

数控转塔冲床横梁结构的分析与优化设计

于卫红

(南京师范大学 电气与自动化工程学院, 江苏 南京 210042)

[摘要] 针对数控转塔冲床进给系统的发展现状以及存在问题,对数控转塔冲床进给系统中的横梁结构进行分析,明确了这类高速运动部件在受到运动加速载荷的工况下的结构位移,确定了以横梁动载荷为主要受力状态的分析条件,通过对分析对象的合理结构简化,制定了横梁在分析中的边界条件,并采用 APDL 语言将有限元模型参数化,分析结果为高速数控转塔冲床的进给机构的设计提供了科学计算的依据,改变了依靠类比设计的传统方法.计算表明,在横梁板厚减薄的情况下,这一关键部件同样可以满足机床的加工精度和运动要求.由此减轻了机床结构件的重量,降低了成本.

[关键词] 数控转塔冲床, 进给机构, 有限元分析, 优化设计

[中图分类号] TH 164 [文献标识码] A [文章编号] 1672-1292(2010) 02-0021-06

Analysis and Optimization for the Servo-Beam of A CNC Turret Punch Press

YuWeihong

(School of Electrical and Automation Engineering, Nanjing Normal University, Nanjing 210042, China)

Abstract Based on the study of the feeding system of CNC turret punch press, the beam structure of a CNC turret punch press is taken as the research object. The displacement of this kind of high speed moving parts has been obtained under dynamic load with its computation condition. By the simplification of the beam, the definition of its boundary condition and APDL language application, the parametric model are analyzed. Through the analysis of punch allowance, the design data for the servo-beam has been achieved with scientific method, which is totally different from the traditional analogy method in this industry. The research shows that the thin wall structure has almost no affect on the machine accuracy because the beam has enough rigidity in both X and Y and the weight of the machine tool can be further lightened to cut the product cost.

Key words CNC turret punch press, feeding system, FEM, optimization design

数控转塔冲床是一种加工多孔薄板的自动化设备. 由于机床公称力大, 进给速度高, 且冲压频率高, 在工作过程中, 往往会引起运动部件的抖动, 甚至造成进给机构的横梁变形, 引起冲孔位置精度下降, 模具寿命缩短, 因此数控转塔冲床横梁结构设计的优劣将直接影响设备的加工速度、加工精度、工作稳定性和可靠性^[1]. 本文以大型通用有限元分析软件 ANSYS 为分析工具, 对进给系统中的关键部件横梁进行有限元建模及静态特性分析, 并在分析的基础上, 根据轻量化设计的思想^[2], 对横梁结构进行了优化设计.

1 横梁结构静态特性分析

1.1 横梁有限元模型的建立

在 CAD 软件中建立的分析对象几何模型可以通过 ANSYS 与 CAD 软件的接口直接导入 ANSYS 环境中. 在建模过程中, 需要对模型进行简化使模型易于建立和分析, 并确保原始分析对象的主要结构力学性能不发生变化. 考虑下列假设和简化:

- (1) 忽略横梁上明显不会影响其整体强度和刚度的部分细节, 如弯角、筋板等;

收稿日期: 2010-03-15
通讯联系人: 于卫红, 讲师, 研究方向: 机械制造及自动化. E-mail: 63032@njnu.edu.cn

(2) 各折弯部件之间的焊接假设为等强焊接, 其强度等于折弯件本身的强度。

横梁有限元模型图如图 1 所示。

1.2 载荷与边界约束条件

在数控转塔冲床实际工作中, 横梁上的夹钳将夹紧板材, 并以 10 m/s^2 的加速度在导轨上高速运动, 到达给定位置进行冲压加工。由于横梁采用的是钢板焊接薄壁结构, 本身重量和受到的载荷有限, 因此分析中主要考虑横梁高速运动下, 结构质量或惯性载荷的作用^[3]。

