

文章编号:1005-0523(2019)02-0111-08

# 行星齿轮主要设计理论与分析方法及均载特性综述

王均刚<sup>1</sup>,杨士男<sup>1</sup>,刘燕德<sup>1</sup>,墨蕊娜<sup>2</sup>

(华东交通大学 1.机电与车辆工程学院;2.理学院,江西 南昌 330013)

**摘要:**行星齿轮传动是机械领域中传递运动和动力的一种重要形式,传动设计问题和行星轮系均载问题是研究行星传动系统的2个重要方面。文章主要从行星齿轮传动的设计理论、传动分析方法、均载特性和行星齿轮实验研究4个方面,综述行星齿轮传动的研究现状。从已有的研究成果来看,国内外学者主要针对已经设计好的行星轮系的传动方案进行分析研究,亟需发展基于主动设计的行星齿轮传动优化方案;而且目前的加工制造已经达到比较高的水平,单纯的采用现有的方法来抑制行星排偏载,已经很难大幅度提高行星齿轮传动性能,亟需探究抑制行星排偏载的新方法。因此,需在吸收和消化已有的行星齿轮传动研发技术基础上,对行星排的偏载抑制方法和多级齿轮传动系统的设计理论进行改进和创新,以适应传动装备向大机型方向发展的趋势,并降低大型齿轮箱的故障率,提高其服役寿命。

**关键词:**行星轮系;传动设计;偏载;多级齿轮传动

**中图分类号:**TH132.4

**文献标志码:**A

行星齿轮传动具有质量小、结构紧凑、功率分流和承载能力强的特点,是减小传动系统体积和重量、实现均载传动的重要传动形式。行星齿轮传动属于现代的先进机械传动,它是将定轴线改为动轴线传动,可以用作减速、增速以及变速传动、运动的合成和分解;由于在传动过程中有效地利用了功率分流和输入、输出的同轴性以及合理地采用了内啮合,使得行星齿轮传动与普通定轴齿轮传动相比较,具有非常明显的优点,行星齿轮传动在风力发电、工程机械、石油化工、船舶和航空航天等领域获得了日益广泛的应用。在过去,传统机械中的大变速传动主要是通过多级传动机构变速来实现的;在一些精密的变速机构中,主要采用的是多级齿轮变速,因此,所需要的齿轮啮合的级数较多,传动链长,导致齿轮箱的体积大、效率低以及制造成本高等缺点。

国内行星齿轮传动行业的技术能力与实际的设备可靠运行要求之间还存在着显著的差距,亟需在吸收和消化已有的行星齿轮传动研发技术基础上,对行星齿轮传动设计方法进行发展创新,对行星排的均载特性进行改进和提高,以适应传动装备向大机型方向的发展趋势,解决行星齿轮传动故障率高,可靠性差,服役寿命短等问题。

## 1 行星齿轮传动的的基本类型

行星齿轮传动是指:至少有1个齿轮,它同中心轮(太阳轮)相啮合,该齿轮在随自身几何轴线公转的同时,还绕自身的几何轴线自转。通过该齿轮和中心轮的运动复合,能把运动和动力从该齿轮机构的基本构件传递到输出构件,得到新的转速和力矩。从机构的自由度划分,可以将行星齿轮机构分为3种类型,分别是,1个自由度、2个自由度和多个自由度的行星齿轮机构;从结构形式划分,可分为:2K-H型系列(如图1)、K-H-V型(如图2)和3K型系列(如图3)行星齿轮机构。而其他比较复杂的行星齿轮机构都可以由这3种基

收稿日期:2018-08-19

基金项目:国家自然科学基金项目(51765020);江西省自然科学基金资助项目(20161BAB206153)

