倾角的增大,次表面裂纹扩展速率增幅由快到慢并最终趋于稳定状态的规律。

不同初始倾角的次表面裂纹左端和右端扩展角度(次表面裂纹尖端扩展路径与初始次表面裂纹的夹角定义为次表面裂纹尖端扩展角度)如图 10 所示。

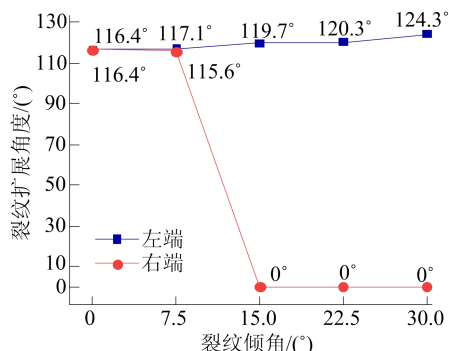


图 10 不同倾角的初始次表面裂纹左端和右端扩展角度

从图 10 可以看出:初始次表面裂纹倾斜角度越大,次表面裂纹左端扩展角度越大,同时,次表面裂纹右端的扩展角度越小;次表面裂纹倾角大于 7.5°后,次表面裂纹右端不会再发生扩展,扩展角度为 0°。

通过上述正应力 S_{11} 和 S_{22} 的比较可知,当初始次表面裂纹为水平次表面裂纹时,在次表面裂纹扩展初期,新产生的次表面裂纹尖端处的 S_{11} 应力值为 578 MPa, S_{22} 应力值为 475 MPa, S_{11} 应力会使次表面裂纹垂直方向扩展, S_{22} 应力会使次表面裂纹水平方向扩展,此时次表面裂纹两端的扩展角度均为 116.4°。

当初始次表面裂纹存在倾角后,法向 S_{22} 应力以压应力为主,对次表面裂纹扩展方向起到的作用微乎其微,而 S_{11} 应力快速增加至 1 500 MPa 并且次表面裂纹左端的应力值随着次表面裂纹倾角的增加而增加,次表面裂纹扩展方向主要受到 S_{11} 应力的影响;次表面裂纹左端偏离垂直方向的角度越来越小,次表面裂纹右端由于受到 S_{11} 压应力的影响,次表面裂纹右端的扩展角度迅速减小为 0°。

3.4 次表面裂纹扩展 1.00 s 后的尺寸及形态

不同倾角的初始次表面裂纹扩展 1.00 s 后的状态如图 11 所示。

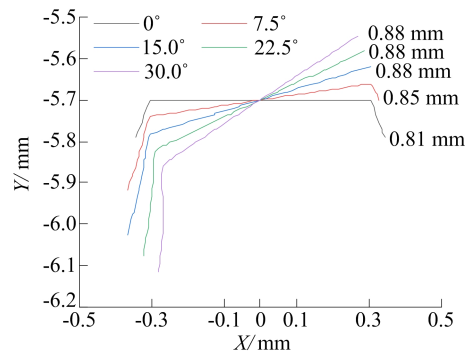


图 11 不同倾角的初始次表面裂纹扩展 1.00 s 后的尺寸和形态

从图 11 可以看出:水平次表面裂纹扩展 1.00 s 后的总长度最小,为 0.81 mm;随着次表面裂纹倾角逐渐增加到 15.0°,次表面裂纹的扩展长度随之增加;当次表面裂纹倾角大于 15.0°之后,次表面裂纹总长度逐渐稳定在 0.88 mm,另外,随着次表面裂纹倾角的增大,次表面裂纹右侧的扩展长度逐渐减小,倾斜角度大于 7.5°的初始次表面裂纹,次表面裂纹右侧不会再发生扩展,与此同时,次表面裂纹左侧的扩展长度逐渐增大。这与次表面裂纹扩展过程中 S_{11} 应力分布随倾斜角度的变化规律保持一致。

通过不同倾角的初始次表面裂纹的裂纹扩展速率、扩展角度以及扩展 1.00 s 后的尺寸及形态的比较发现,水平次表面裂纹的扩展速率最低且扩展长度最小,而且水平次表面裂纹两端是同步扩展的,与存在倾角的初始次表面裂纹相比,裂纹一端的扩展速率较小。另外,存在倾角的初始裂纹右端虽然基本不扩展,但是左端已经近乎沿竖直方向扩展,裂纹沿竖直方向扩展较容易损伤轴承,减短轴承寿命。

因此,相较于其他倾角次表面裂纹的扩展,水平以及较小角度的次表面裂纹扩展对损伤轴承寿命的影响较小。

4 结 论

本文通过建立圆柱滚子轴承有限元模型,应用 XFEM 模拟轴承中的次表面裂纹动态扩展,探究初始次表面裂纹的倾斜角度对次表面裂纹扩展规律的影响以及次表面裂纹的扩展对轴承工作寿命产生的影响并进行分析比较得到的主要结论如下。

