

分类号: TH13
学号: 20222109035

密级: 公开
单位代码: 10759

石河子大学

硕士学位论文



采棉机后桥传动系统动力学特性分析 及优化设计

学位申请人	郭逸
指导教师	张宏文 教授 陈维涛 副教授 王永政 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
2025年6月

分类号: TH13
学号: 20222109035

密级: 公开
单位代码: 10759

石河子大学

硕士学位论文



采棉机后桥传动系统动力学特性分析 及优化设计

学位申请人	郭逸
指导教师	张宏文 教授 陈维涛 副教授 王永政 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
2025年6月

**Investigation into the Dynamic Characteristics and Optimal Design
of the Rear Axle Drive System for Cotton Pickers**

A Dissertation Submitted to

Shihezi University

In Partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of

Master of Engineering

By

Guo Yi

(Mechanical Engineering)

Dissertation Supervisor: Prof. Zhang Hong-wen

June, 2025

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

本人所呈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：郭逸

时间：2025年5月25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：郭逸

时间：2025年5月25日

导师签名：张岩文

时间：2025年5月25日

摘要

新疆是我国最大的优质棉生产基地，棉花机械化采收已经成为现代农业发展的重要趋势。后桥作为采棉机的关键传动部件与主要承载部件，其传动系统的动力学特性直接影响采棉机在复杂工况下的作业稳定性。针对国产采棉机齿轮传动系统振动过大和轮齿断裂等故障频繁发生这一问题，本文以采棉机后桥传动系统为研究对象，提出了一种总体传动系统方案并构建了总成结构，建立了系统的动力学模型并分析了动力学特性，根据振动响应情况对系统进行了轮齿修形优化设计，搭建了采棉机后桥传动系统振动试验台对建模准确性和优化合理性等理论分析结果进行验证。本研究可为预测采棉机后桥传动系统振动响应和实现减振降噪提供理论支持，并为国产采棉机齿轮传动系统的优化设计提供实践参考。本文主要研究内容如下：

(1) 采棉机后桥传动系统设计。基于现有结构提出了一种采棉机后桥总体传动系统方案，其中液压驱动系统采用变量泵-变量马达形式的容积节流调速回路，传动系统采用减速箱-主减速器-轮边减速器三级齿轮传动系统。构建了包含传动系统关键零部件、支承部件和转向部件在内的采棉机后桥总成结构，通过设计合理的机械传动比和扭矩传递路径，有效实现降速增扭的功能。

(2) 系统动力学模型建立与动力学特性分析。考虑啮合刚度、传动误差、啮合阻尼和齿侧间隙等非线性激励，利用 ABAQUS 软件进行齿面加载接触分析获取激励参数，并考虑旋转机械陀螺效应，采用有限元节点法构建包含齿轮转子-齿轮啮合副-传动轴-支承轴承的动力学模型。通过 Campbell 图分析系统固有频率和临界转速等固有特性，采用 Newmark-beta 法求解运动方程分析振动位移、速度和加速度等振动特性。在额定工况下，第二级、第三级齿轮-转子系统振动响应分别呈现周期运动和准周期运动，第一级齿轮-转子系统呈现混沌运动，且在 750-1180 rpm 和 2210-2500 rpm 转速范围内振动位移 RMS 值曲线存在跳跃现象。

(3) 系统轮齿修形优化设计。阐述齿廓修形和齿向修形的基本原理，结合 Romax 软件遗传算法 V2 确定最佳修形量方案，改善齿轮载荷分布和应力集中问题，将优化后的传动误差和啮合刚度激励参数代入系统动力学模型，得到修形后第一级齿轮-转子系统振动响应从混沌运动转变为稳定单一周期运动，振动位移 RMS 值响应曲线未出现跳跃现象，显著优化系统动力学特性。

(4) 试验台搭建与振动响应试验。设计试验方案并搭建采棉机后桥传动系统振动试验台，测量关键节点处的振动加速度，对比理论结果与试验数据。理论值在振动趋势、峰值及共振区域与试验值显著相似，定量误差源于试验条件和模型简化。修形后的系统振动加速度 RMS 试验值曲线总体降幅达到 34.24%，轮齿修形实际改善了振动响应。验证了模型准确性和优化合理性。

