

东北农业大学博士论丛

DESIGN AND EXPERIMENT RESEARCH
ON DOUBLE POWER FLOW
DIFFERENTIAL TRANSMISSION
CONTROLLED BY STEERING WHEEL



方向盘控制

双流差速转向机构设计 及试验研究

孙 勇 张鸿琼◎著 李文哲◎审

 中国农业出版社

东北农业大学博士论丛

方向盘控制双流差速转向 机构设计及试验研究

孙 勇 张鸿琮 著
李文哲 审

中国农业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

方向盘控制双流差速转向机构设计及试验研究/孙
勇, 张鸿琼著. —北京: 中国农业出版社, 2011. 9
ISBN 978-7-109-16008-8

I. ①方… II. ①孙…②张… III. ①履带车—转向
装置—设计 IV. ①U469.603

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2011) 第 169398 号

中国农业出版社出版

(北京市朝阳区农展馆北路 2 号)

(邮政编码 100125)

责任编辑 刘明昌

中国农业出版社印刷厂印刷 新华书店北京发行所发行
2011 年 8 月第 1 版 2011 年 8 月北京第 1 次印刷

开本: 850mm×1168mm 1/32 印张: 6.125

字数: 180 千字

定价: 22.00 元

(凡本版图书出现印刷、装订错误, 请向出版社发行部调换)

摘 要

传统履带式车辆的转向机构通常采用的是转向离合器转向制动的方式,转向精度低、操作过程复杂,并且由于转向时内侧动力被切断,造成内侧履带滑移严重,特别是在湿田行走时使土壤拥起,不但破坏土壤或路面表层状况,而且增加转向阻力,同时也不利于驾驶的舒适性和安全性。对于履带式车辆,不仅要有良好的通过性能,而且还要有良好的转向性能。转向是否灵活、转向半径的大小直接影响到车辆的使用效率、燃油经济性和驾驶员的劳动强度,所以转向的灵活性和可控性是履带车辆的重要技术指标之一,其性能的优劣直接影响着履带车辆的机动性、生产效率和经济性。并且随着履带车辆功率、车重的逐步增大,行驶速度的不断提高及人机工程技术的发展,人们对其转向性能的要求也越来越高。因此,在履带式车辆上实现操作简便、转向圆滑的转向机构为人们所期待。

本书从履带车辆转向运动学和动力学角度出发,在充分考虑地面—车辆系统相互关系的基础上,详细阐述了履带车辆转向的基本原理,针对现有的转向装置进行性能分析,建立了非坚实地面和坚实地面简化转向模型和滑动转向模型;在对国内外现有履带车辆的行走装置和转向方式进行深入研究和分析的基础上,从目前履带车辆转向存在的问题入手,以设计符合我国实际需要的联合收获机通用的底盘为出发点,完成了传动系统总体的设计方案;根据履带车辆的自身转向特性并针对联合收割机的作业特点,在现有的静液压双流差速转向装置的基础上,同时引入车辆转向理论,设计一套相匹配的采用方向盘操纵的操纵控制无动力

切断转向装置，并且应用 CATIA 软件进行此套机构的运动仿真。

最后在试验台架上对其进行运动学试验，检验整个转向传动系统的运动特性。依据空载荷试验结果，确定了不同转向半径时两侧输出轴转向阻力矩，并确定加载谱，利用磁粉制动器进行了台架加载试验。建立了履带车辆两侧输出轴转速同操纵控制机构中方向盘转角和控制直线行驶操纵杆摆角、控制转向行驶操纵杆摆角之间的数学关系。通过与内外侧履带速度随方向盘转角变化的仿真结果和试验结果对比表明，履带车辆采取方向盘精确控制静液压双流差速转向装置，完全可以实现转向期间无动力切断自动无级降速，随着驾驶员对方向盘转动角度，车辆直线行驶分路的速度就会降低，转动得越大，降得越多。转向半径小且转向过渡时间短，解决转向速度受车速制约的问题，可以实现无动力切断转向，即转向时使车辆自动减速，实现类似轮式车辆的转向操纵方式。为后续研究双流履带车辆提供理论依据。

