

T/EJCCCSE

团 体 标 准

T/XXX.2—2024

数控机床结构仿真与优化 第2部分：机床结构件优化设计

CNC machine tool structure simulation and optimization
—Part 2: Optimization design of machine tool structural parts

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

目次	I
前言	II
机床结构件优化设计	1
1 范围	1
2 规范性引用文件	1
3 术语和定义	1
4 拓扑优化	2
5 结构再设计	4
6 尺寸参数优化	4
7 对比验证	5
8 报告编制要求	5
附录 A	6
附录 B	7
附录 C	8

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2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。

本文件由中国商业股份制企业经济联合会归口。

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。

机床结构件优化设计

1 范围

本文件规定了机床结构件拓扑优化、尺寸参数优化设计分析及流程。
本文件适用于机床结构件在保证刚度及固有频率的前提下，进行轻量化设计。

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 优化设计 **optimization design**

用于确定结构几何、物理和工艺等设计参数，以满足最优性能、可靠性、重量和成本等要求。
[GB/T 31054—2014,定义 2.1.14]

3.2 拓扑优化 **topology optimization**

以材料最佳利用为目标的结构形状优化。
[GB/T 31054—2014,定义 3.5.5]

3.3 参数化模型 **parametric model**

在前处理时，将结构设计模型中的几何量、物理量或边界条件参数化的模型。
[GB/T 31054—2014,定义 3.5.1]

3.4 设计变量 **design variable**

参数化的几何、物理或边界条件，属自变量。
[GB/T 31054—2014,定义 3.5.3]

3.5 状态变量 **state variable**

因结构设计变量的改变而引起结构状态变化的量，属因变量。

[GB/T 31054—2014,定义 3.5.4]

3.6 目标函数 **target function**

描述结构优化设计的目标与设计变量及状态变量的映射关系。

[GB/T 31054—2014,定义 3.5.2]

4 拓扑优化

机床结构件优化设计流程主要包括：拓扑优化、结构再设计、尺寸参数优化及对比验证，具体流程参见附录 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。

4.3 迭代模型建立

在初始迭代模型建立中，应遵循以下原则：

- a) 迭代模型应能够包括机床结构件特征；
- b) 迭代模型一般按 1:1 的比例关系建立；
- c) 尽可能的保留与结构件相接触的关键零件，如丝杠螺母、导轨滑块等，便于约束及载荷施加；
- d) 模型的命名应采用可识别的字符，并要保持唯一性。

4.4 静动热态仿真分析

4.4.1 网格划分

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，在结构厚度方向上应确保三层以上；
- c) 网格划分完成后，不应出现“警告”、“报错”。

4.4.2 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。

4.4.3 边界条件设置

(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。

(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，优化设计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。

(3) 载荷

载荷施加应符合以下要求：

- a) 根据载荷情况，找到相关零件重心坐标点，并处建立远程点，施加对称的远程力载荷；
- b) 根据分析需求选择载荷类型，静动热态特性分析中常用的载荷包括重力载荷、热流载荷、对流载荷、流固耦合输入载荷及温度载荷等；
- c) 载荷施加尽可能的满足对称施加。

4.4.4 有限元模型检查

具体流程参见 T/XXXXX J2.1—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》中第9章节。

4.4.5 仿真分析计算

仿真分析计算宜考虑以下要素：

- a) 静态分析及热态分析计算时宜采用默认求解设置，动态分析计算时宜采用 Block Lanczos 法；
- b) 根据模态个数及模态计算方法设置合理的模态阶数或模态上限；
- c) 在满足收敛性、计算精度和计算机资源的条件下，设置合理计算时间步长。

4.5 拓扑优化

拓扑优化应符合以下要求：

- a) 应根据实际情况选择合适的求解器，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) 设计域设置应准确，不应存在丝杠螺母、导轨滑块等非优化的零件；

- d) 优化目标设置时,应根据静动热力学分析的结果及优化设计目的合理选择,确定优化目标、权重及步数;
- e) 响应约束设置时,应根据结构件几何模型的特点,确定剩余质量占比;
- f) 有对称要求的结构件需根据结构特点完成对称性设置。

5 结构再设计

5.1 结构件建模

在结构件模型建立中,应遵循以下原则:

