

# 基于ABAQUS的十字轴式万向联轴器有限元分析

袁崇越

上海理工大学机械工程学院, 上海

收稿日期: 2024年1月12日; 录用日期: 2024年3月18日; 发布日期: 2024年3月26日

## 摘要

通过Catia软件建立十字轴式万向联轴器三维模型, 基于Abaqus有限元分析法, 研究万向联轴器的振动特性。通过模态分析, 求解得到万向联轴器前六阶固有频率以及振型, 与稳定运行的电动机转动频率相比较, 可知该万向联轴器并不会发生共振现象。通过静力学分析, 求解得到十字轴式万向联轴器及十字轴、叉头的最大应力值与最大位移值, 通过计算十字轴与叉头的许用应力值, 与最大应力值进行比较, 可知该万向联轴器满足使用强度要求。通过本文分析, 可为解决万向联轴器在传递动力过程中出现由共振现象所造成的传动误差等问题提供新的思路。

## 关键词

Abaqus, 十字轴式万向联轴器, 有限元分析

# Finite Element Analysis of Cross Shaft Universal Coupling Based on ABAQUS

Chongyue Yuan

School of Mechanical Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai

Received: Jan. 12<sup>th</sup>, 2024; accepted: Mar. 18<sup>th</sup>, 2024; published: Mar. 26<sup>th</sup>, 2024

## Abstract

The three-dimensional model of the cross-shaft universal coupling is established by Catia software, and the vibration characteristics of the universal coupling are investigated based on Abaqus finite element analysis method. Through modal analysis, the first six orders of solid frequency and vibration pattern of the universal coupling are obtained, and compared with the rotation frequency

of the motor in stable operation, it is found that the universal coupling does not have resonance phenomenon. Through the static analysis, the maximum stress value and the maximum displacement value of the cross shaft type universal coupling and the cross shaft and fork head are obtained. By calculating the permissible stress value of the cross shaft and fork head and comparing it with the maximum stress value, the universal coupling meets the use of strength requirements. Through the analysis of this paper, it can provide new ideas for solving the problem of transmission error caused by resonance phenomenon in the process of transmitting power of universal coupling.

## Keywords

Abaqus, Cross Shaft Universal Couplings, Finite Element Analysis

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

万向联轴器，也叫做万向节，是机械传动中一种重要的连接元件，可以解决不同方向传力和传动角度的问题。万向联轴器利用其机构的特点，可使得两轴线存在一定夹角的情况下实现所连接的两轴连续回转，并可靠地传递转矩和功率[1] [2]，可连接两个不在同一直线上，或轴线方向角度大于  $90^\circ$  的轴。它具有比较结构简单，转矩大，效率高，应用广泛，传动精度相对较高，使用时间长，成本低等特点[3] [4]。万向联轴器根据结构的不同，可分为球笼式、三叉杆式、十字轴式等，其中十字轴式万向联轴器具有传动效率高，角向补偿能力较大以及传动平稳等特点，可广泛应用于汽车、机床、飞机、船舶、工程机械等传动装置中。

刘盛娟[5]利用有限元分析方法，对万向联轴器进行模态分析以及强度分析，并对十字轴的摩擦磨损进行了研究，发现接触力受运动副间隙的影响很大，间隙越大，系统失效风险越大。孙新东[6]对十字轴式万向联轴器关键部件十字轴和万向节叉头进行了静态强度分析，在其强度分析结果的基础上对十字轴和万向节叉头进行拓扑优化分析并对其结构进行修正，最后对不同材料的拓扑优化后的十字轴与万向节叉头零件疲劳寿命进行对比，发现使用合金钢材料可大幅提高十字轴的使用寿命。张宏梅[7]以 150 轨钢机上无螺栓十字轴万向联轴器叉头为例，建立了叉头的三维有限元分析模型，并运用 Cosmosm 程序进行静力学分析，找出了叉头的应力集中区和最大应力值，分析了叉头发生破坏的原因，提出了叉头结构设计时可采取的措施。

