



# (12)发明专利申请

(10)申请公布号 CN 109376377 A

(43)申请公布日 2019.02.22

(21)申请号 201811041397.3

(22)申请日 2018.09.07

(71)申请人 东南大学

地址 210033 江苏省南京市栖霞区西岗办事处摄山星城齐民东路8号

(72)发明人 蒋书运 朱国振

(74)专利代理机构 南京苏高专利商标事务所  
(普通合伙) 32204

代理人 柏尚春

(51) Int. Cl.

G06F 17/50(2006.01)

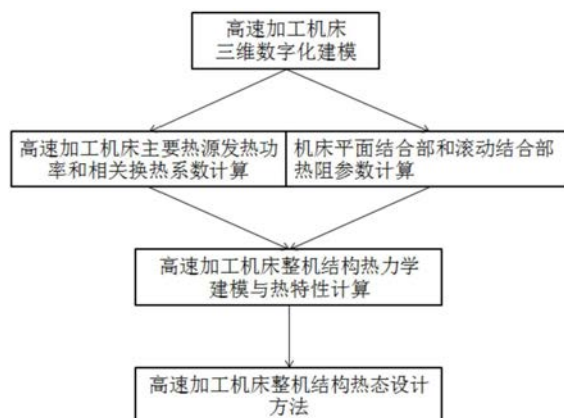
权利要求书3页 说明书7页 附图7页

## (54)发明名称

高速加工机床整机结构热力学建模与热设计方法

## (57)摘要

本发明提供了一种高速加工机床整机结构热力学建模与热设计方法,其包括以下步骤:步骤1:高速加工机床三维数字化建模;步骤2:高速加工机床主要热源发热功率和相关换热系数计算;步骤3:机床平面结合部热阻参数计算;步骤4:高速加工机床整机结构热力学建模与热特性计算;步骤5:高速加工机床整机结构热态设计方法。采用本发明提供的高速加工机床整机结构热力学设计方法,能够大幅提高高速加工机床整机结构热力学建模精度,缩短设计周期。不仅便于高速加工机床的正向设计,而且提高一次设计成功率。



1. 一种高速加工机床整机结构热力学建模与热设计方法,其特征在于该方法包括以下步骤:

步骤1:高速加工机床三维数字化建模:采用三维数字化软件,将拟设计的高速加工机床的初步结构转化为三维CAD模型;

步骤2:高速加工机床主要热源发热功率和相关换热系数计算:采用Palmgren经验公式计算滚动轴承发热功率,采用传热学理论计算相关部位对流换热系数;为高速加工机床整机热态建模提供基础数据;

步骤3:机床平面结合部热阻参数计算:采用分形几何理论,计算机床平面结合部接触热阻;

步骤4:高速加工机床整机结构热力学建模与热特性计算:建立含主要热源与典型结合部接触热阻的高速加工机床的整机热力学模型;开展机床关键零部件、水冷系统物理参数对高速加工机床整机热力学灵敏度分析与计算,寻找影响机床热力学性能的薄弱环节;

步骤5:高速加工机床整机结构热态设计方法:针对步骤4寻找到的影响机床热力学性能的薄弱环节,以提高机床热态性能为目标,提出高速加工机床整机结构动态设计方法。

2. 根据权利要求1所述的高速加工机床整机结构热力学建模与热设计方法,其特征在于,所述步骤1:高速加工机床三维数字化建模,采用三维数字化软件Solidworks或者Pro-E,将拟设计的高速加工机床的初步结构转化为三维CAD模型。

3. 根据权利要求1所述的高速加工机床整机结构热力学建模与热设计方法,其特征在于,所述步骤2:高速加工机床主要热源发热功率和相关换热系数计算,分为以下三步:

步骤2a:高速加工机床电主轴与工件主轴发热功率计算

1) 滚动轴承发热功率 $Q_1$ 计算,

$$Q_1 = 1.047 \times 10^{-4} (M_0 + M_1) \cdot n \quad (1)$$

$$M_0 = \begin{cases} 10^{-7} f_0 (vn)^{\frac{2}{3}} d_m^3 & vn > 2000 \text{cst/min} \\ 160 \times 10^{-7} f_0 d_m^3 & vn < 2000 \text{cst/min} \end{cases} \quad (2)$$

$$M_1 = f_1 p_1 d_m \quad (3)$$

式中: $M_0$ 为润滑剂的流体动力损耗, $M_1$ 为弹性滞后和局部差动滑动的摩擦损耗, $n$ 为轴承转速,r/min; $d_m$ 为轴承中径,mm; $f_0$ 为与轴承类型和润滑方式有关的经验常数, $v$ 为在工作温度下润滑剂的运动粘度,cst, $f_1$ 为与轴承类型和所受负荷有关的参数; $p_1$ 为确定轴承摩擦力矩的计算负荷N;

2) 电主轴电机转子、定子发热功率计算

$P_0$ 为额定功率,电机功率系数 $\alpha$ ,效率 $\eta$ ,则热损耗 $Q = P_0 \alpha (1 - \eta)$ ,其中热损耗2/3分布在电机转子,热损耗1/3分布在电机定子;

3) 工件主轴带传动发热功率 $Q_{\text{belt}}$ 计算

$$Q_{\text{belt}} = P_{\text{beltin}} (1 - \eta) \quad (3)$$

式中: $P_{\text{beltin}}$ 带传动输入功率W, $\eta$ 为带传动效率,带传动的热损耗一半传递到皮带上,一半传递到带轮上,且主动轮和从动轮上的摩擦生热按两带轮的皮带包角等比例分配;

步骤2b:高速加工机床电主轴与工件主轴对流换热系数计算

换热系数 $\alpha$ 和努赛尔数Nu的关系:

$$\alpha = Nu_f \frac{\lambda}{D} \quad (4)$$

式中： $\lambda$ 为流体导热系数， $Nu_f$ 为努赛尔数， $D$ 为几何特征的定型尺寸；

1) 电主轴内置电机定子冷却水套强制对流换热系数 $h_1$ 计算

$$h_1 = Nu_f \frac{\lambda}{D} = 1.86 \left( Re_f \cdot Pr_f \cdot \frac{D}{L} \right)^{1/3} \quad (5)$$

式中： $\lambda$ 为流体导热系数， $Nu_f$ 为努赛尔数； $Pr_f$ 为普朗特数， $Re_f$ 为雷诺数， $L$ 为冷却水流道长度；

2) 电主轴电机定子内表面与转子外表面的传热系数 $h_2$ 计算

$$h_2 = Nu \frac{\lambda}{D} = 0.23 \left( \frac{\sigma}{r_1} \right)^{0.25} Re^{0.5} \quad (6)$$

式中： $r_1$ 为转子外径(m)； $\sigma$ 为定、转子间气隙(m)；

3) 工件主轴旋转表面与空气间的对流换热系数 $h_3$ 计算

$$h_3 = Nu \frac{\lambda}{D} = 0.133 Re^{2/3} Pr^{1/3} \quad (7)$$

4) 工件主轴带轮对流换热系数 $h_4$ 计算

$$h_4 = 9.7 + 5.33 \times U^{0.8} \quad (8)$$

式中： $h_4$ -对流换热系数 $W/(m^2 \cdot K)$ ； $U$ -带轮表面线速度 $m/s$ ；

5) 主轴外表面与空气间的对流换热系数，取复合传热系数为 $h_5 = 9.7 W/(m^2 \cdot K)$

步骤2c) 切削液“二次热源”的建模方法

切削液流道部分的对流换热系数 $Nu$ 计算：

$$Nu = \begin{cases} 0.644 Re^{1/2} Pr^{1/2} & Re < 10^5 \text{ (层流)} \\ 0.037 Re^{4/5} Pr^{1/3} & Re > 10^5 \text{ (紊流)} \end{cases} \quad (9)$$

