基于 ANSYS 的带锯床有限元结构分析

陈晋 丁侠胜 江平
（杭州晨龙智能科技有限公司 浙江 杭州 320000）

摘要：带锯床不仅是装备制造业的母机，而且也是装备制造业中的基础生产方式。由于我国的切削工业起步较晚，导致国产的带锯床在锯切效率和锯切精度等方面与国外相比存在明显的差距。研究中对 G4240-70C 带锯床进行三维建模，并运用 ANSYS 软件对 G4240-70C 带锯床的锯架、立柱和底座进行静态分析，并对 G4240-70C 带锯床的锯架进行动态分析；基于有限元分析的结果，优化了 G4240-70C 带锯床的结构。

关键词：G4240-70C 带锯床；ANSYS；静态分析；动态分析

0 引言

装备制造业是国民经济体系中的核心产业之一，而机床则是装备制造业的核心。按照生产形式，可以将机床分为不同的类别，其中锯床被视为装备制造业的母机，占据重要地位。伴随着经济迅速发展，型材广泛使用于各种建筑领域，尤其是在石油钻井平台、桥梁、楼式塔吊机及娱乐设施等的大型桁架结构中。

我国带锯床产业现状为，虽然实现了从无到有，但与发达国家仍有明显的差距。当前锯床行业主要分为三个层次：第一梯队为德、日等制造强国，其产品特点为高设计水平、高工艺水平、高配件质量、低故障率、较高加工精度，以及使用寿命长；第二梯队为中国台湾省和西班牙，其产品特点为相对可靠的质量、较高的性价比；我国的带锯床行业则处于第三梯队，其特点为设计水平偏低，存在设计冗余，易出现结构问题影响使用寿命。在本次研究中，借助 ANSYS 软件对 G4240-70 这种带锯床进行结构分析，掌握其结构设计不合理处及模态，以期实现结构优化。

1 G4240-70C 带锯床有限元分析模型的建立

1.1 应用软件

1.1.1 SolidWorks

SolidWorks 是一款典型的多模块集合软件，该软件由法国著名航空制造商达索集团（Dassault Group）设计和研发，并在全球的三维设计领域占有重要地位。

SolidWorks 的主要特点如下：

（1）参数化设计；

（2）基于特征建模；

（3）配置管理；

（4）协同工作；

（5）装配设计。

1.1.2 ANSYS Workbench

ANSYS 是一款应用范围较广的计算机辅助工程（CAE）软件，该软件由美国 ANSYS 公司设计开发。ANSYS Workbench 软件中集合了多个模块，其仿真分析功能尤为强大。ANSYS Workbench 是 ANSYS 中集成多个仿真模块的功能块，ANSYS Workbench 提供了一个与 ANSYS 软件求解器相互贯通的强大平 台和方法，ANSYS Workbench 为用户提供了一个更易于操作和人性化的求解分析和仿真平台。ANSYS 软件具有以下特点：

（1）客户化；

（2）集成性；

（3）参数化。

1.2 G4240-70C 带锯床的三维模型及模型简化

1.2.1 基本参数

G4240-70C 带锯床的基本参数，如表 1 所示。

表 1 G4240-70C 带锯床的基本参数

类型	带锯床	最大锯削直径	400mm×700mm
外形尺寸	2465 mm × 1040 mm × 1620 mm	使用范围	通用
适用行业	通用	是否库存	是
产品类型	全新	型号	G4240-70
品牌	晨龙	控制形式	人工
作用对象	五金	主电机功率	4（kW）
安装形式	落地式	作用对象材质	金属

1.2.2 三维模型

本次研究中，根据现场 G4240-70C 带锯床的结构，进行相应的三维模型构建，完成其所拥有的一切特征。在此过程中，主要应用 SolidWorks 软件对 G4240-70C 带锯床建立三维模型，三维模型效果如图 1 所示。

1.2.3 模型简化

G4240-70C 带锯床各个零部件上设有相应的消重孔、焊缝、铸造圆角、以及装配使用的通孔等加工工艺，这些零部件的存在会影响到后续的有限元分析。因此，为了方便后续的分析，在不影响 G4240-70C 整体力学性能的前提下，对其三维模型进行简化，具体方案如下：

