

Analysis of the relationship between system stiffness and kinematic accuracy in high precision gearbox assembly

Li Wan

The Eighth Research Institute of China State Shipbuilding Corporation, Nanjing, Jiangsu, 211100, China

Abstract

high precision gearbox is the core transmission component of precision mechanical system, and the relationship between its system stiffness and motion accuracy directly affects the operation performance of the equipment. This paper analyzes the interaction between the two in the assembly and operation from the theoretical level, expounds the positive influence of the system stiffness on the motion accuracy by restraining deformation, reducing vibration, maintaining transmission stability and other ways, and analyzes how the lack of motion accuracy reacts on the system stiffness by changing the force state and increasing the component loss, revealing the internal relationship between the two interdependent and dynamic effects. The research aims to provide theoretical reference for the performance optimization and assembly process improvement of high-precision gearbox, and help to improve the reliability and accuracy of precision mechanical system.

Keywords

high precision gearbox; System stiffness; Motion accuracy; Assembly; Performance correlation

高精度齿轮箱装配中的系统刚度与运动精度关系辨析

万力

中国船舶集团有限公司第八研究院, 中国·江苏·南京 211100

摘 要

高精度齿轮箱是精密机械系统的核心传动部件, 其系统刚度与运动精度的关系直接影响设备的运行性能。本文从理论层面辨析二者在装配及运行中的相互作用, 阐述系统刚度通过抑制变形、减少振动、维持传动稳定等途径对运动精度的正向影响, 同时分析运动精度不足如何通过改变受力状态、加剧部件损耗反作用于系统刚度, 揭示两者相互依存、动态影响的内在联系。研究旨在为高精度齿轮箱的性能优化与装配工艺改进提供理论参考, 助力提升精密机械系统的可靠性与精度水平。

关键词

高精度齿轮箱; 系统刚度; 运动精度; 装配; 性能关联

1 引言

在诸如航空航天、精密制造以及高端装备等范畴, 高精度齿轮箱性能对于整机运行精度与稳定性起着径直的决定性作用。作为齿轮箱抵御外力变形之能力的系统刚度, 连同运动精度(此乃实际运动与理论运动的契合程度), 构成衡量其性能的核心指标。二者并非孤立存在, 于装配进程经由部件连接、载荷传递形成动态联系: 刚度匮乏会导致装配误差与运行变形的放大, 引致运动精度降低; 而运动精度的欠缺则会加剧部件受力的不均衡以及损耗, 反向削弱系统刚度。对这一相互作用机理展开深度剖析, 于领悟高精度齿轮箱的性能规律、为装配工艺的优化提供指导具备重大理论意义。

2 系统刚度与运动精度的内涵

2.1 系统刚度的定义与构成

系统刚度即齿轮箱于外部载荷施加时对变形予以抵抗的性能, 其数值取决于构成组件的刚度以及装配连接的模式^[1]。其中, 核心组成部分有: 齿轮自身的刚度, 此刚度由材料的强度以及齿形的参数(诸如模数、齿宽)所决定, 齿宽数值越大、材料的弹性模量越高, 则对齿面接触变形的抵抗能力便越强; 轴系的刚度, 它与轴的直径、长度以及支撑的方式存在关联, 轴径增大或者支撑间距缩小, 都能够提升其对弯曲与扭转变形的抵抗能力; 箱体的刚度, 该刚度依赖于结构的形式(像整体铸造、加强筋的布局)以及壁厚, 结构的整体性越强, 就越能够对轴系与齿轮进行稳定支撑, 从而降低装配基准的变形程度。这些部件经由装配所形成的整体刚度, 对齿轮箱在载荷状况下的变形程度起着直接的决定作用。

【作者简介】万力(1981-), 男, 中国江西九江人, 从事高精度齿轮箱装配研究。

2.2 运动精度的衡量指标与意义

齿轮箱传动准确性借由运动精度以具体指标量化。其中涵盖关键要素：传动比误差是实际传动比相较于理论值所呈现之偏差，偏差愈小，速度传递稳定性愈高；转角误差，反映从动轮实际与理论转角间差值，于分度机构等特定场景，微小转角误差或致定位失效；运动平稳性体现于啮合期间振动与冲击程度，平稳性欠佳会加剧部件磨损并放大精度波动^[2]。整机工作质量受运动精度直接作用，例如精密机床进给齿轮箱，若转角误差过大，会致使加工尺寸偏差；机器人关节齿轮箱传动比若不稳定，将降低动作控制精度。

3 系统刚度对运动精度的影响

3.1 抑制变形误差

3.1.1 齿轮与轴的变形控制

当系统呈现刚度匮乏状态时，齿轮于啮合过程中所承受的载荷，会致使齿轮齿面的接触区域出现偏移现象，进而促成局部应力的集聚，使得齿廓发生非均匀性的形变，以此种方式产生传动方面的误差^[3]。轴在扭矩以及径向力的双重作用之下，其产生的弯曲或者扭转变形，会对齿轮的相对位置造成改变（诸如平行轴齿轮的轴线平行度出现偏差这种情形），最终将理想的啮合关系予以破坏。与之相对的是，具备高刚度的系统能够在相当程度上降低此类变形的产生。当齿轮自身具备足够的刚度之时，齿面的接触会呈现出均匀的态势，从而避免了由于局部凹陷而导致的齿形偏差。轴系刚度的提升则能够对轴线位置的稳定性予以维持，减少因挠度而引发的齿轮错位状况，最终实现传动过程中几何误差的降低。

