

印刷装备齿轮系统优化设计及动态特性研究综述

窦水海^{1a,1b}, 刘玉鑫^{1a,1b}, 王乐^{1a,1b}, 孙兆永^{1c}, 王兆华^{1a,1b}, 林兆江², 杜艳平^{1a,1b*}

(1.北京印刷学院 a.机电工程学院 b.新闻出版领域关键技术应用研究与服务综合实验室

c.基础教育学院应用物理与波动工程实验室, 北京 102600; 2.唐山元创自动化科技股份

有限公司河北省纸制品整饰成型智能装备技术创新中心, 河北 唐山 064100)

摘要: **目的** 齿轮系统作为印刷装备核心子系统之一, 其优化设计直接影响着印刷装备的动态特性, 进而对印品质量产生重要影响, 因此亟须对其研究进展进行综述。**方法** 通过文献综述法, 梳理总结印刷装备齿轮系统动力学建模方法、优化设计及动态特性, 以及与印品质量之间的关系等方面的研究成果, 归纳概括各研究方法及其适应性, 并展望未来的研究方向。**结果** 目前, 针对印刷装备复杂齿轮系统精细化动力学建模方法及运行稳定性分析的研究相对匮乏, 针对印刷装备齿轮传动系统、执行系统、结构系统动力学建模与优化设计中的耦合作用的研究相对较少, 针对印刷装备复杂齿轮系统的动态特性与印品质量指标之间的关系规律的研究相对缺乏, 这些将成为未来的研究重点。**结论** 采用高精度多物理场仿真技术有望进一步对印刷装备齿轮系统进行精细化、复杂性建模, 采用拓扑优化算法可以满足印刷装备齿轮系统高稳定性、高耦合性优化设计的需求, 采用深度学习方法能够挖掘动态特性与印品质量评价指标的关联规律, 可为高端印刷装备关键自主可控技术的研发攻关提供支撑。

关键词: 印刷装备; 齿轮系统; 动力学建模; 优化设计

中图分类号: TB122; TB21

文献标志码: A

文章编号: 1001-3563(2024)17-0189-11

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2024.17.023

Review of Optimization Design and Dynamic Characteristics Research on Gear Systems in Printing Equipment

DOU Shuihai^{1a,1b}, LIU Yuxin^{1a,1b}, WANG Le^{1a,1b}, SUN Zhaoyong^{1c},
WANG Zhaohua^{1a,1b}, LIN Zhaojiang², DU Yanping^{1a,1b*}

(1. a. School of Mechanical and Electrical Engineering, b. Comprehensive Laboratory for Key Technology Application Research and Service in the Field of Press and Publication, c. Laboratory of Applied Physics and Wave Engineering, School of Basic Education Beijing, Beijing Institute of Graphic Communication, Beijing 102600, China;

2. Hebei Province Paper Product Decoration Forming Intelligent Equipment Technology Innovation Center, Tangshan Yuanchuang Automation Technology Co., Ltd., Hebei Tangshan 064100, China)

ABSTRACT: Gear systems, as one of the key subsystems in printing equipment, have a direct impact on the dynamic characteristics of printing equipment and further affect print quality. Therefore, it is urgent to provide a review of their research progress. Through a comprehensive literature review, research findings pertaining to dynamic modeling techniques, optimization design strategies, dynamic characteristics of gear systems in printing equipment, and their

收稿日期: 2024-04-01

基金项目: 北京市教育委员会-北京市自然科学基金 (KZ202210015019); 北京市属高等学校高水平科研创新团队建设支持计划 (BPHR20220107); 北京印刷学院校级项目 (Ea202306)

*通信作者

correlation with print quality were summarized. Methodologies employed in various research endeavors were synthesized and summarized along with their applicability. Insights into prospective avenues for further investigation were provided. Currently, there is a relative lack of research on refined dynamic modeling methods and operational stability analysis of complex gear systems in printing equipment. Research on the coupling effects in the dynamic modeling and optimization design of gear transmission systems, execution systems, and structural systems in printing equipment is relatively limited in the field. There is a relative lack of research on the relationship between dynamic characteristics of complex gear systems in printing equipment and quality evaluation indicators of printing products. These will be the focal points of future research endeavors. High-precision multi-physics simulation technology holds promise for further refining and complex modeling of gear systems in printing equipment. Topology optimization algorithms can meet the demands of high stability and high coupling optimization design for gear systems in printing equipment. Deep learning methods can explore the correlation patterns between dynamic characteristics and print quality evaluation indicators. This research can provide support for the development and breakthroughs in key autonomous and controllable technologies for high-end printing equipment.

KEY WORDS: printing equipment; gear system; dynamic model; optimization design

印刷装备的齿轮系统由多个直/斜/锥齿轮轮系、滚筒和墙板等组成,该系统具有结构复杂、集成度高和工作精度高等特点,如图 1 所示。加工精度、齿侧间隙、装配误差及运行状况等因素会显著影响印刷装备的动态特性,而动态特性直接影响印刷装备的运行稳定性和可靠性,进而影响印品的质量^[1]。在印刷装备高速运转时,传动系统产生的动态激励是振动的主要来源,严重时可能导致系统动态特性发生突变,引发机构失稳。若印刷装备齿轮系统的结构参数设计不当,则导致齿侧间隙积累增大,在高速运转时机构传递误差相应增加,从而影响印刷装备的运行稳定性。若不对印刷装备齿轮系统进行优化改进,不仅会影响印刷装备的印刷效率、印品质量,严重时可能导致设备损坏,造成严重的经济损失。基于此,国内外学者对印刷装备齿轮系统的优化设计和动态特性进行了广泛而深入的研究,取得了丰硕的成果。

本文以印刷装备齿轮系统为研究对象,通过查阅文献和实际调研综述了动力学建模方法、优化设计及动态特性与印品质量关系的研究现状。通过概括、分析和总结印刷装备齿轮系统优化设计、动态特性等,拟为印刷装备在实际生产过程中关键部件结构参数选择、油墨成分调配和输出墨量控制提供参考。

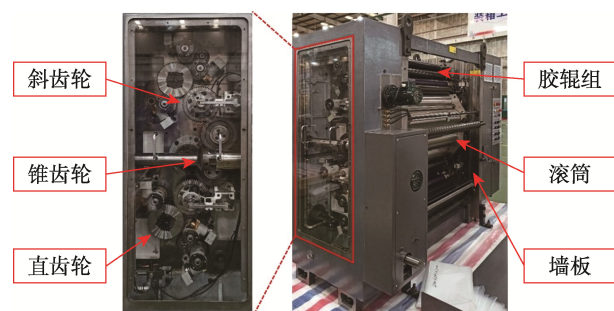


图 1 书刊印刷装备齿轮系统实物
Fig.1 Physical picture of book printing machine gear system

1 印刷装备齿轮系统动力学建模研究现状

印刷装备齿轮系统由齿轮传动系统、执行系统和结构系统组成。此外,由齿轮传动系统和执行系统组成的印刷滚筒轴端齿轮系统如图 2 所示^[2]。作为印刷装备的重要组成部分,齿轮系统的稳定运行对印刷精度具有重要影响。为了更直观、具体地描述印刷装备的动态特性,国内外学者通常运用有限元法和解析法对印刷装备的齿轮系统进行深入的动力学建模研究。2 种建模方法各具优势,其优势和成因如表 1、2 所示。此外,不同的建模方法在适用性上存在差异。有限元法在印刷装备齿轮系统不同子系统的建模过程中有多种应用,在齿轮传动系统建模中,它可以有效地仿真时变啮合刚度等参数激励;在执行系统与结构建模方面,分别用于分析仿真滚筒、墙板的承载能力。解析法仅适用于传动系统建模,将内、外部激励等效为时变或时不变参数,可显著提高运算效率。本节从印刷装备齿轮系统的组成角度出发,综述了印刷装备齿轮传动系统、执行系统和结构系统的建模方法。