（1）删除 G4240-70C 带锯床中的部分零部件，如电气

1-23 工业设计 9月中 第26期 新加 .indd 2 2022/3/10 21:46:41

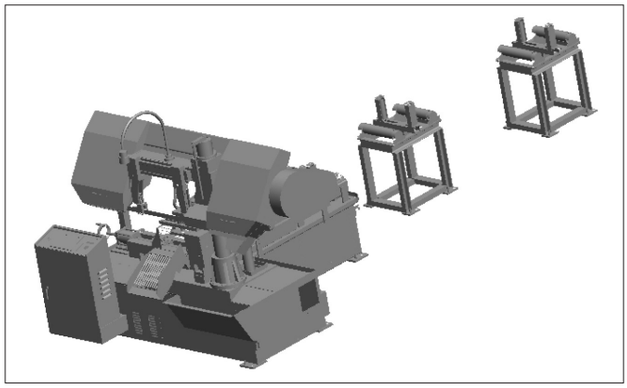


图 1 G4240-70C 数控带锯床的三维模型

系统、冷却系统等，这些零部件不会影响到整机的力学性能；

（2）删除所有标准件，如：螺钉、弹性垫圈等；或对整体结构影响不大的辅助性零部件，如：锯轮盖板、除屑装置等；

（3）删除对整体性能影响不大的小尺寸特征，如：定位孔、通孔、消重孔和工艺槽等；

（4）对于 G4240-70C 带锯床结构和形状较为复杂的锯切系统和底座，其并不适合进行简单的网格划分。在带锯床的力学性能不受较大影响前提下，可以去除部分对整体影响不大的零件，并对复杂的特征进行简化，将复杂的零件转化为外形相类似的立方体与圆柱体，同时，质量与体积尤其是重心不发生较大变化，满足此前提下进行相关分析。

综上，G4240-70C 带锯床简化后的三维模型如图 2 所示。

1.2.4 网格划分

网格划分是有限元分析中尤为关键的一步，通过进行较为细致的网格划分，可以构建出高质量的有限元模型。保证三维模型简化质量的前提下，对其进行网格剖分，其结构、类型、尺寸、数量、网格密度等因素都是需要进行综合考虑的，以获得更高质量的网格。

使用 ANSYS 软件进行网格划分的步骤如下：

（1）设置网格划分目标的物理环境；

（2）选择网格划分方法；

（3）设置网格参数；

（4）预览划分好的网格，进行适当的调整；

（5）生成网格；

（6）检查网格质量。

在本次研究中，G4240-70C 带锯床的三维模型的网格划分主要使用自动划分法；并优化了承载载荷部位的网格，最后得到的网格以四面体网格为主。在 ANSYS 中将网格大小不用设置过小，这样会导致计算缓慢，故此处设置网格大小为 15mm，网格划分结果，如图 3 所示。

1.2.5 边界条件

（1）定义材料属性

G4240-70C 带锯床主要采用钢铁等传统材料，其主要

表 2 材料属性表

材料	密度（kg/m^3）	弹性模量（Gpa）	泊松比
Q235A	7890	212	0.288
45#	7890	209	0.269
HT200	7280	134	0.25

