DOI: 10.3901/JME.2019.13.053

GTF 发动机设计及动力学问题研究综述*

曹树谦^{1,2} 侯兰兰^{1,2}

(1. 天津大学力学系 天津 300354;

2. 天津市非线性动力学与控制重点实验室 天津 300354)

摘要: 齿轮传动涡扇(Geared turbofan, GTF)发动机作为绿色航空动力的代表机型,在降低耗油率、噪声、减少污染物排放等诸多方面具有突出优势。以完善我国关于 GTF 发动机知识参考、引起国内学者关注该技术研究为目的,详细介绍了 GTF 发动机的发展背景和研究现状,以求抛砖引玉之效。重点针对其关键部件-行星齿轮传动系统的动力学问题,包括系统建模、动态特性及非线性响应、功率均载、试验及故障模拟方面,做了详细评述,同时基于 GTF 发动机结构提出其可能面临的故障问题,最后总结了技术难点概况,并指出需要进一步研究的问题。

关键词: 齿轮传动涡扇发动机; 设计; 行星传动系统; 动力学特性

中图分类号: V23; TH132

A Review of Design and Dynamics for the GTF Aero-engine

CAO Shuqian^{1,2} HOU Lanlan^{1,2}

(1. Department of Mechanics, Tianjin University, Tianjin 300354;

2. Tianjin Key Laboratory of Nonlinear Dynamics and Control, Tianjin 300354)

Abstract: As the representative of green aerodynamics, the geared turbofan (GTF) aero-engine has some advantages including lower fuel consumption rate, less noise, minor pollutant emission and so on. Aiming at supplementing the knowledge reserve of GTF and causing our country scholar's concern, the GTF aero-engine is introduced in some key fields, such as development background and research status. The main presentation focuses on the dynamic responses of planetary gear transmission system. It is detailed reviewed in system modelling, dynamic characteristics vs nonlinear dynamics, and power load sharing and especially experiment and fault simulation study. The possible faults for GTF aero-engine are addressed. The technological difficulties and further studies needed are given at last.

Key words: geared turbofan aero-engine; design; planetary transmission system; dynamic characteristics

0 前言

随着航空运输业的蓬勃发展及公众对于环境污染问题的日益关注,航空发动机的燃油污染物排放和噪声污染成为航空领域越来越严峻的问题。限于目前的技术手段,涡扇发动机在污染物排放和噪声方面几乎接近于物理极限能力。研究表明^[1],在权衡燃油排放、发动机尺寸和噪声影响下,涵道比最高只能选在 8~11 区间。进一步增加涵道比,意味着风扇直径的增大,从而导致发动机体积和重量增加,重量增加的后果之一便是耗油率的升高。如何在提高涵道比的同时保证更低的耗油率成为重

要问题。

降低耗油率的方法主要是提高发动机的热效率和推进效率。现阶段涡轮前温度已达到 2 000 K 的极限值,目前的材料和冷却技术很难使得发动机热效率有显著提升;发动机的推进效率主要是通过增加空气流量和降低排气速度来实现,增加涵道比可实现大的空气流量。为实现高涵道比、低油耗、低噪声和低污染物排放的目的,齿轮传动涡扇(Geared Turbofan)发动机成为主研方向之一^[2]。

GTF 涡扇发动机是传统双轴发动机的一种衍生型,如图 1 所示。其不同之处在于发动机风扇与低压涡轮转子之间加装了减速齿轮传动系统,具体位于风扇转子之后。通过该齿轮系统的变速衔接,可以使风扇和涡轮在各自最优工作转速下运转,从而达到整机性能优化的目的。

* 国家重点基础研究发展计划(2015CB057400)和国家自然科学基金(11672201)资助项目。20180719 收到初稿,20181128 收到修改稿

图1 普惠公司PW1000G发动机

GTF发动机并不是一个新概念。霍尼韦尔公司早在1970年就将这种结构应用在了TFE731发动机上。美国普惠公司于1998—2008年期间,通过立项、地面试验,成功将GTF发动机应用于飞机地面试验、三菱的支线飞机、空客340的飞行试验中,并于2008年,将GTF发动机改称为“清洁动力PW1000G系列发动机”^[3]。

我国对GTF发动机的研究尚属预研阶段,主要是概念设计,并未针对GTF发动机启动系统化研究项目和规划。然而随着市场需求的日益提升,相信GTF发动机会成为我国民机预研的主角之一。因此有必要对现阶段国内外关于GTF发动机的研究概况、设计及动力学分析做一详细综述,为国内开展GTF发动机研制提供知识参考。

本文主要围绕GTF发动机的关键件-行星齿轮系统的动力学问题,并结合设计和故障问题进行了归纳和总结,文章结构安排如下:第1节对GTF发动机有别于传统涡扇发动机的结构特点和设计现状进行了简要概括;第2节作为文章主要部分,针对GTF发动机的关键问题-行星齿轮动力学问题,将当前研究分为4类:系统建模、动特性及非线性响应分析、功率均载问题、试验及故障模拟,进行了较为详尽的介绍;第3节根据GTF发动机结构提出其可能面临的故障问题;最后,就GTF发动机研制工作可能面临的技术难点、在设计和动力学方面需要进一步研究的内容进行了展望。

1 GTF发动机结构特点及设计

传统大涵道比涡扇发动机,受限于强度和叶尖切速度的要求,低压转子转速整体只能处于4 000~5 500 r/min,齿轮传动涡扇(GTF)发动机在风扇与低压压气机间增加一个齿轮减速系统之后,风扇转速在3 000~4 000 r/min,而增压压气机和低压涡轮系统可以工作在8 000~10 000 r/min的转速下,由此

风扇、增压级压气机和低压涡轮均具有更高效率,同时较少级数的压气机和低压涡轮即可满足功率要求。GTF的涵道比将增大到10~12,耗油率可比现有涡扇发动机低15%~20%,风扇叶尖速度的降低可使其噪声比国际民航组织规定低20 dB。实现以上指标需要考虑低压转子结构的支承、行星齿轮箱的工作方式、风扇叶片的低速构型、传动部件的体积权衡等多方面的设计问题。

国外有学者早在20世纪90年代即开始了GTF概念的设计和验算工作,BUYUKATAMAN等^[4]在GTF发动机的整体结构、齿轮箱设计、轴承选取方面给出算例,结合齿轮箱动力学特性-包括太阳轮弯曲应力、表面分布应力、表面温度、动载荷等指标,同时考虑了冷却系统设计、润滑油布置、材料选取等因素,给出指导性结论:滑动轴承支承的人字形行星齿轮减速器性能相对较高。

