

高功率密度行星减速器设计的关键核心技术综述

张建润,伍健伟,傅琪迪,罗俊文
(东南大学 机械工程学院,江苏 南京 211189)

摘 要:行星减速器是机电设备中的核心功能部件,随着产品对空间和质量的要求越来越严格,高功率密度行星减速器应运而生,这也对减速器精度及精度保持性、输入输出性能、振动、噪声及可靠性、寿命等提出了更高要求。传统的行星减速器设计技术难以满足产品开发的要求。针对高功率密度行星减速器开发中的动力学设计、多物理场耦合仿真、可靠性设计及寿命预测等三个关键核心设计技术进行分析论述,可为减速器产品的研发提供参考。

关键词:高功率密度行星减速器;动力学设计;多物理场耦合;可靠性设计与寿命预测

中图分类号:TH132.46 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5276(2020)04-0001-04

Crucial Technologies in Design of High Power Density Planetary Reducer

ZHANG Jianrun, WU Jianwei, FU Qidi, LUO Junwen

(School of mechanical engineering, Southeast University, Nanjing 211189, China)

Abstract: Planetary reducer is a core function unit in mechanical and electrical products, with the products development, the restriction on space and weight becomes stricter and stricter. For this, the high power density planetary reducer is produced and an even higher demand is set on its accuracy and accuracy retention, performance of input and output, vibration, noise, reliability and life. The traditional design approaches hardly meet the development requirement of the high power density planetary reducer. Three core and key technologies: dynamic design, multi-physics field coupling simulation as well as reliability design and life prediction in its development are introduced and discussed in this paper. And a reference is given to the designers.

Keywords: high power density planetary reducer; dynamic design; multi-physics field coupling; reliability design and life prediction

0 引言

行星齿轮传动装置与一般的齿轮传动装置相比具有功率质量比大、效率尺寸比大、承载能力强、响应速度快、稳定性好、抗冲击性能好等优点。由于机电装备对空间和质量的要求越来越严格,需要在有限的空间和质量下,所匹配的减速器传动系统具有输出功率高、转矩大的特点。所以,通过提高齿轮模数和增加体积等传统方法已经不能满足要求。

自 20 世纪 60 年代开始,具有功率质量比大、效率尺寸比大等特征的高功率密度行星减速器在美国、日本、德国等国得到研制并快速发展,广泛地应用于高精尖技术领域,如精密机械设备、航空航天设备、火箭与导弹、汽车驱动系统、精密仪器仪表、医疗器械、精密电动工具、微型机器人和机械手臂等。因此,高功率密度、大转矩行星减速器成为机械领域中重要基础装置,故高功率密度设计方

法已成为研制行星减速器的核心关键技术。

目前高功率密度行星减速器的结构和设计技术主要体现以下几个方面:1)将行星减速器与电机的装置集成一体,形成机电一体化模块式的整体结构;2)在传统的静力学设计基础上应用动力学设计技术提升行星减速器的设计水平;3)开发研制新型齿轮材料,不断推出热处理新工艺、开发齿轮加工新技术,提高齿轮的精度、刚度、强度及寿命;4)研究齿轮传动系统的高效润滑与冷却介质,保证减速器运行过程中的精度保持性和性能稳定。

设计技术在机电新产品的开发研制过程中起着引领的作用,高功率密度行星减速器的成功研制离不开先进的设计方法和关键核心技术,同样的输出功率和转矩,对于高功率密度行星减速器将预示着更小的体积和质量、更高的齿轮性能指标,主要表现在:减速器工作中的精度及精度保持性,刚度及强度性能,振动及噪声特性等方面。传统的设计方法已经无法达到要求,因此,新的设计方法和技术呼之欲出。本文针对高功率密度行星减速器设计中

基金项目:国家重点研发计划项目(2019YFB2006402)

