

基于灵敏度分析的大规格床身结构模糊优化设计方法

丛 明^{*1}, 刘 冬¹, 崔冬梅¹, 孟国兴², 董欣胜²

(1. 大连理工大学 精密与特种加工教育部重点实验室, 辽宁 大连 116024;

2. 大连机床集团有限责任公司, 辽宁 大连 116620)

摘要: 提出了采用模糊数学理论和有限元法相结合建立具有静、动态模糊约束的大规格数控车床床身结构优化数学模型新方法. 该方法将模糊逻辑推理理论运用于床身结构灵敏度分析中, 构建了灵敏度模糊集, 实现了最佳模糊设计变量的选取, 并应用一种改进的最优向量水平截集法评估模糊约束的重要性, 避免了最优解的丢失. 优化结果表明, 采用所提模糊有限元优化方法可求得比常规优化方法更为合理的数学解, 能体现工程问题的模糊性, 为复杂机械大件结构的优化设计进行了有益的探索.

关键词: 模糊有限元; 灵敏度分析; 模糊逻辑推理; 向量水平截集

中图分类号: TH114 **文献标志码:** A

0 引 言

结构模糊优化方法是一个融模糊数学、优化技术和计算机技术于一体的综合性现代设计方法. 国内模糊优化技术在土木工程、水文水资源与环境系统等方面的理论研究处于国际领先地位, 但对于机械结构模糊优化的应用多数是机架、齿轮、主轴等简单机械零部件的优化^[1], 所采用的方法也比较单一, 基本上限于水平截集法和最大最小法, 至于与有限元分析结合的模糊优化设计的实例更是少见.

床身是数控机床的重要支承部件, 其结构特性对整机的加工精度、抗振性和使用寿命等方面影响很大. 当前对床身的结构优化多采用普通优化方法^[2,3], 在设计中很少考虑设计因素的模糊性, 而工程结构设计初期存在大量的不确定信息, 尤其是约束的容许范围具有一定的模糊性. 另外, 机床床身结构占整机重量的比重很大, 减轻结构的自重对于提高经济性具有重要意义, 但在设计过程中人们同样关注其他的一些因素, 如结构强度、刚度以及动态特性等. 因此, 对于床身等复杂机械大件结构, 考虑静、动态模糊约束的结构模糊

有限元优化方法更具有实际应用价值.

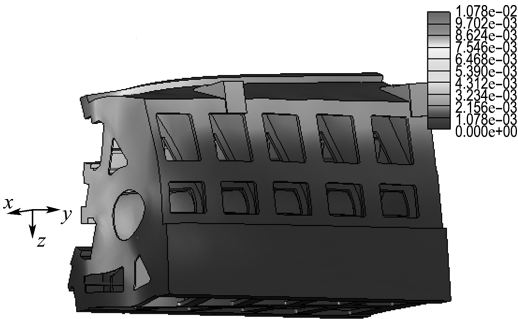
本文将模糊数学的有关理论和有限元方法相结合, 根据实际工程的复杂性, 基于灵敏度分析与模糊逻辑推理理论选取最佳的设计变量, 采用一种改进的最优向量水平截集法实现模糊到非模糊的转化, 对 DL-50 大规格重载数控车床的床身结构模糊优化方法进行研究.

1 床身结构模糊优化问题描述

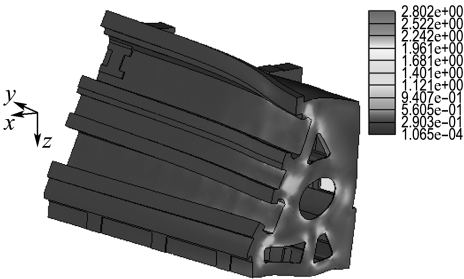
根据 DL-50 大规格重载数控车床的性能要求, 采用 70°斜床身的布局方式, 可实现中心架的垂直安装, 满足特殊用途的数控加工. 床身内部包含辐射型纵横筋板结构, 厚度不一, 结构较为复杂, 其质量达到了 10.84 t. 通过对不同形状、位置和大小板壁孔的分析, 在后腹板和底面支撑板等设计多个并列分布的方形板壁孔.