1.1 齿轮传动系统建模方法

印刷装备齿轮传动系统指由齿轮副和传动轴等组成的系统,用于传递运动和动力。齿轮作为印刷装备传动系统的主要部件,它在参数激励振动下的动态特性将直接影响齿轮传动系统整体的振动特征及模型的计算结果。目前,齿轮传动系统的建模方法主要有有限元法、解析法等,解析法包括材料力学法、势能法。时变啮合刚度作为齿轮机构的主要内部激励参数,近年来引起了国内外学者的广泛关注,其计算方法得到迅速发展。有限元法因为在精确建模、多工况分析、考虑非线性、详细分析结果方面具有优势,计

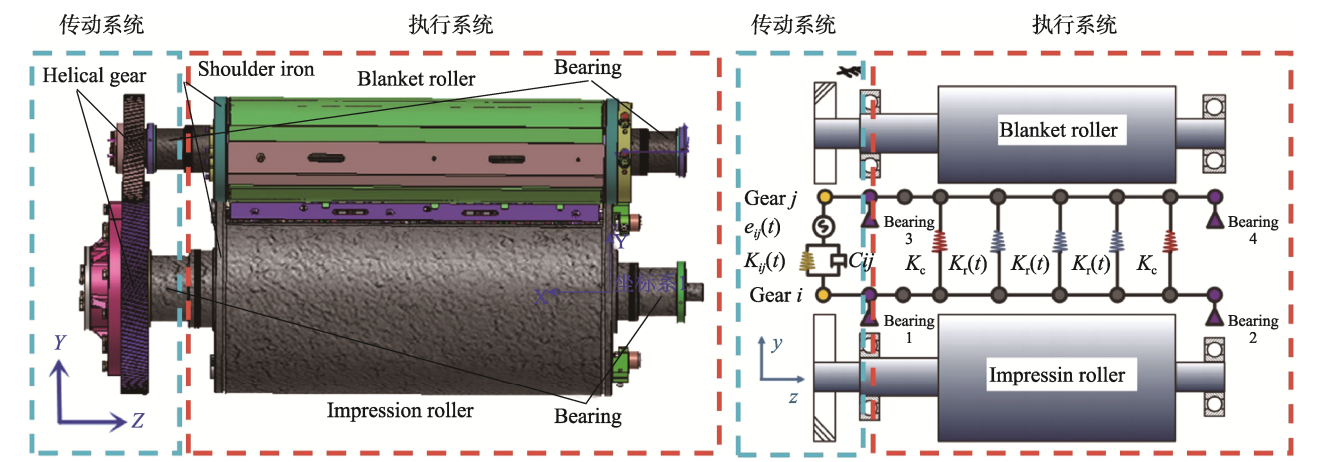


图 2 印刷滚筒轴端齿轮系统三维模型和有限元模型^[2]
Fig.2 3D model and finite element model of printing cylinder shaft end gear system^[2]

表 1 采用有限元法和解析法进行齿轮系统建模的优势及其成因

Tab.1 Advantages and causes of modeling gear systems by finite element method and analytical method		
方法	优势	成因
有限元法	精确建模	可以精确地建立复杂的齿轮结构和啮合过程模型, 同时, 也可以考虑各种几何特征、材料特性和工况变化 ^[3]
	多工况分析	可以在不同工况下进行分析, 包括不同载荷、转速和工作状态 ^[4]
	考虑非线性	可以处理非线性的材料和接触行为, 这在齿轮的啮合接触研究中尤其重要 ^[5]
	详细结果分析	该方法提供了详细的应力、变形和啮合接触信息, 有助于深入理解齿轮系统的行为 ^[4]
解析法	综合性能分析	不仅考虑刚度, 还能够分析变形、应力和故障等多个方面, 使其适用于综合性能分析 ^[6]
	适用范围广	适用于各种齿轮类型和系统配置, 包括直齿轮、斜齿轮和人字齿轮等 ^[7]
	考虑时变性	能够考虑齿轮在运动中的时变性, 从而更准确地模拟实际工况下的啮合刚度变化 ^[8]
	灵活性	计算相对简便, 该方法可用于分析不同工况下的齿轮系统, 如恒定转速、变速、负载变化等 ^[9]

算得出的时变啮合刚度曲线准确性较高^[10], 曾经被用来检验加载齿接触分析法的准确性, 如图 3 所示。与其他计算方法相比, 有限元法的计算成本相对较高, 难以计算多尺度参数影响时的刚度变化情况^[11]。早在 1987 年, Yang 等^[12]在计算时变啮合刚度时, 采用材料力学法、势能法等 2 种解析法进行求解。材料力学法是计算齿轮时变啮合刚度的重要方法, 它不仅能考虑齿轮材料的压缩模量、剪切模量等线性参数, 还能考虑材料的抗拉强度、弯曲强度等非线性参数。Chen 等^[13]提出了一种考虑轮齿变形时的啮合刚度材料力学解析模型, 同时考虑了齿轮基体变形后的刚度变化情况, 对时变啮合刚度进行了计算。势能法将齿轮假设为变截面悬臂梁, 在考虑轴向压缩刚度、剪切刚度、弯曲刚度、赫兹接触刚度及齿轮基体刚度变化的情况下, 综合计算齿轮的时变啮合刚度^[14]。由于势能法在综合性能分析、适应范围、灵活性方面具有优势, 能够综合考虑齿轮变形带来的啮合刚度变化, 因此其计算结果优于材料力学法, 被广泛应用于齿轮的时变啮合刚度计算^[15]。

通过上述研究成果发现, 齿轮传动系统动力学建

模方法主要包括有限元法、解析法。其中, 有限元法更加准确, 解析法则更加高效。虽然有研究人员在齿轮系统动力学建模方面进行了不同程度的研究, 但是针对印刷装备的复杂齿轮传动系统动力学建模的研究相对较少, 这将是印刷装备领域专家未来研究的重点。

1.2 执行系统建模方法

印刷装备执行系统主要由滚筒、墨辊等关键部件组成, 它们对支撑和维持印刷装备的正常运行至关重要。建立印刷装备执行系统的仿真模型能够直接通过计算反映相关结构参数对系统特性的影响, 同时也能够降低分析成本。近年来, 印刷装备执行系统的仿真模型的建立逐渐引起国内外学者的广泛关注^[16]。李乾等^[17]利用有限元方法建立了印刷装备结构系统关键部件滚筒的模型, 分析了滚筒壁厚对滚筒的影响。林硕^[18]研究了印刷装备恒载荷对滚筒压力的影响, 滚筒的三维模型如图 4a 所示。丛军峰^[19]采用有限元分析法对印刷装备执行系统中的刮墨系统进行建模, 并研究了振动特征。

