

# 基于遗传算法的锻压机床多目标优化设计方法

申 远 金 一 褚 彪 骆念武 竺长安

中国科学技术大学,合肥,230027

**摘要:**提出了一种基于遗传算法的锻压机床优化设计方法,并基于该方法开发了一个以多目标参数优化系统为核心的优化设计平台。该设计平台综合运用了 Pro/E 的建模及分析计算能力和 MATLAB 的数学分析处理能力,使得在该优化平台上进行的优化设计既可以保证以精确的实体模型的分析结果为指导,又能基于遗传算法进行多参数多目标协同优化,从而提高了锻压机床的设计效率和优化效果。以某锻压机床为实例,验证了该平台的有效性和可靠性。

**关键词:**锻压机床;优化设计平台;遗传算法;多目标优化

**中图分类号:** TG305

**DOI:**10.3969/j.issn.1004-132X.2012.03.009

## A Multi-objective Optimization Method for Forging Machine Based on Genetic Algorithm

Shen Yuan Jin Yi Chu Biao Luo Nianwu Zhu Chang'an

University of Science and Technology of China, Hefei, 230027

**Abstract:** This paper proposed a genetic algorithm-based design and optimization method for forging machines, and based on this method developed an integrated platform whose core was a multi-objective optimization system. It can direct the design, expedite the optimization and improve the optimization result by calculating the precise analysis results of 3D models and carrying through multi-objective optimization based on genetic algorithm. Finally, the reliability and validity of the platform was validated by optimizing a forging machine.

**Key words:** forging machine; integrated design and optimization platform; genetic algorithm; multi-objective optimization

## 0 引言

锻压机床是航空航天、汽车制造、交通运输、冶金化工等重要领域的基础工业装备,对锻压机床进行整体结构优化设计是降低成本、提高性能的有效途径。结构优化设计包括尺度优化、形状优化和拓扑优化三种。拓扑优化旨在确定最优拓扑结构,形状优化旨在确定结构的最优形状,而尺度优化旨在确定结构各部分的尺寸。机床结构优化设计研究主要有以下两个方面:①对机床整体结构进行形状或拓扑优化设计;②对构成机床结构的关键零部件进行尺寸优化,以提高床身的性能<sup>[1]</sup>。上述工作对改善机床结构动静态性能,提高其抗振性能,节省材料起到了重要作用。本研究将上述优化方法有机结合,即在进行整机全局优化的同时进行关键零部件和结构的优化,设定包含机床质量、动静态性能指标以及稳定性指标的目标函数,引入遗传算法进行多目标协同优化,开展随机搜索,最终获取最优解即锻压机床的整

体最优结构、关键部件及结构的最优拓扑结构与尺寸参数,达到减小总体质量的同时提升机床结构的动静态性能以及整体稳定性的目标。

随着 CAD/CAE 技术的飞速发展,在锻压机床优化设计中已经广泛应用了多种 CAD/CAE 软件进行系统性分析计算以指导优化设计<sup>[2]</sup>。利用静态有限元分析可以校核机身部件的强度和刚度,并根据分析结果进行结构改进设计,降低成本,提高效益。上述工作仍普遍存在以下问题:

(1) Pro/E、UG 等实体模型软件可以建立精确的机床实体模型并进行 CAE 分析计算、敏感度分析,对其结构设计进行方向性指导,但是不便于进行多参数的协同优化。

(2) MATLAB 等数学分析软件可进行简化模型的多参数协同优化,但由于缺少了实体的特性(而一般锻压机床的结构都具有其特殊性),使得优化结果与实际结果往往有分歧。

本文在国内外学者的各种快速设计、多目标优化的理论基础<sup>[3-5]</sup>,充分运用 Pro/E 软件的二次开发工具以及 MATLAB 软件良好的扩展性,将多个子系统集成为一个多目标优化设计平

收稿日期:2010-12-21

基金项目:国家高技术研究发展计划(863 计划)资助项目(2007AA04Z1A2)

台,较好地解决了上述两个冲突的问题,可以在保证对实体模型进行精确有限元分析的基础上,进行基于遗传算法的多参数协同优化,实现锻压机床结构的最优化。

## 1 多目标优化设计平台结构及优化流程

### 1.1 平台结构

多目标优化设计平台结构如图 1 所示。该多目标优化设计平台由实体模型库系统、分析计算系统、调度管理系统、参数优化系统 4 个子系统组合而成。

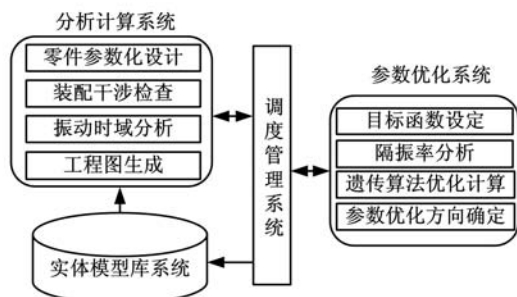


图 1 多目标优化设计平台结构示意图

(1) 实体模型库系统。以 Pro/E 应用软件的三维参数化零件模型、装配模型为数据源,综合运用 SQL Server 数据库,建立了一个完善的锻压机床模型数据库系统。

