

大尺寸立方体开槽超声塑料焊接工具头的优化设计

成 桢^{1,2}, 郭建中¹

(1. 陕西师范大学物理学与信息技术学院, 西安 710062; 2. 西安文理学院物理系, 西安 710065)

摘要: 谐振频率、频率间隔性、振幅均匀度是大尺寸超声塑料焊接工具头设计中的几个主要指标。基于工程实际, 以工具头纵向长度、槽宽度及槽长度为设计变量, 纵向谐振频率和频率间隔值为状态变量, 振幅均匀度为目标函数, 利用有限元软件 ANSYS 的参数化分析技术, 对大尺寸立方体超声塑料开槽工具头进行了优化设计。结果表明, 该优化方法能很好地解决大尺寸超声塑料焊接工具头的设计问题, 既提高了设计效率, 也降低了设计成本。

关键词: 大尺寸工具头开槽; 超声塑料焊接; 有限元分析; 优化设计

中图分类号: TB552 TH12

文献标识码: A

文章编号: 1000-3630(2010)-01-0103-04

DOI 编码: 10.3969/j.issn1000-3630.2010.01.024

Optimized design of large size block-like slotted horn for ultrasonic plastic welding

CHENG Zhen^{1,2}, GUO Jian-zhong¹

(1. Shanxi Normal University College of Physics & Information Technology, Xi'an 710062, China;
2. Xi'an University of Arts and Science Department of Physics, Xi'an 710065, China)

Abstract: The resonant frequency, frequency spacing and the uniformity of amplitude are important quality specifications of large size ultrasonic plastic welding horns. Based on engineering requisition, considering the length of horn, the length and width of slot as design variables, the longitudinal resonant frequency of horn and the frequency spacing as constraint conditions, and the uniformity of amplitude as the objective function, the optimal design algorithm is written. The structure of large size block-like slotted horns for ultrasonic plastic welding is optimized by using the finite element analysis package ANSYS. The example of design shows that this optimized method is feasible and effective to solve the design problem of large size block-like slotted horns for ultrasonic plastic welding.

Key words: large size; ultrasonic plastic welding horn; finite element; optimum design

1 引言

超声塑料焊接是利用热塑性塑料在高频受迫振动下, 其焊接面相互摩擦产生局部高温而熔化结合的一种技术。超声塑料焊接过程中, 既不需添加任何粘接剂、填料或溶剂, 也不消耗大量热源, 具有操作简便、焊接速度快、焊接强度高、生产效率高等优点, 因此超声波焊接技术越来越广泛地获得应用。超声塑料焊接系统主要包括电源、换能器、变幅杆以及工具头。工具头作为传递能量的关键部件, 需根据被焊物件的形状来专门设计。理想的工具头要求在系统工作频率下作一阶纵向振动, 并且具有均匀的输出振幅。一般来说衡量工具头优劣的

重要指标是振幅均匀度(定义为工具头输出端面振幅的最小值和最大值之比)和频率隔离性能(即工具头工作时的纵向谐振频率和其附近最近的谐振频率间的间隔, 称为频率间隔)。输出端面的振幅均匀度越高, 则焊接面越平整光滑; 而频率间隔越大, 系统稳定性越高。

实际工程中, 对于横向尺寸大于四分之一波长的大尺寸工具头, 由于其横向振动对纵向振动的影响较大, 即使在纯纵向模式下工具头输出端面的振幅也不是很均匀, 解决的方法有: 开槽^[1]、开狭缝^[2]、加附加弹性体^[3]等。开槽是用于拟制工具头横向振动最常用的方法^[4]。对于开槽的大尺寸工具头, 由于形状复杂而很难得到解析解, 人们更多地采用有限元等数值计算方法分析这类问题^[5-7]。文献[7]中自编有限元程序来设计大尺寸开槽工具头, 由于太过专业, 一般工程人员较难掌握, 而且该方法费时费力。国内不少超声工具头供应商大多参考已有产品

