

基于 solidworks 数值模拟仿真对 capto 工具系统的可靠性分析

郭翔翔¹, 孙祥龙², 周佼³

1.湖北工业大学工程技术学院, 湖北 武汉 430000

2.常州西夏墅工具产业创业服务中心, 江苏 常州 213000

3.江苏海博工具产业研究院有限公司, 江苏 常州 213000

DOI: 10.61369/SSSD.2025020039

摘 要 : 高速刀柄主轴与先进 Capto 工装系统的连接可靠性的重要性毋庸置疑, 刀柄主轴与工装系统的连接可靠与否直接决定整个工装系统能否在高速运转下精度、稳定地发挥作用, 甚至直接影响加工的质量和效率等各项指标。针对高速刀柄主轴连接的探讨, 本文采用非线性接触分析方法来进行详细的数值分析, 以 solidworks 软件为基础先进行高速刀柄和主轴模型的建立, 然后在 solidworks simulation 平台进行有限元分析, 通过设置不同转速下位移和应力的变化及不同夹紧力下位移和应力的变化进行对比分析其可靠性。

关 键 词 : 可靠性; 高速运转; 转速; 夹紧力; 位移; 应力

Based on Solidworks Numerical Simulation to Analyze the Reliability of Capto Tool System

Guo Xiangxiang¹, Sun Xianglong², Zhou Jiao³

1.Hubei University of Technology Engineering Technology College, Wuhan, Hubei 430000

2.Changzhou Xix Village Tool Industry Entrepreneurship Service Center, Changzhou, Jiangsu 213000

3.Jiangsu Haibo Tool Industry Research Institute Co., Ltd., Changzhou, Jiangsu 213000

Abstract : The importance of the connection reliability between the high-speed tool holder spindle and the advanced Capto tooling system is beyond doubt. Whether connection between the tool holder spindle and the tooling system is reliable or not directly determines whether the entire tooling system can play its role accurately and stably under high-speed, and even directly affects the quality and efficiency of processing and other indicators. In view of the discussion on the connection of high-speed tool holder spindles, this paper adopts contact analysis method for detailed numerical analysis. Based on the solidworks software, the model of high-speed tool holder and spindle is established first, and then the finite element is carried out on the solidworks simulation platform. Through the setting of different speeds and different clamping forces, the reliability is compared and analyzed by changing the displacement and stress.

Keywords : reliability; high-speed operation; rotational speed; clamping force; displacement; stress

一、Capto 工具系统的构成

Capto 工具系是一个高性能的高速处理工具, 已经广泛地运用在现代工业中。2008 年 Capto 刀柄已经被整合到 ISO 刀柄系统中。Capto 工具系统有刀具、刀柄、附件等主要组成部分, 如图 1 所示。整个组成部分的精心设计得以保障整体的有效性与可靠性。

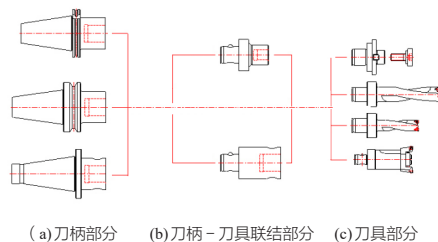


图 1 工具系统的组成

(一) 刀柄

刀柄作为刀具与机床主轴连接的部件, 也是需要注意设计的一部分。Capto 刀柄采用锥面连接式, 不仅连接刚度大, 在高速回转时稳定性也较好。Capto 刀柄的结构, 如图 2 所示。从图 2 可知, Capto 刀柄为锥形三棱体, 边部呈圆弧面, 锥度为 1:20。这种中空、短锥的结构形式使得锥面同时与端部定位。平衡孔在 Capto 刀柄高速旋转中起到动平衡作用。锥形表面的紧密配合使振动和松动减少, 从而延长刀具寿命, 提高加工可靠性。Capto 刀柄实现了快速换刀, 大大的缩短了换刀时间, 提高了生产效率。

(二) 刀具

在 Capto 工具系统里, 刀具是进行切削加工的直接工具。刀具一般用高硬度材质制成, 以便满足高速切削时的耐用性、耐磨性等要求, 例如硬质合金或陶瓷等材质制成。刀具的设计充分考