作者简介:王均刚(1978—),男,讲师,博士,研究方向为传动设计与动力学分析。

本行星齿轮机构复合而成,例如,载荷分流式行星齿轮传动机构(如图4)是由2个2K-H(A)型行星齿机构组合而成的。

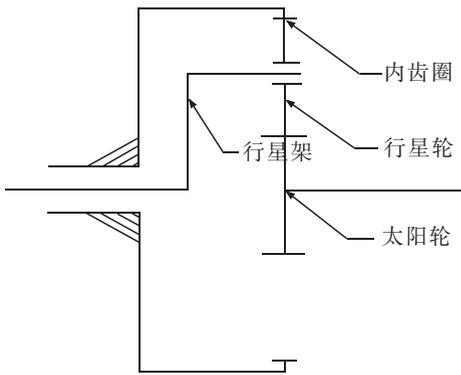


图1 2K-H(A)型行星轮系机构

Fig.1 The type of 2K-H(A) planetary gear train

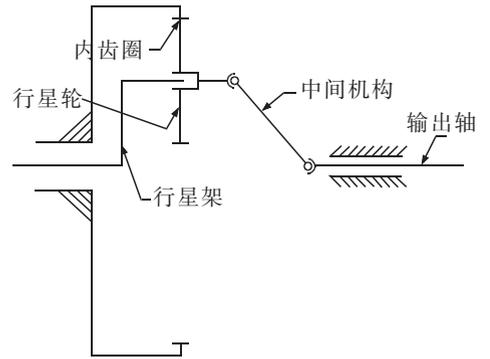


图2 K-H-V型行星轮系机构

Fig.2 The type of K-H-V planetary gear train

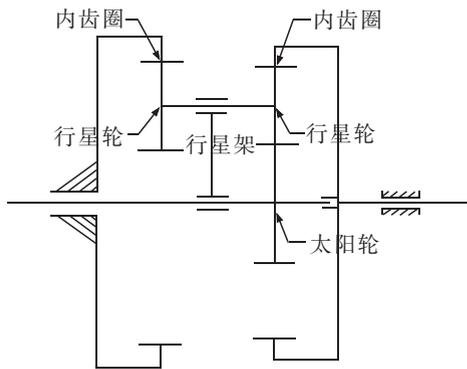


图3 3K(III)型行星轮系机构

Fig.3 The type of 3K(III) planetary gear train

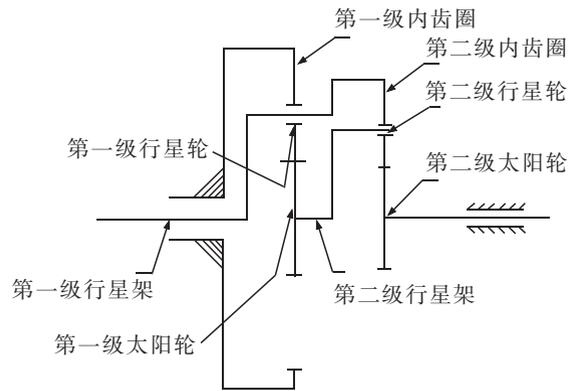


图4 载荷分流式行星轮系机构

Fig.4 Load-split planetary gear train

行星排包含的构件多,结构复杂,使得对行星排齿轮传动系统的运动分析与设计变得非常困难。行星排设计问题和均载问题是研究齿轮传动系统的2个重要方面,对于行星齿轮箱的传动研究,这2个问题也是紧密相关,国内外众多学者对这2方面的问题进行了长期研究。

## 2 行星齿轮传动的研究现状

20世纪70年代,日本学者田口玄一提出“质量既不是靠检验得来的,也不是靠控制生产过程得来的,而是从设计阶段控制的。”所以,在设计行星齿轮传动机构时,要尽量发挥出行星齿轮传动的优点,减少不利因素对齿轮箱本身传动性能的影响。

### 2.1 行星齿轮传动的设计理论

行星齿轮机构的构型研究是机构创新设计的重要方式,目前关于行星齿轮构型研究所采用的较典型的理论方法主要有图论、递归原理和枚举法等。Hsu<sup>[1]</sup>等运用枚举法将构件数目为4的单自由度的行星齿轮机构综合为构件数目为6或7的行星齿轮机构;Fogarasy<sup>[2]</sup>等基于“太阳轮-行星架-行星轮”,“内齿圈-行星架-行星轮”两种构件块的任意组合以及运动学约束方程,得到了不同的行星齿轮传动机构方案;Castillo<sup>[3]</sup>等在文献[1]的基础上根据行星轮系的图论表示原理,运用枚举法得到了许多单自由度行星齿轮传动机构的构型方案,并通过构件的结构编码研究了机构的同构问题;杨如实<sup>[4]</sup>等以行星轮系的中心距、体积和重合度等参数为目标,利用枚举法并通过计算机程序的编制,着重研究了NGW型直齿行星传动机构的设计方案问题;

薛隆泉<sup>[5]</sup>等基于功能离散的拓扑图对行星轮系进行分类与综合,并通过拓扑演化和拓扑反演,推导出各种行星齿轮系的拓扑图谱和结构构型;Rao<sup>[6]</sup>等运用海明矩阵中海明弦的不变性定理,克服了利用图论与递归原理在枚举过程中产生伪同构图的问题,提高了同构检验的效率;尚珍<sup>[7]</sup>等在行星轮系的设计中考虑到设计参数的模糊性和随机性,将模糊数学和可靠性理论相结合,并引入多目标优化设计的理念,对行星齿轮传动机构的高可靠性、高功率密度设计技术进行了研究;谭援强<sup>[8]</sup>等将图论与邻接矩阵法相结合,得到了60种不同的NGW型两级行星齿轮传动机构的构型方案,为行星齿轮构型的创新设计提供了一种新的方法;Rajasri<sup>[9]</sup>等从结构的对称性作为出发点,研究了如何从具有多个同构性的行星齿轮结构中选择特定一种结构用于进一步的合成问题,结果表明具有较高对称性的行星齿轮结构比没有对称性的行星齿轮结构将会产生更多的结构排列;Kamesh<sup>[10]</sup>等提出了一种利用参数顶点关联多项式合成行星轮系的方法,并通过旋转指数检测结构的同构性并成功地将所有同构结构聚类到一个群中。

