

分类号: S24

学号: 20212109073

密级: 公开

单位代码: 10759

石河子大学

硕士学位论文



自走式采棉机机架布局优化及振动特性分析

学位申请人

裴婷稳

指导教师

毕新胜 教授

李文春 高级工程师

赵鹏达 高级工程师

申请学位类别

专业硕士

专业名称

机械

研究领域

机械工程

所在学院

机械电气工程学院

中国·新疆·石河子

2024年7月

分类号: S24
学号: 20212109073

密级: 公开
单位代码: 10759

石河子大学

硕士学位论文



自走式采棉机布局优化及机架振动特性分析

学位申请人	裴婷稳
指导教师	毕新胜 教授
	李文春 高级工程师
	赵鹏达 中级工程师
申请学位类别	专业硕士
专业名称	机械
研究领域	机械工程
所在学院	机械电气工程学院

中国·新疆·石河子

2024年7月

**Layout optimization and frame vibration characteristics analysis of
self-propelled cotton picker**

A Dissertation Submitted to

Shihezi University

In Partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of

Mater of Mechanics

By

Pei ting-wen

(Mechanical Engineering)

Dissertation Supervisor: Prof. Bi Xin-sheng

Senior engineer. Li Wen-Chun

Senior engineer. Zhao Peng-da

July, 2024

石河子大学学位论文独创性声明及使用授权声明

学位论文独创性声明

本人所提交的学位论文是在我导师的指导下进行的研究工作及取得的研究成果。据我所知，除文中已经注明引用的内容外，本论文不包含其他个人已经发表或撰写过的研究成果。对本文的研究做出重要贡献的个人和集体，均已在文中作了明确的说明并表示谢意。

研究生签名：

裴婷稳

时间： 2024 年 07 月 10 日

使用授权声明

本人完全了解石河子大学有关保留、使用学位论文的规定，学校有权保留学位论文并向国家主管部门或指定机构送交论文的电子版和纸质版。有权将学位论文在学校图书馆保存并允许被查阅。有权自行或许可他人将学位论文编入有关数据库提供检索服务。有权将学位论文的标题和摘要汇编出版。保密的学位论文在解密后适用本规定。

研究生签名：

裴婷稳

时间： 2024 年 07 月 10 日

导师签名：

毕新胜

时间： 2024 年 07 月 10 日

摘要

采棉机是实现棉花机械化采摘的关键核心设备，其发展水平决定了棉花种植全程机械化的进程。由于采棉机结构复杂且振源较多，机架作为主要承载部件，各振源结构都直接或间接安装在机架上。不同振源的振动信号在机架上相互耦合叠加，导致机架振动较为剧烈。机架的剧烈振动影响了整机的操纵稳定性和机械的运行效率。因此，本研究采用有限元计算仿真和试验分析相结合的综合分析方法，对采棉机的振动问题进行了系统研究。根据采棉机各振源的振动机理和响应特性规律，分析各振源在机架上的最优布局。并通过模态试验对机架进行样机验证。本文主要工作内容如下：

(1) 对采棉机主要振源的结构和振动特性进行研究，分析其振动机理，并求解出振源激励频率与转速的相关表达式。在此基础上通过振动试验获得各振源的振动信号，并将采集的信号进行时域和频域分析。从而分析出各振源的激励特性，为后续仿真分析提供理论和试验支撑。

(2) 根据自走式采棉机整机布局和机架设计要求，确定机架的基本结构，并建立三维模型。通过 ANSYS 软件对机架进行仿真分析，研究振源激励的位置对机架振动响应的影响，确定机架最佳结构。对最佳结构的机架进行了静力学分析，着重分析机架的变形和受力较大的位置，并进行结构优化及仿真分析，仿真结果表明：优化后机架的形变量和最大应力满足设计要求。

(3) 通过 ANSYS 有限元仿真和模态试验对采棉机机架结构模态频率和振型进行研究。由计算模态结果和试验模态分析结果可得：机架的试验模态结果与有限元计算模态结果基本一致，且各阶模态振型相似。机架的前 6 阶固有频率在 130-367.5 Hz 范围内，振型以弯曲、扭转模态为主。

(4) 分析不同挡位工况下各振源对机架结构的影响，在机架关键结构位置布置了 19 个测点。通过对测点进行振动测试，获得机架在 XYZ 三个方向上的振动加速度信号，并对这些信号进行时域和频域分析。分析机架结构在不同工况下的振动特性。