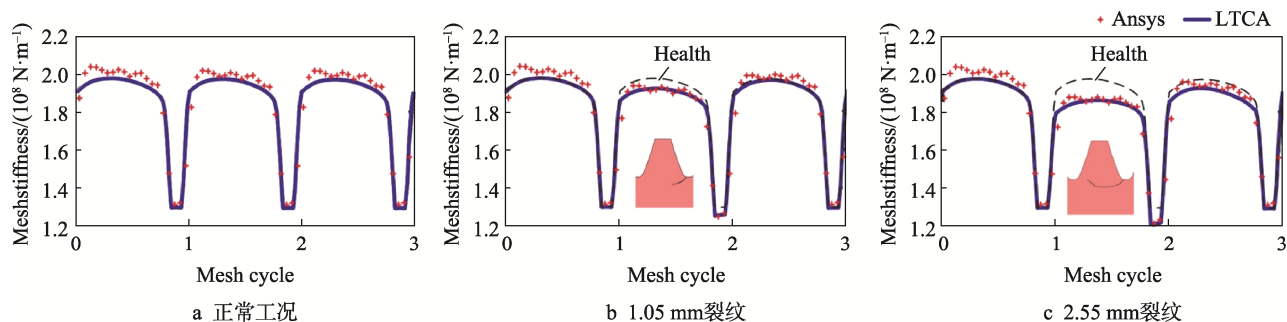
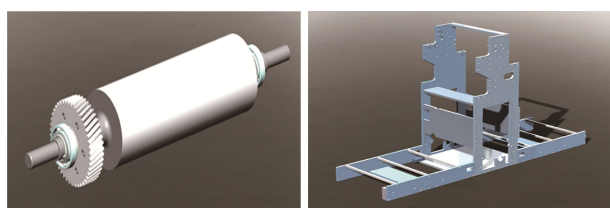


图3 Ansys 软件计算结果与提出的加载齿接触分析法计算结果的比较^[10]
Fig.3 Ring-planet mesh stiffness comparisons between results from the Ansys software and the proposed loaded tooth contact analysis method^[10]



a 印刷滚筒轴端齿轮系统三维模型

b 印刷装备结构系统三维模型

图4 印刷装备齿轮系统关键部件三维模型
Fig.4 3D model for critical components of printing equipment gear system

上述研究表明,印刷装备执行系统动力学建模方法主要为有限元法。通过有限元法可以准确添加载荷,以提升仿真精度。目前,考虑执行系统与齿轮传动系统间的耦合振动效应的相关研究较为匮乏,因此有必要进一步研究二者间的多部件耦合作用。

1.3 结构系统建模方法

印刷装备的墙板、机架和底座作为印刷装备结构系统的关键部件,起到了安装、固定传动系统和执行系统的作用,其三维模型如图4b所示。周玉松等^[20]建立了三维模型,并对装配误差进行了分析。李建青^[21]利用有限元方法对其振动机理进行了研究,将印刷装备的墙板简化为薄板结构进行建模分析,且考虑了安装孔对印刷装备动态特性的影响。

印刷装备结构系统关键部件的结构相对简单,采用有限元法可以在短时间内对其进行高精度建模与仿真,因此有限元法成为印刷装备结构系统动力学建模的主要方法。尽管已有学者对印刷装备结构系统进行了建模分析,但对结构系统与齿轮传动系统、执行系统耦合作用的研究较少,因此有必要深入研究系统间的耦合问题。

2 印刷装备齿轮系统优化设计研究现状

印刷装备齿轮系统的动力学建模结果表明,各个

部件的结构直接影响着印刷精度和运行稳定性,因此齿轮系统的优化设计成为确保印刷装备稳定运行和保证印品质量的关键。这里对印刷装备齿轮传动系统、执行系统和结构系统关键部件的优化设计方法进行了综述。

2.1 齿轮传动系统关键部件优化设计方法

齿轮传动系统优化设计指通过科学合理的设计来提高齿轮传动系统的可靠性、耐久性和传动效率。对齿轮传动系统进行优化设计,不仅能够提高齿轮的承载能力,延长齿轮的使用寿命,而且能够减少由齿轮误差等因素引起的设备振动和噪声等问题。齿轮是印刷装备齿轮传动系统的关键部件,影响齿轮设计的参数主要包括模数、齿数、齿宽、压力角等^[1],在优化过程中每个参数不可能同时达到最优,必须各有权重,因此对齿轮的优化设计属于多目标优化问题。为此,国内外学者利用有限元法、经验修形法对印刷装备齿轮传统系统进行了优化设计。

Muminovic 等^[22]对增材制造装备中的直齿轮机构进行了多目标优化设计,降低了系统的总质量,并且提高了其动态特性,优化后的齿轮如图5所示,其中标号部分为主要受力区域,经优化后齿轮的轮齿质量减少了16.31%。付学中等^[23]分析了面齿轮传动啮合刚度,优化了修形减振,使得综合啮合刚度大幅下降,由 $1.391 \times 10^8 \text{ N/m}$ 降为 $0.124 \times 10^8 \text{ N/m}$,减小了约91%,故有效减小了面齿轮传动的振动和噪声。贾超等^[24]研究了高速齿轮传递误差、啮入冲击的激励模拟及齿面优化修形,传动误差幅值下降了9.7%。郭能等^[25]通过分析优化前后箱体的动力学和强度特征,对重型汽车变速器箱体进行了拓扑优化,进而降低了系统的重量,变速箱体的质量降低了3.33 kg,占原质量的4.58%,达到了轻量化的目的。同时,变速箱体第1阶模态略有提高,在不同工况下最大单元应力均有所下降,由112.9 MPa降至89.30 MPa,下降了约20.9%。梁明轩^[26]采用模态分析技术和拓扑优化技术对齿轮箱进行了轻量化设计,改进后的变速器箱体的刚度、强度基本不变,箱体前两阶固有频率分别提高了

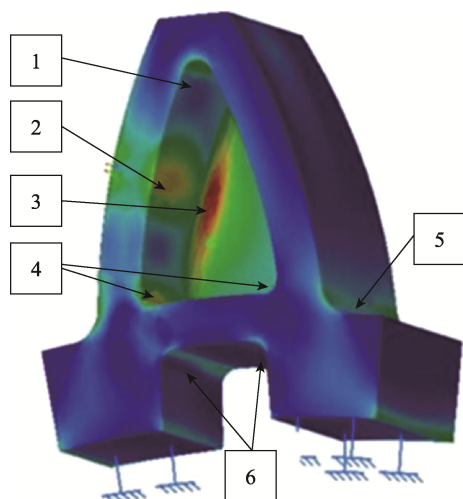


图5 齿轮齿面关于冯-米塞斯应力的分析(增加应力)^[22]

Fig.5 Analysis on Von-Mises stress of gear tooth places (increased stress)^[22]

4.1%、5.0%，箱体质量减少了约 6.8%，变速器箱体的动力学性能得到明显提高。贾涵杰^[27]通过建立多级齿轮三维拓扑修形模型，提高了精度。吴鸿雁等^[28]建立了以柔轮界面的变位系数为变量的侧隙优化控制模型，其设计满足空间啮合要求的渐开线三维柔轮齿廓，提高了渐开线齿廓谐波齿轮的啮合性能。Choi 等^[29]研究了齿顶和齿根效应对齿轮宏观几何优化的影响，进而优化了齿轮质量、啮合效率等。