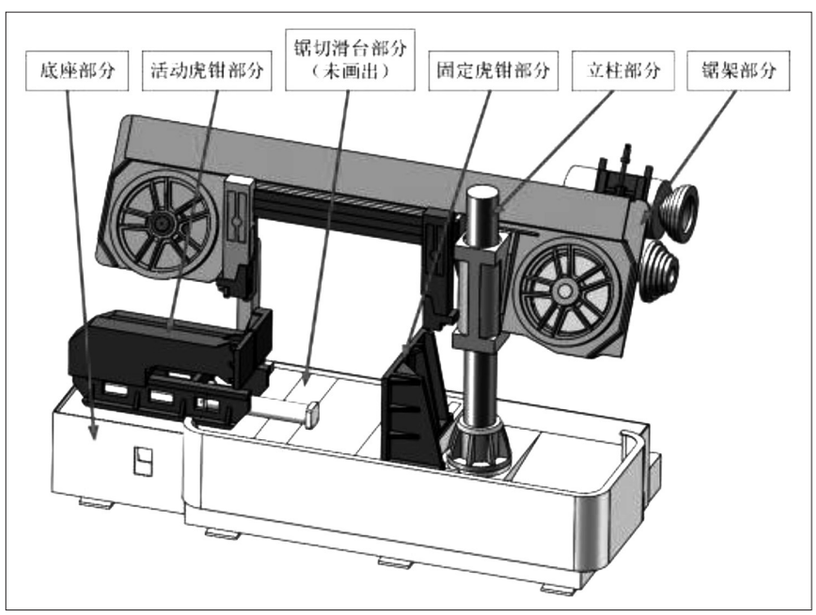


图 2 简化后的三维模型

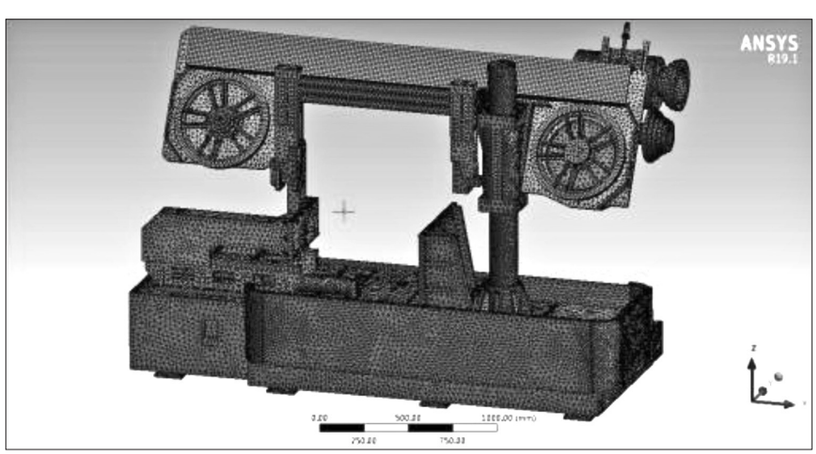


图 3 网格划分

1-23 工业设计 9月中 第26期 新加 .indd 3 2022/3/10 21:46:41

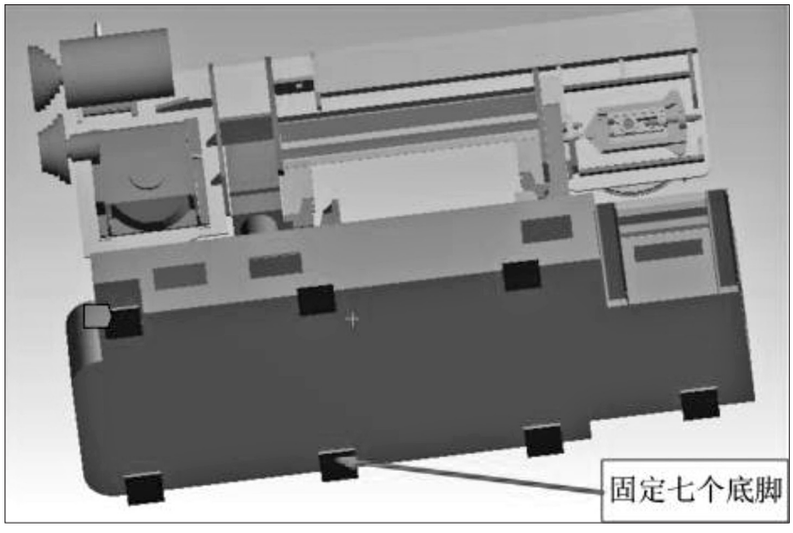


图 4 边界条件 1

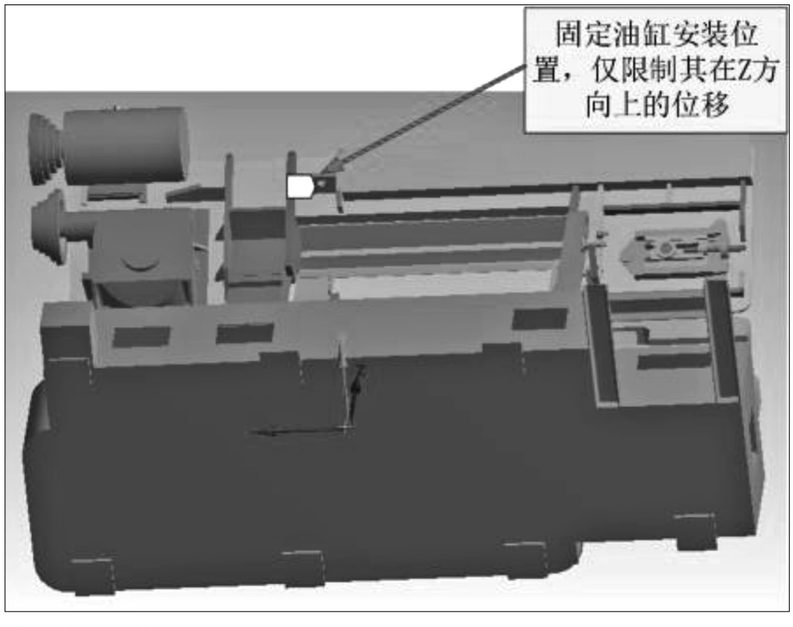


图 5 边界条件 2

包含碳钢 Q235A、碳钢 45#、灰铸铁 HT200 等，其材料属性如表 2 所示。

（2）边界条件设定

在 ANSYS 的 Workbench 中导入三维模型，并根据表 2 输入相应的边界条件，完成网格划分前的基本准备，如图 4 所示。

仅在锯架上固定相应安装位置，如图 5 所示。

设置导向立柱与铸套之间的连接方式为滑动，其摩擦系数设置为 0.03。设置副导向立柱与副导向立柱板之间的连接方式为滑动，其摩擦系数设置为 0.08。

（3）施加载荷

简化后的三维模型在 ANSYS 软件中进行有限元分析时，施加响应的载荷需要参考各个零部件的受力情况来进行设定。在施加的载荷中，以惯性载荷、力载荷和热载荷为主。在对已经简化 G4240-70C 带锯床的模型进行有限元分析时，对其主要施加惯性载荷和力载荷，其中力载荷包含压力载荷以及力矩载荷。根据整机实际受力情况，现在对各个区域施加相应的力，如图 6 所示。

图中，序号 1 至 6 的载荷及大小，如表 3 所示。

表 3 各力载荷及大小

序号	载荷名称	数值
1	锯带张紧力	32000N
