

# 某轴毂复合联接结构优化设计及有限元分析研究

徐志阳

中国长峰机电技术研究设计院 北京 100089

**摘要:** 在典型的连接螺旋桨毂中, 蜗壳样条线被广泛应用。螺旋桨作为飞机、船舶的主要驱动装置, 承载着巨大振动、冲击, 同时对其可靠性要求甚高。而传统的单螺栓花键连接难以满足更高的螺旋桨毂连接要求。因此, 为了满足航空、船舶等领域对螺旋桨毂联接器的高强度及高可靠性要求, 设计一种低重量、高可靠性、较好维修性的新型复合轮毂联接器的需求尤为迫切。这种新型复合轮毂耦合装置在飞机或船舶螺旋桨耦合装置中得到广泛应用, 但其未标准化、系列化。根据实际情况, 本文通过系列化思路进行螺旋桨毂耦合设计, 形成复合螺旋桨毂耦合的合理、高效产品设计系统。本文主要阐述螺旋桨毂复合接头设计的有限元分析及优化。

**关键词:** 螺旋桨毂; 复合联结; 胀紧套; 轴毂

## Optimization design and finite element analysis of a shaft hub composite connection structure

Zhiyang Xu

China Changfeng electromechanical technology research and Design Institute, Haidian District, Beijing 100089

**Abstract:** Spiral case splines are widely used in typical connecting propeller hubs. As the main driving device of aircraft and ships, the propeller carries great vibration and impact and has high-reliability requirements. However, the traditional single bolt spline connection is difficult to meet the higher requirements of a propeller hub connection. Therefore, in order to meet the high strength and high-reliability requirements of propeller hub coupling in aviation, marine, and other fields, it is particularly urgent to design a new composite hub coupling with low weight, high reliability, and good maintainability. This new type of composite hub coupling device has been widely used in aircraft or ship propeller coupling devices, but it is not standardized and serialized. According to the actual situation, this paper carries on the propeller hub coupling design through the serialization idea and forms a reasonable and efficient product design system of composite propeller hub coupling. This paper mainly describes the finite element analysis and optimization of the composite joint design of the propeller hub.

**Keywords:** propeller hub; Compound connection; Expansion sleeve; Shaft hub

### 引言:

船舶能否正常运行, 推进系统起着决定性作用。结构是否稳定、性能是否可靠, 对船舶正常工作至关重要。划桨是船舶推进系统的重要组成部分, 通过划桨与水的相互作用产生船舶源源不断的驱动力。螺旋桨毂连接结构是连接螺旋桨和传动系的重要结构, 其作用为传递运动和扭矩。故螺旋桨毂的结构强度是船舶的运行质量及可靠性的直接决定因素。传统的复合螺旋桨轮毂连接通常使用反卷积样条连接, 优缺点并存。一方面, 反卷积样条连接结构简单, 避免了冲击载荷。但另一方面, 反卷积样条连接容易发生疲劳磨损甚至断裂, 使用寿命较

低, 质量可靠性不高。本文在传统反卷积样条连接的基础上, 设计了船舶推进系统螺旋桨毂连接复合结构的样条曲线与锥形胀套共同作用的联合模式。介绍了复合结构并通过有限元分析研究了其刚度和强度。

### 1、船舶螺旋桨轴毂复合联结结构的研究现状

轮毂的复合连接设计在机械传动装置中应用广泛。连接轮毂轴的方法较多, 通常分为: 1) 轴键槽连接。传动轴上有一个带中心线穿过车轴的销孔, 有两种通孔和盲孔。2) 键连接。可分为平键、花键、半圆扳手、切向扳手等。3) 延伸连接。分为衬套锥形连接、液压延伸衬套连接、公差环连接等。以上轴轮毂连接方法在实用工

程应用中各有优缺点。键连接传输模式结构简单, 组装和拆卸容易, 但不能实现轴向定位。花键的齿表面是根据渐开线设计的, 因此压力均匀, 不会产生应力浓度不均。但花键的性能在暴露于大振动和冲击负荷时不稳定。传统的螺旋桨轮毂连接设计采用单一结构连接模式, 但对复合轮毂连接模式的研究很少。在此工作中, 结合伸缩缝的刚度和强度优势, 充分利用螺杆槽单元连接结构压力的均匀性, 开发了一种新型海上螺旋桨毂的复合连接结构, 并对其特性进行了分析和优化。