关键词：差速式转向机构；静液压；双流传动；履带车辆；转向半径；仿真；转向半径

Abstract

The steering mechanisms is used in tracked vehicles which usually steering clutch and a steering brake are adopted, which have much lower steering precision and complicated operations. While the inner power is cut off during it is steering, it is possible to lead to serious skidding on the inner crawler, especially make the soil pile up. As a result, it destroys the soil or road surface to increase the steering resistance; all of these are disadvantages to drive the vehicle. Tracked vehicle not only has good passing performance, but also good turning performance. Flexibility of turning and size of turning radius influence using efficiency of vehicles, fuel economy and labour intensity of driver directly. So flexibility and controllability of turning is one of important technical index for tracked vehicles, and advantage and disadvantage of performance influence mobility, productivity and economy of tracked vehicles directly. And with gradually enlarging of power and weight of tracked vehicles, constant improvement of running speed, development of human-machine engineering, people call for increasingly high turning performance. Therefore, to accomplish the simply and easy operational steering mechanism is expected.

From kinematics and dynamics of tracked vehicles turning in the paper, the elementary theory of the vehicle turning is introduced detailly. We must consider relationshi between terrain and

vehicle when we build simplified turning model on non-hard terrain and sliding turning model on hard terrain. Performance of existing turning mechanism is analysed, based on study and analysis on existing running mechanism and turning type domestic and overseas, starting with existing problems of present tracked vehicles, starting point on designing combine chassis according with practical needs in our country, and complete design scheme of whole transmission system. Based on turning characteristics of tracked vehicles itself and operating features of combine, designed a set of control turning mechanism with steering wheel that was matched to the mechanism and don't cut off power during turning basing the existing of the hydrostatic double flow transmission device. And applied CATIA to carry on the kinematics emulation of this set of mechanism. At the same time, introducing turning theory of tracked vehicles, basing on fully considering relationship between terrain and vehicle, turning model on hard terrain (consider sliding and wheelspin) and turning model on non-hard terrain are established.

At last, kinematics experiment has been done and test motion characteristics of whole turning transmission system. Then based on no-load experiment result, determine relationship between different radius and turning resistance torque of both output shafts, and determine spectrum of adding load. Built mathematics relationship between both sides output axes rotate speed of tracked vehicle and steering wheel corner and joy stick corner that controls straightline drive in the controlling mechanism through the experiment of bench. Through contrast from simulation results and non-load experiment results about both sides output axes rotate speed of tracked vehicle and steering wheel

corner, tracked vehicle with static hydraulic double power flow differential turning mechanism and adopted the steering wheel to control turning accurately, can lower the speed automatically and not cut off power while steering. With driver rotating steering wheel, speed of straight driving will decrease. Bigger of rotation, more of decrease, and turning radius is smaller, and time of turning transition is shorter. Solved the problem of vehicles speed restricting turning speed, namely vehicles speed reduce when turning, realizes operation as wheel vehicles, and provide theory basis for study tracked vehicle with double flow driving in future.

Key words: Differential Steering Mechanism; Static hydraulic; Double Power Flow; Tracked Vehicle; Steering Wheel; Simulation; Turning Radius

目 录

摘要

Abstract

1 绪言	1
1.1 研究的目的是意义	1
1.2 履带车辆的发展概况	4
1.3 履带车辆转向机构发展概况和趋势	8
1.3.1 履带车辆转向机构分类	8
1.3.2 国外履带车辆转向机构发展概况	21
1.3.3 国内履带车辆转向机构发展概况	24
1.3.4 履带车辆转向机构的发展趋势	28
1.3.5 车辆转向模型及仿真研究现状	29
1.4 研究的主要内容和技術路线	34
1.4.1 研究的主要内容	34
1.4.2 研究的技术路线	36
1.5 小结	38
2 履带车辆转向理论及转向模型的建立	39
2.1 履带车辆转向运动学	39
2.1.1 转向时车体的运动学	41
2.1.2 转向时履带的运动学	43
2.2 履带车辆转向动力学	48

