

拖拉机前驱动桥结构优化与成本控制

牛乐飞 陈 重

一拖（洛阳）车桥有限公司 河南 洛阳 471000

摘 要：本文聚焦于拖拉机前驱动桥，深入探讨其结构优化与成本控制相关问题。首先从多个关键技术点详细论述结构优化的策略，涵盖主减速器、差速器、半轴及桥壳等部件的优化细节；随后从设计、材料、制造等维度提出成本控制的有效措施，强调各环节的成本优化要点，旨在为提升拖拉机前驱动桥性能、降低生产成本提供理论支持与实践指导。

关键词：拖拉机；前驱动桥；结构优化；成本控制

1 引言

在农业现代化进程中，拖拉机作为关键的农业机械设备，其性能直接关乎农业生产效率与质量。前驱动桥作为拖拉机传动系统的核心部件，承担着将发动机动力传递至前轮、实现四轮驱动的重要使命，对拖拉机的牵引力、通过性以及操控性起着决定性作用。然而，当前拖拉机前驱动桥在设计与生产过程中，面临着结构不合理、性能有待提升以及成本较高等问题。例如，部分结构应力分布不均易引发故障，传动效率低导致能耗增加，材料浪费与工艺复杂造成成本居高不下。因此，开展前驱动桥结构优化与成本控制研究，对于提高拖拉机整体性能、增强市场竞争力以及推动农业机械化发展具有至关重要的意义。

2 拖拉机前驱动桥结构优化技术点

2.1 主减速器优化

2.1.1 齿轮参数优化

主减速器齿轮的参数对传动性能有着至关重要的影响。通过运用先进的齿轮设计软件，如KISSsoft、ROMAX等，对齿轮的模数、齿数、压力角、螺旋角等参数进行优化设计。例如，适当增大螺旋角可以增加齿轮啮合的重合度，降低齿轮啮合时的冲击与噪声，提高传动平稳性。一般而言，将螺旋角从传统的 20° - 22° 增大到 25° - 28° ，可使齿轮啮合的重合度提高15%-20%，显著降低啮合冲击。同时，优化齿形参数，使齿轮在啮合过程中受力更加均匀，减少应力集中现象。采用修形齿轮技术，对齿轮的齿顶、齿根进行修形，改善齿轮的啮合性能，降低齿轮的振动与噪声。通过有限元分析方法，对优化后的齿轮进行应力分析与疲劳寿命预测，确保齿轮在各种工况下都能可靠运行^[1]。在有限元分析中，将齿轮模型划分为精细的网格，考虑齿轮的实际工作载荷与边界条件，计算出齿轮在不同工况下的应力分布情况，并

根据材料的疲劳特性预测齿轮的疲劳寿命。

2.1.2 齿轮材料与热处理工艺改进

选用高强度、高耐磨性的齿轮材料，如渗碳淬火处理的20CrMnTi合金钢。通过合理的渗碳淬火工艺，使齿轮表面获得高硬度（HRC58-62），心部保持足够的韧性，从而提高齿轮的抗疲劳性能与耐磨性。渗碳淬火工艺的关键参数包括渗碳温度、渗碳时间、淬火温度与冷却介质等。一般渗碳温度控制在 900°C - 930°C ，渗碳时间根据齿轮的尺寸与要求的渗碳层深度确定，通常为几小时到几十小时。淬火温度一般选择在 820°C - 850°C ，冷却介质可采用油冷或水-油双液淬火。此外，采用先进的表面处理技术，如喷丸强化等，进一步提高齿轮表面的残余压应力，增强齿轮的抗疲劳能力。喷丸强化通过高速弹丸流撞击齿轮表面，使表面产生塑性变形，形成残余压应力层，可提高齿轮的疲劳寿命30%-50%。

2.2 差速器优化

2.2.1 差速器结构改进

传统的差速器在扭矩分配方面存在一定的局限性。为了提高差速器的性能，可采用新型的限滑差速器结构。例如，托森差速器通过蜗轮蜗杆的特殊传动关系，能够根据两侧车轮的转速差自动调整扭矩分配，在车辆转弯或一侧车轮打滑时，将更多的扭矩传递到附着力较大的车轮上，提高车辆的通过性与操控性。托森差速器的工作原理是利用蜗轮蜗杆的自锁特性，当两侧车轮转速差较小时，差速器正常工作；当一侧车轮打滑时，蜗轮蜗杆之间的摩擦力增大，产生自锁效应，限制打滑车轮的转动，将扭矩传递到另一侧车轮。此外，对差速器的行星齿轮机构进行优化设计，增加行星齿轮数量或改进齿轮的齿形，提高差速器的传动效率与可靠性^[2]。增加行星齿轮数量可以使扭矩分配更加均匀，减少单个齿轮的受力，提高差速器的承载能力。改进齿轮的齿形，如