收稿日期: 2009-03-31; 修回日期: 2009-06-10

作者简介: 成桢(1978-), 女, 陕西西安人, 硕士研究生。

通讯作者: 成桢, E-mail: chengzhen613@163.com

的设计尺寸, 然后通过不断地修正测试, 直到满足要求为止, 设计成本高, 而对于复杂的工具头, 这种“试凑”法的成功率也不高, 得到的工具头其整体性能也得不到保证。

本文采用商业有限元软件 ANSYS 对大尺寸立方体开槽工具头进行优化设计, 研究了工具头长度和开槽尺寸对谐振频率的影响程度, 以工具头长度、槽宽度、槽长度为设计变量, 以纵向谐振频率、频率间隔大小为状态变量, 振幅均匀度为目标函数, 采用 APDL 参数化分析技术编制了优化设计程序。设计结果表明, 采用该方法可快速得到同时满足谐振频率、振幅均匀度和频率间隔要求的大尺寸立方体开槽工具头, 极大地提高了设计的效率, 使产品结构更加合理。

2 基于 ANSYS 的大尺寸立方体超声塑焊工具头的优化设计

常见具有开槽结构的立方体工具头结构如图 1 所示, 焊头宽度、厚度和长度分别为 L_x 、 L_y 、 L_z 。

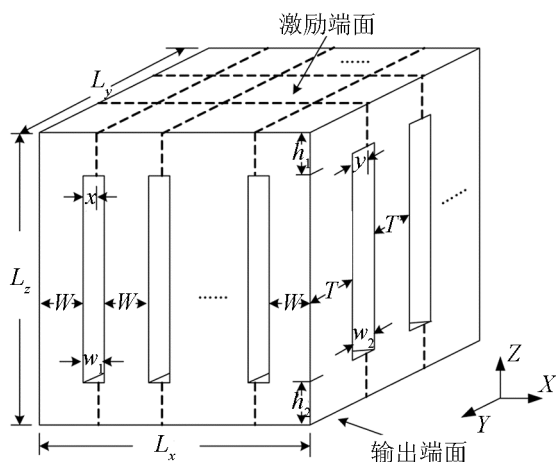


图 1 大尺寸立方体开槽工具头结构示意图

Fig.1 Schematic of the large size block-like slotted horn

设 Z 轴为激励方向, 在工作频率下, 立方体焊头在 Z 方向作一阶纵向振动。人们通常沿焊头纵向开一些槽来减弱横向振动的干扰, 达到焊头输出端面振幅均匀的目的。一般要求相邻槽之间的距离小于四分之一波长。设在垂直于 X 轴方向均匀开 m 个槽, 每个槽宽为 w_1 , 在垂直于 Y 轴方向均匀开 n 个槽, 每个槽宽为 w_2 , 槽分别距离焊头输入及输出端面为 h_1 、 h_2 。文献[8]首先将大尺寸立方体焊头合理划分为若干单元, 然后将考虑了耦合振动的焊头单元和立方体半波振子比较, 利用等效机械阻抗的概念得出了焊头单元的频率方程:

$$L_z = \frac{\pi}{k_2} + h_1 + h_2 - \frac{1}{k_2} \left[\arctan\left(\frac{L_x}{L_x - mw_1} \cdot \frac{L_y}{L_y - nw_2}\right) + \frac{k_2 \tan(k_1 h_1) + \arctan\left(\frac{L_x}{L_x - mw_1} \cdot \frac{L_y}{L_y - nw_2}\right) \cdot \frac{k_2 \tan(k_1 h_2)}{k_1}}{k_1} \right] \quad (1)$$

$$k_1 = k \cdot \sqrt{\frac{\pi^4 - \pi^2 k^2 (1 - \nu^2) [(W+x)^2 + (T+y)^2] - k^4 (2\nu^3 + 3\nu^2 - 1)(W+x)^2 (T+y)^2}{\pi^4 - \pi^2 k^2 [(W+x)^2 + (T+y)^2] + k^4 (1 - \nu^2)(W+x)^2 (T+y)^2}}$$

$$k_2 = k \sqrt{\frac{\pi^4 - \pi^2 k^2 (1 - \nu^2)(W^2 + T^2) - k^4 (2\nu^3 + 3\nu^2 - 1)W^2 T^2}{\pi^4 - \pi^2 k^2 (W^2 + T^2) + k^4 (1 - \nu^2)W^2 T^2}}$$

