

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2013.06.004

基于三次NURBS曲线的伸缩吊臂局部稳定性研究*

黄鑫磊, 纪爱敏*, 殷旭, 孙鹏飞
(河海大学 机电工程学院, 江苏 常州 213022)

摘要: 针对于汽车起重机吊臂采用何种截面形状能够提高其局部稳定性的问题,利用非均匀有理B样条(NURBS)曲线进行其截面形状的建模,并使用ANSYS软件进行了吊臂的局部稳定性分析。首先,通过积累弦长法求得三次NURBS曲线的节点矢量,使用反求技术算出三次NURBS曲线的权因子及其控制点,从而构造出汽车起重机伸缩吊臂下盖板截面的三次NURBS曲线函数;其次,利用APDL命令流控制技术,通过调节三次NURBS曲线控制点的坐标和权因子的大小,得到了多种形状的曲线形吊臂截面,通过计算其屈曲特征值后,获得了吊臂的临界应力值及其变化规律;最后,得到了吊臂截面形状由六边形变换到十二边形,再到曲线形时临界应力的提高程度。研究结果表明,该方法较好地解决了起重机曲线形吊臂的局部稳定性问题。

关键词: 非均匀有理B样条; 汽车起重机; 伸缩吊臂; 局部稳定性; APDL

中图分类号: TH21; TH122; TP3 **文献标志码:** A

文章编号: 1001-4551(2013)06-0659-05

Analysis of local stability of telescopic boom based on cubic NURBS curve

HUANG Xin-lei, JI Ai-min, YIN Xu, SUN Peng-fei

(College of Mechanical and Electronic Engineering, Hohai University, Changzhou 213022, China)

Abstract: Aiming at the problem of which cross-section shape needs to be used in order to increase the local stability of boom of truck crane, the non-uniform rational B-splines(NURBS)curve was exploited to model the cross-section shape of boom and ANSYS software was applied to the analysis of local stability of boom. Firstly, the knot vector of cubic NURBS curve was obtained by accumulated chord length method, then the weights and control points were worked out by reverse technology, thus the cubic NURBS curve function of the lower cover cross-section of truck crane's telescopic boom was established. Secondly, with APDL command flow, various curve shaped cross-section of boom were gotten by adjusting the cubic NURBS curve's coordinates of the control points and the size of the weights, then the buckling eigenvalue was calculated, so the critical stresses of boom and its variation were gained. Finally, the increased value of the critical stresses from a hexagonal cross-section to a dodecagon cross-section, then to a curve cross-section was obtained. The results indicate that the method can solve the problem of the local stability of curve shaped cross-section boom of crane.

Key words: non-uniform rational B-splines(NURBS); truck cranes; telescopic boom; local stability; APDL

0 引 言

随着相关领域对汽车起重机的起重能力、作业幅度和高度的要求越来越高,设计自重轻和高承载能力

的吊臂成为汽车起重机发展的紧迫任务。而在其设计中,为减轻吊臂自重,需增大吊臂截面的尺寸和高宽比,达到充分利用材料的承载能力的要求。但是汽车起重机吊臂在工作过程中,其腹板部分很容易出现

收稿日期: 2012-12-13

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51175146)

作者简介: 黄鑫磊(1989-),男,湖北通城人,主要从事数字化设计方面的研究。E-mail: huangxinlei89@126.com

通信联系人: 纪爱敏,男,教授,博士生导师。E-mail: jam@ustc.edu

$$b_{i+1} = (1 - \frac{(\Delta_{i+3})^2}{\Delta_{i+2}^2 \Delta_{i+1}^3} - \frac{(\Delta_{i+2})^2}{\Delta_{i+2}^3 \Delta_{i+2}^2}) \omega_{i+1} \quad (i = 0, 1, 2, \dots, n-1),$$

$$b_0 = -\frac{3\omega_1}{\omega_0 \Delta_3}, \quad c_0 = \frac{3\omega_1}{\omega_0 \Delta_3},$$