为便于分析计算, 采用对称的半个床身结构对其进行静、动态分析, 并对物理模型进行合理的简化. 床身材料为 HT300, 采用 p 型有限元法自动划分网格, 定义约束并根据约束条件计算出受力情况, 静、动态特性分析结果如图 1 所示. 床身

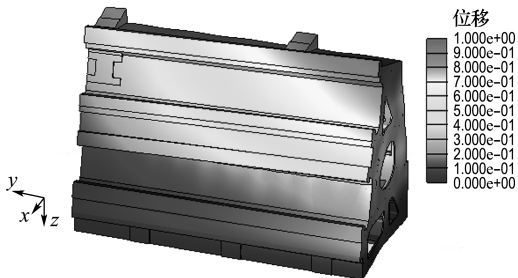
在受载的情况下最大变形发生在与床鞍接触的导轨位置,最大变形量约为 $10.78\text{ }\mu\text{m}$;床身最大合成正应力为 2.802 MPa (HT300 的强度极限为 250 MPa),发生在筋板的结合处;床身的第一阶振型为扭转振型,频率为 126.01 Hz ,在该振型下床身的最大变形量为 1.00 mm ,最大应力为 243.6 MPa .



(a) 位移云图



(b) 应力云图



(c) 一阶模态云图

图 1 床身结构位移、应力和一阶模态云图
Fig. 1 Displacement, stress and first order modal fringe of the bed structure

根据以上分析结果可以得到以下结论:①床身的静、动态特性充分满足要求,而机床工作时的动态特性是影响机床综合性能的主要因素;②云图中低应力区域过多,且最大应力占强度极限的比重小;③机床上转动部件的各种振动如果达到或接近一阶模态频率,则床身的扭转刚性较差,进而影响床身的加工精度,更有可能达到材料的强度极限,使材料发生破坏.根据 DL-50 大规格重载数控车床的特点,其主轴最高转速为 $1\ 200\text{ r/min}$,引起共振的可能性很小.因此认为原设计过于保守,造成材料浪费,结构需进一步优化.综合考虑,取床身的质量为目标函数,即在结构模糊有限元优化过程中追求床身的质量最小.

最小质量目标函数为

find $\mathbf{X} = (x_1\ x_2\ \cdots\ x_n)^T$
 $\min f(\mathbf{X}) = weight(\mathbf{X}), \mathbf{X} \in \mathbf{R}^n$ (1)

式中: $x_1, x_2, \cdots, x_n$ 为床身结构设计变量; $f(\mathbf{X})$ 为床身质量的目标函数.

2 设计变量的模糊选取

建立结构模糊有限元优化数学模型的一个前提与难点是确定哪些参数为设计变量,哪些参数为常量.理论上可以将各参数都按设计变量处理,但实际上这样做是不合理的,而把设计变量都视为确定性的或随机性的也是不全面的,因为实际问题中还有许多设计变量是模糊变量.有时设计变量对目标的影响难以预报,例如加大板厚可增加结构强度,对于复杂的非线性系统,有可能造成力传递路径的改变,使某薄弱环节更加薄弱.因此,设计变量的选取以及对这些设计变量所产生结果的预报在很大程度上都依赖于经验,只能定性描述,从理论上均应视为模糊变量.本文将模糊逻辑推理理论运用于床身结构灵敏度分析中,对床身结构优化设计变量进行模糊选取.

从床身的静、动态特性和相关技术要求考虑,在满足质量最小的前提下,床身的动态特性、强度及刚度是设计中最关心的问题.床身横截面如图 2 所示,各筋板结构尺寸对质量指标具有重要影响.因此,取床身横截面各筋板结构尺寸参数(宽度 w)作为初始设计变量,如表 1 所示.