虑了切削力、热变形、排屑等因素，以此实现最佳的切削效果、提升加工精度。Capto系列刀具具有7类，分别为C3、C4、C5、C6、C8、C8x、C100。Capto C6的范围最大，在该系列中，其各种刀柄设计适配度广，无论是初级的制造还是高级的制造，均能获得最恰当的性能，本文进行有限元分析模型的建立是以 Capto C6具体尺寸建模的。

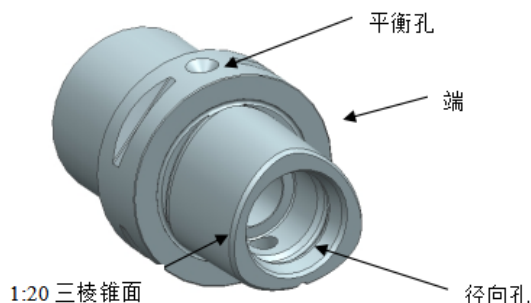


图2 Capto接口结构简图

二、Capto 工具系统结构特点及工作原理

Capto刀柄最主要的设计特点是三弧段等间距面横截面，该三弧段锥形圆的特殊设计，在2个方向上均可无滑移地传递扭矩。

Capto工具系统如图4所示，工作原理：由锥面摩擦完成刀具的夹紧和放松；在夹紧状态时，主轴内部的拉杆通过挤压刀柄尾部，使刀柄的锥面与主轴的锥孔面紧贴，形成传递扭矩的作用。此种夹紧方式简单且可靠，同时可以在短时间内完成刀具的拆装工作，可大大提高生产效率。

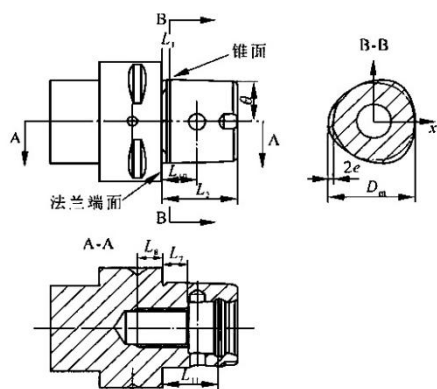


图4 Capto刀柄夹紧系统

三、基于有限元的可靠性分析

（一）模型参数的确定

以国标 GB/T 32577-2016规定的刀柄参数模型建立分析所需要的几何模型，国标 GB/T 32577-2016中对多棱锥接口柄带法兰接触面系列规定了用于自动和手动改变工具的车床、钻床、铣床、车铣中心和磨床，带凹槽的法兰区域允许自动切割，用可膨胀的扇形部分将刀柄紧固到孔的圆柱部分，或用中心螺钉锁定其

中的螺丝。

通过使用锁定器（多棱锥），我们能够进行扭矩的传输。刀柄相关主要参数见表1，表中未列出的参数可参见国标 GB/T 32577-2016，为节省篇幅，这里不再重复列出。

表1 多棱锥柄主要尺寸表

单位：mm

类别	数值					
公称尺寸	32	40	50	63	80	80×
$b_1 \pm 0.1$	39	46	59.3	70.7	86	110
b_2	28.3	35.3	44.4	55.8	71.1	88.7
$b_2 \pm 0.1$	27.9	34.9	44	55.4	70.7	88.3
$d_1 \pm 0.1$	32	40	50	63	80	100
d_4	M12 × 1.5	M14 × 1.5	M16 × 1.5	M20 × 2	M20 × 2	M20 × 2

各种尺寸的锥形部件以及安装孔的承载能力差异可能导致在法兰连接表面产生的压缩力发生变化。这个因素对于多边形圆柱体连接的硬度产生了重大的作用。需要保证表2所列的压缩力至少能够影响到法兰的端部，本文模型尺寸选的第一组。

表2 不同尺寸夹紧力范围

类别	分类情况					
公称尺寸 /mm	32	40	50	63	80	80+
夹紧力 /kN	15	20	25	30	40	40

（二）Capto刀柄主轴连接可靠性数值模拟

高速刀柄主轴与先进 Capto工装系统的连接可靠性的重要性毋庸置疑。刀柄主轴与工装系统的连接可靠与否直接决定整个工装系统能否在高速运转下精度、稳定地发挥作用，甚至直接影响加工的质量和效率等各项指标。

