



(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 105243215 A  
(43) 申请公布日 2016. 01. 13

(21) 申请号 201510658571. 9  
(22) 申请日 2015. 10. 12  
(71) 申请人 西安交通大学  
地址 710049 陕西省西安市咸宁西路 28 号  
(72) 发明人 曹宏瑞 李笔剑 蔡俊琼 樊利军  
郭召  
(74) 专利代理机构 西安通大专利代理有限责任  
公司 61200  
代理人 朱海临  
(51) Int. Cl.  
G06F 17/50(2006. 01)

权利要求书2页 说明书8页 附图3页

(54) 发明名称  
基于参数化有限元模型的电主轴结构优化方法

(57) 摘要  
本发明公开一种基于参数化有限元模型的电主轴结构优化方法,其特征在于,1) 根据待优化的电主轴,初步定义优化问题的设计变量和优化目标;2) 以设计变量为可变参数,建立电主轴参数化有限元模型;3) 根据电主轴设计原则以及相关理论,确定设计变量取值范围、确定状态变量,建立约束条件,然后建立目标函数;4) 选取智能优化算法,进行优化求解,得到优化结果。本发明是基于电主轴参数化有限元模型的优化,考虑了非线性轴承刚度,建立的模型更加接近实际,模型灵活,优化效果好,特别适用于电主轴高刚性、轻量化双目标优化。能够有效提高电主轴刚度,减小电主轴质量,为电主轴的设计提供了有效指导。



1. 一种基于参数化有限元模型的电主轴结构优化方法,其特征在于,包括下述步骤:

(1) 预定义电主轴结构优化的设计变量为:主轴悬伸量  $a$ 、前端轴承跨距  $L_1$ 、后端轴承跨距  $L_2$ 、电主轴外径  $D$ ;优化目的为:提高电主轴刚度、减小电主轴质量;

(2) 以设计变量为可变参数,建立电主轴的参数化有限元模型

用弹簧作为模拟轴承,轴承的支承刚度由轴承拟静力学模型提前计算出,设置弹簧的刚度,使之与对应的轴承刚度一致;然后用四面体单元划分网格,在弹簧与主轴接触点处细化网格;将轴承外圈约束为固定支撑,约束转子转动自由度,限制其周向转动;在主轴负载一端,施加载荷;

(3) 确定设计变量取值范围、确定状态变量,建立约束条件,然后建立起目标函数;其中,设计变量、状态变量、约束条件以及目标函数由下面表达形式确定:

设计变量:

$$X = (x_1, x_2, x_3, x_4)^T = (a, L_1, L_2, D)^T$$

$$X_{\min} \leq X \leq X_{\max}$$

式中: $x_{\min}$ ——设计变量下限;

$x_{\max}$ ——设计变量上限;

状态变量:主轴的质量  $m$ ,轴端位移  $\delta$ ,一阶固有频率  $f$  以及最大应力  $\tau$ :

$$m(x) = (a, L_1, L_2, D)$$

$$f(x) = (a, L_1, L_2, D)$$

$$\delta(x) = (a, L_1, L_2, D)$$

$$\tau(x) = \tau(a, L_1, L_2, D)$$

约束条件:

$$\delta(x) \leq \delta_{\max}$$

$$\tau(x) \leq \tau_{\text{许}}$$

$$L = L_0$$

式中: $\delta_{\max}$ ——允许主轴轴向最大伸长量;

$\tau_{\text{许}}$ ——主轴弯曲变形时的最大许用切应力,单位 MPa,和主轴材料有关;

$L$ ——主轴沿轴向实际总长度;

$L_0$ ——主轴设计总长,为常数;

目标函数:

用主轴一阶固有频率函数  $f(x)$  和主轴质量函数  $m(x)$  分别量化表征高刚性和轻量化这两个指标,因此,目标函数为:

$$f_1(x) = f(x)$$

$$f_2(x) = m(x)$$

在满足设计变量取值以及约束条件的情况下,要求  $f_1(x)$  取最大值、 $f_2(x)$  取最小值,即:

$$\max f_1(x) = \max f(x)$$

$$\min f_2(x) = \min m(x)$$

(4) 采用优化算法对步骤(1)~(3)已设计好的电主轴结构参数进行求解,得到优化结果。

2. 如权利要求 1 所述的基于参数化有限元模型的电主轴结构优化方法,其特征在于,所述电主轴外径  $D$  包括前端轴径  $D_1$  以及后端轴径  $D_2$ 。

