

不同缓冲方式下发电机空投跌落冲击仿真与性能分析

廖圣洁^{1,3}, 阳静³, 方政³, 朱景山^{2,3*}

(1.华中科技大学 机械科学与工程学院, 武汉 430074; 2.海军工程大学 管理工程与装备经济系, 武汉 430033; 3.空降兵研究所, 湖北 孝感 432100)

摘要: **目的** 比较空投发电机的 2 种缓冲方案的优缺点并确定防护区域。**方法** 基于 ANSYS/LS_DYNA 有限元分析软件, 建立发电机空投三维仿真模型, 对其跌落冲击混凝土地面过程进行仿真, 比较 2 种缓冲方案下发电机的损伤情况, 重点分析了在着陆时发电机的形变、应力变化和破坏方式。**结果** 根据仿真结果, 采用蜂窝纸板缓冲因重量分布不均导致叶片脱落, 而钢丝绳减震器能够显著降低最大应力, 仅为蜂窝纸板的 43.6%, 但可能出现再弹起。着陆时的冲击应力主要集中在发电机底部外壳、连接轴和柴油机底座。**结论** 利用有限元软件仿真分析发电机的跌落冲击是可行和有效的, 可以比较不同缓冲方法的效果, 极大地降低了试验成本, 并可用于空投发电机的安全设计与评估。

关键词: 空投; 发电机; 有限元仿真; 缓冲

中图分类号: TB34

文献标志码: A

文章编号: 1001-3563(2024)19-0334-06

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2024.19.034

Simulation and Performance Analysis of Generator Drop Impact in Different Buffering Modes

LIAO Shengjie^{1,3}, YANG Jing³, FANG Zheng³, ZHU Jingshan^{2,3*}

(1. School of Mechanical Science and Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China; 2. Department of Management Economics, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China; 3. Institute of Paratroops, Hubei Xiaogan 432100, China)

ABSTRACT: The work aims to compare the advantages and disadvantages of two buffering schemes and determine the protection area for airdrop generators. A three-dimensional simulation model was established based on ANSYS/LS_DYNA finite element analysis software. The process of generator dropping and impacting concrete ground was simulated, and the damage analysis of generator under two buffering schemes was compared. The deformation, stress change and damage mode of generator during airdrop impact were analyzed. According to the simulation results, the honeycomb cardboard buffer caused blade detachment due to uneven weight distribution, while the steel wire rope absorber significantly reduced the maximum stress to 43.6% of the cardboard buffer, though it might rebound. The impact stress from dropping to the ground was mainly concentrated on the bottom shell of the generator, connecting shaft, and diesel engine base. It is feasible and effective to analyze the drop impact of generator by finite element simulation, which can compare different buffering methods and greatly reduce the test cost, and can be applied to the safety design and evaluation of airdrop generator.

KEY WORDS: airdrop; generator; finite element simulation; buffer

野外军事作战和抢险救灾过程中, 各种设备都需要电力来驱动, 想要获得足够的电力, 就需要 1 台满足现场使用的发电机。但是面对这些特殊场合, 常规通过陆路运送发电机的方式并不适用。因此, 采用空降空投的方式运送更为快捷、方便。然而, 国内外关于空降空投发电机的研究还比较缺乏, 空投发电机最为关键的点在于开伞瞬间缓冲技术以及着陆缓冲技术。缓冲的主要作用是降低发电机受到冲击而发生破坏的可能性。除了空投系统自身携带的缓冲系统对空投件实施整体缓冲外, 空投时还需要根据空投对象特性进行局部防护和额外防护^[1-6]。