采用圆弧齿形,可降低齿轮啮合时的摩擦与噪声,提高传动效率。

2.2.2 润滑系统优化

差速器在工作过程中需要良好的润滑以减少磨损。优化差速器的润滑系统,设计合理的油道与油槽,确保润滑油能够充分润滑各个摩擦副。例如,采用强制润滑方式,通过油泵将润滑油输送到差速器内部的关键部位,提高润滑效果。在差速器壳体上设计专门的油道,将润滑油引导至行星齿轮、半轴齿轮等摩擦部位。同时,选择合适的润滑油粘度与添加剂,以适应不同的工作温度与负荷条件。在低温环境下,选用粘度较低的润滑油,以保证差速器能够顺利启动;在高温高负荷条件下,选用粘度较高、具有良好抗磨性能的润滑油,并添加抗氧化、抗腐蚀等添加剂,延长润滑油的使用寿命。

2.3 半轴优化

2.3.1 半轴强度与刚度优化

半轴作为传递扭矩的重要部件,其强度与刚度直接影响到拖拉机的行驶安全性。通过有限元分析方法,对半轴在不同工况下的应力与变形情况进行模拟分析,找出应力集中区域与薄弱环节。在有限元分析中,建立半轴的精确三维模型,考虑半轴在实际工作中受到的扭矩、弯矩等载荷,以及边界条件的约束。根据分析结果,对半轴的结构进行优化设计,如增加半轴的直径、改变半轴的截面形状等,提高半轴的强度与刚度。例如,在半轴的应力集中区域增加圆角过渡,降低应力集中系数;采用空心半轴结构时,合理设计壁厚,使半轴在满足强度要求的同时,减轻重量。

2.3.2 半轴轻量化设计

在保证半轴强度与刚度的前提下,采用轻量化设计理念,降低半轴的重量。例如,采用空心半轴结构,通过合理的壁厚设计,在满足强度要求的同时,减轻半轴的质量。空心半轴的壁厚设计需要根据半轴所承受的扭矩、弯矩以及材料的力学性能进行计算。一般来说,空心半轴的内径与外径之比在0.5-0.7之间时,既能保证半轴的强度,又能实现较好的轻量化效果。轻量化设计不仅可以降低拖拉机的整体重量,提高燃油经济性,还可以减少半轴的惯性力,提高车辆的操控性能。

2.4 桥壳优化

2.4.1 桥壳拓扑优化

拓扑优化是一种先进的结构优化方法,通过在给定的设计空间内寻找最优的材料分布,实现结构轻量化与强度提升的目标。对拖拉机前驱动桥桥壳进行拓扑优化,首先建立桥壳的有限元模型,设定优化目标(如最

小化质量)与约束条件(如最大应力不超过材料的许用应力),然后运用拓扑优化算法进行计算。常用的拓扑优化算法有变密度法、均匀化方法等。变密度法将设计空间离散为有限个单元,每个单元的密度作为设计变量,通过优化算法调整单元的密度,使材料向受力较大的区域集中。根据优化结果,对桥壳结构进行重新设计,去除多余的材料,优化桥壳的形状与尺寸,在保证桥壳强度的前提下,实现轻量化设计。例如,通过拓扑优化,桥壳的某些非承载区域可以被去除,或者将实心结构改为空心结构,从而减轻桥壳的重量。

2.4.2 桥壳疲劳寿命优化

桥壳在拖拉机行驶过程中承受着复杂的交变载荷,极易发生疲劳破坏。鉴于我公司桥壳采用铸铁件,具体为球铁450-10材料,为提高桥壳的疲劳寿命,可通过有限元分析软件对桥壳开展疲劳寿命预测工作。首先,详细分析桥壳在不同工况下的应力分布与疲劳损伤状况,精准找出疲劳薄弱部位。在进行疲劳寿命预测时,必须充分考虑桥壳的实际工作载荷谱,也就是桥壳在不同行驶工况下所承受的载荷随时间的变化情况。依据疲劳损伤累积理论,精确计算出桥壳在给定载荷谱下的疲劳寿命。针对这些疲劳薄弱部位,采取针对性的优化措施。例如,在桥壳的应力集中区域增加加强筋,以此改变应力的分布状态,有效降低应力集中系数,进而提高桥壳的疲劳寿命^[3]。同时,对桥壳的制造工艺进行优化,重点聚焦于热处理工艺。在热处理过程中,通过制定合理的加热、保温与冷却工艺方案,精准消除桥壳内部的残余应力,充分提升材料的力学性能,最终进一步提高桥壳的疲劳寿命。

3 拖拉机前驱动桥成本控制措施

3.1 设计环节成本控制

3.1.1 模块化设计

采用模块化设计理念,将前驱动桥分解为多个功能模块,如主减速器模块、差速器模块、半轴模块、桥壳模块等。各模块具有独立的功能与接口,便于进行标准化设计与生产。通过模块化设计,可以减少定制化零部件的数量,降低研发成本与生产成本。例如,在设计主减速器模块时,采用标准化的齿轮参数与安装尺寸,使该模块可以适用于不同型号的拖拉机前驱动桥,减少了为每种型号单独设计主减速器的成本。同时,模块化设计还便于产品的升级与维护,当某一模块出现故障或需要改进时,只需更换或升级相应的模块,而无需对整个前驱动桥进行更换,降低了维修成本。