第一作者简介:张建润(1962—),男,江苏镇江人,教授,博导,博士,江苏省数控机床中心副主任,江苏省振动工程学会常务理事,中国机械动力学专业委员会常务委员。长期从事机械动力学、振动与噪声控制及产品创新设计方面的研究,90年代以来先后承担或参与了多项国家、省部级和地方的科学基金项目、重点研发项目,国家专项项目,科技成果转化项目。积极开展科研国际合作,参与欧共体项目及校际合作项目。科研成果直接面对产品,承担并完成了 50 余项企业横向科研项目,覆盖车辆、船舶、航空航天、机床、工程机械、家电产品等领域。曾获得教育部科技进步一等奖 1 项,省部级科技进步二等奖 4 项,三等奖 3 项。拥有发明专利 20 余项,在国内外核心期刊上发表 SCI 及 EI 论文 70 余篇。

的几个核心关键技术进行论述。

1 高功率密度行星减速器的动力学设计与分析

高功率密度行星减速器,一方面要求减速器具有高的刚度以抵抗内外界干扰的能力,另一方面,由于减速器的集成化、小型化和低能耗的要求,势必带来刚度降低,严重影响了其动力学响应特性。正是由于它们之间的矛盾,衍生出行星减速器动态特性设计与分析技术。如何在满足设计和制造要求的前提下,实现质量更轻、振动噪声更低、效率更高、可靠性更好的综合性能是当今减速器领域研究的热点。为实现行星减速器的最佳综合性能,国内外学者在行星减速器的动力学设计与分析方面进行了大量的研究。

HUANG C 等以小齿数差减速器的内啮合行星齿轮为研究对象,结合动态接触有限元方法,提出了动力特性分析方法,进行动态响应和加速度噪声分析^[1]。BOUSLEMA M 等采用频率响应函数(FRF)仿真技术的子结构方法,分析了刚性联轴器连接到行星齿轮系统级联减速器的振动^[2]。为减少刚性摆线针轮行星减速器工作时的振动,提高运行可靠性,陈忠敏等设计了一种带减振衬垫的非刚性摆线针轮行星减速器,综合考虑时变刚度、轴向误差、啮入冲击等激励,基于集中参数理论和牛顿第二定律建立多因素耦合动力学模型,并对其进行了非线性振动分析^[3]。张炜龙针对行星齿轮传动的轮边减速器齿轮零件制造装配偏心误差以及轮齿啮合副的齿侧间隙等因素的影响,致使各行星轮分担载荷不均匀,导致传动系统产生振动、噪声等问题,探讨了齿轮零件制造装配偏心误差、齿侧间隙、中心构件浮动、弹性构件支撑刚度对轮边减速器动态均载性能的影响^[4]。林腾蛟等研究复杂激励作用下多级行星齿轮减速器的耦合振动响应及动态性能优化方法,建立了包含时变啮合刚度、传动误差、啮合阻尼、齿侧间隙、摩擦力矩、结合部刚度和阻尼等因素的四级行星耦合系统动力学集中参数模型,在此基础上提出了基于谐波平衡法的多级行星齿轮耦合系统动态优化方法^[5]。图1为多级行星齿轮减速器动力学模型、有限元模型及有限元模型的等效应力云图。

事实上,非线性因素强烈影响行星减速器的动力学特性。ZHANG Y 等以渐开线正齿轮的2K-H型行星齿轮减速器为研究对象,结合时变啮合刚度、齿轮啮合时变反冲、时变压力角等非线性因素,建立了行星齿轮传动系统横扭摆耦合非线性动力学模型^[6]。王家序等以少齿差行星减