关键词：采棉机机架；振动特性；模态分析；布局

Abstract

The cotton picker is the key core equipment to realize the mechanized picking of cotton, and its development level determines the process of the whole mechanization of cotton planting. Due to the complex structure and many vibration sources of the cotton picker, the frame is the main bearing part, and each vibration source structure is directly or indirectly installed on the frame. The vibration signals of different vibration sources are coupled and superimposed on the frame, resulting in severe vibration of the frame. The severe vibration of the frame affects the handling stability of the whole machine and the operation efficiency of the machine. Therefore, in this study, a comprehensive analysis method combining finite element calculation simulation and test analysis was used to systematically study the vibration problem of cotton picker. According to the vibration mechanism and response characteristics of each vibration source of the cotton picker, the optimal layout of each vibration source on the frame is analyzed. The prototype of the frame is verified by modal test. The main work of this thesis is as follows :

(1) The structure and vibration characteristics of the main vibration source of the cotton picker are studied, the vibration mechanism is analyzed, and the correlation expression between the excitation frequency and the rotational speed of the vibration source is solved. On this basis, the vibration signals of each vibration source are obtained by vibration test, and the collected signals are analyzed in time domain and frequency domain. The excitation characteristics of each vibration source are analyzed, which provides theoretical and experimental support for subsequent simulation analysis.

(2) According to the overall layout of the self-propelled cotton picker and the design requirements of the frame, the basic structure of the frame is determined and a three-dimensional model is established. Through the simulation analysis of the frame by ANSYS software, the influence of the position of the vibration source excitation on the vibration response of the frame is studied, and the optimal structure of the frame is determined. The static analysis of the frame with the best structure is carried out, focusing on the analysis of the deformation of the frame and the position where the force is large, and the structural optimization and simulation analysis are carried out. The simulation results show that the deformation and maximum stress of the optimized frame meet the design requirements.

(3) The modal frequency and vibration mode of the frame structure of cotton picker are studied by ANSYS finite element simulation and modal test. From the calculated modal results and the experimental modal analysis results, it can be concluded that the experimental modal results of the frame are basically consistent with the finite element calculation modal results, and the modal shapes of each order are similar. The first six natural frequencies of the frame are in the range of 130-367.5Hz, and the vibration modes are mainly bending and torsion modes.

(4) The influence of each vibration source on the frame structure under different gear conditions was analyzed, and 19 measuring points were arranged at the key structural positions of the frame. Through the vibration test of the measuring point, the vibration acceleration signals of the frame in the three directions of XYZ are obtained, and these signals are analyzed in time domain and frequency domain. The vibration characteristics of the frame structure under different working conditions are analyzed.

Key words: Cotton picker frame; Vibration characteristics; modal analysis; layout

目 录

摘要	I
Abstract	II
第 1 章 绪论	1
1.1 课题研究背景与意义	1
1.2 国内外研究现状	2
1.2.1 大型收获农机装备结构布局优化的国内外研究现状	2
1.2.2 大型收获农机装备机架结构优化国内外研究现状	5
1.3 研究方案	8
1.3.1 研究目标	8
1.3.2 研究内容	8
1.3.3 研究方法	9
1.4 技术路线	9
1.5 本章小结	11
第 2 章 自走式采棉打包机的振源分析	12
2.1 水平摘锭式采棉打包机整机结构及工作原理	12
2.1.1 整机结构	12
2.1.2 工作原理	13
2.2 自走式采棉打包机的整机布局	13
2.2.1 整机总体结构布局要求	13
2.2.2 机架结构的确定	14
2.3 自走式采棉机主要振动部件分析	15
2.3.1 自走式采棉机采摘头的分析	16
2.3.2 自走式采棉机气力输棉装置的分析	17
2.4 采棉机振源分析	18
2.4.1 振源振动试验设计	18
2.4.2 发动机激励特性分析	19
2.4.3 风机激励特性分析	24
2.4.4 采摘头激励特性分析	27
2.4.5 打包系统激励特性分析	31
2.4.6 棉田地面激励特性分析	32

