

大跨径斜拉桥索梁锚固区力学特征分析及优化

熊华涛

(中铁十六局集团铁运工程有限公司, 河北 高碑店 074000)

摘要:为探究斜拉桥索梁锚固区受力机理,建立了某斜拉桥索梁锚固区钢锚箱局部三维有限元模型,对钢锚箱整体及各板件进行了详细受力分析,并基于自适应遗传算法,对钢锚箱板件厚度进行了优化。结果表明:钢锚箱 M1 板件与其他板件相交位置应力集中效应较为明显,呈现出较为典型的面外受弯状态,建立以钢锚箱应力为约束条件的目标函数,板件 M1、M2、M5、M6 厚度均有不同程度增大,M3、M4 板件厚度有小幅降低。优化后各板件沿斜拉索索力方向应力和等效峰值应力降幅较为明显,分别达 11%、10%左右;板件 M1 两项应力指标有小幅增长,增幅均在 5%以内,同时钢锚箱板件应力集中现象得到缓解,基于自适应变量的遗传算法在钢锚箱优化中取得了较好的效果,具有较高的精度和较强的鲁棒性。

关键词:钢锚箱; 自适应遗传算法; 斜拉索方向应力; 等效峰值应力

大跨径斜拉桥索梁、索塔锚固区一般采用钢锚箱式锚固结构。钢锚箱锚固结构板件众多,受力呈现典型的空问效应,局部板件在高应力作用下,容易出现强度下降或疲劳破坏。同时,由于锚固结构构造本身的复杂性,且承受强大的集中力作用,且对部分连接板件产生偏心效应,简单的力学模型很难描述其力学行为,须建立精细化的局部有限元模型分析钢锚箱的力学特征。国内外学者为此做了大量的研究工作。李燕通过采用“子模型技术”,对某斜拉桥钢锚箱开展了有限元数值分析工作,明确了钢锚箱部分板件应力集中区域,探究了应力分布在板件上不连续性的原因,为现场施工监控提供了指导;周绪红对某斜拉桥索梁锚固区开展了三维非线性有限元模拟研究,同时考虑了锚箱承压板与锚垫板之间的接触问题;张清华等以苏通长江大桥为研究对象,采用试验与有限元相结合的手段,研究了边界处理对有限元分析精度的影响,获取了各板件的受力特性;欧键灵对某宽幅单索面斜拉桥钢锚箱进行数值分析,并对板件构造提出了改进建议。同时,相关学者也开展了多项锚固结构的模型试验及数值模拟研究,明确了钢锚箱的传力机理和应力分布,研究了各类板件参数及设置对力学性能的影响。该文在现有研究成果的基础上,以某大跨径斜拉桥为工程背景,建立索梁锚固区局部有限元模型,分析其受力特征,并基于自适应遗传算法开展钢锚箱板件厚度优化研究。

1 索梁锚固区有限元数值分析

以某大跨径斜拉桥索梁锚固区为研究对象,该钢锚箱焊接于钢箱梁主梁外侧,斜拉索锚头与钢箱梁承压板紧顶接触,从而将索力通过钢锚箱传递至钢箱梁上,所有板件均为 Q345 钢材,整个钢锚箱分为 6 组板件,编号为 M1~M6,各板件厚度分别为 48、60、60、60、48、48 mm,由于钢锚箱附近板件众多,应力分布较为复杂,需对该部位进行详细的受力分析。钢锚箱构造图及侧面图见图 1、2,板件编号见图 3。

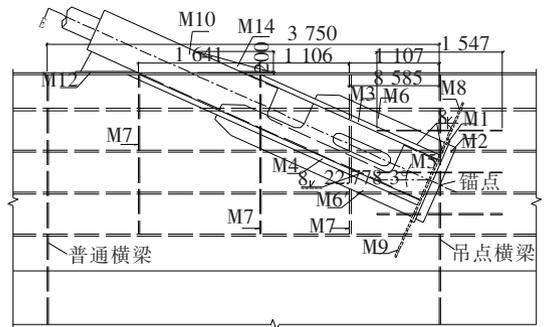


图 1 钢锚箱构造图(单位:mm)

使用 Ansys 建立该部位局部精细化有限元模型,选取承受索力最大的钢锚箱作为分析对象,根据圣维南原理,取 3 倍钢锚箱体积区域的主梁及锚固区建模,由于承压板 M2 板件较厚,该部分使用 Solid45 建模,

钢锚箱其余部分以及钢箱梁均采用 Shell63 板单元模拟,由于模型尺寸大于 3 倍钢锚箱尺寸,边界对锚箱受力影响较小,因此在远离锚箱的主梁三边板件设置为面固结约束,由于 M1 板件与 M2 板件是紧顶接触,在 Ansys 中设置接触单元,通过两组板件的变形确定其接触面积,在荷载输入时仅考虑斜拉索索力作用,忽略钢箱梁内力对钢锚箱的影响,将斜拉索索力以面荷载的形式施加于垫板 M2 上。