虽然国内外缺少发电机的空投研究, 但空投其他物品或载人空投的研究较多。例如, 刘振光等^[7]针对空投车辆跌落过程, 使用相容拉格朗日-欧拉方法 (CLE 方法) 研究油箱结构的冲击应力、油箱本体动态应力分布以及内部油的状态, 通过油箱底部橡胶缓冲垫可降低 10 MPa 的冲击应力。常天笑等^[8]通过总结、归纳各类空投和投弃试验以及仿真分析, 得到弹药空投和投弃落地冲击特性的一般规律, 有无缓冲材料和货台跌落冲击地面的最大过载相差几千倍。Fuentes 等^[9]对空投运输新鲜血液的影响进行研究, 通过对比空投前后血液中的某些成分表明空投是一种可行的血液制品输送方式。Liu 等^[10]研究了载人空降中着陆安全气囊的最佳缓冲特性, 建立了 1 个代表人体颈部损伤指数的不确定目标函数, 以保证人员的安全性。

为了应对空投着陆时的冲击力以及提高发电机薄弱部位的缓冲防护能力, 可以选择合适的缓冲材料进行防护。对于发电机的局部防护, 可根据防护部位的脆值、外形以及可操作空间选取不同的缓冲材料, 缓冲材料一般分为泡沫塑料、蜂窝纸板、气泡薄膜、橡胶、钢丝绳等。为了避免发电机在空投着陆时受损, 需要精选缓冲材料和包装参数。通过利用计算机仿真模拟来研究发电机的跌落冲击过程, 不仅可以确定这些参数, 还可以节约大量的人力物力, 对发电机的空投过程具有重要的指导作用^[11-15]。本文将某型号发电机捆绑安装在一个试验用货架台上, 该发电机以一定的速度跌落冲击地面, 通过 ANSYS/LS_DYNA 软件进行该发电机的跌落冲击仿真, 研究不同缓冲材料下 (蜂窝纸板和钢丝绳减震器) 发电机各部件的跌落冲击损伤情况, 重点分析在着陆冲击时发电机的形变、应力变化和对发电机的破坏方式等, 从而为空投发电机的设计开发与应用提供参考。

1 建模与仿真

1.1 几何模型及材料参数

图 1 表示本文建立的发电机空投跌落冲击的几何模型, 其中缓冲方式有 2 种, 一种是采用钢丝绳减震器, 另一种则是采用大小相同的蜂窝纸板代替钢丝

绳减震器, 图 1 中显示的是钢丝绳减震器作为缓冲材料的模型。本文选取的发电机是 XX 型号的发电机, 主要由柴油机、发电机、控制箱, 桨扇等组成。由于该发电机模型过于复杂, 只对其重点研究的区域进行模型的构建, 对空投跌落冲击过程中影响不大的部分遵循仿真模型简化原则进行了一定程度的删除和简化, 由此组成 1 个空投单元固定在货架台 (1.2 m×1.2 m) 上的空投模型, 其中, 发电机是直径 400 mm, 长 320 mm 的圆筒状, 位于空投件底部, 通过轴承与柴油机相连, 桨扇位于柴油机上部, 桨扇盘的直径为 340 mm, 每片桨叶长 110 mm。通过横纵 4×4 条绑带对发电机进行捆绑, 使其固定于底层货架台上。在发电机底层、侧面、中间、顶层各铺放蜂窝纸板约束并缓冲发电机的横向滑移与冲击。整个空投模型底部为混凝土地面, 长宽为 5 m×5 m。

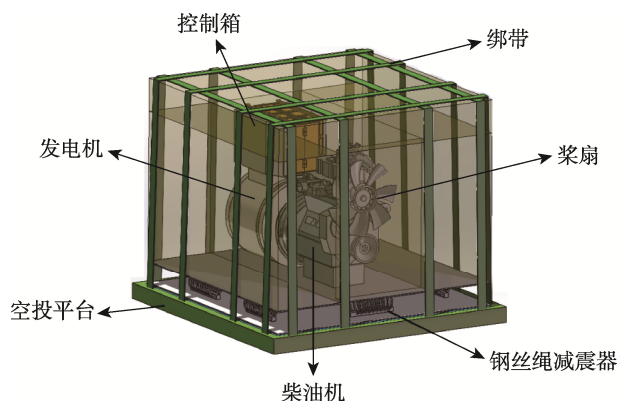


图 1 发电机空投模型
Fig.1 Generator airdrop model

发电机底部的缓冲材料的选择有 2 种, 分别是钢丝绳减震器和相同体积的蜂窝纸板, 其中钢丝绳减震器由上下 2 块薄钢板中间夹 7 个纵横排列横向摆放的弹簧组成, 其中, 弹簧的直径为 75 mm, 螺距为 20 mm, 总共 9 圈。上下薄钢板的尺寸为 1 100 mm×1 100 mm×5 mm, 两者间距为 100 mm, 如图 2 所示。