- a) 结构件设计时,应保留与原始模型相同的外形轮廓,不应出现安装、装配等问题;
- b) 结构件应在筋板布置、孔径位置等方面应着重参考拓扑优化结果;
- c) 结构件非重要部位的设计,应结合工程经验;
- d) 结构件的设计应考虑到实际的制造条件,符合实际制造要求;
- e) 结构件设计时,应适当考虑美观性。

5.2 驱动尺寸设置

在驱动尺寸设置中,应遵循以下原则:

- a) 同一方向的驱动尺寸尽可能地选择同一个基准面;
- b) 筋板驱动尺寸的基准尽可能地设置为筋板中心,使筋板在尺寸变化时向两侧同时改变;
- c) 驱动尺寸的设置应考虑优先级,比较重要的筋板、孔径优先设置,起美观作用的筋板、孔径少设置或不设置驱动,以缩减计算规模;
- d) 完成设置后,需对驱动尺寸进行调整试验,确保设置无误;
- e) 通过调整试验,获取驱动尺寸可变化的上下限范围;
- f) 各组驱动尺寸的命名应采用可识别的字符,并要保持唯一性。

6 尺寸参数优化

6.1 优化目标设置

在尺寸参数优化设计中,应根据优化方案及静动热态特性仿真分析结果,将质量、最大变形及一阶固有频率等参数设置为优化目标,并合理分配权重。

6.2 试验样本设计

试验样本设计时应符合以下要求:

- a) 各设计变量的尺寸上下限范围,应小于或等于对应驱动尺寸可变化的上下限范围;
- b) 应根据结构件特点和优化目的,区分优化目标的优先级,将状态变量质量和最大变形设为最小,一节固有频率设为最大;
- c) 在满足收敛性、计算精度和计算机资源的条件下,设置合理的样本生成数量,以缩减计算规模。

6.3 灵敏度分析

灵敏度分析结果的输出至少应包含以下信息：

- a) 各设计变量对状态变量优化函数的灵敏度直方图；
- b) 灵敏度最大的设计变量对各状态变量的响应曲面图；

6.4 尺寸参数优化

尺寸参数优化结果的输出至少应包含以下信息：

- a) 基于试验样本数据、灵敏度分析，拟合出的设计变量与状态变量之间的关系图；
- b) 最佳的状态变量值以及对应的设计变量尺寸值。

7 对比验证

根据尺寸参数优化获得的最佳尺寸，修正优化模型，与原模型固有频率和刚度进行对比，验证优化效果。对比验证结果的输出至少应包含以下信息：

- a) 原构件与优化后构件模型对比图；
- b) 原构件与优化后构件优化目标对比表。

8 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) 报告应包含优化目的、优化条件、优化过程和分析结论等内容；
- b) 报告应真实记录优化前处理、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)

机床结构件优化设计分析流程图

机床结构件优化设计分析流程如图 A.1 所示。

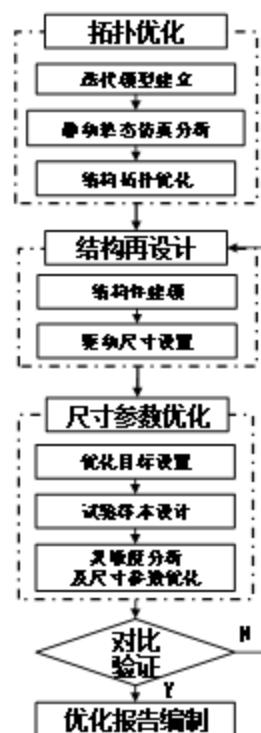


图 A.1 机床结构件优化设计分析流程

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/m 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

附录 C

(资料性附录)

驱动尺寸参数表及优化结果对比表

C.1 驱动尺寸参数表

表 C.1 给出了各驱动尺寸参数表。

表 C.1 各驱动尺寸参数表

驱动尺寸名称	Workbench 参数	物理含义	变化范围	确定值

C.2 优化结果对比表

表 C.2 给出了优化结果对比表。

表 C.2 优化结果对比表

	优化前	优化后
模型对比		
质量/kg		
最大变形/ μm		
一阶固有频率/Hz		