## 2. 有限元模型的建立

### 2.1. 建立三维模型

在对十字轴式万向联轴器进行振动特性分析时，首先要建立万向联轴器的三维模型。本文采用 Catia 进行三维建模。Catia 具有强大的三维建模功能，提供了广泛的工具和功能，提供了多种建模技术，尤其具有突出的曲面建模能力，能够创建几乎任何形状模型，广泛应用于航空航天、汽车、工业设计、制造业等领域。为了提高有限元分析的计算效率，本文所使用的联轴器三维模型作了一定简化处理。三维模型见图 1。

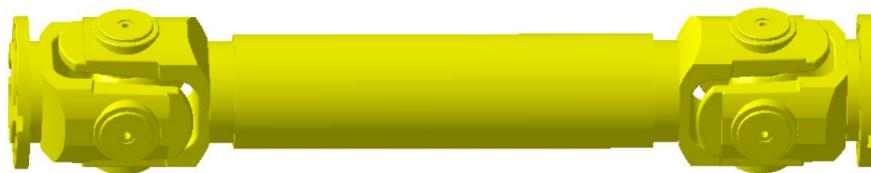


Figure 1. Cross shaft universal coupling model

图 1. 十字轴式万向联轴器模型图

## 2.2. 设置材料属性及网格划分

在 Abaqus 中设置材料属性, 十字轴和中间轴材料为 45 号钢, 叉头材料为 35CrMo, 滚动轴承材料为 GCr15。十字轴式万向联轴器各部件材料属性如表 1 所示。

Table 1. Cross shaft universal coupling component material properties

表 1. 十字轴式万向联轴器部件材料属性

零部件	材料	密度(kg/m <sup>3</sup> )	弹性模量(Mpa)	泊松比
十字轴	45	7850	$2.10 \times 10^5$	0.3
叉头	35CrMo	7850	$2.06 \times 10^5$	0.3
中间轴	45	7850	$2.10 \times 10^5$	0.3
滚动轴承	GCr15	7810	$2.08 \times 10^5$	0.3

使用 Abaqus 中自动划分网格功能, 设置该十字轴式万向联轴器网格为四面体网格, 单元格类型为 C3D10。有限元模型及网格模型如图 2, 图 3 所示。



Figure 2. Cross shaft universal coupling finite element model

图 2. 十字轴式万向联轴器有限元模型图



Figure 3. Cross shaft universal coupling mesh model

图 3. 十字轴式万向联轴器网格模型图

## 3. 十字轴式万向联轴器模态分析

模态分析用于研究物体结构在自由振动时的振动特性, 评估和预测结构的固有频率、模态形态和振动模式, 以及结构的响应和稳定性。在模态分析中, 首先需要获取结构的有限元模型, 并确定结构的材

料特性和边界条件。然后，通过求解结构的特征值问题，计算出结构的固有频率和对应的模态形态。固有频率表示结构在自由振动时的振动频率，而模态形态描述了结构在不同振动模式下的振动形态。

本文中，对万向联轴器进行模态分析，求解计算得到十字轴式万向联轴器的固有频率以及模态形态，避免万向联轴器工作时各部件发生共振。

### 3.1. 模态分析理论基础

模态分析动力学微分方程为：

$$[M]\{\ddot{X}\} + [C]\{\dot{X}\} + [K]\{X\} = \{F(t)\} \quad (1)$$

式中  $[M]$ ， $[C]$ ， $[K]$ -系统总体质量矩阵、阻尼矩阵和刚度矩阵；

$\{\ddot{X}\}$ ， $\{\dot{X}\}$ ， $\{X\}$ -系统中节点的加速度向量、速度向量和位移向量；  
 $\{F(t)\}$ -激励向量。

