DOI:10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2020.06.017

改进子模型分析法对起重机主梁静态特性影响研究

马旭[a,b],王宗彦[a,b],刘岩松[a,b],臧春田[a,b],李荣强[a,b]

(中北大学 a. 机械工程学院; b. 山西省起重机数字化设计工程技术研究中心,山西 太原 030051)

摘　要:针对子模型分析法边界约束不足及网格划分精度低等问题,采用目标区域进行延展、逐步递减缩小区域等措施进行了改进。在缩小过程中,网格不断细化,使边界约束得到有效的控制。通过数学公式推导得出了改进子模型分析法的数学模型,在加以有效约束后使用Workbench19.2的仿真功能分别求出桥式起重机主梁子模型分析法、改进子模型分析法以及原始粗模型的结果。结果对比进一步论证了改进子模型分析法的优越性。

关键词:桥式起重机;主梁;改进子模型分析法;静态特性

中图分类号:TH215　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1671-5276(2020)06-0070-03

Study of Influence of Improved Sub-model Analysis Method on Static Characteristics of Main Girder of Overhead Crane

MA Xu[a,b], WANG Zongyan[a,b], LIU Yansong[a,b], ZANG Chuntian[a,b], LI Rongqiang[a,b]

(a. School of Mechanical Engineering; b. Crane Digital Design Engineering Technology Research Center of Shanxi Province, North University of China, Taiyuan 030051, China)

Abstract: Because the problems of insufficient boundary constraints and low precision of grid division exist in submodel analysis method, the measures such as extending and gradually decreasing the target area and reducing the area are adopted for making an improvement. The mathematical model of the improved sub-model analysis is derived by mathematical formula. After effective constraints, the Workbench19.2 simulation function is used to calculate the main beam model analysis of the bridge crane, the improved sub-model analysis and the results of the original crude model are compared, which is used to further demonstrate the superiority of the improved sub-model analysis.

Keywords: bridge crane; main girder; improved sub-model analysis; static characteristic

0　引言

桥式起重机(简称桥起)是应用于装卸和搬运物料的机械设备,能在减轻繁琐工作量的同时完成一些人类无法完成的繁琐任务,广泛应用于钢铁、冶金、建材等行业[1-2]。

在进行主梁有限元分析[3]时,传统的网格划分无法达到较好的效果,而子模型技术可以实现结构局部区域的精确计算,因此本文采用子模型分析法来解决此类问题。

目前,国内外对子模型技术的应用进行了大量的研究。崔磊等[4]基于多边界切割插值对子模型分析进行了一定的改进;任慧龙等[5]将子模型应用于小水线面双体船结构优化;许允等[6]通过分析子模型范围即边界条件对应力的影响,发现子模型范围对结果影响较大,而边界节点对于应力的影响较小。然而在现阶段研究中子模型分析法多数是直接对总体模型进行粗略分析,计算结果的精度无法保证。因此对子模型分析法进行改进是非常有必要的。

针对以上问题,本文在将子模型分析法引入到桥起主梁静态特性研究中的同时,对该方法进行改进,大大改善了主梁网格划分方法与划分精度。所提出的改进子模型分析法可用于桥起主梁最大应力以及变形量的精确分析,具有一定参考价值。

1　子模型分析法

1.1　子模型分析法介绍

有限元分析中所使用的子模型分析法是指在原有的整体粗化模型中进行划分,将重要的部分提取出来,作为研究的重点位置进行研究,然后对研究的重点位置进行网格细化,从而获得该区域较为精准的结果[7-8]。子模型分析法可以有效地避免划分网格较大带来的计算结果不精确的影响,同时可以将不重要的部分进行删除,大大减少了分析时间。

1.2　子模型分析法原理

有限元求解线性静力学问题可以归为以下公式[8]:

$$\boldsymbol{Ku}=\boldsymbol{f} \tag{1}$$

其中:$\boldsymbol{K}$ 是结构刚度矩阵;$\boldsymbol{u}$ 为结构节点外载荷向量;$\boldsymbol{f}$ 为结构结点位移向量。将整体模型自由度分为3组:子模型