2.2.1 转向时作用在履带车辆上的外力	48
2.2.2 转向时作用在履带车辆上的外力矩	52
2.2.3 不同转向半径主动轮受力分析	53
2.3 小结	55
3 新型履带转向装置的设计	56
3.1 传动系统设计	57
3.1.1 传动系统总体设计方案	57
3.1.2 转向机构行驶过程分析	61
3.2 液压系统设计	64
3.2.1 液压技术与应用	64
3.2.2 液压系统方案的确定	66
3.2.3 液压系统的确定	68
3.3 操纵系统设计	70
3.3.1 控制过程原理	71
3.3.2 控制总体路线	75
3.3.3 转向控制装置的计算方法	77
3.3.4 操纵控制机构的设计	81
3.4 小结	94
4 双流传动履带车辆转向过程仿真计算	96
4.1 车辆—地面系统转向模型建立	96
4.1.1 非坚实地面上的转向模型	96
4.1.2 坚实地面上的转向模型	98
4.2 坚实地面上的转向过程仿真计算	103
4.2.1 简化模型与滑动模型对比仿真	103
4.2.2 坚实地面转向过程分析	106
4.3 非坚实地面上的转向过程	117
4.3.1 地面情况参数的影响	117

4.3.2 车辆结构参数的影响	120
4.4 小结	120
5 台架试验结果与分析	122
5.1 试验装置理论分析	122
5.1.1 转向过程实现自动无级降速	122
5.1.2 车辆最小半径的限制	123
5.1.3 传动装置特性	123
5.1.4 转向时两侧履带的速度分析	127
5.1.5 转向性能分析	129
5.1.6 转向功率分析	131
5.2 空载试验结果与转向特性分析	146
5.2.1 试验目的	146
5.2.2 试验装置	147
5.2.3 试验方法与步骤	148
5.2.4 空载试验结果及分析	148
5.3 加载试验结果与转向特性分析	153
5.3.1 试验目的	153
5.3.2 试验装置	154
5.3.3 坚实地面载荷谱确定	154
5.3.4 试验方法与步骤	155
5.3.5 试验结果及分析	157
5.4 小结	163
6 结论与展望	165
6.1 结论	165
6.2 创新点	167
6.3 展望	167

附录 主动轮功率计算源代码	169
参考文献	173
后记	182

1 绪 言

1.1 研究的目的和意义

近年来,我国水稻种植面积迅速扩大,而水稻收获所用工时占水稻生产总工时的 31%,因此,使用联合收割机进行收获是实现水田机械化的最后一个重要环节。人们在使用联合收割机作业的同时一直在改进车体的性能,驾驶员不但要控制整车的正常行驶,更重要的还要检控收获质量,所以减轻驾驶员行驶过程中控制整车行进、转向的劳动强度就显得尤为重要。传统履带式车辆的转向机构通常采用的是转向离合器转向制动的方式,转向精度低、操作过程复杂,并且由于转向时内侧动力被切断,造成内侧履带滑移严重,特别是在湿田行走时使土壤拥起。不但破坏土壤或路面表层状况而且增加转向阻力,同时也不利于驾驶的舒适性和安全性。基于水田作业的特殊性,目前水稻联合收割机普遍采用履带式行走系统,因为履带可以看作车辆自携的可移动的道路,它可以连续地在车辆前面铺开,车辆在其上通过,然后再由车辆收回。履带式车辆能够通过承载能力较低的地面,且牵引力较大,水稻产区土壤含水率高、承压能力低、泥脚深,为了提高水稻联合收割机的通过性,大多数水稻收获机械都采用了履带式行走机构。

对于履带式车辆,不仅要有良好的通过性能,而且还要有良好的转向性能。转向是否灵活、转向半径的大小直接影响到车辆的使用效率、燃油经济性和驾驶员的劳动强度,所以转向的灵活性和可控性是履带车辆的重要技术指标之一,其性能的优劣直接

影响着履带车辆的机动性、生产效率和经济性。并且随着履带车辆功率、车重的逐步增大,行驶速度的不断提高及人机工程技术的发展,人们对其转向性能的要求也越来越高。因此,在履带式车辆上实现操作简便、转向圆滑的转向机构为人们所期待。