2.5 本章小结	32
第3章 自走式打包采棉机机架静力学分析与模态分析	34
3.1 采棉机机架模型的建立与仿真	34
3.1.1 有限元建模与前处理	34
3.1.2 材料属性的确定	34
3.1.3 机架结构网格划分	35
3.1.4 施加载荷和边界条件	35
3.2 自走式采棉机振动特性分析	37
3.2.1 试验方案	37
3.2.2 试验结果分析	38
3.2.3 方差分析	39
3.3 静力学验证	41
3.3.1 满载弯曲工况下静力学分析	42
3.3.2 偏载弯曲工况	42
3.3.3 满载过障工况分析	43
3.3.4 卸棉工况分析	43
3.4 机架模态分析	44
3.4.1 机架模态分析方法	44
3.4.2 机架约束模态模型简化	45
3.4.3 机架模态的求解分析	45
3.5 机架模态试验	46
3.5.1 机架试验模态分析方法	46
3.5.2 试验系统与试验过程	47
3.5.3 采棉机机架试验模态方法	49
3.5.4 频响曲线的参数识别与验证	51
3.5.5 有限元分析结果与试验模态结果对比	52
3.6 本章小结	52
第4章 自走式采棉机机架振动试验	53
4.1 机架测点分布	53
4.2 机架振动时域分析	54
4.3 机架振动频域分析	57
4.4 本章小结	63
第5章 结论与展望	64
5.1 结论	64

5.2 展望	65
参考文献	66
附录 1	71
附录 2	73
致谢	76
作者简介	77

第1章 绪论

1.1 课题研究背景与意义

棉花在我国国民经济中占有重要地位，是关乎国计民生的重要农产品，同时也是棉纺织工业的主要原料，其产业链涉及多个行业^[1]。目前，我国不仅是世界上主要的棉花生产国，也是最重要的棉花消费国，而发展棉花生产的根本出路在于机械化^[2, 3]。“世界棉花看中国，中国棉花看新疆”，截至2023年，新疆棉花种植面积为 $2369.3 \times 10^3 \text{ hm}^2$ ，占全国棉花种植面积的85%。棉花产量511.2万吨，占全国棉花总产量的91%，创历史新高^[4]。因此，棉花生产全程全面机械化是棉花生产发展的必由之路，将全程全面机械化发展作为棉花生产提质增效的关键举措，促进棉花生产实现提档升级^[5]。积极推广和发展机械采棉技术更加促进棉花高效高产发展^[6]。

采棉机是棉花机械化收获关键核心装备。打包式采棉机能将采摘的棉花直接打包成捆实现采包一体化，在提高采棉效率的同时并解决了落地棉采净率低的问题^[7]。国产采棉机行业正不断加强自主创新能力和产业能力，极大地提高了国产采棉机的竞争能力。其中，中农机、钵施然、沃得等国产品牌采棉机已逐渐成为棉花采收的主力军^[8, 9]。



图 1-1 国产采棉机

Fig.1-1 Domestic cotton picker

采棉机工作时，机架受到来自发动机和其他旋转部件所产生惯性力激励的影响。这些激励相互作用会导致机架出现振动耦合现象，从而使机架振动状况变得更加复杂。特别是当振源的激励频率处于机架固有频率范围内时，机架将会产生共振，导致采棉机整机产生较大的振动。据统计，80%的结构损坏是由疲劳损坏引起的^[10]。在较高的动载荷负载高强度工作的情况下，持续强烈的振动会导致结构的疲劳损坏，降低机械的工作性能，缩短机械的使用寿命，对机械的工作稳定性和整机性能造成较大影响^[11, 12]，采棉机的机架断裂图如图 1-2 所示。



图 1-2 机架断裂

Fig.1-2 Frame fracture

由于采棉机结构复杂且振源较多，机架作为承载部件，各振源结构直接或间接安装在机架上^[13]，机架性能优劣直接影响采棉机稳定性。目前国内关于采棉机机架的研究相对较少，因此本研究采用了试验分析和有限元计算仿真的综合方法，对采棉机收获过程中采摘头、发动机、风机、传动系统等振源的动载荷对机架的激振耦合影响进行了系统分析，研究机架在多源激励载荷作用下的振动机理和响应，探索机架及其各振源的振动特性，进一步分析其结构特征。不仅可以降低采棉机整机的振动，提高其综合性能和工作可靠性。同时还实现了国产采棉机自主创新能力的提高，提升了大型自走式农机装备的研发能力。