第一作者简介:马旭(1995—),男,山西阳泉人,硕士研究生,研究方向为数字化设计与制造。

内自由度 i、子模型边界自由度 b 和子模型外部自由度 o,将式(1)进行扩展,得到子模型的公式为:

$$\begin{bmatrix} K_{ii} & K_{ib} \\ K_{bi} & K_{bb} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_i \\ u_b \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} f_i \\ f_b \end{Bmatrix} \tag{2}$$

由于内部节点与外界节点没有任何一个单元相关,因此式(2)可等价于整个模型公式,而整个模型的分析公式如式(3)所示,当 $\boldsymbol{K}_{io}$ 等矩阵由于未接触而为 0 矩阵时,两者等价。

$$\begin{bmatrix} K_{ii} & K_{ib} & K_{io} \\ K_{bi} & K_{bb} & K_{bo} \\ K_{oi} & K_{ob} & K_{oo} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_i \\ u_b \\ u_o \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} f_i \\ f_b \\ f_o \end{Bmatrix} \tag{3}$$

上述便是所使用的子模型分析原理,由式(2)可得 u_b 和 f_b 是影响结果的两个主要条件,一定程度上这两个条件的准确性代表了整个结果的精准程度,而传统子模型分析法对于边界条件的约束并没有较好的方法[9-10]。

2　改进子模型分析法

2.1　改进子模型分析法原理

由子模型分析法可知 u_b 和 f_b 对于最终结果的影响比较大,因此对于边界应力以及变形量需要增加其精准程度[11]。对于桥起主梁而言,要得到准确的跨中位置应力以及变形量,不能单单将其中一部分拿出来进行研究,而应该逐步划分直至最终分析位置,这样可以使得边界上的数值由于网格的变小而变得更加准确,同时边界上的约束条件有了多重约束,改进子模型分析法流程图如图 1 所示。

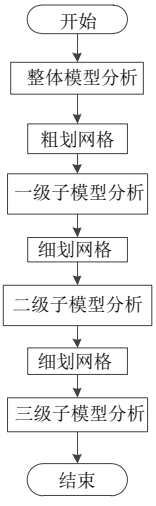

图 1　改进子模型分析法流程图

首先,将目标位置的区域作为最终区,然后扩大其范围得到第 2 次子模型所需要的模型,然后在第 2 次子模型的基础上扩大范围得到第 3 次子模型区域,依次进行网格细化,使网格不断细化,得到最终结果。

2.2　改进子模型数学原理

式(2)为最终子模型的数学模型,相当于第 1 次子模型的数学公式,即第 1 次子模型,对模型内部进行求解可得式(4):

$$\boldsymbol{K}'_1 \begin{Bmatrix} u_{b1} \\ f_{b1} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} u_{i1} \\ f_{i1} \end{Bmatrix} \tag{4}$$

式中:$\boldsymbol{K}'_1 = \begin{bmatrix} \dfrac{K_{ib1}K_{bi1} - K_{ii1}K_{bb1}}{K_{bi1}} & \dfrac{1}{K_{bi1}} \\ \dfrac{K_{ib1}K_{bi1} - K_{bi1}K_{ib1} - K_{ii1}K_{bb1}}{K_{bi1}K_{ii1}} & \dfrac{1}{K_{bi1}K_{ii1}} \end{bmatrix}$;

下标 1 代表初化模型所对应的各个参数;u_{i1} 和 f_{i1} 为下一次子模型分析的 u_{b2} 和 f_{b2}。依次进行类推可得第 2 次子模型分析模型为:

$$\boldsymbol{K}'_2 \begin{Bmatrix} u_{i1} \\ f_{i1} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} u_{i2} \\ f_{i2} \end{Bmatrix} \tag{5}$$

式中 $\boldsymbol{K}'_2 = \begin{bmatrix} \dfrac{K_{ib2}K_{bi2} - K_{ii2}K_{bb2}}{K_{bi2}} & \dfrac{1}{K_{bi2}} \\ \dfrac{K_{ib2}K_{bi2} - K_{bi2}K_{ib2} - K_{ii2}K_{bb2}}{K_{bi2}K_{ii2}} & \dfrac{1}{K_{bi2}K_{ii2}} \end{bmatrix}$。

以此类推可得最终所求目标表达式为

$$\boldsymbol{K}'_3 \begin{Bmatrix} u_{i2} \\ f_{i2} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} u_{i3} \\ f_{i3} \end{Bmatrix} \tag{6}$$