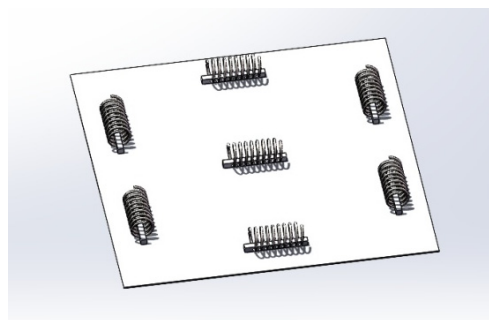


图 2 钢丝绳减震器内部弹簧排布
Fig.2 Internal spring arrangement of steel wire rope shock absorber

本文通过仿真分析这 2 种缓冲材料对发电机跌落冲击地面的缓冲性能。为了接近发电机跌落冲击的

真实效果,需要对发电机各部件材料、缓冲材料、地面、货架台等设置准确的材料力学特性参数,主要包括模型的材料密度、弹性模量和泊松比。其中,蜂窝纸板属于各向异性材料,其本构模型如下^[16]:

$$f(X) = \begin{cases} 3.4705X, X \leq 0.061 \\ 0.703 + 13.0539X + \\ 96.6293X^2 + 240.3239X^3, \\ 0.061 < X \leq 0.168 \\ 0.0974 \tan(31.3X) + \\ 0.0009 \tan(2.02X), \\ X > 0.168 \end{cases} \quad (1)$$

其中, X 表示蜂窝纸板的应变, $f(X)$ 为蜂窝纸板的应力。

钢丝绳减震器内部弹簧采用硅锰弹簧钢,具有较高的可塑性和韧性,能够很好地抵抗空投跌落的冲击力。电机内部各部件材料如图3所示。

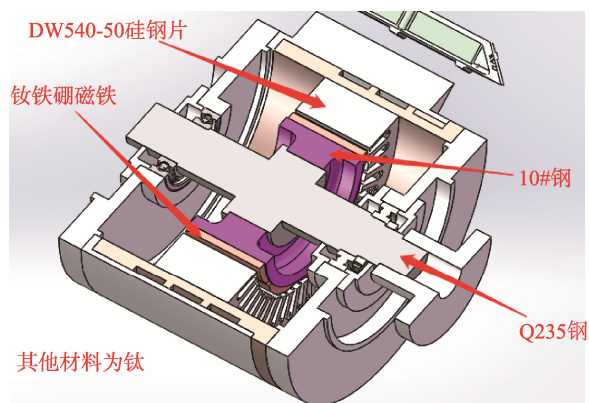


图3 电机材料
Fig.3 Motor materials

电机内部转轴由于结构和功能需要,材料就选用硬度和相对耐磨性较强的Q235钢;电机内部转轴固定轴除了需要较好的硬度和耐磨性外,还需要较强的韧性,故采用10#钢;电机内部的磁铁材料选用常用的钕铁硼磁铁。此外,模拟空投的货架台使用尼龙66材料,4条绑带与货架台紧密连接,其中绑带选用锦纶,该材料的拉伸强度和弹性模量较高,常用于制作高强度的纺织品,如绳索、渔网和工业用布料等。地面则是标准的混凝土地面,具体参数如表1所示。

