

# 基于 ANSYS 优化设计求解双椭球热源模型参数

顾 颖<sup>1</sup>, 李亚东<sup>1</sup>, 强 斌<sup>1</sup>, 揭志羽<sup>1</sup>, 陈小松<sup>2</sup>

(1. 西南交通大学 土木工程学院, 成都 610031; 2. 江苏中泰桥梁钢构股份有限公司, 靖江 214521)

**摘要:** 为实现双椭球热源模型(double ellipsoidal heat Source model, DEHSM)参数自动化求解, 基于 ANSYS 优化设计, 提出一种新的 DEHSM 参数求解方法。根据提出的方法, 利用 VB 语言开发了 DEHSM 参数求解程序, 分析了程序失效原因, 给出了处理对策; 对四种不同的焊接工艺参数, 采用开发的程序求解了 DEHSM 参数, 并比较了熔宽、熔深的计算值与实测值的差异。经实例验证表明, 在保证求解精度的前提下, 提出的方法和开发的程序能够有效地求解 DEHSM 参数; 提出的基于 ANSYS 优化设计求解热源模型参数的方法及相关优化变量的设置, 还可适用于高斯热源、3D 锥形热源等其它热源参数的求解。

**关键词:** 双椭球热源模型; ANSYS 优化设计; VB 语言; 程序开发

中图分类号: TG 402 文献标识码: A 文章编号: 0253-360X(2016)11-0015-04

## 0 序 言

DEHSM<sup>[1]</sup>引入了电弧挺度对熔深的影响参数, 克服了平面高斯热源模型无法考虑熔深的缺点, 适合坡口焊、填角焊等有较大熔深要求的焊接方式, 现已广泛地用于气体保护焊、电子束焊、埋弧焊的数值模拟中。DEHSM 参数的对焊接温度场结果有很大的影响<sup>[2,3]</sup>, 从而影响到焊接应力与变形的计算结果, 所以 DEHSM 参数的准确取值是保证焊接应力与变形计算精度的前提。求解 DEHSM 参数常用方法是试算法<sup>[4,5]</sup>, 即根据实测的熔池形状或温度曲线, 反复调整热源参数, 使计算结果与测试数据相符。由于参数调整严重依赖于个人经验, 所以试算次数较多, 非常耗时。

目前依据理论求解 DEHSM 参数的方法大致可归为两类: 回归分析法、智能计算技术。回归分析法<sup>[6]</sup>先对 DEHSM 参数进行敏感性分析, 然后通过回归分析建立热源参数与熔池形状的显示表达式。优点是已知熔池形状便可快速求出 DEHSM 参数, 缺点是只能求解特定焊件、在特定焊接工艺下的热源参数。如文献[6]建立的表达式仅适用于 600 mm × 300 mm × 22 mm 的钢板在 1 000 A、32 V 工艺下对接焊的热源参数预测。智能计算技术<sup>[7]</sup>基于人工神经网络、支持向量机等智能算法, 根据大量实测样本求解 DEHSM 参数, 克服了回归分析法中“特定焊接工艺”的限制, 但需要大量的不同焊接工艺下熔池

形状的实测数据, 也常局限于某种特定尺寸的工件。如文献[7]基于支持向量机和人工神经网络预测了任意焊接工艺下的 DEHSM 参数, 但测试了多达 18 种不同焊接工艺下熔深和熔宽数据, 且只是针对 600 mm × 300 mm × 16 mm 这一种规格的钢板。

针对上述问题, 文中提出了一种新的 DEHSM 参数的求解方法——基于 ANSYS 优化设计求解 DEHSM 参数, 无需大量的参数分析和回归表达式的建立, 也不需要智能计算技术中大量的实测样本, 只需测得熔池形状, 便可通过优化算法自动地求出 DEHSM 参数。

## 1 有限元模型的建立

### 1.1 DEHSM 简介

DEHSM 采用前、后两个 1/4 椭球来模拟热源能量密度分布, 前椭球热流密度函数  $q_f$  (W/m<sup>3</sup>) 为

$$q_f = \frac{6\sqrt{3}f_1Q}{\pi a_f b c \sqrt{\pi}} \exp\left(-3 \frac{x^2}{a_f^2}\right) \exp\left(-3 \frac{y^2}{b^2}\right) \exp\left(-3 \frac{z^2}{c^2}\right) \quad (1)$$

