

T/EJCCCSE

团 体 标 准

T/EJCCCSE00*—2024

数控机床结构仿真与优化

第 1 部分：机床静动热态特性仿真分析

CNC machine tool structure simulation and optimization
—Part 1: Simulation analysis of static dynamic and thermal
characteristics of machine tool

2024-XX-XX 发布

2024-XX-XX 实施

中国商业股份制企业经济联合会 发布

目 次

前言	II
机床静动热态特性仿真分析	1
1 范围	1
2 规范性引用文件	1
3 术语和定义	1
4 坐标系与单位制	2
5 模型构建与简化	2
6 网格划分	3
7 材料设置	3
8 边界条件设置	4
8.1 静态边界条件设置	4
8.2 动态边界条件设置	4
8.3 热态边界条件设置	5
9 有限元模型检查	5
10 仿真分析计算	6
10.1 静态特性分析计算	6
10.2 动态特性分析计算	6
10.3 热态特性分析计算	7
11 仿真分析报告编制要求	8
附录 A	9
附录 B	10
附录 C	12
附录 D	13

前 言

本文件按照 GB/T 1.1-2020《标准化工作导则 第1部分：标准化文件的结构和起草规则》的规则起草。

本文件是 T/XXX—2024《数控机床结构仿真与优化》的第1部分。T/XXX—2024 已经发布了以下部分：

- 第1部分：机床静动热态特性仿真分析；
- 第2部分：机床结构件优化设计。

本文件由……提出。

本文件由 XXX 协会归口。

本文件负责起草单位：……。

本文件主要起草人：……。

本文件为首次发布。

机床静动热态特性仿真分析

1 范围

本规范文件规定了机床整机静动热态特性仿真分析的方法及流程。

本规范文件适用于机床在设计阶段中，分析机床静动热态特性，并寻找整机潜在薄弱环节。

2 规范性引用文件

下列文件对于本文件的应用是必不可少的。凡是注日期的引用文件，仅注日期的版本适用于本文件。凡是不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

GB 3100—1993 国际单位制及其应用

GB 3101—1993 有关量、单位和符号的一般原则

GB/T 13574—1992 金属切削机床静刚度检验通则

GB/T 16768—1997 金属切削机床振动测量方法

GB/T 17421.3—2009 机床检验通则 第3部分：热效应的确定

GB/T 31054—2014 机械产品计算机辅助工程 有限元数值计算 术语

GB/T 33582—2017 机械产品结构有限元力学分析通用规则

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1 机床静刚度 **machine tools static rigidity**

机床在静载荷作用下，在规定方向上抵抗承载刀具与承装工件的部件间相对位置变化的能力。

[GB/T 13574—1992,定义 3]

3.2 固有频率 **natural frequency**

无阻尼线性振动系统的自由振动频率。

[GB/T 2298—2010,定义 3.88]

3.3 振型 **mode of vibration**

机械系统某一给定振动模态的，在某一固有频率下，由中性面或中性轴上的点偏离其平衡位置的最大位移值所描述的图形。

3.4 对流换热系数 **coefficient of convective heat transfer**

壁面和与之接触的流体之间，在单位温差作用下，于单位时间内通过单位面积传递的对流热量。

3.5 温度场 **temperature field**

某一瞬间，在一定空间范围内各个点的温度分布集合。

3.6 热变形 **thermal deformation**

由于温度的变化而引起物体的变形。

3.7 结构静力学分析 **structural statics analysis**

在静态或可近似静态载荷作用下，忽略惯性和阻尼效应的结构相应分析。

[GB/T 31054—2014,定义 2.1.10]

3.8 结构动力学分析 **structural dynamics analysis**

在时变载荷以及惯性和阻尼效应作用下，对结构动力学特性和相应的分析。

[GB/T 31054—2014,定义 2.1.11]

3.9 结构热分析 **structural thermal analysis**

对结构温度场及其他热物理参数的分析。

[GB/T 31054—2014,定义 2.1.12]

4 坐标系与单位制

静动热仿真分析流程参见附录 A 中图 A.1。

4.1 坐标系

坐标系由右手定则来确定，宜选用笛卡尔直角坐标系，必要时可选用柱坐标系或球坐标系。

有限元分析建模时应定义全局坐标系，当模型载荷、约束或结果显示需求与全局坐标系不一致时可增加局部坐标系。

4.2 单位制

单位制的选择应按照 GB 3100-1993 和 GB 3101-1993 执行。根据机床产品特点选择 SI 单位制或其他单位制。例如，对质量较敏感的零件推荐采用 SI 单位制，质量单位为千克，具体参见附录 B 中表 B.1；对质量不敏感的大型零部件产品推荐采用 SI 单位制倍数单位，质量单位为吨，具体参见表 B.2。