1.2 模型网格及求解设置

图4a表示整个发电机空投系统的整体网格划分示意图,其中隐藏了发电机周围布置的蜂窝纸板缓冲垫,与绑带一起将发电机组固定在货架台上面,缓冲垫形状规则,网格都采用正六面体单元。简化的发电机模型由电控箱、柴油机、连接套筒、桨叶等4个部分装配而成,由于这几个部分形状复杂,因此,采用多种不同形式的网格划分方法。其中形状规则的部分采用六面体单元的网格,如电机内部的转轴、弹簧、桨扇盘等;其他结构不规则的部分采用四面体单元的网格,如电箱主体、柴油机、桨叶等,如图4b所示。弹簧是钢丝绳减震器的主体部分,采用多域扫描型网格划分方法(Multizone),由于跌落冲击瞬时应力集中在弹簧,采用较小的网格,单元尺寸为3mm。采用蜂窝纸板缓冲方式的空投模型则在钢丝绳减震器处由大小相同的蜂窝纸板代替,网格采用规则的正六面体单元。假定整个发电机空投跌落过程中绑带是紧紧固定在货架台上不发生脱落分离等情况,两者接触类型采用“bonded”连接在一起,采用自动网格划分方法(Automatic),画出四面体单元的网格,单元尺寸为20mm。

表1 各材料物理参数
Tab.1 Physical parameters of each material

部件	材料	密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	弹性模量/MPa	泊松比	屈服强度/MPa
弹簧	弹簧钢	7 850	21 000	0.3	800
电机转轴	Q235	7 850	21 000	0.3	235
电机固定轴	硅钢	7 480	18 000	0.25	480
电机内轴	10#钢	7 850	21 000	0.3	205
电机磁石	钕铁硼	7 620	18 000	0.28	500
电机其它部件	钛合金	4 620	96 000	0.36	930
缓冲材料	蜂窝纸板	50	60	0.1	—
货架台	尼龙 66	1 140	1 480	0.41	3.10
绑带	锦纶	160	1 260	0.06	—
地面	混凝土	2 300	30 000	0.18	—

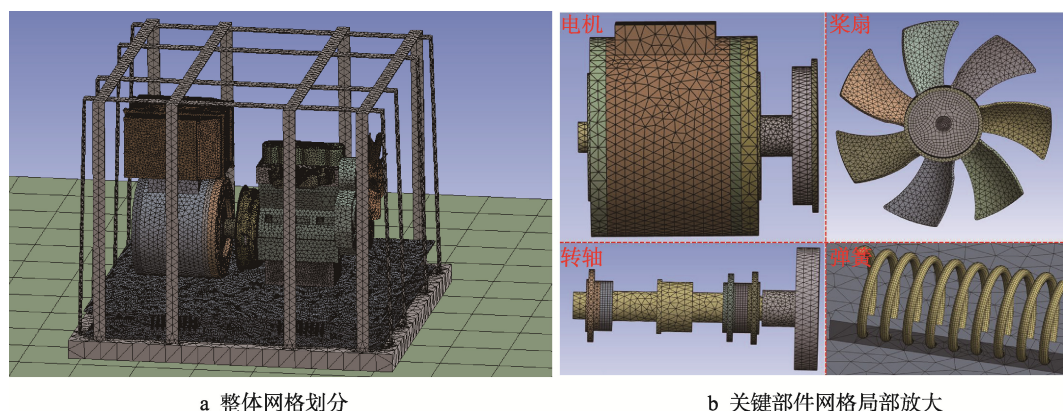


图 4 整个空投系统和关键部件网格划分
Fig.4 Grid division of the whole airdrop system and its key parts

采用 Workbench/LS_DYNA 的任意拉格朗日欧拉算法 (ALE 算法) 模拟计算发电机捆扎在货架台上以一定的速度跌落冲击地面时的变形与发电机组内部各部件损伤破坏情况。假定发电机货架台采用有伞空投的模式, 开伞后以一定的速度自由跌落冲击地面, 通常这个速度在 8 m/s 左右, 由于考虑到横向风速, 实际速度再偏大一点, 因此本模型发电机货架台的初始下落速度为 10 m/s, 模拟跌落高度大概为 5 m, 由于起始时刻空投模型与地面接触, 故整个模型冲击地面的速度等于其初始下落速度 10 m/s; 发电机与货架台之间的接触设置为摩擦接触 (Friction), 为了提高计算速度, 采用 ANSYS 默认接触算法罚函数法 (Pure Penalty)。