1.2 国内外研究现状

1.2.1 大型收获农机装备结构布局优化的国内外研究现状

整机布局是指通过合理设计规划整机各部件的位置和连接方式，以实现整体结构紧凑、重心最低、稳定运行，并满足各项功能指标要求^[14]。

1998年，王学农和陈发^[15]将9976型采棉机的发动机横向布置在底盘上，优化了机器后部的空间。使设计者得以将燃油箱、淋润剂箱和润滑油箱布置在机器的后部，同时将前轴重量转移到后轴，以改善整机的重量分配和机器的稳定性。

2002年，杜辉^[16]等人了解决窄行距六行小麦精播机整体配置拥挤复杂的问题。对现有两种布局方式（直线式布局和前后交错布局）进行了综合分析后。最终采用了“前四后二”型整机布局。通过加大了机架前后横梁的间距和缩短了播种单体的纵向尺寸。有效缓解了播种机整体布局拥挤的问题，同时改善了小麦精播机组作业时的纵向稳定性。

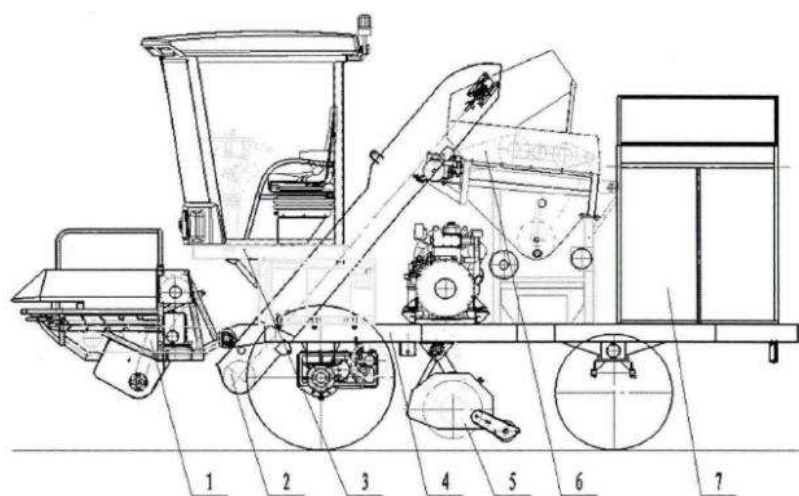
2007年，曾志强^[17]在前人研究的基础上，在断尾机构前置的情况下，通过虚拟仿真的方法对小型甘蔗收获机的运动学、动力学进行了分析、研究。并且对甘蔗物流进行

了仿真分析，总体的重心位置和稳定性参数进行了测量和计算，找出最佳的整体布局，从而保证了结构的合理性和物流的顺畅。

2012年，范志达^[18]根据整机布局设计的要求，采用动力学分析理论确定了甘蔗收获机切割器安装位置，以切割器的动态响应最小为目标，对车载振源的布局进行了优化。与原有样机相比，刀盘的振动幅值由原来的2 mm减小至0.8 mm。

2016年，麻芳兰^[19-20]等人为了提高甘蔗收获机刀盘的刚性，对不同振源的布置位置进行理论分析。建立了整机的动力学模型，重点分析不同振源布置方式对刀盘动态特性的影响。研究发现，采用切割器简支梁安装方式、发动机中置和剥叶系统轴负式布局，有利于提高刀盘的刚性。其改进使得刀盘的振动幅度从2 mm降至0.8 mm，明显改善了刀盘的动态性能。

2016年，李山山^[21]以自走式玉米收获机为研究对象，分析自走式玉米收获机的整机结构和动力传递路线特点，确定其主要结构设计参数，并在此基础上建立自走式玉米收获机的整机动力学模型。进行了自走式玉米收获机的总体结构布局分析，并利用布局问题的研究成果构建自走式玉米收获机的整机结构布局优化数学模型，在此基础上探讨布局优化模型的求解算法。



1.割台 2.升运器 3.驾驶台 4.机架 5.还田机 6.剥皮机 7.粮箱

图 1-3 自走式玉米收获机结构简图

Fig.1-3 Self-propelled corn harvester

2018年，胡陈君^[22]以电动微耕机样机为研究对象，基于其结构和性能参数，对整机结构进行了理论设计。以扶手力和振动为电动微耕机重心位置的优化标准，研究了扶手力、振动和重心位置之间的关系，并以此为依据对电动微耕机进行布局优化。

2019年，张昆昆^[23]通过研究现有联合收获机部件布置方式，确定了荞麦收获机三种整机布局方案：方案一（发动机前置，油箱后置）、方案二（发动机中置，油箱侧置）和方案三（发动机后置，油箱前置）。并利用 ADAMS 和 Workbench 对其进行仿真分