结构系统在受到外力产生运动时，会按照某一特定频率发生自然振动，这个特定的频率称为固有频率。

对于无阻尼单自由度系统，固有频率计算如式 2 所示：

$$f_n = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (2)$$

单位为 Hz，表示在 1 s 内发生自然振动次数。也可以角频率来表示结构的固有频率。如式 3 所示：

$$w_n = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (3)$$

上述计算得到的均为无阻尼固有频率，单在一般结构中，固有频率均为有阻尼固有频率，因此，有阻尼固有频率与无阻尼固有频率关系如式 4 所示：

$$w_d = w_n \sqrt{1 - \xi^2} \quad (4)$$

式中  $w_d$ -有阻尼固有频率， $w_n$ -无阻尼固有频率， $\xi$ -阻尼比。

### 3.2. 十字轴式万向联轴器模态分析结果

Abaqus 中进行模态分析，需要通过设置“频率”分析步来实现。同时设置边界条件，对万向联轴器一端施加对称、反对称、固定约束，另一端施加位移转角约束，对其他各部件进行绑定。最后提交求解。

通过模态分析得出十字轴万向联轴器前六阶固有频率见表 2，振型变化如图 4 所示。

Table 2. First six orders of intrinsic frequency

表 2. 前六阶固有频率

模态阶数	频率/Hz	振型描述
1	61.076	一端发生位移
2	63.367	一端发生较大位移
3	390.65	两端发生扭曲
4	421.25	两端同时发生扭曲和位移
5	461.97	一端发生膨胀
6	843.94	两端同时发生较大扭曲