切削液溅到的的表面的对流换热系数：将切削液流道对流系数乘以0.6，得到该表面的对流系数；式(9)的定性温度取流体和壁面的平均温度 $T_m$ ，定型尺寸取流体流过的壁面长度 $L$ 。

4. 根据权利要求1所述的高速加工机床整机结构热力学建模与热设计方法，其特征在于，所述步骤3：高速加工机床主要结合部热阻参数计算，分为以下2步：

步骤3a) 固定结合面接触热阻 $R_c$ 的计算

总的接触热阻 $TCR$ 为

$$R = \left[ \sum_{i=1}^{N(a'_s)} R_{ci}^{-1} \right]^{-1} \quad (10)$$

式中： $R_{ci}$ 为第 $i$ 个微凸体接触热阻。

无量纲总接触热阻为

$$R^* = \left[ \sum_{i=1}^{N(a'_s)} \left( \frac{\sqrt{\pi} \left( 1 - A_r^{*1/2} \right)^{1.5}}{2(a_i^*)^{1/2}} \right)^{-1} \right]^{-1} \quad (11)$$

式中： $R_{ci}$ 为第 $i$ 个微凸体接触热阻， $A_r^*$ 为相对面积接触比， $a_i^*$ 为第 $i$ 个微凸体的截面积， $N(a'_s)$ 为接触点数目；

步骤3b) 轴承外圈与轴承座间的接触热阻计算

轴承接触热导为,

$$\Pi = \left( \frac{h_{ring}}{\lambda_{ring}} + \frac{h_{gap}}{\lambda_{gap}} \right)^{-1} A \quad (12)$$

式中： $\Pi$ 为接触热导(W/K)； $h_{ring}$ 、 $h_{gap}$ 分别为轴承外圈、外圈与轴承座平均间隙厚度m； $\lambda_{ring}$ 、 $\lambda_{gap}$ 分别为轴承外圈和间隙中空气的导热系数W/(m<sup>2</sup>·K)，A为轴承套圈的圆柱形外表面面积；

平均间隙 $h_{gap}$ 可由下式计算

$$h_{gap} = h_{gap0} - (T_{ring} - T_{housing}) a' \cdot r_{housing} \quad (13)$$

式中： $h_{gap0}$ 为轴承外圈与轴承座之间的原始间隙，m； $a'$ 为线性膨胀系数，对于钢材可取其值为 $11.7 \times 10^{-6}/K$ 。

5. 根据权利要求1所述的高速加工机床整机结构热力学建模与热设计方法，其特征在于，所述步骤4：高速加工机床整机结构热力学建模与热特性计算，建立含主要热源与典型结合部接触热阻的高速加工机床的整机热力学模型；开展高速加工机床主要热源的发热功率、机床关键零部件、水冷系统物理参数对高速加工机床整机热力学性能的灵敏度分析计算，寻找影响机床热性能的薄弱环节与主要因素。

6. 根据权利要求5所述的高速加工机床整机结构热力学建模与热设计方法，其特征在于，所述主要热源为高速电主轴、工件主轴、切削液二次热源；典型结合部为平面结合部、滚动结合部。

7. 根据权利要求5所述的高速加工机床整机结构热力学建模与热设计方法，其特征在于，所述高速加工机床整机热力学性能包括温度场与热位移场。

8. 根据权利要求1所述的高速加工机床整机结构热力学建模与热设计方法，其特征在于，所述步骤5：高速加工机床整机结构热态设计方法，围绕步骤4发现的影响机床热性能的薄弱环节与主要因素，以降低加工过程中的热变形、提高加工精度为设计目标，修改机床主要零部件的结构参数，重新设计相关物理参数，完成高速加工机床热设计。

## 高速加工机床整机结构热力学建模与热设计方法

### 技术领域

[0001] 本发明涉及一种高速加工机床整机结构热力学建模与热设计方法,属于数控机床设计领域。

### 背景技术

[0002] 数控机床正朝着高速与高精度方向发展,产业界对高速加工机床的热态性能要求越来越高。建立高速加工机床整机热力学模型,开展整机热力学分析,继而完成机床的热力学设计,是高速机床研发的首要技术环节。

[0003] 建立高精度的高速加工机床热力学模型,是开展高速加工机床热力学设计的理论基础。近年来,国内外学者围绕着机床热力学建模与热特性计算,开展了大量的研究,概括起来,其主要研究工作包括:

[0004] ①电主轴热力学:考虑主轴中滚动轴承和内置电机转子、定子作为主要热源,计算主轴各表面的换热系数,建立电主轴的热力学模型,通过有限元法,计算出电主轴的温度场和热位移场。

[0005] ②机床结合部热阻:建立机床主要结合面热阻,以机床床身为研究对象,建立机床局部热力学模型,通过有限元法,计算考虑热阻的机床床身温度场和热位移场。

[0006] 应该看出,以上两种机床热力学单一因素建模与设计方法,均不能满足高速加工机床的设计要求。从机床的正向热设计角度出发,应该建立考虑主要热源(高速电主轴、工件主轴、切削液二次热源)与结合部(平面结合部、滚动结合部)接触热阻的高速加工机床的整机热力学模型,基于该模型,可以开展高速加工机床热力学特性分析,继而提出高速加工机床整机热设计,提升机床的热态性能。

### 发明内容

[0007] 技术问题:针对高速加工机床整机热力学建模与热设计中存在的问题,本发明专利提出了高速加工机床主要热源(高速电主轴、工件主轴、切削液二次热源)与典型结合部(平面结合部、滚动结合部)接触热阻的建模方法,继而建立了高速加工机床的整机热力学模型;基于高速加工机床整机热力学灵敏度分析结果,提出了高速加工机床整机热力学设计方法。本发明专利不仅便于高速加工机床正向设计,而且提高机床热态设计准确性和一次设计成功率。

[0008] 技术方案:本发明的一种高速加工机床整机结构热力学建模与热设计方法包括以下步骤:

[0009] 步骤1:高速加工机床三维数字化建模:采用三维数字化软件,将拟设计的高速加工机床的初步结构转化为三维CAD模型;

[0010] 步骤2:高速加工机床主要热源发热功率和相关换热系数计算:采用Palmgren经验公式计算滚动轴承发热功率,采用传热学理论计算相关部位对流换热系数;为高速加工机床整机热态建模提供基础数据;

[0011] 步骤3:机床平面结合部热阻参数计算:采用分形几何理论,计算机床平面结合部接触热阻;

[0012] 步骤4:高速加工机床整机结构热力学建模与热特性计算:建立含主要热源与典型结合部接触热阻的高速加工机床的整机热力学模型;开展机床关键零部件、水冷系统物理参数对高速加工机床整机热力学灵敏度分析与计算,寻找影响机床热力学性能的薄弱环节;

[0013] 步骤5:高速加工机床整机结构热态设计方法:针对步骤4寻找到的影响机床热力学性能的薄弱环节,以提高机床热态性能为目标,提出高速加工机床整机结构动态设计方法。