关键词：采棉机后桥；传动系统；动力学特性；轮齿修形优化；振动试验

Abstract

Xinjiang serves as the largest production base for high-quality cotton in China, and mechanized cotton harvesting has emerged as a critical trend in the development of modern agriculture. The rear axle constitutes the key transmission component and primary load-bearing part of the cotton picker. The dynamic characteristics of the transmission system directly influence the stability of the cotton picker under complex working conditions. In response to issues such as excessive vibration and frequent faults like tooth breakage in the gear transmission systems of domestic cotton pickers, this thesis focuses on the drive system of the cotton picker's rear axle as the research subject. An overall drive system scheme is proposed, and the assembly structure is constructed. A system dynamic model is established to analyze its dynamic characteristics, and an optimization design for gear tooth modification is conducted based on vibration response. A vibration test bench for the rear axle drive system of the cotton picker is established to verify theoretical analysis results, including modeling accuracy and optimization rationality. This study provides theoretical support for predicting the vibration response of the cotton picker's rear axle drive system and achieving vibration and noise reduction, while also offering practical references for optimizing the gear drive system of domestic cotton pickers. The primary research contents of this thesis are summarized as follows:

(1) Design of the rear axle transmission system of the cotton harvester. An overall transmission system scheme for the rear axle of the cotton harvester is proposed based on the existing structure. The hydraulic drive system employs a volumetric throttling speed control circuit using variable pumps and motors, while the transmission system utilizes a three-stage gear transmission system comprising a reducer box, main reducer, and wheel-side reducer. The structure of the rear axle assembly of the cotton picker, which includes key components of the transmission system, supporting parts and steering parts, has been constructed. By designing a reasonable mechanical transmission ratio and torque transmission path, the function of reducing speed and increasing torque has been effectively achieved.

(2) Establishment of the system dynamic model and analysis of dynamic characteristics. Considering meshing stiffness, transmission error, meshing damping and tooth side gap and other nonlinear excitation, ABAQUS software was used to carry out tooth surface loading contact analysis to obtain the excitation parameters, and considering the gyroscopic effect of rotating machinery, a dynamic model including gear rotor-gear meshing pair, drive shaft-support bearing was constructed by finite element node method. Campbell diagram was used to analyze the natural characteristics of the system, such as natural frequency and critical speed, and Newmark-beta method was used to solve the motion

equation to analyze vibration characteristics such as displacement, velocity and acceleration. Under rated working conditions, the vibration response of the second-stage and third-stage gear-rotor system presents periodic motion and quasi-periodic motion, respectively, while the first-stage gear-rotor system presents chaotic motion, and the vibration displacement RMS value curve has a hopping phenomenon in the speed range of 750-1180 rpm and 2210-2500 rpm.

(3) Optimization design of system gear tooth profile modification. The basic principles of tooth profile modification and tooth direction modification were described, and the optimal modification amount was determined by combining genetic algorithm V2 of Romax software to improve the gear load distribution and stress concentration. The optimized transmission error and meshing stiffness excitation parameters were inserted into the system dynamics model, and the vibration response of the first stage gear-rotor system was changed from chaotic motion to stable single period motion after modification. The response curve of vibration displacement RMS value does not appear jumping phenomenon, which significantly optimizes the dynamic characteristics of gear system.

(4) Test bench construction and vibration response test. Design the test scheme and build the vibration test bench of the rear axle drive system of the cotton picker, measure the vibration acceleration at the key node, and compare the theoretical results with the test data. The theoretical values are significantly similar to the experimental values in the vibration trend, peak value and resonance region, and the quantitative errors are due to the test conditions and model simplification. The overall reduction in the RMS value curve of vibration acceleration of the modified system reaches 34.24%, and the actual improvement in vibration response by tooth profile modification is verified. The accuracy and optimization rationality of the model are verified.