目前,国内外学者主要针对平行轴齿轮传动和单级行星轮系传动<sup>[11-12]</sup>为研究对象,对多级行星齿轮传动进行设计研究较少,并且对于同构类型以及非同构类型中各行星齿轮机构的性能优劣,没有提出判定的指标;故仍须要对多级行星齿轮传动的主动设计方法进行深入的研究。

## 2.2 行星齿轮传动的分析方法

传动比作为行星齿轮传动设计与分析过程中最基本的物理量,是计算传动效率的前提,但不同的行星轮系传动方案,其运动学分析过程的难易程度相差很大;而行星齿轮传动的效率变化范围较大,影响因素诸多,它作为评价其传动性能优劣的重要指标之一,对行星齿轮的传动设计具有重要的意义。因此,研究行星轮系的传动比和传动效率的计算方法具有很高的实用价值,国内外已有许多学者对其进行了相关研究。符炜<sup>[13]</sup>通过建立行星轮系基本回路的封闭矢量方程,利用复数矢量法分析出各构件之间的速度关系;彭朝琴<sup>[14]</sup>等在文献[13]的基础上,引入符号流图的概念描述行星轮系各构件之间的速度关系,并简化其运算过程;杨实如<sup>[15]</sup>等以NGW型行星齿轮机构为基础,基于力学原理,应用力偶系的平衡条件建立行星轮系的力矩方程组,推导出复合行星齿轮机构的传动比计算公式;Nelson<sup>[16]</sup>等基于图论对行星轮系中各构件进行邻接矩阵定义,将行星轮系中各单元回路方程所构成的线性方程组以矩阵方式进行系数运算,推导出了各构件之间的角速度关系;段福海<sup>[17]</sup>等针对多级复合行星传动系统的运动学分析,提出了一种图解分析法;Tsai<sup>[18]</sup>等运用方块图法将各构件间的角速度方程转化为动力传递模型,结合控制理论的反馈与前馈函数对行星轮系的运动特性进行了分析;Gomà-Ayats<sup>[19]</sup>等针对复杂行星轮系中各构件之间的运动关系以及整个传动系统的传动比分配,提出了一种超图法;陈宏<sup>[20]</sup>等针对复杂和封闭行星齿轮机构运动学分析提出了一种几何分析法,该方法的显著特点是不需要推导和反复回代方程,可以直接从分析几何图形中读出各构件转速和传动比。Ettore Pennestri<sup>[21]</sup>针对行星轮系的功率流分析提出了一种标定图法,并将其与图论相结合,利用力矩平衡方程和能量守恒定理对轮系的传动效率进行了分析;袁茹<sup>[22]</sup>等通过建立行星齿轮传动的动态分析模型,提出了动态效率的计算方法,通过与常规的传动效率计算方法对比,更能真实地反映了传递功率、输入转速、齿轮误差以及支承刚度等因素对传动效率的影响,得到的结果更能接近实际的传动效率值;Castillo<sup>[23]</sup>经过演绎推导出了行星轮系中的转矩、齿数比和传动效率之间的计算关系;Salgado<sup>[24-25]</sup>等根据行星齿轮系的传动比、齿轮啮合效率和传动效率三者之间的关系,提出了功率流图的概念,为行星轮系的设计提供了参考;胡青春<sup>[26]</sup>等提出了一种图解分析法,通过对行星齿轮系进行基本单元划分,并基于邻接矩阵法将行星轮系的角速度与转矩方程进行矩阵化,利用计算机进行效率计算,该方法在处理复杂行星轮系时简化了计算过程,提高了准确性;王成<sup>[27]</sup>等以图论为基础,针对2K-H型行星轮系提出了一种图表示法,推导出了邻接矩阵与轮系中基本回路的关系,并将遗传算法中的适应度概念与轮系结构联系起来,以适应度的大小为准则判断轮系的传动效率、传动比、结构紧凑性等性能指标,为轮系的分析和设计提供了理论基础;Chen<sup>[28]</sup>等在图论的基础上提出虚功率、虚功率比、功率分流比和虚分流功率比的概念,对行星齿轮传动系统的功率流及传动效率进行分析,该方法忽略了构件所受力矩对轮系效率的影响,更容易通过编程实现传动效率的分析;薛会玲<sup>[29]</sup>等基于虚功率理论和轮系传动比方程式,分别建立复合差动轮系和封闭式行星轮系功率和虚功率流图,研究分