在本文的模拟过程中，对于材料力学性质的处理，考虑其是各向同性材料在弹性范围内的分析，所以其物理关系是基本的广义胡克定律关系，即

$$\sigma_{ij} = \lambda \delta_{ij} \varepsilon_{kk} + 2\mu \varepsilon_{ij} \quad (1)$$

其中 σ_{ij} 是二阶应力张量， ε_{ij} 是二阶应变张量， δ_{ij} 是克罗内克（Kronecker）符号， $\varepsilon_k = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3$ 是体积应变（应变张量的迹）。拉梅常数 λ 和剪切模量 μ 是拉梅材料常数，对于各向同性材料，可以通过式（2）和式（3）计算：

$$\lambda = \frac{E\nu}{(1+\nu)(1-2\nu)} \quad (2)$$

$$\mu = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad (3)$$

其中 E 杨氏弹性模量， ν 是泊松比。

最后，通过对刀柄 Capto刀柄主轴连接进行仿真，深入关注接触面应变分布、接触面的位移变形以及接触状态的变化，综合分析以上指标，可以透彻准确地评价高速刀柄主轴连接的可靠性，为进一步改善 Capto工具系统的可靠性提供了可靠的数据依据及理论证明。

（三）刀柄与高速主轴的非线性接触分析

本研究基于GB/T32557.1-2016标准刀柄，参照ISO26623-1建立40CrNi2Mo材料的有限元模型，重点开展刀

柄—主轴联接强度可靠性分析。该建模方法通过简化几何特征（忽略倒角等），同样适用于扭矩传递和端面定位等可靠性研究。表3为该材料性能的基本参数，在 Solidworks Simulation 中设置材料特性参数如图5所示。

表3 40CrNi2Mo材料参数

材料	密度 ρ (kg/m ³)	弹性模量 E (GPa)	泊松比 ν	摩擦因 数 f	屈服极限 (MPa)
40CrNi ₂ Mo	7850	196	0.284	0.15	835

几何模型的建立，通过 Solidworks 基本建模完成，刀柄的几何特征是三个方向尺寸处于同一尺寸量级的实体模型，选择高阶单元有利于在较少的单元数量下实现较高的精度，因此选用二阶实体四面体单元，网格剖分如图6。

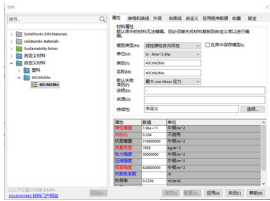


图5 模型参数设置

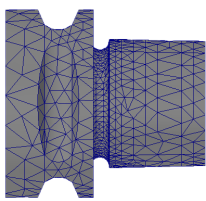


图6 高速刀柄的网格划分图

对于刀柄主轴的接触设置，需要根据接合类型进行分析，设置摩擦因数 f 为 0.15。在设置接触对时，选择局部接触行为，其中选择接触面设置为刀柄端面与外锥面，建模时需预设刀柄—主轴过盈配合参数。图7为刀柄锥面与主轴接触及刀柄端面与主轴接触的设置情况（蓝线框显示的为接触部位）。高速刀柄—主轴连接可靠性有限元分析需设置边界条件如图8所示。

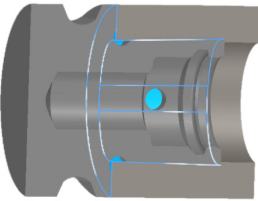


图7 高速主轴与刀柄的接触

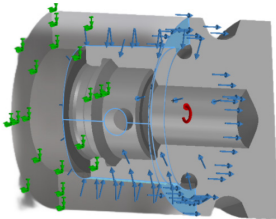


图8 高速刀柄与主轴边界条件设置

应用 Solidworks Simulation 模块在进行非线性求解时，本仿真模块会通过二分求解法处理无收敛状况。因此这里只需要默认 solidworks simulation 的设置即可。在结果选项中，由于材料可以认为是塑性材料，且不处于三向等拉的受力状态，因此其失效形式是屈服，输出结果应选择 Von Mises 等效应力，即按照最大畸变能理论得出的第四强度相当应力。在模拟运行时选择高速主轴—刀柄系统在 30000r/min 转速、10 μ m 过盈配合及 15kN 夹紧力条件下进行非线性接触分析，获得以下关键结果：接触应力分布如图9所示，锥面接触位移分布如图10所示。