析，得出方案三为最佳的整机布局方案。

2021年，赖晓^[24]等人通过试验研究了液压油缸、发动机和物流架等构件的安装位置对切割系统轴向振动的影响规律。试验结果表明：3个因素对甘蔗收获机刀盘轴向振幅的影响显著程度大小依次为物流架安装位置，液压油缸安装位置，发动机安装位置。与最劣布局相比，最优安装布局可有效降低刀盘轴向振动幅值40.8%，同时综合切割质量评定值 R_0 也降低了16.9%。



图 1-4 液压油缸，激振电机，物流架的安装位置

Fig.1-4 Installing position of hydraulic cylinder, actuating engine and logistics frame

2022年，胡登兴和王树兰^[25]针对新能源汽车底盘布局进行研究，并分析了机械传动底盘布局、无变速器型底盘布局、无差速器型底盘布局以及轮毂电机型底盘布局四种不同的汽车底盘布局方式的特点。

2022年，周祖岳^[26]等为减小再生稻收获机作业时的碾压面积，设计了一种履带式再生稻收获机，并对工作部件进行设计布局，对柴油箱、液压油箱设计3种布局方式：(a) 液压油箱前置、柴油箱后置（居左）；(b) 液压油箱前置、柴油箱后置（居右）；(c) 液压油箱/柴油箱后置。比较3种布局的横向侧翻极限倾角，液压油箱前置、柴油箱后置时再生稻收获机的横向侧翻极限倾角最大，布局合理。

2022年，董昭^[27]提出了一种履带式水田荸荠收获机的结构方案，以满足荸荠机械化收获的农艺要求。该方案采用上中下三层结构，各个零部件被合理地布置。其中挖掘收获机构内置于整机内部，并采用主副双机架设计的布局。

1998年，Jang, Cheon-Soo等^[28]使用CAE软件对前横梁（汽车底盘的子框架）进行建模，计算求解得到机构的静载荷，采用ADAMS进行动态载荷分析以对机构进行有限元分析优化。并通过试验测得的负载曲线数据对横梁进行耐久性分析优化，优化后，重量减轻了30%，零件数量从19个减少到9个。

2011年，Liu J等^[29]基于Pro/E软件，构建了2500HP压裂车主车架和副车架的三维模型。采用拓扑优化方法，确定了副车架的布局，并分析了主车架和副车架之间连接器的数量和位置，分析结果表明，在不增加主车架和副车架连接器数量的情况下，可以增强底盘的承载能力。

2016年, Wei Yu 和 Ning Sun^[30]根据车辆底盘控制系统的功能不同, 将复杂的底盘控制问题分解为若干个子控制系统。减少不同功能子系统之间的运行冲突, 快速有效地使车辆获得最佳性能。

2019年, Zudova Lada 等^[31]提出了一种翼箱混合(格子-桁架)结构布局优化算法。确定每个布局承重元件的尺寸, 并寻找接口位置, 从而提供翼箱结构的最小重量。采用混合结构布局的翼箱截面长度变为原翼箱的65%~73%。该结构满足约束条件, 与传统结构布局相比具有重量优势。

2021年, Deyi Zhou 等^[32]研究了三排四轮驱动(4WD)玉米收割机的行走传动系统布局, 并对收割机驱动轮滑移的四种状态进行了仿真分析。通过对四轮驱动玉米收割机应用转矩分配控制, 可显著减少驱动轮打滑时的调整时间, 极大提高玉米收割机的田间适应性和作业质量。

2022年, Pengfei Wang 等^[33]和 Zhengtao Yang 等^[34]对联合收割机的电气化、智能化改造, 采用电机和减速器的组合方式, 简化了安装方案。对加减速两种工况进行有限元分析, 提出了基于车辆行走速度自动调节采收速度的电动驱动方法。最后, 通过田间小麦收获试验, 验证了电动改造的正确性。

综上所述, 收获机械中各部件的相对位置对于整机稳定性和重心位置有较大影响。现有的研究在收获机械的整机性能评估、驱动动力分配、结构参数建模等方面有许多成果。但针对收获机械振源安装位置对整机振动影响的规律的相关研究较少。因此本文对采棉机机架及各振源进行动力学建模, 并将动载激振力作为输入源进行仿真研究, 以优化各振源的结构参数和质量分布, 对研究采棉机在多源激励下的振动响应具有重要意义。