ν 是材料的泊松比, $k = 2\pi f/c$ 为细长棒中一维纵振动的波数, f 为细长棒的基频纵振频率, c 为细长棒中纵波声速。

在工具头的宽度、厚度、开槽数量等参数预先确定的情况下, 利用式(1)能计算出某一谐振频率下工具头的谐振长度, 这为大尺寸立方体超声焊接工具头的设计提供了理论依据。但式(1)无法得到工具头振幅均匀度及频率间隔等信息, 所以需要在此基础上对其进行优化设计, 使之能达到工程应用的目的。ANSYS 是当前应用最为广泛的有限元分析软件, 其技术成熟, 性能优越且功能强大, 为解决问题提供了强大的技术支持和手段。本文利用 ANSYS 的子函数逼近法及梯度寻优法, 对利用式(1)计算的大尺寸立方体工具头进行优化设计。

大尺寸立方体超声工具头一般都沿横向均匀开槽, 所以整个结果具有对称性, 利用 ANSYS 仿真时只需建立八分之一模型即可, 建模时使用三维八节点的 SOLID45 单元。在优化过程中, 取工具头长度、槽长度、槽宽度为设计变量, 纵向谐振频率以及频率间隔值为状态变量, 用 1 减去工具头输出端面最大振幅与最小振幅之比的值作为目标函数, 应用子函数逼近法及梯度寻优法进行优化。优化过程中需要注意以下几个关键问题。

2.1 模态振型的识别

模态识别是优化设计中的重要环节, 由于设计参数较多, 变化范围宽, 工具头在感兴趣的频率范围内会出现多个振动模态, 所以要实现工具头的优化设计就必须进行模态识别。此处引用振型相关系数法^[9], 并通过 ANSYS 参数设计语言 APDL 编程来实现纵振模态的识别。振型相关系数定义为:

$$MAC_i = \frac{[\phi_s^T \phi_{o_i}]^2}{(\phi_s^T \phi_s)(\phi_{o_i}^T \phi_{o_i})} \quad (0 \leq MAC \leq 1)$$

式中 ϕ_s 为初始结构时第 1 阶纵向振动振型, 也即参考模态; ϕ_{o_i} ($i=1, 2, \dots, 5$) 为优化设计过程中计算的各阶振型。振型相关系数的大小反映了两个振型

的相似程度,值越大则相似程度越高。据此可实现优化设计中所需的纵向振动模态振型进行识别。

2.2 频率间隔值的计算

频率间隔性能是工具头纵向工作频率与最近的谐振频率之差,是工具头稳定工作的重要指标。焊接系统工作时,因负载及其他环境变化而产生频率漂移,若频率间隔太小,则工具头工作模态易发生变化而影响焊接质量。利用 APDL 语言编程获得频率间隔值的思路如下:在获得纵向谐振频率后,提取该频率对应的模态号,再获取和该模态号相邻的两个模态号对应的频率值,分别和纵向谐振频率相减,并对差取绝对值,所得结果的最小值就是频率间隔值。

2.3 变量初值的选取及上下限的设定

若设计变量初值及变化范围选取不当,优化程序很容易因发散而提前退出,从而得不到最优解。为合理选择设计变量的上下限,需研究各设计变量对工具头纵向谐振频率的影响程度。

经多反复实验,比较理想的开槽宽度约为 $\lambda/25 \sim \lambda/20$,开槽长度约为 $\lambda/4 \sim \lambda/3$, λ 为工具头纵向振动基频模式的波长^[1]。以一 15kHz 的立方体开槽工具头为例,研究了各设计变量对纵向谐振频率的影响程度。图 2 给出了工具头各结构参数分别改变 10% 时纵向谐振频率的变化情况。由图 2 可见,工具头长度对谐振频率影响最大,开槽的宽度其次,槽长度影响最小。所以在实际优化过程中,工具头长度的上下限不能取得过大,否则容易导致优化失败。