析了轮系的传动型式,轮系速比、齿数比等参数对传动效率的影响。李庆凯<sup>[30]</sup>等根据键合图能量守恒和功率流动的特点,将键合图理论应用到封闭式行星轮系的功率流分析中,通过建立轮系的键合图模型,对轮系功率流向进行判别,为轮系的效率计算提供了基础,键合图法相比于其他方法对功率流向判别过程简单、不易出错、且通用性强。陈彬<sup>[31]</sup>等基于行星齿轮传动的啮合原理以及运用行星齿轮传动效率的单元分析法,研究了齿轮变位系数、压力角和螺旋角对行星齿轮传动啮合效率和3K型行星齿轮传动效率的影响;颜海波<sup>[32]</sup>等以增加齿轮工作寿命为目的,研究分析了重合度、变位系数、啮合角和锥角等基本参数对3K型变齿厚行星轮系传动效率的影响,基于优化设计理论,以传动效率为目标,得出了变齿厚齿轮的最佳参数。

综上所述,行星轮系传动比的计算方法有很多种,各有一套完善的理论计算公式,因此,针对不同的行星齿轮传动类型,应选择相应的传动比计算方法,以减少计算量,避免出现错误;由于影响行星齿轮机构传动效率的因素多种多样,包括交变输入载荷、传动速度、制造与安装误差、设计几何参数等,而且各影响因素之间又相互作用,所以需要进一步考虑在动态情况下研究行星齿轮传动系效率的计算方法。

### 2.3 行星齿轮传动均载特性的研究

行星齿轮传动的显著特点是功率分流,但该特点须要在各行星轮间的载荷分配均衡条件下才能体现。其基本原理是:通过中心轮、齿圈或行星架,没有固定的径向支承,在受力不平衡的情况下能够径向浮动,以使各行星轮均匀地分担载荷。如图5所示,单排行星轮系中含有三个行星轮受载均匀时, $F_1, F_2, F_3$ 将形成一个封闭的等边三角形。

若行星齿轮系统中载荷分布不均匀情况较为严重时,将会导致行星齿轮箱发出噪声、产生振动,轴承损坏,甚至轮齿折断等故障,从而缩短其使用寿命。因此,在行星齿轮传动设计中,必须考虑到行星轮间载荷分配的不均匀性,国内外学者对此问题进行了较深入的研究。Bodas<sup>[33]</sup>等研究了行星轮轴的切向位置误差量对均载系数的影响,得到了切向误差量与均载系数之间的关系;

Singh<sup>[34-35]</sup>通过建立三维行星齿轮接触模型研究表明,行星架销孔位置的切向误差对行星齿轮间载荷的分配影响程度较大,但仅增加行星齿轮的个数或者采用太阳轮浮动方式,并不能实现行星轮系的均载,并进一步分析了对于不同行星轮数的行星轮系中不同程度的行星轮位置误差和转矩水平对均载性能的影响,并将其总结为映射图;徐向阳<sup>[36]</sup>等采用动力学建模和试验对柔性销轴式风电齿轮箱行星传动的均载特性进行了研究;马朝锋<sup>[37]</sup>等针对某型号风电增速箱行星传动系统建立了行星传动系统的扭转动力学模型,计算了太阳轮的浮动量和各基本构件之间的动态均载系数对增速箱行星轮系的动态均载性能给出定量的分析;Gu X<sup>[38]</sup>等通过建立行星齿轮集中参数模型,并结合动力学仿真计算,研究了中心件的偏心误差量对轮系中动态均载系数的影响;任菲<sup>[39]</sup>等考虑制造误差等影响因素研究了人字齿行星齿轮传动系统均载特性;Park<sup>[40]</sup>等对风电齿轮箱的均载特性和齿面载荷的分布特性进行了研究;Iglesias<sup>[41]</sup>等建立了行星排的均载分析模型,并据此对行星轮的齿面进行了齿廓修形研究;Sarvi<sup>[42]</sup>等采用神经网络算法对风电齿轮行星排的均载特性进行了优化分析;Alfred<sup>[43-44]</sup>通过数值分析法研究了均载系数与行星轮系均载性能之间的关系,并进一步地通过实验分析了挠性行星销轴对行星轮系影响;孙尚贞<sup>[45-46]</sup>等基于建立单级行星齿轮传动系统的弯扭耦合非线性动力学模型,通过数值仿真的方法,研究了行星轮偏心误差、齿侧间隙对整个传动系统的动态均载性能的影响规律;Kim<sup>[47]</sup>等通过行星齿轮系的仿真模型模拟研究了行星架销孔位置误差对行星齿轮间载荷分配的影响,结果表明减小行星销直径或者增加行星轴承间隙有利于行星齿轮间载荷分配,延长齿轮箱的使用寿命;文献[48-49]中王均刚,王勇,霍志璞采用集中参数法建立了行星排多级耦合传动系统的动力学模型,对系统的均载特性进行了研究,与单级行星排传动相比,多级行星排的均载系数较大(如图6所示),偏载更加严重。