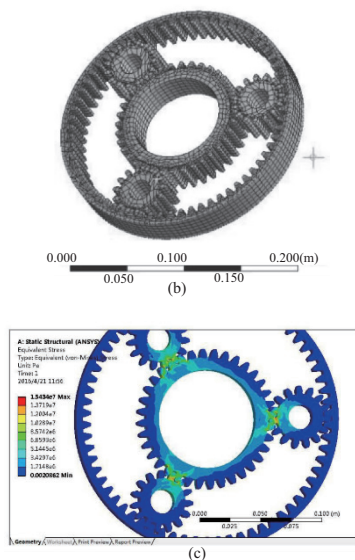
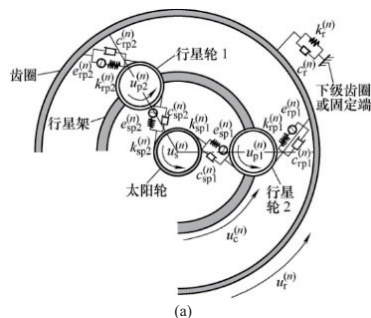


图1 行星齿轮减速器动力学模型、有限元模型及等效应力云图

速器为研究对象,综合考虑时变啮合刚度、齿轮传递误差、齿侧间隙及轴承支撑刚度和阻尼等因素,采用集中质量法建立了弯-扭耦合8自由度非线性振动模型,研究了减速器的非线性耦合振动特性^[7-8]。SUN W 等考虑电动机的工作特性和时变啮合刚度和传动误差等非线性因素,分析了多级行星减速机的固有特性和动态响应^[9]。

总的来说,动力学设计技术是研制开发高功率密度行星减速器不可缺少的技术,主要有两种方式,一种是基于数字模型的仿真技术,另一种是基于解析模型的分析技术。动力学设计技术研究的核心是系统本身的几何精度和系统刚度两个方面带来的传递精度、传递效率、振动噪声、结构强度及寿命等问题,进而进行减速器的优化设计。

2 高功率密度行星减速器设计中多物理场耦合与建模分析技术

高功率密度行星减速器更多是在复杂的多物理场耦合状况下工作,因此,对减速器系统设计中开展多物理场耦合建模分析是重要的环节。多物理场耦合(multi-physics problem)是指由两个或两个以上的场通过交互作用而形成的物理现象,如流体和结构相互作用、固和液、气和液等^[10]。C. Boivin等在早期描述了不同物理现象之间的数据交换是如何通过变量关联实现的,应用变量关联方法对通用数值工具箱进行了详细的修改,给出了场和界面耦合问题的数值结果^[11]。YAMAMOTO M 对多物理场CFD(computational fluid dynamics)建模做了详细的回顾,表述了两个物理场之间耦合的强弱关系,指出单一物理场的工程问题已经比较成熟,在未来工程应用中应着重探究不同物理场模型以及有效的CFD方法来解决多物理场耦合问题^[12]。

减速器工作过程是流场、温度场、结构应力场等物理场复合作用的过程,在设计分析中应该考虑多物理场之间的耦合作用。高功率密度行星减速器体积小、热源较多、散热

面积小,且传递转矩较大、转速高,在工作时,齿轮和轴承高速转动、轮齿之间啮合摩擦会产生大量热量。因此,散热不足会导致减速器内温度升高,引起结构发生一定程度的热变形和热应力。此外,行星减速器对装配精度要求较高,由于温度场的变化引起结构变形会导致齿轮轴线位置产生一定程度偏差,高速工作时结构相对位置的偏差会产生剧烈的振动和声辐射。因此,行星齿轮减速器设计中需要考虑多物理场之间的耦合,即流-固-热耦合、热-声-振耦合等。GARAMBOIS P 等人采用迭代谱方法,分析了周期性轮系之间啮合激励与波动载荷之间的多物理耦合,给出了不同激励源、运动的动态耦合方程、谱方法和迭代解法以及正齿轮高啮合频率参数激励与低流体阻力转矩频率耦合的动态响应^[13]。图2、图3为建立的数字仿真模型,进行减速器箱体热-结构耦合及热-结构加载耦合特性分析,得到了箱体热结构耦合变形云图^[14]。