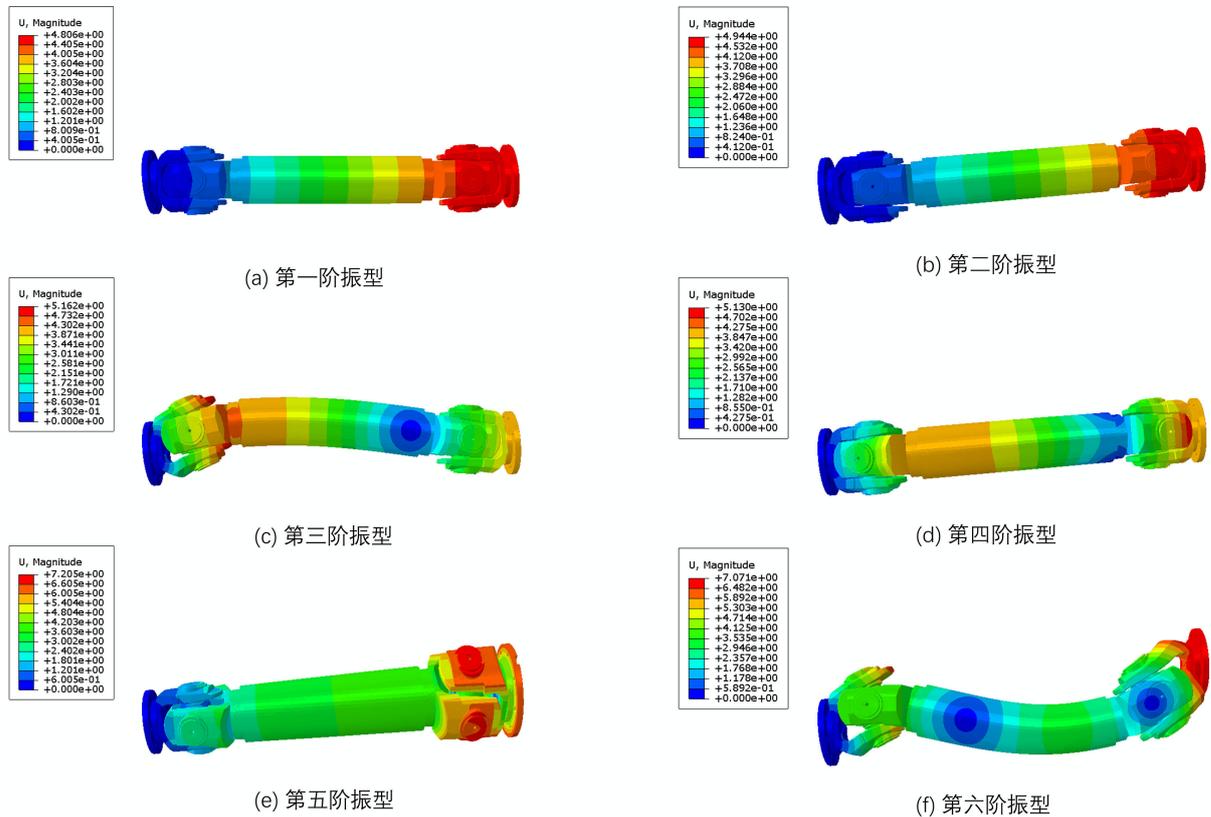


Figure 4. First six orders of vibration pattern  
图 4. 前六阶振型图

分析结果表明, 十字轴式万向联轴器最低固有频率为 61.076 Hz, 通常万向联轴器两端与输入轴、输出轴相连。输入轴动力由电动机提供, 通常电机稳定运行时, 额定转速为 1500 r/min, 经过多级减速后, 电机转速一般在 50~200 r/min 间, 对应的转动频率为 0.83~3.33 Hz [8], 远小于十字轴式万向联轴器的最低固有频率, 当输入端电机的转动频率小于联轴器最低固有频率, 不会发生共振现象。

模态分析的结果对结构设计和分析非常有价值。通过分析结构的固有频率, 可以避免设计与系统固有频率相近的激励频率, 从而避免共振现象。此外, 模态分析还可以评估结构的稳定性和振动模式的分布, 为结构的优化和改进提供指导。

在实际应用中, 模态分析通常与其他分析方法结合使用, 例如静力学分析、动力学分析和疲劳分析, 以全面评估结构的振动特性和性能。它在航空航天、汽车、建筑、机械等领域都有广泛的应用。

#### 4. 十字轴式万向联轴器静力学分析

由于十字轴式万向联轴器在传递动力时, 输入轴与电机相连, 万向联轴器输入端承受一定的扭矩, 因此需要静力学分析, 预测万向联轴器在正常工作时不发生大变形且不会因扭矩过大而被破坏。

##### 4.1. 静力学分析理论基础

在机构运动时, 广义的动力学公式如式 1, 但在进行静力学分析时, 机构的运动速度为 0, 因此式 1 可转换为式 5。

$$[K][X]=[F] \quad (5)$$

## 4.2. 十字轴式万向联轴器静力学分析结果

在实际工作中, 万向联轴器传递动力的过程中, 各个部件均承受一定的外力, 因此有必要对整个万向联轴器进行整体有限元分析, 使其符合实际工作环境, 这样有限元分析计算得到的受力情况比对单个部件进行受力分析更为准确。

根据实际工况, 假设联轴器一端固定, 另一端承受扭矩, 大小为  $5 \text{ Kn}\cdot\text{m}$ 。在 Abaqus 中, 对联轴器一端施加对称、反对称、固定约束, 约束其六个自由度, 分别为沿着  $x$ ,  $y$ ,  $z$  方向的移动以及绕着  $x$ ,  $y$ ,  $z$  方向的转动。对输入端施加弯矩, 大小为  $5 \text{ Kn}\cdot\text{m}$ , 方向与输入轴电机转向相同。为了简化计算, 在进行静力学分析时, 可去除滚动轴承。通过设置叉头与十字轴间的接触属性来模拟滚动轴承的作用。

