

基于遗传算法的机床主轴结构静态优化设计

方英武,张广鹏,傅卫平

(西安理工大学机械及精仪器工程学院 陕西 西安 710048)

摘要:利用边界元法(BEM)建立加工中心主轴系统的力学模型,通过遗传算法(GA)对机床主轴结构进行优化设计.算例研究结果表明,对于多约束优化问题,利用该算法可以较好地获得全局最优解,给出的主轴参数优化合理,能够满足工程实际应用的需要.

关键词：优化设计；主轴系统；边界元法；遗传算法

中图分类号: TH 133.2 文献标识码: A

0 引言

机床主轴部件是机床实现旋转运动的执行件,机床设计成功与否在一定程度上取决于主轴系统设计的优劣。机床主轴的基本形状是阶梯状空心轴,主轴设计的重要内容就是按刚度要求选择合理的最佳主轴参数,而影响主轴性能及加工精度的主要是主轴的弯曲变形,其中轴端变形将会直接影响工件加工精度及质量。

关于系统结构的优化设计,到目前为止,国内外学者已经提出了不少方法,但是,所有这些方法均使用数学规划技术寻找最优解,不少方法要求设计变量是连续的.实际上,在大多数工程设计问题中,设计变量往往是离散化的,机床主轴设计就是如此.有关离散化变量的结构系统优化设计也有不少方法,像 John 和 Ramakrishnan 的分枝定界线性规划方法等.这些数学规划方法,尤其是非线性规划方法,当用于工程设计问题中时,局限性很大,往往收敛到局部最优解,受初始值影响较大^[1~3].

近年来,遗传算法在函数优化中所具有的良好特性使得它在一些连续/离散变量的结构优化领域显示出极好的应用前景^[4].本文利用边界元法建立了机床主轴的力学模型,利用遗传算法对机床主轴结构进行了静态优化设计.算例结果表明,所用方法正确、有效,能够满足工程应用的需要.

1 边界元法解析

1.1 结构模型

加工中心主轴系统的力学模型应尽量地反映其实际的工作状态,使实际结果能真实地反映其性能,根据对加工中心主轴结构及主轴部件受力状况的实际分析,建立了如图 1 所示的结构示意图。在图示中,各字母所代表含义如下:

P_1 为主轴所受径向切削力; P_2 为主轴所受皮带张力; L_1, L_2, L_3 为阶梯轴长度; D_1, D_2, D_3 为阶梯主轴的轴外径; L_5 为主轴中间跨距; D_4 为主轴中间轴径。

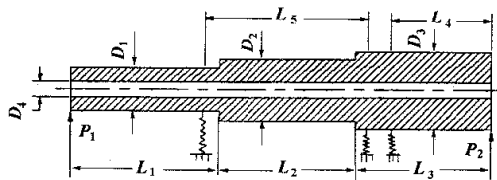


图 1 主轴系统简化示意图

1.2 边界元法建模解析

加工中心主轴系统在三支承作用下,受传动力及切削力作用,主轴会产生弯曲变形,对于变截面梁的三支承弹性结构的的梁单元问题,用常用的材料力学知识很难求解,本文采用边界单元法建立力学模型,并进行迭代运算求解。

边界单元法又称边界积分方程法,它通过积分变换把问题的控制方程转化为边界积分方程,

收稿日期 :1999-09-22 ;修订日期 :2000-01-08

基金项目 机械部机械工业发展基金资助项目(96JA0717-D)

作者简介:方英武(1972-),男,安徽省贵池市人,西安理工大学硕士研究生。

万方数据

这是一种半数值半解析法^[5].如图 2 所示建立边界元法的梁单元模型和弹性支承单元模型.

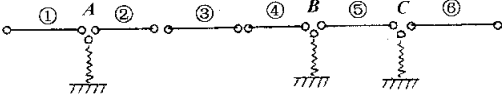


图 2 BEM 梁单元模型图

考虑到单元之间力、位移的结合条件：

$$\begin{cases} V = V' ; \\ T = T' ; \\ M = - M' ; \\ Q = - Q' , \end{cases}$$

式中： V, V' 表示挠度即变形量； T, T' 表示转角； M, M' 表示弯矩； Q, Q' 表示剪力。

由结合条件将每个单元进行组合，建立如下方程式^[6]

$$[A] \cdot \{U\} = \{P\}$$

式中 $[A]$ 为系数矩阵； $\{U\}$ 为待求未知量； $\{P\}$ 为已知量。

应用迭代算法求解，其计算框图如图 3 所示。框图中 $P_A, P_B, P_C, P'_A, P'_B, P'_C$ 分别为支承点处迭代前后的作用力； $V_A, V_B, V_C, V'_A, V'_B, V'_C$ 分别为支承点处迭代前后的变形量； ε 为迭代精度值； K 为支承刚度。通过迭代解析，可以求得端部的位移值。