5 模型构建与简化

5.1 模型构建

在几何模型构建过程中，应遵循以下原则：

- a) 几何模型应能够表达机床整机结构特征；
- b) 几何模型一般按 1:1 的比例关系建立模型，使模型与结构件实物保持基本一致；
- c) 几何模型的命名应采用可识别的字符，并要保持唯一性。

5.2 模型简化

静动热态特性分析时，几何模型简化宜考虑以下要素：

- a) 删除机床外壳防护罩、拖链等不受力结构；
- b) 在不影响仿真模型精度的前提下，删除零件的倒角、圆角以及各种螺栓孔、工艺孔等细小结构；
- c) 删除编码器、气动回路、电气阀等对仿真分析影响较小的结构；
- d) 删除螺栓、螺钉等细小零部件；
- e) 删除滑块凸台、填补导轨导向槽，填补导轨与滑块间空隙；
- f) 将轴承、联轴器等零件改为同等尺寸的中空圆柱；
- g) 确保模型内没有“干涉”、“间隙”等问题；
- h) 将各零件模型名称改为英文命名。

6 网格划分

6.1 网格疏密控制

网格疏密应符合以下要求：

- a) 应对结构变化大、曲面曲率变化大、载荷变化大或不同材料连接的部件进行细化；
- b) 单元尺寸过度平滑、粗细网格之间应有足够的单元进行过渡，避免相邻单元的质量和刚度差别太大；
- c) 关注应力相应区域的网格密度应大于仅关注位移相应区域的网格密度；
- d) 主要受力方向的单元尺寸大小，垂直于该方向单元尺寸在满足单元质量要求时可以逐渐放大。

6.2 网格划分要求

网格划分时，应符合以下要求：

- a) 应保留主要的几何轮廓线，网格应与几何轮廓保持基本一致；
- b) 对于实体单元网格，在结构厚度方向上宜三层以上；
- c) 对于需要关注的焊接边，宜采用两排以上的网格；
- d) 对于关注零件的网格，宜划分为六面体；其他零件网格，宜划分为四面体；
- e) 网格划分完成后，不应出现“警告”、“报错”。

7 材料设置

材料属性设置时，应符合以下要求：

- a) 材料属性单位应与几何模型单位一致；
- b) 材料属性输入信息（如弹性模量、泊松比、密度和热膨胀系数等）应完整，能够准确表达结构的刚度、质量、阻尼特性及热特性。

8 边界条件设置

8.1 静态边界条件设置

8.1.1 接触

接触设置应符合以下要求：

- a) 根据接触类型选择具体方式，相对固定的部件之间设置为绑定接触，运动部件之间设置为不分离接触；
- b) 接触设置应无重合、无干涉，避免出现非接触区域误接触设置；
- c) 接触区域应能反映实际接触情况。

8.1.2 约束

约束施加应符合以下要求：

- a) 根据约束类型选择施加方式，静态特性分析中常用的约束为：床身与地面以固定支撑为约束；
- b) 约束区域应能准确反映实际约束情况，应避免单点约束，以防止应力集中，若实际约束区域小于一个单元时，应约束四个以上节点或细化网格。

8.1.3 载荷

载荷施加应符合以下要求：

- a) 根据分析需求选择载荷类型，静态特性分析中常用的载荷包括重力载荷、单向力载荷、远程力载荷等；
- b) 载荷大小、方向和作用区域应符合实际载荷情况。

8.2 动态边界条件设置

8.2.1 接触

接触设置应符合以下要求：

- a) 采用弹簧单元等效接触刚度和阻尼；
- b) 根据结合面类型选择施加方式，机床固定结合面采用三向弹簧单元等效，附录 C 给出了常用的结合面类型和接触设置方式；
- c) 接触设置应无重合、无干涉，避免出现非接触区域误接触设置；
- d) 接触区域应能反映实际接触情况。

8.2.2 约束

约束施加应符合以下要求：

- a) 根据约束类型选择施加方式，动态特性分析中常用的约束为：床身与地面以固定支撑为约束；
- b) 约束区域应能准确反映实际约束情况，应避免单点约束，以防止应力集中，若实际约束区域小于一个单元时，应约束四个以上节点或细化网格。