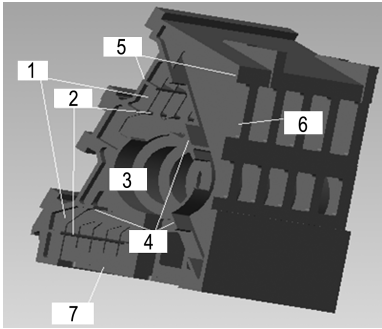


图 2 床身横截面筋板结构示意图

Fig. 2 The schematic diagram for the rib plate of bed cross section

表 1 各筋板结构尺寸参数

Tab. 1 Dimension parameters of the rib plate		
编号	床身筋板类型	经验设计值 w/mm
Set1	纵向筋板	20
Set2	横向筋板	20
Set3	圆柱筋板	30
Set4	支撑筋板	20
Set5	前壁板	25
Set6	后腹板	35
Set7	底面支承板	40

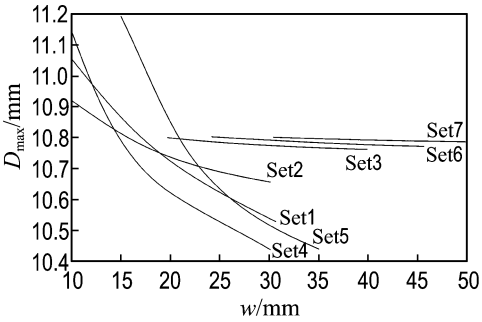
在运用模糊逻辑推理选择合理的设计变量前,为保证实际床身的静、动态特性,采用初始设计变量对床身静变形和基频的灵敏度大小作为设计变量模糊选取的前提.灵敏度是关注指标对某结构参数的变化梯度,其数学意义上可以理解如下:若一函数 $F(x)$ 可导,其一阶灵敏度 S 可用一阶微分灵敏度和一阶差分灵敏度两种方式来表示:

$$S = (F)_j = \partial F(x) / \partial x_j \tag{2}$$

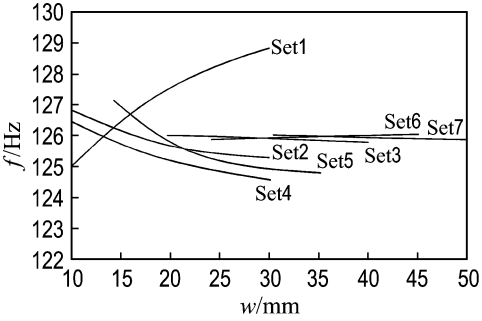
$$S = \Delta F(x) / \Delta x_j \tag{3}$$

除了一阶灵敏度外,还可以有高阶灵敏度. DL-50 大规格床身结构横截面各筋板结构尺寸参数对结构最大变形量 $D_{\max}$ 和基频 f 的灵敏度分析结果如图 3 所示,其中灵敏度分析区间为各筋板结构尺寸 $w \pm 10 \text{ mm}$.

由于床身横截面各筋板结构尺寸参数对目标函数均有影响,而通过图 4 灵敏度分析结果,可以得出纵向筋板(Set1)、横向筋板(Set2)、支撑筋板(Set4)、前壁板(Set5) 4 个尺寸参数对床身的最大变形量和基频变化影响相对较大.此时,可将这些较灵敏的尺寸参数作为设计变量,并结合经验优先选择那些灵敏度较大的参数,而其他尺寸



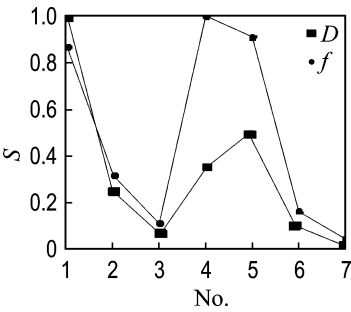
(a) 变形量



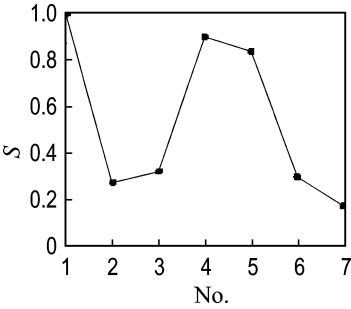
(b) 基频

图 3 各筋板尺寸对变形量和基频灵敏度影响分析结果

Fig. 3 The sensitive analysis results of the displacement and the fundamental frequency affected by rib plate dimension



(a) 床身最大变形量、基频为目标



(b) 总质量为目标

图 4 灵敏度曲线

Fig. 4 Sensitivity curves

参数由于对床身静、动态性能影响较小,可以在模糊优化后根据筋板结构合理过渡进行适当的调整. 显然这是近似的、模糊的,这些设计变量不一定是最终应选取的设计变量,但从模糊数学的观点看其可能性很大,而那些灵敏度很低的设计变量,由于需经很大修正才能有较大影响,该参数成为设计变量的可能性极小,引起的误差可以忽略. 综上所述,即可以运用模糊逻辑推理进行设计变量的模糊选取.