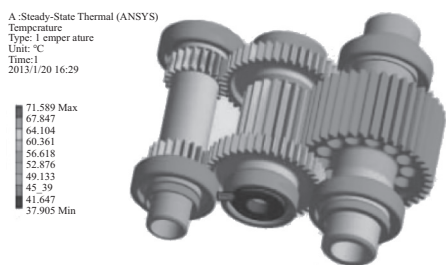


图2 减速器传动系统温度场分布图

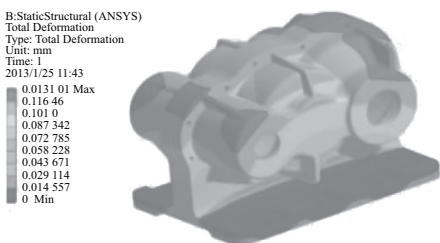


图3 减速箱热-结构加载耦合总变形云图

DAI Jianchuan 等人基于 ADAMS 软件建立了单级行星齿轮箱在正常和故障状态下的刚柔耦合模型,分析行星齿轮箱中齿根裂纹扩展和振动特性之间的关系^[15]。MOHAMMADPOUR M 研究了车用差动准双曲面齿轮多物理、多尺度分析中系统动力学与解析摩擦学的耦合问题,获得差动准双曲面齿轮副动态特性和摩擦损失^[16]。图4、图5是 CHEN Y 等采用有限元方法对电动汽车电机-变速器一体化系统进行多物理场耦合仿真分析结果^[17]。

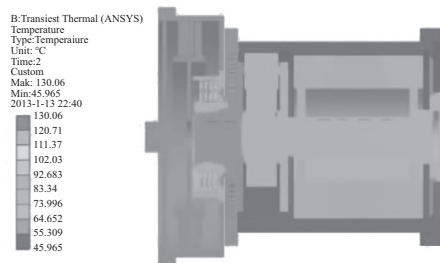


图4 系统温度分布图

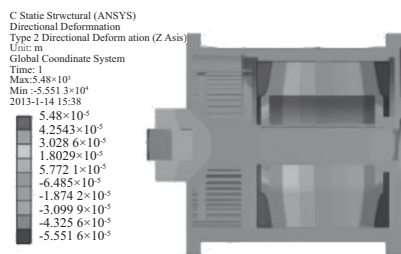


图5 系统热变形云图

正如前面的分析,在设计高功率密度行星减速器时,需要考虑多个物理场之间的作用,这种作用称之为“耦合”。由于不同物理场的本构方程出自不同的学科领域,目前能将这些不同物理场进行耦合计算的有效手段就是数字仿真技术,而决定相互作用的是“场”间的“耦合”模型,它直接表征“场”间的耦合强弱。高功率密度行星减速器多场耦合分析技术成为了减速器设计中的关键技术之一。

3 高功率密度行星减速器可靠性设计与寿命预测技术

行星减速器设计中一个重要的环节是可靠性设计技术。传统的基于静力学的齿轮弯曲疲劳和点腐蚀疲劳计算对计算的理想度要求太高,安全系数的取值过大,对寿命的预测性精准度欠缺。一般仅对一对啮合齿进行计算,由于高功率密度行星减速器本身对系统内传动结构的尺寸进行限制,对质量设定了轻量化,这表明相同结构尺寸的齿轮及其零部件要承担更大的载荷,这就需要更精确的设计和更完善的优化。

行星减速器的可靠性和寿命主要体现在传动精度的退化、振动幅值的增加、噪声的增大以及相关零部件的损坏等方面。目前,围绕减速器可靠性设计和寿命预测技术主要体现在现代数模仿真计算以及基于运行信号的数据分析。何春霞等采用虚拟样机技术对轮边三级行星减速器可靠性分析完成了车辆启动、爬坡、制动工况下齿轮强度分析及对疲劳寿命的影响^[18]。李晓豁等利用 ANSYS 的概率设计功能,研究了电动轮自卸车轮边减速器行星架的结构可靠性^[19]。图6为武越基于疲劳分析理论建立的采煤机行星减速器虚拟样机模型,进行疲劳分析,得出了减速器的系统寿命云图、安全因子云图等,获得了行星减速器的实时疲劳情况^[20]。