我国对于GTF发动机的研制,目前还处于概念设计阶段,主要是沈阳发动机设计研究所、航发商发、南航等单位进行了初步的设计和有限元计算。

冯金等^[5]以五路分流人字齿星型风扇驱动齿轮箱为研究对象开展了概念设计。其行星轮采用齿轮/轴承一体化设计并选用调心滚子轴承,齿圈采用柔性支承,通过摩擦传扭来实现运转。侯明曦等^[6]在GTF发动机齿轮传动系统概念设计的基础上,对齿轮进行了疲劳强度分析,其采用齿轮宏观参数优化和微观修形设计方法,提高齿轮承载能力,减小传递误差,改善齿轮接触区应力分布,提高齿轮传动系统的运动平稳性。

陈聪慧等^[7]针对GTF在发动机的整体结构,拟定了风扇齿轮系统的设计参数,给出滑油系统、散热器结构、轴承选取方面的算例比较,总结得出:行星型齿轮减速机构相对于恒星型减速箱尺寸小、传递功率路径多,可靠性高(图2);使用滑动轴承相较于滚动轴承寿命长、尺寸小。

孟祥战^[8]研究了航空发动机星型齿轮传动系统的优化设计,对单级齿轮传动和两级星型传动都进行了深入的分析和探讨,分别以系统体积最小和中心距最小为目标函数,以齿轮的接触强度、弯曲强度、胶合强度等为约束条件,建立了完整的数学模型。在齿轮传动系统优化的研究中,确定了齿轮的结构形式和几何尺寸计算,对设计变量的选取和约束条件的确立进行了较为详细的论述,建立数学模型并给出了参数的圆整和变位系数的优选方法。

由于行星齿轮减速箱的加入,与相同体积的传统涡扇发动机相比,GTF发动机的叶片具有更大直

径^[9], 在完成同等功率情况下, 其风扇的速度更低, 但推动风量更高, 因此对其强度、叶型的设计需要重新考虑。

ZHANG 等^[10]设计了一种适用于超高载荷低转速风扇转子的大弯度、低损失风扇叶型。保持外径、流量及压比沿叶高分布规律与现有设计大致相同,

进行降低转速设计。由于该叶型弯度大, 可实现超高负荷; 由该叶型构成的叶栅通道后部呈收敛状, 可抑制附面层增厚, 降低损失。KAPLAN 等^[11]设计了一个齿轮驱动的超高涵道比风扇试验台, 考虑叶型和流道优化, 并采用钛合金材料制作叶片, 综合计算了叶片和转子的应力分布。

图 2 行星齿轮传动两种结构

BIANCHI 等^[12]针对低速轴流风扇, 改进其叶片的叶尖形状来降低有害噪声, 并进行了气动声学实验, 采用连续谱分析了声源的相干性, 可识别来自叶间距的主要噪声。研究发现: 叶尖修型、通过调整叶片前后面的壁面流体路径, 能够显著影响气体泄流情况。

2 GTF 发动机行星齿轮动力学

行星齿轮箱作为 GTF 发动机的核心技术, 它的加入将改变整个转子系统的动力学行为, 尤其是低压转子系统, 其柔性和支承的改变, 需要针对其动力学问题进行详细研究, 主要涉及方面包括动力学模型的建立、动特性及非线性响应分析、功率均载问题和试验及故障模拟研究。

2.1 动力学建模

动力学模型的建立是分析系统动力学行为的基础。行星齿轮系统建模时方法的选取主要分为两类, 即集中参数法和有限元法。集中参数模型是在离散化力学模型基础上建立的, 模型中各变量与空间位置无关, 分析推导出系统的常微分方程组。有限元模型是将求解域看成由有限个小域互联组成, 对每个小域元假定近似解, 并推导适用于总域求解的条件, 从而求得问题的近似解。

因行星齿轮系统具有显著的集中质量特点, 集中质量法更为常用, 较易获得定性的动特性规律; 有限元法能够考虑复杂结构特征, 得到行星齿轮系统较为全面和精确的近似解, 同时可将具体实际齿轮系统 1:1 建模研究, 量化分析其动力学特性, 所得结果更易用来解决实际问题。国内外学者在行星

齿轮传动建模中主要使用了这两种方法。

根据对集中质量运动模式的不同处理, 可以将齿轮系统动力学模型分为 2 种: 纯扭转动力学模型和平移-扭转耦合动力学模型。KAHRAMAN^[13]较早分析了两种模型的差异性。通过理论和实验分析表明: 在关于传动系统的固有特性分析时, 纯扭转与平移-扭转动力学模型的计算结果差异很小。因此对于固有特性的研究, 可更多地采用自由度较少的纯扭转模型。KAHRAMAN 在之后发表了一系列关于行星齿轮动力学的文章, 建立了一个非线性时变行星二维动力学模型^[14], 随后将其扩展到了三维振动并分析了行星相位对动力学响应的影响^[15]。基于该模型, KAHRAMAN 和 BLANKENSHIP^[16]研究了均载和啮合相位的影响。

GUO 等^[17]建立了两级行星齿轮传动系统纯扭转动力学模型, 分析各个构件之间沿啮合线方向的相对位移以及自由振动特性。BAHK 等^[18]利用该模型采用数值仿真、弧长延拓的谐波平衡法、摄动法以及有限元仿真等方法分析了系统的脱齿、超谐波响应以及次谐波响应等非线性特征。

风扇齿轮驱动系统采用的齿轮必须考虑发动机、齿轮箱以及齿轮箱轴承之间的相互影响。采用人字型齿将使轴向载荷相互抵消, 降低行星齿轮轴承上的载荷。

王浩飞^[19]建立了考虑齿面摩擦及两端斜齿轮副相互影响的人字齿行星齿轮传动系统动力学模型, 研究分析了齿面摩擦及两端斜齿轮副错位对系统动力学特性的影响, 并将仿真的结果与相关文献的结论进行对比, 验证了所建模型的正确性。