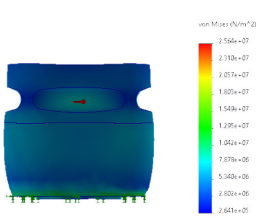


图9 接触应力分布图

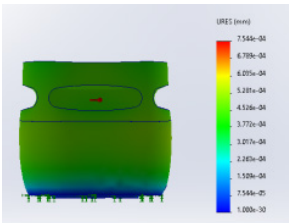


图10 锥面接触位移分布图

由上9和10图可知在转速为 30000r/min、过盈量为 10 μ m、夹紧力为 15kN 的工况条件下最大的应力值为 25.64MPa，最大位移为 7.54×10^{-4} mm，因为高速主轴转动的最大速度都不低于 30000r/min，以此结果作为静应力和变形的基本参考值是合适的。

（四）高速刀柄与主轴的可靠性分析

进一步分析，需要考虑不同的转速、夹紧力等工况条件下进行模拟，机床高速运行的速度一般都高于 30000r/min，但大多数的机床的最高速度都在 80000r/min 以内，所以表4里最高的转速取值 80000r/min。具体模拟参数如下表4，表5所示。

表4 转速基本参数

类别	不同工况						
转速 (r/min)	16000	30000	40000	50000	60000	70000	80000
角速度 (rad/s)	1674.4	3140	4186	5232	6280	7326	8372

表5 夹紧力基本参数

类别	不同工况				
夹紧力 (kN)	15	16	17	18	19
压力值 (kPa)	104.17	111.11	118.06	125.00	131.94

选择表中两极值进行分析，取表格第一组数据和最后一组数据，具体运行结果如下：

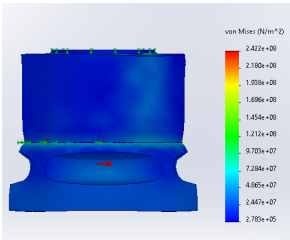


图11 转速80000r/min 夹紧力19kN

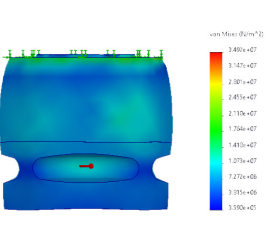


图12 转速30000r/min 夹紧力19kN

由图11和12可以看出，最大的 Von Mises 等效应力值 242MPa，由表3可知，所选材料最大的屈服极限值为 835MPa，这里至少有3倍以上的安全因数，由此可得在夹紧力 19kN 内，转速不超过 80000r/min 的工况条件下，发生静强度失效的概率是极低的，故此设计能够满足刀柄和主轴之间的可靠运行。

（五）Capto 刀柄主轴连接可靠性因素分析

刀柄主轴连接可靠性是衡量主轴连接性能的主要指标，主要包括以下几个重要的影响因素，本章从刀柄主轴连接应变量和连接屈服强度两个方面来分析这些因素对可靠性的分析。在刀柄主轴连接强度方面，连接部分强度是决定整个工具系统可靠、稳定的一个重要因素，如果连接强度不够，刀柄连接部位会在高速加工过程中因松动或者破裂，从而影响加工的精度和工具寿命，因此，刀柄与主轴之间的连接强度需要一定的材料以及热处理工艺得到的刀柄连接部位的强度保证，能够承受足够大的正向与反向冲击。采用上一节类似的有限元静力学模拟，可以得出不同夹紧力和转速工况下的连接强度分析结果，如表6所示。

表6 不同转速和不同夹紧力变化的模拟结果

类别	分类情况					
转速（r/min）	30000	40000	50000	60000	70000	80000
角速度（rad/s）	3140	4186	5232	6280	7326	8372
夹紧力（kN）	15					
最大等效应力（MPa）	25.64	60.51	94.66	136.53	185.76	242.09
最大位移（mm）	4.54×10^{-4}	6.12×10^{-4}	9.57×10^{-4}	1.38×10^{-3}	1.88×10^{-3}	2.45×10^{-3}
夹紧力（kN）	16					
最大等效应力（MPa）	25.62	60.5	94.62	136.5	185.73	242.01
最大位移（mm）	4.53×10^{-4}	6.12×10^{-4}	9.57×10^{-4}	1.38×10^{-3}	1.88×10^{-3}	2.45×10^{-3}
夹紧力（kN）	17					
最大等效应力（MPa）	25.6	60.48	94.57	135.55	184.88	241.86
最大位移（mm）	4.53×10^{-4}	6.12×10^{-4}	9.56×10^{-4}	1.38×10^{-3}	1.87×10^{-3}	2.44×10^{-3}
夹紧力（kN）	18					
最大等效应力（MPa）	25.58	60.48	94.52	135.54	184.82	241.65
最大位移（mm）	4.52×10^{-4}	6.11×10^{-4}	9.56×10^{-4}	1.37×10^{-3}	1.87×10^{-3}	2.44×10^{-3}
夹紧力（kN）	19					
最大等效应力（MPa）	25.56	60.46	94.46	135.5	184.79	241.5
最大位移（mm）	4.52×10^{-4}	6.11×10^{-4}	9.55×10^{-4}	1.37×10^{-3}	1.86×10^{-3}	2.43×10^{-3}

