

基于 ZWSOFT 的一种灾后重建机器人设计及仿真分析

孙俊丽, 温汉辉, 黄壬安, 李星贤, 龙达峰*

(惠州学院电子信息与电气工程学院, 广东 惠州 516007)

摘要: 灾后重建机器人能够在辅助人类快速、高效和便捷地建设家园中发挥重要作用。应用 ZWSOFT 的 3D-CAD 设计模块设计了一款小体积、多功能的灾后重建机器人。机器人的主要部件包括起重机构、履带机构、推土机构及无人机机构, 具有起重、推土、清理、运输和监测等多种功能。根据机器人的运动, 确定关键零件的材料性能参数和受载情况, 运用 ZWSOFT 的中望结构仿真模块对关键零件结构进行有限元静力学分析, 安全系数均大于 1.4, 满足设计技术要求。

关键词: 灾后重建; 机器人; ZWSOFT 软件; 结构强度; 有限元仿真

中图分类号: TP242 **文献标志码:** A

1 引言

如今的机器人因具有较高的自动化程度而被各个领域广泛地应用^[1]。在“中国制造 2025”的总体战略规划提出要加快发展关键技术领域研发智能型工业机器人^[2], 智能化机器人变得越来越重要, 进入到黄金时期^[3]。在灾后重建领域中, 机器人也在快速地发展。陈军研制的 H7030 自升式塔式起重机, 回转机构采用变频无极调速方案, 回转制动平稳、就位迅速、操作性能良好, 起重机构可以 360° 旋转; 肖维思^[4]等对抹灰机器人施工开展研究, 将平面图纸转化为三维模型, 通过模型自动规划

路径和作业信息, 机器人与人类协作进行灾后重建工作; 中联科下线开展首台六节臂 50m 泵车的研究, 可以使起重机构部件的大臂和小臂伸长到符合要求程度^[5]; 程晶晶^[6]等开展中小型塔机起升机构整体优化设计方法研究; 尤昆^[7]进行农业机器人通用移动平台控制系统的设计, 开发出一种基于期望轨迹的路径规划算法, 并且利用超声波实现障碍物距离检测; 日本研发出 T-52、T-53 抢险机器人, 其中 T-52 重 5t, 体积 3 500mm×2 400mm×3 450mm, T-53 重 2.95t, 体积 2 320mm×1 400mm×2 800mm^[8]; 日本的日立建机 ASTACO 双臂挖掘机, 通过双臂液压系统进行挖掘工作; 瑞士研发出“凯撒”腿轮

基金项目: 广东省自然科学基金 (2021A1515011401); 广东省教育厅高校科研项目 (2021ZDZX1012、2022ZDJS056)

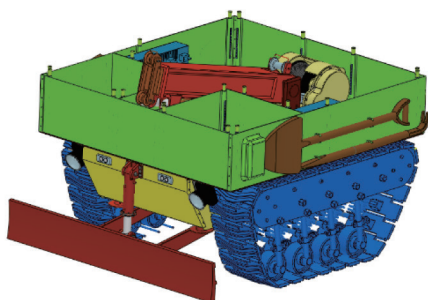
* 通信作者: 龙达峰

式挖掘机等。

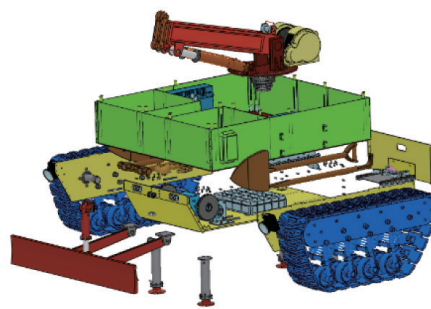
综上所述,不论国内还是国外,对于灾后重建机械设备的研发都在不断地发展,尤其是大型机械设备的研发尤为迅速,但大型机械设备是以单一功能为主且在灾后复杂环境中无法进行有效作业,难以满足更加快速、高效和便捷的灾后重建要求。并且在大型机械设备工作的区域之外仍有大量的区域无法进行作业,这些区域在重建过程中占据着主导,有必要设计小体积、多功能的新型灾后重建机器人以弥补用于灾后重建的大型机械设备的不足之处。