8.2.3 载荷

载荷施加应符合以下要求：

- a) 根据分析需求选择载荷类型，动态特性分析中常用的载荷包括正弦振动载荷、随机振动载荷和冲击振动载荷等；
- b) 载荷大小、方向和作用区域应符合实际载荷情况。

8.3 热态边界条件设置

8.3.1 热源

热源设置应符合以下要求：

- a) 热源设置应能反映实际情况，包括但不限于电机、轴承、丝杠螺母、导轨滑块和切削热；
- b) 热源发热量参数计算应根据零件出厂试验数据或相关经验公式确定。

8.3.2 对流换热系数

对流换热系数设置应符合以下要求：

- a) 空气自然对流换热系数计算宜采用经验公式或符合工况的经验值；
- b) 冷却液强制对流换热系数计算应根据零件冷却流道及所采用冷却液类型进行流体分析，通过流固耦合得出。

8.3.3 载荷

载荷施加应符合以下要求：

- a) 根据分析需求选择载荷类型，热态特性分析中常用载荷包括热流、对流、流固耦合输入载荷等；
- b) 载荷大小、方向和作用区域应符合实际载荷情况。

9 有限元模型检查

9.1 网格质量检查

网格质量检查内容及要求如下：

- a) 模型中不应存在畸变网格，网格质量检查的主要指标包括长宽比、翘曲度、偏斜度、内角等方面；网格划分时，上述指标推荐的量化数值要求参见附录 B.3；
- b) 同一零件，相邻几何特征的网格节点共用无裂缝；
- c) 无重复节点和单元；
- d) 保证结构重点关注区域的网格质量高，非重点关注区域的网格质量可适当降低。

9.2 质量特性检查

在有限元建模中，应对影响计算准确性的模型质量分布、总质量、质心分布等因素进行检查，检查配重后模型各部分质量分布、质心是否与实际状态相一致。

9.3 工程特性检查

划分网格结束后，应对有限元模型进行工程特性检查，具体检查内容及要求如下：

- a) 材料参数检查。依据机床结构设计时的材料特性，对材料参数进行复核，检查材料参数是否与设计一致；
- b) 接触检查。依据机床几何特点、分析需求和装配方式，对接触类型进行检查，检查接触类型的选择是否与结构形式和连接方式一致；
- c) 约束检查。依据机床结构安装方式，对约束进行检查，检查约束是否与安装条件一致；
- d) 载荷检查。依据机床结构工作载荷条件，对载荷进行检查，检查载荷类型、载荷作用对象等是否与工作载荷条件一致。

10 仿真分析计算

10.1 静态特性分析计算

10.1.1 求解设置要求

求解设置要求包括求解器的选择和求解参数的设置，应遵循下列要求：

- a) 应根据求解器的特点选择合适的求解器，如内存占用情况、适合求解规模、典型应用类型等；
- b) 选定求解器之后，应设置对应的求解参数，包括求解精度、收敛准则、程序终止条件等；
- c) 求解参数的设置应有明确的参考依据。

10.1.2 可视化显示要求

有限元仿真分析结果应以云图、等值线图、列表或动画形进行可视化处理，可视化应满足要求：

- a) 后处理所使用的模型数据应与计算求解的模型数据完全一致；
- b) 应遵循清晰明了为第一原则，有效表达仿真分析结果；
- c) 等值线图应兼顾应力梯度变化大区域和变化缓慢区域，不宜过密；
- d) 应在图片明显位置标识最大值、最小值、坐标系及结果类型。

10.1.3 仿真结果分析要求

有限元静力学仿真分析结果处理应遵循下列要求：

- a) 应对有限元静力学仿真结果进行误差分析，误差来源包括：几何模型处理误差、有限元网格划分误差、边界条件设置误差、有限元计算误差等；
- b) 应根据经验理论值、相似案例或试验值，评价计算结果的有效性；
- c) 宜通过列表形式展示特别关注区域的应力、应变、变形等力学量，避免人为修改结果；
- d) 宜根据计算结果比较分析参数灵敏度；
- e) 宜根据计算结果分析机床整机薄弱环节。

10.2 动态特性分析计算

10.2.1 求解设置要求

计算方法选择及计算控制参数设置，宜考虑下列要点：

- a) 计算时宜采用 Direct (Block Lanczos Method) 法；
- b) 根据分析关注的模态个数及模态计算方法合理设置模态阶数（通常关注模态个数为 6 阶，求解模态阶数宜设置为 12 阶）。