$$a_{n+1} = -\frac{3\omega_n}{\omega_{n+1} \Delta_{n+1}},$$

$$b_{n+1} = \frac{3\omega_n}{\omega_{n+1} \Delta_{n+1}},$$

$$q_i = (a_i + b_i + c_i) Q_{i-1} \quad (i = 1, 2, \dots, n),$$

$$q_0 = Q_0^*,$$

$$q_{n+1} = Q_{n-1}^*。$$

由式(8)可解得控制点 $P_i (i = 0, 1, \dots, n+1)$ 。

由求得的权因子 w_i 和控制点 P_i 以及基函数 $N_{i,3}(u)$ 可得出起重机伸缩吊臂下盖板截面的三次 NURBS 曲线函数 $C(u)$ 。

三次 NURBS 曲线流程图如图 1 所示。

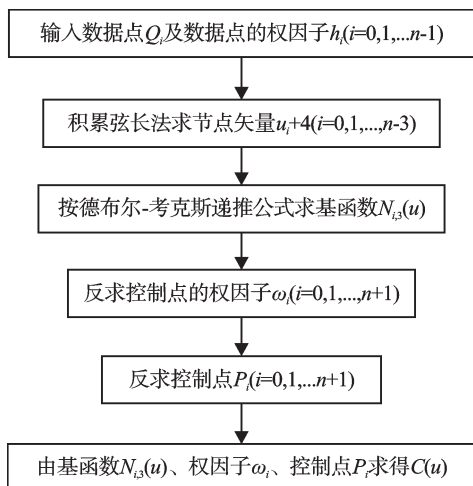


图1 三次NURBS曲线的流程图

2 伸缩吊臂局部稳定性的有限元分析

汽车起重机伸缩吊臂其结构属于一种薄板结构,其局部稳定性是利用最小势能原理^[12]导出单元的平衡方程式。经组装后,可得到整体平衡式为:

$$(K + K_\sigma)\delta = 0 \quad (9)$$

式(9)中,系数矩阵一般是非奇异的,只有零解; $\delta = 0$,表示板受中面力作用的平衡是稳定的平衡。若将中面力按比例增加 λ 倍,则单元刚度矩阵以及整体的几何刚度矩阵分别变为 λk_σ 和 λK_σ 。故整体平衡方程式为:

$$(K + \lambda K_\sigma)\delta = 0 \quad (10)$$

式(10)中,随着 λ 值增大到一定值,也就是载荷增大到一定值时,系数矩阵变成奇异,方程有非零解,表时结构丧失稳定性。因而,求解结构稳定性的临界载荷便归结为求解特征值问题,即:

$$|K + \lambda K_\sigma| = 0 \quad (11)$$

求出式(11)中的最小特征值 λ_{\min} , 则 $\lambda_{\min} F$ 便是临界载荷。

3 基于三次NURBS曲线的吊臂局部稳定性分析

3.1 使用三次NURBS曲线构造吊臂下盖板截面

在已知吊臂下盖板截面的若干数据点及其相应的权因子后,采用积累弦长法求得吊臂下盖板截面三次 NURBS 曲线的节点矢量,使用反求技术得到吊臂下盖板截面三次 NURBS 曲线的权因子及其控制点,从而构造出吊臂下盖板截面的三次 NURBS 曲线函数。

3.2 采用 APDL 编写吊臂截面程序

采用 ANSYS 自带的 APDL^[13] 命令流编写吊臂截面程序,并将吊臂下盖板截面三次 NURBS 曲线的控制点和权因子作为控制变量,设置循环后,可得到多种曲线形的吊臂截面。

3.3 吊臂局部稳定性分析

对每一种曲线形吊臂截面进行网格划分、加约束、加载后,进行静力分析,求解前须激活预应力选项。再进行特征值屈曲分析,得到吊臂的临界应力值。整个求解过程采用 APDL 循环程序,算出一个吊臂截面的临界应力值后,自动进行下一个吊臂截面的求解,从而可得到多种曲线形吊臂的临界应力值。

基于三次 NURBS 曲线吊臂局部稳定性分析的流程图如图 2 所示。

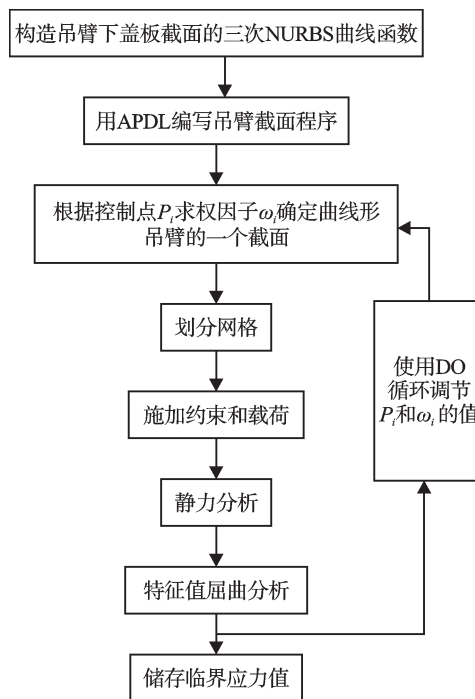


图2 基于三次NURBS曲线吊臂局部稳定性分析的流程图

4 具体算例

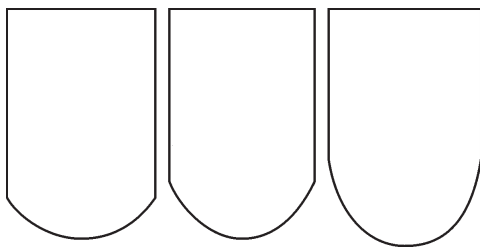
本研究采用一具体算例来进行验证。其中,各参数如下:伸缩吊臂截面中面尺寸的高为0.836 m,宽为0.542 m,吊臂长为0.558 7 m,吊臂上部的板厚0.007 m,下部的板厚0.009 m,断面内力: $M_x=1.5 \times 10^6 \text{ N}\cdot\text{m}$, $M_y=2.7 \times 10^5 \text{ N}\cdot\text{m}$, $N=3.5 \times 10^3 \text{ N}$,方向与文献[1]一致。