3. 如权利要求 1 所述的基于参数化有限元模型的电主轴结构优化方法,其特征在于,所述优化算法包括遍历搜索算法 Screen、多目标遗传算法 MOGA、多目标自适应算法 AMO、基于响应面优化算法 RSO 的任一种。

## 基于参数化有限元模型的电主轴结构优化方法

### 技术领域

[0001] 本发明涉及机械结构设计,特别涉及一种机床电主轴结构参数优化设计方法。

### 背景技术

[0002] 电主轴是高速,高精度数控机床的核心部件,它是一种融合了多种技术单元的主轴系统。高速电主轴因其转速高、精度高,能够极大提高机床加工效率,极大改善加工精度。电主轴本身的特性直接影响机床的加工性能。电主轴的设计合理与否从根本上影响主轴性能,所以对电主轴结构优化显得尤为重要。

[0003] 国内外对于机床主轴优化设计开展了不少研究。基本都是从主轴建模+优化算法方面对主轴(包括电主轴)的结构参数进行优化。2012年,C.W.Lin(Lin CW. Simultaneous optimal design of parameters and tolerance of bearing locations for high-speed machine tools using a genetic algorithm and Monte Carlo simulation method[J]. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, 2012, 13(11):1983-1988.)在遗传算法和 Monte Carlo 算法的基础上,提出了一种确定主轴轴承位置最优值的优化算法,并验证了该优化算法可有效提高主轴系统的性能;2014年,C.W.Lin(Lin CW. Optimization of Bearing Locations for Maximizing First Mode Natural Frequency of Motorized Spindle-Bearing Systems Using a Genetic Algorithm[J]. Applied Mathematics, 2014, 5(14):2137-2152.)开发了一种基于遗传算法的优化方法用于寻找轴承在主轴上的最佳位置,使得电主轴的一阶固有频率最大,并通过仿真分析验证了该优化方法是有效的。

[0004] 申请号为 2013100137207 的发明专利公开了一种机床主轴的优化设计方法,其特点在于利用试验设计在可行域中进行均匀的初步寻优,然后从所有试验点中选出令目标函数综合最优的一个初步优化解,并将这个初步优化解作为梯度法的初始值,进一步深入优化,最终获得令机床主轴综合性能最优的全局优化解。

[0005] 高性能电主轴要求其具有良好的刚性以及较小的质量,以满足其高转速,高精度的性能要求。因此,对电主轴优化设计时,高刚性和轻量化是其两个主要目标。纵观现有文献,有关电主轴优化设计的研究,一些文献建立的优化模型过于简化,不能很好描述主轴实际情况;大多只是以提高刚度为目标,并没有同时考虑高刚性和轻量化这两个目标,而且优化的设计变量大都是轴承位置,很少将主轴轴承配合直径、前后支承轴承跨距、主轴悬伸综合考虑。因此,不能很有效的对电主轴做结构优化。

### 发明内容

[0006] 本发明的目的是提供一种能准确、有效、方便的对电主轴实施结构参数优化的方法,尤其是对电主轴进行高刚性、轻量化双目标优化。

[0007] 为达到以上目的,本发明是采取如下技术方案予以实现的:

[0008] 一种基于参数化有限元模型的电主轴结构优化方法,其特征在于,包括下述步

骤：

[0009] (1) 预先定义电主轴结构优化的设计变量为：主轴悬伸量  $a$ 、前端轴承跨距  $L_1$ 、后端轴承跨距  $L_2$ 、电主轴外径  $D$ ；优化目标为：提高电主轴刚度、减小电主轴质量；

[0010] (2) 以设计变量为可变参数，建立电主轴的参数化有限元模型

[0011] 用弹簧作为模拟轴承，轴承的支承刚度由轴承拟静力学模型提前计算出，设置弹簧的刚度，使之与对应的轴承刚度一致；然后用四面体单元划分网格，在弹簧与主轴接触点处细化网格；然后施加约束和载荷；