提取万向联轴器最大应力云图及位移云图, 如图 5, 图 6 所示。十字轴、叉头最大应力云图及位移云图, 如图 7 所示。

分析结果表明, 在给定扭矩下, 十字轴万向联轴器最大等效应力值为  $204.5 \text{ Mpa}$ , 最大位移值为  $0.378 \text{ mm}$ 。十字轴最大等效应力值为  $133.5 \text{ Mpa}$ , 最大位移为  $0.342 \text{ mm}$ , 其最大等效应力值出现在十字轴过渡圆角处。叉头最大等效应力值为  $204.5 \text{ Mpa}$ , 最大位移为  $0.378 \text{ mm}$ , 其最大等效应力值出现在叉耳根部。俞翔栋[9]对大扭矩万向联轴器叉头和十字轴结构强度进行仿真分析以及实验验证, 其结果表明, 在额定扭矩以及最大扭矩工况的作用下, 叉头的最大应力值发生在叉耳的根部, 十字轴的最大应力值发生在十字轴轴径的根部, 与本文仿真结果接近, 验证了本文分析结果的准确性。

叉头和十字轴是万向联轴器的关键零部件, 其承载能力主要决定了万向联轴器的转扭能力[9]。其中十字轴在万向联轴器中传动过程中起着至关重要的作用, 因此在分析过程中, 应着重分析十字轴及叉头的应力变化以及位移变化。



Figure 5. Maximum stress clouds for cross shaft universal couplings

图 5. 十字轴式万向联轴器最大应力云图

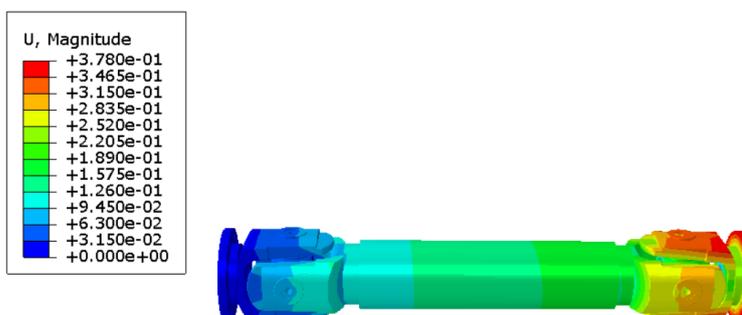
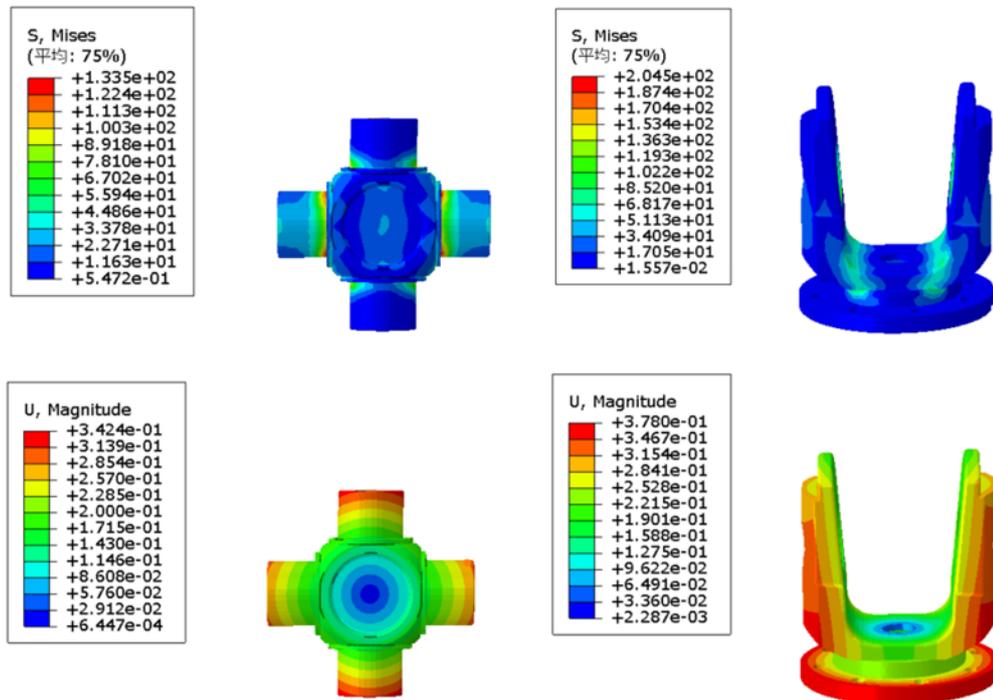