应用于航空发动机的行星齿轮系统, 实际工作

于动坐标系中,因此基于旋转坐标系的动力学建模更为贴合实际。

沈稼耕^[20]研究了人字齿行星齿轮系统,对行星齿轮系统的基本参数与激起中心构件的振动形式之间的关系进行了分析;在计算得到人字齿行星齿轮系统中多重啮合间的相位关系的基础上,给出了计入啮合相位关系的人字齿轮时变啮合刚度的计算方法;考虑时变啮合刚度激励和误差激励,在旋转坐标系中建立了考虑啮合相位关系的人字齿行星齿轮的动力学模型;对啮合相位与模态特性之间的关系进行了研究;通过傅里叶级数法求解动力学方程得出啮合相位与振动响应之间关系,通过合理选取行星齿轮中各轮齿数和行星轮个数来调整各个啮合间的相位关系以使得振动或者噪声最小。

集中质量法在优化减少自由度方面具有优势,较易获得系统的规律性动特性,但在动力学参数的选取上容易偏离实际系统,有限元法可为集中质量法提供更为合理精确的参数范围,在难以进行实际试验情况下,两种方法可以相互验证。

AMBARISHA 等^[21]有效利用集中质量法和有限元法建立直齿行星齿轮系统模型,基于有限元分析,考虑了啮合刚度、轮齿接触误差等影响,得到系统的一系列动力学特征。所得动力学响应在有限元模型和集中质量模型对比中一致性很好。

GRADU 等^[22]考虑特定的动态激励,建立了系统的有限元模型,得到不同行星轮间距的系统动态响应。PARKER 等^[23]在研究直升机行星齿轮系统时,建立了平面有限元-接触模型,综合利用有限元和 Bousinesq 方法的优点,考虑了关键齿廓的真实几何形状和轮副的接触作用。该半解析半有限元的建模方式在满足精度同时有效地降低了运算成本。

马艳红等^[24]考虑 GTF 发动机风扇转子与低压转子的耦合关系,提出了转子系统简化整体有限元模型,针对该模型给出了 GTF 发动机转子系统的临界转速计算方法。揭示了整体模型与单转子模型临界转速计算结果的差异,以及典型力学特征参数对 GTF 转子系统临界转速与模态特征的影响。计算结果表明:相比考虑耦合关系的整体模型,将风扇转子与低压转子分开计算会导致转子系统固有频率值偏移及部分临界转速丢失;齿轮箱安装支承刚度增大会使得系统临界转速上升。

2.2 动态特性及非线性响应分析

固有频率和振型是动力学研究的基本问题。在激励作用下齿轮传动系统的响应是齿轮传动系统动力学研究的重要内容之一,通过对时域或频域动态响应的研究,了解齿轮系统振动的本质与基本规律

以及振动与系统参数的关系,从而更深刻地认识齿轮振动的本质,以便有效地设计、制造出优质的齿轮系统^[25]。系统的动力学响应特征,尤其是非线性因素所带来的特有的响应特性,对于分析系统动力学行为,指导前期设计和后期结构改进都具有重要的参考价值。

因结构的特殊性,行星齿轮系统的振动模态较一般系统要复杂,其固有模态包括转动模态、平移模态和行星模态。如图 3 所示。

图 3 行星传动振动模式

基于该三种模态, LIN 等^[26]考虑陀螺效应和时变刚度的影响,研究了行星齿轮传动系统的三维自由振动特性。

PARKER^[27]针对行星齿轮的相位调整定相,对齿轮振动的某些谐波的抑制效果进行了详细分析。行星齿轮定相可以在添加其他零件的基础上有效减少行星齿轮在平移和回转模态上的振动。

杨富春等^[28]建立了复式行星齿轮传动综合动力学模型,模型考虑了各构件的平移和扭转振动及静态传递误差。系统分析了复式行星齿轮传动系统的固有振动特性,研究了其固有频率的带状分布特点,根据中心构件及行星轮的振动特点,将系统振型分为三类,即中心构件平移—行星轮随机振动模式、中心构件扭转—行星轮相同振动模式、中心轮静止—相邻行星轮反向振动模式。

行星齿轮系统的非线性因素主要是由齿侧间隙、齿面摩擦、轴承间隙、轮齿分离等带来,当行星轮采用滑动轴承支承时,还需考虑油膜激振力所带来的非线性影响。在考虑非线性因素的影响时,系统的动力学行为不再简单为固有振动特性,要想减振和维持系统稳定运行,还需要考虑高阶谐波和次谐波的影响。

孙涛等^[29-30]发展了单自由度解析谐波平衡法的应用。对行星齿轮传动系统的多自由度非线性动力学微分方程组,在考虑刚度波动的情况下,推导了行星齿轮系统微分方程组的解析谐波平衡法的计算公式,并采用 Boryden 迭代方法求解非线性代数方程组。通过对算例求解,得到了行星齿轮传动的非线性频响特性,与相应的线性系统进行了比较,并

研究了时变啮合刚度、误差和齿侧间隙对系统非线性动力学行为的影响。研究发现,若行星齿轮系统的所有啮合副均产生双边冲击振动,则齿侧间隙的存在有利于行星齿轮传动的均载。若齿侧间隙而使得系统的啮合副处于单边冲击振动状态,则齿侧间隙越大,各路载荷分配的不均匀性亦随之加剧。

时变的啮合刚度会激起行星齿轮系统振动,在共振转速带附近,系统会发生轮齿分离现象,从而带来跳跃和次谐波共振等非线性特征。BAHK 等^[31]针对该轮齿分离问题,采用数值仿真和谐波平衡法进行研究,解析法中轮齿分离作为弱非线性处理,发现较大的外扭矩也会引发轮齿分离。

齿面摩擦是齿轮传动装置中特有的内部激励因素,在行星齿轮中,该摩擦力会随着齿轮转动呈现周期性变化,所引起的动力学响应反映为非线性特征。

LIU 等^[32]与朱恩涌等^[33]都针对含有齿面摩擦的齿轮系统,建立平移-扭转耦合的动力学模型,LIU 分析了单啮合状态下,齿轮的参数失稳以及摩擦带来的轮齿变形情况。朱恩涌主要针对 2K-H 型行星齿轮系统,考虑摩擦力、时变啮合刚度以及啮合误差的综合作用,运用变步长 Gill 积分法求解系统多自由度间隙型非线性微分方程组,得到了考虑滑动摩擦力影响时系统的非线性振动响应。

轴承间隙一直是轴承-转子系统不可忽视的非线性激励之一。无论是滚动轴承还是滑动轴承,对于轴承间隙的合理设计都是关系系统稳定安全运行的前提。在行星齿轮系统中,轴承间隙较为复杂,包括行星架轴承间隙、行星轮轴承间隙,同时与齿侧间隙共同作用,使得间隙激励成为齿轮振动的重要激励源。