整个过程采用APDL控制。

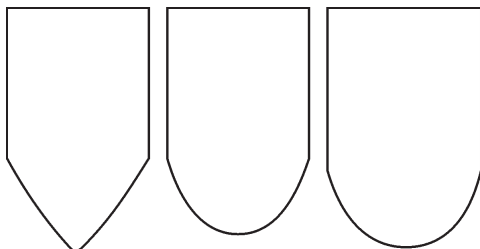
4.1 建模

用APDL编写其截面程序,吊臂下盖板截面曲线用三次NURBS曲线函数,并将控制点 P_i 和权因子 w_i 作为参数,调节吊臂截面形状。由于吊臂截面的形状呈现对称性,因此,在调节一个控制点 P_i 或者权因子 w_i 时,也要同样大小地调节吊臂截面对称的另一侧控制点 P_j 或者权因子 w_j 。

控制点 P_0 和 P_4 同时取0.465、0.565和0.665时,吊臂截面的变化情况如图3(a)所示。权因子 w_1 和 w_3 同时取0.1、0.55和1时,吊臂截面的变化情况如图3(b)所示。



(a) 伸缩吊臂截面随着控制点 P_i 变化



(b) 伸缩吊臂截面随着权因子 w_i 变化

图3 伸缩吊臂截面变化图

4.2 划分网格

选取ANSYS单元库中的壳单元SHELL63,进行网格划分,得到有限元模型。

4.3 约束和载荷

对模型进行加载和约束。曲线形吊臂的约束载荷图和曲线形吊臂的一阶屈曲模态如图4所示。图4中显示受压力大的一侧腹板发生屈曲,与实际相符。

4.4 求解结果

本研究对此先进行静力分析,再进行特征值屈曲分析,获得特征值屈曲解及其屈曲模态后得出其局部稳定性临界应力值。

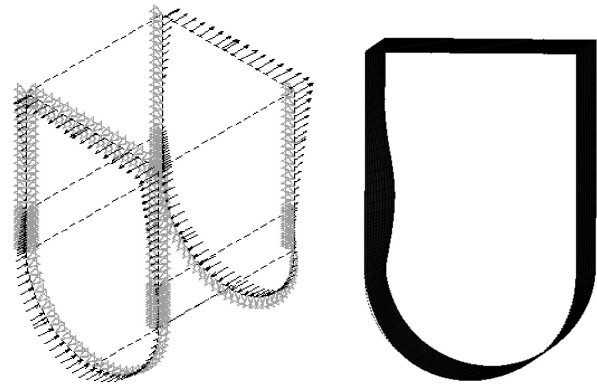


图4 曲线形吊臂约束载荷及一阶屈曲模态

部分程序如下:

```

/PREP7
ET,1,SHELL63           !定义壳单元
.....                !NURBS曲线建模
*do,P0y,0.645,0.465,-0.02 !设置控制点循环
*do,W1,0.1,1,0.1       !设置权因子循环
.....
pstres,on              !打开预应力
ANTYPE,0               !静力分析
.....
ANTYPE,1               !屈曲分析
BUCOPT,LANB,1,0,0,
MXPAND,1,0,0,1,0.001,
.....
*GET,R,MODE,1,FREQ    !提取特征值
.....

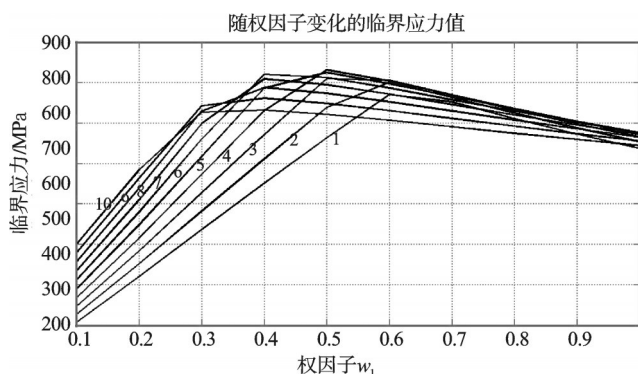
```