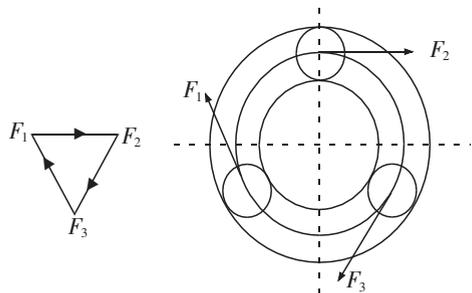


图5 均载原理

Fig.5 The principle of load sharing

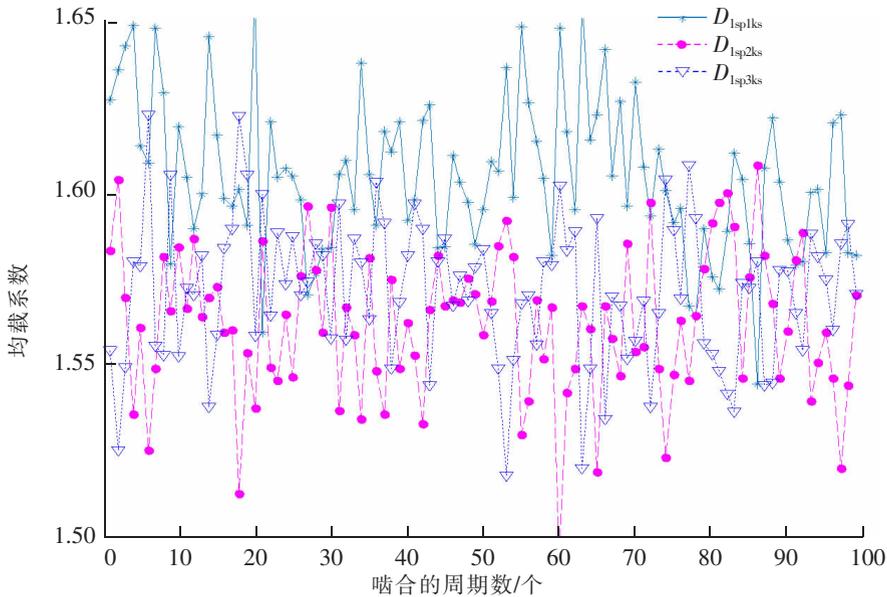


图6 行星传动的周期均载系数曲线<sup>[48]</sup>

Fig.6 The curves of the relationships between the number of periods and load sharing coefficients of planetary transmission

通常改善行星齿轮系统均载性的方法可归纳为以下几种：① 提高制造和装配精度等级，严格控制公差，将行星轮销轴的位置偏差降至最低；② 采用柔性浮动的结构设计，可以让太阳轮、内齿圈或行星架浮动，使其在一定范围内具有自动调节的能力；③ 采用弹性件的均载机构，合理的选择轴承的结构形式，降低支撑刚度。而通过选择行星排构件的浮动方式和提高加工制造装配精度是目前抑制行星排偏载的主要方法。但与单级行星齿轮传动相比，多级行星齿轮传动机构的结构复杂，制造、安装误差以及级间耦合等因素导致系统的动力学特征十分复杂，偏载更为严重。

#### 2.4 行星齿轮传动的实验研究

行星齿轮传动系统中，使各路行星轮传递的功率分配趋于均匀，这关系到行星传动系统设计是否合理，也关系到能否在实际中正常应用；行星齿轮传动系统虽然优点明显，但其可动构件多，振动信号复杂等特点给实验研究带来一定的困难，目前涉及到行星齿轮传动均载实验的研究，而且大多数是为了验证理论分析模型的合理性。在1994年，Kahraman<sup>[50]</sup>采用横向扭转振动耦合模型研究了行星齿轮传动系统载荷分配特性，根据理论和试验指出浮动中心太阳轮在系统低速运转时可有效地均衡载荷，但在高速工作状态下则恶化系统的动态响应的问题；Ligata<sup>[51]</sup>和 Singh<sup>[52]</sup>等通过采用多通道数据采集分析仪，将应变片安装在内齿圈根部位置，针对含有3~6个行星轮的NGW型行星轮系，定量分析了行星传动齿轮偏差对均载特性的影响，试验结果表明，行星轮数越多，其均载性能越差；靳朝举<sup>[53]</sup>以一级行星轮系加两级平行轮系的风电齿轮箱为研究对象，通过不同载荷情况下行星传动试验及试验数据的分析处理，得出了轮系的实际均载效果，试验结果表明行星轮轴在行星架上的位置误差以及齿距累计误差、齿轮跳动误差是造成载荷分配不均的最主要原因；胡聪芳<sup>[54]</sup>针对封闭行星齿轮箱为试验对象，根据应变测试结果，分析了行星齿轮箱动态均载系数随不同工况载荷下的变化趋势，试验结果表明通过控制行星轮制造和安装误差带，可以有效地提高轮系的均载性能；2016年 Kim<sup>[55]</sup>等为验证实际工业生产的行星架轴孔误差对行星齿轮箱载荷分配的影响程度，采用三维测量装置对其进行误差分析，并以行星齿轮箱额定转矩的25%、50%、75%和100%进行加载，结果表明随着输入转矩的增加，行星架轴孔误差对其均载特性的影响逐渐减弱；付晨曦<sup>[56]</sup>通过搭建行星齿轮试验台，采用两种不同构型的齿轮试验模型进行均载性能的对比分析，阐明了行星齿轮传动系统的布局构型、啮合相位、误差与均载的关系，针对分扭传动具体提出了设计轮齿啮合相位的均载方法；张霖霖<sup>[57]</sup>等在单级人字齿行星齿轮试验台上对不同啮合相位的行星齿轮系统进行了均载试验研究，验证了对轮系均载特性的分析考虑啮合相位因素的必要性；Kim<sup>[58]</sup>等通过试验分析了行星齿轮箱输入转矩的增大和旋转方向的改变对行星齿轮