2 灾后重建机器人的设计

2.1 总体设计方案



a) 整体结构示意图



b) 轴测分解图

图1 灾后重建机器人结构图

2.2 部件设计

(1) 履带机构 为了适应灾后的复杂地形,灾后重建机器人的行走方式采用的是履带式。履带的优点:接地比压低;承重能力强;与地的接触面积大;通过性和爬坡能力强;具有转弯半径小,机动性、爬坡能力强的越野性等特点;重心低、附着系数大,具有良好的抵抗翻倾和下滑的坡地稳定性。履带的设计中具有冲角、退角和减震模块。其中冲角和退角可以实现陡坡、山地和泥地上行走,而减震模块使得机器人行走更加平稳,减少侧翻、前倾的危险。履带机构由从动轮、内外侧法兰、承重横杆、内侧板、外侧板、主动轮等零部件组成。履带在结构上由四组减震弹簧、四个从动轮、一个主动轮和30个履带片构成,其中履带片之间通过销进行连接固定,并且主动轮、从动轮与履带片通过齿轮进行传动,如图2所示。

(2) 起重机构 为了在灾后重建过程中转移无法靠

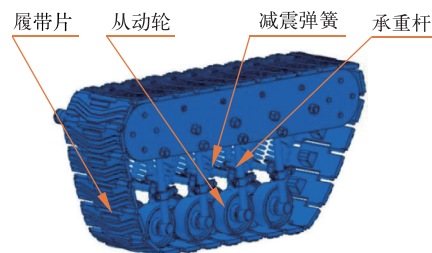


图2 灾后重建机器人履带示意图

灾后重建机器人的目标使用场景有灾区的室内外及道路、公共基础设施、倒塌的住房。

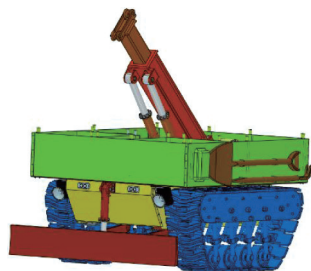
机器人的目标功能有抬起重物(石头、路边的障碍物和倒塌的大型房屋碎片等无法人为搬运的物品),转移、运输物资,灾区清理,重建住房与公共设施,恢复通信,在地震等灾区场地中进行远程搜索,获取地形特征等相关信息进行灾后监测。机器人的关键零件的强度安全系数要大于等于1.4。

机器人总体尺寸为1640mm×1410mm×938mm,机器人总重1811kg,起重臂重513.3kg,机器人运载重物的最大载荷为50kN,最大推土载荷为35kN。

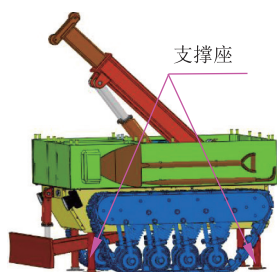
灾后重建机器人总体的结构由起重机构、履带机构、推土机构及无人机机构等主要部件组成。具体如图1所示。

人力移除的重物,如道路中的障碍物、倒塌的大型房屋碎片、石头等,且在灾后重建过程中进行物资的增援,需要在灾后重建机器人中增加起重机构,以提高重建的效率。起重机构由吊钩和起重臂大臂、起重臂底座、起重臂旋转轴、起重臂旋转箱体、起重臂前臂、起重臂液压缸、起重臂液压杆等零部件组成。在起重机构中,增加液压支撑底座,为支撑提供坚实的基础,避免因重物过重致使机器人倾倒、侧翻等情况的发生。起重臂在