2 结果与讨论

2.1 蜂窝纸板缓冲分析

本文选取了 2 种缓冲方案, 分别是发电机底部的钢丝绳减震器和相同体积的蜂窝纸板这 2 种不同类型的缓冲材料, 然后以相同的速度跌落冲击混凝土地面, 分析 2 种不同缓冲方案的防护特性。图 5 为发电机在蜂窝纸板缓冲下跌落冲击地面时各部件的损伤应力图, 其中地面为混凝土。为方便观察发电机应力情况, 隐藏周围缓冲的蜂窝纸板。从图 5a 中可以看

出, 发电机跌落冲击地面时应力主要集中在发电机组的底部、连接转轴处和桨叶连接转轴处。根据图 5a 中应力主要集中的区域, 图 5b 放大了底部应力主要集中处的损伤应力图, 可以发现最大应力也集中在底部电机套筒外壳, 达到 723.7 MPa。另外, 在蜂窝纸板缓冲下发电机跌落冲击地面时发生了桨扇解体的情况, 如图 6 所示, 从图 6 中可以看出, 发电机的桨叶叶片在蜂窝纸板缓冲下冲击地面时发生损伤脱落, 桨叶叶根处最大应力可达到 99.6 MPa。

2.2 钢丝绳减震器缓冲分析

图 7 为发电机在钢丝绳减震器下跌落冲击地面时及弹起后的损伤应力图。图 7a 表示跌落冲击地面整体损伤应力图, 其中地面为混凝土。从图 7a 中可以看出, 钢丝绳减震器里面的弹簧承受应力最大, 由于弹簧压缩吸收大部分冲击势能, 发电机所承受的应力明显减小; 图 7b 表示发电机弹起后的整体损伤应力图, 从图 7b 中可以看出, 货架台上的发电机在受地面碰撞后向上弹起, 绑带和周围缓冲垫的固定使发电机没有弹起太多。图 7c 是冲击地面时发电机底部的应力云图, 应力的主要集中区域与蜂窝纸板基本一致, 发电机底部电机套筒外壳最大应力约为 315.7 MPa, 不到蜂窝纸板缓冲垫的 1/2, 相较于蜂窝纸板, 钢丝

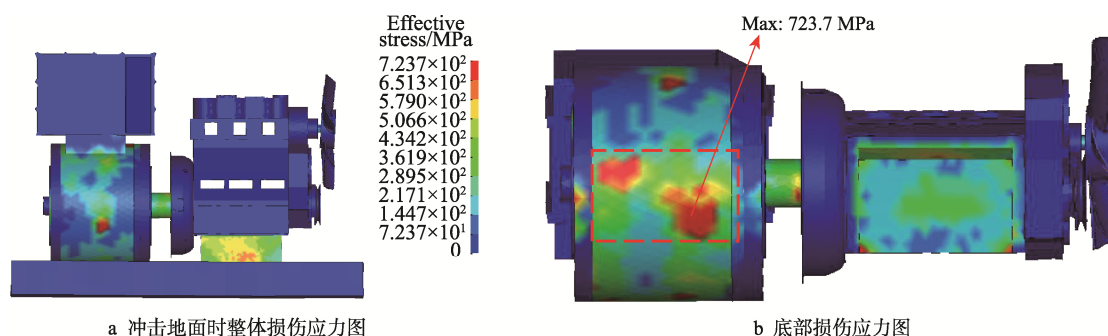


图 5 发电机采用蜂窝纸板缓冲跌落冲击地面的损伤应力图
Fig.5 Damage stress diagram of a generator buffered by honeycomb cardboard dropping and impacting on ground