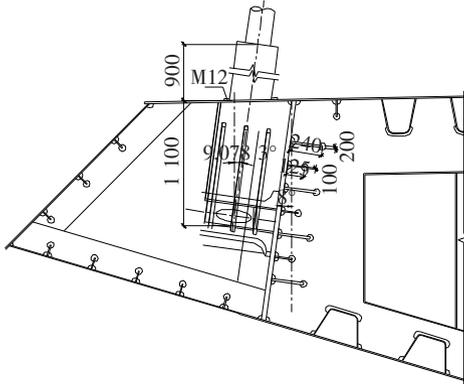


图 2 钢锚箱侧面布置图(单位:mm)

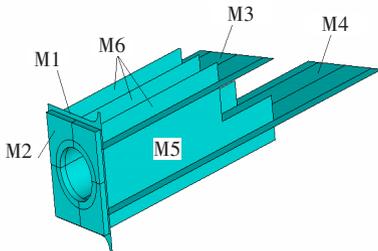


图 3 钢锚箱板件编号图

2 有限元计算结果

图 4 为钢锚箱整体 Von Mises 应力分布结果。

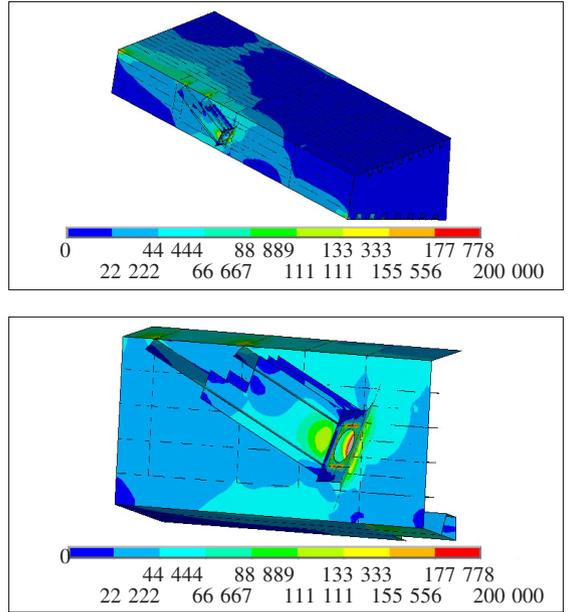
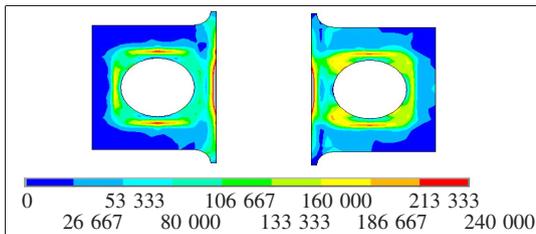


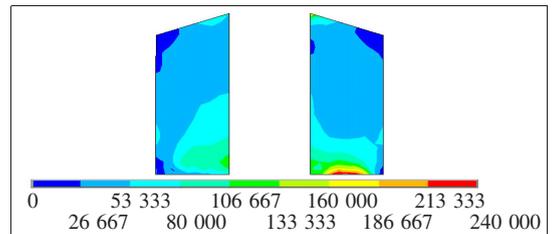
图 4 钢锚箱整体 Von Mises 应力云图(单位:kPa)

由图 4 可知:锚固区位置传力途径较为明确,钢锚箱前侧钢箱梁主要受压,后侧受拉,板件 M5 在靠近板件 M1 附近、以及板件 M1 在与支承板件交界处的应力较大,最大超过了 200 MPa,其他部位板件的应力较小,锚固区附近钢箱梁腹板 Von Mises 应力均为 70 MPa。

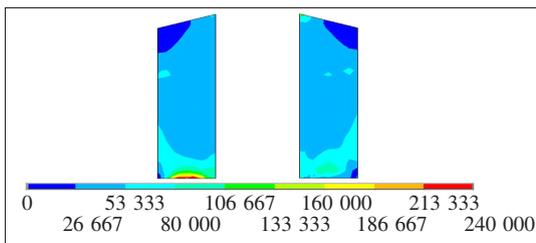
图 5 及表 1 为板件 M1、M3、M4、M5~M6 的应力



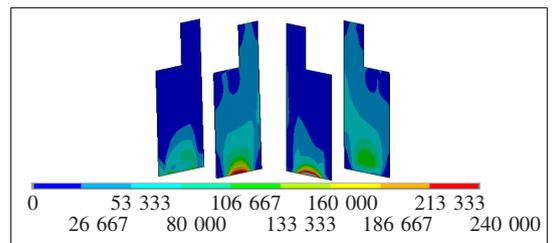
(a) M1 板件



(b) M3 板件



(c) M4 板件



(d) M5、M6 板件

图 5 钢锚箱主要板件 Von Mises 应力云图(单位:kPa)