式中 $\boldsymbol{K}'_3 = \begin{bmatrix} \dfrac{K_{ib3}K_{bi3} - K_{ii3}K_{bb3}}{K_{bi3}} & \dfrac{1}{K_{bi3}} \\ \dfrac{K_{ib3}K_{bi3} - K_{bi3}K_{ib3} - K_{ii3}K_{bb3}}{K_{bi3}K_{ii3}} & \dfrac{1}{K_{bi3}K_{ii3}} \end{bmatrix}$。

将式(6)以及式(5)带入式(4)可得

$$\boldsymbol{K}'_3\boldsymbol{K}'_2\boldsymbol{K}'_1 \begin{Bmatrix} u_{b1} \\ f_{b1} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} u_{i3} \\ f_{i3} \end{Bmatrix} \tag{7}$$

式(7)为改进子模型分析法的最终表达式。由于网格逐步细化使得刚度矩阵的精度逐步提高,而边界条件也在原来的基础上得到了有效的改善,解出的结果也将更为精确。相比原先的一步结果,这个求解结果更为精确。如果分析模型更为巨大,可在式(7)基础上延伸迭代推导得到。如果对模型再进行细小的划分,与式(4)迭代可得最终表达式:

$$\cdots\boldsymbol{K}'_5\boldsymbol{K}'_4\boldsymbol{K}'_3\boldsymbol{K}'_2\boldsymbol{K}'_1 \begin{Bmatrix} u_{b1} \\ f_{b1} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} u_{i3} \\ f_{i3} \end{Bmatrix} \tag{8}$$

式中:$\boldsymbol{K}'_1$ 表示第 1 次子模型时所对应的刚度矩阵;$\boldsymbol{K}'_2$ 表示第 2 次子模型时所对应的刚度矩阵;$\boldsymbol{K}'_3$ 表示第 3 次子模型时所对应的刚度矩阵,以此类推 $\boldsymbol{K}'_4$ 表示第 4 次子模型时所对应的刚度矩阵。

3　主梁静态研究结果

本文以山东某公司生产的 5 t/18.5 m 桥式起重机主梁为例,使用的分析软件为 Workbench19.2,使用 Solidworks建立三维模型进行分析,分别对静态特性中的应力、变形量进行仿真对比,与原来的子模型分析法结果比较得出结论。子模型切割主要由 Workbench19.2 自带的 DM 模块来进行切割,也可自行建立三维模型,但必须注意模型坐标,以得到准确结论。

3.1　位移结果

在对主梁网格粗化,进行初始分析得到主梁的最大变形量为跨中位置,因此分别建立跨中位置周围 1 000 mm、200 mm、20 mm 的三维模型进行子模型分析。在对主梁整体模型分析后先进行第 1 步子模型分析,网格大小设置为最大 50 mm,分析完成之后,以第 1 步子模型分析结果为边界,进行第 2 次子模型分析,网格大小设置为 10 mm,最后以第 2 次子模型分析结果为边界,进行第 3 次子模型分析。网格大小设置为 1 mm,最终得到细化。其主梁初始结果如图 2 所示,原始子模型分析结果如图 3 所示,改进子模型分析结果如图 4 所示。

图 2　主梁粗分析结果云图(变形)

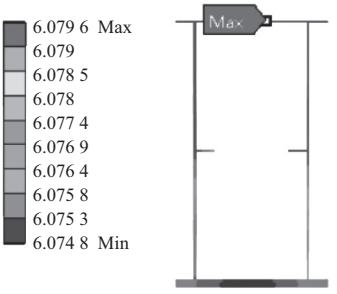

图 3　原始子模型分析法分析云图

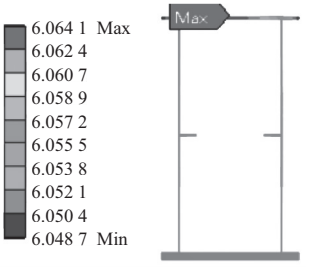

图 4　改进子模型分析法分析云图

由于本文采用桥起主梁的静态特性较强,所以在变形量上的变化较小。通过比较图 2-图 4 可知,改进子模型分析法与粗模型的误差值为 0.237 mm,而子模型分析法与之的误差值为 0.08 mm,误差值比率相差近 3 倍。由上述数学公式可得,改进子模型分析法的精度要远远高于子模型分析法,因此子模型分析法对于变形量精度的影响值小于本文提出的改进子模型分析法。因此,改进子模型分析法在研究变形量时比原先的子模型分析法有很大的优势,在研究变形量时,为了提高精度,改进子模型分析法的使用有一定必要性。