工作状态下可以达到 2 000mm 长, 并且可以实现 360° 旋转工作。起重机构的工作状态分成两种, 第一种是单液压起重臂进行重物起吊, 利用履带机构的支撑能力进行工作, 如图 3a 所示; 第二种是在使用液压起重臂的同时, 利用液压支撑座进行支撑, 增大支撑力, 如图 3b 所示。



a) 单液压起重臂起重机构



b) 液压起重臂与支撑座复合起重机构

图 3 起重机构工作示意图

(3) 推土机构 在灾后重建的过程中, 灾区的清理是个必不可少的步骤。在灾区中, 除大型重物外更多的是泥土、碎石等许多的小型杂物, 为了实现对灾区的清理工作, 在灾后重建机器人的正前方设计一个推土机构。如图 4 所示。推土机构由推土铲、推土铲底座、推土铲液压杆和推土铲液压缸等零部件组成。在工作过程中, 可以通过改变液压的大小, 调节推土铲的高度, 便于开展清理工作。

(4) 无人机机构 为了能及时了解和监测灾区的情况, 在机器人中设计一个无人机机构。其中无人机存放于机器人的箱体后端, 无人机搭载有最新的视觉模块、

生命探测仪器和 5G 模块等。在接近灾区时可以提前使用无人机进行前方路段、房屋坍塌程度及人员的探测等。无人机机构由无人机、无人机底板、导轨 a、导轨 b、弹簧、导轨直齿轮和齿条等零部件组成。无人机的进出采用直齿轮 ($m=2$ 、 $z=17$) 和齿条 ($m=2$ 、 $L=300\text{mm}$) 啮合运动, 无人机门增加扭转弹簧, 在无人机收回后通过扭转弹簧将无人机门带回。如图 5 所示。

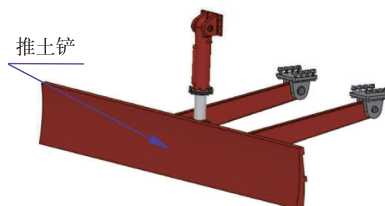


图 4 灾后重建机器人推土铲示意图

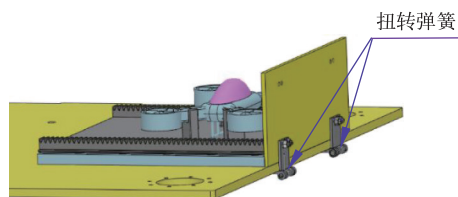


图 5 灾后重建机器人无人机机构示意图

3 关键零件结构强度分析

用 SWSOFT 结构仿真模块对灾后重建机器人的主要承重零件进行有限元静力学仿真分析, 主要承重零件有起重臂底座、起重臂的旋转轴、履带机构中的承重横杆和推土机构中的推土铲等, 材料参数见表 1。

强度条件为

$$\bar{\sigma} \leq [\sigma] \quad (1)$$

式中, $\bar{\sigma}$ 表示平均等效应力, $[\sigma]$ 表示为许用应力。

塑性材料许用应力为屈服强度与安全系数之比

$$[\sigma] = \sigma_s / n \quad (2)$$

式中, $[\sigma]$ 为许用应力, σ_s 为屈服强度, n 为安全系数。

表 1 材料参数表

零件	材料	密度 / (kg/m^3)	弹性模量 / GPa	泊松比	屈服强度 / MPa	备注
起重臂底座	45 钢	7 850	205	0.3	345	调质处理
推土铲	40Cr	7 850	200	0.3	440	调质处理
旋转轴	45Mn	7 850	205	0.3	375	调质处理
承重横杆	40Cr	7 850	200	0.3	440	调质处理

3.1 起重臂底座仿真分析

由于起重臂底座所受力均为起重臂给予的压力，并且位于六个孔位上，运载重物的最大载荷为 50kN，相关数据见表 2。如图 6 和图 7 可知，起重臂底座在 50kN 的作用下，平均等效应力为 234.6MPa。安全系数 n 取 1.4，由公式 (2) 得，许用应力 $[\sigma]$ 为 246.42MPa，大于平均等效应力 234.6MPa，满足设计技术要求。

表 2 起重臂相关数据

零件	材料	网格单元 /mm	最大载荷 /kN	平均等效应力 /MPa
起重臂底座	45 钢	6	50	234.6

3.2 推土铲力学仿真

由于推土铲在运动过程中，受到来自前方的阻力，最大推土载荷为 35 kN，相关数据见表 3。如图 8 和图 9 可知，推土铲在 35kN 的作用下，平均等效应力为 305.5MPa。安全系数 n 取 1.4，由公式 (2) 得，许用应力 $[\sigma]$ 为 314.28MPa，大于平均等效应力 305.5MPa，满足设计技术要求。