[0014] 所述步骤1:高速加工机床三维数字化建模,采用三维数字化软件Solidworks或者Pro-E,将拟设计的高速加工机床的初步结构转化为三维CAD模型。

[0015] 所述所述步骤2:高速加工机床主要热源发热功率和相关换热系数计算,分为以下三步:

[0016] 步骤2a:高速加工机床电主轴与工件主轴发热功率计算

[0017] 1) 滚动轴承发热功率 $Q_1$ 计算,

$$[0018] \quad Q_1 = 1.047 \times 10^{-4} (M_0 + M_1) \cdot n \quad (1)$$

$$[0019] \quad M_0 = \begin{cases} 10^{-7} f_0 (vn)^{\frac{2}{3}} d_m^3 & vn > 2000 \text{cst/min} \\ 160 \times 10^{-7} f_0 d_m^3 & vn < 2000 \text{cst/min} \end{cases} \quad (2)$$

$$[0020] \quad M_1 = f_1 p_1 d_m \quad (3)$$

[0021] 式中: $M_0$ 为润滑剂的流体动力损耗, $M_1$ 为弹性滞后和局部差动滑动的摩擦损耗, $n$ 为轴承转速,r/min; $d_m$ 为轴承中径,mm; $f_0$ 为与轴承类型和润滑方式有关的经验常数, $v$ 为在工作温度下润滑剂的运动粘度,cst, $f_1$ 为与轴承类型和所受负荷有关的参数; $p_1$ 为确定轴承摩擦力矩的计算负荷 $N$ ;

[0022] 2) 电主轴电机转子、定子发热功率计算

[0023]  $P_0$ 为额定功率,电机功率系数 $\alpha$ ,效率 $\eta$ ,则热损耗 $Q = P_0 \alpha (1 - \eta)$ ,其中热损耗2/3分布在电机转子,热损耗1/3分布在电机定子;

[0024] 3) 工件主轴带传动发热功率 $q_{\text{belt}}$ 计算

$$[0025] \quad q_{\text{belt}} = P_{\text{beltin}} (1 - \eta) \quad (3)$$

[0026] 式中: $P_{\text{beltin}}$ 带传动输入功率 $W$ , $\eta$ 为带传动效率,带传动的热损耗一半传递到皮带上,

[0027] 一半传递到带轮上,且主动轮和从动轮上的摩擦生热按两带轮的皮带包角等比例分配;

[0028] 步骤2b:高速加工机床电主轴与工件主轴对流换热系数计算

[0029] 换热系数 $\alpha$ 和努赛尔数 $Nu$ 的关系:

$$[0030] \quad \alpha = Nu_f \frac{\lambda}{D} \quad (4)$$

[0031] 式中: $\lambda$ 为流体导热系数, $Nu_f$ 为努赛尔数, $D$ 为几何特征的定型尺寸;

[0032] 1) 电主轴内置电机定子冷却水套强制对流换热系数 $h_1$ 计算

[0033] 
$$h_1 = Nu_f \frac{\lambda}{D} = 1.86 \left( Re_f \cdot Pr_f \cdot \frac{D}{L} \right)^{1/3} \quad (5)$$

[0034] 式中： $\lambda$ 为流体导热系数， $Nu_f$ 为努赛尔数； $Pr_f$ 为普朗特数， $Re_f$ 为雷诺数， $L$ 为冷却水流道长度；

[0035] 2) 电主轴电机定子内表面与转子外表面的传热系数 $h_2$ 计算

[0036] 
$$h_2 = Nu \frac{\lambda}{D} = 0.23 \left( \frac{\sigma}{r_1} \right)^{0.25} Re^{0.5} \quad (6)$$

[0037] 式中： $r_1$ 为转子外径(m)； $\sigma$ 为定、转子间气隙(m)；

[0038] 3) 工件主轴旋转表面与空气间的对流换热系数 $h_3$ 计算

[0039] 
$$h_3 = Nu \frac{\lambda}{D} = 0.133 Re^{2/3} Pr^{1/3} \quad (7)$$

[0040] 4) 工件主轴带轮对流换热系数 $h_4$ 计算

[0041] 
$$h_4 = 9.7 + 5.33 \times U^{0.8} \quad (8)$$

[0042] 式中： $h_4$ —对流换热系数 $W/(m^2 \cdot K)$ ； $U$ —带轮表面线速度 $m/s$ ；

[0043] 5) 主轴外表面与空气间的对流换热系数，取复合传热系数为 $h_5 = 9.7 W/(m^2 \cdot K)$

[0044] 步骤2c) 切削液“二次热源”的建模方法

[0045] 切削液流道部分的对流换热系数 $Nu$ 计算：

[0046] 
$$Nu = \begin{cases} 0.644 Re^{1/2} Pr^{1/2} & Re < 10^5 \text{ (层流)} \\ 0.037 Re^{4/5} Pr^{1/3} & Re > 10^5 \text{ (紊流)} \end{cases} \quad (9)$$

[0047] 切削液溅到的表面的对流换热系数：将切削液流道对流系数乘以0.6，得到该表面的对流系数；式(9)的定性温度取流体和壁面的平均温度 $T_m$ ，定型尺寸取流体流过的壁面长度 $L$ 。

[0048] 所述步骤3：高速加工机床主要结合部热阻参数计算，分为以下2步：

[0049] 步骤3a) 固定结合面接触热阻 $R_c$ 的计算

[0050] 总的接触热阻 $TCR$ 为

[0051] 
$$R = \left[ \sum_{i=1}^{N(a'_s)} R_{ci}^{-1} \right]^{-1} \quad (10)$$

[0052] 式中： $R_{ci}$ 为第 $i$ 个微凸体接触热阻。

[0053] 无量纲总接触热阻为

[0054] 
$$R^* = \left[ \sum_{i=1}^{N(a'_s)} \left( \frac{\sqrt{\pi} \left( 1 - A_r^{*2} \right)^{1.5}}{2(a_i^*)^2} \right)^{-1} \right]^{-1} \quad (11)$$

[0055] 式中： $R_{ci}$ 为第 $i$ 个微凸体接触热阻， $A_r^*$ 为相对面积接触比， $a_i^*$ 为第 $i$ 个微凸体的截面积， $N(a'_s)$ 为接触点数目；

[0056] 步骤3b) 轴承外圈与轴承座间的接触热阻计算

[0057] 轴承接触热导为，

[0058] 
$$\Pi = \left( \frac{h_{ring}}{\lambda_{ring}} + \frac{h_{gap}}{\lambda_{gap}} \right)^{-1} A \quad (12)$$

[0059] 式中： $\Pi$ 为接触热导( $W/K$ )； $h_{ring}$ 、 $h_{gap}$ 分别为轴承外圈、外圈与轴承座平均间隙厚

度 $m$ ;  $\lambda_{ring}$ 、 $\lambda_{gap}$ 分别为轴承外圈和间隙中空气的导热系数 $W/(m^2 \cdot K)$ ,  $A$ 为轴承套圈的圆柱形外表面面积;

[0060] 平均间隙 $h_{gap}$ 可由下式计算

$$[0061] \quad h_{gap} = h_{gap0} - (T_{ring} - T_{housing}) a' \cdot r_{housing} \quad (13)$$