考虑横梁的结构所含的质量分布以及横梁的加速度相关, 采用分布载荷^[4], 表达式^[4]如下:

$$F = M a$$

假设横梁的高速运动加速度数值为 10 m/s^2 , 方向为 x 轴正向。忽略横梁底部丝杆座, 认为横梁承受自重外, 主要承受加速度引起的惯性力。

1.3 计算结果分析与研究

由于影响数控转塔冲床冲孔精度的主要因素是横梁产生的位移, 将造成夹钳夹持板材出现偏差, 所以本文把横梁的位移作为研究重点。确定了上面的条件, 经过计算机运算, 得出了横梁结构位移分布, 应力分布, 如图 2 和图 3 所示。

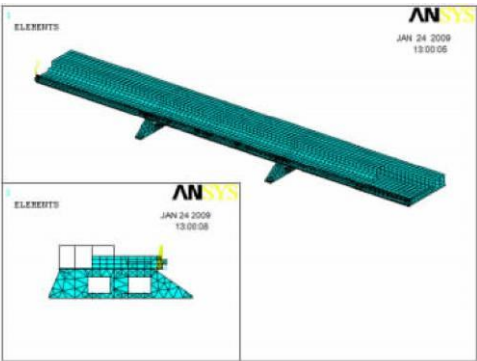


图 1 横梁有限元模型图
Fig.1 The FEA model of the beam

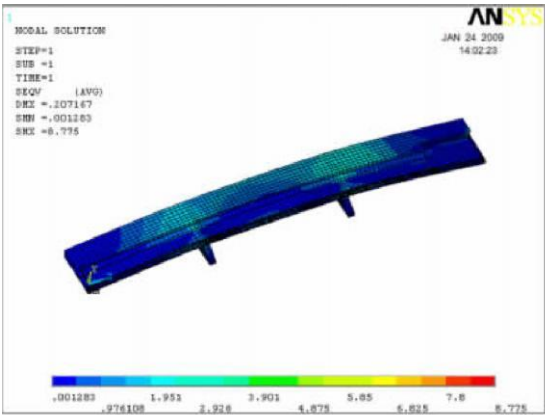


图 2 横梁应力分布图
Fig.2 Stress distribution

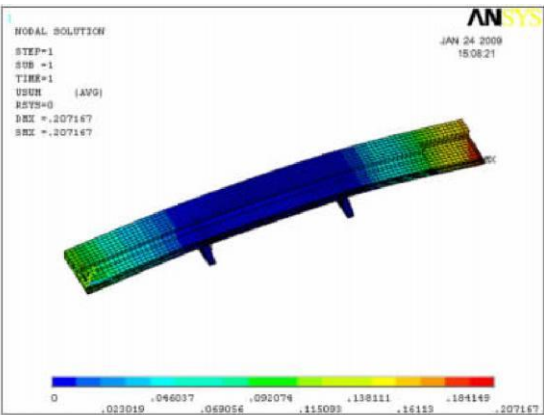


图 3 横梁变形图
Fig.3 Deformation distribution

强度特征: 从横梁的应力分布图来看, 结构的最大应力出现在纵向进给的支持面处, 应力值远远小于材料的许用应力。由于承受惯性力的影响, 且处于结构两支撑面中间, 因此, 其应力分布相对均匀, 应力范围出现在两支撑面之间, 在支撑面附近加大。

刚度特征: 从横梁位移图来看, 结构的位移变化发生在结构的两端, 而最大位移发生在结构的最右端。主要原因是结构的最右端刚度相对薄弱, 因为结构设计过程中需要考虑安装横向进给的驱动电机。

通过结构的静态分析, 在结构承受静态载荷作用下, 进给机构的应力值和位移值都比较小。结构发生的最大应力为 10.141 MPa 远小于材料的许用应力, 强度上满足使用要求, 同时结构的最大变形为 0.229 mm , 刚度也满足要求^[6]。由此可见, 结构在整体强度和刚度方面都有比较大的裕量, 可以优化进给机构横梁钢板的厚度以减轻进给机构的质量, 降低成本。

2 横梁结构的优化设计

2.1 横梁焊接板的厚度对横梁结构应力和变形的影响

从横梁的组成来看, 其结构基本都是通过板的焊接构成的^[1], 一共有 3 种厚度的板, 其中大部分都是 8 mm 钢板的焊接结构, 定义为 T_1 ; 加强肋部分定义为 T_2 , 为 12 mm ; 横向进给电机座后挡板厚度定义为

T3 为 20mm. 下面通过对这些板的厚度的分析, 找出板的厚度与结构应力和变形的对应关系, 从而对这些板进行优化.