GUO 等^[34]基于分段线性的轴承间隙模型^[35],采用集中质量法和有限元法对比研究了行星齿轮传动中轴承间隙、时变啮合刚度和轮齿分离作用下的非线性动力学响应特征。表明中央轮的轴承间隙对于行星齿轮的振动响应影响最大,行星轮轴承间隙影响次之,两个间隙都会改变齿轮动载荷,使之重新分布,从而影响分岔和混沌形式。

2.3 功率均载问题

动载荷和均载虽属于动态响应,但对行星齿轮传动系统意义重大,通常被单独研究。行星传动由多个定轴星轮共同分担载荷,特点是功率分流,传动功率大,相对体积小,质量轻。理想情况下,对于一个 n 个行星轮传动的齿轮副系统,每个行星轮所分担的扭矩相同,均为总输出扭矩的 $1/n$,然而,由于制造和装配误差,完全的均载很难实现。GTF

发动机行星齿轮箱无论采用恒星型传动还是行星型传动,因结构、尺寸和安装限制,载荷分布都是重点关注问题,导致不均载的因素主要包括各轴系偏心误差、安装和装配间隙、轴承偏心以及齿轮啮合角度和齿厚误差等。

HIDAKA 等^[36-38]研究了 3 个行星轮的行星齿轮传动系统中载荷的分配情况。其研究表明,在这种系统中如果只浮动行星架、齿圈和太阳轮中的一个,均载是能够实现的,这个结论也得到了 MÜLLER 等^[39]的证实。BODAS 等^[40]考虑因制造和装配所带来的轮架和齿轮误差对行星轮均载的影响,将误差分为 3 类:时不变且非装配误差,例如行星架开孔位置误差;时不变装配误差,例如行星齿厚度误差;时变且装配误差,例如齿轮间隙跳动误差;在准静态下研究了带有以上误差的行星均载特性,相应给出了调整均载特性的量化和设计规律。

KAHRAMAN^[41]推导出考虑非线性时变的行星齿轮传动系统的均载系数模型,定量考察了安装误差对均载系数的影响情况,研究表明,给予中心构件(太阳轮、行星架和齿圈)一定的浮动能力,能够有效改善均载特性,同时,装配中如果调整行星轮的跳动误差,使多个行星轮之间的误差能够消减,从而减小跳动误差对于均载系数的影响。

SINGH^[42-43]考察了行星齿轮数目、太阳轮支撑刚度、轮轴支承轴承刚度对均载结果的影响,指出轮轴数增多,在保证均载情况下,需要将轴孔位置误差的公差带收缩;考虑位置误差,建立了任意轮数适用的系统模型,可预测行星轮间的载荷分配特性,研究浮动(系统带有间隙)和非浮动系统的非均载的本质机理。

莫帅等^[44-46]为了揭示 GTF 发动机星形传动系统星轮载荷分配机理,对所有齿轮的偏心误差、齿厚误差、基节误差、安装误差,轴承制造误差等分别进行了当量啮合误差分析,考虑了中心轮同时浮动导致的啮合侧隙变化而引起的浮动啮合误差,建立了针对功率流动闭环特征的各构件角位移协调的精细化均载系数计算模型,计算得到了考虑位移协调和不考虑位移协调的均载系数分别为 1.051 5 和 1.045 2,获得了相应的均载特性曲线,为设计上确定均载系数、工艺上合理分配及控制公差提供了科学依据。

风扇驱动人字齿行星齿轮箱的结构复杂,人字齿轮是二分支分流传动,传动过程中由于不可避免的对称性误差,需要通过齿轮的轴向自位浮动来达到均载,而传动系统中的五个行星轮同时与太阳轮、外齿圈啮合,其自位的调整受太阳轮和外齿圈的约

束, 整个系统的均载过程十分复杂^[47-48]。

任菲^[49]基于动力学响应所得人字齿行星齿轮传动的动态啮合力, 计算了传动系统的动力学均载系数, 研究了不同浮动方式下系统各构件误差及系统参数对动力学均载特性的影响。系统参数包括: 工况参数(输入转速、输入扭矩)、物理及几何参数(中心构件支撑刚度、行星轮个数)。研究表明, 减小制造误差和采用浮动措施对人字齿行星传动的均载有重要作用, 系统均载系数随制造误差的增加而显著增大, 当采用浮动措施时均载系数明显减小且组合浮动效果更好。

鲍和云^[50]对两级星型齿轮传动系统的分流特性及动力学特性进行了研究, 包括两级星型齿轮传动系统的均载特性分析与均载设计、非线性动力学建模、非线性微分方程的求解方法及非线性动态特性分析等内容。

综上, 目前研究主要集中于装配误差和间隙偏心导致的行星轮不均等间隙分布, 从而产生不均载情况。在 GTF 发动机中, 行星齿轮减速箱输入轴连接于低压压气机轴端, 除高转矩载荷外, 一定量的弯矩也会作用于其上。另外重力激励也是需要考虑的激励源之一, 重力会扰乱原有系统的对称性, 导致轮齿啮合载荷波动, 产生不均载效应。当弯矩和重力同时加载与行星齿轮系统时, 行星轮承担载荷波动剧烈, 是不可忽视的不均载因素之一。

GUO 等^[51]研究了弯矩、转矩、重力等对于行星齿轮传动系统均载特性的影响, 建立了一个三维多体动力学模型, 将主轴、行星架、齿轮轴都作为弹性考虑, 研究表明, 弯矩和重力作为基础外激励, 可以导致轮齿和行星轮轴承上的周期性载荷, 其对于行星轮齿的均载影响大于波动的啮合刚度。在低转矩输入时, 弯矩和重力的激励效应更加明显。

2.4 实验及故障模拟

美国俄亥俄州立大学的 Dynamics & Vibration Lab 进行了大量直/斜齿轮行星传动系统的动力学试验^[52-54]。试验主要包括: 利用加速度传感器获取加速度信号测试系统振动特性, 其主要目的是验证集中参数模型和分布质量模型的有效性并且指导分析模型的建立。试验应用多处测量信号的平均值改善信号质量, 以一定范围的激励频率对系统进行扫频测试获取系统的固有频率, 通过改变系统的参数设计验证相位调谐理论抑制振动的有效性。

