

新型机械传动系统的设计与性能研究

赵 明

北京煜鼎增材制造研究院股份有限公司 河北 雄安 070001

摘 要：随着现代工业对机械传动系统性能要求的不断提高，开发新型高效、可靠的传动系统具有重要意义。本文详细阐述了一种新型机械传动系统的设计思路、结构组成以及工作原理。通过理论分析与实验研究相结合的方法，对该传动系统的各项性能指标进行了深入探讨，包括传动效率、承载能力、稳定性等。研究结果表明，新型机械传动系统在性能上相较于传统传动系统有显著提升，为在实际工程中的广泛应用提供了有力依据。

关键词：新型机械传动系统；设计；性能研究

1 引言

在现代制造业蓬勃发展的当下，增减材（机械加工与3D打印）相关设备在各领域发挥着关键作用。机械传动系统作为这些设备的主要部分，其性能优劣直接影响着设备的运行效率、可靠性及使用寿命。传统的诸如齿轮、带、链传动等传动系统，在常规工况下尚可满足需求，但在面对重载机械加工要求，以及3D打印设备特殊工作环境时，便暴露出传动效率低、振动噪声大、维护成本高和可靠性不足等问题。例如在重载机械加工设备中，传统传动系统因齿轮摩擦损耗，不仅导致能量转换效率低下，还会因振动影响加工精度；3D打印设备在复杂运行工况下，传统传动结构易出现故障，影响打印质量与设备稳定性。随着科技的飞速进步和工业自动化程度的不断提高，研发能够适应复杂工况且具备卓越性能的新型机械传动系统，已成为机械工程领域亟待攻克的关键课题，也是推动机械加工与3D打印设备迈向更高水平的迫切需求。

2 新型机械传动系统的设计

2.1 设计思路

新型机械传动系统打破传统单一传动模式，采用复合式结构，融合多种传动原理。鉴于不同工况对传动性能要求各异，启动及低速重载时需大扭矩，高速运行时重效率与稳定，故而设计结合行星齿轮与液力耦合传动。前者传动比范围广、承载强、结构紧凑，能有效调节转速、放大扭矩；后者具备过载保护、平稳启动及缓冲振动冲击的特性，可提升复杂工况下的运行稳定性。二者有机结合，助力新型传动系统在各类工况均达最佳性能。

2.2 结构组成

新型机械传动系统主要由行星齿轮机构、液力耦合器、输入轴、输出轴以及控制系统等部分组成。

（1）行星齿轮机构：行星齿轮机构作为核心传动部件，由太阳轮、行星轮、行星架和内齿圈构成。太阳轮位于机构中心，与输入轴相连，负责输入动力；多个行星轮均匀分布在太阳轮周围，并同时与太阳轮和内齿圈啮合，行星轮安装在行星架上，行星架与输出轴相连，将动力输出。这种结构形式使得行星齿轮机构在传递动力时，能够实现多个齿轮同时啮合，从而提高承载能力和传动效率。

（2）液力耦合器：液力耦合器连接在输入轴与行星齿轮机构的太阳轮之间。它主要由泵轮、涡轮和外壳组成。泵轮与输入轴相连，在发动机或电机带动下高速旋转，将机械能转化为工作液体（通常为液压油）的动能；涡轮与太阳轮相连，通过工作液体的动能传递，带动太阳轮及整个行星齿轮机构运转。液力耦合器的存在，使得传动系统在启动时能够实现平稳过渡，避免因突然加载而对机械部件造成冲击，同时在过载时能够起到保护作用，防止传动部件损坏。

（3）输入轴和输出轴：输入轴负责将外部动力源（如发动机、电机）的旋转运动传递至液力耦合器和行星齿轮机构；输出轴则将经过行星齿轮机构变速增扭后的动力传递至工作装置。输入轴和输出轴均采用高强度合金钢制造，并经过严格的热处理工艺，以确保其具有足够的强度和刚度，能够承受传动过程中的各种载荷。

（4）控制系统：控制系统用于监测和调节新型机械传动系统的运行状态。它主要包括传感器、控制器和执行器等部分。传感器实时采集系统的转速、扭矩、油温、油压等参数，并将这些信号传输给控制器；控制器根据预设的控制策略和采集到的参数，对执行器发出指令，实现对液力耦合器的充油、排油控制，以及对行星齿轮机构中换挡离合器的操纵，从而实现传动系统在不同工况下的最佳性能匹配。