Key words: Cotton picker rear axle; Transmission system; Dynamic characteristics; Gear tooth modification optimization; Vibration test

目录

摘要.....	I
Abstract.....	II
目录.....	IV
第 1 章 绪论.....	1
1.1 研究背景及意义.....	1
1.1.1 课题来源.....	1
1.1.2 研究背景.....	1
1.1.3 研究意义.....	3
1.2 国内外研究现状.....	3
1.2.1 重载农机后桥研究现状.....	3
1.2.2 后桥齿轮传动系统振动噪声研究现状.....	5
1.2.3 齿轮传动系统动力学研究现状.....	6
1.3 研究目的及内容.....	8
1.3.1 研究目的.....	8
1.3.2 研究内容.....	8
1.3.3 拟解决的实际问题.....	9
1.4 研究方法及技术路线.....	9
1.4.1 研究方法.....	9
1.4.2 技术路线.....	10
1.5 本章小结.....	11
第 2 章 采棉机后桥传动系统设计.....	12
2.1 前言.....	12
2.2 后桥传动系统方案设计.....	12
2.2.1 现有后桥传动系统结构分析.....	12
2.2.2 总体传动系统方案设计.....	14
2.3 后桥总成结构构建.....	16
2.3.1 传动系统关键零部件结构.....	17
2.3.2 支承部件结构.....	21
2.3.3 转向部件结构.....	22
2.4 本章小结.....	24

第 3 章 采棉机后桥传动系统动力学特性分析	25
3.1 前言	25
3.2 采棉机后桥传动系统动力学建模	25
3.2.1 齿轮-转子建模	25
3.2.2 齿轮副啮合作用建模	26
3.2.3 传动轴建模	29
3.2.4 支承轴承建模	31
3.2.5 传动系统动力学模型	32
3.3 采棉机后桥传动系统动力学分析	35
3.3.1 系统固有特性分析	35
3.3.2 系统振动特性分析	37
3.4 本章小结	42
第 4 章 采棉机后桥传动系统轮齿修形优化设计	43
4.1 前言	43
4.2 轮齿修形基本原理	43
4.2.1 齿廓修形基本理论	43
4.2.2 齿向修形基本理论	44
4.3 基于 Romax 遗传算法 V2 的轮齿修形优化设计	45
4.3.1 轮齿修形优化设计具体步骤	45
4.3.2 轮齿修形优化设计结果分析	48
4.4 修形齿轮传动系统动力学特性分析对比	50
4.5 本章小结	51
第 5 章 采棉机后桥传动系统动力学特性试验验证	53
5.1 前言	53
5.2 采棉机后桥传动系统振动响应试验	53
5.2.1 试验方案	53
5.2.2 试验台搭建	55
5.3 理论结果与试验结果对比分析	56
5.3.1 动力学模型准确性验证	56
5.3.2 轮齿修形优化合理性验证	59
5.4 本章小结	61
第 6 章 总结与展望	62
6.1 总结	62
6.2 展望	63

参考文献.....	65
致 谢.....	70
作者简介.....	71

第 1 章 绪论

1.1 研究背景及意义

1.1.1 课题来源

本文研究课题来源于：

(1) 兵团科技攻关“揭榜挂帅”项目，农用大型高端四轮驱动重载后驱动桥关键技术攻关（JBGS-2022004）。

(2) 兵团农机研发制造推广应用一体化项目，国产六行打包采棉机四轮驱动重载行走底盘国产化研发推广（NY240612-01）

1.1.2 研究背景

新疆是我国最大的优质棉生产基地，具有得天独厚的条件。2024 年新疆全区棉花种植面积达 2447.9 千公顷，占全国 86.25%^[1]。近十年，新疆棉花播种面积与棉花产量占全国比重呈现逐年稳步增长的趋势，如图 1-1 所示。随着我国农业机械化水平的蓬勃发展，新疆棉花机采率连年攀升，机械化收获已经成为现代农业发展的重要趋势^[2]。2024 年底全疆采棉机保有量超过 8000 台，棉花机采率达到 90%^[3]。