针对齿轮的寿命预测技术,XIANG S 通过等轴测图算法融合齿轮振动信号的时域和频域特征,生成齿轮的健康指标,提出了一种新型的具有权重放大功能的长短期记忆神经网络(LSTMP-A),用于精确预测齿轮的剩余寿命。与传统方法相比,LSTMP-A 方法进行齿轮剩余寿命预测具有更高的精度^[21]。ZHAO J 等提出了一种基于经验模态分析(EMD)和本征模函数(IMF)的行星齿轮箱故障诊断新方法,实现对齿轮箱故障的分析及预判^[22]。王冬梅采用故障树分析法,进行了减速器的结构分析,并建立了行星齿轮减速器系统故障发生逻辑模型,用于关键部件的寿命预测^[23]。J Gallego-Calderon 则使用损伤当量载荷和

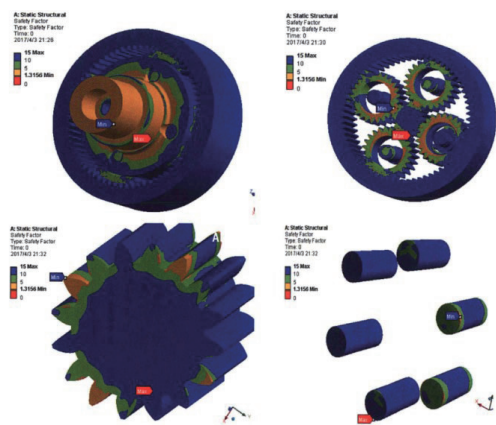


图6 行星减速器系统的安全因子云图

一阶可靠性方法(FORM)计算风力涡轮机变速箱的低速行星级中轴承的疲劳和可靠性^[24]。

高功率密度行星减速器可靠性设计是产品性能的保障,它要求在设计阶段不仅能够计算出强度和寿命,还要能够以强度和寿命为目标进行零部件的设计。目前广泛采用的数据统计分析方法是建立在已有产品和类比产品基础上的,全新设计的产品开发将离不开可靠性虚拟仿真技术。

4 结语

设计技术作为产品开发的引领,在高新产品的研制中起着核心作用,本文围绕高功率密度行星减速器开发中的三大关键核心设计技术进行了详细分析。动力学设计与分析技术是减速器开发过程中优化设计的基础;多物理场耦合建模与分析技术是减速器开发中的核心分析技术;可靠性设计与寿命预测技术是产品性能的保障。

参考文献:

- [1] HUANG C, WANG J, XIAO K, et al. Dynamic characteristics analysis and experimental research on a new type planetary gear apparatus with small tooth number difference[J]. Journal of Mechanical Science And Technology, 2013, 27(5): 1233-1244.
- [2] BOUSLEMA M, FRIKHA A, ABDENNADHAR M, et al. Effects of modal truncation and condensation methods on the frequency response function of a stage reducer connected by rigid coupling to a planetary gear system[J]. Comptes Rendus Mecanique, 2017, 345(12): 807-823.
- [3] 陈忠敏,侯力,段阳,等. 新型摆线针轮行星减速器传动系统的振动特性[J]. 吉林大学学报(工学版), 2018, 48(1): 174-185.
- [4] 张伟龙. 300吨矿用自卸车轮边减速器动态均载研究[D]. 湘潭:湘潭大学, 2018.
- [5] 林腾蛟,曹洪,谭自然,等. 四级行星齿轮减速器耦合系统动态性能优化[J]. 机械工程学报, 2018, 54(11): 161-171.
- [6] ZHANG Y, ZHU X, JIA S. Study on nonlinear dynamic characteristics of 2K-H planetary gear system[M]// DEStech Transactions on Engineering and Technology Research, Pandey K M, Mustapha F, Sanya; 2016, 227-235.
- [7] 王家序,李奇,肖科,等. 少齿差行星减速器非线性耦合振动研究

[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2016, 44(2): 40-46.