[0012] (3) 确定设计变量的取值范围、确定状态变量，建立约束条件，然后建立起目标函数；其中，设计变量、状态变量、约束条件以及目标函数由下面表达形式确定：

[0013] 设计变量：

$$[0014] \quad x = (x_1, x_2, x_3, x_4)^T = (a, L_1, L_2, D)$$

$$[0015] \quad x_{\min} \leq x \leq x_{\max}$$

[0016] 式中： $x_{\min}$ ——设计变量下限；

[0017]  $x_{\max}$ ——设计变量上限；

[0018] 状态变量：主轴的质量  $m$ ，轴端位移  $\delta$ ，一阶固有频率  $f$  以及最大应力  $\tau$ ：

$$[0019] \quad m(x) = (a, L_1, L_2, D)$$

$$[0020] \quad f(x) = (a, L_1, L_2, D)$$

$$[0021] \quad \delta(x) = (a, L_1, L_2, D)$$

$$[0022] \quad \tau(x) = \tau(a, L_1, L_2, D)$$

[0023] 约束条件：

$$[0024] \quad \delta(x) \leq \delta_{\max}$$

$$[0025] \quad \tau(x) \leq \tau_{\text{许}}$$

$$[0026] \quad L = L_0$$

[0027] 式中： $\delta_{\max}$ ——允许主轴轴向最大伸长量；

[0028]  $\tau_{\text{许}}$ ——主轴弯曲变形时的最大许用切应力，单位 MPa，和主轴材料有关；

[0029]  $L$ ——主轴沿轴向实际总长度；

[0030]  $L_0$ ——主轴设计总长，为常数；

[0031] 目标函数：

[0032] 用主轴一阶固有频率函数  $f(x)$  和主轴质量函数  $m(x)$  分别量化表征高刚性和轻量化这两个指标，因此，目标函数为：

$$[0033] \quad f_1(x) = f(x)$$

$$[0034] \quad f_2(x) = m(x)$$

[0035] 在满足设计变量取值以及约束条件的情况下，要求  $f_1(x)$  取最大值、 $f_2(x)$  取最小值，即：

$$[0036] \quad \max f_1(x) = \max f(x)$$

$$[0037] \quad \min f_2(x) = \min m(x)$$

[0038] (4) 采用优化算法对步骤 (1) ~ (3) 已设计好的电主轴结构参数进行求解，得到优化结果。

[0039] 上述方案中，所述电主轴外径  $D$  包括前端轴径  $D_1$  以及后端轴径  $D_2$ 。所述优化算法

包括遍历搜索算法 Screen、多目标遗传算法 MOGA、多目标自适应算法 AMO、基于响应面优化算法 RSO 的任一种。

[0040] 与现有技术相比,本发明的优点是:①电主轴建模时考虑了轴承非线性刚度,模型更加准确;②该发明在对电主轴结构优化时,设计变量考虑了主轴悬伸量  $a$ 、前端轴承跨距  $L_1$ 、后端轴承跨距  $L_2$ 、电主轴外径  $D$  多个设计变量,优化效果更明显;③该发明可同时对电主轴进行高刚性、轻量化双目标优化,比一般的单一高刚性优化更优越。

## 附图说明

[0041] 下面结合附图及具体实施方式对本发明作进一步详细说明。

[0042] 图 1 是本发明电主轴结构优化的整体流程图。

[0043] 图 2 是型号为 U25-215446 铣削电主轴简化后的几何结构。图中:1、规则圆柱体(电机转子的简化);2、直接接触(去掉螺纹);3、去掉细小的倒角和圆角。

[0044] 图 3 是图 2 铣削电主轴结构优化的设计变量。图中: $L_1$ 、前端轴承跨距; $L_2$ 、后端轴承跨距; $D$ 、后端外径; $a$ 、主轴悬伸量;4、第一轴承;5、第二轴承;6、第三轴承。

[0045] 图 4 是一大型高精度数控成形磨齿机的磨削电主轴简化后的几何结构。图中:7、砂轮;8、前端轴承;9、芯轴;10、后端轴承;

[0046] 图 5 是图 4 磨削电主轴结构优化的设计变量。图中: $L_1'$ 、前端组合轴承跨距; $L_2'$ 、后端组合轴承跨距; $D_1$ 、前端轴径; $D_2$ 、后端轴径;4'、第一组合轴承;5'、第二组合轴承;6'、第三组合轴承。

## 具体实施方式

[0047] 实施例 1

[0048] 参考图 2, U25-215446 型铣削电主轴的优化设计,该电主轴用于数控机床高速铣削,可进行半精加工和精加工。具体按以下步骤对该电主轴实施优化:

[0049] 首先,根据待优化对象,预先定义优化的设计变量和优化目标。由图 2 可以看到,该电主轴是由三个轴承(分别为图 3 中的 4、5、6)支承。前端是由一对角接触球轴承背对背反装,两轴承之间有一定跨距;后端由一个浮动变位轴承支承,承受径向载荷。结构优化时,参考图 3,选择主轴悬伸量  $a$ 、前端轴承跨距  $L_1$ 、后端轴承跨距  $L_2$  以及后端外径  $D$  为设计变量,以提高电主轴刚度和减小电主轴质量为优化目标。

[0050] 其次,建立电主轴参数化有限元模型。根据图 2 的几何模型,以图 3 确立的设计变量为可变参数,建立电主轴的参数化几何模型。用角接触球轴承的拟静力学模型事先计算出各个支承轴承的刚度,然后用弹簧替代图 3 中相应的轴承,然后以四面体单元划分网格,在弹簧与主轴接触点处细化网格;将轴承外圈约束为固定支撑,约束转子转动自由度,限制其周向转动;在主轴负载一端,施加 1000N 的径向力,模拟径向载荷,建立起电主轴的参数化有限元模型。

[0051] 然后,确定设计变量取值范围、确定状态变量、设置约束条件,再求目标函数。

[0052] 1) 设计变量

[0053] 如图 3 所示,在该实施例中,确定的设计变量有:主轴悬伸量  $a$ 、前端轴承跨距  $L_1$ 、后端轴承跨距  $L_2$  以及后端外径  $D$ 。可表示为:

[0054]  $x = (x_1, x_2, x_3, x_4)^T = (a, L_1, L_2, D)^T$

[0055] 根据该电主轴结构尺寸以及这些设计变量优化时的可变范围,确定出这 4 个设计变量的取值范围为:

[0056]  $x_{\min} \leq x \leq x_{\max}$

[0057]  $x_{\min} = (20, 20, 280, 50)^T$

[0058]  $x_{\max} = (60, 120, 400, 70)^T$

[0059] 设计变量的初始值以及取值范围可用表 1 表示如下:

[0060] 表 1

[0061]

设计变量	初始值	下限值	上限值
[0062]			
悬伸量 $a/\text{mm}$	41	20	60
前端轴承跨距 $L_1/\text{mm}$	84	20	120
后端轴承跨距 $L_2/\text{mm}$	345	280	400
后端轴径 $D/\text{mm}$	62	50	70

[0063] 2) 状态变量

[0064] 状态变量有四个:轴的质量  $m$ ,轴端位移  $\delta$ ,一阶固有频率  $f$  以及最大应力  $\tau$ 。

[0065]  $m(x) = (a, L_1, L_2, D)$

[0066]  $f(x) = (a, L_1, L_2, D)$

[0067]  $\delta(x) = (a, L_1, L_2, D)$

[0068]  $\tau(x) = \tau(a, L_1, L_2, D)$

[0069] 3) 约束条件

[0070] 该主轴材料为 38CrMoAl,其弯曲变形时的最大许用切应力  $\tau_{\text{许}} = 50\text{MPa}$ ,限制轴向位移不超过  $5\mu\text{m}$ ,要求主轴总长度  $L_0 = 525\text{mm}$ 。所以,约束条件为:

[0071]  $\tau \leq \tau_{\text{许}} = 50\text{MPa}$

[0072]  $\delta \leq \delta_{\max} = 5\mu\text{m}$

[0073]  $L = L_0 = 525\text{mm}$

[0074] 4) 目标函数

[0075] 高刚性目标函数: $f_1(x) = f(a, L_1, L_2, D)$

[0076] 轻量化目标函数: $f_2(x) = m(a, L_1, L_2, D)$

[0077] 此发明中,电主轴结构优化是以高刚性、轻量化为目标,属于双目标优化。主轴的刚度与其一阶固有频率密切相关,一阶固有频率越高主轴刚度越大,也就是刚性越好。轻量化就是要求主轴在满足性能要求的前提下,质量越小越好。

[0078] 其次还要求:一阶固有频率在提高 10%的情况下尽量取最大值;主轴质量在减轻 10%的情况下尽量取最小值。因此,确定该优化问题的状态变量、约束条件以及目标函数如表 2 所列:

[0079] 表 2

[0080]

状态变量	初始值	约束条件	目标函数
主轴的质量 $m/\text{kg}$	10.141	$m\leq 9.127$	Minimum
轴端径向位移 $\delta/\mu\text{m}$	3.786	$\delta\leq 5$	——
一阶固有频率 $f/\text{Hz}$	1022.8	$f\geq 1125.1$	Maximum