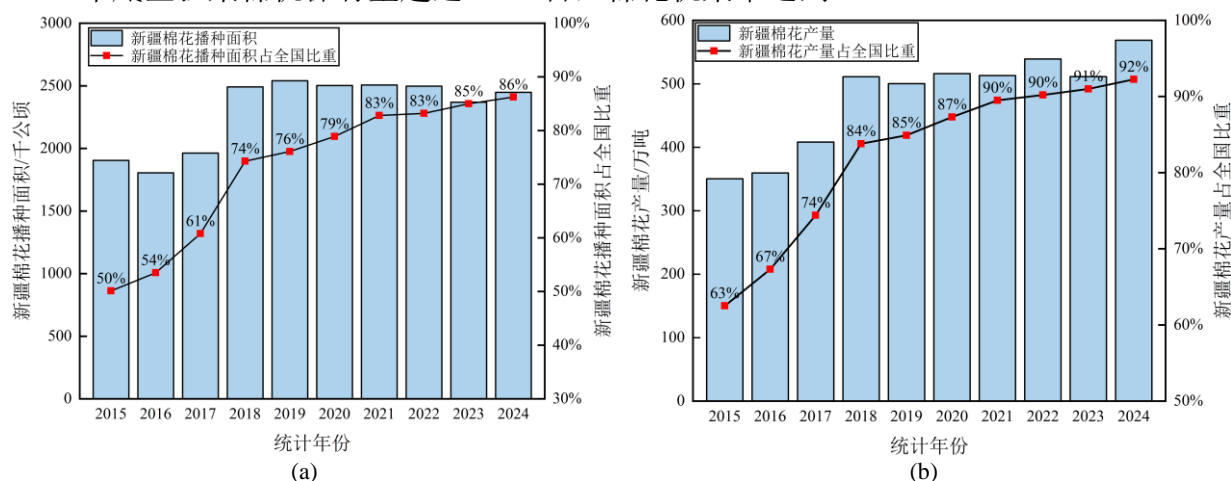


图 1-1 近十年新疆棉花播种面积与棉花产量占全国比重(a)近十年棉花播种面积, (b)近十年棉花产量
Fig. 1-1 The proportion of cotton sown area and cotton output in Xinjiang in recent ten years. (a) cotton sown area in the last ten years, (b) cotton production in the last ten years

后驱动桥是大型重载农业机械的主要动力传输部件和承载支撑部件^[4]，由液压系统、传动系统、转向系统、支撑系统及控制系统等组成，它将液压系统的输出动力经传动系统降速增扭，并改变传动方向后分配给左、右驱动轮，并且允许左、右驱动轮以不

同转速转动，提高农业机械在复杂工况下行驶与转向的稳定性、平顺性。采棉机作为大型高端智能农机，后驱动桥作为其底盘关键部件，为保证采棉机在新疆田间复杂工况下作业的稳定性和平顺性，采棉机后驱动桥的关键技术攻关显得尤为重要。现有采棉机后驱动桥如图 1-2 所示。



图 1-2 现有采棉机后驱动桥 (a)前侧图, (b)后侧图

Fig. 1-2 Existing cotton picker rear drive axle.(a) front side view,(b) back side view

齿轮传动作为机械传动的核心部件，广泛应用于重载农业机械领域，其动力学特性直接影响系统的运行效率、稳定性和使用寿命。国产重载农机后驱动桥虽已具备独立研发、制造的能力，但大部分仅限于小吨位，总体传动稳定性低，后桥齿轮传动系统振动过大和轮齿断裂等故障频繁发生，尤其是针对新疆田间作业的四轮驱动采棉机后桥传动系统的动力学特性研究存在不足，难以满足大型高端农业机械的现代化、智能化发展需求。目前，农业机械领域生产的后驱动桥大部分载荷能力较低，且多采用传统式驱动，产品可靠性、通用性、适应性差，与国外 John Deere、CASE、New Holland 等企业研制的传动性能稳定的高端智能重载农机独立驱动悬浮式转向后桥存在较大差距。在中美贸易战、科技战的大背景下，国外企业对国内企业加紧了技术限制，在一些领域已形成技术壁垒，严重阻碍了我国大型高端农业机械装备向现代化、智能化的发展进程。《中国制造 2025》实施纲要把高端智能农机装备列为重点发展的十大领域之一^[5]，“十四五”科技发展规划中将农业关键技术与高端智能农机装备也被列为重点研发计划^[6]。农业机械底盘的研发水平是衡量农业现代化与智能化水平的关键指标，全球领先的农业装备国家都将底盘核心技术的研发作为大型高端智能农机发展的重点方向，后桥传动系统动力学特性研究是其重要组成部分。