模糊逻辑推理是建立在模糊逻辑基础上的一种不确定性推理方法,一般采用 Zadeh 提出的语言变量、语言值、模糊集和模糊关系合成的方法进行推理^[4]. 这种方法以模糊集合理论为前提,并利用模糊逻辑和模糊语言规则推导出近似的模糊判断结论.

将各设计变量在所要求的范围内对床身最大变形量、基频以及总质量的灵敏度归一化,结果见图 4.

由此可得灵敏度模糊集,用语言变量表示为 $\tilde{S} = \{(\text{非常灵敏}, 0.9 \sim 1.0), (\text{很灵敏}, 0.8 \sim 0.9), (\text{较灵敏}, 0.7 \sim 0.8), (\text{灵敏}, 0.5 \sim 0.7), (\text{不太灵敏}, 0.3 \sim 0.5), \dots\}$

依据上述用语言变量表示的灵敏度模糊集,运用模糊逻辑推理(并可以结合设计者的经验)从中选择合理的设计变量. 推理过程的程序如下:

```
IF 所选参数相对灵敏 AND 经验判断为合理 THEN  
选为可能的设计变量  
ELSE IF 所选参数不灵敏 THEN 剔除该参数, ...  
END IF
```

由此,选择纵向筋板(Set1)、横向筋板(Set2)、支撑筋板(Set4)、前壁板(Set5) 4 个设计参数作为模糊优化的设计变量,完成了床身结构模糊有限元优化设计变量的模糊选取.

3 床身的参数模糊建模与优化

结构模糊有限元优化设计包括模糊建模和应用有限元优化程序寻求最优解两方面内容. 如何从实际问题的模糊信息中抽象出适当的数学模型,是工程模糊优化设计的关键和首要任务. 与常规优化设计一样,目标函数、设计变量和约束条件是模糊优化设计数学模型的三要素^[5]. 基于以上

对床身结构模糊优化目标函数、设计变量的探讨,确定其模糊约束与隶属函数如下.

3.1 模糊约束条件的建立

为了使床身结构在模糊优化设计过程中仍能具有良好的静、动态特性,取频率约束、应力约束和位移约束作为约束变量建立其模糊约束条件. 由于频率、应力和位移有一个从完全容许到完全不容许的过渡阶段^[6],其模糊约束条件可以表述为

$$g_j(\mathbf{X}) \subseteq G_j; j = 1, 2, \dots, J \tag{4}$$

式(4)表示模糊量 $g_j(\mathbf{X})$ 在模糊的意义下落入模糊允许区间 G_j . 式中:“ $\sim$ ”表示该运算包含模糊事物; $g_j(\mathbf{X})$ 表示相关的模糊约束,即应力、位移、频率、尺寸等约束; G_j 表示约束函数 $g_j(\mathbf{X})$ 所允许的取值范围构成的模糊集.

由此,约束函数 $g(\mathbf{X})$ 的容许范围 G 构成了实数论域上的一个模糊集,用扎德法表示如下:

$$G = \int_{g \in \mathbf{R}} \frac{\mu_G(g)}{g} \tag{5}$$

其中 $\mu_G(g)$ 为模糊约束的隶属函数.