KARRAY 等^[55]以研究动力学特性为目的设计了一个行星齿轮系统试验台, 如图 4 所示, 两个完全一样的行星齿轮副安装在同一根转轴上, 实验研究了升降速下系统的共振频率, 并考察了外载荷对

于共振频率点的影响, 加重的载荷能够使一阶固有频率降低。

图 4 两级行星齿轮副及加载装置

肖正明等^[56]基于齿轮啮合理论和 Lagrange 方程, 考虑各级齿圈扭转支撑刚度, 提出运用集中参数法建立多级行星齿轮-箱体耦合扭转动力学模型。在分析多级行星齿轮啮合相位关系的基础上, 确定各齿轮对时变啮合刚度, 并运用有限元法获取各齿圈扭转支撑刚度。行星齿轮传动误差表示为轴频和齿频叠加的谐波函数, 分析多级行星齿轮传动的主要激励特征。针对盾构机三级行星减速器某施工地段的运行条件, 求解行星齿轮系统的动态响应, 并分析其时频特性。采用背靠背能量回馈试验台架测试方案, 测量盾构机行星减速器的振动加速度, 采用数值积分计算振动速度和位移, 并分析其振动特性。研究表明盾构机行星减速器振动试验数据与计算结果具有良好的一致性, 验证了多级行星齿轮系统耦合动力学模型的准确性。

LEI 等^[57]对于行星齿轮箱的故障诊断提出了一种自适应随机振动方法。对于行星齿轮箱的故障诊断难点包括敏感测点的选取、振动传递路径的梳理和弱故障特征的提取。所提方法利用蚁群算法的优化能力, 并自动匹配故障信号与随机振动系统, 从而有效滤掉噪声并提取微弱故障信号。其团队还设计了一套两级行星齿轮箱试验装置^[58], 如图 5 所示, 可以实现轮齿点蚀、裂纹损伤、缺齿等故障模拟。

图 5 两级行星齿轮箱试验台模型

目前国内外对于人字形行星齿轮啮合的实验研究相对较少, 针对航发的行星齿轮减速装置, 由于考虑了人字形齿轮、滑动轴承支承、以及小尺寸大

扭矩的传动特性, 试验的设计和进行较为复杂。

KANG 等^[59]通过试验、解析和仿真研究了双斜齿轮即人字形齿轮的动力学特性, 设计了一台可施加一定范围扭矩和升降速的人字形齿轮副试验-测量装置, 如图 6 所示。

图6 人字形齿轮副试验台

试验齿轮副可以错开一定角度, 模拟错位啮合故障问题。通过获取系统在不同参数变化下的高速三维振动、动力学运动传递误差、扭矩, 形成动力学数据库。基于实验所获取数据库, 建立了考虑转轴和轴承支承的、线性时变的人字形齿轮副系统模型。基于此模型详细分析了错位角度下的系统动力学规律, 与试验进行对比, 验证了模型三维振动分析的精确性, 并说明左右错位角度是影响人字形齿轮副动力学响应的首要参数。

3 GTF 发动机可能故障问题

在齿轮传动涡扇发动机中, 减速器工作于高转速、高负荷下, 不仅体积与重量大, 结构复杂, 而且齿轮、支承齿轮的轴承均在恶劣条件下工作, 因此是一个故障多发、可靠性差的部件。GTF 发动机面临不平衡、轴承故障、润滑冷却不良等多重问题。

风扇转子的本机平衡对于大涵道比涡扇发动机是必需工作, 不论在风扇部件还是在涡轮部件上调整配重均是对整个低压转子的平衡。而对于 GTF 发动机, 风扇平衡和低压转子平衡需要分别考虑, 还需要加入行星齿轮箱的动特性影响。GTF 航发面临本机不平衡新问题, 需要探索适应新结构的动平衡手段。

轴承是风扇齿轮驱动系统中的关键部件之一。行星齿轮箱的使用经验表明, 轴承问题约占行星齿轮传动系统故障的 1/3。滚动轴承和滑动轴承都可用于齿轮减速器, 但滚动轴承和滑动轴承又有各自的优缺点; 滑动轴承相对寿命长, 但对滑油清洁度要求高, 起动时必须滑油润滑; 滚动轴承寿命较短,

但起动时允许短时间的无滑油情况。对于 GTF 发动机, 轴承支承的分布形式、结构设计和类型选取是需要关注的问题之一。

当齿轮驱动系统减速箱采用人字型齿时, 行星齿轮的轴承选择对整个系统的尺寸和性能有决定性的影响。采用人字型齿和滑动轴承组合的齿轮驱动系统具有最小的尺寸、最长的寿命、最小的功耗。另外, 考虑到五路分流人字齿行星齿轮传动系统在传动过程中会不断进行自定心及找正, 采用滑动轴承能够很好地改善系统的均载特性。但是按照设计要求, 每个行星轮上的轴承需要承受近 30 t 的径向力, 而基于我国滑动轴承现有的设计加工水平, 最多只能达到要求的 52%。若想提高承载能力, 需要进一步减小轴承间隙, 并配以高性能的涂层保护轴瓦^[3]。除此之外, 为了满足 30 min 不断油的适航要求, 必须为滑动轴承配一套辅助供油系统。由此, 滑动轴承支承的行星齿轮减速箱面临油膜厚度调整、油膜激振、冷却润滑等问题。

齿轮箱外侧采用了静态的安装座进行支承, 除了用于辅助安装与定位外, 安装座还起到抑制齿轮箱自身变形与振动的作用。由于齿轮啮合的轴向力在箱内得到自平衡, 风扇与低压转子轴向力通过各自主轴传递。是否需在该齿轮箱安装座布置故障检测装置是可考虑问题。

目前 GTF 发动机故障问题的研究主要集中于行星齿轮箱内部构件, 包括滑动轴承问题、行星齿轮问题等。在考虑不平衡故障、不对中问题、冷却不良等方面, 对转子系统甚至发动机性能影响的研究仍显不足, 值得进一步加大科研力度。

卜忠红等^[60-61]考虑滑动轴承支承刚度不对称和耦合特性, 建立计入内齿轮轴向振动的人字齿轮行星传动动力学模型, 利用 4 个刚度系数描述行星轮滑动轴承支承油膜刚度。分析系统的自由振动特性, 发现系统存在 5 种振动模式: 中心轮扭转-轴向振动模式、内齿轮扭转-轴向振动模式、中心轮横向振动模式、内齿轮横向振动模式和行星轮振动模式。根据每种振动模式的振型特征, 推导出 5 种模式固有特性的低阶计算公式。系统固有频率的分布范围比直齿、斜齿行星传动系统小。结果表明, 油膜刚度不对称不会对振型特征产生影响, 但是刚度耦合不对称时中心轮横向振动模式会发现显著变化: 对应的二重固有频率变成两个不同的单重频率, 振型呈现新特征。

