

DOI:10.19344/j. cnki. issn1671-5276.2024.03.007

矿用挖掘式装载机工作机构疲劳寿命分析

何洋¹, 李晓璐²

(1. 辽宁工业大学 汽车与交通工程学院, 辽宁 锦州 121012;

2. 广东文理职业学院 机电工程系, 广东 湛江 524471)

摘要: 为了确定矿用挖掘式装载机工作机构的疲劳寿命, 分析并确定了铲斗随机挖掘阻力的计算方法, 利用 Matlab 模拟铲斗的随机挖掘阻力。采用 Pro/E 建立该机工作机构的三维模型, 将其映射到 Workbench 环境中创建其有限元模型; 将模拟的挖掘阻力数据导入 ncode 模块, 分析铲斗、小臂和大臂的应力和疲劳寿命情况。结果表明: 该机工作机构的应变量范围在 $0.313 \times 10^{-2} \sim 0.028$ m 之间, 应力范围集中在 $705 \sim 3.85 \times 10^8$ Pa; 铲斗与连杆的连接部位寿命最短, 约 7.58×10^6 次, 所得结论可为矿用挖掘式装载机的参数设计及优化提供依据。

关键词: 挖掘式装载机; 疲劳; 有限元; 应力

中图分类号: TD421.5⁺2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-5276(2024)03-0037-04

Fatigue Life Analysis of Working Mechanism for Mining Backhoe Loader-bucket

HE Yang¹, LI Xiaohuo²

(1. School of Automobile and Traffic Engineering, Liaoning University of Technology, Jinzhou 121012, China;

2. Department of Mechanical and Electrical Engineering, Guangdong Institute of Arts and Sciences, Zhanjiang 524471, China)

Abstract: In order to figure out the fatigue life of the working mechanism of mining backhoe loader-bucket, the calculation method of the random excavating resistance of bucket was analyzed and determined, and Matlab was applied to simulate the random excavating resistance. With Pro/E, the three-dimensional model of the working mechanism was established, and its finite element model was created by Workbench. The simulated excavating resistance was imported into ncode to analyze the stress and fatigue life of the bucket, jib and boom. The results show that the variable range of the working mechanism is $0.313 \times 10^{-2} \sim 0.028$ m, and the stress range is $705 \sim 3.85 \times 10^8$ Pa. The minimum service life is located at the connecting parts between the bucket and rod, about 7.58×10^6 times. The research conclusion provides a basis for the parameter design and optimization of the machine.

Keywords: backhoe loader-bucket; fatigue; finite element; stress

0 引言

矿用挖掘式装载机是矿山平巷、斜巷掘进、碎石土料采集及输送等重要的机械设备, 由于矿区作业环境恶劣, 铲斗运动过程中的角度和工作空间不断变化以及物料赋存条件的不确定性, 使得该机工作机构承受的载荷复杂多变, 导致各部件出现疲劳破坏, 从而降低工作效率。为此, 分析矿用挖掘式装载机工作机构的疲劳寿命很有必要。

目前, 对于挖掘式装载机疲劳寿命的研究主要分为理论计算、有限元分析、实验研究等方法。文献[1]基于工作装置作业姿态、材料属性和外载荷特性, 利用热点应力建立工作装置疲劳寿命

的评估模型。文献[2]利用液压挖掘机的实验平台以及仿真软件, 获得该机关键铰接点的应力、应变情况。文献[3]采用试验的方法, 对装载机的工作装置进行结构寿命预测。文献[4]借助 SolidWorks 建立装载机铲斗的有限元模型, 分析了铲斗的应力及疲劳寿命。文献[5]根据设计的疲劳试验台, 完成装载机加速加载疲劳试验, 并对装载机的工作装置进行了极小子样疲劳可靠性分析。文献[6]基于 ANSYS 建立装载机工作装置的有限元模型, 完成静力学分析和模态分析, 并对其结构参数优化。

上述方法对挖掘式装载机疲劳可靠性的研究具有重要意义, 由于工作空间不断变化加之挖掘

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(59774033); 辽宁工业大学博士科研启动基金资助项目(XB2021004)

第一作者简介: 何洋(1982—), 男, 辽宁锦州人, 副教授, 博士, 硕士生导师, 研究方向为现代机械设计与方法、机电液系统仿真与应用, heyang121000@163.com。

阻力的随机性和复杂性,所以对于随机挖掘阻力作用下的工作机构的疲劳可靠性分析还不多见。为此,本文通过对随机挖掘阻力的理论计算,结合有限元分析方法,分析该挖掘机工作机构的疲劳寿命。