(2) 分析计算系统。以 Pro/Mechanical 平台为基础,分析计算系统可以通过对实体模型库系统中的参数化零件及组件进行组织和加载计算,得到需求的各种应力、应变的计算结果。

(3) 参数优化系统。参数优化系统基于 MATLAB 软件平台的数学分析系统生成参数种群,并通过调度管理系统获得各参数的分析计算结果,结合优化目标函数进行多次交叉、变异的算法处理,进行参数的优化。

(4) 调度管理系统。调度管理系统综合管理其他 3 个系统,是整个集成系统的核心。它负责将模型库的模型调入分析计算系统进行分析计算,并将分析计算结果调入参数优化系统进行优化,优化结束后,根据优化结果进入模型库修改参数化模型的参数,然后再次分析计算,直至获得最优参数。

### 1.2 平台优化流程

多目标优化平台的 4 个子系统将分工协作,完成整个锻压机床的参数优化工作。优化平台可根据模型库的参数化模型以及机床的结构和工艺特性,确定进行优化的目标参数和优化目标函数,然后生成参数种群。对于生成的参数种群,通过

调度管理系统进行模型库参数化零件的参数修改,并将其整体模型载入分析计算系统进行计算分析,再将计算结果放入分析系统进行目标函数的分析,当待设定的参数种群分析完毕后,针对其结果用交叉、变异算子进行参数种群的处理和筛选,获得新种群,再次迭代计算,直至获得最优参数。优化机制如图 2 所示。

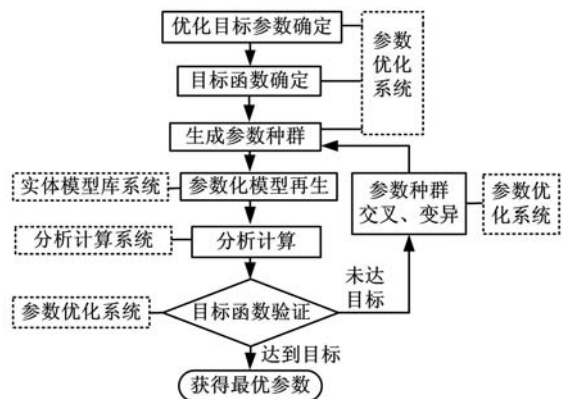


图 2 多目标优化设计平台优化流程

## 2 模型库系统及分析计算系统设计

模型库系统的主要功能是:系统地存放锻压机床零件以及组件模型,形成模型库文件系统,提供良好的外部接口给调度管理系统来访问指定零件、修改零件尺寸参数,并且能够将模型快速地提供给分析计算系统进行分析计算。锻压机床模型是基于 Pro/E 建立的三维实体模型,在模型库系统中,将机床模型按照结构分类存储,包括了 .PRT 零件文件以及 .ASM 装配体组件文件。模型的 ID、名称、结构信息、位置指针等属性信息都存储于模型库中,调度管理系统通过查询文件的信息调用模型库中已有的相关模型。

分析计算系统是基于 Pro/E 软件中的 Pro/Mechanical 分析平台构建的。Pro/Mechanical 是模拟模型的物理特性并据此改进所设计产品的机械性能的 CAE 模块,Pro/Mechanical 可以直接使用 Pro/E 的三维实体模型进行有限元分析计算。该子系统根据调度系统传入的模型库的模型,结合预先设置的载荷、约束,计算出零件应力及局部变形结果,并将此结果传递给调度系统备用。

## 3 调度管理系统设计

调度管理系统负责协调平台的几个子系统,主要功能如下:①访问模型库系统,修改实体模型的指定参数;②管理分析计算系统对准备好的机床模型进行分析计算,并取得计算结果;③将分析

系统的计算结果传给参数优化系统进行结果分析,并获得模型参数的进化方案。

调度管理系统通过 Pro/E 软件的二次开发接口来调度和管理模型库系统以及分析计算系统。Pro/E 用于二次开发的接口即 Pro/Toolkit 可以让用户以编程方式实现自己所需要的特定功能。我们充分利用 C++ 的 MFC 类库,在该优化设计平台的研究中采用 Pro/Toolkit 二次开发的接口结合 Visual Studio 2005 平台的方式来进行系统的实现<sup>[6-7]</sup>。