CHAARI 等^[62]针对行星齿轮的轮齿点蚀和裂纹问题, 建立了两种故障的数学模型, 通过时频域特征、正常齿轮和故障齿轮对比分析, 研究故障行

星齿轮对系统刚度的影响情况。王况等^[63]抓住行星齿轮系统复合运动的突出特征,结合故障振动传递路径的时变特性,提出了一种基于故障运动特征的潮汐频率特征指标,即由于行星轮的公转,太阳轮齿故障到传感器的传播途径具有时变特性,故障频率具有周期性变化的特征,命名为潮汐频率,对行星齿轮箱进行故障诊断。通过对行星齿轮箱太阳轮局部故障的振动数据分析,验证了潮汐频率指标的存在,分析了潮汐频率作为行星齿轮箱故障诊断指标的优势和前景。

4 结论与思考

基于以上综述,总结齿轮传动风扇发动机研制过程中可能遇到的技术难点包括以下几方面。

(1) 行星齿轮箱输入输出传递功率问题。民航客机要求风扇的功率可达到 40 000 kW,因此要求齿轮传动系统的功率传递精度足够高,以减少功率损失。目前国内齿轮的加工和转配能力、传递效率测量技术都有待提高。

(2) 行星齿轮箱的高效稳定工作,需要齿轮轴系的绝对同轴和平行。因此,需要隔离发动机的弯曲振动传递至齿轮传动轴,考虑如何引入刚柔恰当的支承和隔振结构是设计 GTF 的一大难点。

(3) 齿轮箱在低压转子上的加入,直接改变整个低压转子系统的动力学行为。连接和支承的改变会带来本质非线性问题,考察系统振动及非线性振动特性,是整机设计的必研项目,对于复杂的 GTF 转子系统进行非线性动力学分析是一大技术考验。

(4) 均载问题在行星齿轮传动机构中占据重要地位。将齿轮箱置于航发双转子系统中,要求体积小、精度高,且输入输出功率大,如何保证载荷的均衡传递是 GTF 发动机能否有效运行的关键。

考虑以上技术难点,从技术需求和科研不足的角度出发,进一步的研究可从以下几个方面进行。

(1) GTF 发动机全面设计工作。考虑功率需求、涵道比、噪音域等诸多要求,基于有限元方法建立完善的发动机模型并进行大量的动特性运算,借鉴已有机型结构,确定关键参数域。

(2) 行星齿轮箱的动力学问题。从线性振动和非线性振动角度多方位分析传动齿轮箱的动力学行为。考虑整机参数,加入齿轮箱的低压转子系统的细化建模与简化,探究参数对系统动力学响应的影响规律,总结定性理论指导 GTF 发动机设计。

(3) 关键件的强度和结构改善。改善风扇构型设计,以适应大涵道比和低转速,低压压气机和低

压涡轮由于转速的提高和级数的减少,需要从强度和叶片结构上做重新改型论证。滑油、润滑和冷却油路设计也需要改善。

(4) GTF 发动机的潜在故障问题。行星齿轮减速箱的加入,对于系统的振动、结构、气动稳定性都具有影响,不平衡、不对中、碰摩和密封等问题不可忽视,从整机角度,考虑 GTF 发动机故障隐患并提出解决方案是必需研究内容。

(5) GTF 发动机模拟试验研究。探索动力学相似理论,按照航空发动机整机设计实验台,保证试验台在动特性指标、气动效应、结构缩比等方面与真机必要的相似性,建立考虑弯扭耦合振动的试验数据库。

参 考 文 献

- [1] WILFERT G, KRIEGL B, SCHEUGENPFLUG H. Clean-validation of a high efficient low NOx core, a GTF high speed turbine and an integration of a recuperator in an environmental friendly engine concept[C]// 41st AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference, 2005, 4195.
- [2] LARSSON L, GRÖNSTEDT T. Conceptual design and mission analysis for a geared turbofan and an open rotor configuration[C]// Proceedings of ASME Turbo Expo 2011 GT2011 June 6-10, 2011, Vancouver, Canada.
- [3] 张德志, 张锦绣, 王凤. 齿轮驱动涡轮发动机结构设计特点分析[J]. 航空发动机, 2011, 37(4): 1-4.
ZHANG Dezhi, ZHANG Jinxiu, WANG Feng. Analysis of structural design characteristics for geared turbofan engine[J]. Aeroengine, 2011, 37(4): 1-4.
- [4] BUYUKATAMAN K, WILTON S. Gearbox system design for ultra-high bypass engines[C]// AIAA/ASAE/ASME/ASEE 26th Joint Propulsion Conference, Orlando, 1990: AIAA-90-2152.
- [5] 冯金, 覃坤, 王丹. 星型风扇驱动齿轮箱概念设计探讨[J]. 航空工程进展, 2015, 6(4): 490-495.
FENG Jin, QIN Kun, WANG Dan. Discussion on conceptual design of fan drive gear system with star gears[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2015, 6(4): 490-495.
- [6] 侯明曦, 李锦花, 张茂强. GTF 发动机行星齿轮传动系统设计技术研究[J]. 航空发动机, 2014, 40(2): 61-64.
HOU Mingxi, LI Jinhua, ZHANG Maoqiang, et al. Research on design technology of planetary gear system for geared turbofan engine[J]. Aeroengine, 2014, 40(2): 61-64.
- [7] 陈聪慧, 信琦. 风扇齿轮驱动系统的概念设计[J]. 航空科学技术, 2011(4): 8-11.