1 铲斗载荷模型

图1为工作机构的载荷模型。当铲斗铲取物料时,由于挖掘深度的不断变化和物料赋存条件的不确定性,使得铲斗挖掘阻力具有随机性。随机挖掘阻力是铲斗挖掘过程中所受的最大阻力,可分解为法向挖掘阻力合力 F_n 、切向挖掘阻力合力 F_t 。

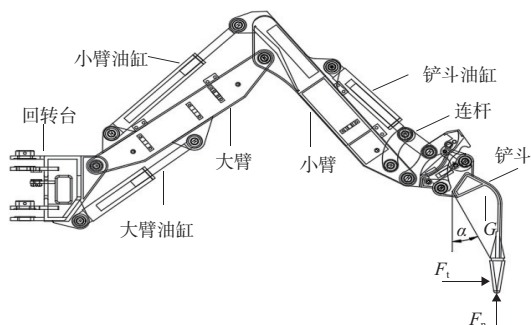


图1 工作机构载荷模型

F_n 、 F_t 可由布尔分布和瑞利分布描述^[7],有

$$\begin{cases} F_n = F_{nf} \cos 30^\circ + G \cos \alpha + F_{np} \\ F_t = F_{tq} + F_{tc} - G \sin \alpha - F_{nf} \sin 30^\circ \end{cases} \quad (1)$$

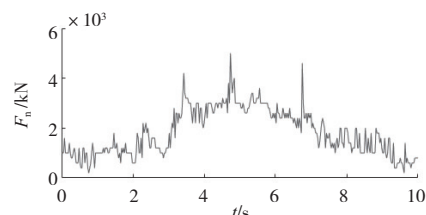
式中: F_{nf} 为铲斗与煤岩的摩擦力, $F_{nf} = \frac{hb(\rho + \Delta\rho)A_s}{K_c R} \delta$,其中 h 为铲取深度, b 为铲斗宽度, ρ 为煤岩密度, $\Delta\rho$ 为煤岩密度变化量, A_s 为铲斗内侧壁面积, K_c 为煤岩松散系数, R 为铲斗铲取半径, δ 为正态分布下挖掘阻力的标准差; G 为铲斗重力; α 为铲取角; F_{np} 为斗齿顶点对煤岩的正压力, $F_{np} = \beta[-\ln(1 - r_{np})]^{1/\gamma}$,其中 β 为比例参数, γ 为分布状态变量, r_{np} 为威布尔分布函数, $r_{np} = \int_0^{F_{np}} f_{np}(x) dx$, $f_{np}(x)$ 为威布尔分布概率密度; F_{tq} 为切向挖掘阻力, $F_{tq} = \delta[-\ln(1 - r_{tq})]$, $r_{tq} = \int_0^{F_{tq}} f_{tq}(x) dx$, $f_{tq}(x)$ 为瑞利分布概率密度; F_{tc} 为黏着力。

根据上述分析,取散体煤岩最大抗压强度4 MPa,摩擦因数0.8,松散系数1.1,工作面的长和宽为3 m×1.5 m。相关材料参数如表1所示。

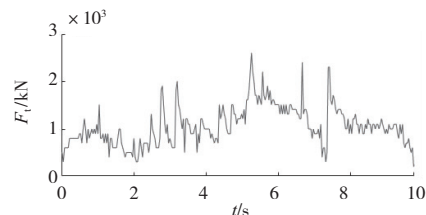
表1 材料参数

材料	屈服强度/ MPa	弹性模量/ GPa	泊松比	密度/(g/cm ³)
Q345	345	210	0.274	7.85×10 ³
16Mn	343	212	0.310	7.87×10 ³
45#钢	355	209	0.296	7.85×10 ³

利用 Matlab 仿真获得法向挖掘阻力 F_n 和切向挖掘阻力 F_t 随时间变化曲线,如图2所示。由图可见,法向和切向挖掘阻力随时间无规律的变化,具有随机性,但法向挖掘阻力整体呈现先增加后减小的变化趋势,法向和切向随机挖掘阻力的峰值分别为 4.96×10^3 kN 和 2.57×10^3 kN,均值分别为 1.82×10^3 kN 和 0.95×10^3 kN。



(a) 法向随机挖掘阻力



(b) 切向随机挖掘阻力

图2 挖掘阻力随时间变化曲线

2 工作机构有限元模型

考虑到该机工作装置结构复杂,采用 Workbench 建立其三维模型比较困难,为此借助 Pro/E5.0 建模软件的实体造型技术,根据相关尺寸,完成该机的铲斗、小臂、大臂、油缸以及回转台等各零件的建模及装配,得到其工作机构的三维模型如图3所示。