经验修形法也是优化齿轮的一种方法，根据实际运行工况对齿轮进行适当修形，进而提高其运行稳定性和承载能力。Baglioni 等^[30]通过仿真技术，引入了平均摩擦因数，从多角度分析了齿轮系统，得到了“最优理论”参数和“接近实际”参数。Wang 等^[31]对齿轮的柔性变形进行了研究，并进行了优化设计。近年来，超材料的发展突飞猛进，Dou 等^[32]设计了一种机械超材料复合齿轮，其机械超材料相当于阻尼器，将齿轮传动过程中的振动减小了约 54.7%。由于经验修形法的优化效果具有较高的不确定性，因此随着实验次数的增加，优化效率随之降低。基于有限元软件的拓扑优化法可以根据多目标需求对齿轮传动系统关键部件进行一次性拓扑优化，因此基于有限元软件的拓扑优化法更加高效。

目前的研究进展表明，齿轮传动系统优化设计方法主要包括有限元法、经验修形法，利用上述方法对齿轮传动系统进行优化设计，可以实现轻量化、高性能和低噪声的目标。少有学者考虑齿轮传动系统的高稳定性、高速性及齿轮配合运行稳定性等方面对齿轮传动系统优化设计的影响。

2.2 执行系统关键部件优化设计方法

执行系统优化设计的目的在于通过结构优化，在

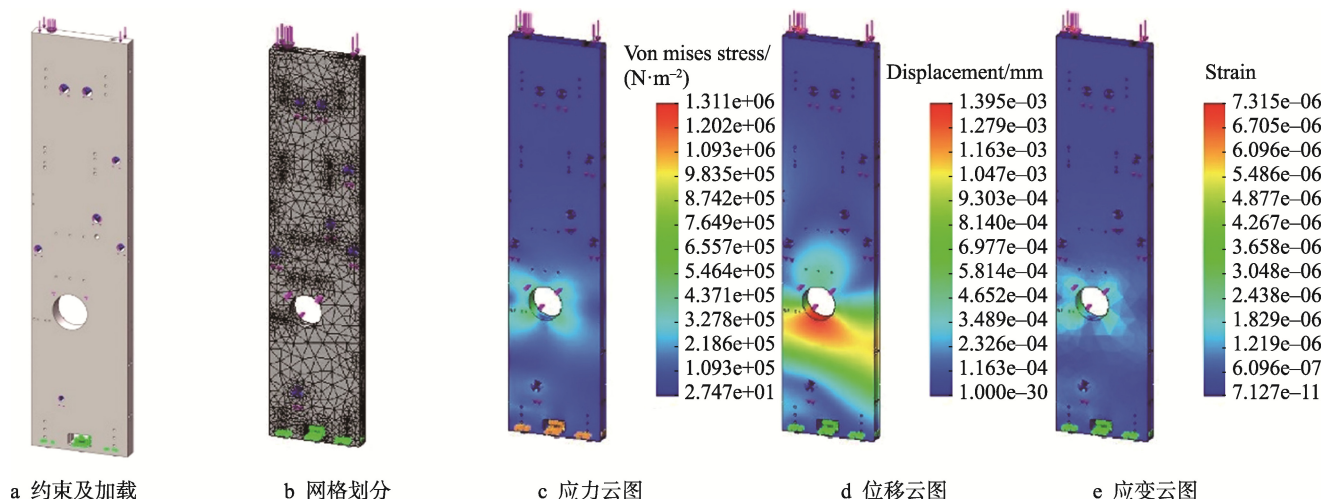
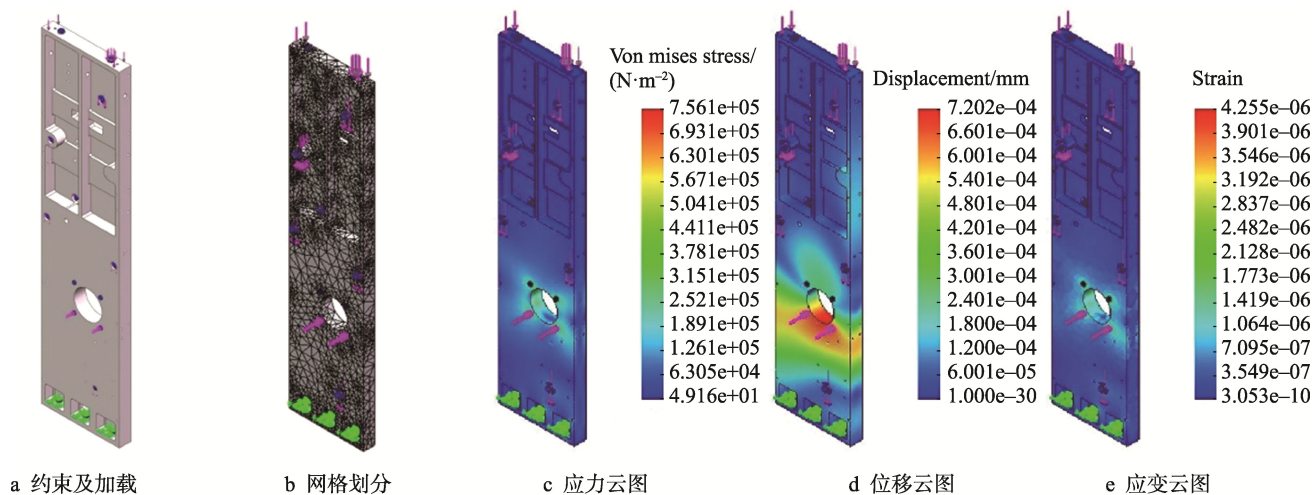
减轻质量或改变滚筒结构的条件下，提高其动态特性和刚度。在印刷装备中，印刷滚筒是执行系统的关键部件，其性能直接关系到印刷效果和生产效率。张庆山等^[33]通过有限元软件 Ansys Work-bench 对模切机印刷滚筒进行模态分析和质量优化设计，在减轻质量的条件下提高其刚度和动态性能。向磊等^[34]提出了一种有限元法与正交试验法相结合的优化设计方法，在考虑变刚度印刷滚筒支承轴承径向刚度对其挠曲变形的影响下，对变刚度印刷滚筒结构分布及结构尺寸进行优化设计，提升其抗挠曲变形能力，为印刷滚筒的优化设计提供了可行的方法。经优化后，变刚度印刷滚筒中部挠曲变形得到改善，轴向最大挠曲变形量降低了 10.2%。有限元软件可以有效仿真多种工况下印刷装备执行系统的受力情况，并且通过调整网格大小可以提高运算效率。与其他优化设计方法相比，基于有限元软件对印刷装备执行系统进行拓扑优化是一种高效的优化设计方法。

最新的研究进展显示，印刷装备执行系统的主要优化设计方法为有限元法。针对印刷装备执行系统的优化设计，学者们的研究重点主要集中在提高单个部件的承载能力和动态性能上，对于多部件之间的耦合作用考虑得相对较少。