[0081]

最大切应力 $\tau/\text{MPa}$	5.55	$\tau\leq 50$	——
轴的总长度 $L/\text{mm}$	525	$L=525$	——

[0082] 最后,选取智能优化算法,优化求解,得到优化结果。表 3 是采用基于响应面优化算法 RSO 得到的一组优化结果。优化前后结果对比参见表 4。

[0083] 表 3

[0084]

用时	$a/\text{mm}$	$L_1/\text{mm}$	$L_2/\text{mm}$	$D/\text{mm}$	$\delta/\mu\text{m}$	$\tau/\text{MPa}$	$f/\text{Hz}$	$m/\text{kg}$
2	34.136	94.295	289.77	55.274	3.3251	5.1306	1208.6	8.9143

[0085] 表 4

[0086]

优化的目标参数	初始值	优化后的值	两者的比较
一阶固有频率 $f/\text{Hz}$	1022.8	1208.6	提高 18%
主轴的质量 $m/\text{kg}$	10.141	8.9143	减轻 12%

[0087] 从表 4 电主轴优化前后结果来看,主轴一阶固有频率提高 18%,质量减小 12%,达到了明显的优化效果,同时实现了高刚性、轻量化双目标优化。对表 3 得到的设计变量优化结果合理取整,得到最终的优化结果如表 5 所示。

[0088] 表 5

[0089]

设计变量	初始值	优化得到的结果	圆整后的数值
悬伸量 $a/\text{mm}$	41	34.136	34
前端轴承跨距 $L_1/\text{mm}$	84	94.295	94
后端轴承跨距 $L_2/\text{mm}$	345	289.77	290
后端轴径 $D/\text{mm}$	62	55.274	55

[0090] 实施例 2：

[0091] 参考图 4,一种大型高精度数控成形磨齿机电主轴优化设计。该电主轴用于数控成



型磨齿机,用于大型齿轮的精密加工。具体按以下步骤对该电主轴实施优化：

[0092] 首先,根据待优化对象,预先定义优化的设计变量和优化目标。从图 4 可以看到,该电主轴前端由 4 个角接触球轴承两两一对背对背反装（对应图 5 组合轴承 4’、5’）;后端由 2 个角接触球轴承形成一对背对背安装支承（对应图 5 组合轴承 6’）。参考图 5,结构优化时,选择主轴悬伸量 a、前端轴承跨距 L<sub>1</sub>、后端轴承跨距 L<sub>2</sub>、前端轴径 D<sub>1</sub>以及后端轴径 D<sub>2</sub>作为设计变量,以高刚性和轻量化为优化目标。

[0093] 其次,建立该电主轴的参数化有限元模型。根据图 4 的几何模型,以图 5 确立的 5 个设计变量为可变参数,建立电主轴的参数化几何模型。用角接触球轴承的拟静力学模型事先计算出各个支承轴承的刚度,然后用弹簧替代图 5 中相应的轴承,然后以四面体单元划分网格,在弹簧与主轴接触点处细化网格 ;将轴承外圈约束为固定支撑,约束转子转动自由度,限制其周向转动 ;在主轴负载一端,施加 500N 的径向力,模拟径向载荷,建立起电主轴的参数化有限元模型。

[0094] 然后,确定设计变量取值范围、确定状态变量、设置约束条件,再求目标函数

[0095] 1) 设计变量

[0096] 如图 5 所示,在该实施例中,电主轴结构优化的设计变量有 :主轴悬伸量 a、前端轴承跨距 L<sub>1</sub>、后端轴承跨距 L<sub>2</sub>、前端轴径 D<sub>1</sub>以及后端轴径 D<sub>2</sub>。可表示为：

[0097]  $x = (x_1, x_2, x_3, x_4, x_5)^T = (a, L_1, L_2, D_1, D_2)^T$

[0098] 根据该电主轴装配结构尺寸以及这些设计变量优化时的可变范围,确定出这 5 个设计变量取值范围：

[0099]  $x_{\min} \leq x \leq x_{\max}$

[0100]  $x_{\min} = (156, 44, 300, 70, 60)^T$

[0101]  $x_{\max} = (200, 100, 400, 90, 80)^T$

[0102] 设计变量的初始值以及取值范围可用表 6 表示如下：

[0103] 表 6

[0104]