## 2、轴毂复合联接器的系列化设计

### 2.1 系列化设计的意义

通过复合反卷样条圆锥曲面对连接的结构产品的系列化, 提高了零部件的泛化程度, 合理简化产品的类型和规格。同时通过多种手段不断提高生产工艺水平, 改善产品质量及互换性, 降低成本, 使其广泛应用于更多场合, 实现批量化生产。序列化基本上基于优先数原则, 在相同的基本结构中处理多个次要尺寸的产品, 以形成不同的系列。而优先级和优先级编号系统是序列化研究方法中的一个科学的数值系统, 可以防止数值传播中的扰动。在脚底-轴向复合离合器的结构设计中有多尺寸, 相互影响、彼此相关。因此对互换性、可用性和匹配性有重大影响的参数作为优先编号, 如允许扭矩等。同时尽可能选择其他脚底-轴复合离合器参数作为优先计数系统。总的来说, R5和R10系列是机械产品选择的主要参数, R20系列是普通零件和工具选取的一般型材的尺寸。为了确保在选择系列时分类不会太稀疏, 主要选择参数为R10系列。

### 2.2 系列化轴毂复合联接器结构参数设置

1) 选择诺达尔复合联接器的主要参数和基本参数。将输入轴的扭矩作为一系列诺达尔复合联接器的主要参数。基本参数的选择可以反映复合轮毂联接器的基本工作和基本结构参数, 因此, 主要参数为槽模块M、齿数Z和工作齿的长度L、轴孔的内径d1和z2以及膨胀离合器的内径D1和外径D2。2) 确定诺达尔耦合主要参数的基本参数及上限和下限: 基本类型的允许扭矩为2500N·m, 其他类型结构的允许扭矩基于一系列机械耦合的国家标准GB/T3507-1983额定扭矩的原理。其中, 这两个标准的系列选择为20000N·m的上限和100N·m的下限。基本参数: 皮带的模块M、齿Z的数量和工作齿的长度L、轴孔z2的膨胀衬套的内径d1和膨胀离合器内径D1、外径D2等基本参数是在上述子部分的设计中参数化的, 因此从计算的参数化结果中得出上限和下限。

## 3、常用的具体装配方法

### 3.1 压入法

如果剩余量不大, 通常采用常温直接压制的方法。压制过程很简单, 但在组装过程中, 接头会刮伤或变平, 进而减少了接头的干扰和强度。

### 3.2 温差法

如果过盈配合时, 经常使用温差的方法。温差的方法可分为红色匹配的方法和冷收缩的方法。

红色匹配方法。其利用随着加热膨胀、遇冷收缩的金属材料的物理特性。如果孔和轴之间有轻微的干涉, 孔会加热膨胀, 然后轴衬套会插入延伸的孔中。自然冷却后, 轴和孔形成可以传递轴力、扭矩或两者的组合。红色匹配方法的优点是设计简单, 能承受比压力机安装方法更大的轴力和扭矩, 因此被广泛使用。对于复杂设计的重型、大型零件或大型工件, 也可以采用红色匹配法来解决大规模工艺设备不足带来的复杂性。将过热的气缸油倒入符合红色套筒零件尺寸的容器中, 加热到所需温度, 保持一段时间的温度, 就可以拆下零件, 安装轴衬套。因为均匀加热, 内部应力小, 没有变形或变形很少, 表面没有氧化物, 可以整体加热零件, 故这种加热方法应用广泛。红色匹配方法依赖于轴与扭矩传递孔之间的摩擦, 摩擦力与管接头干涉有关。如果干涉太小, 孔和轴会随着扭矩的传递而减弱。干涉越多, 摩擦越大。但是, 如果干涉太高, 孔洞附近就会出现过大的应力, 从而增加塑性变形。因此, 实际干涉不会太多。

冷缩装配方法。冷收缩部件将零件低温冷却, 而后放入包含的零件中, 在室温下膨胀, 然后结合在一起。冷缩装配具有操作简便、高性能特点, 与高温膨胀方法相比, 具有收缩变形小、内应力小、表面杂质和接头少等特点。因此, 冷缩装配不仅适用于精密轴承、中小型薄壁衬套, 而且适用于金属和非金属物体之间的紧密连接。工件用冷收缩组装时, 可以根据材料和干涉选择适当的制冷剂。干冰制冷剂可用于具有过渡版型或小过拟合的中小连接部件, 冷却温度可达到-78℃。氮气制冷剂(液氮)的冷却温度可达到-195℃。红色匹配法使用材料的热膨胀和冷收缩的物理特性, 因此线性膨胀系数相同。而冷收缩组件的干涉可以从红衬套干涉的经验公式计算出来。组装温差法的连接质量高, 但组装过程很复杂。如果拟合干扰的方法正确可靠, 不仅节省时间和劳动力, 还保证了设备的安全。因此, 过度离合器的组装在机器装配中起着非常重要的作用。