2.3 结构系统关键部件优化设计方法

结构系统优化设计旨在通过结构优化，在确保结构系统支撑能力的前提下，提高局部强度和刚度，以及结构减重。优化设计的核心目标在于提高结构系统的材料利用率和承载能力。在印刷装备中，墙板作为结构系统的关键部件，其设计、加工和装配等环节对印刷装备的精度和性能具有重要影响。墙板的优化设计对提高印刷机的使用寿命至关重要，而有限元法是主要的优化设计方法。例如，李贤伟^[35]使用有限元仿真软件在保证墙板承载能力不变的情况下，进行了轻量化处理，优化前后的效果如图 6、图 7 所示。此外，王水等^[36]依据经编机墙板的结构特点，借助有限元仿真软件，对影响墙板性能的墙板壳厚和筋板厚度参数进行了分析，通过优化该参数，提高了材料的利用率，降低了能耗，改善了结构，优化后墙板在保持外部尺寸不变且满足使用要求的情况下，其质量减少了 17%。高振清等^[37]对胶印机关键部件间隙问题进行了研究。韩晓良^[38]计算了定位产生的误差，并分析其原因，提出了新的装配定位方法，提高了定位精度和印刷质量。有限元软件可以通过添加外部载荷的方式有效仿真印刷装备齿轮传动系统、执行系统对结构系统的作用，提升了拓扑优化效率，因此印刷装备结构系统关键部件优化设计主要采用基于有限元软件的拓扑优化法。

由上述研究可以看出，印刷装备结构系统部件的结构较简单，大大提升了有限元仿真的效率，因此结构系统优化设计方法主要采用有限元法。大多数学者

图6 印刷装备墙板有限元分析过程(优化前)^[35]Fig.6 Finite element analysis process of printing equipment wall panel (before optimization)^[35]图7 印刷装备墙板有限元分析过程(优化后)^[35]Fig.7 Finite element analysis process of printing equipment wall panel (after optimization)^[35]

多对印刷机墙板的单一结构进行优化,对于整体齿轮系统的传动机构布置参数(如相邻轮系夹角、结构支撑刚度与阻尼和胶辊组装配相对位置等)考虑得较少。

3 印刷装备齿轮系统动态特性及其与印品质量的关系研究现状

印刷装备齿轮系统优化设计可以通过调节印刷装备齿轮系统动态特性(包括振动、噪声、动态挠曲、动态拉弯等)提升印刷装备的印品质量。这里综述了印刷装备齿轮系统动态特性分析的研究进展,鉴于深入研究印刷装备齿轮系统动态特性与印品质量之间的关系对提升印品质量具有重要意义,总结了动态特性对印品质量影响的研究成果,还归纳总结了印刷装备印品质量的提升方法。

3.1 印刷装备齿轮系统动态特性

印刷装备齿轮系统较复杂,导致其动态特性具有

不确定性,进一步影响了印品质量和印刷装备在高速度下的稳定性^[39],可见分析研究其动态特性十分重要。Li等^[40]将齿轮系统简化为转子系统,建立了系统的微分方程,并分析了系统的稳定性。Huang等^[41]建立了斜齿轮-电机柔性模型,利用相关指标对系统的变化进行了定量描述。Yang等^[42]研究了含有裂纹故障时齿轮系统的动态响应特性。Feng等^[43]利用实验方法对齿轮磨损时的动态特性进行了监测,同时预测了齿轮的磨损趋势,实测数据与预测数据之间的误差可保持在5.0%以内。Chang等^[44]研究了在磨损状态下齿轮宏观磨损特征与微观磨损特征间的关系,以及振动特性。Smith等^[45]研究了齿轮系统振动特征的指标描述方法。Li等^[46]研究了热效应与动态特性共同作用下直/斜齿轮的热传递特性。Paschold等^[47]研究了齿轮在磨损状态下的热平衡问题。于旺^[48]考虑了乏油及动载工况下,行星齿轮系统的动态特性及热效应作用。丁华锋等^[49]基于斜齿轮的动态响应,分析了斜齿轮运行过程中热弹流的润滑特性。Wang^[50]研究

了斜齿轮的热变形模型,并分析了其动态特性。

尽管许多学者已对齿轮系统的动态特性和热效应等进行了深入分析研究,但这些研究大多基于单级传动,对印刷装备多级传动引起的热胀效应的影响考虑得较少。考虑齿侧间隙的累积误差、高速传递误差及热胀效应等因素的分析变得尤为重要,这将丰富印刷装备齿轮系统动态特性研究内容。

3.2 印刷装备齿轮系统动态特性与印品质量关系

齿轮系统的传动灵敏度越高,其动态响应精度越高,所以印刷装备齿轮系统的动态特性能够直接影响印品的质量。肖泽^[51]对印刷机进行了建模,并对质量的影响因素进行了控制研究。肖颖等^[52]根据质量评价标准,对EL薄膜喷墨印刷质量进行了评价。易锦等^[53]利用模糊评价方法对印品质量进行了评价。韩胜兰^[54]基于数字印刷系统对印刷品质量进行了分析。郭丽娜等^[55]、张和平等^[56]进行了灰关联模型在卡纸印刷质量评价的应用研究,预测精度高达95.059%。Løkke等^[57]研究了不同基材对印品质量的影响。赵闪闪等^[58]研究了涂布纸水性油墨喷墨印品质量的影响因素。孙冰^[59]建立了柔印质量分析与评价模型。Norrick等^[60]、Neeb等^[61]基于动力学模型对印刷装备齿轮的扭转振动进行了精密计算,并基于此模型研究了扭转振动对印品质量的影响。以上研究表明,学者们可以通过对印刷装备齿轮系统进行优化设计来改变其动态特性,进而提升印品质量。

此外,学者们还通过调整印刷装备油墨的成分、输出墨量来提高印品质量。Dong等^[62]研制了一种新型的聚乙二醇二丙烯酸酯水性分散染料,显著提高了油墨滴在表面的流变性,从而提高了涤纶织物的印刷质量。Boroujeni等^[63]提出了一种尿素低聚物来提高棉织物印花的质量,与含有尿素的浆料相比,含有尿素低聚物的印花棉织物的色调和色度得到明显改善。苗润丰等^[64]基于密度曲线法对印刷装备输出墨量进行控制,打印1 mm线条的线宽变化率最低达到3.64%,相较于最大墨量法,降低了33.82%,有效提升了热转移印花的印品质量。由于油墨直接与涂布相互作用,因此学者们可以直接根据两者之间的相互作用属性来提升印刷质量。由于涂布种类具有多样性,使得涂布与油墨之间的作用具有多样性,因此需要根据实际情况选择合适的印品质量提升方法。

综上所述,学者已对印品质量评价进行了研究,但是大多基于成品检测手段,很少将印刷装备的动态特性与评价指标相互关联,从而研究印刷装备复杂齿轮传动系统的动态特性与印品质量的关系。同时,学者们通过对印刷装备的部件结构、油墨成分等方面进行优化,有效提升了印品质量,但是针对高速运转印刷装备印品质量提升的研究相对较少。由此可见,今

后有必要将印刷装备的高速运转对印品质量的影响作为研究重点。

4 结语

通过综述研究发现,少有学者对印刷装备齿轮系统动力学建模的研究成果进行综述,更鲜有学者从印刷装备齿轮系统优化设计、印刷装备齿轮系统动态特性及其与印品质量的关系方面对相关研究成果进行梳理、总结、归纳。本文对印刷装备齿轮系统的建模方法,以及印刷装备齿轮系统的优化设计和动态特性进行了深入分析,主要结论如下。