- CHEN Conghui, XIN Qi. Conceptual design of fan gear drive system[J]. *Aeronautical Science & Technology*, 2011(4): 8-11.
- [8] 孟祥战. 航空发动机星型齿轮传动系统优化设计[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2004.
- MENG Xiangzhan. Optimization design of star gear transmission system of aero-engine[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2004.
- [9] KURZKE J. Fundamental differences between conventional and geared turbofans[C]// *Proceedings of ASME Turbo Expo 2009: Power for Land, Sea and Air GT2009 June 8-12, 2009, Orlando, Florida, USA*.
- [10] ZHANG Jinhuan, ZHOU Zhenggui, WEI Wenqiang. Aero dynamic design of an ultra-low rotating speed geared fan[J]. *Aerospace Science and Technology*, 2017, 63: 73-81.
- [11] KAPLAN B, NICKE E, VOSS C. Design of a highly efficient low-noise fan for ultrahigh bypass engines[J]. *ASME Turbo Expo 2006: Power for Land Sea and Air*, 2006, 1: 1-8.
- [12] BIANCHI, CORSINI A, RISPOLI F. Experimental aeroacoustic studies on improved tip geometries for passive noise signature control in low-speed axial fan[C]// *ASME Paper No. GT2008-51057*: 863-875.
- [13] KAHRAMAN A. Natural modes of planetary gear trains[J]. *Journal of sound and vibration*, 1994, 73(1): 125-130.
- [14] KAHRAMAN A. Load sharing characteristics of planetary transmissions[J]. *Mechanism and Machine Theory*, 1994, 29: 1151-1165.
- [15] KAHRAMAN A. Planetary gear train dynamics[J]. *ASME Journal of Mechanical Design*, 1994, 116: 713-720.
- [16] KAHRAMAN A, BLANKENSHIP G W. Planet mesh phasing in epicyclic gear sets[C]// *Proc. of International Gearing Conference, Newcastle, 1994*: 99-104.
- [17] GUO Y, PARKER R G. Purely rotational model and vibration modes of compound planetary gears[J]. *Mechanism and Machine Theory*, 2010, 45(3): 365-377.
- [18] BAHK C J, PARKER R G. Nonlinear dynamics of planetary gears with equal planet spacing[C]// *ASME 2007 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference. American Society of Mechanical Engineers*, 2007: 603-616.
- [19] 王浩飞. 基于齿面摩擦的人字齿行星齿轮传动系统动力学研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2015.
- WANG Haoifei. Dynamic analysis of the double helical planetary gear trains considering tooth friction[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2015.
- [20] 沈稼耕. 计入啮合相位的人字齿行星齿轮系统动力学研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2014.
- SHEN Jiageng. Research on dynamics of herringbone planetary gear trains based on mesh phasing[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2014.
- [21] AMBARISHA V K, PARKER R G. Nonlinear dynamics of planetary gears using analytical and finite element models[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2007, 302: 577-595.
- [22] GRADU M, LANGENBECK K, BREUNIG B. Planetary gears with improved vibrational behaviour in automatic transmissions[J]. *Vdi Berichtenr*, 1996: 861-879.
- [23] PARKER R G, AGASHE V, VIJAYAKAR S M. Dynamic response of a planetary gear system using a finite element/contact mechanics model[J]. *ASME Journal of Mechanical Design*, 2000, 122(10): 304-310.
- [24] 马艳红, 曹冲, 郝勇, 等. 齿轮传动风扇发动机转子系统结构与动力学分析[J]. *航空动力学报*, 2015, 30(11): 2753-2761.
- MA Yanhong, CAO Chong, HAO Yong, et al. Structure and dynamics analysis of rotor system in geared turbofan engine[J]. *Journal of Aerospace Power*, 2015, 30(11): 2753-2761.
- [25] 巫世晶, 任辉, 朱恩涌. 行星齿轮传动系统动力学研究进展[J]. *武汉大学学报*, 2010, 43(3): 398-403.
- WU Shijing, REN Hui, ZHU Enyong, et al. Research advances for dynamics of planetary gear trains[J]. *Engineering Journal of Wuhan University*, 2010, 43(3): 398-403.
- [26] LIN J, PARKER R G. Analytical characterization of the unique properties of planetary gear free vibration[J]. *ASME Journal of Vibration and Acoustics*, 1999, 121(3): 316-321.
- [27] PARKER R G. A physical explanation for the effectiveness of planet phasing to suppress planetary gear vibration[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2000, 236(4): 561-573.
- [28] 杨富春, 周晓军, 郑津洋. 复式行星齿轮传动系统综合动力学模型及振动特性研究[J]. *振动与冲击*, 2011, 30(8): 144-148.
- YANG Fuchun, ZHOU Xiaojun, ZHENG Jinyang. Dynamic model and vibration characteristics of complex compound planetary gear set[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2011, 30(8): 144-148.
- [29] 孙涛, 沈允文. 行星齿轮传动非线性动力学方程求解与动态特性分析[J]. *机械工程学报*, 2002, 38(3): 11-15.