间均载性能的影响,研究结果表明随着输入扭矩的增加,各行星轮的载荷分配趋于均匀,但是当输入扭矩的旋转方向改变时,将会导致齿轮啮合相位发生改变,致使轮系的均载性能变差。

目前的行星齿轮的均载试验研究,通常将外界激励,构件的制造、安装误差,浮动构件的选取以及柔性构件的设置作为对行星齿轮传动系统均载实验的考虑因素,来研究系统均载性能的变化趋势;但是,对于高重合度的齿轮啮合所引起的时变啮合刚度、齿侧间隙等内部动态激励作用下的轮系均载性能的研究以及如何进行协调优化多种均载方式的参数才能达到最佳的均载效果还有待完善。

### 3 结论

国内外学者主要采用图形化方法针对已经设计好的行星齿轮传动方案进行分析研究,尚缺少有效的主动设计方法,而且由于多级行星齿轮传动机构结构复杂,用这些方法表现会比较复杂,故仍需要对多级行星排传动的主动设计方法进行深入的研究。行星齿轮传动的均载问题一直以来都是国内外学者研究的重点与难点,但大多数建立的是单级行星齿轮数学模型,考虑的也只是某种单一因素对轮系均载性能的影响,针对整个多级行星齿轮耦合传动系统的动力学模型及其均载特性的研究还少见公开发表,缺乏系统性的研究成果;因此,如何建立既能反应多级行星齿轮传动的动力学本质且形式又较简单的动力学模型,进一步分析多级行星齿轮传动系统的动态均载特性,依然是需要进一步研究的重要课题。由于行星齿轮传动除无规律交变输入扭矩外还承受着多种非转矩载荷,再加上目前的加工制造水平有限,单纯的采用提高构件的加工装配质量或者选择构件浮动方式的方法来抑制行星排偏载,已经很难大幅度提高风电增速箱传动性能了,亟需探究抑制行星排偏载的新方法。

### 参考文献:

- [1] HSU C, LAM C K, LIN Y, et al. Automatic synthesis of displacement graphs for planetary gear trains[J]. *Mathematical and Computer Modeling*, 1994, 19(11): 67-81.
- [2] FOGARASY A A, SMITH M R. A new simplified approach to the kinematic analysis and design of epicyclic gear boxes[J]. *Journal of Mechanical Engineering Science*, 1995, 209(13): 49-53.
- [3] JOSE M, CASTILLO D. Enumeration of 1 dof planetary gear train graphs based on functional constraints[J]. *Journal of Mechanical Design*, 2002, 124(4): 723-732.
- [4] 杨实如, 段钦华. NGW型直齿行星传动的设计方法研究[J]. *煤矿机械*, 2005, 26(10): 18-20.
- [5] 薛隆泉, 汪友明, 王慧武, 等. 基于功能离散法的周转轮系拓扑综合研究[J]. *机械工程学报*, 2006, 42(6): 40-45.
- [6] RAO Y V, RAO A C. Generation of epicyclic gear trains of one degree of freedom[J]. *Journal of Mechanical Design*, 2008, 130(5): 232-245.
- [7] 尚珍, 刘忠明, 王长明. 高可靠性/高功率密度行星齿轮传动设计技术研究[J]. *机械设计*, 2010, 27(6): 48-51.
- [8] 谭援强, 何娟, 杨世平, 等. NGW型两级行星传动机构构型分析[J]. *机械传动*, 2013, 37(11): 18-23.
- [9] RAJASRI I, GUPTA A, RAO Y V D. Symmetry and its effects on structures of planetary gear trains[J]. *Journal of The Institution of Engineers (India)*, 2014, 95(1): 77-81.
- [10] KAMESH V V, RAO K M, RAO A B S. Topological synthesis of epicyclic gear trains using vertex incidence polynomial[J]. *Journal of Mechanical Design*, 2017, 139(6): 0623041-06230412.
- [11] 周慧兰, 郭震. 基于CAE的斜齿轮四板注塑模设计[J]. *华东交通大学学报*, 2017, 34(1): 138-142.
- [12] 周新建, 李志强. 利用FMECA法的兆瓦级风力机故障模式分析[J]. *华东交通大学学报*, 2017, 34(1): 107-117.
- [13] 符炜. 用复数矢量法对周转轮系进行运动分析[J]. *现代机械*, 1999(4): 32-34.
- [14] 彭朝琴, 符炜, 赵又红. 用符号流图对周转轮系进行运动分析[J]. *机械科学与技术*, 2001, 20(5): 672-673.
- [15] 杨实如, 段钦华. 应用力偶系平衡条件分析周转轮系[J]. *机械设计与研究*, 2003, 19(4): 48-49.
- [16] NELSON C A, CIPRA R J. Simplified kinematic analysis of bevel epicyclic gear trains with application to power flow and efficiency analyses[J]. *Journal of Mechanical Design*, 2005, 127(2): 278-286.