3.2 模糊约束隶属函数的确定

模糊优化问题的最优解取决于模糊判决集合隶属函数的最大值点. 隶属函数是模糊理论的数学基础,借助它能够对所有模糊边界的可用域进行定量表示,虽然只是近似地描述事物模糊性,但比完全不考虑模糊性要科学合理. 根据床身约束的性质与结构模糊设计的要求,采用如下线性隶属函数对约束的模糊子集进行数学表达:

$$\mu_G(g) = \begin{cases} 1; & g^l(x) \leq g(x) \leq g^u(x) \\ 1 - \frac{g(x) - g^u(x)}{d^u}; & g^u(x) \leq g(x) \leq g^u(x) + d^u \\ 1 + \frac{g(x) - g^l(x)}{d^l}; & g^l(x) - d^l \leq g(x) \leq g^l(x) \\ 0; & \text{其他} \end{cases} \tag{6}$$

式中: $g^u(x)$ 、 $g^l(x)$ 分别表示 $g(x)$ 的上、下限值,可采用普通设计方法得到. 对于频率等下限约束,取 $1 - [g(x) - g^u(x)]/d^u$ 不存在;对于应力、位移等上限约束,取 $1 + [g(x) - g^l(x)]/d^l$ 不存在. d 为模糊约束的容许偏差,其值可由增扩系数法

得到。

对于床身结构,各设计变量的上、下限值采用床身三维模型重塑方法得到,模糊约束条件可能

的上限值或下限值由普通优化方法求解得出,其中频率约束具有下限值,应力和位移约束具有上限值,如表 2 所示。

表 2 设计变量与模糊约束的上、下限值

Tab. 2 The up and down limit of design variables and fuzzy constraints

项目	w/mm				f/Hz	σ/MPa	$D/\mu\text{m}$
	Set1	Set2	Set4	Set5			
上限值	30	30	30	35	—	2. 802	10. 78
下限值	10	15	10	22	126. 01	—	—

根据线性隶属函数公式,得到约束函数的隶属函数形式分别如下:

频率约束的隶属函数

$$\mu_f(\mathbf{X}) = \begin{cases} 1; & f^l \leq f \\ 1 + \frac{f - f^l}{d_f^l}; & f^l - d_f^l \leq f \leq f^l \\ 0; & \text{其他} \end{cases} \tag{7}$$

式中: f^l 为床身结构基频的最小许用值,即频率约束的下限值 126. 01 Hz; d_f^l 为频率约束的下容差,由增扩系数法确定为 8 Hz.

应力约束的隶属函数

$$\mu_\sigma(\mathbf{X}) = \begin{cases} 1; & \sigma \leq \sigma^u \\ 1 - \frac{\sigma - \sigma^u}{d_\sigma^u}; & \sigma^u \leq \sigma \leq \sigma^u + d_\sigma^u \\ 0; & \text{其他} \end{cases} \tag{8}$$

式中: σ^u 为床身结构合成正应力的最大许用值,即应力约束的上限值 2. 802 MPa; d_σ^u 为应力约束的上容差,由增扩系数法确定为 0. 5 MPa.

位移约束的隶属函数

$$\mu_D(\mathbf{X}) = \begin{cases} 1; & D \leq D^u \\ 1 - \frac{D - D^u}{d_D^u}; & D^u \leq D \leq D^u + d_D^u \\ 0; & \text{其他} \end{cases} \tag{9}$$

式中: D^u 为床身结构的最大变形量许用值,即位移约束的上限值 10. 78 μm ; d_D^u 为位移约束的上容差,由增扩系数法确定为 1 μm .

3.3 改进的最优向量水平截集法

求解结构模糊优化设计的基本途径就是把模糊问题转化为非模糊问题^[7],再用各种常规优化

方法求解. 模糊优化可采用的方法有很多,如权重大小法、最优水平截集法等. 基于所构建床身结构模型的实际特点,本文采用一种改进的最优向量水平截集法实现模糊到非模糊的转化.

在描述模糊约束(式(4))的问题过程中,最优水平截集法就是寻找一个最优的设计水平 λ ,用与之相应的最优水平截集 $G_j(\lambda)$ 代替全部的模糊容许区 $G_j(\mathbf{X})$,则模糊优化问题可转化为具有 λ 的非模糊优化问题,这是一个具有清晰边界的闭区间:

$$G_j(\lambda) = [g_j^l(\lambda), g_j^u(\lambda)] \tag{10}$$

如图 5 所示,这些普通集合 $G_j(\lambda)$ 叫做 G_j 的最优水平截集^[8].