2	正常工作锯切抗力（总）	2991.83N
3	正常工作进给抗力（总）	2591.11N
4	夹紧力减锯切抗力的一半（3.5MPa 油压下）	17955.26N
5	工件重力加进给力	27414.51N
6	夹紧力加锯切抗力的一半	20947.09N

2 G4240-70C 带锯床的静态分析

静态分析主要是验证物体在承受恒定载荷时，其结构的力学性能。物体的结构设计可以借助静力分析，由此来判断其结构的合理性。

2.1 动力学方程

静态特性分析主要内容是分析一个物体的形变、应力，其主要方式是通过对物体施加一个恒定的载荷。在经典力学中，物体的动力学方程为：

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

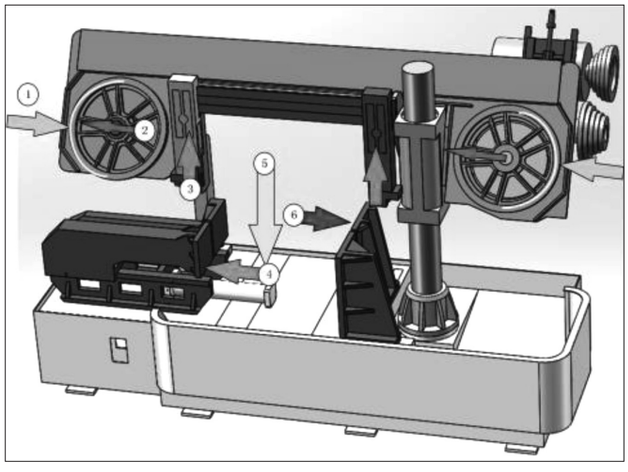


图 6 G4240-70C 改进型整机主要受力情况

1-23 工业设计 9月中 第26期 新加 .indd 4 2022/3/10 21:46:41

式中：

[M]—质量矩阵；

[C]—阻尼矩阵；

[K]—刚度系数矩阵；

{x}—位移矢量；

{F}—力矢量；

在结构的静态特性分析中，力与时间无关，因此位移矢量 {x} 由以下的矩阵方程求出：

$$[K]\{x\}=\{F\} \quad (2)$$

式中：

[K]——连续的常量矩阵；

因此结构的材料应该满足线弹性和小变形理论。

2.2 G4240-70C 带锯床整体结构的静态特性分析

经过简化后的 G4240-70C 带锯床的核心部分包含锯切系统、底座等结构，在静态特性分析中，保留了一组核心部件，包括电机、减速机等。对带锯机整体结构进行静力分析时，需要在锯架上施加的载荷主要以下几种：