表1 钢锚箱各板件应力计算结果 MPa

板件编号	沿索力方向 最大应力	垂直索力方 向最大应力	等效峰值 应力
M1	223.11	187.53	236.78
M2	294.78	277.54	300.74
M3	234.27	211.78	243.11
M4	264.85	224.52	273.47
M5	227.42	216.38	247.79
M6	248.88	236.30	254.83

计算结果。

由图5可知:板件M1在板件M3~M6及钢箱梁腹板约束下,受力呈现典型的面外弯曲,在与其他板件及钢箱梁腹板相交位置,应力值普遍较大,Von Mises应力范围为200~240 MPa,其中板件边缘灰色区域部分应力超过240 MPa;板件M3、M4大部分区域处于低应力状态,与板件M1相交位置出现局部弯曲,且拉压应力在小范围内急剧变化;M5、M6板件在靠近板件M1的位置应力较大,下部区域出现较为明显的应力集中现象,小部分灰色区域应力超过240 MPa。各板件连接部分以及与钢箱梁腹板相结合区域应力集中现象较为明显,峰值应力较大。

3 钢锚箱板件厚度优化

通过对钢锚箱开展有限元数值模拟分析可知,索梁锚固区钢锚箱结构较为复杂、几何形状突变,在斜拉索索力直接作用下,锚固区应力分布不均,存在较为明显的应力集中现象,在运营期活载长期作用下,容易产生疲劳损伤裂纹,从而影响结构的可靠性和耐久性。因此需对板件构造参数进行调整,以优化其局部受力。该文选取M1~M6各板板厚作为待修正参数。由于钢锚箱板件众多,各板板厚变化将引起锚箱整体或局部刚度变化,改变其应力分布状态,其优化过程是一个多参数互相影响、迭代调整的过程,该文基于最优化理论,构建目标函数和约束条件,使用遗传算法对板厚进行最优化求解。

钢锚箱各板板厚在变化过程中,应保证钢锚箱整体及各板件的应力最小,同时对板厚变化应作出一定限制,以避免所有板件同时无限增厚造成无法收敛的问题,该文中以所有板件总质量最小为另一目标函数。故目标函数可取为:

$$f_1(x) = f(\sigma) = \min(\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3, \dots, \sigma_n) \quad (1)$$

$$f_2(x) = \min \sum_{i=1}^n (m_1, m_2, \dots, m_n) \quad (2)$$

式中: $f(x)$ 为目标函数; σ_n 为 n 号板件最大应力; m_n 为第 n 号板件的质量。

对于实际工程结构,在各荷载作用下,应保证结构始终处于线弹性工作状态,因此构件最大应力不允许超过其屈服应力,该文约束条件可取为:

$$\max(\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3, \dots, \sigma_n) \leq \sigma_{con} \quad (3)$$

式中: σ_{con} 为应力控制指标,此处取Q345钢材屈服应力。

遗传算法在土木工程领域已有广泛应用,是一种较为高效的全局最优搜索算法,其不依赖于具体的研究领域,能有效解决目标函数或约束条件多峰性、非线性等问题,具有较好的鲁棒性。该文联合RBF神经网络与遗传算法开展钢锚箱结构厚度参数的优化分析,该法可提升种群中的精英个数和比例,其原理为将自适应参数也作为设计变量,自适应调整初始随机变量的产生,大幅提高初始种群中的“精英率”。对于服从正态分布的变量 x ,其自适应随机变量按式(4)得到:

$$x_i = u_i + a\gamma_1\sigma_i \sqrt{-2\ln\gamma_2} \sin(2\pi\gamma_3) \quad (4)$$

式中: a 为变量,取值一般为 $[-10 \ 10]$,可根据失效概率调整。

在钢锚箱优化计算中,以M1~M6板件厚度为变量,其初始值分别为48、60、60、60、48、48 mm,变量范围取 6σ (此处 σ 表示服从正态分布随机变量的标准差),RBF神经网络的输入为由DPS生成U200(200⁶)的均匀设计样本,采用Matlab批量处理目标函数结果,设计变量训练参数见表2。

表2 设计变量参数信息

项目	初始 值/mm	变量范 围/mm	变异系数	分布类型
板件M1厚度	48	33.6~62.4	0.05	正态分布
板件M2厚度	60	42.0~78.0	0.05	正态分布
板件M3厚度	60	42.0~78.0	0.05	正态分布
板件M4厚度	60	42.0~78.0	0.05	正态分布
板件M5厚度	48	33.6~62.4	0.05	正态分布
板件M6厚度	48	33.6~62.4	0.05	正态分布