设计变量	初始值	下限值	上限值
悬伸量 a/mm	191	156	200
前端轴承跨距 L <sub>1</sub> /mm	54	44	100
后端轴承跨距 L <sub>2</sub> /mm	346	300	400
前端轴径 D <sub>1</sub> /mm	82	70	90
后端轴径 D <sub>2</sub> /mm	74	60	80

[0105] 2) 状态变量

[0106] 状态变量有四个 :轴的质量 m,轴端位移 δ ,一阶固有频率 f 以及最大切应力 τ 。

[0107]  $m(x) = (a, L_1, L_2, D_1, D_2)$

[0108]  $f(x) = (a, L_1, L_2, D_1, D_2)$

[0109]  $\delta(x) = (a, L_1, L_2, D_1, D_2)$

[0110]  $\tau(x) = (a, L_1, L_2, D_1, D_2)$

[0111] 3) 约束条件

[0112] 该主轴材料为 38CrMoA1,其弯曲变形时的最大许用切应力  $\tau_{\text{许}}=50\text{MPa}$ ,要求轴向位移不超过  $5\text{ }\mu\text{m}$ ,要求主轴总长度  $L_0=652\text{mm}$ 。所以,约束条件为:

[0113]  $\tau \leq \tau_{\text{许}}=50\text{MPa}$

[0114]  $\delta \leq \delta_{\text{max}}=5\text{ }\mu\text{m}$

[0115]  $L=L_0=652\text{mm}$

[0116] 4) 目标函数

[0117] 高刚性目标函数: $f_1(x)=f(a,L_1,L_2,D_1,D_2)$

[0118] 轻量化目标函数: $f_2(x)=m(a,L_1,L_2,D_1,D_2)$

[0119] 此发明中,电主轴结构优化是以高刚性、轻量化为目标,属于双目标优化。主轴的刚度与其一阶固有频率密切相关,一阶固有频率越高主轴刚度越大,也就是刚性越好。轻量化就是要求主轴在满足性能要求的前提下,质量越小越好。

[0120] 其次还要求:一阶固有频率在提高 10%的情况下尽量取最大值;主轴的质量在减轻 10%的情况下尽量取最小值。因此综合以上,确定该优化问题的状态变量、约束条件以及目标函数如表 7 所示:

[0121] 表 7

[0122]

状态变量	初始值	约束条件	目标函数
主轴的质量 $m/\text{kg}$	21.7	$m\leq 19.5$	Minimum
轴端径向位移 $\delta/\mu\text{m}$	4.185	$\delta\leq 5$	——
一阶固有频率 $f/\text{Hz}$	792.37	$f\geq 871.8$	Maximum
最大切应力 $\tau/\text{MPa}$	4.66	$\sigma\leq 50$	——
轴的总长度 $L/\text{mm}$	652	$L=652$	——

[0123] 最后,选取智能优化算法,优化求解,得到优化结果。表 8 是采用多目标自适应算法 AMO 得到的一组优化结果。优化前后结果对比参见表 9

[0124] 表 8

[0125]

$a/\text{mm}$	$L_1/\text{mm}$	$L_2/\text{mm}$	$D_1/\text{mm}$	$D_2/\text{mm}$	$\delta/\mu\text{m}$	$\tau/\text{MPa}$	$f/\text{Hz}$	$m/\text{kg}$
157.82	69.938	304.17	70.356	60.834	2.953	3.353	1059.5	17.214

[0126] 表 9

[0127]

优化的目标参数	初始值	优化后的值	两者的比较
一阶固有频率 $f/\text{Hz}$	792.37	1059.5	提高 33%

[0128]

芯轴的质量 $m/\text{kg}$	21.7	17.214	减轻 21%
---------------------	------	--------	--------

[0129] 从表 9 电主轴优化前后结果来看,主轴一阶固有频率提高 33%,质量减小 21%,达到了明显的优化效果,同时实现了高刚性、轻量化双目标优化。对表 8 得到的设计变量优化结果合理取整,得到最终的优化结果如表 10 所示:

[0130] 表 10

[0131]

设计变量	初始值	优化得到的结果	圆整后的数值
悬伸量 $a/\text{mm}$	191	157.82	158
前端轴承跨距 $L_1/\text{mm}$	54	69.938	70
后端轴承跨距 $L_2/\text{mm}$	346	304.17	304
前端轴径 $D_1/\text{mm}$	82	70.356	70
后端轴径 $D_2/\text{mm}$	74	60.834	61