（1）电机锯切时施加的扭矩；

（2）锯切工作时产生的锯切抗力和进给抗力；

（3）带锯条对锯轮的拉力及反作用力；

（4）带锯条张紧机构的张紧力。

首先对带锯床设置固定面，设置其地脚安装面为固定面，施加重力及表 3 中的各个主要作用力，G4240-70C 带锯床整体则有相应的的应力分布和变形，其结果如图 7 所示。

从上图可以看出，带锯床整体的最大变形发生在锯架上，其大小为 1.24mm，其余部位的变形较小。

2.3 锯切系统零部件的静态特性分析

锯切系统的核心零部件包括：锯架、主动锯轮、从动锯轮和张紧机构。锯切系统的静态特性分析是建立在各个零部件的静态特性分析基础之上，随后可以展开 G4240-70C 带锯床的静态特性分析。在 G4240-70C 工作状态静态特性分析中，张紧机构的拉力、带锯条的拉力、电机传递的扭矩、锯切力传递的锯切载荷是锯架受到主要的载荷。

（1）锯架的静态特性分析

锯架所承受的主要载荷主要由两个部分组成，一个是电机传递过来的扭矩、另一个是锯切力载荷，锯架局部参考系以锯架本身方向为参考。锯架总变形，如图 8 所示。

从上图可以看出锯架的最大变形为 1.08mm，集中在主动轮和从动轮两端的位置，其他位置的变形不超过 0.1mm，整体形变均很小。

从上图可以看出，X 方向上最大变形量为 0.31mm，发生在主动轮侧锯板下边缘；Y 方向上最大变形量为 0.71mm，发生在副立柱底端；Z 方向上最大变形量为 0.94mm，发生在从动轮侧锯板侧边缘。