3.1.2 箱体变形的约束作用

轴系与齿轮以箱体作为安装基准。在内部啮合力或外部固定载荷作用下，若箱体刚度匮乏，便会出现变形现象，致使轴承孔位置偏移以及中心距改变。诸如，箱体的局部凹陷有可能致使齿轮副中心距增大，进而引发啮合侧隙的不均匀，最终导致传动冲击。与之相对，具备高刚度的箱体能够维持轴承孔的位置精度，保证齿轮轴线的相对位置契合设计要求，为稳定啮合奠定基础，从装配基准层面削减运动误差的根源。

3.2 减少振动干扰

3.2.1 共振规避

齿轮箱固有频率同系统刚度呈现正向关联性，即刚度的升高会致使固有频率相应提升。共振现象会在外界激励频率（诸如齿轮啮合频率这类）趋近固有频率时被触发，进而引发剧烈振动，对运动平稳性造成破坏。凭借高刚度设计，能够促使固有频率同常见激励频率保持一定距离，防止共振的出现，以此降低振动对齿轮啮合产生的干扰。以高速齿轮箱为例，刚度的增强能够让固有频率脱离啮合频率区间，减小因共振引发的瞬时转速波动以及转角误差。

3.2.2 动态响应抑制

于齿轮箱运作期间，动态载荷如啮合冲击、负载突变

等情形切实存在^[4]。对于这类载荷所引发的冲击，高刚度系统具备更为迅速的抵御能力，进而能够削减部件振动幅度。以齿轮啮合瞬间为例，该瞬间所产生的冲击力作用于低刚度轴，致使其出现显著震颤，最终使得齿面接触于短暂时间内偏离理想位置。与之形成鲜明对比的是，高刚度轴系能够以快速的态势吸收冲击能量，将振动幅度限制在极小范围之内，从而确保了啮合过程的连续性与稳定性，动态误差也由此得以降低。

3.3 维持传动稳定性

3.3.1 齿面接触状态稳定

系统具备高刚度特性，可保障齿轮于不同载荷条件下，齿面接触处于稳定状态。在重载工况这一特定情形之中，倘若刚度呈现不足态势，齿面极有可能出现边缘接触现象，进而致使局部磨损程度加剧，最终导致齿形精度发生改变。与之相对，当刚度处于充足水平时，齿面接触区域不仅分布均匀，且位置稳定，能够在长时间内维持设计所规定的齿廓形态，实现传动比的一致性，有效降低因接触状态变动而引发的精度波动情况。

3.3.2 传动比波动的抑制

传动比的波动，其根源可追溯至齿轮、轴以及箱体所产生的变形。以轴的扭转变形为例，此变形会致使输入与输出转速间的比例关系背离理论数值。高系统刚度能够将这类变形限制在极小的范围之内，从而实现传动比的稳定状态。于精密分度传动领域而言，稳定性的重要程度不言而喻。即便存在细微的装配误差，凭借高刚度，亦能够降低误差在传动链当中的累积，进而维持输出转角与输入之间严格的比例关系。

4 运动精度对系统刚度的反馈作用

4.1 改变系统受力状态

4.1.1 附加力的产生

由运动精度欠缺所引致的附加力，呈现出多源性与复杂性之特质。针对齿轮，若存在齿距累积误差情形，于啮合进程中，会涌现周期性的‘齿面撞击’状况。此撞击力将沿齿宽方向予以传递，进而致使齿轮产生瞬时倾斜。在斜齿轮传动领域，这般倾斜可转化为轴向力，使轴系的轴向窜动得以加剧。多级齿轮传动场景下，前一级传动误差会为后一级放大，进而生成连锁反应式附加力，使得末级输出端的受力波动更显突出。转角误差所引发的相位偏差，可致使齿轮啮合重合度发生改变。当重合度降低时，单对齿所承受载荷会瞬间增大，从而产生冲击性附加力。该力不仅作用于齿面，而且会借助轴传递至轴承座，令箱体承受额外振动载荷。经长期作用，或会致使箱体固定螺栓出现松动，对系统受力平衡造成进一步破坏。

4.1.2 载荷分布的不均化

因运动精度之缺陷致使的载荷分布非均匀性，展现出显著的局部化特性。齿向偏差致使齿面接触区域朝齿轮一端偏移，偏移量的增大与局部载荷集中现象的严重程度呈正相

关。高速运转状态下,伴随齿轮旋转,此类集中载荷生成周期性应力脉冲,进而导致齿根部位出现疲劳损伤。

轴承受力方向的改变源于轴系平行度误差,致使轴承内外圈接触角偏离,部分滚动体承受的载荷显著上扬,其他滚动体或处轻载、空载之态。此不平衡引发轴承滚道的不均匀磨损,凹坑或台阶的形成,进而加剧载荷分布失衡。箱体变形对该不均性具有放大作用,箱体因刚度不足而扭曲时,轴系安装基准偏移,齿轮啮合中心距呈现周期性变动,使得载荷在齿面分布上出现动态波动。