2 机床主轴系统的优化数学模型

如图 1 所示，选取 $L_1, L_2, L_3, L_4, L_5, D_1, D_2, D_3, D_4$ ，作为主轴部件的优化设计变量。令 $X = L_1, L_2, L_3, L_4, L_5, D_1, D_2, D_3, D_4, X$ 的求解方法见框图 3。

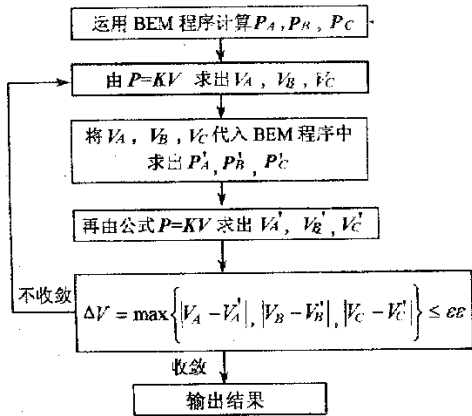


图 3 BEM 计算程序框图

考虑到各种实际因素，在主轴重量一定的情

况下，把主轴轴端变形量 $V(X)$ 最小作为优化目标，同时考虑到在结构设计中，对主轴系统的提出的多种约束条件^[6]，可建立如下的优化数学模型：

$$\begin{cases} \text{目标函数} : \min V(X) ; \\ \text{约束条件} : g_j(X) < \alpha \quad (j = 1 \dots n) , \end{cases}$$

式中： n 是约束数目； $g_j(X)$ 为约束条件函数。

3 遗传算法的应用

3.1 基本思想

遗传算法是基于自然遗传和自然优选机理的寻优方法，这是一个迭代过程。在迭代过程中都保留一组候选解按其解的优劣进行排序，并按某种指标从中选出一些解，然后用遗传算子（如交叉、变异等）对其进行运算，产生新一代的一组候选解，重复这个过程，直到满足某种收敛指标为止。

3.2 染色体表示

将遗传算法用于机床主轴的优化设计时，首先需将设计变量表达成二进制或十进制代码位串的形式，位串叫做染色体，一个染色体就表示了一个设计点，在本文中采用了十进制编码的形式^[8]。

3.3 适应度值的确定

GA 中的适应度函数通常是非负的，而且标准 GA 一般要求将求解问题表示成最大化问题，这样对一任意的优化问题，首先要将其数学表达式表示为 GA 适于求解的形式，同时要保证二者在数学优化上是等价的，这个过程叫适应变换，可以通过一次或多次数学变换（或映射）来实现，对于带约束的优化问题，可用惩罚函数将其转化为无约束问题。将惩罚系数 C 定义为

$$C_j = \begin{cases} g_j(X) & ; g_j(X) > 0 \\ 0 & ; g_j(X) \leq 0 \end{cases} ,$$

而

$$C = \sum_{j=1}^{m_0} C_j ,$$

其中， m_0 为约束数目。

则该无约束问题变为 $Q(X) = V(X)(1 + KC)$ ，参数 K 的大小根据违约影响确定。为了进行迭代计算，需对母体群中的每一个个体的优劣程度进行评价，这里用评估函数 $G^*(x)$ 表示适应度函数。

$$G_s^* = 1 - \frac{Q_s(X)}{Q(X)_{\max} + Q(X)_{\min}} .$$

式中： $Q_s(X)$ 表示第 s 个母体所对应的无约束问题的函数值； $Q(X)_{\max}, Q(X)_{\min}$ 分别表示无约束问题的最大值和最小值， G_s^* 表示第 s 个母体的

函数值,显然, G_s^* 的值越大,该母体越优越.

3.4 种群选择方法

选择就是去劣存优,为染色体的交叉和变异作群体选择.而采用何种方法进行选择形式匹配集,对 GA 性能有很大的影响.选择就是模拟自然选择规律,适应度高的个体被选择的可能性大,因此适应度为群体的进化提供了选择压力.本文采用了适用度比例法,即根据 N 个染色体的适应度函数值的大小来选择染色体进行复制,并将其拷贝到下一代,每个染色体被选择的概率为

$$P_{k_i} = \frac{G^* \cdot (k_i)}{\sum_{i=1}^n G^* \cdot (k_i)}.$$

由公式可知, P_{k_i} 越大,即适应度函数值越高的染色体被选择的机会就越大.

3.5 遗传算子操作(GA 操作)

3.5.1 交叉(Crossover)

交叉过程是随机地选择两个染色体作为母体,再随机地产生染色体中的一位置,将两个母体在这一位置后的子串进行交换,而形成两个新的染色体.染色体是否发生交叉由交叉概率 P_c 决定.