[0062] 式中: $h_{gap0}$ 为轴承外圈与轴承座之间的原始间隙, $m$ ;  $a'$ 为线性膨胀系数,对于钢材可取其值为 $11.7 \times 10^{-6}/K$ 。

[0063] 所述步骤4:高速加工机床整机结构热力学建模与热特性计算,建立含主要热源与典型结合部接触热阻的高速加工机床的整机热力学模型;开展高速加工机床主要热源的发热功率、机床关键零部件、水冷系统物理参数对高速加工机床整机热力学性能的灵敏度分析计算,寻找影响机床热性能的薄弱环节与主要因素。

[0064] 所述主要热源为高速电主轴、工件主轴、切削液二次热源;典型结合部为平面结合部、滚动结合部。

[0065] 所述高速加工机床整机热力学性能包括温度场与热位移场。

[0066] 所述步骤5:高速加工机床整机结构热态设计方法,围绕步骤4发现的影响机床热性能的薄弱环节与主要因素,以降低加工过程中的热变形、提高加工精度为设计目标,修改机床主要零部件的结构参数,重新设计相关物理参数,完成高速加工机床热设计。

[0067] 有益效果:本发明提供的高速加工机床整机结构热力学建模与热设计方法,是基于完善的高速加工机床热力学模型与系统的热力学分析计算结果而提出的。因此采用本发明“高速加工机床整机结构热力学建模与热设计方法”,可以提高机床热态设计准确性和一次设计成功率。

## 附图说明

[0068] 图1本发明专利的设计步骤与内容,

[0069] 图2高速加工机床三维数字化模型,

[0070] a为内圆复合磨床3D-CAD模型,

[0071] b为整机有限元分析模型,

[0072] 图3无量纲接触热阻 $R^*$ 在不同参数影响下计算结果,

[0073] a为无量纲接触热阻与接触载荷在不同 $G^*$ 下的关系( $E/\sigma=106, D=1.3$ ),

[0074] b为无量纲接触热阻与接触载荷在不同 $D$ 下的关系( $E/\sigma=106, G=10^{-7}$ ),

[0075] c为无量纲接触热阻与接触载荷在不同 $E/\sigma$ 下的关系( $D=1.3, G=10^{-7}$ ),

[0076] d为无量纲接触面积与接触热阻在不同接触变形情形下的关系,

[0077] 图4整机额定工况下的温度场分布云图,

[0078] a为等距测视角的整机额定工况温度场分布云图,

[0079] b为背视图视角的整机额定工况温度场分布云图,

[0080] 图5整机额定工况下的热位移场分布云图,

[0081] a为等距测视角的整机额定工况热位移场分布云图,

[0082] b为背视图视角的整机额定工况热位移场分布云图,

[0083] 图6热设计后的整机温度场分布云图,

[0084] a为俯视图视角的热设计后的整机温度场分布云图,



[0085] b为背视图视角的热设计后的整机温度场分布云图。

### 具体实施方式

[0086] 下面结合一个实施例(精密数控内圆复合磨床),对本发明的高速加工机床整机结构热力学设计方法作进一步详细说明。

[0087] 图1给出了本发明高速加工机床整机结构热力学设计方法的具体内容,包括如下步骤:步骤1:高速加工机床三维数字化建模

[0088] 采用三维建模软件(如Solidworks)建立精密数控内圆复合磨床的三维数字化(CAD、CAE)模型,如图2所示。

[0089] 步骤2:高速加工机床主要热源发热功率计算

[0090] 步骤2a:采用公式(1)-(3),计算高速加工机床磨削电主轴滚动轴承发热功率 $Q$ ,在不同温度情况下,计算结果如表1所示

[0091] 表1内圆磨削电主轴轴承生热率 $q$ 与温度的对应关系( $q=Q/V$ )

温度(°C)	7008C 轴承生热率(W/m <sup>3</sup> )(×10 <sup>6</sup> )			7208 轴承生热率(W/m <sup>3</sup> )(×10 <sup>6</sup> )	
	1#-4# (Fr=152.6)	5#-6#(Fr=52.8)	7#-8#(Fr=0)	9#-10#(Fr=0)	
25	3.18	3.17	3.17	2.29	
30	2.91	2.91	2.90	2.10	
[0093] 35	2.52	2.51	2.51	1.81	
40	2.15	2.15	2.15	1.55	
50	1.76	1.75	1.75	1.26	

[0094] 采用公式(1)-(3),计算高速加工机床工件主轴滚动轴承发热功率 $Q$ ,在不同温度情况下,得到不同温度下轴承生热率,见表2所示。

[0095] 表2轴承生热率与温度的对应关系( $q=Q/V$ )

轴承类别	生热率(W/m <sup>3</sup> )		
	25°C	30°C	40°C
[0096] NN3020ASK	31135.84	21528.05	19600.99
234420M	33403.97	23628.73	21673.69
B7016C	31180.01	23087.01	21518.60

[0097] 电主轴内置电机的额定功率为16kW,正常工作状态下功率系数为0.9,功率损耗为1.5kW。假设该损耗全部转化成热量,其中2/3(1kW)由定子发出,1/3(0.5kW)由转子发出,则电机定、转子生热率分别为254250W/m<sup>3</sup>、255056W/m<sup>3</sup>。

[0098] 带传动的效率为96%,带传动输入功率 $P_{beltin}$ 为可倾瓦动压轴承和推力滑动轴承等的摩擦损耗功率,为5.5kW,工件主轴上从动带轮的摩擦热损( $q_{belt}$ )为43.86W。

[0099] 步骤2b:高速加工机床电主轴与工件主轴对流换热系数计算

[0100] 采用公式(5)计算强制冷却水对流换热系数 $h_1=13719W/(m^2 \cdot K)$

[0101] 采用公式(6)电机内置转子、定子对流换热系数 $h_2=116.2W/(m^2 \cdot K)$

[0102] 采用公式(7)工件主轴旋转表面与空气间的对流换热系数计算 $h_3=100W/(m^2 \cdot K)$

[0103] 根据公式(8),皮带轮直径为245mm、200mm和144mm的径向表面所对应的对流换热系数分别为81W/(m<sup>2</sup>·K)、70W/(m<sup>2</sup>·K)和56W/(m<sup>2</sup>·K);砂轮主轴直径为95mm和56mm的径向表面所对应的对流换热系数分别为43W/(m<sup>2</sup>·K)和31W/(m<sup>2</sup>·K)

[0104] 主轴外表面与空气间的对流换热系数,取复合传热系数为 $h_5=9.7W/(m^2 \cdot K)$

[0105] 步骤2c:采用公式(9)计算高速加工机床切削液作为“二次热源”相关对流换热系数计算,额定工况下切削液流量100L/min。主要表面的对流换热系数见表3所示:

[0106] 表3床身主要表面的对流换热系数

项目	对流换热系数 $\alpha(W/m^2 \cdot K^{-1})$
切削液流道前段	2985.3
切削液流道末段	2618.1
切削液溅到的表面	1560
自然对流换热面	2~10

[0109] 步骤3:机床平面结合部热阻参数计算

[0110] 步骤3a:采用公式(10)(11)计算总的接触热阻R和无量纲接触热阻 $R^*$ ,计算结果如图3所示。

[0111] 步骤3b:采用公式(12)计算轴承外圈与轴承座间的接触热阻,对于普通主轴轴承(取4级加工精度),取 $h_{ring}=5 \times 10^{-6}m$ , $\lambda_{ring}=24W/(m \cdot K)$ , $\lambda_{gap}=2.84 \times 10^{-2}W/(m \cdot K)$ ,则主轴轴承与配合面的接触系数见表4所示。