2 2 T1的变化对结构应力和变形的影响

T1的变化范围是 4~ 12 mm, 引起的结构应力和变形变化如图 4和图 5所示.

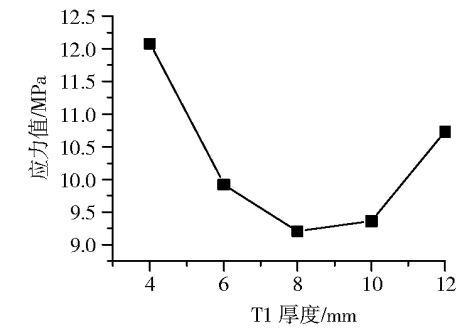


图 4 板 T1 厚度对结构应力的影响
Fig.4 The size of T1 affects stress

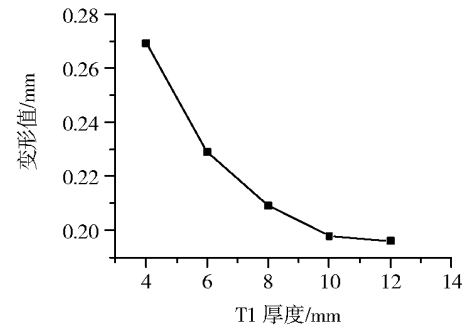


图 5 板 T1 厚度对结构变形的影响
Fig.5 The size of T1 affects deformation

从结构应力变化图中可以看出, 由于钢板厚度的增加, 结构强度和刚度得到提高, 应力先是随着 T1 钢板厚度的增加而减小; 但钢板厚度继续增大时, 由于结构重量的增加, 惯性力增大, 反而引起了应力值的上升. 而在结构变形变化图中, 可以看出结构的变形是随着钢板 T1 厚度的增加而逐渐减小的, 与实际情况相符合.