1) 通过综述印刷装备齿轮系统的传动系统、执行系统和结构系统建模方法的研究现状,发现有限元法、解析法适用于印刷装备齿轮不同子系统的建模。有限元法主要用于印刷装备齿轮传动系统、执行系统和结构系统的建模,而解析法仅适用于传动系统的建模。随着印刷装备齿轮传动系统复杂性的提高,目前针对印刷装备复杂的齿轮传动系统动力学建模的研究相对较少,且解析法建立的动力学模型与实际相差越来越大,未来可将实验数据导入有限元仿真软件中,并分析解决解析法建模不足的问题。此外,针对印刷装备传动系统、执行系统、结构系统耦合作用的研究相对匮乏,齿轮系统精细化建模及方法研究相对较少,因此有必要深入研究印刷装备齿轮系统多物理场耦合模型及高精度建模方法。未来可基于多物理场仿真技术,利用COMSOL Multiphysic等多物理场仿真软件将有限元模型进行细化网格处理,以填补上述研究的不足。

2) 通过综述印刷装备齿轮系统各部件优化设计方法的研究现状,发现有限元法被广泛应用于传动系统、执行系统、结构系统的优化设计,经验修形法多被应用于齿轮传动系统的优化设计。利用上述方法对齿轮传动系统进行优化设计,可以实现轻量化、高性能和低噪声的目标。鲜有学者考虑齿轮传动系统的高稳定性、高速性及齿轮配合运行稳定性等方面对齿轮传动系统优化设计的影响。国内外学者对印刷装备执行系统的优化设计研究主要集中于提高单个部件的承载能力和动态性能上,针对多部件之间的耦合作用的研究相对较少。对于结构系统的优化设计,大多数学者通常重点研究单一结构的印刷装备墙板优化,而相邻轮系夹角、支撑结构的刚度与阻尼、胶辊组装配等整体齿轮系统参数对墙板优化设计的影响方面的研究较少。随着机器学习的迅速发展,拓扑优化算法作为一种重要的机器学习算法,有望被用来研究印刷装备齿轮系统多目标优化设计。

3) 通过分析印刷装备齿轮系统的动态特性及其与印品质量的关系发现,学者们对单机传动的齿轮系统动态特性和热效应开展了深入研究,但对印刷装备多级传动所引起热胀效应的影响考虑得较少。在未

来的研究中,可以应用多物理场仿真软件研究齿侧间隙累积误差、高速传递误差及热胀效应等因素对齿轮系统动态特性的影响。此外,学者们依靠成品检测手段对印品质量进行了评价研究,通过印刷装备的动态特性与印品质量评价指标的关系来分析印刷装备齿轮系统动态特性与印品质量之间的规律等方面的研究较少。随着深度学习技术的发展,今后可以通过卷积神经网络、循环神经网络等深度网络模型深入挖掘二者之间的规律。同时,通过综述印刷装备印品质量的提升方法发现,今后有必要通过建立流-固耦合有限元模型来分析印刷装备高速运转对印品质量的影响。

参考文献:

- [1] 欧阳天成. 高速胶印机齿轮传动系统非线性动力学及弹流润滑研究[D]. 南京: 东南大学, 2016: 14-41.
- OUYANG T C. Study on Nonlinear Dynamics and Elastohydrodynamic Lubrication of Gear Transmission System of High-Speed Offset Press[D]. Nanjing: Southeast University, 2016: 14-41.
- [2] OUYANG T C, SU Z X, LI S Y, et al. Experimental and Numerical Investigations on Dynamic Characteristics of Gear-Roller-Bearing System[J]. Me-CHANISM and Machine Theory, 2019, 140: 730-746.
- [3] 李金锴, 陈勇, 臧立彬, 等. 基于有限元法的疲劳点蚀斜齿轮时变啮合刚度分析与试验研究[J]. 机械传动, 2021, 45(12): 1-7.
- LI J K, CHEN Y, ZANG L B, et al. Time Varying Meshing Stiffness Analysis and Experimental Study of Fatigue Pitting Helical Gear based on Finite Element Method[J]. Journal of Mechanical Transmission, 2021, 45(12): 1-7.
- [4] 贵新成, 李立顺, 李红勋, 等. 高重合度摆线内齿轮副时变啮合刚度计算与齿间载荷分配研究[J]. 机械工程学报, 2018, 54(21): 101-112.
- GUI X C, LI L S, LI H X, et al. Time-Varying Mesh Stiffness Calculation and Load Distribution among Teeth of Cycloid Internal Gear Pair with High Contact Ratio[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2018, 54(21): 101-112.
- [5] 张奎晓. 基于时变啮合刚度的齿轮非线性动力学的研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2013: 29-39.
- ZHANG K X. Study on Nonlinear Dynamics of Gears Based on Time-Varying Meshing Stiffness[D]. Shenyang: Northeastern University, 2013: 29-39.
- [6] 孟宗, 李佳松, 潘作舟, 等. 裂纹故障对轮齿时变啮合刚度的影响分析[J]. 中国机械工程, 2022, 33(16): 1897-1905.
- MENG Z, LI J S, PAN Z Z, et al. Influences of Crack Faults on TVMS of Gear Teeth[J]. China Mechanical Engineering, 2022, 33(16): 1897-1905.
- [7] 邹浩然, 王三民, 何前进, 等. 修形人字齿轮副时变啮合刚度的解析算法[J]. 西北工业大学学报, 2022, 40(3): 538-548.
- ZOU H R, WANG S M, HE Q J, et al. Analytical Algorithm for Time-Varying Meshing Stiffness of Modified Herringbone Gear Pair[J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2022, 40(3): 538-548.
- [8] 魏鹏, 邓松. 基于势能法的两级斜齿轮系统时变啮合刚度计算与动态特性研究[J]. 机械传动, 2020, 44(9): 51-57.
- WEI P, DENG S. Time-Varying Mesh Stiffness Calculation and Research on Dynamic Characteristic of Two-Stage Helical Gear System Based on Potential Energy Method[J]. Journal of Mechanical Transmission, 2020, 44(9): 51-57.
- [9] 林腾蛟, 赵子瑞, 江飞洋, 等. 考虑温度效应的斜齿轮时变啮合刚度解析算法[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2020, 47(2): 6-13.
- LIN T J, ZHAO Z R, JIANG F Y, et al. An Analytic Algorithm of Time-Varying Mesh Stiffness of Helical Gears Considering Temperature Effect[J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2020, 47(2): 6-13.
- [10] HAN H Z, ZHAO Z F, TIAN H X, et al. Fault Feature Analysis of Planetary Gear Set Influenced by Cracked Gear Tooth and Pass Effect of the Planet Gears[J]. Engineering Failure Analysis, 2021, 121: 105162.
- [11] ZHAO B S, HUANGFU Y F, MA H, et al. The Influence of the Geometric Eccentricity on the Dynamic Behaviors of Helical Gear Systems[J]. Engineering Failure Analysis, 2020, 118: 104907.
- [12] YANG D C H, LIN J Y. Hertzian Damping, Tooth Friction and Bending Elasticity in Gear Impact Dynamics[J]. Journal of Mechanisms, Transmissions, and Automation in Design, 1987, 109(2): 189-196.
- [13] CHEN Z G, ZHOU Z W, ZHAI W M, et al. Improved Analytical Calculation Model of Spur Gear Mesh Excitations with Tooth Profile Deviations[J]. Mechanism and Machine Theory, 2020, 149: 103838.
- [14] LIANG X H, ZUO M J, PANDEY M. Analytically Evaluating the Influence of Crack on the Mesh Stiffness of a Planetary Gear Set[J]. Mechanism and Machine Theory, 2014, 76(1): 20-38.
- [15] TIAN X H. Dynamic Simulation for System Response of Gearbox Including Localized Gear Faults[D]. Edmonton: University of Alberta: 2004: 18-49.
- [16] LIU Q, HUANG Z, POINTER M R, et al. Optimizing the