总体来看，G4240-70C 带锯床锯架的结构设计存在不

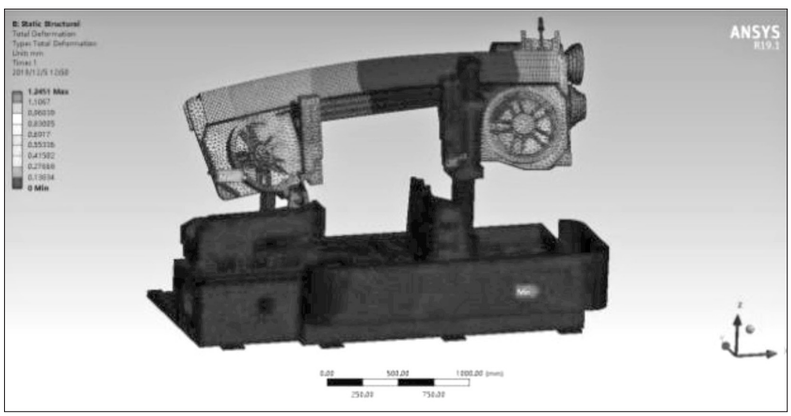


图 7 整机的受力总变形云图

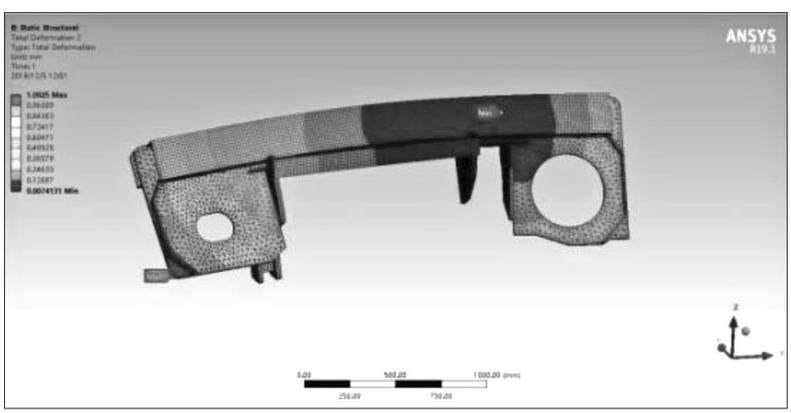


图 8 锯架受力下的总变形

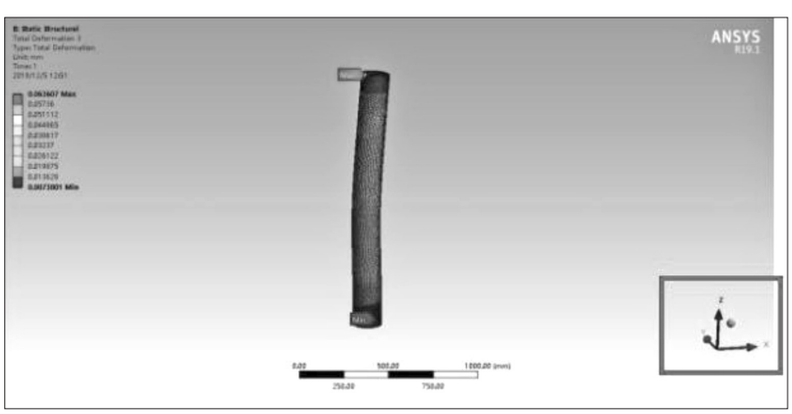


图 9 立柱受力总变形

1-23 工业设计 9月中 第26期 新加 .indd 5 2022/3/10 21:46:42

合理的地方，整体刚性存在不足的情况。因此，建议在保证整体质量不大幅增加的情况下，对锯架进行结构优化，增强其刚性。

（2）立柱的静态特性分析

带锯床在工作时，在液压缸的作用下，锯切系统会进行循环往复运动，实现对工件的锯切，这时进给导柱需要承受一定的剪应力。在分析进料导柱和支架的静态特性时，假设锯切系统移动到最高位置。

全球坐标系下，主立柱受力总变形如图 9 所示。

从上图可以看出，进给导向立柱的最大变形为 0.06mm，发生在立柱顶端，立柱底部及立柱支座的变形较小。

从上图可以看出 X 方向上最大变形量为 0.03mm，发生在立柱底部；Y 方向上最大变形量为 0.06mm，发生在立柱顶部；Z 方向上最大变形量为 0.04mm，发生在立柱顶部从动轮侧。

综上所述，进给导向立柱结构的静态特性在表 3 的工况下表现良好，不需要进行额外的结构优化。

（3）底座的静态特性分析

带锯床的底座是由钢板整体焊接成的，底座在 G4240-70C 带锯床中主要起到支撑的作用。在基础上进行有限静力分析时，根据表 3 工况，向底座施加对应的载荷并定义边界条件。带锯床的底座固定在地面上，底座的安装面设置为固定面。全球坐标系下，底座受力总变形如图 10 所示。

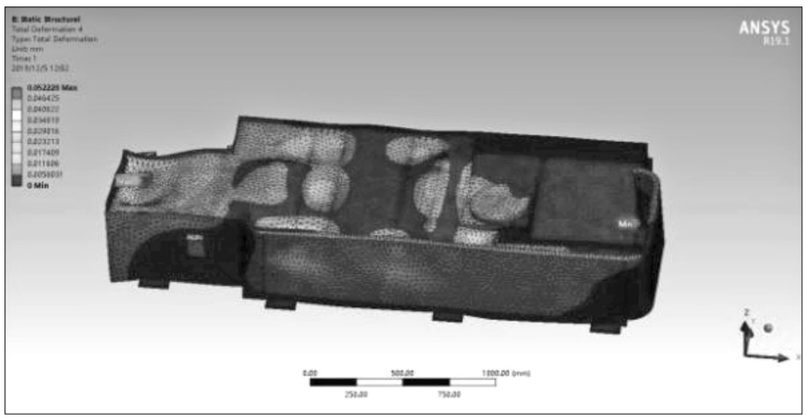


图 10 底座受力总变形

从图 10 可以看出，底座整体的最大变形为 0.05mm，发生在与进给导向立柱接触部位及其附近位置，底座其余部位的变形较小。

从上图可以看出，X 方向上最大变形量为 0.02mm，发生在从动轮下方；Y 方向上最大变形量为 0.02mm，发生在从动轮下方；Z 方向上最大变形量为 0.05mm，发生在固定虎钳下方。