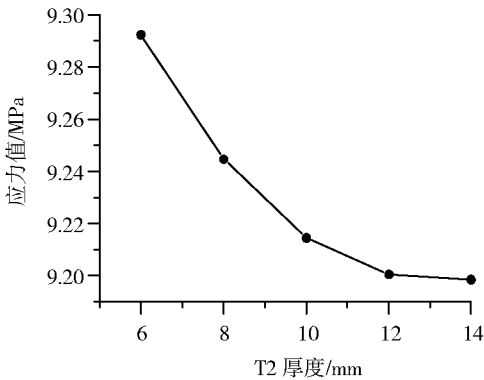


图 6 板 T2 厚度对结构应力的影响
Fig.6 The size of T2 affects stress

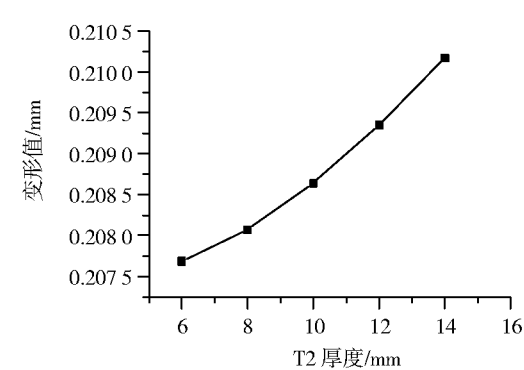


图 7 板 T2 厚度对结构变形的影响
Fig.7 The size of T1 affects deformation

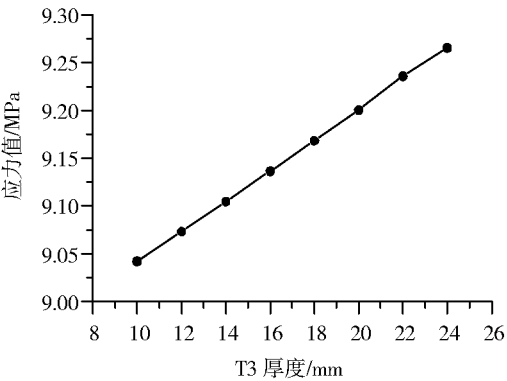


图 8 板 T3 厚度对结构应力的影响
Fig.8 The size of T3 affects stress

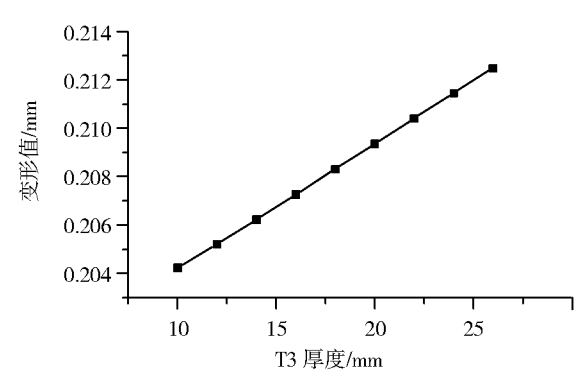


图 9 板 T3 厚度对结构变形的影响
Fig.9 The size of T3 affects deformation

2 3 T2 T3的变化对结构应力和变形的影响

尽管由于板 T2和 T3在整个机构中所占的比重相对 T1来讲很少, T2和 T3板厚变化对整个结构最大应力和变形产生的影响不大, 但是 T2 T3的影响却不能忽略. 这一点从图上数值也可以得到验证. T1的图

中对最大应力的影响从 9.2~12.1MPa(反映在纵坐标上), 区间长度 2.9MPa, T2、T3 对最大应力的影响分别是 9.20~9.29MPa 和 9.04~9.27MPa, 区间长度为 0.09MPa 和 0.23MPa, 分别是 T1 引起的应力变化的 3.1% 和 7.9%; 结构的变形方面, 在 T1 变化的过程中, 变形值变化区间 0.20~0.27mm, 区间长度为 0.07mm, T2 变化引起变形值的改变为 0.0027mm (0.2104~0.2077mm), T3 变化引起变形值的改变为 0.009mm (0.213~0.204mm), 分别为 T1 引起形变的 3.9% 和 12.9%. 同时, 在后面的分析中还可以看到, T2、T3 对整体动态的特性也有举足轻重的影响, 因此需要同时对这 3 种不同的板厚进行综合优化.

3 横梁结构的优化

为了保证进给机构能正常工作, 对结构的最大应力和最大变形等做了一定的限制, 形成优化分析中的状态变量, 构成了优化设计的另一种约束, 即行为约束或称作性能约束. 而结构上的焊接板的厚度则构成了优化过程中的设计变量. 同时为了减轻重量和降低成本, 我们定义结构的体积是优化目标函数^[7].

在此我们根据厂家提供的产品技术规格即最大变形应小于等于 0.300mm, 查《机械设计手册》结构最大的等效应力(冯氏应力)应小于等于 130MPa 的数据, 作为优化设计的性能约束^[7].

假设最大变形不超过 0.3mm, 许用应力 < 130MPa, T1=2~16mm; T2=2~24mm; T3=2~40mm. 对于上述问题采用零阶方法进行优化计算^[8]. 通过 11 次优化迭代, 得到优化分析结果如下:

SET 11
(FEASIBLE)
DMAX (SV) 0.29096mm
SMAXI (SV) 12.893MPa
T1 (DV) 4.8201mm
T2 (DV) 8.5304mm
T3 (DV) 11.2961mm
VOLUME (OBJ) 0.37426E+08mm³
目标函数 VOLUME 的收敛情况如下图所示:

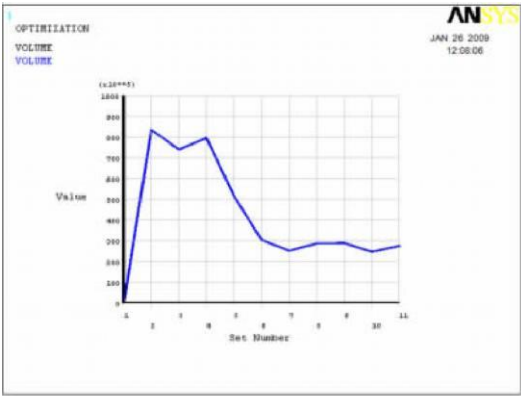


图 10 目标函数 VOLUME 的收敛情况
Fig.10 Convergence of VOLUME

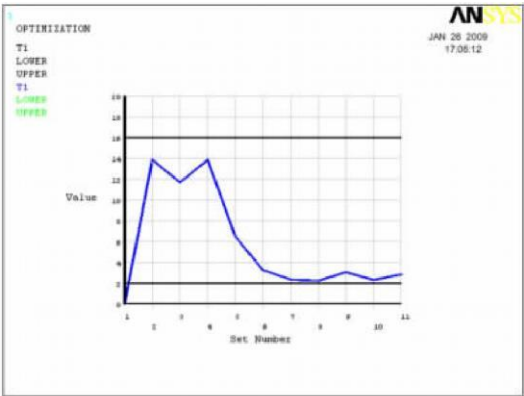


图 11 T1 的变化情况
Fig.11 Change of T1

状态变量 T1、T2、T3 的变化情况如表 1 所示:

表 1 优化结果对比

Table 1 The optimization results contrast

参数	原设计参数	优化结果	效果对比
最大变形 DMAX	0.229mm	0.291mm	在允许的刚度范围内
最大应力 SMAXI	10.14MPa	12.893MPa	在允许的强度范围内
T1 厚度	8mm	4.820mm	减少 40%
T2 厚度	12mm	8.530mm	减少 30%
T3 厚度	20mm	11.296mm	减少 40%
体积	0.556943E+08mm ³	0.37426E+08mm ³	减少 33%

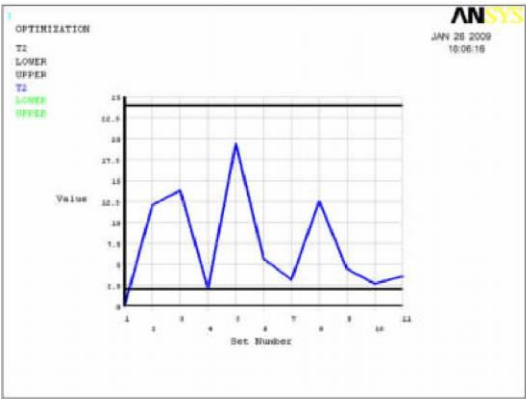


图 12 T2 的变化情况
Fig.12 Change of T2

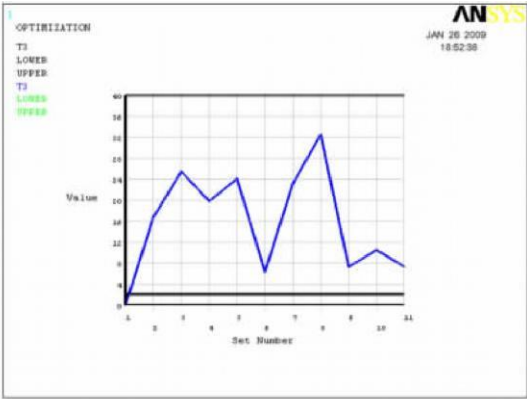


图 13 T3 的变化情况
Fig.13 Change of T3

即当 $T1= 4.820\text{ mm}$ 、 $T2= 8.530\text{ mm}$ 、 $T3= 11.296\text{ mm}$ 时得到最优解, 这时进给结构的最大变形为 0.291 mm , 最大应力值为 12.893 MPa 符合约束条件和横梁的工作要求. 优化后整个结构的体积仅约为原来的 67% 左右, 大大减轻了重量, 材料的潜力得到了充分的挖掘. 由此证明优化的结果是令人满意的. 实际修改中, 可以将参数分别取整为: $T1= 5\text{ mm}$; $T2= 9\text{ mm}$; $T3= 12\text{ mm}$.

4 横梁优化效果评估

应用上述优化方法对高速数控转塔冲床的横梁进行了结构优化设计, 改进其原设计方案, 使机床的静态特性得到较大的改善, 动力分析如表 2 数据表明, 优化后结构的动力特性完全满足要求.