采棉机后桥传动系统主要是利用空间啮合齿轮传动来实现变量液压马达与后轮之间动力传递的换向、扭矩的增加和转速的降低。后驱动桥作为采棉机底盘关键部件，应抑制因路面不平导致的底盘冲击载荷，同时降低由行驶速度与路况耦合作用所导致的低频振动效应，从而提高采棉机行驶的平顺性和稳定性，提高采棉机作业质量，实现采棉机后桥独立驱动，但由于其工作环境导致动力学问题突出，齿轮传动系统振动过大和轮齿断裂等故障频繁发生，影响采棉机的服役性能和使用寿命，改善动力学特性是采棉机后桥齿轮传动系统设计制造的关键技术难题。

1.1.3 研究意义

(1) 理论意义

重载农机面临高负载、复杂工况，其齿轮传动系统振动、噪声及疲劳寿命问题突出，现有理论对时变啮合刚度、传动误差等非线性激励因素对系统振动性能的影响分析有待完善，针对采棉机传动系统的齿轮动力学研究仍较为有限。因此本文以采棉机后桥为研究对象，建立更精确的传动系统动力学模型，预测系统在复杂工况下的振动响应，分析设计参数、工况参数与系统振动响应之间的关联规律，提出改善动力学特性的优化方法，为深入研究采棉机后桥传动系统齿轮动力学特性、完善齿轮系统动力学研究体系提供有价值的理论支持。

(2) 实践意义

目前我国采棉机后桥研发仍存在不足，后桥传动系统易出现振动、噪声及传动效率低等问题，影响作业性能和使用寿命，而针对采棉机后桥齿轮传动系统动力学特性研究在一定程度上可为其提供实践应用参考。因此本文以采棉机后桥为研究对象，以齿轮系统动力学建模为基础，研究采棉机后桥动力学特性，寻求对采棉机后桥减振降噪的解决方法，为解决采棉机后桥传动系统振动过大和轮齿断裂等问题、优化设计后桥传动系统提供有价值的实践参考。

1.2 国内外研究现状

针对采棉机后桥齿轮传动系统动力学特性研究的重点和难点，本部分分别从采棉机后桥研究现状、后桥齿轮传动系统振动噪声研究现状、齿轮传动系统动力学研究现状三个方面来阐述国内外研究现状。

1.2.1 重载农机后桥研究现状

在农业机械领域，如今市面上先进的重载农机多采用组合式驱动后桥^[7]，此种驱动方式该布置形式取消了离合器和变速器，把动力源与固定减速比的传动系统集成为一个整体，动力源的输入转速及扭矩直接通过固定减速比的由减速箱、主减速器、差速器、半轴、轮边减速器组成的传动系统降速增扭分配给后轮转动，大大缩短了动力源输入动力到后轮的传递路径，具有传动效率高、转速调节方便的优点，实现大型重载农机的四轮驱动及在复杂工况的稳定作业。

John Deere 作为全球采棉机行业的领军企业，以其最新型号 CP770 采棉机为例。作业速度相较于 CP690 提升了 5%，一档作业速度为 7.4 km/h，二档作业速度达到 14.8 km/h，运输速度达到 27.2 km/h^[8]。CP770 采棉机后桥是重载农机悬浮转向驱动桥，