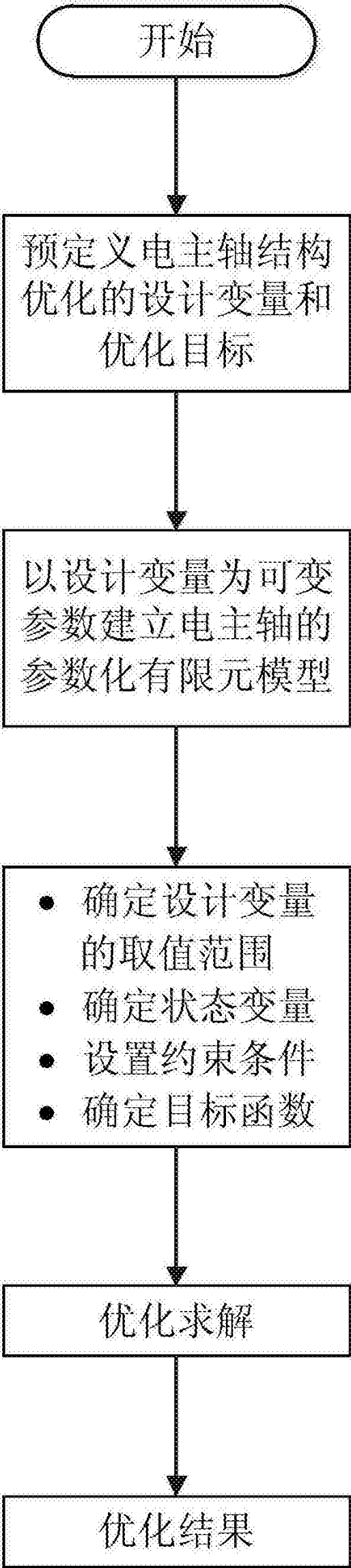


图 1

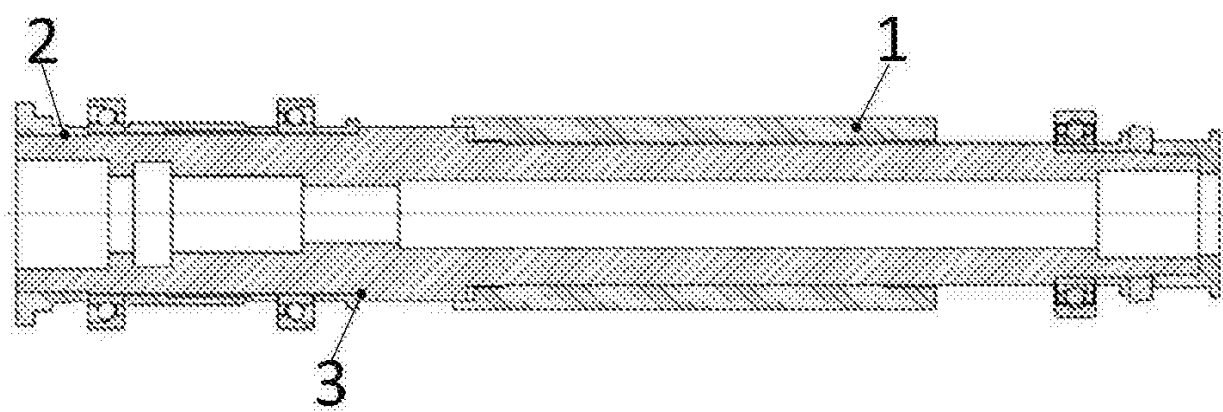


图 2

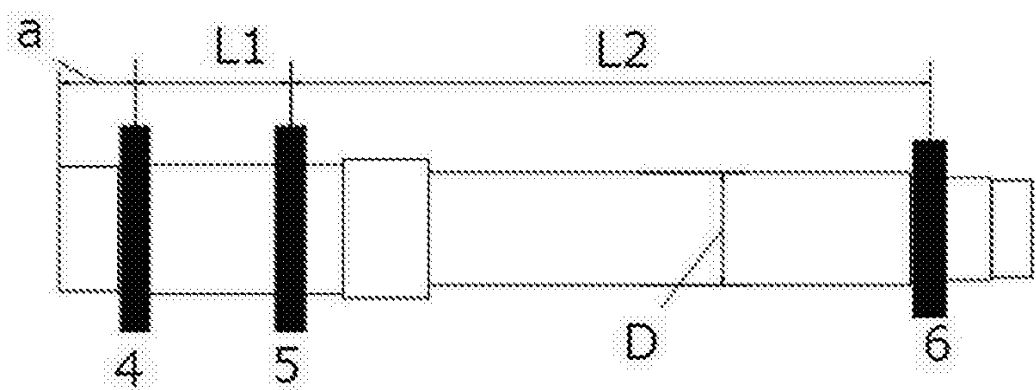