- Spectral Characterisation of a CMYK Printer with Embedded CMY Printer Modelling[J]. *Applied Sciences*, 2019, 9(24): 5308.
- [17] 李乾, 何邦贵, 田大烈. 基于有限元对印刷机滚筒的仿真分析[J]. *价值工程*, 2017, 36(16): 145-146.
LI Q, HE B G, TIAN D L, et al. Simulation Analysis of Printing Press Cylinder Based on Finite Element Method[J]. *Value Engineering*, 2017, 36(16): 145-146.
- [18] 林硕. 基于恒载荷控制补偿的凹版印刷机滚筒压力仿真研究[J]. *自动化应用*, 2021(3): 23-25.
LIN S. Simulation Research on Cylinder Pressure of Gravure Printing Machine Based on Constant Load Control and Compensation[J]. *Automation Application*, 2021(3): 23-25.
- [19] 丛军峰. 印刷机刮墨系统振动特性仿真及实验研究[D]. 苏州: 苏州大学, 2017: 20-34.
CONG J F. Simulation and Experimental Study on Vibration Characteristics of Ink Scraping System of Printing Machine[D]. Suzhou: Soochow University, 2017: 20-34.
- [20] 周玉松, 程德和. 胶印机墙板安装同轴度误差分析及UG装配研究[J]. *安阳工学院学报*, 2012, 11(2): 4-8.
ZHOU Y S, CHENG D H. Research of Concentricity Error Analysis of Wall installation and UG Simulate Assembly Based on High-Speed and Single Sheet Feeding Lithographic Press[J]. *Journal of Anyang Institute of Technology*, 2012, 11(2): 4-8.
- [21] 李建青. 动载荷下印刷机墙板系统动态特性分析与研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2009: 37-43.
LI J Q. Analysis and Research on Dynamic Characteristics of Printing Machine Wallboard System under Dynamic Load[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2009: 37-43.
- [22] MUMINOVIC A J, MUMINOVIC A, MESIC E, et al. Spur Gear Tooth Topology Optimization: Finding Optimal Shell Thickness for Spur Gear Tooth produced using Additive Manufacturing[J]. *TEM Journal*, 2019, 8(3): 788-794.
- [23] 付学中, 方宗德, 贾超, 等. 面齿轮传动啮合刚度分析与修形减振优化[J]. *振动与冲击*, 2019, 38(5): 265-272.
FU X Z, FANG Z D, JIA C, et al. Meshing Stiffness Analysis and Optimization of Vibration Reduction and Modification for Face-Gear Drives[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2019, 38(5): 265-272.
- [24] 贾超, 方宗德. 高速齿轮传递误差和啮入冲击的激励模拟及齿面优化修形[J]. *振动与冲击*, 2019, 38(23): 103-109.
JIA C, FANG Z D. Simulation for Transmission Error and Mesh-in Impact Excitation of High Speed Gears and Their Tooth Surface Optimal Modification[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2019, 38(23): 103-109.
- [25] 郭能, 周友国, 雷刚, 等. 重型汽车变速箱箱体拓扑优化[J]. *重庆理工大学学报(自然科学版)*, 2010, 24(12): 106-109.
GUO N, ZHOU Y G, LEI G, et al. Topological Optimization on the Gear-Box of Heavy Vehicle[J]. *Journal of Chongqing University of Technology (Natural Science)*, 2010, 24(12): 106-109.
- [26] 梁明轩. 变速器系统非线性动力学特性与参数优化研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2014: 115-143.
LIANG M X. Study on Nonlinear Dynamic Characteristics and Parameter Optimization of Transmission System[D]. Shenyang: Northeastern University, 2014: 115-143.
- [27] 贾涵杰. 采煤机截割部多级齿轮传动-箱体耦合动力学建模分析及动力学性能优化[D]. 重庆: 重庆大学, 2019: 15-35.
JIA H J. Dynamic Modeling Analysis and Dynamic Performance Optimization of Multi-Stage Gear Transmission-Box Coupling in Shearer Cutting Part[D]. Chongqing: Chongqing University, 2019: 15-35.
- [28] 吴鸿雁, 陈晓霞, 邢静忠. 渐开线谐波齿轮空间齿廓设计及优化分析[J]. *机械传动*, 2021, 45(8): 130-138.
WU H Y, CHEN X X, XING J Z. Spatial Tooth Profile Design and Optimization Analysis of Involute Harmonic Gear[J]. *Journal of Mechanical Transmission*, 2021, 45(8): 130-138.
- [29] CHOI C, AHN H, PARK Y J, et al. Influence of Gear Tooth Addendum and Dedendum on the Helical Gear Optimization Considering Mass, Efficiency, and Transmission Error[J]. *Mechanism and Machine Theory*, 2021, 166(1): 104476.
- [30] BAGLIONI S, CIANETTI F, LANDI L. Influence of the Addendum Modification on Spur Gear Efficiency[J]. *Mechanism and Machine Theory*, 2012, 49: 216-233.
- [31] WANG S Y, ZHANG Y D L, MAO S T, et al. Investigation on Deformation of the Flex-Gear and Optimization Design of Compound Curve Cam Wave Generator with Spiral[J]. *Mathematical Problems in Engineering*, 2021, 2706482.
- [32] DOU S H, LIU Y X, DU Y P, et al. Design and Simulation of Gear Transmission System Based on Metamaterial[J]. *AIP Advances*, 2023, 13(8): 085203.
- [33] 张庆山, 刘其洪. 基于 Workbench 的模切机印刷滚筒的模态分析及优化设计[J]. *包装工程*, 2011, 32(3): 60-62.

