

基于 ANSYS 优化设计求解双椭球热源模型参数

顾 颖¹, 李亚东¹, 强 斌¹, 揭志羽¹, 陈小松²

(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^[1]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^[2,3], 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^[4,5], 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有两类: 回归分析法、智能计算技术。回归分析法^[6]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^[7]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/m³) 为

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

后椭球热流密度函数 q_r (W/m³) 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: $Q = \eta UI$; η 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)。

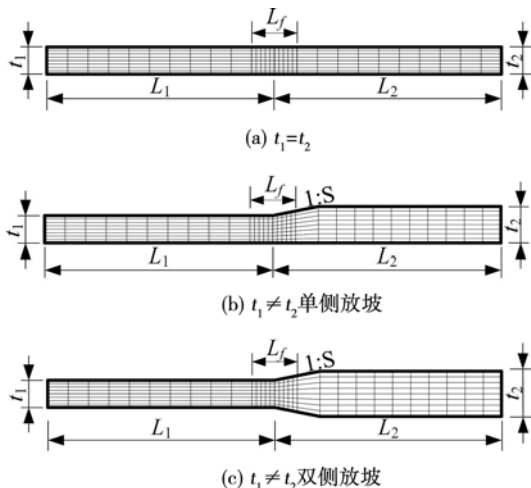


图 1 对接接头参数化建模

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^[8],即

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

式中: q 为对流换热热流密度(W/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($W/m^2 \cdot K$),按式(4)取值^[8],即

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

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 η 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^[5,9],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 ^[7],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 0.4~0.7 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: $a_r = W_m/2, a_f = 2W_m$ 。

(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

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 $v = 16.67$ mm/s。

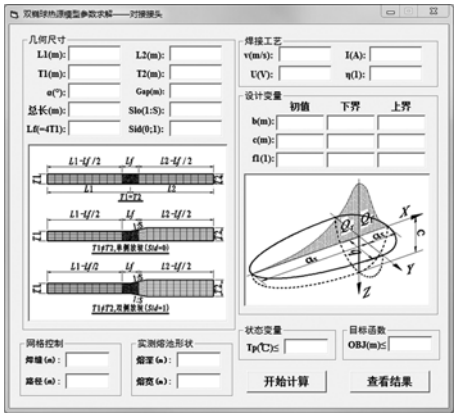


图 2 对接接头 DEHSM 参数输入界面

Fig. 2 Input interface of DEHSM parameters for butt joint

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	前椭球能量 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	熔宽 D_c	$(W_m - W_c)/W_m$	$(D_m - D_c)/D_m$
1	1 000	30	9.25	15.57	0.658 6	13.02	9.80	12.44	9.22	4.45	5.92
2	1 000	32	7.58	15.41	0.614 7	12.76	10.56	12.12	9.93	5.02	5.97
3	1 100	32	6.50	16.00	0.551 8	11.50	11.46	12.00	10.96	- 4.35	4.36
4	1 200	32	10.01	14.25	0.749 9	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 $OBJ \leq 0.1 \text{ mm}$,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 $\leq 0.2 \text{ mm}$),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 $OBJ \leq 0.5 \text{ mm}$,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^[11]。

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, Han Yongquan, 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 Wenchao, 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 Zhaozhong, 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