调度管理系统通过模型的 ID 将存储在模型库分配的物理介质上的实体模型加载到 Pro/E 软件中,然后对实体模型的参数对象和尺寸对象进行重新配置,并对参数对象和尺寸对象进行校验、干涉检查,判断是否满足装配约束条件。如果满足约束条件,则按参数对模型进行再生,生成新的模型,并调用 Pro/Mechanical 进行指定的分析计算。以上都是调用 Pro/Toolkit 所提供的库函数来驱动模型的,其流程如图 3 所示。

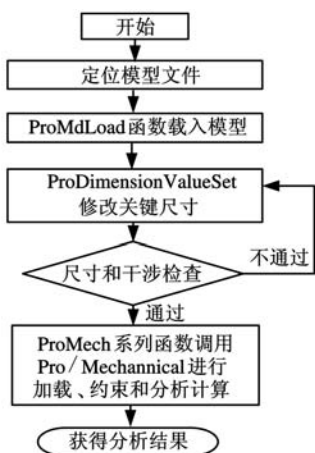


图 3 调度管理流程

调度管理系统对参数优化系统的管理调用是通过调用在 MATLAB 软件平台上开发的一个动态链接库实现的<sup>[8]</sup>。参数优化系统的参数种群经过模型库以及分析计算系统获得对应的计算结果,然后将计算结果连同对应的参数反馈给参数优化系统,参数优化系统将根据设置的目标函数来进行基于遗传算法的参数优化,最终得到最优的参数。

## 4 基于遗传算法的参数优化算法

### 4.1 设计变量

本系统可以针对优化对象的不同确定不同的设计变量,经过分析判定,我们在此选择锻压机床上下横梁的纵向及横向板厚和板间距 8 个变量作为设计变量。

### 4.2 目标函数

锻压机床的设计目标是提高锻压机床的精度和稳定度,并且在材料的许用应力范围内使锻压机床的总质量最小。因此本文的目标函数的作用因子选择上横梁的横向弯曲度和纵向弯曲度、锻压机床的最大应力及机床的总质量。

在评价锻压机床的稳定性和精度时,主要参考上横梁的纵向弯曲度和横向弯曲度,弯曲度越小,锻压机床压制的产品精度越高,且产生的振动也越小,即机床的稳定性越好。这两个弯曲度将作为我们设置目标函数的主要依据。

在保证锻压机床精度的前提下,减小锻压机床的质量也会使机床的耐久性和稳定性提高,同时也能降低生产成本,因此,机床总质量也是优化目标函数的一个重要因素。

此外,锻压机床的应力集中的最大值也是目标函数的一个因素,最大应力值越大,对目标函数带来的负面影响也越大。

因此,总体的目标函数由以上 4 个目标函数加权组成:

$$J_o = \sum_{i=1}^4 \omega_i J_{Ti}$$

式中,  $\omega_i$  为目标函数的权系数,可以根据锻压机床型号的不同以及优化目标的不同进行调整;  $J_{Ti}$  为子目标函数。

### 4.3 遗传算法

本系统采用自定义函数的方式进行整数序号编码<sup>[9-10]</sup>。个体的每个基因数值用某一范围内的整数表示。经过编码的染色体长度等于设计变量的数目 4。每个设计变量可选的离散值个数为  $m_i$  ( $i=1,2,3,4$ ),每个设计变量  $x_i$  的基因值为  $[1, m_i]$  中的随机数。

对于遗传算子的设置,我们采用 MATLAB 工具箱缺省的适应度比例函数 Rank 作为适应度比例参数,采用随机均匀分布选择函数作为选择参数,并采用遗传算法工具箱的缺省再生参数、交叉参数。

采用惩罚函数法进行约束的处理,也就是在原来的个体适应度的基础上添加一个惩罚因子,以降低不满足约束条件的个体的适应度,即

$$F'(x) = \begin{cases} F(x) & x \text{ 满足约束} \\ F(x) + P(x) & x \text{ 不满足约束} \end{cases}$$