后椭球热流密度函数  $q_r$  (W/m<sup>3</sup>) 为

$$q_r = \frac{6\sqrt{3}f_2Q}{\pi a_r b c \sqrt{\pi}} \exp\left(-3 \frac{x^2}{a_r^2}\right) \exp\left(-3 \frac{y^2}{b^2}\right) \exp\left(-3 \frac{z^2}{c^2}\right) \quad (2)$$

式中:  $Q = \eta U I$ ;  $\eta$  为有效热功率;  $U$  为焊接电压;  $I$  为焊接电流;  $a_r, a_f, b, c$  为椭球的形状参数;  $f_1, f_2$  为前、后椭球能量份额参数, 且  $f_1 + f_2 = 2$ 。

## 1.2 参数化建模

以对接接头为例,基于ANSYS APDL语言,对接头形式和尺寸大小进行参数化建模,以提高建模效率,并获得广泛的适应性。

如图1所示,对接接头参数化建模考虑了板件1,2的厚度参数( $t_1, t_2$ )和长度参数( $L_1, L_2$ );针对 $t_1 \neq t_2$ 的情况,又分为单侧放坡、双侧放坡及不放坡三种,并同时考虑了放坡坡度( $S$ )。

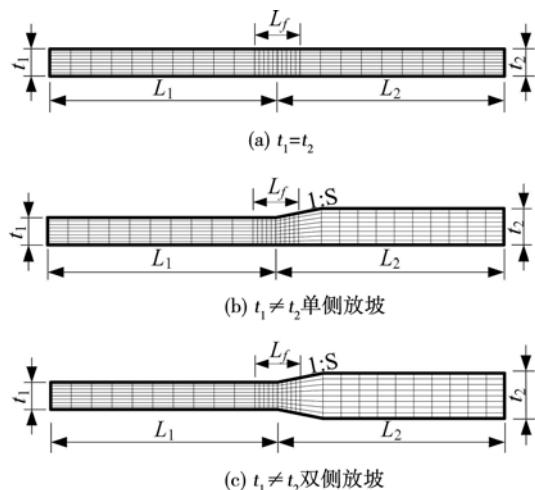


图1 对接接头参数化建模

Fig. 1 Parametric modeling of butt joint

焊件与熔敷金属均采用SOLID70单元模拟,并在SOLID70单元外表面生成一层封闭的表面效应单元(SURF152),用于施加对流传热和辐射传热;使用“生死单元”考虑焊接金属的熔敷过程;为避免存在常应变的三角形单元(一阶)与四面体单元(一阶),网格划分为四边形网格和六面体网格。

## 1.3 边界条件

焊接温度场模拟的边界条件有:环境温度、对流换热及辐射传热。

环境温度取室温25℃,并假定在焊接过程中不发生变化,对流换热与辐射传热按式(3)计算<sup>[8]</sup>,即

$$q = h(T_s - T_a) \quad (3)$$

式中: $q$ 为对流换热热流密度( $\text{W}/\text{m}^2$ ); $T_s$ 为工件表面温度(K); $T_a$ 为周围环境的温度(K); $h$ 为对流换热与辐射传热的综合换热系数( $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ),按式(4)取值<sup>[8]</sup>,即

$$h = \begin{cases} 0.0668T_s & 0 \leq T_s \leq 500^\circ\text{C} \\ 0.231T_s - 82.1 & T_s > 500^\circ\text{C} \end{cases} \quad (4)$$

## 2 ANSYS 优化设计求解 DEHSM 参数

### 2.1 ANSYS 优化设计简介

ANSYS 优化设计能够解决工程中大多数的最

优化问题,只要将工程问题数学化、参数化,并恰当设置优化变量及约束条件,理论上都是可以通过ANSYS 优化设计来解决的,当然也可以用于DEHSM参数的求解。

ANSYS 优化设计的优化变量和约束条件是通过设计变量、状态变量和目标函数来定义的。其中,设计变量是自变量,在取值范围内改变以获得最优的结果;状态变量是因变量,因设计变量而改变,用于约束设计状态;目标函数也是因变量,是需要最小化的量。