履带车辆转向时,因使单片履带板产生横向的回转运动,当叠加到纯粹的直线稳定运动上时,转向行驶较直线行驶多出了一种附加的行驶阻力,即回转阻力。所以履带车辆转向时即要克服前进中的行走阻力,又要克服转向阻力矩。在车辆转向过程中,车辆转向半径最小时的转向力矩最大。基于此,转向过程对牵引力的要求相应的要增大,如果履带车辆在转向期间能够自动适时降挡,可以提高车辆转向动力性能;如能在任意速度下都可以实现原地转向,则可大大提高车辆的机动性。

由于履带车辆的转向原理与轮式车辆根本不同,使履带车辆很难在任何速度下按驾驶员意愿使车辆按一定半径转向。随着农用履带车辆功率的增大和车速的提高,对其转向机动性的要求也越来越高,对新型转向机构的研究也越加迫切,并且随着联合收割机的广泛应用和人机工程要求的不断提高,用方向盘操纵转向控制系统代替传统的转向离合器和转向制动器显得越为重要。采用静液压双流差速转向装置,可以实现无动力切断转向,解决上述弊端,但两个动力流的简便操纵和精确控制,一直是人们所关注的课题。

传统的产品研发开发过程一般要经历概念方案设计、结构设计、物理样机制造与试验、设计方案的修改完善以及最后的定型批量生产等主要阶段,其中物理样机试验是验证设计方案可行性和保证产品质量的重要环节,同时也是非常耗时耗力的环节,与产品开发过程中“快、好、省”的目标相矛盾。随着现代计算机技术和测控技术的发展,利用先进的计算机技术,人们可以在物理样机制造之前,首先建立虚拟样机,对产品进行结构工艺检查、性能的分析预测和虚拟试验,这样可以大大减少物理样机的

加工与试验的次数,从而比传统的仅靠物理样机试验的开发模式节约了大量的时间和资本。计算机仿真中所建立的传动系统模型除了可作为整车模型的一部分用来快速计算整车系统的性能参数以外,还可以作为辅助设计工具使工程师们能够确定影响整个传动系统和车辆系统稳态和瞬态行为的零部件。如果所建立的传动系统模型的适应性和可信度很高,就可以在这个模型的基础上设计多种不同的方案并且进行系统性能的仿真,对系统性能变化后的结果进行定量的描述,寻求最优的设计方案。

基于上述,在现有的静液压双流差速转向装置的基础上,根据履带车辆的自身转向特性并针对联合收割机的作业特点,设计一套与其匹配的采用方向盘操纵的操纵控制装置,利用方向盘转角的变化来控制两个定量马达的转速,再通过可差速传动的机械式变速箱分配到两侧驱动轮上,这不但使履带车辆的转向操纵与轮式车辆完全相同,而且可以实现车辆在转向期间自动无级降速,其降速幅度随转弯半径减小而增大,自动满足不同转弯半径对速度的要求,同时还可实现零半径转向,使履带车辆的转向操纵大为简便,降低发动机的功率储备。同时应用 CATIA 软件进行此套方向盘控制机构进行实体建模、虚拟装配、运动学仿真和运动过程中的干涉检验,然后加工此套操纵机构,最后在试验台架上对其进行运动学试验,检验整个转向传动系统的运动特性。在理论研究的基础上,通过台架加载试验,建立履带车辆两侧输出轴转速同操纵控制机构中方向盘转角和控制直线行驶操纵杆摆角之间的数学模型,验证使用方向盘转向来实现履带车辆转向期间自动无级降速可行性。同时引入车辆转向理论,在充分考虑车辆—地面系统的相互关系基础上,分别建立坚实地面转向模型(考虑滑移和滑转)和非坚实地面转向模型(简化模型)。结合实际情况,选择参数边界条件,借助工程领域常用的 MATLAB 分别对转向过程中的地面和车辆影响因素进行仿真分析。通过加载试验结果与仿真结果对比分析,为进一步研究方向盘操纵双流传