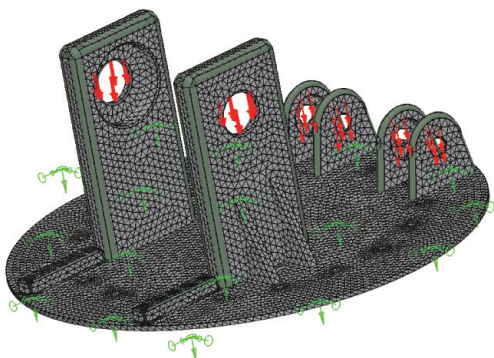


图 6 起重臂底座受载与网格图

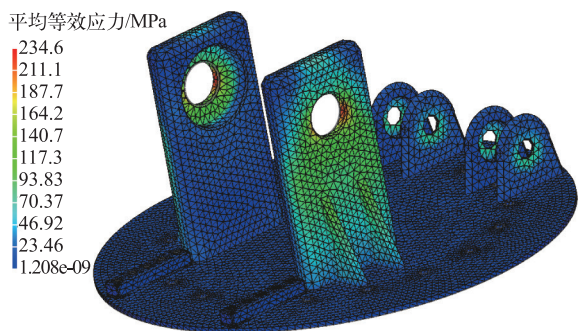


图 7 起重臂底座平均等效应力

表 3 推土铲相关数据

零件	材料	网格单元 /mm	最大载荷 /kN	平均等效应力 /MPa
推土铲	40Cr	8	35	305.5

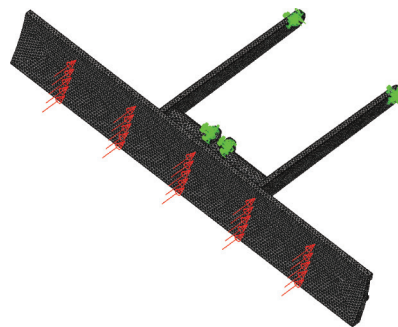


图 8 推土铲受载与网格图

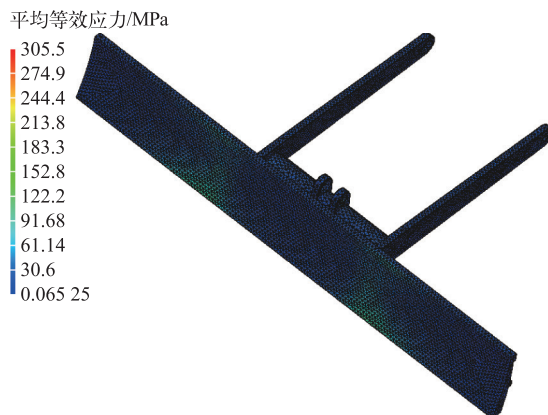


图 9 推土铲平均等效应力

3.3 承重横杆仿真分析

承重横杆安装在履带的减震弹簧上，左右两端被固定，中间受力，共八根，左右均分，机器人的总重为 1 811kg (17.748kN)，则每根的受力分别为 2 218N；运载重物的最大载荷为 50kN，每根承重横杆承受的运载重物载荷为 6 250N，则承重横杆承受的最大载荷为 8 468N，相关数据见表 4。如图 10 和图 11 可知，承重横杆在 8 468N 的作用下，平均等效应力为 253.2MPa。安全系数取 1.4，由公式 (2) 得，许用应力 $[\sigma]$ 为 267.8MPa，大于平均等效应力 253.2MPa，满足设计技术要求。