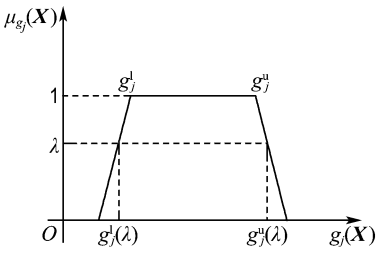


图 5 模糊约束的最优水平截集

Fig. 5 Optimal level cut set of fuzzy constraints

常规的模糊优化方法只用一个最优化水平值 λ 对优化问题中的模糊约束集合进行截取,从而将模糊优化问题转化为常规优化问题. 此方法的缺点在于因约束中的个别或多个因素约束要求严格而不得不采用较高的水平值 λ ,从而可能漏掉更佳的设计方案.

由床身静、动态特性分析结论可知,频率约束较应力和位移约束重要,所以为了使优化结果更

符合工程实际,单用一个水平截集值不能评估出各种约束的重要性.故在此基础上采用了一种改进的最优向量水平截集法,根据各约束性质和约束要求程度的不同,将各种性质的约束分别对待,采用不同的水平值 λ_j ,最终求得一组使设计方案最优的水平值 λ_j .

如图 6 所示,以 $g_1(\mathbf{X})$ 、 $g_2(\mathbf{X})$ 两个约束为例, d_1 和 d_2 分别表示两个约束对应的容差.可以看出,图中线段 AC 表示了设计变量对应于原最优水平截集法的可能取值范围,而图中区域 ABCDA 表示了改进的最优向量水平截集法的可能取值范围,故用此模糊优化方法所得到的优化解,可以使设计方案有更大的选择余地.

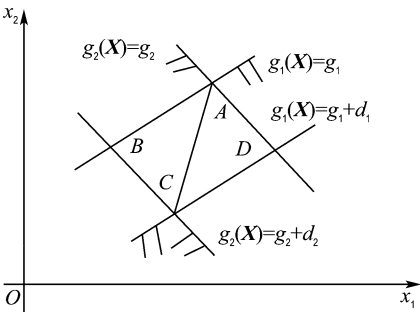


图 6 两种不同方法模糊约束对最优解的影响

Fig. 6 The effect of fuzzy constraints on the optimal solution by two different methods

此时,原模糊优化模型中的约束条件可处理为

$$G_j(\lambda_j) = [g_j^l(\lambda_j), g_j^u(\lambda_j)] \tag{11}$$

根据上述方法,将模糊优化的数学模型转化为常规优化的数学模型,具体如下:

寻求一组最优的设计变量

$$\mathbf{X} = (\omega_{\text{Set1}} \quad \omega_{\text{Set2}} \quad \omega_{\text{Set4}} \quad \omega_{\text{Set5}})^T$$

使得目标函数

$$f(\mathbf{X}) = \text{weight}(\mathbf{X})$$

最小,其中 $\mathbf{X} \in \mathbf{R}^4$,同时满足

$$f \geq f^l + d_f^l(1 - \lambda_1) \tag{12}$$

$$\sigma \leq \sigma^u + d_\sigma^u(1 - \lambda_2) \tag{13}$$

$$D \leq D^u + d_D^u(1 - \lambda_3) \tag{14}$$

$$\omega_{\text{Set}, \min} \leq \omega_{\text{Set}i} \leq \omega_{\text{Set}, \max} \tag{15}$$

其中 $0 \leq \lambda_j \leq 1$,最优水平值 λ_j 采用二级模糊综合评价方法,根据对结构安全可靠和经济节省有影响的模糊因素,如设计水平、制造水平、重要程度、使用条件等加以考虑确定,取 $\lambda_1 = 0.95, \lambda_2 = \lambda_3 = 0.8$.取一系列不同的 λ_j 值,就可得到若干个具有不同设计水平的最优设计方案,为床身结构的模糊有限元优化提供了进一步优选的可能.

4 床身模糊有限元优化的寻优算法

基于以上研究结论,针对床身结构特点将有限元求解与模糊分析相结合,来寻求最终的优化结果.床身结构模糊有限元优化设计框图如图 7 所示,将模糊优化模型转化为常规优化模型,并进行边界条件的加载,对初始设计进行分析,对分析结果就设计要求进行评估,根据确定的设计水平,进行修正设计,寻找最优设计域直到所有的设计要求都满足为止.