动履带车辆转向装置提供充分可靠的理论依据。

1.2 履带车辆的发展概况

1770年,英国理查德·洛弗尔·埃奇沃思发明了履带车辆并同时获得专利(Bekker, 1962),当时履带车辆被描述为“便携式轨道”或是“人造路”。这种便携式轨道是由多块木头制造而成,沿着与其相配的车架移动,类似于在车轮前面铺了无限长的轨道一样,这就是全履带车辆的最初构想。19世纪一大批发明家投身到全履带车辆的发明创造中来,并且申请了大量的专利。但是履带车辆并没有得到发展,技术还十分低下,许多重大问题没有解决,驱动力还不能满足动力的需求,操纵机构的设计很不合理。那一时期可利用的材料仅仅是木材和铸铁,材料性能远远满足不了履带车辆的要求。然而,由于内燃机的发明并且随着第一辆汽车的诞生,在19世纪末这一状况得以迅速的改变。1901年第一辆半履带蒸汽机车问世,随后客车和履带车辆发生了革命性的变化,一战前期农用拖拉机开始生产并得到广泛使用。这一时期由于土壤与车辆之间的理论研究十分不充分,履带车辆的使用很有限。Terzaghi以工程的观点详细阐述了土壤力学的原理,但没有对车辆与土壤之间的关系进行统计研究。一战后期,战场上出现了第一辆坦克,它在战场上的所向披靡推动了履带车辆与它所处环境之间的研究。在战争中广泛使用的纵横相间的履带车辆技术被转化为民用,主要在农业领域。在许多国家发展农业机械的努力下,致使不同型号的机械装置的特点和土壤与车辆之间的关系重新定义。许多运动机械细节的重要性已经显现出来,拖拉机的重心位置对压力分布、牵引力的影响,履带链的张紧力的重要性,地面压力被定义为车的总重量与接地面积的比值,履带的履刺性能和滚动阻力、压力、轮距等一系列问题被认知,并且被广泛应用。此时,轮式和履带式车辆的发展最终形成

了组织严密的学科,这为后来的深入研究提供了广阔的空间。这一时期履带车辆的发展主要依赖于汽车工业的发展,履带车辆仅仅是汽车的衍生品,或是汽车的简单改造(Anh Tuna Le, 1999)。

经过反复试验和纠正错误,农用拖拉机的技术水平得到了显著提高。它是紧跟机动车辆的发展而进步的,因而还很少考虑车辆与土壤之间的问题。在农业领域,土壤力学突出了车辆类型与土壤之间的关系,而不再靠人们的主观期望。这一思想使人们一直很迷惑,直到各种有价值的新理论被提出。

随着二战的爆发,新型纵横相间的履带车辆再次得到了发展,虽然很有限但非常重要,促进了履带车辆朝着大马力、钢板履带的方向发展。而且为适应这一变化,履带车辆的悬挂和转向系统得到了发展,车辆的重量和尺寸设计接近极限。以前认为对车辆的影响不太重要的因素也得到了充分重视。现代履带车辆的设计充分考虑了土壤环境和车辆实用性,对土壤的了解已经渗入到履带车辆的设计制造中来。与以往的机型相比,它们有更好的性能,现代履带拖拉机能以很高的速度在乡村奔驰,并且能根据地形与气候状况进行合理作业,这些使得履带车辆在许多情况下有巨大的优势。如在不能使用公路而又要运输物资和设备时,它是必不可少的。也可用来帮助探险和开荒,由于对地面的压力小可以保护自然环境。

随着对履带车辆的性能要求越来越高,金属履带已不能满足履带车辆高速运转要求,因此,人们将研究精力集中到橡胶履带车辆的研发,特别是20世纪80年代以来,美国卡特彼勒和迪尔公司,英国的马歇尔公司,日本的洋马、小松公司和久保田公司都研制出了自己独特的橡胶履带产品,这些产品均采用静液压差速动力转向机构。但是对于解决车辆转向期间功率增大的问题,不是没有考虑,而是额外增加一套液压辅助转向机构来提高转向功率,未能从机构自身特点加以解决。