[0112] 表4主轴轴承与配合面间的接触系数h(单位: $W/m^2 \cdot K$ )

	7008C 轴承	7208C 轴承
内圈-轴颈	4800	4800
外圈-轴承座	3000	2024

[0114] 步骤4:高速加工机床整机结构热力学建模与热特性计算

[0115] 本实施例,内圆磨削孔径为150mm,砂轮直径为80mm。将内圆磨削电主轴、床头箱和切削液等热源,全部施加于机床热力学分析模型,计算得到整机在额定工况下的温度场分布云图,见图4。

[0116] 整机在额定工况下的热位移场分布云图,见图5,图中黑色网格表示未发生热变形时的轮廓。

[0117] 额定工况下,整机主要部位的热位移,列于表5。

[0118] 表5整机在额定工况下各构件平均热位移

项目	位移( $\mu m$ )			
	X 向	Y 向	Z 向	$\sqrt{X^2 + Y^2 + Z^2}$
工件端面	0.99	1.94	2.25	3.23
内圆砂轮端面	-74.12	131.82	-1.04	151.29
金刚笔	9.53	21.22	-19.18	30.15
床头箱主轴端面	-0.68	4.04	-2.07	5.05

[0120] 经换算,整机热变形引起的内孔和锥面磨削误差为 $43.30\mu m$ 。

[0121] 步骤5:高速加工机床整机结构热态设计方法

[0122] 针对步骤4分析结果,本实施例对机床结构进行改进设计,将与流道尺寸相同的平板覆盖在流道上,使切削液不直接与床身接触,减少传递给床身热量,进而减少床身热变

形,其主要部位的热位移列于表6。

[0123] 表6热设计之后各构件的平均热位移

项目	位移( $\mu\text{m}$ )			
	X 向	Y 向	Z 向	$\sqrt{X^2 + Y^2 + Z^2}$
[0124] 工件端面	7.60	-2.68	0.85	8.11
内圆砂轮端面	-95.97	86.69	-14.99	130.22
金刚笔 1	0.25	-0.06	0.33	0.42
床头箱主轴端面	5.33	3.10	-2.48	6.66

[0125] 经热设计之后,整机热变形引起的内孔和锥面磨削误差为 $1.15\mu\text{m}$ 。

[0126] 由设计结果看,在磨削孔径为150mm,内圆磨削砂轮直径为80mm状态下,对磨床进行热设计前、后的加工热误差对比,见表7。可以看出,采用本发明专利“高速加工机床整机结构热力学建模与热设计方法”,可以大幅度提高机床的磨削精度。

[0127] 表7热设计前后加工精度对比

内圆磨削	
[0128] 原模型( $\mu\text{m}$ )	43.3
改进后模型 ( $\mu\text{m}$ )	1.2
优化比例(%)	97.0

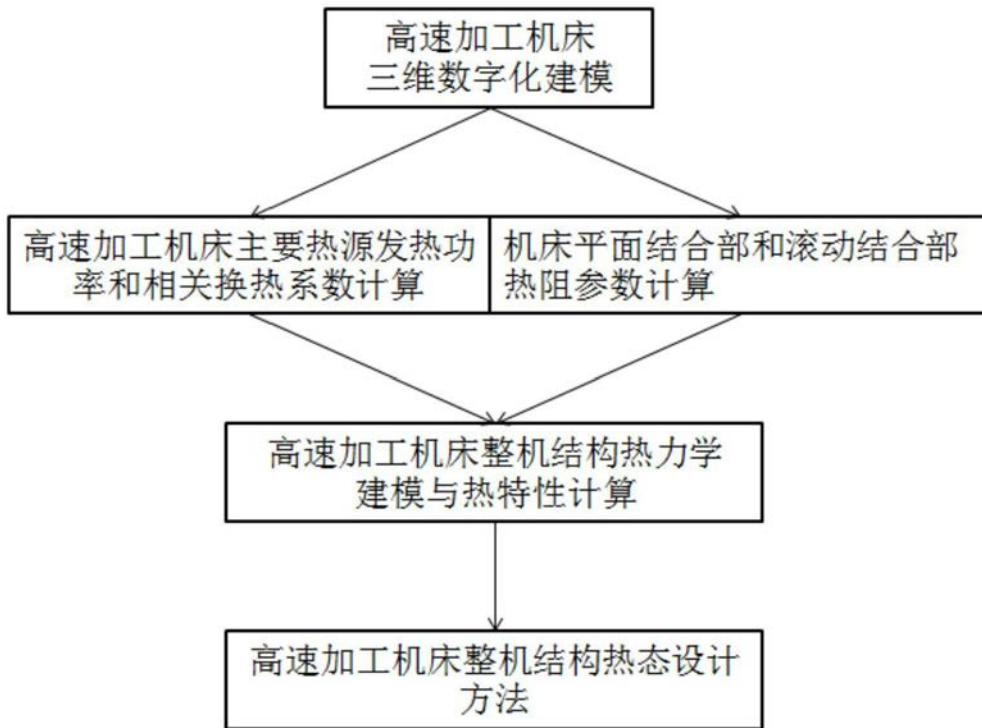
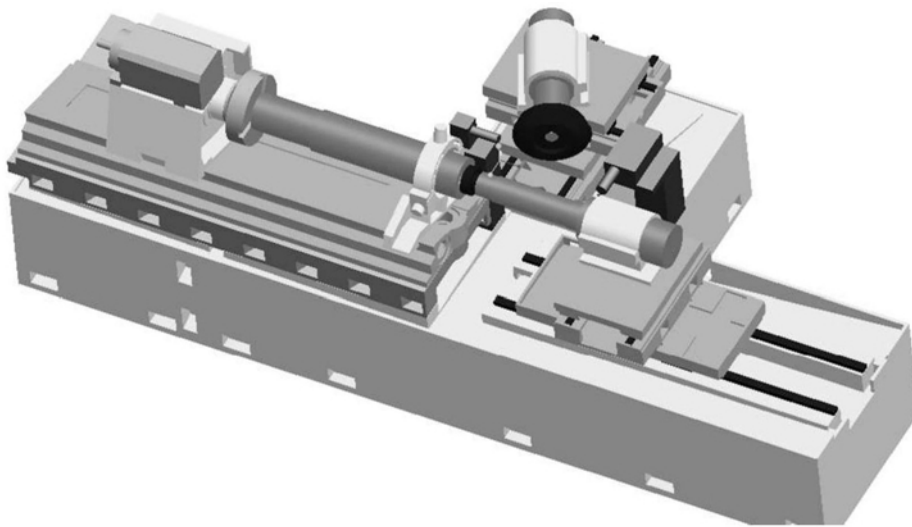
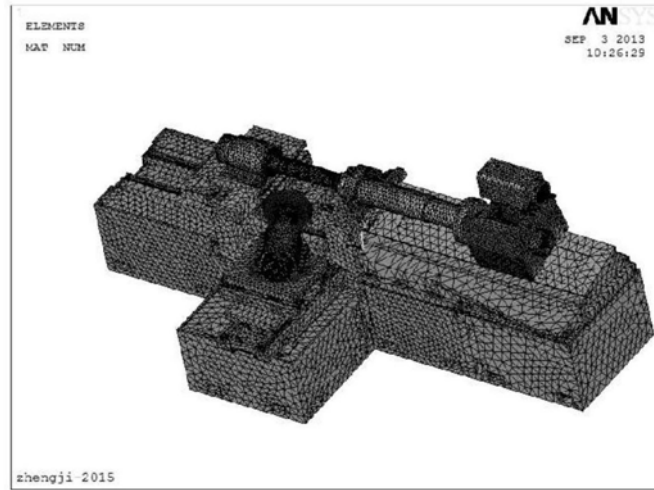