整体来看，带锯机底座的部分刚性较好，能基本满足设计要求与使用要求，但其结构存在部分设计冗余。在满足静强度要求的条件电动的前提下，可以考虑对底座结构进行优化设计，对其进行减重设计，减少结构冗余。

3 G4240-70C 带锯床的动态分析

3.1 模态分析方程

模态是物体结构的固有振动特性，物体结构的每个模态都有独特的固有频率和振型。模态分析的振动频率 ω_i 和模态 ϕ_i 由下面的方程计算得出：

$$\left([K]-\omega_i^2[M]\{\phi_i\}\right)=0 \qquad (3)$$

式中：

[K]—刚度矩阵；

[M]—质量矩阵。

研究中，G4240-70C 带锯床零件及整体结构模态分析中，式 (3) 中刚度矩阵 [K] 和质量矩阵 [M] 通常被假设为固定值，这也说明了，结构材料满足小位移理论或能结构材料是线弹性材料，才能用此理论进行分析。模态分析的主要目的是两种，一个是分析物体结构的模态频率，另一个是分析物体结构的频率振型。其主要用于目标物体的动力特性分析提供理论依据。

3.2 G4240-70C 带锯床的模态分析

锯床的模态分析不需要定义载荷施加，其边界条件定义及约束方法与结构静态特性分析相同。去除力的施加，仅保留地脚固定以及 Y 向约束，可得模态分析如图 11。

1 至 4 阶整机频率分析结果，如表 4 所示。

4 结语

根据 G4240-70C 带锯床的基本参数，使用 Solid Works 软件建立了 G4240-70C 数控带锯床的三维模型，并对 G4240-70C 带锯床的三维模型进行简化。在 G4240-70C 带锯床的静态分析中，围绕锯架、立柱和底座等部分展开，在 G4240-70C 带锯床的动态分析中，围绕锯架展开；得到如下结论：