简单地讲,ANSYS 优化设计就是在保证状态变量不超过限值的条件下,基于优化算法自动地调整设计变量来尽量减小目标函数的过程。

## 2.2 优化变量设置

设计变量、状态变量、目标函数在DEHSM参数求解中的选取与设置如下。

(1) 设计变量。DEHSM 能量密度的式(1)、式(2)中的焊接电压  $U$ 、电流  $I$  及有效热功率  $\eta$  都是已知的,未知量有形状参数  $a_r, a_f, b, c$  和前、后椭球能量份额参数  $f_1, f_2$ 。其中,  $a_r, a_f$  对熔深和熔宽的影响很小<sup>[5,9]</sup>,而  $b, c, f_1, f_2$  的影响较大,又因  $f_1 + f_2 = 2$ ,所以  $f_1, f_2$  中只有一个独立量,故选取  $b, c, f_1$  这三个参数作为设计变量。

$b, c$  的迭代初值  $b_0, c_0$  分别取实测熔宽  $W_m$ 、熔深  $D_m$ <sup>[7]</sup>,取值范围为初值的  $\pm 20\%$ ,即:  $b_0 = W_m, c_0 = D_m, b \in [0.8W_m, 1.2W_m], c \in [0.8D_m, 1.2D_m]$ ;  $f_1$  一般在  $0.4 \sim 0.7$  之间取值,所以  $f_1$  迭代初值取 0.5,且  $f_1 \in [0.4, 0.7]$ ;  $a_r, a_f$  则按文献[1]的建议取值,即:  $a_f = W_m/2, a_r = 2W_m$ 。

(2) 状态变量。文献[10]指出峰值温度  $T_p$  是影响焊接残余应力的重要因素,文献[1]也将  $T_p$  作为热源参数准确与否的判断依据,故选取  $T_p$  作为状态变量,约束设计状态。在优化分析中,状态变量不能超过设定的上界,上界可根据焊接热源的种类参照文献[11]取值。

(3) 目标函数。把实测熔池形状与计算熔池形状的差异作为目标函数,目标函数在优化设计中是要尽量减小的量,目标函数越小,说明计算与实测的熔池形状就越接近,目标函数的定义如下:

$$OBJ = \max \{ |W_c - W_m|, |D_c - D_m| \} \quad (5)$$

式中: $OBJ$  为目标函数; $D_m, W_m$  为熔深、熔宽实测值; $D_c, W_c$  为熔深、熔宽计算值。

当参数化建模、设计变量、状态变量与目标函数等都设定完成后,就可以用 OPEXE 命令执行优化分析,即通过 ANSYS 内置的优化算法(零阶法、一阶法)自动调整设计变量  $b, c, f_1$ ,使得在状态变量  $T_p$  不

超过上界的条件下, 尽量减小目标函数  $OBJ$ , 当  $OBJ$  小于设定容差(如 0.5 mm)时, 所对应的  $b, c, f_1$  即是求解的 DEHSM 参数.

### 3 DEHSM 参数求解程序开发

采用 ANSYS 优化设计求解 DEHSM 参数, 涉及焊接温度场求解、计算结果自动提取、优化分析定义等等, 需设置的参数和步骤较多, 仅使用 APDL 控制计算流程, 交互性较差, 也不便于使用.

为获得交互性好、方便操作的参数输入图形界面, 选用 VB 汇编语言, 针对对接接头, 开发出“双椭球热源模型参数求解程序”(以下简称程序), 程序界面如图 2 所示. 对照左侧的接头示意图, 输入几何尺寸和网格控制参数, 对照右侧的热源模型图, 输入设计变量相关参数, 补充其它参数, 点击“开始计算”按钮, 生成求解宏文件(HWJ. mac), 并同时调用 ANSYS 软件求解. 求解完成后, 点击“查看结果”按钮查看 DEHSM 参数求解结果.

基于 VB 语言开发热源参数求解程序需要解决

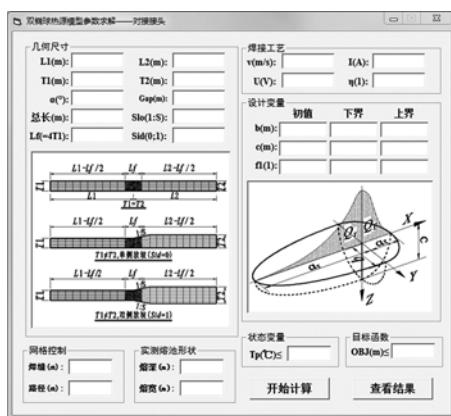


图 2 对接接头 DEHSM 参数输入界面

Fig. 2 Input interface of DEHSM parameters for butt joint

三个问题: 求解宏文件生成、ANSYS 调用与数据传递、运算结束判断, 下面分别介绍程序对这些问题的处理方法.