图1

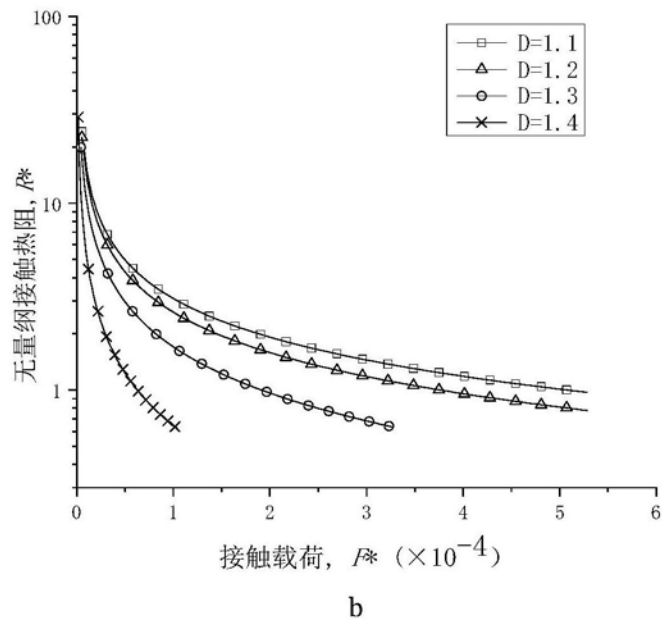
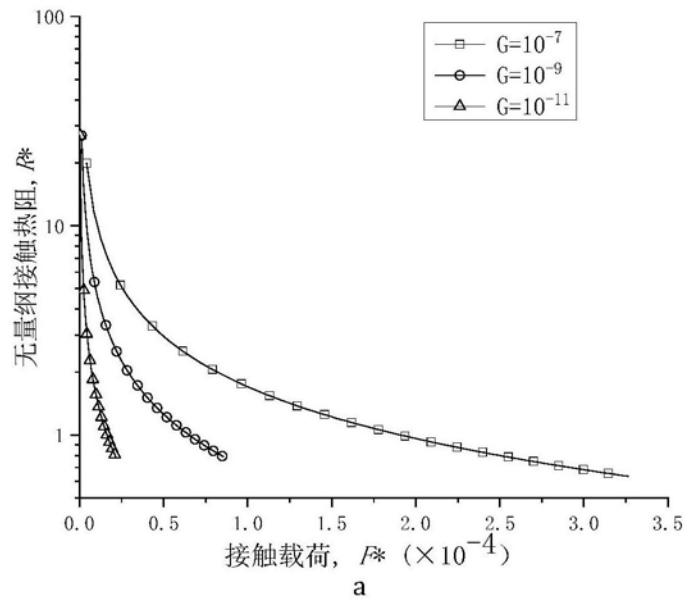