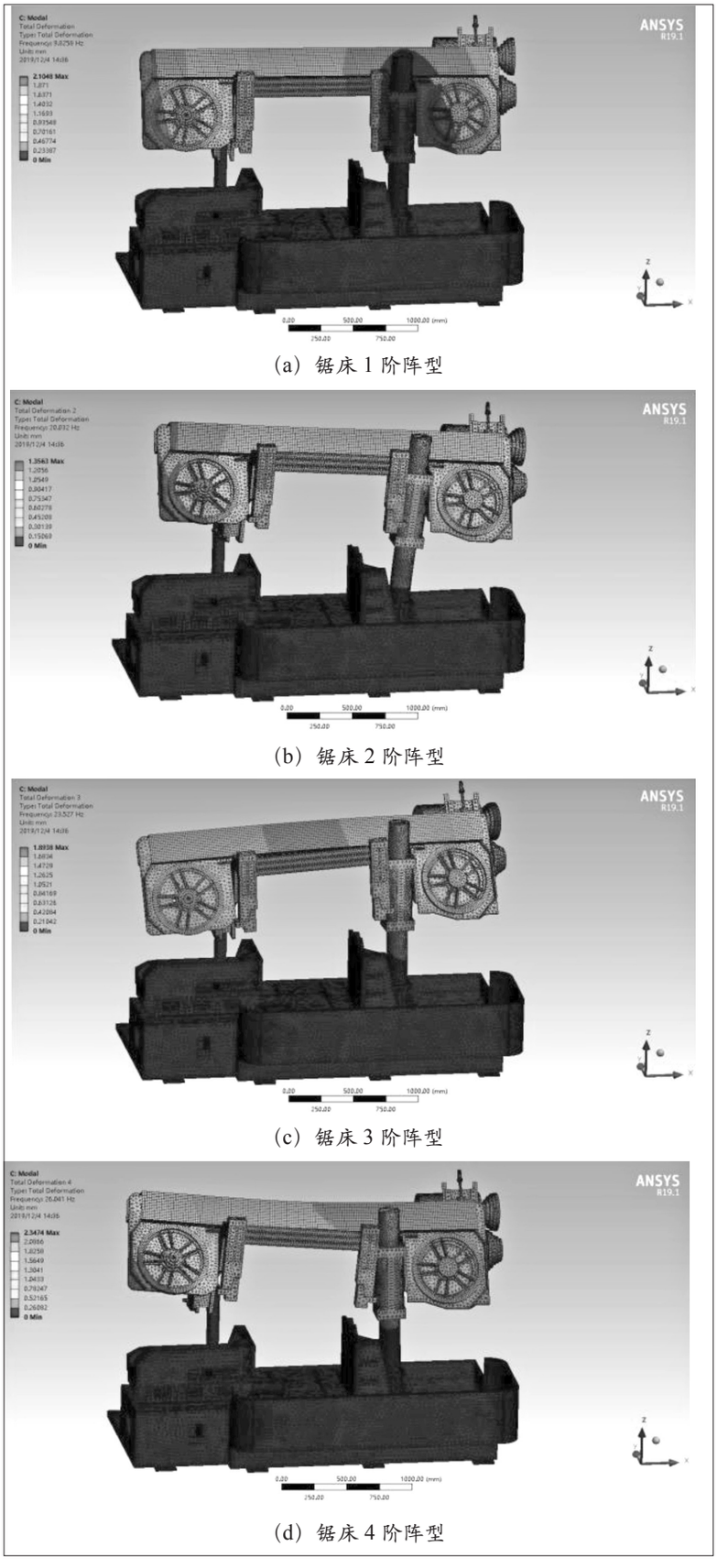
（1）锯架部分

锯架整体刚性较好，在静力学分析中（不计重力），在预定工况下最大变形为 1.08mm，优于上一代产品，但仍有可改进空间。正面划红线筋板可连接起来增强整体刚性，以抵消图 8 中 YZ 轴（锯架局部坐标系）中的弯矩，减小整体

表 4 1 至 4 阶整机频率

阶数	频率（Hz）	振型方向	最大变形处
1 阶	9.83	摆动，最大变形为 2.1	锯架从动锯轮侧边缘
2 阶	20.03	弯曲，最大变形为 1.4	锯架从动锯轮下边缘
3 阶	23.53	扭转，最大变形为 1.9	主电机皮带轮
4 阶	26.04	扭转，最大变形为 2.3	锯架从动锯轮下边缘

1-23 工业设计 9月中 第26期 新加 .indd 6 2022/3/10 21:46:42



（a）锯床 1 阶阵型

（b）锯床 2 阶阵型

（c）锯床 3 阶阵型

（d）锯床 4 阶阵型

图 11 锯床 1 ～ 4 阶模态分析阵型图

变形。

（2）立柱部分

根据图 9 可得，立柱整体刚性较好，无需修改。但是在整体模态分析时，可能需要调整。

（3）底座部分

根据图 10 可得，底座整体刚性较好，无需修改。但是在整体模态分析时，可能需要调整。

参考文献：

[1] 王文慧，巫邵波，史云霞 .GB4230 带锯床送料机构的数控化改造 [J]. 装备制造技术，2020(03):184-186.

[2] 金玉 . 浅谈带锯床安装调试——以 GB4240B 型带锯床为例 [J]. 电子测试 ,2019(24):83-85.

[3] 黎川 .GZK4230 数控带锯床有限元分析及优化设计 [D]. 杭州：杭州电子科技大学，2016(03):6-7.

[4] 黎川 .GZK4230 数控带锯床有限元分析及优化设计 [D]. 杭州：杭州电子科技大学，2016(03):10-11.

[5] 王俊秋 . 残余应力对 H 型钢锯切的影响研究及专用带锯床开发 [D]. 杭州：浙江工业大学，2020(05):71-72/76-77.

作者简介：陈晋（1991.01-），男，汉族，安徽东至人，本科，研究方向：智能制造；丁侠胜（1991.01-），男，汉族，浙江缙云人，本科，研究方向：智能制造；江平（1071.06-），男，汉族，湖南长沙人，本科，研究方向：智能制造。

1-23 工业设计 9月中 第26期 新加 .indd 7 2022/3/10 21:46:42