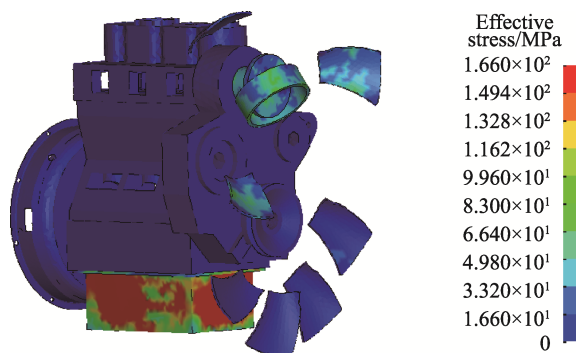


图6 桨叶损伤及应力图
Fig.6 Damage and stress diagram of paddle fan

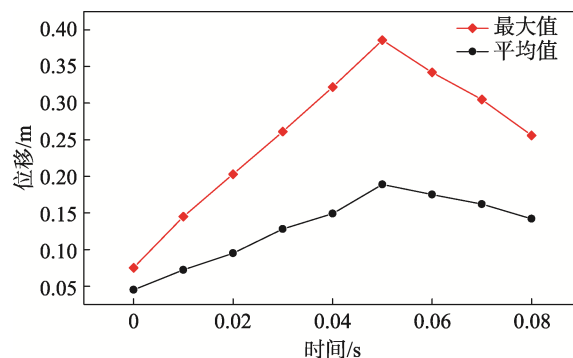
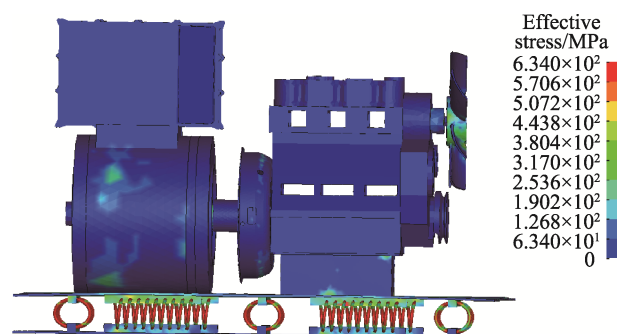
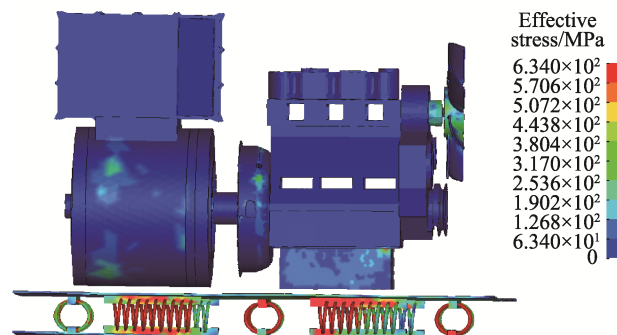


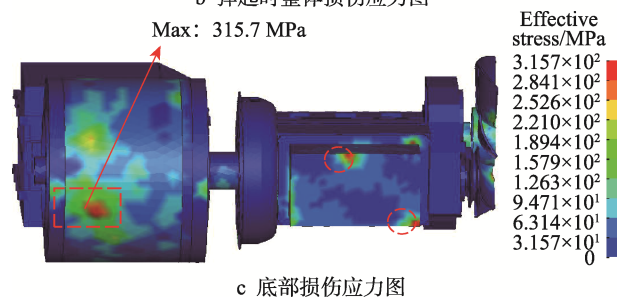
图8 发电机跌落冲击地面位移分布曲线图
Fig.8 Displacement distribution curve of generator dropping and impacting on concrete



a 冲击地面时刻整体损伤应力图



b 弹起时整体损伤应力图



c 底部损伤应力图

图7 发电机采用钢丝绳减震器缓冲
跌落冲击地面的损伤应力图
Fig.7 Damage stress diagram of a generator with
steel wire rope shock absorber dropping and
impacting on ground

绳减震器对发电机的缓冲作用更为明显。图8表示发电机空投跌落冲击地面时位移分布曲线图,可以看出,跌落冲击的过程中,整个发电机捆绑结实,没有脱出平台,曲线的走势也很好地反映了发电机与地面碰撞后弹起的位移趋势。