3.2　应力结果

应力性能是桥起主梁静态性能是否达标的重要指标,而通过对上述模型的分析得此起重机模型最大应力出现位置为斜板与连接板的连接位置,因此以此位置为最终分析目标位置,使用子模型分析法与本文所提出的改进子模型分析法分别对其进行分析。由于此处应力集中明显,为了防止造成误差,本模型最终分析范围改为周围 200 mm,网格划分大小等与 3.1 节所示相同。通过分析得到结果如图 5-图 7 所示。图 5 为整体模型粗划分结果图,图 6 为子模型分析法结果图,图 7 为改进子模型分析法结果图。

图 5　主梁粗分析结果云图(应力)

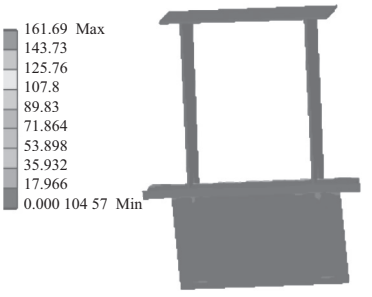

图 6　子模型分析法分析云图(应力)

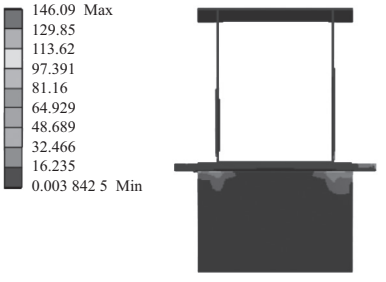

图 7　改进子模型分析法分析云图(应力)

由图 5-图 7 可得:粗化分析云图所显示的最大应力为 122 MPa,而子模型分析法所得的最大应力为 162 MPa,相差 40 MPa,改进子模型分析法所得的最大应力为 146 MPa,相差 24 MPa。由此可知子模型分析得出的结果与实际有较大的误差,而通过改进子模型分析法有效地减少了这种误差的存在。造成这种误差的原因有可能是由于应力集中的影响,由此可证明改进子模型分析法的优越性以及子模型分析法在 Workbench 中的不足之处。就方法的可靠程度而言,改进子模型分析法明显结果更加精确。

4　结语

针对桥起主梁跨度较大,分析网格无法划分得更为细致,从而使结果不太准确问题,本文进行了一定的研究同时得出以下结果:

1) 通过对子模型数学公式的延伸,得出了改进子模型分析法的数学公式,同时仿真可以证明其优越性。

(下转第 84 页)