- SUN Tao, SHEN Yunwen. Study on nonlinear dynamic behavior of planetary gear train solution and dynamic behavior analysis[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2002, 38(3): 11-15.
- [30] 孙涛, 胡海岩. 基于离散傅里叶变换与谐波平衡法的行星齿轮系统非线性动力学分析[J]. 机械工程学报, 2001, 38(11): 58-61.
- SUN Tao, HU Haiyan. Nonlinear dynamics of planetary gear transmission by harmonic balance method based on DFT[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2001, 38(11): 58-61.
- [31] BAHK C J, PARKER R G. Analytical solution for the nonlinear dynamics of planetary gears[J]. Journal of Computational and Nonlinear Dynamics, 2011, 6: 1-15.
- [32] LIU G, PARKER R G. Impact of tooth friction and its bending effect on gear dynamics[J]. Journal of Sound and Vibration, 2009, 320: 1039-1063.
- [33] 朱恩涌, 巫世晶, 王晓笋, 等. 含摩擦力的行星齿轮传动系统非线性动力学模型[J]. 振动与冲击, 2010, 29(8): 217-220.
- ZHU Enyong, WU Shijing, WANG Xiaoshun, et al. Study on nonlinear dynamic model of planetary gear train sets with friction force[J]. Journal of Vibration and Shock, 2010, 29(8): 217-220.
- [34] GUO Y, PARKER R G. Dynamic analysis of planetary gears with bearing clearance[J]. Journal of Computational and Nonlinear Dynamics, 2012, 7: 041002-1-15.
- [35] KAHARMAN A, SINGH R. Nonlinear dynamics of a geared rotor-bearing system with multiple clearances[J]. Journal of Sound and Vibration, 1991, 144(3): 469-506.
- [36] HIDAKA T, TERAUCHI Y, NAGANUM K. Dynamic behavior of planetary gear-1st report: Load distribution[J]. Bull. JSME, 1976, 19(132): 690-698.
- [37] HIDAKA T, TERAUCHI Y, DOHI K. On the relation between the run out errors and the motion of the center of sun gear in a stoekicht planetary gear[J]. Bulletin of JSME, 1979, 22(167): 748-754.
- [38] HIDAKA T, TERAUCHI Y, NAGANUM K. Dynamic behavior of planetary gear-7th report: Influence of the thickness of ring gear[J]. Bull. JESE, 1979, 22: 1142-1149.
- [39] MÜLLER H W. Epicyclic drive trains[M]. Detroit: Wayne State University Press, 1982.
- [40] BODAS A, KAHARMAN A. Influence of carrier and gear manufacturing errors on the static load sharing behavior of planetary gear sets[J]. The Japan Society of Mechanical engineers International Journal: Series C, 2004, 47(3): 908-915.
- [41] KAHARMAN A. Load sharing characteristics of planetary transmissions[J]. Mechanism and Machine Theory, 1994, 29(8): 1151-1165.
- [42] SINGH A. Application of a system level model to study the planetary load sharing behavior[J]. Journal of Mechanical Design, 2005, 127(12): 469-476.
- [43] SINGH A. Load sharing behavior in epicyclic gears: Physical explanation and generalized formulation[J]. Mechanism and Machine Theory, 2010, 45(3): 511-530.
- [44] 莫帅, 张以都, 吴琼, 等. GTF 发动机星形传动系统多分流均载机理研究[J]. 航空动力学报, 2016, 31(3): 764-768.
- MO Shuai, ZHANG Yidu, WU Qiong, et al. Research on load sharing mechanism of star gear trains for GTF engine[J]. Journal of Aerospace Power, 2016, 31(3): 764-768.
- [45] MO Shuai, ZHANG Yidu, WU Qiong. Research on multiple-split load sharing of two-stage star gearing system in consideration of displacement compatibility[J]. Mechanism and Machine Theory, 2015, 88: 1-15.
- [46] MO Shuai, ZHANG Yidu, WU Qiong. Load sharing behavior of star gearing reducer for geared turbofan engine[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2017, 30(4): 796-803.
- [47] 尹素格. 船用星型齿轮减速器的均载与动态特性研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2011.
- Yin Suge. Research on load sharing and dynamic characteristics of marine star gear reducer[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2011.
- [48] 袁擎宇. 星型齿轮传动系统均载分析方法的研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2004.
- YUAN Qingyu. The analysis method on load sharing of star gear transmission system[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2004.
- [49] 任菲. 考虑制造误差的人字齿轮行星传动系统动力学特性及动态均载研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2015.
- REN Fei. Study on dynamic characteristics and dynamic load sharing of a herringbone planetary gear with manufacturing errors[D]. Chongqing: Chongqing University, 2015.
- [50] 鲍和云. 两级星型齿轮传动系统分流特性及动力学研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2006.
- BAO Heyun. Study on load-split characteristics and dynamics of two-stage star gear trains[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2006.
- [51] GUO Y, KELLER J, LACAVA W. Combined effects of gravity, bending moment, bearing clearance, and input torque on wind turbine planetary gear load sharing[C]// American Gear Manufacturers Association Fall Technical Meeting, 2012, Dearborn, Michigan. 2012: 1-19.
- [52] VELEX P, PICHON V, WITTMAN R. Dynamic behavior

- of epicyclic trains-experiment and analyses[C]// Proceedings of the International Gear Conference, Newcastle, 1994: 265-270.
- [53] PARKER R G, ERICSON T M. OSU planetary gear vibration experiments[EB/OL]. <http://www.mecheng.osu.edu/vibrations/dynamicsfiles>, 2009.
- [54] INALPOLAT M, KAHRAMAN A. Atheoretical and experimental investigation of modulation sidebands of planetary gear sets[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2009, 323: 677-696.
- [55] KARRAY M, CHAARI F, RINCON A F D, et al. An experimental investigation of the dynamic behavior of planetary gear set[J]. *Design and Modeling of Mechanical Systems*, 2013, 25: 199-206.
- [56] 肖正明, 秦大同, 尹志宏. 多级行星齿轮系统耦合动力学分析与试验研究[J]. *机械工程学报*, 2012, 48(23): 51-58.
- XIAO Zhengming, QIN Datong, YIN Zhihong. Multi-stage planetary gears dynamic coupling analysis and experimental investigation[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2012, 48(23): 51-58.
- [57] LEI Yaguo, HAN Dong, LIN Jing, et al. Planetary gearbox fault diagnosis using an adaptive stochastic resonance method[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2013, 38: 113-124.
- [58] LEI Yaguo, KONG Dong, LIN Jing, et al. Fault detection of planetary gearboxes using new diagnostic parameters[J]. *Measurement Science and Technology*, 2012, 23: 1-10.
- [59] KANG M R, KAHRAMAN A. An experimental and theoretical study of the dynamic behavior of double-helical gear sets[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2015, 350: 11-29.
- [60] 卜忠红, 刘更, 吴立言. 滑动轴承支承人字齿轮行星传动固有特性分析[J]. *机械工程学报*, 2011, 47(1): 80-88.
- BU Zhonghong, LIU Geng, WU Liyan. Natural characteristics analysis on herringbone planetary gear trains with slide bearing support[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2011, 47(1): 80-88.
- [61] BU Zhonghong, LIU Geng, WU Liyan. Modal analyses of herringbone planetary gear train with journal bearings[J]. *Mechanism and Machine Theory*, 2012, 54: 99-115.
- [62] CHAARI F, FAKHFAKH T, HADDAR M. Dynamic analysis of a planetary gear failure caused by tooth pitting and cracking[J]. *Journal of Failure Analysis and Prevention*, 2006, 6(2): 73-78.
- [63] 王况, 科盛, 左明健. 一种基于行星齿轮箱复合运动的故障诊断指标[J]. *振动与冲击*, 2016, 35(23): 217-221.
- WANG Kuang, WANG Kesheng, ZUO Mingjian. A fault diagnosis index based on complex movement of planetary gearbox[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2016, 35(23): 217-221.
-
- 作者简介: 曹树谦, 男, 1964 年出生, 博士, 教授。主要研究方向为旋转机械非线性动力学、结构动力学与优化。
E-mail: sqcao@tju.edu.cn
- 侯兰兰(通信作者), 女, 1989 年出生, 博士研究生。主要研究方向为动力学与控制、旋转机械非线性动力学。
E-mail: xiaoshihanlan@163.com