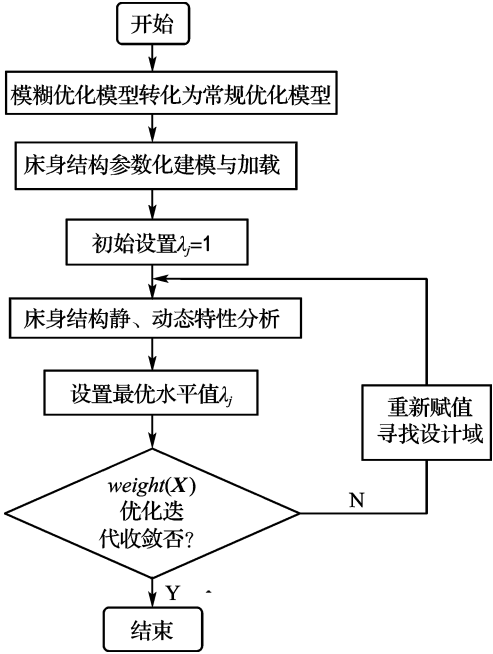


图 7 床身结构模糊有限元优化设计框图

Fig. 7 The block diagram for the structure fuzzy finite element optimal design of bed

经过上述的迭代与求解,可以得到床身结构设计变量的一组最优解.分别采用传统经验设计、常规优化和模糊有限元优化 3 种方法对床身结构进行设计,设计结果比较见表 3.

表3 传统经验设计、常规优化方法和模糊有限元优化方法结果比较

Tab. 3 The result comparison of traditional experience design, conventional optimization and fuzzy finite element optimization methods

设计方案	设计变量 w/mm				计算结果			
	Set1	Set2	Set4	Set5	f/Hz	σ_{max}/MPa	$D_{max}/\mu m$	质量/ t
传统经验设计	20.00	20.00	20.00	25.00	126.01	2.802	10.78	10.84
常规优化方法	18.11	15.64	14.73	23.50	119.84	1.545	10.08	10.31
模糊有限元优化方法	12.20	16.08	11.25	22.14	131.30	2.612	10.90	9.78

注： f 、 σ_{max} 、 D_{max} 分别为床身结构基频值、合成正应力最大值、最大位移变形量

由表3计算结果可以看出,在满足床身结构静、动态性能的工程要求下,经过多次迭代运算,床身结构质量下降了9.8%。对比各优化方法的参数数值表明,常规优化设计较传统经验设计在节省材料方面有很大改进,但在衡量床身的关键性能结构基频方面能力却有所下降;模糊有限元优化设计综合考虑了节省材料和评估各约束重要性等方面因素,其优化结果较常规优化设计在材料的使用上又有了显著降低,虽然最大合成正应力、最大位移变形量较常规优化设计有所增加(其中最大合成正应力为2.612 MPa,发生在筋板的结合处;最大位移变形量为10.90 μm ,发生在与床鞍接触的导轨位置);但仍可以满足床身结构的静态性能要求,并且结构形式和尺寸更合理,这种优化结果在工程设计中是可取的,即常规优化设计漏掉了全局最优解。

对原床身与新床身模型进行谐响应分析,用100~220 Hz的谐振力对床身进行激励,把分析结果和原床身模型的谐响应分析结果进行比较,得到图8。由比较结果可以得出,新床身结构的

动态性能得到了提高。所以模糊优化符合生产现实,在工程设计中采用结构模糊有限元优化方法更科学、可靠。

5 结 论

(1)本文采用模糊数学理论和有限元法相结合,对DL-50 数控车床大规格床身进行了结构模糊有限元优化,方法的研究为床身结构设计提供了重要依据,具有一定应用价值。优化结果显示床身结构质量下降了9.8%,表明本文的模糊有限元方法能够体现问题的模糊性,在工程设计中采用模糊优化方法更科学、可靠。

(2)基于灵敏度分析与模糊逻辑推理理论对设计变量进行模糊选取,通过分析床身横截面各筋板尺寸参数的灵敏度预报了其对结构变形量和基频的影响,依据用语言变量描述的灵敏度模糊集,运用模糊逻辑推理选择了最佳的设计变量。