## 4、螺旋桨轴毂复合联结结构的设计及有限元分析

### 4.1 复合轴毂联结结构的设计

在工业领域得到广泛使用且最常见的传输结构为花键。花键连接的优点包括：1) 花键连接的应力均匀，且花键槽与轮毂的牙齿均匀分布，因此表面接触良好。2) 采用样条线的花键，传输齿槽相对较浅，因此齿根的应力集中和切割作用较弱。3) 花键有多个牙齿同时参与工作，因此传输接触区域大，可以承受较重的载荷。4) 云形线花键具有零件的轴向定位功能，零件具有良好的定心功能。5) 花键传动机构的加工精度高，进而提高了轴的传动质量，减少振动。由于花键连接具有上述优点，因此在汽车变速器、船舶螺旋桨毂连接、飞机传动轴等领域广泛应用。在这项研究中，采用了渐开线花键和圆锥形扩张套的轮毂连接方法。锥形扩张套管是一种典型的无钥匙连接结构。这种连接方法具有结构简单、无轴损伤、应力浓度降低和组装简便等优点。扩展套筒连接结构具有良好的互换性，同时能承受冲击负载和骤变负载。锥面胀紧套在传动轴中应用广泛，其优点主要有：1) 抗冲击、抗振性能好，能承受较大的轴向及径向振动。同时，锥面扩展接触联轴器与轴毂可形成过盈配合，利于扭矩传动。2) 螺杆的预紧力为良好互换的锥形膨胀套提供作用力，拆装时只需拧动螺杆即可。当锥形胀紧套开始工作时，由于预紧力缘故，相关的切面之间相互紧密贴合，较难出现锈蚀等故障形式。3) 锥面胀紧套连接机构结构简单，加工精度低，且轴与膨胀套配合精度低，因此成本低廉。故传动机构采用锥面胀紧套，经济性良好。

#### 4.2 轴毂复合联结结构的有限元分析

为了有效评价上述螺杆轴轮毂复合联轴器结构的力学性能，采用有限元分析法分析了该结构的刚度和强度。按照有限元分析的一般步骤，首先将螺旋桨毂复合连接结构划分离散为无数个小单元，以数值方式对每个小单元进行求解处理。本文采用 Ansys 软件完成并解析了螺旋桨轴复合连接器结构的三维建模和单元截面。采用 Ansys 的丝杠轴毂复合联轴器结构功率分析，具体步骤如下：建立轴毂复合联轴器数学模型、定义单元及单元函数、处理传递载荷、建立节点机械平衡力学方程公式、构建边界条件及其求解力，进而分析机构的刚度和强度。

#### 5、结论

基于轮毂接触力学模型，本文用有限元模型模拟了接触过程的力学特性，并分析了干涉、转速和摩擦系数对轮毂接触应力的影响。同时，在干扰力不足的情况下，分析了转速对转子微运动脚底-轴向系统振动特性的影响。得出结论如下：1) 当轮毂处于干涉配合时，轮毂之

间的最大接触应力随转速增加增大。2) 随着轮毂之间干涉在一定范围内的增加，最大接触应力随之线性增加。随着转速的增加，最大接触应力趋于减小，而摩擦系数的变化对接触应力没有明显的影响。3) 如果轮毂之间的干涉出现故障，摩擦将引起轮毂之间明显的速度差异。当转速较低时，位特性出现在时域图中，频率变换和多个频率分量存在于频率谱图中。随着旋转速度的增加，比特周期明显变化，频率谱的不同频率成分被减少到极小水平。在这种情况下，转速的增加将减少轮毂的接触应力。

#### 6、结束语

为船舶前行提供持续动力的螺旋桨毂传动机构，在船舶推进系统中起着至关重要的作用。相较传动机构单一、故障率较高、传动性能不稳定的传统桨毂，本文将锥形胀套与渐开线花键传动机构有机结合，创建了一种新型桨毂复合连接结构。通过有限元模拟分析证明该复合连接结构抗振动及抗冲击性能优越，力学传递稳定，具有重要的理论和实践意义，为后续的传动机构选用提供了借鉴意义。

#### 参考文献：

- [1] 蓝少雄. 船舶螺旋桨防水草缠绕装置[J]. 江苏船舶, 1988 (2): 47-49.
- [2] 于安斌, 叶金铭, 丁江明. 加工误差对螺旋桨轴承载力影响的初步研究[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版), 2016, 40 (5): 895-900.
- [3] 童宗鹏, 周文建, 王国治, 等. 船舶传动系统结构振动控制技术[J]. 噪声与振动控制, 2009, 29 (6): 136-139.
- [4] 孙骅, 李文静. 螺旋桨轴毂复合联接结构接触问题的非线性有限元分析及结构尺寸优化[J]. 机械传动, 2012, 36 (3): 74-77.
- [5] 王志坚, 龚小平, 仝崇楼. 轴毂固定联接结构的一种创新设计[J]. 机械设计, 2005, 22 (5): 54-56.
- [6] 全国机器轴与附件标准化技术委员会. GB/T17855-1999 花键承载能力计算方法[S]. 北京: 中国标准出版社, 2000: 1-15.
- [7] 张燕, 谭建荣, 范文惠, 等. 合理化工程中机械产品的标准化设计和变形设计[M]. 北京: 机械工业出版社, 2009: 62-128.
- [8] 陈醇滔. 零部件参数化设计方法研究与系统实现[D]. 南京: 南京理工大学, 2004: 26-68.