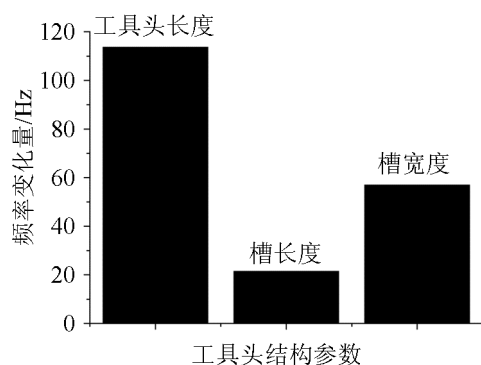


图2 纵振频率对设计变量的灵敏度
Fig.2 Sensitivity of the longitudinal resonant frequency to design variables

3 优化实例

对一个宽、厚均为 190mm 的大尺寸立方体工具头进行优化设计,材料为硬铝(杨氏模量 $E=7.31 \times 10^{10} \text{N/m}^2$, 密度 $\rho=2700 \text{kg/m}^3$, 泊松比 $\nu=0.33$)。

设计要求:谐振频率为 15kHz,振幅均匀度大于 80%,频率间隔值大于 800Hz。工具头的优化初值由式(1)计算,各参数如下: $L_x=L_y=190 \text{mm}$, $w_1=w_2=10 \text{mm}$, $h_1=h_2=20 \text{mm}$, $m=n=2$, $L_z=162.5 \text{mm}$ 。利用 ANSYS 对取初始值的工具头进行分析,得到其谐振频率为 15027Hz,振幅均匀度为 38.5%,频率间隔值为 449Hz。

对上述尺寸的工具头进行优化, L_z 限定在 150~170mm, h_1 限定在 15~30mm, w_1 限定在 8~16mm,设计变量的公差均设定为 10^{-4} 。对于状态变量,谐振频率限定在 14950~15050Hz,频率间隔值设定下限为 800Hz。目标函数为 1 与振幅均匀度之差。为了得到准确的优化解,首先采用零阶的子函数逼近法获得最优解的基本位置,然后采用一阶的梯度寻优法对最优解的位置进行更精确的确定。本优化共进行了 22 次迭代,其中子函数逼近法迭代 19 次后收敛,一阶方法迭代了 3 次,图 3 给出了目标函数随迭代次数的变化规律。各设计变量的优化结果为: $L_z=119.75 \text{mm}$, $w_1=10.87 \text{mm}$, $h_1=66.57 \text{mm}$,此时工具头谐振频率为 14997Hz,振幅均匀度达到 92%,频率间隔值为 934Hz,图 4 为优化后得到的立方体开槽工具头的纵向振型云图。

4 结语

本文利用 ANSYS 软件的 APDL 参数化分析技术对大尺寸立方体超声塑焊工具头进行优化设计,根据工程实际情况确定了设计变量、状态变量及目标函数,分析了编程过程中应注意的问题并给出了解决思路。优化结果表明,本文给出的优化方法是有效的,达到了预期的优化目标。利用该方法对大尺寸工具头进行优化设计,既缩短了设计周期,又降低了设计成本,而且工具头的各个性能指标均可

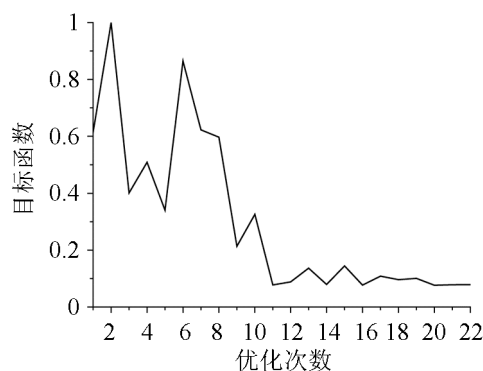


图3 目标函数随优化次数的变化曲线
Fig.3 Relation between the objective function and the optimized number