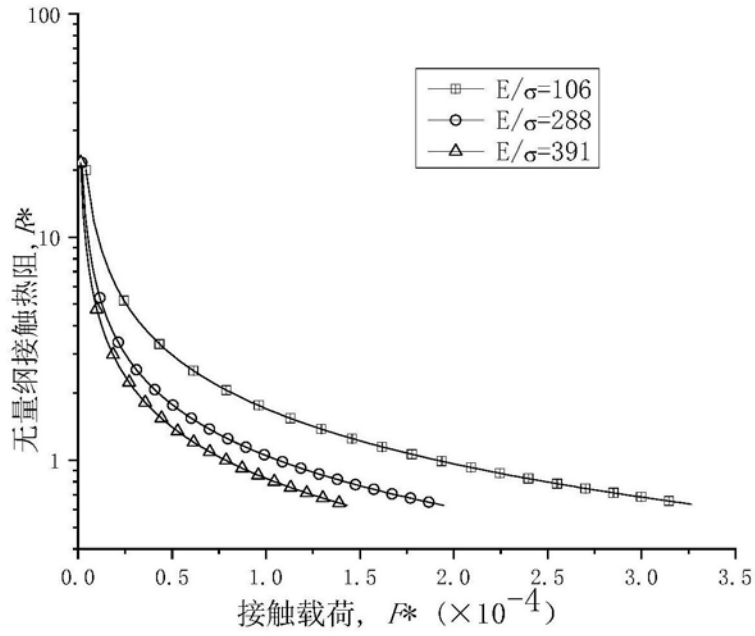
a



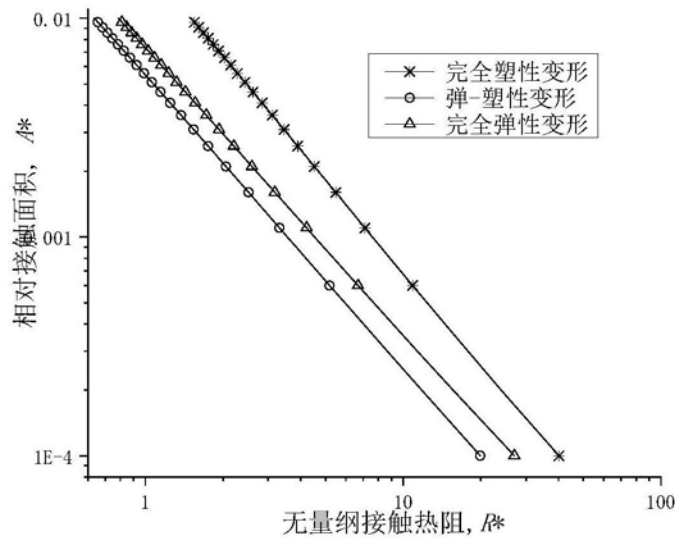
b

图2



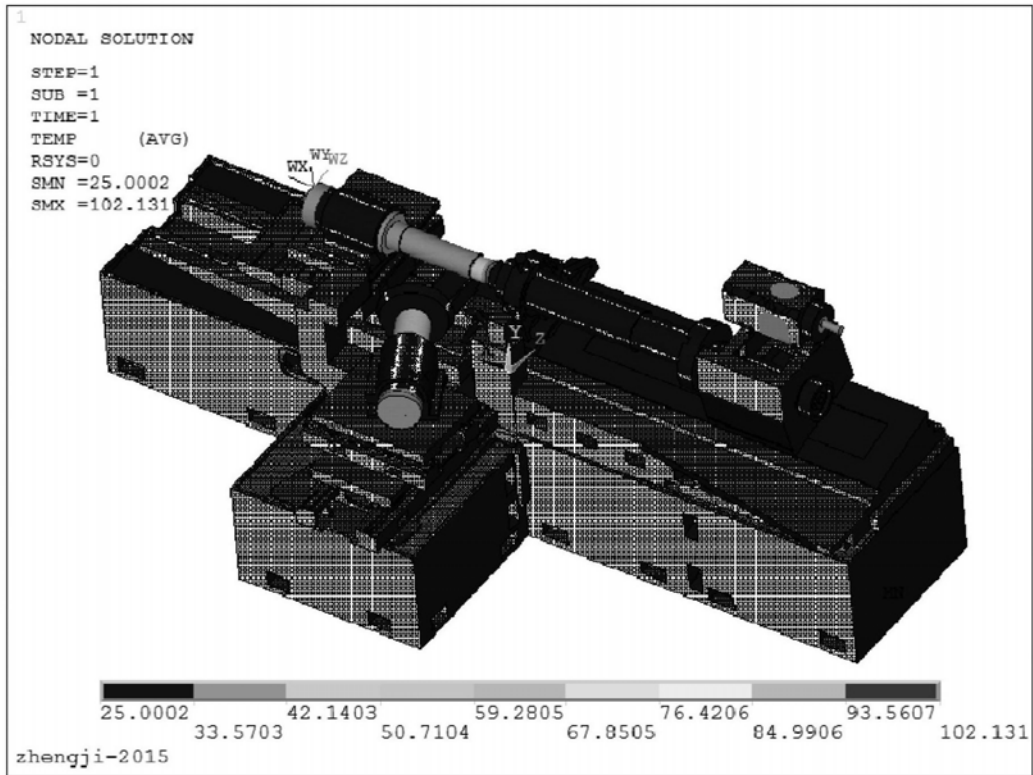


c

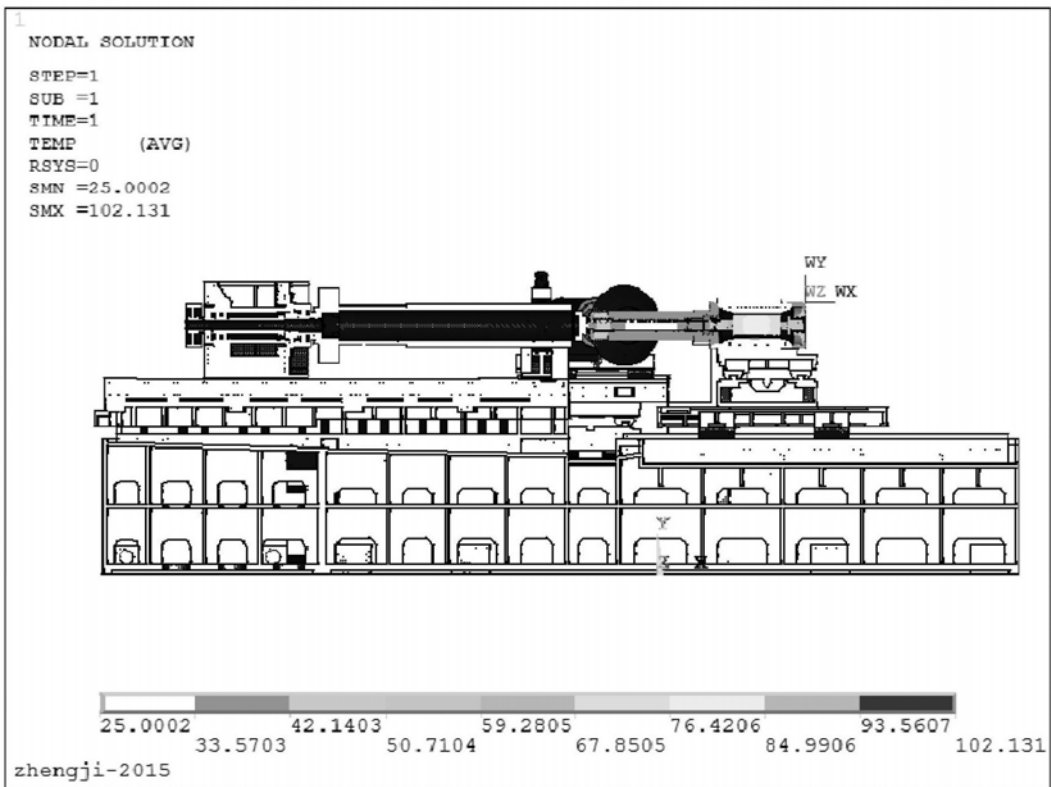


d

图3