1) 次表面裂纹的扩展主要受水平方向拉伸应力作用的影响。次表面裂纹扩展过程中,裂纹左端在 S_{11} 方向处于显著的拉伸状态;裂纹尖端在 S_{22} 方向基本上处于压缩状态;次表面裂纹尖端处的正应力 S_{22} 远小于正应力 S_{11} 。这表明正应力 S_{11} 对裂纹扩展起主导作用, S_{22} 对裂纹扩展起次要作用。

2) 在圆柱滚子压力载荷的作用下,次表面水平裂纹尖端处的扩展是同步进行的(两端同时对称扩展),而当次表面裂纹存在倾角时,次表面裂纹右端的扩展会受到抑制,由两端扩展转变成一端扩展。随着次表面裂纹倾角的增加,次表面裂纹左端扩展过程中的水平方向拉应力明显增大,导致裂纹左端的扩展程度更加剧烈。

3) 随着次表面裂纹倾角从 0° 增加到 22.5° ,裂纹扩展速率先快速增加后缓慢增加;次表面裂纹倾角继续增加至 30.0° 的过程中,裂纹扩展速率不变。初始次表面裂纹倾斜角度越大,次表面裂纹左端扩展角度越大。

4) 通过比较次表面裂纹的扩展速率、扩展角度以及扩展 1.00 s 后的尺寸及形态可以发现,相较于水平以及较小角度倾角的次表面裂纹,大倾角次表面裂纹扩展速率更快,扩展角度更大,扩展长度更长,说明大倾角次表面裂纹扩展对损伤轴承寿命的影响更大。

[参 考 文 献]

- [1] 李震,王青山,王瑞华,等. 不同预载机制和过盈量下角接触球轴承的动力学特性[J]. 航空动力学报, 2024, 39(4): 272-283.
- [2] 李旭锋,刁鑫伟,雷超钦,等. 基于 ANSYS Workbench 的圆柱滚子轴承有限元分析[J]. 中国水运(下半月), 2020, 20(3):98-99,101.
- [3] 贺瑜飞. 基于 ANSYS Workbench 圆柱滚子轴承有限元仿真[J]. 煤矿机械, 2019, 40(10):181-183.
- [4] 刘胜兰,杜剑维,余放. 滚动轴承裂纹故障仿真及验证[J]. 舰船科学技术, 2019, 41(17):100-104.
- [5] 杨凡,许克峰. 圆柱滚子轴承失效分析[J]. 哈尔滨轴承, 2020, 41(3):19-22.
- [6] HUA L, ZHONG Z Z. The extremum parameters in ring rolling[J]. Journal of Materials Processing Technology, 1995, 69(1):273-276.
- [7] HUA L, MEI X, WU X. Vibration and control in ring rolling process[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 1999, 9(2):9-13.
- [8] LI F K, HU W P, MENG Q C, et al. A new damage-mechanics-based model for rolling contact fatigue analysis of cylindrical roller bearing[J]. Tribology International, 2017, 120:105-114.
- [9] DENG S, QIN X P, HUANG S. A study on the effect of subsurface crack propagation on rolling contact fatigue in a bearing ring[J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2015, 29(3):1029-1038.
- [10] 陈威,苏建新. 基于 FRANC3D 的盾构机主轴承疲劳作用机理研究[J]. 机械传动 2022, 46(6):102-107.
- [11] ZHENG J, HU Y X. Study on crack propagation of a bearing inner-ring under cyclic loading[J]. Applied Mechanics and Materials, 2016, 851:317-321.
- [12] DENG S, HAN X H, QIN X P, et al. Subsurface crack propagation under rolling contact fatigue in bearing ring [J]. Science China Technological Sciences, 2013, 56(10): 2422-2432.
- [13] TREVOR S, FARSHID S. Explicit finite element modeling of subsurface initiated spalling in rolling contacts[J]. Tribology International, 2010, 43(9):1693-1702.
- [14] 孙海波,沈峰. 风电齿轮箱轴承内部疲劳裂纹萌生与扩展方向研究[J]. 机械传动, 2022, 46(8):33-38.
- [15] 张珂,李青松,夏卫华. 考虑预裂纹的滚动轴承疲劳寿命预测[J]. 机电工程, 2022, 39(8):1031-1040, 1070.
- [16] 谢俊杰,柳小勤,伍星,等. 滚动轴承接触疲劳内部裂纹扩展有限元分析[J]. 机械科学与技术, 2020, 39(3): 350-355.
- [17] GAZIZULIN D, KOGAN G, KLEIN R, et al. Towards a physics based prognostic model for bearing-spall initiation and propagation [C]//Aerospace Conference. [S. l.]: IEEE, 2015:1-10.
- [18] BOMIDI J A R, SADEGH F. Three-dimensional finite ele-