- [8] 李奇,王家序,黄超,等. 变参数对少齿差行星减速器振动特性影响及实验[J]. 机械设计与研究, 2016, 32(2): 79-84.
- [9] SUN W, MA H, WANG L, et al. Dynamic analysis of multi-stage planetary reducer in TBM cutter head driving system[C]. [S:I]: IEEEASME International Conference on Mechatronic and Embedded Systems and Applications, 2016: 1-6.
- [10] CARLOS A, PARK K C, FARHAT C. Partitioned analysis of coupled mechanical systems[J]. Computer Methods in Applied Mechanics & Engineering, 2001, 190(24/25): 3247-3270.
- [11] C.Boivin, C.F. Ollivier-Gooch. A generic finite-volume solver for multiphysics problems I: field coupling[C]. Canada: The Tenth Annual Conference of the Computational Fluid Dynamics Society of Canada, 2002: 49-54.
- [12] YAMAMOTO M. Multi-physics CFD simulations in engineering[J]. Journal of Thermal Science, 2013(4): 3-9.
- [13] GARAMBOIS P, DONNARD G, RIGAUD E, et al. Multiphysics coupling between periodic gear mesh excitation and input/output fluctuating torques: application to a roots vacuum pump[J]. Journal of Sound & Vibration, 2017, 405: 158-174.
- [14] 火统龙,葛文杰,赵炜. 减速器箱体热-结构耦合分析[J]. 机械传动, 2014(4): 133-136.
- [15] DAI Jianchuan, NIU Hang, HOU Chenggang, et al. Dynamic simulation of planetary gearbox with tooth root crack based on a rigid-flexible coupled model[C]. Proceedings of the ASME 2019 International Mechanical Engineering Congress and Exposition Volume 14: Design, Systems, and Complexity. Salt Lake City, Utah, USA: IMECE2019-11012, V014T14A011: 1-6.
- [16] MOHAMMADPOUR M, THEODOSSIADES S, RAHNEJAT H. Multiphysics investigations on the dynamics of differential hypoid gears[J]. Journal of Vibration and Acoustics, 2014, 136(4): 1-15.
- [17] CHEN Y, DING Y, ZHUANG J, et al. Multi-objective optimization design and multi-physics analysis a double-stator permanent-magnet doubly salient machine[J]. Energies, 2018, 11(8): 1-15.
- [18] 何春霞,孙晓红. 矿用自卸车轮边减速系统可靠性建模分析[J]. 机械设计与制造, 2016(5): 149-153.
- [19] 李晓璐,王岩,张永胜,等. 基于ANSYS的轮边减速器行星架的可靠性分析[J]. 农业装备与车辆工程, 2009(12): 10-13.
- [20] 武越. 采煤机行星减速器动力学与有限元分析[D]. 阜新: 辽宁工程技术大学, 2017.
- [21] XIANG S, QIN Y, ZHU C, et al. Long short-term memory neural network with weight amplification and its application into gear remaining useful life prediction[J]. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 2020, 91: 103587.
- [22] ZHAO J, LI H, LIU J, et al. Planetary gearboxes fault diagnosis based on EMD and EDT[C]. [S:I]: In 2015 Prognostics and System Health Management Conference (PHM) 2015 Prognostics and System Health Management Conference (PHM), 2015: 1-5.
- [23] 王冬梅. 少齿差行星齿轮减速器故障树分析[J]. 上海电机学院学报, 2011, 14(4): 237-240.
- [24] J. Gallego-Calderon, A. Natarajan, N. K. Dimitrov. Effects of bearing configuration in wind turbine gearbox reliability[J]. Energy Procedia, 2015, 80: 392-400.

收稿日期: 2020-05-10