(3)针对床身结构优化设计中约束的模糊性,在求解过程中采用改进的最优向量水平截集法以评估出频率、应力和位移约束的重要性,避免了漏掉最佳的设计方案,实现模糊到非模糊的转化,使优化结果更符合工程实际。

参考文献：

[1] 赖一楠,吴明阳,赖明珠,等. 复杂机械结构模糊优化方法及工程应用[M]. 北京:科学出版社,2008

[2] 王艳辉,伍建国,缪建成. 精密机床床身结构参数的优化设计[J]. 机械设计与研究,2003,19(6):53-55

[3] 张学玲,徐燕申,钟伟泓. 基于有限元分析的数控机床床身结构动态优化设计方法研究[J]. 机械强度,2005,27(3):353-357

[4] 胡成亮,刘全坤,王强,等. 基于灰色关联和模糊逻辑

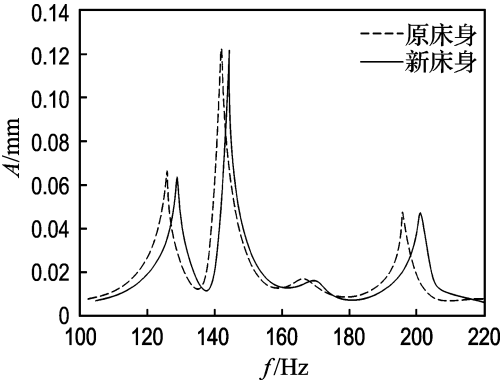


图8 原床身与新床身模型谐响应分析结果比较

Fig. 8 The comparison of harmonic response analysis results between the former bed and the new bed

辑的齿轮锻模多目标优化设计[J]. 中国机械工程, 2007, **18**(14):1739-1742

[5] RAO S S. Description and optimum design of fuzzy structural systems [J]. **International Journal of Mechanisms Transmissions and Automation in Design, Transactions of the ASME**, 1987, **10** (9):126-132

[6] 张晓丽,杨建强,常春影,等. 多目标模糊优化方法及其在工程设计中应用[J]. 大连理工大学学报, 2005, **45**(3):374-378

(ZHANG Xiao-li, YANG Jian-qiang, CHANG Chun-ying, *et al.* Multi-objective fuzzy optimization method and its practical application to engineering design [J]. **Journal of Dalian University of Technology**, 2005, **45**(3):374-378)

[7] 唐加福,汪定伟. 模糊优化理论与方法的研究综述[J]. 控制理论与应用, 2000, **17**(2):159-163

[8] 黄洪钟. 机械设计模糊优化原理及应用[M]. 北京: 科学出版社, 1997

[9] ELISHAKOFF I, FERRACUTI B. Fuzzy sets based interpretation of the safety factor [J]. **Fuzzy Sets and Systems**, 2006, **157**(18):2495-2512

[10] LEI Zhen-yu , CHEN Qiu. A new approach to fuzzy finite element analysis [J]. **Computer Methods in Applied Mechanics**, 2002, **191**(45):5113-5118

Structure fuzzy optimal method in design of large-sized bed based on sensitive analysis

CONG Ming^{*1}, LIU Dong¹, CUI Dong-mei¹, MENG Guo-xing², DONG Xin-sheng²

(1.Key Laboratory for Precision & Non-traditional Machining Technology of Ministry of Education, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China;
2.Dalian Machine Tool Group Corporation, Dalian 116620, China)

Abstract: A new approach to building the mathematical model of large-sized CNC lathe bed with static and dynamic fuzzy constraints was presented by combining the fuzzy theory with finite element method. Based on sensitive analysis of the bed structure, fuzzy logic inference was applied to constructing the fuzzy set of sensitivity to determine the optimal group of fuzzy design variables. An improved optimal vector level cut set method was induced to distinguish the effects of fuzzy constraints, so the optimal solution would not be lost. The analytical results show that using fuzzy finite element method, a more reasonable solution than one by using the conventional optimum method can be obtained. This method can reflect the fuzziness of engineering problem, and it also can do beneficial exploration for optimization design of complex large-sized structure.

Key words: fuzzy finite element; sensitive analysis; fuzzy logic inference; vector level cut set