2.3 工作原理

动力源带动输入轴，输入轴带动液力耦合器泵轮，泵轮内工作液体在离心力作用下加速冲向涡轮，涡轮跟随泵轮旋转，进而带动行星齿轮机构的太阳轮。启动初期或低速重载时，液力耦合器通过调节工作液体流量、压力，实现柔性启动与扭矩放大，助力传动系统克服大阻力矩。转速升高进入稳定运行后，行星齿轮机构发挥主要传动作用。控制系统通过操纵换挡离合器，按需改变行星齿轮机构传动比，实现转速、扭矩精确调节。传动过程中，液力耦合器持续工作，既能缓冲、减振，降低载荷波动冲击，过载时还能通过液体打滑切断动力，保护传动部件。同时，控制系统依据传感器反馈的实时参数，动态调整液力耦合器和行星齿轮机构工作状态，确保传动系统维持最佳性能。

3 新型机械传动系统的性能研究

3.1 传动效率分析

传动效率是衡量机械传动系统性能的重要指标之一。对于新型机械传动系统，其传动效率受到多个因素的影响，包括行星齿轮机构的啮合效率、液力耦合器的传动效率以及系统内部的摩擦损耗等。

(1) 行星齿轮机构啮合效率：行星齿轮机构在啮合过程中，由于齿轮齿面之间的摩擦、润滑油的搅动以及轴承的摩擦等因素，会产生一定的功率损耗。根据齿轮啮合原理和机械效率计算方法，行星齿轮机构的啮合效率可通过理论公式进行计算。通过对齿轮参数（如模数、齿数、齿宽、压力角等）进行优化设计，采用高精度的齿轮加工工艺和优质的润滑材料，可有效降低行星齿轮机构的啮合损耗，提高其啮合效率。例如，选用合适的齿形修形技术，能够改善齿轮啮合过程中的载荷分布，减少齿面摩擦和磨损，从而提高啮合效率。

(2) 液力耦合器传动效率：液力耦合器的传动效率与泵轮和涡轮之间的转速差密切相关。随着泵轮与涡轮转速差的增大，液力耦合器内部工作液体的循环流量和能量损失增加，传动效率降低。为提高液力耦合器的传动效率，在设计过程中对其结构参数（如工作腔形状、叶片角度、直径等）进行优化，采用高效的冷却系统控制工作液体的温度，确保液力耦合器在高效区运行。例如，采用变矩器锁止技术，在系统稳定运行且转速差较小时，通过机械锁止机构将泵轮和涡轮刚性连接，使液力耦合器直接传递动力，可显著提高传动效率。

(3) 系统总传动效率：通过理论分析和实验测试，在不同工况下对系统总传动效率进行研究。实验结果表明，在额定工况下，新型机械传动系统的总传动效率可

达90%以上，相较于传统的齿轮-带复合传动系统，传动效率提高了10%-15%。在部分负荷工况下，由于液力耦合器的柔性调节作用，系统仍能保持较高的传动效率，有效降低了能量损耗。

3.2 承载能力研究

承载能力是衡量机械传动系统能否适应高扭矩、重载工况的关键指标。新型机械传动系统的承载能力主要取决于行星齿轮机构的设计参数和制造工艺。

(1) 齿轮强度计算：行星齿轮机构中的齿轮在传递动力过程中，承受着较大的接触应力和弯曲应力。根据齿轮强度理论，采用赫兹接触应力公式和弯曲疲劳强度公式对齿轮的接触强度和弯曲强度进行计算。通过合理选择齿轮材料（如高强度合金钢）、优化齿轮参数（如增大模数、增加齿宽、合理设计齿形等）以及采用先进的热处理工艺（如渗碳淬火、氮化处理等），可有效提高齿轮的接触强度和弯曲强度，从而提升行星齿轮机构的承载能力。例如，对齿轮进行渗碳淬火处理后，齿面硬度可大幅提高，接触疲劳强度显著增强，能够承受更大的载荷。

(2) 行星轮均载分析：在行星齿轮机构中，多个行星轮同时参与啮合，为保证各行星轮均匀分担载荷，避免出现偏载现象，对行星轮的均载性能进行分析。采用力学模型和数值计算方法，研究行星轮个数、行星架结构刚度、齿轮制造误差等因素对均载性能的影响。通过优化行星架结构设计，提高其制造精度，采用均载机构（如弹性元件、浮动机构等），可有效改善行星轮的均载性能，充分发挥各行星轮的承载能力。例如，在行星架上安装弹性均载元件，当某个行星轮受到较大载荷时，弹性元件发生变形，使其他行星轮分担部分载荷，从而实现均载。实验结果表明，经过均载优化后的行星齿轮机构，其承载能力相较于未优化前提高了30%-50%，能够满足高扭矩、重载工况的要求。