10.2.2 可视化显示要求

动态特性分析结果的可视化显示应符合以下要求：

- a) 显示或输出结果前，应读取设置的模态阶数结果数据；
- b) 输出结果应包含关注频段内的固有频率、模态振型、相对应力和相对应变等值线图的全部或部分内容；
- c) 宜采用动画形式展示结构响应过程。

10.2.3 仿真结果分析要求

有限元静力学仿真分析结果处理应遵循下列要求：

- a) 应对有限元静力学仿真结果进行误差分析，误差来源包括：几何模型处理误差、有限元网格划分误差、边界条件设置误差、有限元计算误差等；
- b) 应根据经验理论值、相似案例或试验值，评价计算结果的有效性；
- c) 应对所关心的结果给出典型的图表，如固有频率表、模态振型图等。图表应简明、易懂图表中不应有无关的信息；
- d) 根据给出的图表结果，总结分析结论，如刚强度特性、振动特性，薄弱环节等。

10.3 热态特性分析计算

10.3.1 求解设置要求

热态特性分析应遵循下列要求：

- a) 选择合适的求解器对机床整机温度场进行求解；
- b) 将整机温度场作为温度载荷，对整机热变形进行求解。

10.3.2 可视化显示要求

热态特性分析结果的可视化显示应符合以下要求：

- a) 显示或输出结果前，应读取整机温升及最大变形数据；
- b) 输出结果应包含关注零部件的温度场及热变形情况，如整机、床身、横梁、丝杠等。

10.3.3 仿真结果分析要求

热态特性分析结果的可视化显示应符合以下要求：

- a) 显示或输出结果前，应读取整机温升及最大变形数据；
- b) 输出结果应包含关注零部件的温度场及热变形情况，如整机、床身、横梁、丝杠等。

11 仿真分析报告编制要求

机床整机静动热态特性仿真分析报告应符合以下要求：

- a) 报告应包含仿真目的、仿真条件、仿真过程和分析结论等内容；
- b) 报告应真实记录仿真前处理、计算过程、后处理等信息；
- c) 报告应以图片、列表等形式明确给出仿真结果，以及仿真分析结论；
- d) 报告宜有签署页，包括编制、审核、会签、批准等签署项。

附录 A
(资料性附录)

机床整机静动热态特性仿真分析流程图

机床整机静动热态特性仿真分析流程如图 A.1 所示。

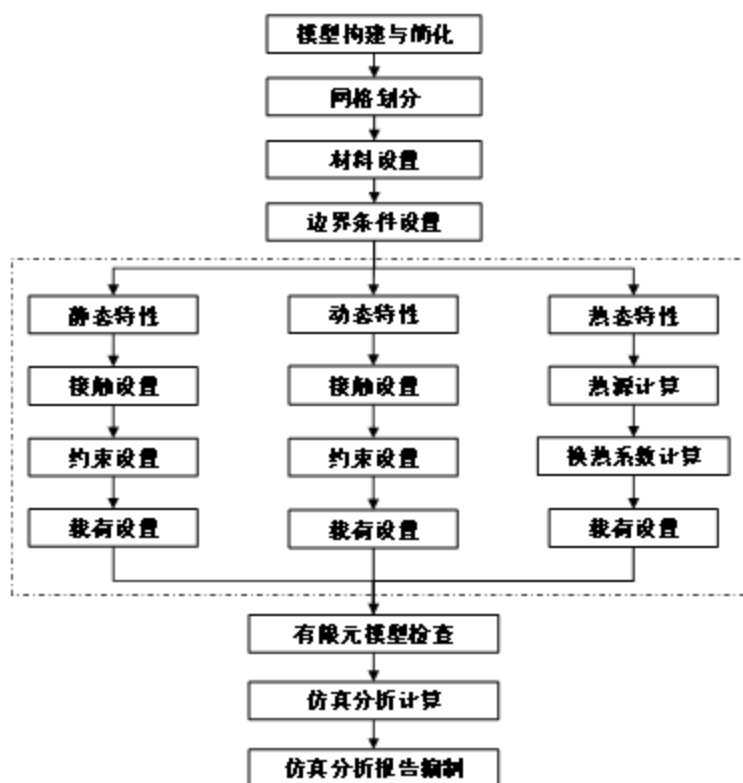


图 A.1 机床整机静动热态特性仿真分析流程

附录 B

(资料性附录)