- [17] 段福海,胡青春,朱新军. 基于图解-矩阵法行星齿轮传动系统运动学分析[J]. 机械传动,2007,31(4):81-84.
- [18] TSAI M C,HUANG C C,LIN B J,et al. Kinematic analysis of planetary gear systems using block diagrams[J]. Journal of Mechanical Design,2010,132(06):0650011(1-10).
- [19] GOMA J R,DIEGO A,CANELA J M,et al. Hypergraphs for the analysis of complex mechanisms comprising planetary gear trains and other variable or fixed transmissions[J]. Mechanism & Machine Theory,2012(51):217-229.
- [20] 陈宏,陈小安,李云松. 复杂与封闭行星齿轮机构运动学分析的新方法[J]. 现代科学仪器,2012(5):35-39.
- [21] PENNESTRI E,FREUDENSTEIN F. A systematic approach to power flow and static force analysis in epicyclic spur gear trains [J]. Journal of Mechanical Design,1993,115(3):639-644.
- [22] 袁茹,王三民,沈允文. 高速行星齿轮传动的动态效率研究[J]. 机械科学与技术,2001,20(5):670-671.
- [23] JOSE M,CASTILLO D. The analytical expression of the efficiency of planetary gear trains[J]. Mechanism & Machine Theory,2002,37(2):197-214.
- [24] SALGADO D R,CASTILLO D,DEL J M. Selection and design of planetary gear trains based on power flow maps [J]. Journal of Mechanical Design,2005,127(1):120-134.
- [25] SALGADO,CASTILLO D. Analysis of the transmission ratio and efficiency ranges of the four-,five-,and six- link planetary gear trains[J]. Mechanism & Machine Theory,2014,73(7):218-243.
- [26] 胡青春,段福海,莫海军. 复杂行星齿轮系运动学分析及效率计算[J]. 中国机械工程,2006,17(20):2125-2129.
- [27] 王成,方宗德,张军辉. 基于图论的2K-H型周转轮系效率计算的研究[J]. 制造业自动化,2007,29(8):15-20.
- [28] CHEN C,LIANG T T. Theoretic study of efficiency of two-dofs of epicyclic gear transmission via virtual power[J]. Journal of Mechanical Design,2011,133(03):0310071-0310077.
- [29] 薛会玲,刘更,杨小辉,等. 周转轮系功率流与传动效率分析的简化方法[J]. 机械传动,2017,41(1):43-48.
- [30] 李庆凯,唐德威,姜生元,等. 封闭式行星轮系功率流判别的键合图法[J]. 北京航空航天大学学报,2012,38(9):1250-1254.
- [31] 陈彬,黄庆九,王鑫,等. 渐开线3K型行星齿轮传动效率分析[J]. 机械设计与制造,2015(6):87-90.
- [32] 颜海波,黄庆九,邢介发,等. 3K型变齿厚行星齿轮传动装置的效率分析[J]. 机械设计与制造,2017(5):158-161.
- [33] BODAS A,KAHRAMAN A. Influence of carrier and gear manufacturing errors on the static load sharing behavior of planetary gear sets[J]. Jsme International Journal,2004,47(3):908-915.
- [34] SINGH A. Application of a system level model to study the planetary load sharing behavior[J]. Journal of Mechanical Design. 2005,127(3):469-476.
- [35] SINGH A. Epicyclic load sharing map development and validation[J]. Mechanism&Machine Theory 2011,46(5):632-646.
- [36] 徐向阳,朱才朝,刘怀举,等. 柔性销轴式风电齿轮箱行星传动均载研究[J]. 机械工程学报,2014,50(11):43-49.
- [37] 马朝锋,刘凯,靳艳丽. 风力发电机行星传动增速系统动态均载研究[J]. 西安理工大学学报,2008,24(3):286-289.
- [38] GU X,VELEX P. On the dynamic simulation of eccentricity errors in planetary gears[J]. Mechanism & Machine Theory,2013,61(1):14-29.
- [39] 任菲,秦大同,吴晓铃. 考虑制造误差的人字齿行星传动均载特性[J]. 中南大学学报(自然科学版),2016,47(2):474-481.
- [40] YOUNG J,PARK Y J,KIM J G,et al. Load sharing and distributed on the gear flank of wind turbine planetary gearbox[J]. Journal of Mechanical Science & Technology,2015,29(1):309-316.
- [41] IGLESIAS M,RINCON A F D,DE-JUAN A M,et al. Planetary gear profile modification design based on load sharing modelling[J].Chinese Journal of Mechanical Engineering,2015,28(4):810-820.
- [42] SAFARI M,SARVI M. Optimal load sharing strategy for a wind/diesel/battery hybrid power system based on imperialist competitive neural network algorithm[J]. Renewable Power Generation Iet,2014,08(8):937-946.
- [43] MONTESTRUC A N. A numerical approach to calculation of load sharing in planetary gear drives[J]. Journal of Mechanical Design,2010,132(1):01450(31-34).
- [44] MONTESTRUC A N. Influence of planet pin stiffness on load sharing in planetary gear drives[J]. Journal of Mechanical Design,2011,133(1):01450(11-17).
- [45] 孙尚贞,姚爱民,李同杰,等. 齿侧间隙对行星齿轮传动机构均载特性的影响规律[J]. 机械工程与技术,2017,6(2):218-226.
- [46] 孙尚贞,姚爱民,李同杰,等. 行星轮偏心误差对行星齿轮传动系统均载性能的影响[J]. 机械工程与技术,2018,07(2):105-111.