3.3 稳定性研究

稳定性是保证机械传动系统可靠运行的重要性能指标。新型机械传动系统在运行过程中，可能受到外部载荷波动、转速变化以及自身结构振动等因素的影响，导致系统运行不稳定。为研究系统的稳定性，从以下几个方面进行分析：

(1) 振动特性分析：建立新型机械传动系统的动力学模型，采用有限元分析方法对系统的振动特性进行研究。考虑系统中各部件的质量、刚度、阻尼等参数，分析系统在不同工况下的固有频率和振型。通过优化系统结构设计，调整部件的质量分布和刚度配置，避免系统

在工作转速范围内发生共振现象。例如,对输入轴和输出轴进行模态分析,通过改变轴的直径、长度以及支撑方式,调整轴的固有频率,使其避开工作转速引起的激励频率,减少振动的发生。同时,在系统中设置阻尼装置(如橡胶阻尼垫、液压阻尼器等),增加系统的阻尼比,抑制振动的传播和放大,提高系统的稳定性。

(2) 动态响应分析:在考虑外部载荷波动和转速变化的情况下,对新型机械传动系统的动态响应进行分析。采用数值仿真方法,模拟系统在不同工况下的运行过程,研究系统输出转速、扭矩的波动情况以及系统的过渡过程特性。通过优化控制系统的控制策略,如采用先进的PID控制算法或自适应控制算法,对系统的运行状态进行实时调节,减小输出参数的波动,提高系统的动态稳定性。例如,当系统受到突然加载或卸载时,控制系统能够迅速调整液力耦合器的工作状态和行星齿轮机构的传动比,使系统输出转速和扭矩保持稳定,避免出现过大的波动和冲击。实验结果表明,经过稳定性优化后的新型机械传动系统,在各种工况下均能保持稳定运行,输出转速和扭矩的波动范围控制在较小范围内,满足实际工程应用的要求。

3.4 实验测试

为验证新型机械传动系统的设计性能,搭建了实验测试平台,对系统的各项性能指标进行了实验测试。实验测试平台主要由动力源(电机)、新型机械传动系统、加载装置、测量传感器以及数据采集与处理系统等部分组成。

(1) 实验方案设计:根据新型机械传动系统的设计要求和性能研究内容,制定了详细的实验方案。实验工况包括不同的输入转速(从低速到高速)、不同的加载扭矩(从轻载到重载)以及不同的运行时间(模拟长期运行工况)。在每个实验工况下,测量系统的输入功率、输出功率、转速、扭矩、油温、油压等参数,并记录系统的运行状态和振动噪声情况。

(2) 实验结果分析:通过对实验数据的分析,得到了新型机械传动系统在不同工况下的性能曲线和性能指标。实验结果与理论分析和数值模拟结果基本吻合,验证了新型机械传动系统设计的合理性和性能的优越性。在传动效率方面,实验测得的系统总传动效率与理论计算值偏差在5%以内,在额定工况下达到了设计要求的90%以上;在承载能力方面,系统能够稳定承受设计的最大加载扭矩,且在长期重载运行过程中,齿轮等关键部件未出现明显的磨损和损坏现象;在稳定性方面,系统在各种工况下的振动幅值和噪声水平均在允许范围内,输出转速和扭矩的波动稳定,表明系统具有良好的稳定性。实验结果充分证明了新型机械传动系统在性能上相较于传统传动系统具有显著优势,为其进一步的工程应用提供了可靠的实验依据。

4 结束语

本研究开发出融合行星齿轮与液力耦合的复合式机械传动系统。凭借创新设计,该系统在传动效率、承载能力、稳定性上表现优异。经理论分析与实验测试,总传动效率超90%,承载能力较传统系统提升30%-50%,工况适应性强。此成果为工业机械传动难题提供有效方案,应用前景广阔。但系统轻量化设计不足,难以契合重量敏感场景。后续可围绕轻量化、智能控制及与新能源、物联网等技术融合深入研究,持续提升综合性能与竞争力,推动机械传动技术革新。

参考文献

- [1]赵强.新型机械传动系统的创新设计思路探讨[J].机械设计与制造工程,2022,51(8):25-28.
- [2]孙悦.基于多学科优化的新型机械传动系统性能提升研究[D].华中科技大学,2021.
- [3]刘辉.新型机械传动系统在工业自动化中的设计应用及性能分析[J].工业工程与管理,2023,28(4):123-128.
- [4]陈华.面向新能源装备的新型机械传动系统设计与可靠性研究[J].能源工程,2022,42(6):45-50.