(1) 求解宏文件生成. 用 VB 的 Print #语句将输入的参数按照 APDL 语言格式打印到 HWJ. mac 文档中, 以定义几何尺寸、焊接工艺等参数; 用 Open 语句从现有文档中读入其它的建模或求解命令, 再用 Line Input #语句打印到 HWJ. mac 文档中, 从而生成求解宏文件.

(2) ANSYS 调用与数据传递. 用 Shell() 函数调用 ANSYS 软件读入宏文件(HWJ. mac)进行运算, 并实现 VB 和 ANSYS 间的数据传递. Shell() 函数调用格式如: Shell ("ANSYS\_Path-b-p ane3fl-i HWJ. mac-o Result.txt", vbNormalFocus), 其中 ANSYS\_Path 为 ANSYS 的执行文件路径; ane3fl 为 ANSYS10.0 的产品特征码; HWJ. mac 为输入文档, Result.txt 为输出文档.

(3) 运算结束判断. VB 调用的 ANSYS 计算是在后台进行的, 不会出现求解完成的提示(Solution is done!), 所以需要在查看结果前判断运算是否结束. 程序通过 \*.DO3 文件来判断计算是否结束, \*.DO3 是 ANSYS 计算过程中的临时文件, 计算结束后自动删除, 所以可以准确地判断 ANSYS 计算是否完成.

### 4 实例验证

为验证文中提出的求解方法与开发的程序是否能有效地求解 DEHSM 参数, 对四种不同的焊接工艺参数, 依据文献[12]中熔深、熔宽的实测值, 使用程序求解 DEHSM 参数, 计算结果如表 1 所示. 表 1 所列数据的研究对象为两块 600 mm × 300 mm × 16 mm 钢板的对接焊, 焊接方式为埋弧焊, 功率系数  $\eta = 0.9$ , 焊接速度  $v = 16.67 \text{ mm/s}$ .

表 1 基于程序求解的 DEHSM 参数列表  
Table 1 List of DEHSM parameters solved by program

编号	焊接电流 I/A	焊接电压 U/V	椭球宽度 b/mm	椭球深度 c/mm	份额 $f_1$	实测值/mm		计算值/mm		相对误差 e(%)	
						熔宽 $W_m$	熔深 $D_m$	熔宽 $W_c$	熔深 $D_c$	$(W_m - W_c) / W_m$	$(D_m - D_c) / D_m$
1	1 000	30	9.25	15.57	0.6586	13.02	9.80	12.44	9.22	4.45	5.92
2	1 000	32	7.58	15.41	0.6147	12.76	10.56	12.12	9.93	5.02	5.97
3	1 100	32	6.50	16.00	0.5518	11.50	11.46	12.00	10.96	- 4.35	4.36
4	1 200	32	10.01	14.25	0.7499	9.74	12.64	9.49	13.27	2.57	- 4.98

从表 1 中可以看出, 熔深、熔宽的计算值与实测值的绝对误差均小于 0.65 mm, 相对误差小于 6%,

若增加迭代次数或选用一阶优化法(为缩短计算时间, 程序采用零阶法), 还可以使误差更小. 由此, 说

明基于程序求解的 DEHSM 参数可以使熔宽、熔深计算值与实测值的差异控制在较小的范围内,从而也证实了文中提出的方法是可以有效地求解 DEHSM 参数的.

## 5 求解失效原因与对策

采用程序求解 DEHSM 参数,每次计算不一定都能得到满意的结果,可能出现目标函数大于容差或峰值温度超过上界等情况,主要是由于三个原因造成的.

(1) 设计变量上界、下界设置不当. 优化分析时,设计变量  $b, c, f_1$  是在上、下界之间取值,若遍历  $b, c, f_1$  域内所有组合均不能使计算熔深、熔宽与实测数据的差异满足要求,则会出现  $OBJ$  大于容差的情况. 对此,可以放宽  $b, c, f_1$  的取值范围,但  $c$  的上界不能超过薄板的厚度.

(2) 输入数据与实际情况不符. 若输入的线能量( $\eta UI/v$ )在实际焊接中都不能使熔池形状达到输入的熔深和熔宽,当然在数值模拟中也不能实现. 对此,应仔细核对输入数据,特别是要根据实测数据输入正确的  $D_m, W_m$ .