单位制系统及网格质量检查指标

B.1 SI 单位制系统

表 B.1 给出了对质量较敏感的机床零部件产品分析建模时推荐采用的 SI 单位制。

表 B.1 SI 单位制系统

物理量名称	SI 基本单位制系统	
	单位名称	单位符号
长度	米	m
质量	千克	kg
时间	秒	s
温度	开[尔文]	K
—	SI 导出单位制系统	
力	牛顿	N
应力	帕	Pa(N/m ²)
力矩	牛顿米	N·m
密度	千克每立方米	kg/m ³
位移	米	m
速度	米每秒	m/s
加速度	米每二次方秒	m/s ²
频率	赫兹	Hz

B.2 SI 单位制系统 2

表 B.2 给出了对质量不敏感的机床零部件产品分析建模时推荐采用的 SI 单位制。

表 B.2 SI 单位制系统 2

物理量名称	SI 基本单位制系统	
	单位名称	单位符号
长度	毫米	mm
质量	吨	t
时间	秒	s
温度	开[尔文]、摄氏度	K、°C
—	SI 导出单位制系统	
力	牛顿	N
应力	兆帕	MPa(N/mm ²)
力矩	牛顿毫米	N·mm
密度	吨每立方毫米	kg/mm ³
位移	毫米	mm
速度	毫米每秒	mm/s
加速度	毫米每二次方秒	mm/s ²
频率	赫兹	Hz

B.3 网格质量检查

表 B.3 给出了有限元建模要求中网格质量检查控制指标。

表 B.3 网格质量检查控制指标

类别	四边形单元	三角形单元	六面体单元	楔形单元	四面体单元
长宽比	≤ 5.0	≤ 5.0	≤ 5.0	≤ 5.0	≤ 5.0
翘曲度	$\leq 16^\circ$	—	$\leq 18^\circ$	$\leq 18^\circ$	—
偏斜度	$\leq 60^\circ$	$\leq 60^\circ$	$\leq 60^\circ$	$\leq 60^\circ$	$\leq 60^\circ$
内角	40° - 135°	20° - 120°	40° - 135°	20° - 120°	20° - 120°

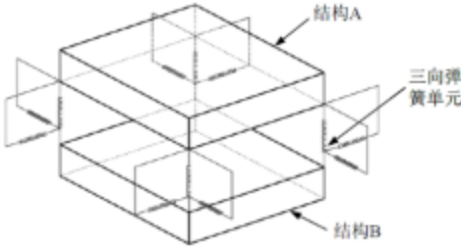
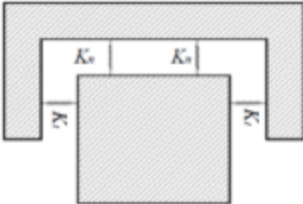
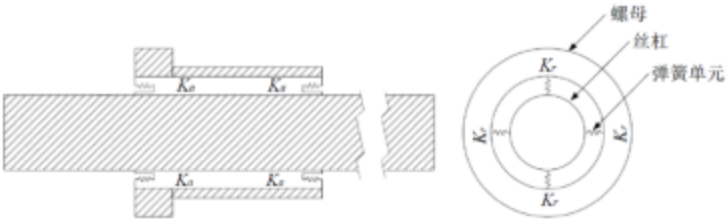
附录 C

(资料性附录)

典型结合面接触设置

下表给出了典型结合面接触设置方式。

表 C.1 典型结合面接触设置方式

类型	设置方式
固定结合面	
导轨滑块结合面	
丝杠螺母结合面	

附 录 D
(资料性附录)

机床静动热态特性分析结果记录表

D.1 机床固定结合面参数计算表

表 D.1 给出了机床固定结合面参数计算表。

表 D.1 网格质量检查控制指标

结合面对象	刚度参数 (N/m)		阻尼参数 (Ns/m)	
	法向	切向	法向	切向

D.2 机床热源发热量计算表

表 D.2 给出了机床热源发热量计算表。

表 D.2 机床热源发热量计算表

热源	发热量/W	数量

D.3 机床刀具与工作台相对变形量与静刚度计算表

表 D.3 给出了机床刀具与工作台相对变形量与静刚度计算表。

表 D.3 机床刀具与工作台相对变形量与静刚度计算表

相对变形量 D/ μm 施加力 F/N	X 方向	Y 方向	Z 方向
0			
500			
1000			
1500			
2000			
静刚度计算			

D.4 机床固有频率和振型记录表

表 D.4 给出了机床固有频率和振型记录表。

表 D.4 机床固有频率和振型记录表

阶数	频率/Hz	振型描述

D.5 机床最大温升及热变形记录表

表 D.5 给出了机床最大温升及热变形记录表。

表 D.5 机床最大温升及热变形记录表

名称	最大温升/℃	最大热变形/μm