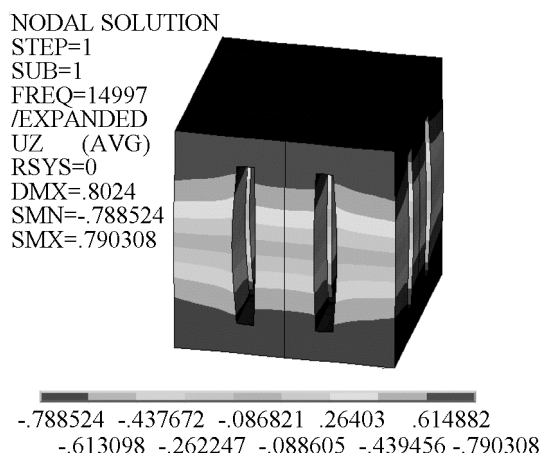


图 4 优化后工具头的纵向位移分布云图

Fig.4 Amplitude distribution of longitudinal vibration of the optimum horn

达到最优化。

参 考 文 献

- [1] 林书玉, 张福成. 超声塑料焊接工具横向振动及开槽的研究[J]. 声学技术, 1992, 11(4): 24-28.
LIN Shuyu, ZHANG Fucheng. A study of large dimension vibrating systems and their transverse slotting[J]. Technical Acoustics, 1992, 11(4): 24-28.
- [2] Cardoni A, Lucas M. Enhanced vibration performance of ultrasonic block horns[J]. Ultrasonics, 2002, 40: 365-369.
- [3] Adachi K, Ueha S. Modal vibration control of large ultrasonic tools with the use of wave-trapped horns[J]. J Acoust Soc Am, 1990, 87(1): 208-214.
- [4] 周光平, 梁明军, 王家宣. 大尺寸超声振动体的研究[J]. 声学技术, 2004, 23(3): 183-188.
ZHOU Guangping, LIANG Mingjun, WANG Jiaxuan. Study on large sized ultrasonic vibrators[J]. Technical Acoustics, 2004, 23(3): 183-188.
- [5] Kevin O'shen. Enhanced vibration control of ultrasonic tooling using finite element analysis[A]. ASME, Vibration Analysis-Analytical and Computational Conference[C]. 1991, DE37: 259-265.
- [6] Lucas M, Smith A C. Redesign of ultrasonic block horns for improved vibration performance[J]. Journal of Vibration and Acoustics, 1997, 119: 410-414.
- [7] 林仲茂. 超声塑焊变幅器的有限元分析[J]. 声学技术, 1996, 15(4): 153-156.
LIN Zhongmao. Analysis of ultrasonic horn for plastic welding by finite element method[J]. Technical Acoustics, 1996, 15(4): 153-156.
- [8] 梁召峰, 周光平, 莫喜平. 立方体超声塑料焊接开槽焊头的设计[J]. 声学技术, 2008, 27(5): 522-523.
LIANG Zhao Feng, ZHOU Guangping, MO Xiping. A study of large dimension vibrating systems and their transverse slotting[J]. Technical Acoustics, 2008, 27(5): 522-523.
- [9] 陶征, 赵淳生. 基于 ANSYS 的纵扭超声电机定子的优化设计方法[J]. 压电与声光, 2007, 29(5): 603-608.
TAO Zheng, ZHAO Chunsheng. The optimal design about stator of ultrasonic motor using longitudinal and torsional mode based on ANSYS[J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 2007, 29(5): 603-608.

上海市声学学会召开理事会

上海市声学学会于 2009 年 12 月 11 日在中国科学院声学研究所东海研究站召开理事会, 会议内容包括以下三个方面:

- (1) 学会年度总结汇报。
- (2) 讨论学会换届工作及各专业委员会提名理事候选人。
- (3) 讨论庆祝学会成立 30 周年(2010 年)的有关活动, 以及出版“上海市声学学会成立三十年”纪念册事宜等。

会后, 学会为前理事长王季卿教授在东海站举办 80 寿宴。历届学会老领导、老同事冯绍松、周永昌、徐智章、向大威、高克成、潘玉玺以及钱梦騄理事长、孟昭文副理事长、龚农斌秘书长等本届理事 30 余人出席。

上海市声学学会办公室