1.2.2 大型收获农机装备机架结构优化国内外研究现状

振动在设备故障中占了很大比重, 是影响设备安全、稳定运行的重要因素。通过对振动分析, 可以对机械故障进行检测。国内对农业机械振动特性的研究起步较晚, 一些农业机械的振动研究较少。目前, 对振动的研究大部分是通过 ANSYS 软件分析模型, 模态试验验证模型准确性, 优化机构使其振动频率避开共振频率, 从而防止共振。最后, 对优化后的机构进行模态试验, 看是否满足要求。

2015年, 周林^[35]对玉米收获机底盘车架的结构强度和疲劳寿命展开了深入研究。通过三维建模软件对底盘机架进行建模, 并进行模态分析以确定最大模态变形位置, 静力学分析以确定应力集中位置。对车架关键部件进行了优化设计, 使得在满足疲劳可靠性要求的前提下, 该部件质量减少了24%。

2016年, 臧世宇^[36]等为校核谷物联合收割机脱粒机机架的强度特性, 运用 P/ROE 软件建立机架的三维模型, 并导入到 ANSYS Workbench 中进行有限元静力学分析, 得

到该结构的变形、应变云图。并运用拓扑优化方法对机架进行轻量化设计。经过优化后,机架的质量减少了20%。

2016年,李兴凯^[37]等为了减小小区小麦育种收获机工作过程中的振动,对其作业可靠性、育种试验结果测定产生干扰。利用Solidworks软件对育种收获机机架进行参数化建模,结合有限元分析软件ANSYS workbench提取出机架的前10阶固有频率和模态振型。通过正交试验进行结构优化,从而降低机架固有频率,防止共振。该研究可以为小区育种收获机机架结构的设计与优化提供参考。

2018年,李琳琳^[38]等为提高矮化密植红枣收获机的工作性能,建立了机架有限元模型并进行静力学分析和模态分析,根据分析结果,利用design-expert统计学软件进行分析和优化设计,获取机架各构件厚度的最优参数组合;分析结果表明,优化设计后机架质量降低11.17%,30 Hz时最大变形量减小79.848%,明显改善了机架的振动特性。

2019年,冯伟^[39]等针对小型收割机普遍存在整车质量重、燃油消耗大、燃油经济性较差等问题。以小型收割机底盘机架为研究对象,建立机架有限元模型,计算分析模态,获得共振频率及模态振型,测试试验模态,验证模型的准确性,通过优化设计软件ISIGHT,对机架进行轻量化设计,使得机架重量下降22.9%,为农机具轻量化设计提供理论依据和技术支撑。

2021年,朱荣金^[40]以水稻联合收割机底盘机架作为研究对象,在保证机架整体的强度、刚度和动态特性的前提下,通过使用轻质材料和先进的优化算法对其进行整体的轻量化优化设计,优化后机架的强度和刚度均有明显提高,并且底盘机架整体应力分布更加均衡。

2023年,侯杰^[41]等设计了一种多作物割台,通过对关键部件进行设计与分析,确定割台伸缩、接穗板及连杆机构的具体参数。开展了割台振动试验和田间收获试验。试验表明:在发动机低转速(1800 r/min)时割台振动以收割机共振为主;高转速(2600 r/min)时以振源影响为主,其中切割器的往复运动是主要振源。

2023年,周建飞^[42]建立了“主枝一曲柄滑块式振动收获机”动力学模型和“果柄一果实”振动模型。发现主枝激振点部位受力大小和主枝消耗的振动能量的影响因素。确定了激振点位置和激振频率对果枝振动加速度响应和振动能量传递的影响:(1)激振点与主枝基部的距离随着激振频率的增加而增大。(2)振动能量从主枝传递到二级分枝的效率随着激振频率的增加而减小。

2023年,谌逸凡^[43]利用振动模态分析方法,对油菜割晒机在作业工况下各激励源的激励特性以及对割台框架振动的影响进行了分析。并对割台进行了静力学分析、模态分析以及振动仿真分析。为了优化割台结构,进行了四因素四水平试验,并分析了支撑梁、钢材厚度与割台模型第一阶固有模态频率、最大振幅之间的关系。最终确定了机架各梁厚度的最优参数组合,使得改进后的割台机架振动幅值明显降低。