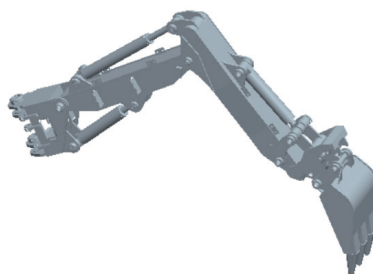


图3 挖掘式装载机工作机构三维模型

通过 Pro/E5.0 与 Workbench 之间的无缝连接功能,将工作机构三维模型映射到 Workbench 环境下,设置模型材料属性、划分网格^[8],单元总数 60 719 个,节点总数 116 750 个。将回转台轴孔处设置为固定约束,取法向和切向挖掘阻力的峰值添加载荷,完成其有限元模型如图 4 所示。

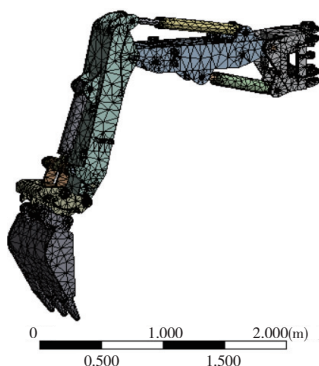


图 4 挖掘式装载机工作机构有限元模型

3 静力学分析

在 Workbench 环境下,完成工作机构的静力学分析。由图 5 的应变云图可知,工作机构的应变变量范围在 $0.313 \times 10^{-2} \sim 0.028$ m 之间,铲斗应变变量最大,小臂其次,大臂应变变量最小,由于回转台设置为固定约束,因此其应变量为 0。图 6 为应力分布云图。由图可见,应力范围在 $705 \sim 3.85 \times 10^8$ Pa,较大应力位于斗齿根部、油缸与大、小臂的连接部位以及小臂油缸与连杆的连接部位,后者的应力最大。这是由于连杆承担小臂油缸推力以及铲斗的挖掘阻力,使该处出现了较大的应力集中。

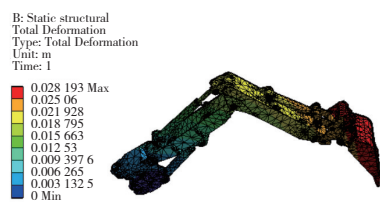


图 5 应变云图

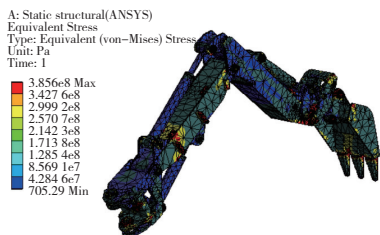


图 6 应力云图

4 工作机构疲劳寿命分析

Ncode 在疲劳分析设计领域有完备的功能,是目前零件疲劳分析的主流工具^[9]。在 Workbench 环境下完成装载机工作机构的应力分析后,将数据导入 Ncode 疲劳分析模块,分析其疲劳寿命,流程如图 7 所示。

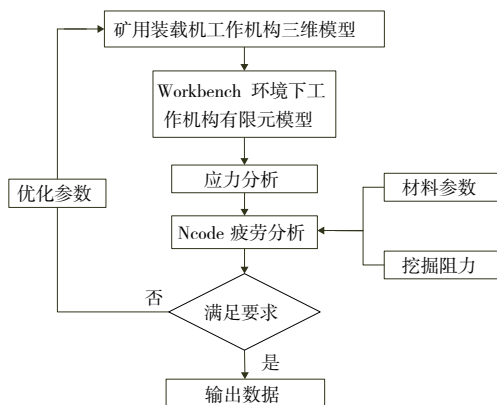


图 7 分析流程图

根据前述挖掘阻力的计算结果,将数据转换为 txt 文件,利用 ASCII 的转换功能将该 txt 文件转为 S3T 文件格式加载到 ncode 模块。

图 8 为矿用装载机工作机构的疲劳寿命分析云图。由图可知,该机工作机构的疲劳寿命范围为 $7.58 \times 10^6 \sim 2.45 \times 10^{11}$ 次,最小寿命位于连杆与铲斗的连接部位,这与应力分析结果相符。由于该机完成一次挖掘(挖掘、回转、卸料和返回)的时间为 16 s,按照每天 8 h 工作制计算,连杆与铲斗的连接部位正常工作下的疲劳寿命为 $(7.58 \times 10^6 \times 16) / (60 \times 60 \times 8 \times 365) = 11.5$ 年,满足实际工况需求。