表 2 优化后横梁的模态频率

Table 2 The optimization of beam modal frequency

阶数	1 阶	2 阶	3 阶	4 阶	5 阶	6 阶
频率 /Hz	34.528	72.339	78.248	109.66	140.40	150.14

从结构的振动结果也可以看出:

- (1) 结构的振型基本都是以结构上的焊接板的弯曲和扭转为主, 同时对结构整体中出现了扭转变形.
- (2) 对于优化后的结构, 由于板的厚度使用了优化后的数值 (数值上变小了), 因此结构的频率比原始结构的频率有所下降.

(3) 进给结构中的横向进给电机的型号是 YD132M—6/4, 转速 $1000\sim 1500\text{ r/min}$, 工作的固有频率为 $16.7\sim 25\text{ Hz}$ 而本结构的基频频率为 34.589 Hz 电机的工作频率和结构的基频不在同一个频段内, 因此结构工作过程中不会发生共振或者发生激烈的振动. 优化后的模型的动力特性符合要求.

(4) 这类结构件由于其在 X 和 Y 方向上具有较宽的结构, 故在前几阶振型上对数控转塔冲床的加工精度影响不大.

表 3 优化后机床的测试数据

Table 3 The machine test data after optimization

参数	原设计机组	优化设计机组
振动位移 /mm	0.061	0.038
厂房内噪声值 /dB	90	82

另外, 对优化设计方案的机床和原设计机床也进行了现场测试, 其主要测试数据见表 3. 从表 3 可以看出, 机床的动态特性也得到了明显改善.

5 结论

本文以有限元软件 ANSYS 为工具平台, 根据轻量化设计的思想, 对横梁结构进行了有限元分析和优化设计, 优化后整个结构的体积仅为原来的 67% 左右, 大大减轻了重量, 降低了冲床的制造成本, 机床的静态、动态特性得到明显改善. 整个设计过程全部在计算机环境中完成, 大大地缩短了设计周期, 降低了设计成本, 提高了设计水平, 产品性能更加优越, 产生的经济效益更高, 为高速数控转塔冲床的进给机构的设计提供了科学计算的依据, 从而改变了这类加工装备依靠类比设计的传统方法.

[参考文献] (References)

- [1] 刘振堂. 数控转塔冲床发展新进展 [J]. 锻压装备与制造技术, 2003(3): 23-25.
Liu Zhengtang New development of CNC turret punch press [J]. Forging Equipment and Manufacture, 2003(3): 23-25 (in Chinese)
- [2] 许超. 机床大件几何优化 [J]. 江苏机械制造及自动化, 1995(2): 15-18.
Xu Chao Optimization of great spare parts of machine tools [J]. Jiangsu Machinery Manufacture and Automation, 1995(2): 15-18 (in Chinese)
- [3] 许超, 汤文成, 金乐军, 等. 基于知识的机床大件结构智能设计系统研究 [J]. 制造技术与机床, 1995(3): 27-31.
Xu Chao Tang Wengcheng Jin Lejun et al. Intellect design method research of great spare parts of machine tools [J]. Manufacture Technology and Machine Tools, 1995(3): 27-31 (in Chinese)
- [4] Matsumoto M, Shimizu M, Osakada K, et al. Finite element analysis of single layer forming on metallic powder bed rapid prototyping by selective laser processing [J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2002, 42: 61-67
- [5] Hu Z, Kovacevic R, Labudovic M. Experimental and numerical modeling of buckling instability of laser sheet forming [J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2002, 42: 1427-1439.
- [6] Shimizu M, Itakura Y, Mori K, et al. Finite element analysis of liquid ejection in continuously cast slab by sequential forging [J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 1998, 38: 1149-1163.
- [7] Hu Z, Labudovic M, Wang H, et al. Computer simulation and experimental investigation of sheet metal bending using laser beam scanning [J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2001, 41: 589-607.
- [8] Lee S K, Ko D C, Kim B M. Optimal die profile design for uniform microstructure in hot extruded product [J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2000, 40: 1457-1478.

[责任编辑: 刘 健]