由斜盘液压马达、变速箱、主减速器、差速器、轮边行星减速器、半轴、分体式桥壳、转向系统、悬浮固定销轴和机电液控制系统组成，整合了传动系统、行走机构、液压装置、转向控制、制动技术及机电液一体化检测控制等多项技术，极大程度地确保采棉机行驶作业时承重与动力传输的稳定性与平顺性，其使用寿命长，不易发生故障损坏，齿轮传动系统产生的振动噪声对后桥桥壳及整车的影响小，在重载农机后驱动桥的研发中处于世界领先水平，如图 1-3 所示。

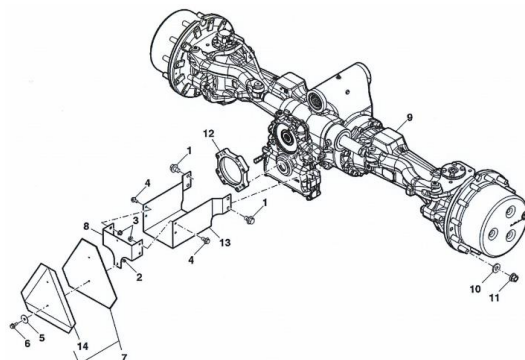


图 1-3 约翰迪尔 CP770 采棉机后驱动桥结构图

Fig. 1-3 John Deere CP770 cotton picker rear drive axle structure

国产采棉机经过不断的发展，如钵施然、中国铁建、山东天鹅、现代农装等采棉机企业在作业功能、采摘率、含杂率等关键性能上已接近国外同类产品，但采棉机工作质量不稳定、作业效率低、可靠性和振动稳定性差等性能表现制约了国产采棉机的推广^[9]。后桥是采棉机的主要承重部件及动力传输部件，后桥传动系统产生的振动噪声影响采棉机的质量与可靠性，也是影响国产采棉机与国外先进采棉机水平差距的决定因素。国产采棉机大多作业速度低于 6.4 km/h，且故障率高、作业稳定性差、关键零部件依赖进口。近年来，国内企业仍在不断提升采棉机后桥研发水平，由 4MZD-3A 型号采棉机的非断开型传统式驱动后桥升级为 4MZD-6A 型号采棉机的断开型组合式驱动后桥，如图 1-4 所示。

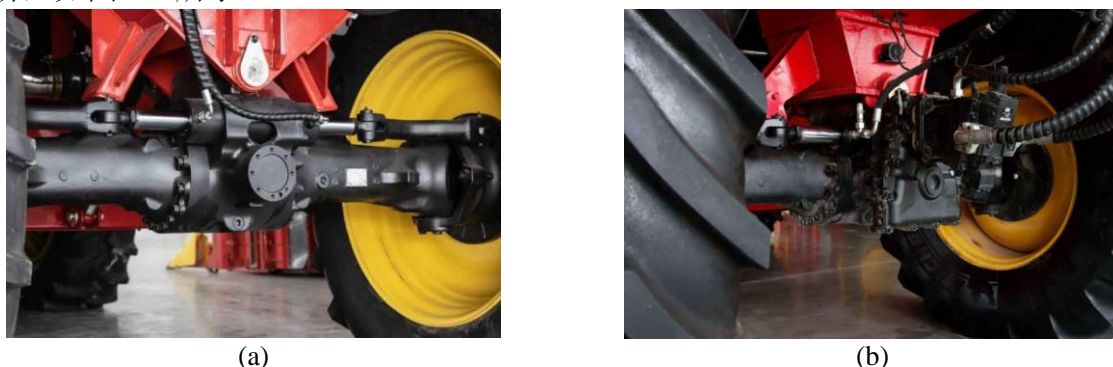


图 1-4 国产采棉机后驱动桥 (a) 4MZD-3A 型号采棉机后桥, (b) 4MZD-6A 型号采棉机后桥

Fig. 1-4 Domestic cotton picker rear drive axle. (a) 4MZD-3A type cotton picker rear axle, (b) 4MZD-6A type cotton picker rear axle

综上所述，我国针对重载农机后驱动桥虽也已具备独立研发、制造的能力，但大部分仅限于小吨位，总体技术含量低，传统式驱动后桥传动效率低、转速调节控制复