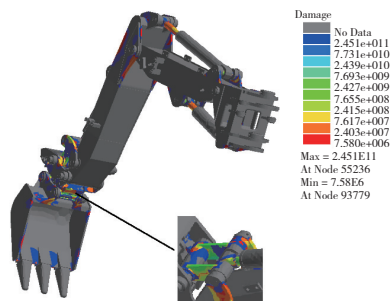


图 8 工作机构疲劳寿命云图

5 结语

本文根据随机过程理论计算矿用装载机随机挖掘阻力,以此作为载荷样本数据结合其有限元

模型,分析该机工作机构的应力、应变及疲劳寿命情况,所得结论如下:

1) 工作机构的应力范围为 $705 \sim 3.85 \times 10^8$ Pa, 疲劳寿命范围为 $7.58 \times 10^6 \sim 2.45 \times 10^{11}$ 次;

2) 工作机构的最小寿命位置位于连杆与铲斗的连接部位。

该分析方法缩短了产品研发周期、优化了结构参数,具有实际工程意义。

参考文献:

- [1] 万一品,俞虎升,贾洁,等. 基于热点应力的装载机工作装置疲劳寿命研究[J]. 机械设计,2022,39(9): 36-41.
- [2] 於来玲,殷晨波,陈长林,等. 液压挖掘机动力学仿真与试验分析[J]. 机械制造与自动化,2021,50(6): 118-122.
- [3] 万一品,宋绪丁,员征文,等. 装载机工作装置疲劳试验载荷谱编制方法[J]. 中国机械工程,2017,28(15):1806-1811.

- [4] 王海芳,汪澄,戴亚威. 装载机铲斗有限元及疲劳分析[J]. 煤矿机械,2016,37(1):96-98.
- [5] 杨思源,宋绪丁,万一品,等. 矿用装载机工作装置应力与疲劳寿命仿真分析[J]. 工程机械,2022,53(6): 65-71.
- [6] 鲍建伟,李建平,杜长龙,等. 挖掘式装载机工作装置有限元分析[J]. 煤炭科学技术,2010,38(8): 111-114.
- [7] 李晓豁,石峥嵘,吕良玉,等. 矿用挖掘式装载机铲斗铲取散体煤岩随机载荷的模拟[J]. 工程设计学报,2014,21(4):329-333,339.
- [8] 何洋,李晓豁,覃创业,等. 挖掘式装载机工作机构振动特性分析[J]. 渤海大学学报(自然科学版),2018,39(3):255-262.
- [9] 杨啟梁,张新林,胡漂,等. 汽车座椅骨架焊缝的疲劳寿命预估方法研究[J]. 机械设计与制造,2021,370(12):107-111,115.

收稿日期:2022-11-07

(上接第19页)

科知识,对多用户参与的可解释群决策交互模式进行了探讨,为群体决策场景服务的快速设计和知识体系建立提供了新的研究思路,也为从业者长效且可持续拓展群决策交互设计提供了新的设计思路。

2) 后续研究工作将进一步挖掘可解释性的新型表达模式和交互模式,提高可解释群决策的合理性、适用性、鲁棒性和有效性。

参考文献:

- [1] TORRANCE E P. Group decision - making and disagreement[J]. Social Forces,1957,35(4):314-318.
- [2] 赵海燕,张友良. 面向产品并行开发过程的群决策支持系统研究[J]. 中国机械工程,2000,11(12):1376-1379.
- [3] PÉREZ I J, CABRERIZO F J, ALONSO S, et al. On dynamic consensus processes in group decision making problems[J]. Information Sciences,2018,459:20-35.
- [4] WU Z B, XU J P. Managing consistency and consensus

in group decision making with hesitant fuzzy linguistic preference relations[J]. Omega,2016,65:28-40.

- [5] DEMIRKAN H, DELEN D. Leveraging the capabilities of service - oriented decision support systems: putting analytics and big data in cloud[J]. Decision Support Systems,2013,55(1):412-421.
- [6] UREÑA R, KOU G, DONG Y C, et al. A review on trust propagation and opinion dynamics in social networks and group decision making frameworks [J]. Information Sciences,2019,478:461-475.
- [7] 吴飞,廖彬兵,韩亚洪. 深度学习的可解释性[J]. 航空兵器,2019,26(1):39-46.
- [8] TUFEEKI Z. Algorithmic harms beyond facebook and google: emergent challenges of computational agency[J]. Journal on Telecommunications and High Technology Law, 2015,13:203.
- [9] 成科扬,王宁,师文喜,等. 深度学习可解释性研究进展[J]. 计算机研究与发展,2020,57(6):1208-1217.

收稿日期:2023-12-04