- ment elastic-plastic model for subsurface initiated spalling in rolling contacts[J]. *Journal of Tribology*, 2014, 136(1): 1-14.
- [19] WEN J S, JU W E, HAN T K, et al. Finite element analysis of a subsurface penny-shaped crack with crack-face contact and friction under a moving compressive load[J]. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2012, 26(9): 2719-2726.
- [20] 党晓勇, 师志峰, 刘静. 圆柱滚子轴承次表面裂纹区域应力分布规律研究[J]. *机电工程*, 2023, 40(2): 204-210, 224.
- [21] BELYTCHKO T, BLACK T. Elastic crack growth in finite elements with minimal remeshing [J]. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 1999, 45: 602-620.
- [22] HANSBO A, HANSBO P. A finite element method for the simulation of strong and weak discontinuities in solid mechanics[J]. *Computer Methods in Applied Mechanics & Engineering*, 2004, 193(33/35): 3523-3540.
- [23] SONG J, AREIAS P M A, BEIYTCHKO T. A method for dynamic crack and shear band propagation with phantom nodes[J]. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 2006, 67(6): 868-893.
- [24] 伍梓聪, 任祉达, 李蓓智. 滚动轴承微裂纹及其对轴承疲劳寿命的影响[J]. *组合机床与自动化加工技术*, 2020, 8(8): 21-24, 29.

(责任编辑 胡亚敏)

(上接第 589 页)

- [2] BIRD J J, KOBYLARZ J, FARIA D R, et al. Cross-domain MLP and CNN transfer learning for biological signal processing: EEG and EMG[J]. *IEEE Access*, 2020, 8: 54789-54801.
- [3] FUKANO K, IIAZAWA K, SOEDA T, et al. Deep learning for gesture recognition based on surface EMG data[C]// 2021 International Conference on Advanced Mechatronic Systems. [S. l. : s. n.], 2021: 41-45.
- [4] MAKUSSOV O, KRASSAVIN M, ZHABINETS M, et al. A low-cost, IMU-based real-time on device gesture recognition glove[C]// 2020 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics. [S. l.]: IEEE, 2020: 3346-3351.
- [5] ANTILLON D W O, WALKER C R, ROSSET S, et al. Glove-based hand gesture recognition for diver communication[J]. *IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems*, 2022, 34(12): 1-13.
- [6] HOU J, LI X, ZHU P, et al. SignSpeaker: a real-time, high-precision smartwatch-based sign language translator[C]// The 25th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking. [S. l. : s. n.], 2019: 1-15.
- [7] WEN H, RAMOS ROJAS J, DEY A K. Serendipity: finger gesture recognition using an off-the-shelf smartwatch[C]// Proceedings of CHI Conference on Human Factors in Computing Systems. [S. l. : s. n.], 2016: 3847-3851.
- [8] ZHENG Z, WANG Q, YANG D, et al. CG-Recognizer: a bi-signal-based continuous gesture recognition system[J]. *Biomedical Signal Processing and Control*, 2022, 21(7): 2398-2410.
- [9] DUAN F, REN X, YANG Y. A gesture recognition system based on time domain features and linear discriminant analysis[J]. *IEEE Transactions on Cognitive and Developmental Systems*, 2022, 13(1): 200-208.
- [10] SUN B, SONG B, LV J. A multi-scale feature extraction network based on channelspatial attention for electromyographic signal classification [J]. *IEEE Transactions on Cognitive and Developmental Systems*, 2022, 15(2): 591-601.
- [11] PAN T Y, TSAI W L, CHANG C Y. A hierarchical hand gesture recognition framework for sports referee training-based EMG and accelerometer sensors[J]. *IEEE Transactions on Cybernetics*, 2022, 52(5): 3172-3183.
- [12] HUANG H, ZENG Z, YAO D, et al. Spatial-temporal ConvLSTM for vehicle driving intention prediction[J]. *Tsinghua Science and Technology*, 2022, 27(3): 599-609.
- [13] 李晓林, 胡泽荣. 基于预训练模型的中文电子病历实体识别[J]. *计算机工程与设计*, 2023, 44(2): 535-540.
- [14] 中国聋人协会, 国家手语和盲文研究中心. 国家通用手语词典[M]. 北京: 华夏出版社, 2019: 5-231.

(责任编辑 胡亚敏)