Figure 6. Cross shaft universal coupling maximum displacement clouds

图 6. 十字轴式万向联轴器最大位移云图



**Figure 7.** Maximum stress map and displacement map of cross shaft and fork head  
**图 7.** 十字轴、叉头最大应力云图及位移云图

根据材料力学第四强度理论可知，当材料屈服强度除以材料的安全系数时，得到的数值即为许用应力。本文中十字轴采用的材料为 45 号钢，屈服强度为 355 Mpa，取安全系数为 1.9 时，十字轴的许用应力值为 186.84 Mpa，大于十字轴在给定扭矩下的最大等效应力值。叉头采用的材料为 35CrMo，屈服强度为 835 Mpa，叉头的许用应力值为 439.47 Mpa，大于叉头在给定扭矩下的最大等效应力值。因此该十字轴式万向联轴器满足给定的使用强度要求。

## 5. 结语

由于十字轴式万向联轴器在传递动力时，输入轴与电机相连，万向联轴器输入端承受一定的扭矩，因此需要静力学分析与模态分析，预测万向联轴器在正常工作时不发生大变形且不会因扭矩过大而被破坏。

1) 对实际工况下的万向联轴器进行模态分析，得出前六阶固有频率以及振型，可知万向联轴器的固有频率为 61.076~843.94 Hz，远小于输入轴电机的转动频率，证明万向联轴器在工作时不会产生共振现象。

2) 对实际工况下的万向联轴器进行静力学分析，对联轴器施加扭矩，可知十字轴式万向联轴器最大等效应力值为 204.5 Mpa，十字轴最大等效应力值为 133.5 Mpa，叉头最大等效应力值为 204.5 Mpa，满足使用强度要求。

## 参考文献

- [1] 杨文志, 郭伟超. 十字轴式万向联轴器辊端叉头有限元分析[J]. 机械传动, 2011, 35(2): 52-54.  
<https://doi.org/10.16578/j.issn.1004.2539.2011.02.009>
- [2] Bayrakceken, H., Tascetiren, S. and Yavuz, I. (2007) Two Cases of Failure in the Power Transmission System on Vehicles: A Universal Joint Yoke and a Drive Shaft. *Engineering Failure Analysis*, **14**, 716-724.

---

<https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2006.03.003>

- [3] 高云峰. 理论力学教具 DIY 系列(二)十字轴万向节及转角差异的演示模型[J]. 力学与实践, 2020, 42(4): 475-477.
- [4] 范景峰, 梅二召, 董振波. 汽车传动轴轴颈断裂分析与优化[J]. 机械, 2020, 47(7): 7-14.
- [5] 刘盛娟. 十字轴式万向联轴器的动力学特性仿真分析[D]: [硕士学位论文]. 太原: 太原理工大学, 2016.
- [6] 孙新东. 十字轴式万向联轴器的结构优化和疲劳分析[D]: [硕士学位论文]. 太原: 中北大学, 2018.
- [7] 张宏梅, 黄康. 无螺栓十字轴万向联轴器叉头三维有限元分析[J]. 机械工程师, 2001(6): 28-30.
- [8] 杨佩东. 十字轴式万向联轴器强度与模态分析[J]. 中国重型装备, 2020(4): 40-42.  
<https://doi.org/10.14145/j.cnki.51-1702/th.2020.04.013>
- [9] 俞翔栋, 何柳, 丁蓉, 等. 大转矩万向联轴器叉头和十字轴结构强度仿真分析与验证[J]. 传动技术, 2021, 35(3): 13-17.