表 4 承重横杆相关数据

零件	材料	网格单元 /mm	最大载荷 /N	平均等效应力 /MPa
承重横杆	45Mn	2	8 468	253.2

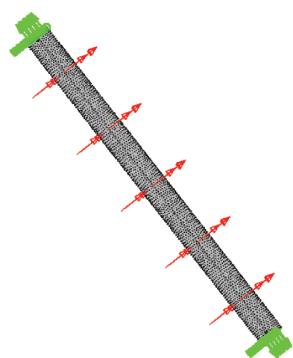


图 10 承重横杆受载与网格图

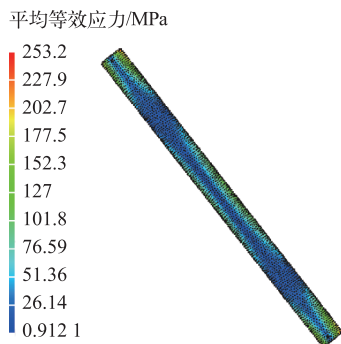


图 11 承重横杆平均等效应力

3.4 旋转轴仿真分析

由于起重臂的旋转轴受到来自起重臂向下的压力，起重臂的总重为 513.3kg (5.03kN)，运载重物的最大载荷为 50kN，则旋转轴承受最大载荷为 55.03kN，相关数据见表 5。如图 12 和图 13 可知，起重臂转轴在 55.03kN 的作用下，平均等效应力为 297.2MPa。安全系数 n 取 1.4，由公式 (2) 得，许用应力 $[\sigma]$ 为 314.2MPa，大于平均等效应力 297.2MPa，满足设计技术要求。

表 5 起重臂旋转轴相关数据

零件	材料	网格单元 / mm	最大载荷 / kN	平均等效应力 / MPa
旋转轴	40Cr	6	55.03	297.2

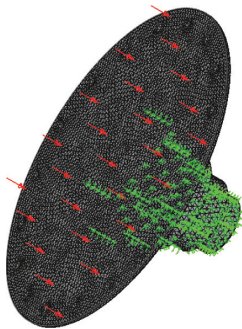


图 12 起重臂旋转轴受载与网格图

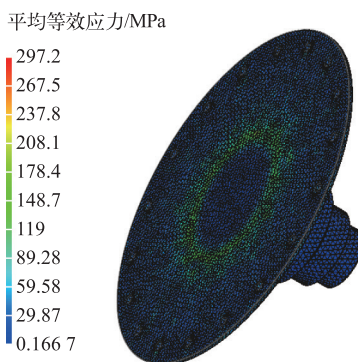


图 13 起重臂旋转轴平均等效应力

4 结束语

本文用 ZWSOFT 软件设计了一款小体积、多功能的灾后重建机器人。机器人具有起重、推土、清理、运输和监测等多种功能。机器人主要由履带机构、起重机构、推土机构和无人机机构等主要部件组成。应用 ZWSOFT 结构仿真模块灵活、高效地对关键零件进行了有限元静力学分析，安全系数均大于 1.4，满足设计技术要求。该款灾后重建机器人可以较好满足灾后重建工作的快速、高效和便捷的要求。

参考文献

- [1] 牛利松, 刘婷婷. 工业机器人在自动化控制中的应用 [J]. 集成电路应用, 2023, 40 (7): 206-207.
- [2] 穆馨. 中国制造 2025 对工业机器人发展的促进 [J]. 内燃机与配件, 2017 (11): 112-114.
- [3] 官文, 熊杰, 卢峰. 中国制造 2025 背景下工业机器人技术人才培养初探 [J]. 课程教育研究, 2020 (11): 238.
- [4] 肖维思, 庄然, 唐务生. 抹灰机器人施工研究 [J]. 施工技术 (中英文), 2023, 52 (11): 22-26.
- [5] 我国首台 6 节臂 50m 泵车在中联重科下线 [J]. 工程机械与维修, 2009 (5): 38.
- [6] 程晶晶. 中小型塔机起升机构整体优化设计方法研究 [D]. 沈阳: 沈阳建筑大学, 2019.
- [7] 尤昆. 农业机器人通用移动平台控制系统的设计 [D]. 天津: 天津农学院, 2021.
- [8] 郭瑞璜. 日本新一代救援机器人——T-53 援龙 [J]. 消防技术与产品信息, 2011 (4): 76-79.

收稿日期: 2024-07-18