在Matlab中调用遗传算法模块,输入数学优化模型和相关参数后对设计变量进行全局最优搜索,使用Python脚本语言建立Ansys与Matlab的数据交互接口,调用Ansys有限元计算作为RBF神经网络训练样本数据,再使用RBF神经网络与遗传算法联合进行优

化分析。RBF 神经网络基本参数信息见表 3。

表 3 RBF 神经网络参数信息

项目	参数数值	说明
输入层	6	设计变量
输出层	1	钢锚箱各板件最大应力
训练组数	200	U200(200 ⁶)
网络控制精度	0	网络训练精度
测试要求精度	0.001	应力误差

4 优化结果

待程序收敛于最优解后,将设计变量输入至 Ansys 中,获取在最优设计变量结果下钢锚箱力学响应特征,优化后设计变量见表 4。由表 4 可知:设计变量优化前后板厚均有一定变化。

表 4 设计变量参数优化结果

项目	初始值/ mm	优化值/ mm	变化幅度/ %
板件 M1 厚度	48	55.89	16.44
板件 M2 厚度	60	63.97	6.61
板件 M3 厚度	60	51.47	-14.22
板件 M4 厚度	60	49.33	-17.78
板件 M5 厚度	48	55.17	14.94
板件 M6 厚度	48	53.84	12.17

为验证算法的有效性,提取板件 M1~M6 在最大索力工况下的沿索力方向的应力及等效峰值应力结果进行对比,具体见表 5。表 5 表明:板件厚度变化对钢锚箱应力值有一定影响,以沿索力施加方向应力值为例,M2 作为直接承受斜拉索索力作用的板件,沿索力方向上最大应力及等效峰值应力均有小幅降低,两者降幅分别为 4.55%、4.84%;板件 M3、M4 沿索力方向最大应力降幅较为明显,均达到了 11%左右,等效峰值应力降幅也达到了 10%左右,板件 M6 应力变化不明显,两种应力指标降幅均在 4%以内;板件 M1 应力呈增大趋势,沿索力方向最大应力及等效峰值应力增幅分别为 4.67%和 4.21%。

从优化后钢锚箱应力分布云图可知:对板厚进行调整改变了钢锚箱局部刚度及应力传导路径,各板件应力集中现象得到缓解,可认为通过自适应遗传算法对钢锚箱板厚进行优化取得了良好效果。

表 5 优化前后钢箱梁主要板件应力对比结果

板件 编号	优化前/MPa		优化后/MPa	
	沿索力方向 最大应力	等效峰值 应力	沿索力方向 最大应力	等效峰值 应力
M1	223.11	236.78	233.54	246.74
M2	294.78	300.74	281.36	286.19
M3	234.27	243.11	206.52	217.64
M4	264.85	273.47	233.76	247.17
M5	227.42	247.79	210.37	226.66
M6	248.88	254.83	239.14	244.83

5 结论

(1) 钢锚箱在索力直接作用下,板件 M1 与板件 M3、M4、M5、M6 相交位置应力水平较高,最高达 300.74 MPa,应力集中较为明显,呈现出典型面外弯曲的受力特征。

(2) 基于自适应遗传算法,以板厚为设计变量,建立合理的目标函数和约束条件,能较为精确地获取板件厚度最优解,算法具有较高的精度和较强的鲁棒性,可为钢锚箱构造参数优化提供一种思路。

(3) 优化后板件沿斜拉索索力方向最大应力降幅为 11%左右,等效峰值应力降幅最大为 10%左右,应力集中现象有一定程度缓解。

参考文献:

- [1] 吕文舒,陈星烨,张祖军. 钢箱梁斜拉索梁锚固区钢锚箱受力性能及结构局部优化研究[J]. 中外公路,2020(3).
- [2] 李燕. 基于子模型技术法的钢锚箱结构强度研究[D]. 长安大学硕士学位论文,2013.
- [3] 周绪红,吕忠达,狄谨,等. 钢箱梁斜拉桥索梁锚固区极限承载力分析[J]. 长安大学学报(自然科学版),2007(3).
- [4] 张清华,李乔. 超大跨度钢箱梁斜拉桥索梁锚固结构试验研究[J]. 土木工程学报,2011(9).
- [5] 欧键灵,彭聪,宁平华. 超宽幅单索面斜拉桥钢锚箱仿真分析和设计优化[J]. 特种结构,2016(4).
- [6] 金波,周旺,唐丽莹. 正常使用极限状态下隐式功能函数结构可靠度计算[J]. 湖南大学学报(自然科学版),2020(1).
- [7] Tang Q Y, Zhang C X. Data Processing System (DPS) Software with Experimental Design, Statistical Analysis and Data Mining Developed for Use in Entomological Research[J]. Insect Science, 2013, 20(2):254-260.