- [47] JEONG G, KIM J G, PARK Y J, et al. Influence of the carrier pinhole position errors on the load sharing of a planetary gear train[J]. *International Journal of Precision Engineering & Manufacturing*, 2018, 19(4): 537–543.
- [48] 王均刚, 王勇, 霍志璞. 风电增速箱行星传动系统动力学方程及均载特性[J]. *太阳能学报*, 2015, 36(1): 26–32.
- [49] 王均刚. 行星轮系与多级齿轮传动系统动态性能与传动设计优化研究[M]. 合肥: 合肥工业大学出版社, 2018.
- [50] KAHRAMAN A. Load sharing characteristics of planetary transmissions[J]. *Mechanism & Machine Theory*, 1994, 29(8): 1151–1165.
- [51] LIGATA H, KAHRAMAN A, SINGH A. An experimental study of the influence of manufacturing errors on the planetary gear stresses and planet load sharing[J]. *Journal of Mechanical Design*, 2008, 130(4): 137–139.
- [52] SINGH A, KAHRAMAN A, LIGATA H. Internal gear strains and load sharing in planetary transmissions: model and experiments [J]. *Journal of Mechanical Design*, 2008, 130(7): 917–928.
- [53] 靳朝举. 风电齿轮箱行星结构动态均载测试方法研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2014.
- [54] 胡聪芳. 2.05MW 风机主增速箱均载特性及其可靠性研究[D]. 湘潭: 湘潭大学, 2014.
- [55] KIM J G, PARK Y J, LEE G H, et al. An experimental study on the effect of carrier pinhole position errors on planet gear load sharing[J]. *International Journal of Precision Engineering & Manufacturing*, 2016, 17(10): 1305–1312.
- [56] 付晨曦. 直升机齿轮分扭传动主减速器动态特性与均载特性研究[D]. 西安: 西北工业大学, 2016.
- [57] 张霖霖, 朱如鹏. 啮合相位对人字齿行星齿轮传动系统均载的影响[J]. *机械工程学报*, 2018, 54(11): 129–140.
- [58] KIM J G, PARK Y J, LEE G H, et al. Experimental study on the carrier pinhole position error affecting dynamic load sharing of planetary gearboxes[J]. *International Journal of Precision Engineering & Manufacturing*, 2018, 19(6): 881–887.

## Overview on Main Design Theory and Load Sharing Characteristics of Planetary Gear Trains

Wang Jungang<sup>1</sup>, Yang Shinan<sup>1</sup>, Liu Yande<sup>1</sup>, Mo Ruina<sup>2</sup>

(1.School of Mechatronics & Vehicle Engineering, East China Jiaotong University, Nanchang 330013 China;

2.School of Basic Science, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China)

**Abstract:** Planetary gear transmission is an important form of transmitting motion in the field of machinery. The problem of transmission design and the load sharing of planetary gear trains are two important aspects in the study of planetary transmission system. In this paper, the research status of planetary gear transmission was summarized from four aspects, including design theory, analysis method, load sharing characteristics and experimental study. From the existing research results, domestic and foreign scholars mainly analyze and study the transmission scheme of planetary gear trains which have been designed, and it is urgent to develop the optimization scheme of planetary gear transmission based on active design. The current manufacturing has reached a relatively high level, simply using existing methods to suppress the planetary row eccentric load, has been difficult to significantly improve the performance of planetary gear transmission, it is urgent to explore new methods to suppress planetary row eccentric load. Therefore, on the basis of absorbing and digesting the existing research and development technology of planetary gear transmission, it is necessary to improve and innovate the eccentric load suppression method of planetary row and the design theory of multi-stage gear transmission system, so as to adapt to the development trend of transmission equipment toward large models, reduce the failure rate of large gearboxes, and increase their service life.

**Key words:** planetary gear trains; transmission design; partial load; multistage gear transmission