4.2 加剧部件损耗与刚度衰减

4.2.1 齿轮磨损的刚度影响

齿轮磨损由运动精度欠佳引发,呈现显著方向性与阶段性特征。初始阶段,齿面接触欠佳致使局部区域磨损加速,形成微小凹痕。这些凹痕改变齿面接触轨迹,使后续啮合应力分布更趋不均。运行时间增长下,凹痕逐步扩展并相连,沿齿向或齿廓方向形成磨损带。针对硬齿面齿轮,磨损带边缘产生微小剥落现象。剥落颗粒作为磨料,加剧齿面磨损,形成恶性循环。齿厚均匀性遭破坏后,齿轮传递扭矩时产生附加弯曲力矩,致使轮齿弹性变形呈现不对称性,即同一齿轮正反转时刚度存在差异。此刚度不对称进一步增大传动误差,加剧齿轮箱输出运动的不平稳性。

4.2.2 轴与轴承的累积变形

轴于运动精度匮乏之工况下,会产生复合变形。齿轮因安装误差致使偏载出现时,扭矩与弯矩会被轴同时承受,形成弯扭组合变形。轴之支撑部位变形最为显著,轴颈与轴承内圈配合间隙之变化会被引发,致使轴承预紧力丧失。高速旋转时,轴之挠曲会引发离心力,轴之弯曲变形会进一步增大,“变形-离心力-更大变形”的累积效应得以形成。在该工况下,轴承磨损呈现多部位特性:轴的挠曲致使内圈发生椭圆化变形,而箱体支撑刚度的欠缺导致外圈出现局部凹陷,滚动体与滚道间接触应力分布趋于极不平衡状态。滚动体于经过应力集中区域时,微小塑性变形会得以产生,这些变形经逐步累积,致使轴承游隙增大。增大的游隙会对轴的径向跳动予以加剧,轴系刚度进而被降低,最终致使齿轮箱运动精度步入加速下降阶段。

4.3 推动系统刚度需求的调整

4.3.1 精度要求提升促使刚度优化

在系统刚度方面,因不同应用场景于运动精度的要求而呈现差异化需求。精密坐标镗床的进给系统,纳米级定位

精度的实现,促使齿轮箱轴系需具备极高扭转刚度,用以保障指令脉冲和实际位移严格对应。轴材料的选择不仅关乎强度,其弹性模量的稳定性亦不容忽视。轴直径的设计,在满足轻量化前提下,也需要确保充足的截面惯性矩。

在航天范畴内的姿态控制系统里,齿轮箱对于角位置精度,其要求为达到秒级。此情形下,箱体需具备极高的整体刚度属性。该刚度的作用在于抗衡航天器发射阶段所承受的冲击载荷,以及在轨运行期间遭遇的温度变化影响。箱体结构应选取整体锻造工艺,以此实现减少装配环节致使的刚度损失之目的。与此同时,借助有限元分析手段,对箱体的筋板布局实施优化处理。使刚度分布与载荷分布实现匹配状态,防止因局部刚度不足而成为精度方面的短板。

4.3.2 系统刚度与运动精度的动态交互

在高精度齿轮箱实际运转进程之中,系统刚度以及运动精度,并非维系于静态的关联态势,相反,呈现出动态交互的复杂样态。针对齿轮箱启动或者负载出现突变这种情形,系统刚度必须即时抵御冲击性载荷,以确保运动精度不致发生急剧的劣化现象。就像在工业机器人高速启停的工况之下,倘若齿轮箱系统刚度能够做出迅速响应,对部件的瞬间变形加以限制,那么便可以将运动精度维持在合理范畴之内,从而保障机器人末端执行器动作的精确性。与之相对,一旦刚度响应有所滞后,运动精度将会首当其冲遭受冲击,致使部件产生异常磨损与变形状况,在后续的运行过程当中,进而持续对系统刚度造成削弱。

5 结语

在外界因素影响以及系统刚度与运动精度动态交互方面,协同优化重要性经凸显。借助材料、结构及工艺综合改进之方式,二者良性循环能够实现,该举措为高精度齿轮箱在高端装备中的稳定应用奠定了坚实基础,并且有力地推动了精密制造领域的持续发展。

参考文献

- [1] 吴宗,李万里.微小型精密齿轮减速箱自动化装配技术研究[J].中国科技期刊数据库 工业A,2024(11):054-057.
- [2] 陈沪,陈永光.一种新型压缩机高精度摆线转子齿轮油泵装配结构简介[J].石油化工设备,2021,50(4):83-85.
- [3] 张皓.某大型风电齿轮箱弹性销轴的过盈装配[J].机械工程与自动化,2013(3):97-98+101.
- [4] 王辉,潘忠,夏峰.炼铁高炉水冷齿轮箱常见机械故障及维护[J].中文科技期刊数据库(全文版)工程技术,2023(3):4-7.