试验结果表明,压力-转矩相应正常,充、泄油响应较快,转矩容量400 Nm以上,满足使用需求。

小油压下,没有转矩传递,原因是油压在*Kp*点以下,活塞未移动,故没有转矩传递[5]。测试结果显示,*Kp*点在0.2 MPa左右,如图4所示。

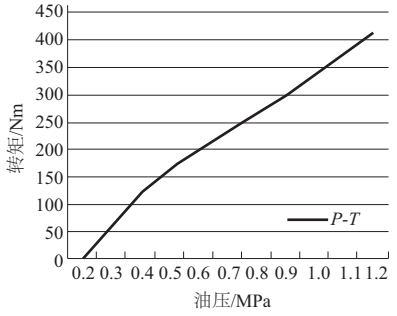

图4　油压与转矩传递曲线

2) 换挡滑摩极限工况试验

设定油温80℃,润滑流量2L/min,主动端恒转速2 000 r/min,滑摩转矩150 Nm,滑摩时间0.6 s。

滑摩前后*P-T*曲线无变化,同一油压下,转矩波动<5 Nm,拆解摩擦副表面无异常,满足换挡使用需求。*P-T*对比如图5所示,拆解分析如图6所示。

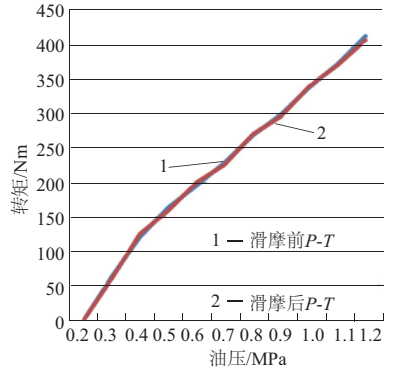

图5　换挡滑摩前后*P-T*对比分析曲线

图6　换挡滑摩工况拆解图

3) 温升探索试验

设定油温80℃,润滑流量2L/min,主动端转速1 500 r/min,滑摩转矩270 Nm,滑摩时间1.5 s,采集对偶片温度为326℃,理论计算滑摩功1.57 J/mm^2。拆解分析:摩擦副表面无烧蚀;增加转速至1 600 r/min,滑摩时间增加至1.8 s,理论计算滑摩功2.65 J/mm^2,采集对偶片温度360℃,摩擦副烧蚀。温度尽量控制在300℃以下,热容量尽量控制在1 J/mm^2,为后续控制策略的制定,提供参考依据。

4　结语

本文结合设计空间及理论计算确定摩擦片、活塞的几何尺寸、摩擦副数量、工作油压及活塞行程等参数,确定摩擦片材料、回位弹簧形式、消除离心力的选型及设计方法。通过计算安全系数及台架试验,验证了离合器设计的可行性。

参考文献:

[1] 黄宗益. 现代轿车自动变速器原理及设计[M]. 上海:同济大学出版社,2006.

[2] 焦敏,赵志国,王晨,等. 混合动力轿车变速箱湿式制动器设计研究[J]. 现代制造技术与装备,2018(11):88-91.

[3] BERND Matthes. Dual clutch transmission lessons learned and future potential[J]. SAE Paper,2005(1): 1021.

[4] NAVNHEIMER Harald, BERSCHE B. Automotive transmissions fundamentals, selection, design and application [M]. USA: Springer Berlin Heidelberg,2011: 344-365.

[5] 徐瑞雪,尹良杰. 湿式双离合器自动变速器充油控制[J]. 机械制造与自动化,2016,45(6): 248-250.

收稿日期:2019-11-04

(上接第72页)

2) 通过对桥起主梁形变的仿真分析可得,改进子模型分析法比原有的子模型分析法结果更加精确。

3) 通过对起重机主梁应力分析对比可得,子模型分析法在应力集中处会有较大误差,而改进子模型分析法有效地遏制了这种误差,提高了子模型分析的精度。

参考文献:

[1] 张质文,虞和谦,王金诺,等. 起重机设计手册[M]. 北京: 中国铁道出版社,1998.

[2] 宋佳雄,郑新梅,刘燕,等. 基于有限元法桥式起重机主梁应力分析及优化设计[J]. 河北工业大学学报,2019,48(1): 35-43.

[3] 梁赛,杨冰,吴亚运,等. 有限元方法中实体单元选择策略研究[J]. 机械制造与自动化,2019,48(2): 79-83.

[4] 崔磊,毛江鸿,金伟良,等. 基于多边界切割插值的改进子模型分析方法[J]. 计算力学学报,2015,32(5): 619-626.

[5] 任慧龙,张清越,胡雨蒙,等. 基于参数化子模型的小水线面双体船结构优化[J]. 华中科技大学学报(自然科学版),2015,43(11): 88-92.

[6] 许允,张少雄,张晨阳,等. 子模型范围及边界条件对应力结果的影响[J]. 船海工程,2016,45(4): 19-23.

[7] 张海平,刘艾明,陶瑛. ANSYS子模型分析法在管磨机筒体结构应力分析中的应用[J]. 河南建材,2017(1): 24-26.

[8] 曹学兴,何蕴龙,迟福东,等. 基于子模型分析法的高堆石坝坝基廊道抗震安全性研究[J]. 水利与建筑工程学报,2018,16(6): 87-93.

[9] 肖斌,李彪,夏春燕, 等. 基于功率流法双层隔振系统振动传递[J]. 机械工程学报,2011,47(5): 106-113.

[10] 徐格宁,范小宁,陆凤仪,等. 起重机焊接箱形梁疲劳可靠度及初始裂纹的蒙特卡罗仿真[J]. 机械工程学报,2011,47(20): 41-44.

[11] 于佳田,聂春戈,郝月,等. 子模型技术在塔尖结构疲劳性能预测中的应用[J]. 机械工程学报,2018 (10): 76-79.

收稿日期:2020-06-15