2.3 2种缓冲方式分析

根据前面的仿真结果,可知钢丝绳减震器对空投发电机的缓冲效果较好,发电机底座承受的最大应力只有采用蜂窝纸板缓冲的1/2左右。而且,采用蜂窝纸板缓冲会造成桨扇叶片的脱落,这可能是因为发电机组左右部分的重量不同,跌落冲击地面时较重的发电机以及电控箱部分将蜂窝纸板压溃较深,从而造成桨扇部分向上翘起,使其与周围缓冲的蜂窝纸板发生碰撞,造成叶片的脱落。发电机在采用蜂窝纸板缓冲方案时应该注重桨叶的防护,防止叶片与周围区域直接碰撞,因此,对桨叶周围加装防护罩是一种十分有效的方案。与蜂窝纸板缓冲方式不同,钢丝绳减震器通过弹簧吸收跌落冲击能量,但是弹簧压紧后会有一次再次释放的过程,这会造成发电机组再次弹起,如图7b所示,因此,采用钢丝绳减震器更要注重整个发电机组的包装捆扎,以防止因为弹簧的多次跳起而造成缓冲包装错位或地面不平时发生倾覆的情况。

3 结语

本文基于ANSYS Workbench/LS_DYNA软件中的显示动力学分析对发电机在不同缓冲材料下空投跌落冲击地面过程进行仿真。研究结果发现,发电机空投跌落冲击应力损伤与缓冲材料的类型存在明显联系,与蜂窝纸板缓冲相比,采用钢丝绳减震器缓冲可以很大程度地减小冲击时的最大应力,但是会存在多次再次弹起的情况,在空投时需充分考虑各种不同缓冲材料和捆绑包装方案。仿真结果表明,采用钢丝绳减震器的发电机可以抵御空投的跌落冲击。发电机跌落冲击混凝土地面时,采用蜂窝纸板和钢丝绳减震器所受最大冲击应力值分别为723.7 MPa和315.7 MPa,钢丝绳减震器对发电机的缓冲效果最为明显,且应力集中在电机底部电机套筒外壳、连接转轴和柴油机底座区域,发电机的设计应注意这个区域的防护。另外,除了在着陆时的冲击影响较大,运输过程中的振动、翻转也有可能造成缓冲包装错位以及发电机组连接部件的松

动,故在拆卸空投平台后应该进行仔细检查。本文采用的方法可应用于空投发电机的安全性设计与评估。

参考文献:

- [1] 刘涛,张宏伟,孙晓旺,等. 车辆载人空降的试验与仿真研究[J]. 兵工学报, 2023, 44(8): 2283-2298.
LIU T, ZHANG H W, SUN X W, et al. Experimental and Simulation Study on Vehicle Manned Airdrop[J]. Acta Armamentarii, 2023, 44(8): 2283-2298.
- [2] 董新东,王宏,林浩,等. 中件空投平台缓冲材料及技术[J]. 包装工程, 2016, 37(17): 30-33.
DONG X D, WANG H, LIN H, et al. Cushioning Materials and Technology of Middle-Sized Pack Airdrop Platform[J]. Packaging Engineering, 2016, 37(17): 30-33.
- [3] NING L M, CHEN J C, TONG M B. Development of an Efficient Contact-Friction Model for High-Fidelity Cargo Airdrop Simulation[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2019, 32(5): 1145-1155.
- [4] 黄民虎. 缓冲包装用柱形空气垫缓冲特性分析与仿真[D]. 西安: 陕西科技大学, 2021.
HUANG M H. Analysis and Simulation of Cushioning Characteristics of Cylindrical Air Cushions for Cushioning Packaging [D]. Xi'an: Shaanxi University of Science & Technology, 2021.
- [5] 汪欣,王广东. 运输投送力量在跨海登岛作战登陆基地开设中的运用研究[J]. 国防交通工程与技术, 2019, 17(5): 12-16.
WANG X, WANG G D. An Application of the Transportation and Projection Power to the Opening of Landing Bases in Sea-Crossing Landing Operations[J]. Traffic Engineering and Technology for National Defence, 2019, 17(5): 12-16.
- [6] 代波,王剑安,王惠方,等. 空降火箭炮武器系统轻量化研究[J]. 火炮发射与控制学报, 2021, 42(2): 106-112.
DAI B, WANG J A, WANG H F, et al. The Lightweight Research on the Airborne Rocket Launcher Weapon System[J]. Journal of Gun Launch & Control, 2021, 42(2): 106-112.
- [7] 刘振光,何兴云,王永勤. 基于 CEL 方法油箱跌落过程结构动态应力分析[J]. 机械, 2023, 50(3): 8-13.
LIU Z G, HE X Y, WANG Y Q. Structural Dynamic Stress Analysis of Fuel Tank During Dropping Process Based on CEL Method[J]. Machinery, 2023, 50(3): 8-13.
- [8] 常天笑,王雨时,闻泉. 弹药空投和投弃落地冲击特性研究综述[J]. 探测与控制学报, 2021, 43(6): 1-12.
CHANG T X, WANG Y S, WEN Q. A Review on Air-dropped and Jettisoned Ammunition Landing Impact Characteristics Research[J]. Journal of Detection & Control, 2021, 43(6): 1-12.
- [9] FUENTES R W C, SHAWLER E K, SMITH W D, et al. Operation Blood Rain Phase 2: Evaluating the Effect of Airdrop on Fresh and Stored Whole Blood[J]. Journal of Special Operations Medicine, 2022, 22(3): 9-14.
- [10] LIU X, ZHANG Z Y, ZHAO Z H. The Uncertain Optimisation of Buffering Characteristics of Landing Airbag in Manned Airdrop[J]. International Journal of Crashworthiness, 2013, 18(3): 225-236.
- [11] 梁旭东. 空降空投物伞耦合系统动力学及稳定性研究[D]. 沈阳: 沈阳航空航天大学, 2019.
LIANG X D. Research on the Dynamics and Stability of Parachute-Cargo Coupling Systems for Airborne and Airdrop Missions[D]. Shenyang: Shenyang Aerospace University, 2019.
- [12] 刘胜祥,王兴业,徐丽丽,等. 蜂窝纸板在空投包装中的应用[J]. 包装工程, 2016, 37(17): 25-29.
LIU S X, WANG X Y, XU L L, et al. Application of Honeycomb Paperboard in the Packaging of Airdrop[J]. Packaging Engineering, 2016, 37(17): 25-29.
- [13] 林洁,左铁东,崔翔,等. 不确定因素下空投系统气囊缓冲仿真研究[J]. 计算机仿真, 2023, 40(10): 82-85.
LIN J, ZUO T D, CUI X, et al. Simulation Research on Airbag Cushion of Airdrop System Under Uncertain Factors[J]. Computer Simulation, 2023, 40(10): 82-85.
- [14] 贾山,高翔宇,陈金宝,等. 低空无伞无损空投包装设计及其自稳和缓冲性能验证[J]. 航天返回与遥感, 2022, 43(2): 1-14.
JIA S, GAO X Y, CHEN J B, et al. Design of Low Altitude Free Drop Packaging and Verification of Its Self-Stability and Cushioning Performance[J]. Spacecraft Recovery & Remote Sensing, 2022, 43(2): 1-14.
- [15] 朱景山,习赵军,吴仲达,等. 水囊组合件空投跌落冲击仿真及优化设计[J]. 包装工程, 2023, 44(7): 307-313.
ZHU J S, XI Z J, WU Z D, et al. Airdrop Impact Simulation and Optimization Design of Water Sac Assembly[J]. Packaging Engineering, 2023, 44(7): 307-313.
- [16] 卢富德,高德. 考虑蜂窝纸板箱缓冲作用的产品包装系统跌落冲击研究[J]. 振动工程学报, 2012, 25(3): 335-341.
LU F D, GAO D. Study on Drop Impact of Packaging System Considering the Cushioning Action of Honeycomb Paperboard Box[J]. Journal of Vibration Engineering, 2012, 25(3): 335-341.