(3) 约束条件过于严格. 若目标函数的容差或状态变量的上界设置过小,则难以得到 DEHSM 参数最优解. 如要求  $OBJ \leq 0.1$  mm,意味着熔深、熔宽计算值与实测值的差别不能大于 0.1 mm,这不仅需要焊缝单元的网格划分得十分精细(约  $\leq 0.2$  mm),还要花费更多的计算时间. 若焊缝单元尺寸不大于 2 mm,建议取  $OBJ \leq 0.5$  mm,便可得到较为满意的结果;又如,状态变量的上界设置过小,则有可能丢失 DEHSM 参数的最优解,可根据焊接热源的种类确定状态变量的上界<sup>[11]</sup>.

## 6 结 论

(1) 基于 ANSYS 优化设计,提出了一种新的 DEHSM 参数求解方法,对四种不同的焊接工艺参数,采用提出的方法求解了 DEHSM 参数,通过比较熔宽、熔深的计算值与实测值,表明文中提出的方法能够有效地求解 DEHSM 参数.

(2) 根据提出的方法,利用 VB 语言开发了 DEHSM 参数求解程序,并给出了程序失效原因及处理对策. 经实例验证表明:只需在程序界面输入相关数据,便可自动求解 DEHSM 参数,如此,不仅提高了有限元模型的建立效率,还能适应不同焊件尺寸、不同工艺的情况.

(3) 文中提出的基于 ANSYS 优化设计求解热源模型参数的方法及相关优化变量的设置,不仅适用于 DEHSM 参数的求解,还可用于高斯热源、3D 锥形热源等其它热源参数的求解.

## 参考文献:

- [1] Goldak J, Chakravarti A, Bibby M. A New Finite Element Model for Welding Heat Sources [J]. Metallurgical Transactions B, 1984, 15(2): 299–305.
- [2] 牟取哈, 韩永全, 赵鹏, 等. 铝合金变极性等离子弧焊应力场数值分析[J]. 焊接学报, 2015, 36(11): 97–100.  
Mou Quhan, HanYongquan, Zhao Peng, et al. Numerical simulation of stress field in variable polarity plasma arc welding of aluminum alloys[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2015, 36(11): 97–100.
- [3] 董文超, 陆善平, 李殿中. 焊接顺序对大型薄板装甲钢结构焊接变形的影响[J]. 焊接学报, 2015, 36(7): 43–46, 50.  
Dong Wencho, Lu Shanping, Li Dianzhong. Effect of welding sequence on welding distortion of large-sized thin armor steel structure[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2015, 36(7): 43–46, 50.
- [4] Abhay Sharma, Ajay Kumar Chaudhary. Estimation of heat source model parameters for twin-wire submerged arc welding[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2009, 45(11–12): 1096–1103.
- [5] Gery D, Long H, Maropoulos P. Effects of welding speed, energy input and heat source distribution on temperature variations in butt joint welding[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2005, 167(2–3): 393–401.
- [6] 李培麟, 陆皓. 双椭球热源参数的敏感性分析及预测[J]. 焊接学报, 2011, 31(11): 89–91.  
Li Peilin, Lu Hao. Sensitivity analysis and prediction of double ellipsoid heatsource parameters[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2011, 31(11): 89–91, 95.
- [7] Li Peilin, Lu Hao. Hybrid heat source model designing and parameter prediction on tandem submerged arc welding[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2012, 62(5–8): 577–585.
- [8] Argyris J H, Szimmat J, Willam K. Finite element analysis of arc-welding process. numerical methods in thermal problems [C]// Proceedings of the Third International Conference, Seattle WA, USA, Pineridge Press, Swansea UK. 1983, 249–258.
- [9] Jia Xiaolei, Xu Jie, Liu Zhaoheng, et al. A New method to estimate heat source parameters in gas metal arc welding simulation process [J]. Fusion Engineering and Design, 2014, 89: 40–48.
- [10] Shoichi Kiyoshima, Dean Deng, Kazuo Ogawa, et al. Influences of heat source model on welding residual stress and distortion in a multi-pass J-groove joint[J]. Computational Materials Science, 2009, 46: 987–995.
- [11] D.拉达伊. 焊接热效应[M]. 熊第京, 郑朝云, 史耀武, 译. 北京: 机械工业出版社, 1997.
- [12] 李培麟. 多丝埋弧焊热源模型与焊缝成形的模拟研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2012.

**作者简介:** 顾颖,男,1986年出生,博士研究生. 主要从事桥梁钢结构焊接残余应力及焊接变形的预测与控制研究. 发表论文4篇. Email: 245697636@qq.com

**通讯作者:** 李亚东,男,教授. Email: yadongli2009@qq.com