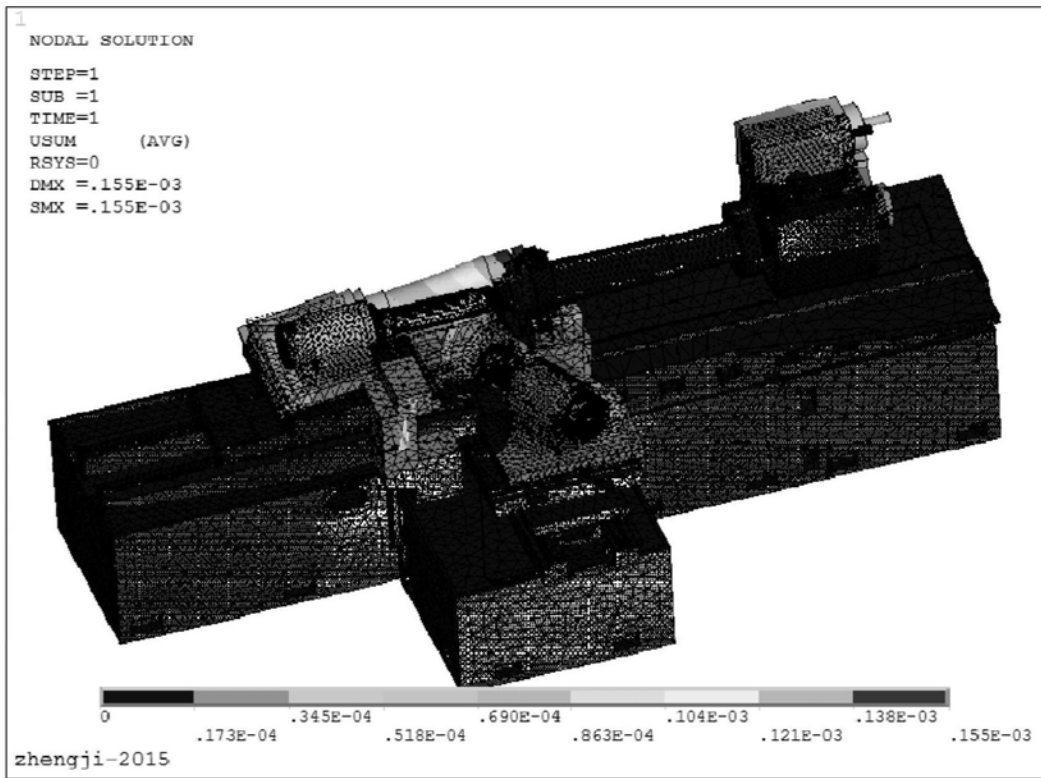
a



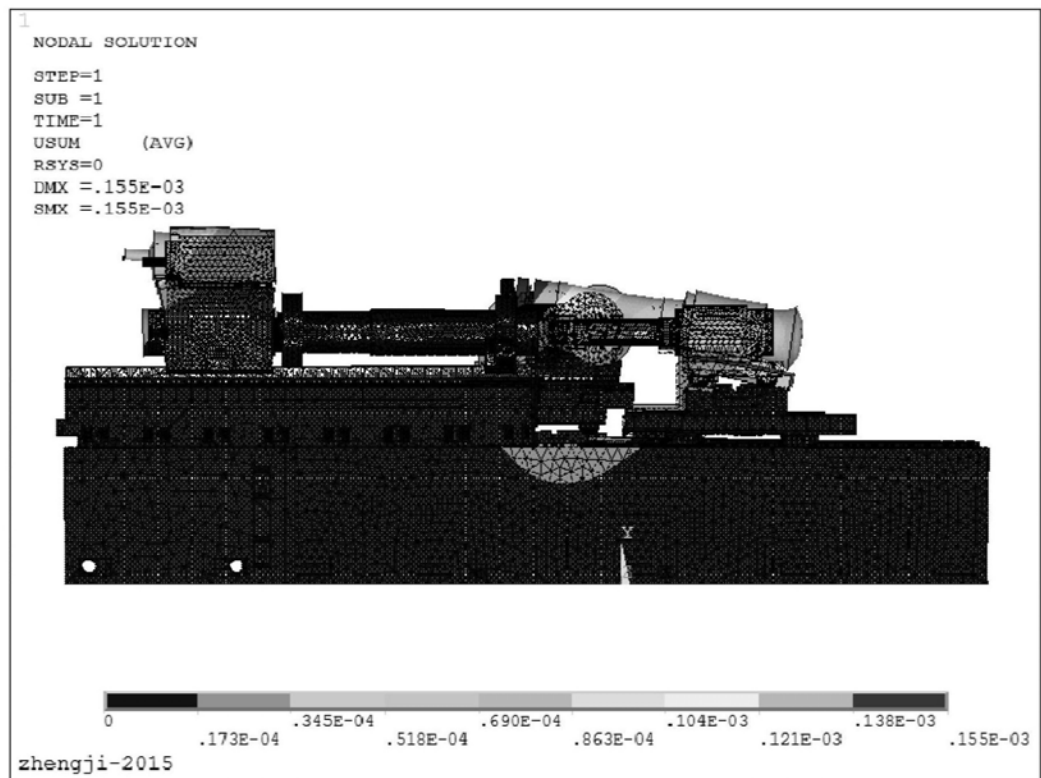
b

图4





a



b

图5

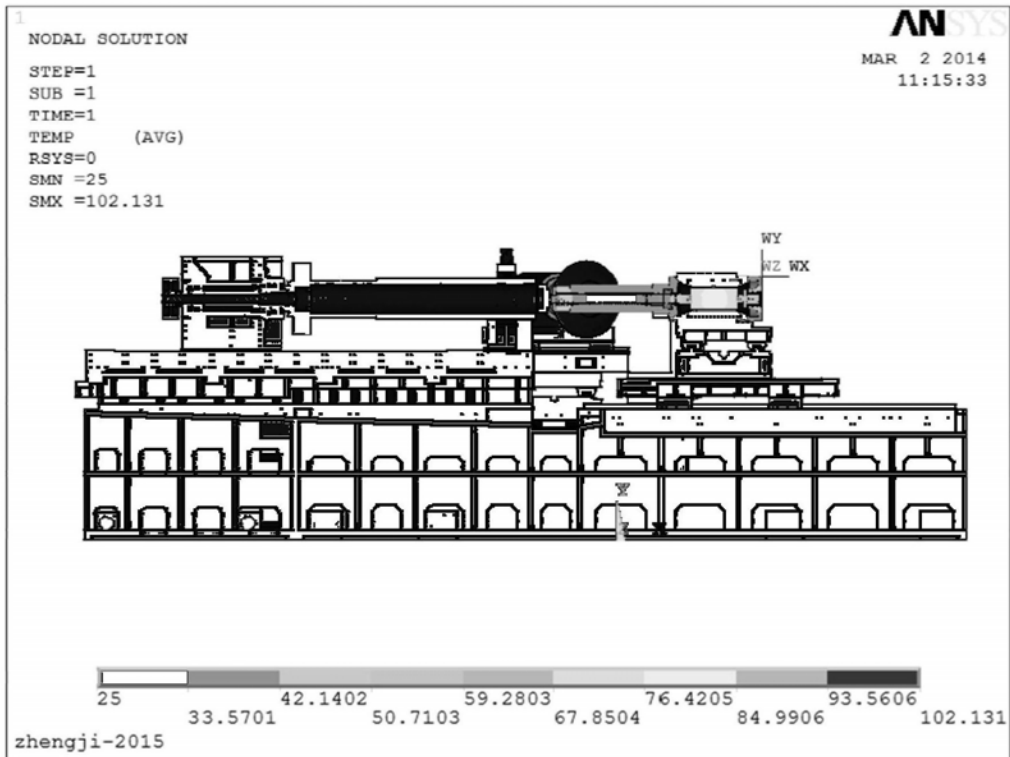
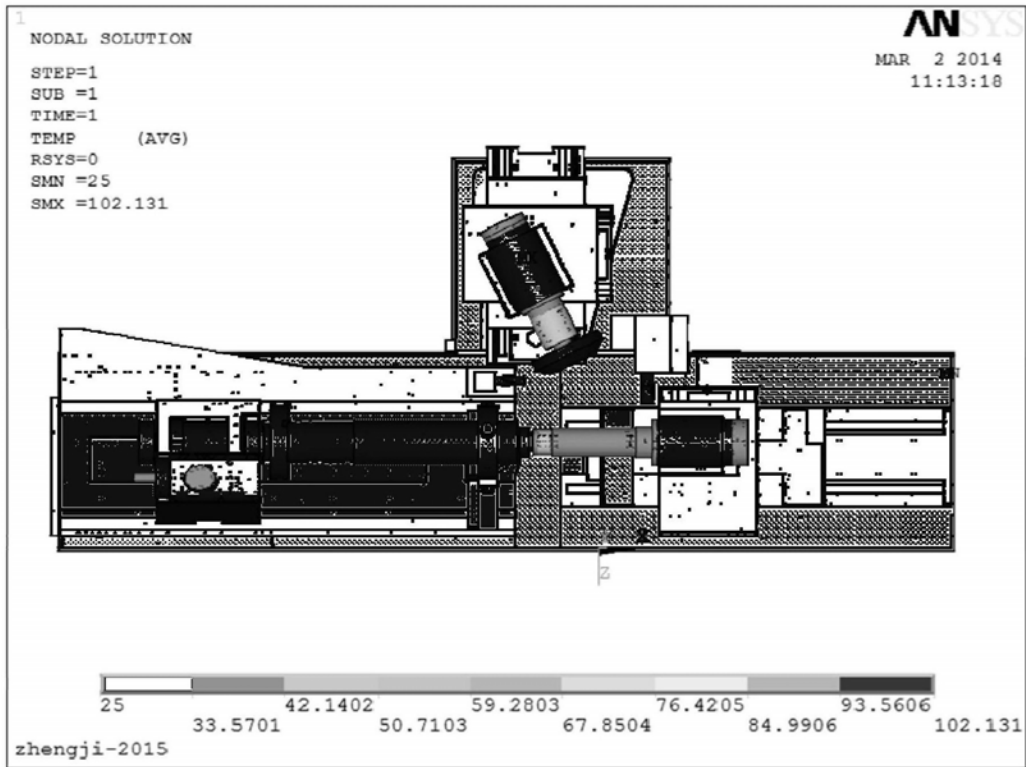


图6