3.5.2 变异(Mutation)

变异过程是以较小的概率 P_m 随机地改变染色体串上的每一位.在二进制表示的染色体中,发生变异时,对所选择的每一个母体,从 $[1, 2, \dots, m]$ 中随机选出一参数 Bit, Bit 表示变异的码所在的位置,即 0 变成 1,而原来的 1 则变成 0.我们选择了合适的 P_m, P_k, P_c 值,运用 GA 操作,经过数代遗传,其值满足一定的收敛准则后,根据收敛准则

则 $\left| \frac{G_{\max}^*(X) - \bar{G}^*(X)}{\bar{G}^*(X)} \right| \times 100\% < \epsilon$ 判断是否满足要求,式中: $G_{\max}^*(X)$ 表示最好的解的适应度值, $\bar{G}^*(X)$ 表示平均适应度值,分别将各母体二进制码转换为十进制码,并找出对应的设计变量值,进而求出 $\alpha(X)$ 值,即得到原问题的最优设计方案 X .

4 优化设计算法及算例

根据上述思想,在 Fortran power station 上采用 Fortran 语言编制出相应的计算程序,其总体运行程序框图如图 4 所示.

以加工中心主轴为例,对其主轴进行结构优化设计,如图 1 所示. $E = 200 \text{ GP}$, $P_2 = 363 \text{ N}$, $P_1 = 6324 \text{ N}$, $K_A = 5000$, $K_B = 2500$, $K_C = 2500$, 其主要参

数值变化范围为: $D_4 = 60 \sim 90 \text{ mm}$, $L_4 = 110 \sim 180 \text{ mm}$, $L_5 = 300 \sim 500 \text{ mm}$, $D_4/D_1 \geq 0.5$, $D_2 - D_1 \geq 5$, $D_3 - D_2 \geq 5$, $L_1 - L_4 \geq 20$, $40 \geq L_4 + L_5 - L_1 - L_2 \geq 20$. 计算中,取交叉概率 $P_c = 0.3$,变异概率 $P_m = 0.02$, $\epsilon = 0.005$,主轴的重量为 4.1 kg ,用遗传算法进行求解,取种群大小为 20,染色体长度为 8,即每个设计变量以 4 位二进制位串表示进行优化计算,优化结果为 $L_1 = 175 \text{ mm}$, $L_2 = 260 \text{ mm}$, $L_3 = 155 \text{ mm}$, $L_4 = 115 \text{ mm}$, $L_5 = 360 \text{ mm}$, $D_1 = 75 \text{ mm}$, $D_2 = 80 \text{ mm}$, $D_3 = 85 \text{ mm}$, $D_4 = 60 \text{ mm}$, $V = 0.0006 \text{ mm}$,经过实际检验,符合工程设计要求,因而此方法是可行的.

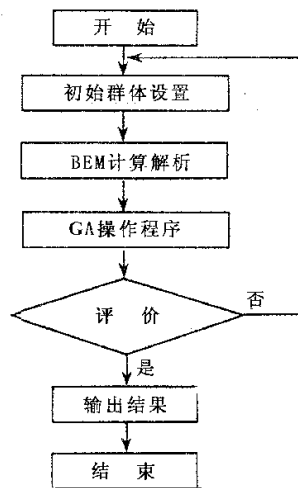


图 4 主轴优化程序框图

5 结语

算例研究表明,应用边界元法建立机床主轴结构系统多支承静力学模型,并用遗传算法进行结构优化设计,能够快速找到全局最优解,大大减少了计算工作量.这为主轴结构优化设计提供了一个新方法,减少了传统的靠经验设计所带来的盲目性,为主轴结构的高性能、轻量化设计提供了理论依据.

参考文献:

[1] 姚新策.进化算法研究进展[J].计算机学报,1995,18(9):20-28.
[2] WALTER G A, BEAK T. Optimal layout of tree networks using genetic algorithms[J]. Engineering Optimization, 1993, 20(1):1-22.
[3] GOLDBERG D E. Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine learning[M]. MA: Addison Wesley, 1989.

- [4] 刘 勇. 非数值并行算法——遗传算法(第二册) [M]. 北京: 科学出版社, 1995.
- [5] 王有成. 工程中的边界元方法[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1996.
- [6] 班努杰 P K. 工程科学中的边界元法[M]. 北京: 国际工业出版社, 1988.
- [7] 机床设计手册编写组. 机床设计手册(第三册) [M]. 北京: 机械工业出版社, 1986.

Static Design of Structural Optimization of Spindle System For Machine Tool Based on Genetic Algorithm

FANG Ying - wu , ZHANG Guang - peng , FU Wei - ping

(College of Machinery & Precise Instrument ,Xi 'an University of Science & Technology ,Xi 'an 710048 ,China)

Abstract Boundary element method (BEM) is used to establish the mechanical model for spindle system in the paper. Genetic algorithm(GA) is applied to optimizing spindle structural system. The result of this study shows that it will guarantee a global optimum with multiple restrains. The optimal parameters given of spindle system are reasonable. It can meet the needs of the engineering application.

Key words 边界元法 ; spindle design ; spindle system ; boundary element method ; genetic algorithm