- ZHANG Q S, LIU Q H. Modal Analysis and Optimum Design of Die Cutting Machine Printing Cylinder Based on Workbench[J]. Packaging Engineering, 2011, 32(3): 60-62.
- [34] 向磊, 姚齐水, 李超, 等. 基于正交试验的新型印刷滚筒结构优化[J]. 包装工程, 2019, 40(7): 210-216.
- XIANG L, YAO Q S, LI C, et al. Structure Optimization of New Type Printing Cylinder Based on Orthogonal Test[J]. Packaging Engineering, 2019, 40(7): 210-216.
- [35] 李贤伟. 凹版印刷机智能化设计系统研究与应用[D]. 西安: 西安理工大学, 2019: 7-21.
- LI X W. Research and Application of Intelligent Design System for Gravure Printing Machine[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2019: 7-21.
- [36] 王水, 王敏其, 黄龙振, 等. 基于 ANSYS 的经编机墙板结构优化[J]. 机械设计与制造工程, 2018, 47(7): 25-28.
- WANG S, WANG M Q, HUANG L Z, et al. The Wall-board Structure Optimization of Warp Knitting Machine Based on ANSYS[J]. Machine Design and Manufacturing Engineering, 2018, 47(7): 25-28.
- [37] 高振清, 王仪明, 白建军. 胶印机关键部件间隙自动调节技术研究及装置开发[J]. 机械设计与制造, 2012(7): 131-133.
- GAO Z Q, WANG Y M, BAI J J. Research and Device Development on Gap Adjustment Automatically for Key Parts of Offset Machine[J]. Machinery Design & Manufacture, 2012(7): 131-133.
- [38] 韩晓良. 印刷机墙板定位误差分析及改进[J]. 北京印刷学院学报, 2006, 14(5): 13-17.
- HAN X L. Analysis and Improvement on the Register Difference of the Printer's Side-frame[J]. Journal of Beijing Institute of Graphic Communication, 2006, 14(5): 13-17.
- [39] 孙兆永, 夏千里, 张翱, 等. 印刷装备振动噪声特性研究综述[J]. 包装工程, 2023, 44(9): 232-242.
- SUN Z Y, XIA Q L, ZHANG A, et al. Research Progress on Vibration and Noise Characteristics of Printing Press[J]. Packaging Engineering, 2023, 44(9): 232-242.
- [40] LI Y Q, LUO Z, LIU J X, et al. Dynamic Modeling and Stability Analysis of a Rotor-Bearing System with Bolted-Disk Joint[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2021, 158(24): 107778.
- [41] HUANGFU Y F, ZENG J, MA H, et al. A Flexible-Helical-Geared Rotor Dynamic Model Based on Hybrid Beam-Shell Elements[J]. Journal of Sound and Vibration, 2021, 511: 116361.
- [42] YANG L T, WANG L M, YU W N, et al. Investigation of Tooth Crack Opening State on Time Varying Meshing Stiffness and Dynamic Response of Spur Gear Pair[J]. Engineering Failure Analysis, 2021, 121: 105181.
- [43] FENG K, SMITH W A, RANDALL R B, et al. Vibration-Based Monitoring and Prediction of Surface Profile Change and Pitting Density in a Spur Gear Wear Process[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2022, 165: 108319.
- [44] CHANG H C, BORGHESEANI P, PENG Z X. Investigation on the Relationship between Macropits and Wear Particles in a Gear Fatigue Process[J]. Wear, 2021, 484: 203724.
- [45] SMITH W A, RANDALL R B, HU C, et al. Cepstral Removal of Resonance Effects to Improve the Use of Traditional Gear Diagnostic Indicators at Different Speeds[C]// First World Congress on Condition Monitoring. London: IOP Publishing, 2017: 1-9.
- [46] LI W, ZHAI P F, DING L. Analysis of Thermal Characteristic of Spur/Helical Gear Transmission[J]. Journal of Thermal Science and Engineering Applications, 2019, 11(2): 021003.
- [47] PASCHOLD C, SEDLMAIR M, LOHNER T, et al. Erratum To: Efficiency and Heat Balance Calculation of Worm Gears[J]. Forschung Im Ingenieurwesen, 2020, 84(2): 127.
- [48] 于旺. 乏油-动载-热效应下行星齿轮系统的动力学特性研究[D]. 沈阳: 沈阳理工大学, 2021: 62-74.
- YU W. Study on Dynamic Characteristics of Planetary Gear System under Oil Shortage-Dynamic Load-Thermal Effect[D]. Shenyang: ShenYang Ligong University, 2021: 62-74.
- [49] 丁华锋, 刘明勇, 张晋熙, 等. 乏油工况下斜齿轮热弹流润滑特性研究[J]. 润滑与密封, 2021, 46(3): 74-82.
- DING H F, LIU M Y, ZHANG J X, et al. Study on Thermal Elastohydrodynamic Lubrication of Helical Gear under Starved Lubrication Condition[J]. Lubrication Engineering, 2021, 46(3): 74-82.
- [50] WANG C. A Calculation Method of Thermal Deformation for Double Helical Gear[J]. Mechanics & Industry, 2019, 20(6): 612.
- [51] 肖泽. 凹版印刷机建模与套准控制[D]. 上海: 东华大学, 2019: 37-48.
- XIAO Z. Modeling and Registration Control of Gravure Printing Machine[D]. Shanghai: Donghua University, 2019: 37-48.
- [52] 肖颖, 钱志伟, 高雪玲. EL 薄膜喷墨印刷质量的评价[J]. 印刷杂志, 2014(1): 58-60.
- XIAO Y, QIAN Z W, GAO X L. Evaluation of Ink-Jet

- Printing Quality of EL Thin Film[J]. Printing Field, 2014(1): 58-60.
- [53] 易锦, 沈义华, 王友坚. 印刷品质量的模糊综合评价[J]. 印刷杂志, 2004(2): 36-39.
- YI J, SHEN Y H, WANG Y J. A Vague Comprehensive Appraisal of Printing Quality[J]. Printing Field, 2004(2): 36-39.
- [54] 韩胜兰. 基于数字印刷系统的印刷品呈色质量分析与控制研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2021: 13-33.
- HAN S L. Analysis and Control of Printing Color Quality Based on Digital Printing System[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2021: 13-33.
- [55] 郭丽娜, 郅云, 王悦, 等. 灰关联模型在卡纸印刷质量评价中的应用研究[J]. 数字印刷, 2019(6): 58-65.
- GUO L N, ZHI Y, WANG Y, et al. Application Research of Grey Relation Model for Printing Quality Evaluation on Cardboard[J]. Digital Printing, 2019(6): 58-65.
- [56] 张和平, 解晓龙. 基于灰色关联度的组合优化模型研究[J]. 统计与决策, 2019, 35(9): 19-23.
- ZHANG H P, XIE X L. Research on Combinatory Optimization Model Based on Grey Relational Degree[J]. Statistics & Decision, 2019, 35(9): 19-23.
- [57] LØKKE M M, SEEFELDT H F, SKOV T, et al. Color and Textural Quality of Packaged Wild Rocket Measured by Multispectral Imaging[J]. Postharvest Biology and Technology, 2013, 75: 86-95.
- [58] 赵闪闪, 尤飞. 涂布纸水性油墨喷墨印品质量的影响因素研究[J]. 包装学报, 2019, 11(5): 68-75.
- ZHAO S S, YOU F. Study on Influencing Factors of Water-Based Inkjet Printing Quality of Coated Paper[J]. Packaging Journal, 2019, 11(5): 68-75.
- [59] 孙冰. 纸品印刷残留溶剂迁移行为及柔印质量分析与评价模型的研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2018: 34-41.
- SUN B. Study on Migration Behavior of Residual Solvent in Paper Printing and Analysis and Evaluation Model of Flexographic Quality[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2018: 34-41.
- [60] NORRICK N, NEEB S. Calculation of Torsional Vibrations and Prediction of Print Quality in Sheetfed Offset Printing Presses[J]. Technische Mechanik, 2017, 37(2): 171-180.
- [61] NEEB S, NORRICK N. Stability Analysis of Parameter-Excited Linear Vibration Systems with Time Delay, Using the Example of a Sheetfed Offset Printing[J]. Technische Mechanik, 2017, 37(2): 367-376.
- [62] DONG Y P, NIE L, CHEN Y F, et al. Development of UV Monomer-Contained Dye Inks for High-Quality Printing Application on Polyester Fabrics without Pretreatment[J]. Progress in Organic Coatings, 2023, 184: 107717.
- [63] BOROUJENI F M, SHARZEHEE M. Synthetic Oligomers with Urea Binding and Their Role as Crosslinkers in Improving the Printing Quality on Cotton Fabric[J]. Fibers and Polymers, 2023, 24(3): 855-867.
- [64] 苗润丰, 苗尧毓, 高鹏福, 等. 基于密度曲线模型提升热转移印花印品质量[J]. 丝绸, 2023, 60(2): 93-101.
- MIAO R F, MIAO Y Y, GAO P F, et al. Improving the Quality of Heat Transfer Printing Based on the Density Curve Model[J]. Journal of Silk, 2023, 60(2): 93-101.