式中,  $F(x)$  为原来的适应度函数;  $P(x)$  为惩罚函数。

运用遗传算法进行参数优化的具体过程如图 4 所示。

## 5 计算实例

以某型号的锻压机床为例进行优化设计。整体模型及优化过程中的变形分析界面见图 5。

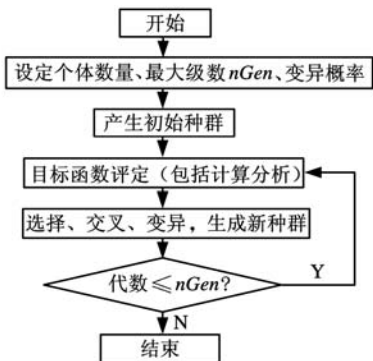
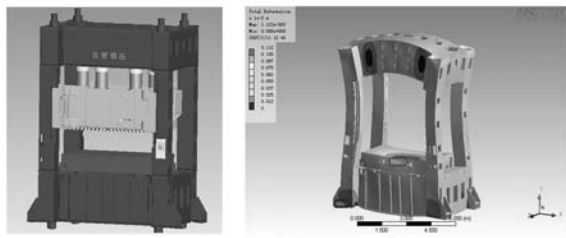


图 4 基于遗传算法的参数优化流程图



(a) 实体模型

(b) 变形分析界面

图 5 某型锻压机床实体模型及变形分析界面图

表 1、表 2 为该型锻压机床多目标优化设计平台优化前后的参数变化以及技术指标对比。

表 1 优化前后参数变化

参数名	D1	D2	D3	D4
优化前(mm)	40	35	40	30
优化后(mm)	37.8	36.2	39.5	32.4
参数名	D5	D6	D7	D8
优化前(mm)	40	40	35	40
优化后(mm)	35.8	34.6	36.7	36.7

表 2 优化前后技术指标

	横向变形差 (mm)	纵向变形差 (mm)	最大应力 (MPa)	质量 (kg)
优化前	0.44	0.32	227	270 150
优化后	0.38	0.28	196	255 880

锻压机床经过多目标优化后,横向变形差由初始的 0.44mm 减小到 0.38mm,纵向变形差由初始的 0.32mm 减小到 0.28mm,机床最大应力由 227MPa 减小到 196MPa,质量由初始的 270 150kg 减小到 255 880kg,减小 14 270kg,达到了减小变形差和应力集中的同时减小机床质量的目的。经过优化,机床的结构更加合理,应力的分配更加符合工作要求,达到了结构优化的目的。

在进行计算机分析计算的同时,我们也对新制造的锻压机床进行了试验测量,得到了与分析计算一致的结果,验证了本文优化平台分析计算结果的正确性。

## 6 结语

本文针对锻压机床的优化设计技术进行了研究,提出了一个集成优化设计平台,为锻压机床的设计及性能优化提供了个良好的支撑平台。该平台通过调度管理系统对参数化模型库、分析计算系统及参数优化系统的协调管理,实现了结合有限元分析和遗传算法的参数优化,并且以某型锻压机床为例,验证了平台的正确性和可靠性。

## 参考文献:

- [1] 满佳,张连洪,陈永亮. 基于元结构的机床结构可适应优化设计方法[J]. 中国机械工程, 2010, 21(1): 51-54.
- [2] 陈开. 锻压机床快速优化设计方法研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2009.
- [3] 张勇,李光耀,王建华. 多目标遗传算法在整车轻量化优化设计中的应用研究[J]. 中国机械工程, 2009, 20(4): 500-503.
- [4] Xu Bin, Chen Nan, Che Huajun. An Integrated Method of Multi-objective Optimization for Complex Mechanical Structure[J]. Advances in Engineering Software, 2010, 41: 277-285.
- [5] Park Chung Hae, Saouab A. An Integrated Optimisation for the Weight, the Structural Performance and the Cost of Composite Structures[J]. Composites Science and Technology, 2009, 69: 1101-1107.
- [6] 魏坤,钟小强,陈开,等. 基于 Pro/Toolkit 的锻压机床装配模型快速设计[J]. 计算机工程, 2008, 34(21): 239-241.
- [7] 二代龙震工作室. Pro/TOOLKIT Wildfire 2.0 插件设计[M]. 北京: 电子工业出版社, 2005.
- [8] 王素立,高洁,孙新德,等. MATLAB 混合编程与工程应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2008.
- [9] 张京军,崔炜,王南. 小生境遗传算法的多刚体系统动力学参数优化设计[J]. 机械工程学报, 2004, 40(3): 66-70.
- [10] Goldberg D E. Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning[M]. Boston, MA: Addison-Wesley, 1989.

(编辑 苏卫国)

作者简介: 申 远,男,1985 年生。中国科学技术大学精密机械与精密仪器系博士研究生。主要研究方向为 CAE、智能控制。发表论文 10 余篇。金 一,男,1985 年生。中国科学技术大学精密机械与精密仪器系博士研究生。褚 彪,男,1985 年生。中国科学技术大学精密机械与精密仪器系博士研究生。骆念武,男,1970 年生。中国科学技术大学精密机械与精密仪器系实验师。竺长安,男,1957 年生。中国科学技术大学精密机械与精密仪器系教授、博士研究生导师。