由表6可知随着转速的增加，由于惯性力的作用，其最大等效应力、变形都有明显的增大，这和基本的力学规律是相吻合的；同转速下，夹紧力对于结果的影响较小，原因是夹紧力和惯性力相比，只是一个相对的小量，其作用的局部位置等效应力有所变化，但对整体而言的最大等效应力，影响极为有限。

通过仿真结果可以看出，最大等效应力也是远低于材料的屈服极限的。即使是在最不利工况，即转速达到80000 r/min、过盈量10μm、夹紧力19kN的条件下，其刀柄连接部位的最大等效应力也只有242MPa，较之材料的屈服极限835MPa，具有很高的安全因数。实际上，Capto刀柄主轴连接可靠性受多个因素共同影响，静强度分析只是一个方面却又是极为重要的一个方面，其数据结果可以为振动分析、优化连接强度以及降低疲劳等方面的设计提供依据，从而提升Capto工具系统的整体可靠性和加工性能。

四、结论

本文以solidworks软件为基础先进行高速刀柄和主轴模型的建立，然后在solidworks simulation平台进行有限元分析，通过

设置最高转速80000r/min、过盈量为10μm、夹紧力为15kN的刀柄与高速主轴联接状态的接触非线性分析得出GB/T32557.1–2016型刀柄与主轴联接的接触应力分布，以此作为基础参照，然后再以不同转速下位移和应力的变化及不同夹紧力下位移和应力的变化进行对比分析其可靠性。本研究采用了非线性接触分析的方法，对高速刀柄主轴连接进行了精细的数值模拟，其具体设置参数包含时间步长、收敛准则、网络及精度、边界条件；对于材料，认为是各向同性的本构关系，其在弹性阶段满足广义胡克定律。在Capto刀柄主轴连接的模拟分析中，特别关注了接触面的应力分布、位移变形情况以及接触状态的变化。通过在不同的夹紧力和转速模拟，以及刀具本身材料参数对比，Capto工具系统具有很高的安全因数，可以得出Capto刀柄具有更好的结构强度和可靠性。

参考文献

- [1] 吕震宙，王燕萍，宋芳. 可靠性工程基础 [M]. 西安：西北工业大学出版社，2018.
- [2] 赵钦志，王军见. 数控机床可靠性试验技术发展赏析 [J]. 世界制造技术与装备市场, 2022 (03).
- [3] 张劲，王树林，王贵成，等. Capto工具系统关键参数分析 [J]. 工具技术, 2017, 51(7): 49–52.
- [4] 张劲；王树林；史翔云；周益军；高速加工用 Capto 刀柄关键尺寸测量技术研究 [J]. 机械强度, 2019.04.
- [5] 吴振华：多棱圆锥刀柄接触特性的研究 [D]. 哈尔滨理工大学：2015.
- [6] 耿海彬；HSK 工具系统分析 [J]；机械工人·冷加工，2004 年 07 期。
- [7] 胡明清；宇慧平；刀柄装配结构的过盈配合理论分析及数值模拟 [A]；北京力学会第 20 届学术年会论文集 [C]，2014 年。
- [8] 张国军；高速切削 HSK 工具系统失效机理与工作可靠性研究 [D]；东北大学，2011 年。
- [9] 曾凡宇；HSK 工具系统高速性能及结构优化研究 [D]；重庆理工大学，2018 年。
- [10] 张松，艾兴，唐委校. 高速旋转状态下的主轴 / 刀柄联接特性 [J]. 山东大学学报：工学版，2003，33(5): 473–476.