图 3

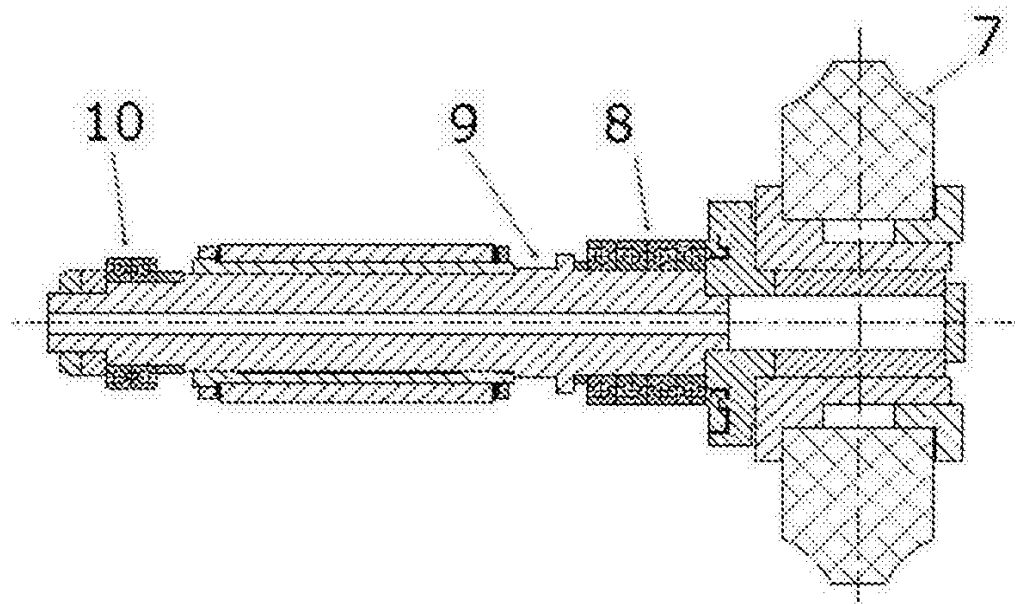


图 4

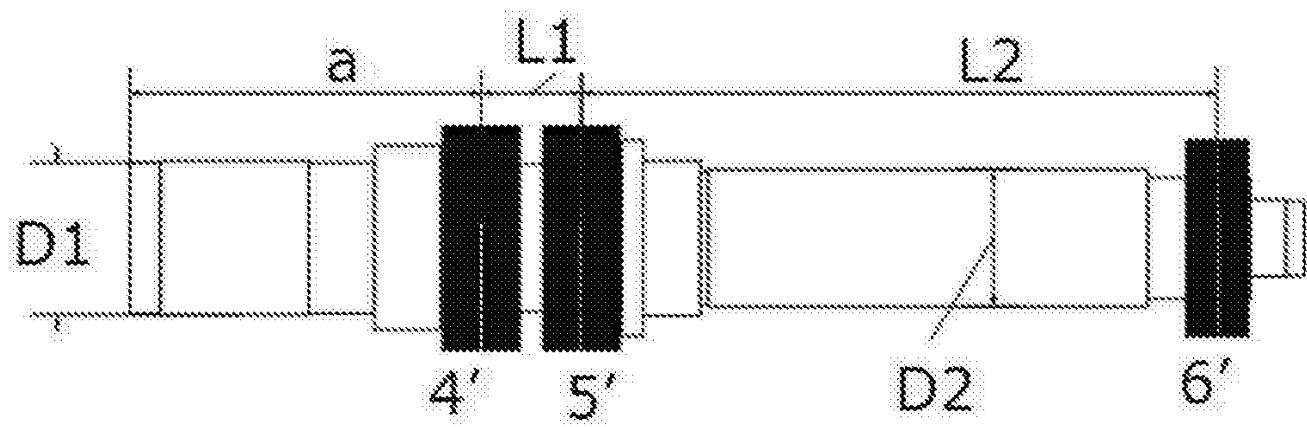


图 5