3.1.2 价值工程分析

运用价值工程方法,对前驱动桥的各个部件进行功能-成本分析。明确每个部件的功能需求,评估其成本与功能的匹配程度。对于功能过剩或成本过高的部件,进行优化改进,剔除冗余功能,降低部件成本。例如,在分析差速器模块时,发现其部分功能在实际使用中很少用到,但增加了制造成本。通过对差速器结构进行简化,去除这些冗余功能,在保证差速器基本性能的前提下,降低了差速器的制造成本。同时,注重提高产品的价值,即在满足用户功能需求的前提下,尽可能降低成本,提高产品的性价比。

3.2 材料选择与成本控制

3.2.1 国产材料替代

在确保前驱动桥性能不受影响的前提下,积极推进国产优质材料对进口材料的替代工作。鉴于国内材料技术的持续进步,众多国产材料在性能方面已完全能够契合拖拉机前驱动桥的使用需求。以我公司前驱动桥桥壳为例,其材质为铸铁件,具体采用球铁450-10材料。在满足桥壳强度与可靠性标准的情况下,可探索使用国产同类型优质球铁材料来替代进口球铁材料。国产优质球铁材料在性能指标上与进口材料相近,而价格方面通常比进口材料低。通过大规模采用国产球铁材料,能够有效降低前驱动桥的生产成本。此外,减少对进口材料的依赖,可显著提升产品的自主可控性,避免因进口材料供应不稳定或价格波动给生产带来不利影响,保障生产的连续性与稳定性。

3.2.2 材料回收与再利用

建立完善的材料回收与再利用体系,对前驱动桥生产过程中的废料、边角料以及报废产品中的可回收材料进行回收处理。在桥壳制造过程中,鉴于我公司桥壳为铸铁件,采用球铁450-10材料,会产生大量的铸铁边角料。通过先进的回收工艺,如切割、熔炼等,将这些边角料进行再加工,使其重新用于前驱动桥的生产制造。材料回收与再利用具有多方面重要意义。一方面,它可以显著降低原材料消耗,有效减少生产成本;另一方面,能够大幅减少对环境的污染,助力企业实现可持续发展。例如,回收利用废旧球铁材料,经过重新熔炼与精炼处理后,可制成新的桥壳铸件毛坯,既降低了原材料采购成本,又减少了废旧金属对环境造成的污染。

3.3 制造工艺优化与成本控制

3.3.1 精益生产

引入精益生产理念,优化前驱动桥的生产流程,消

除生产过程中的浪费现象。通过价值流分析,找出生产流程中的非增值环节,如过多的库存、不必要的搬运、等待时间等,并采取相应的措施进行改进。例如,采用准时化生产(JIT)方式,根据订单需求合理安排生产计划,减少库存积压,降低库存成本。在传统生产模式下,企业为了应对市场需求的不确定性,往往会保持较高的库存水平,这不仅占用了大量的资金,还增加了库存管理成本。采用JIT生产方式后,企业根据客户的订单需求,精确安排生产计划,实现零部件的及时供应与生产,将库存水平降低到最低限度。同时,加强生产现场管理,提高生产效率,降低生产成本。例如,通过优化生产布局,减少零部件的搬运距离;采用看板管理等工具,实现生产过程的可视化与实时监控,及时发现并解决生产过程中的问题。

3.3.2 自动化与智能化制造

加大对自动化与智能化制造设备的投入,提升前驱动桥生产环节的自动化程度。例如,可引入自动化精密加工设备、自动化装配线等,减少人工干预,提高精度效率、降低成本。自动化精密加工设备加工精度高、效率稳,保障零部件质量;自动化装配线实现自动输送、装配与检测,减少误差、提升质量。同时,利用智能化技术实时监控与数据分析,及时解决问题,提升质量稳定性、降低废品率与成本。如在设备安装传感器采集数据,用大数据分析预测故障与质量问题,提前预防解决。

结语

拖拉机前驱动桥的结构优化与成本控制是一项系统而复杂的工程,涉及多个技术领域与管理环节。通过主减速器、差速器、半轴及桥壳等关键部件的结构优化,以及设计、材料、制造工艺等方面的成本控制措施,能够实现前驱动桥性能与成本的双重提升。未来,应继续加强相关技术研究与实践探索,不断优化前驱动桥的结构与成本,为农业机械化事业的发展做出更大贡献。

参考文献

- [1]谢太林.重型拖拉机前驱动桥设计与应用[D].江苏大学,2023.
- [2]慕海锋,徐允飞,范振喜,等.轮式拖拉机前驱动桥相关结构设计[J].拖拉机与农用运输车,2022,49(03):48-50+54.
- [3]冯叶陶,廖敏,张小军,等.丘陵山地拖拉机前驱动桥壳组件轻量化设计与试验研究[J].中国农机化学报,2021,42(05):107-113.