4.5 结果分析

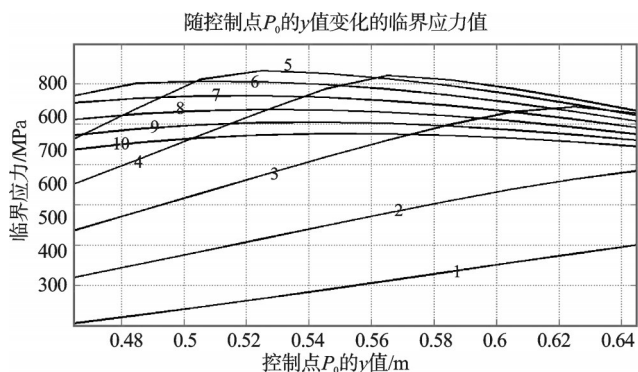
本例通过调节吊臂下盖板截面端点处控制点 P_0 的纵坐标 y 值和吊臂下盖板截面曲线1/4处的权因子 w_1 ,得出曲线形吊臂局部稳定性临界应力。固定控制点 P_0 的一个纵坐标 y 值($y=0.465, 0.485, 0.505, \dots, 0.645$),调节权因子 w_1 ($w_1=0.1, 0.2, 0.3, \dots, 1$),得到临界应力随权因子 w_1 变化的线图。编号1,2,3, ..., 10对应 y 值为0.465,0.485,0.505...,0.645时的临界应力变化情况如图5(a)所示。

固定权因子 w_1 的一个值($w_1=0.1, 0.2, 0.3, \dots, 1$),调节控制点 P_0 的纵坐标 y 值($y=0.465, 0.485, 0.505, \dots, 0.645$),得到临界应力随控制点 P_0 的纵坐标 y 值变化的线图。编号1,2,3, ..., 10对应 w_1 取0.1,0.2,0.3...,1时的临界应力变化情况如图5(b)所示。

为了进行相关的对比,本研究还算出了六边形和十二边形在实际载荷下的临界应力值。其载荷计算和加载方式采用曲线形吊臂的方法,同样是受压力大的一侧腹板发生屈曲。



(a) 临界应力随权因子 w_i 变化的线图



(b) 临界应力随控制点 P_0 纵坐标 y 值变化的线图

图5 临界应力随权因子 w_i 和控制点 P_0 纵坐标 y 值变化线图

将六边形吊臂的临界应力、十二边形吊臂的临界应力和曲线形吊臂的最大临界应力进行比较。可得的临界应力值,以及从六边形到十二边形,再到曲线形,吊臂局部稳定性的提高程度如表1所示。

表1 3种吊臂的局部稳定性临界应力对比

截面形式	求解方法	临界应力/MPa	相对差值/(%)
六边形	有限元法	604.695	
十二边形	有限元法	745.395	23.27
曲线形	有限元法	831.656	11.57

通过该算例可以得出结果:

(1) 从表1可知,吊臂截面从六边形到十二边形,再到曲线形,吊臂的局部稳定性逐渐提高。

(2) 吊臂下盖板截面曲线权因子对局部稳定性的影响。从图5(a)可知,权因子 w_i 取0.5左右时,即 w_i 取中间值时,吊臂的局部稳定性达到最好。

(3) 吊臂下盖板截面曲线控制点对局部稳定性的影响。从图5(b)可知,控制点 P_0 的纵坐标 y 取中间偏大值,即腹板高度取吊臂高度的一半偏大值时,吊臂的局部稳定性达到最好。

5 结束语

本研究采用计算机图形学中的三次NURBS曲线建立了汽车起重机的吊臂截面模型,利用有限元方法对其吊臂进行了局部稳定性分析,并采用ANSYS中的APDL语言对该吊臂的建模和分析进行控制,通过调节吊臂下盖板截面三次NURBS曲线的控制点和权因子,构造出任意曲线形状的吊臂截面,再对吊臂进行静力分析和屈曲分析,得到临界应力值的变化规律,获得了能够提高曲线形吊臂局部稳定性的吊臂截面;并将其与六边形吊臂和十二边形吊臂的临界应力值进行了对比,得出了汽车起重机曲线形吊臂局部稳定性更好的结论。

上述研究方法具有较强的实际应用价值,为曲线形吊臂的局部稳定性研究开辟了一条新道路。

参考文献 (References):

- [1] 孙在鲁,陈佳伟. 箱形伸缩臂腹板局部稳定性临界应力的计算[J]. 工程机械,1980(12):14-24.
- [2] 孙在鲁,陈佳伟,周莉珍,等. 关于八角形臂的探讨[J]. 建筑机械,1982(1):10-18.
- [3] 孙在鲁. 大圆角吊臂腹板局部稳定性临界应力的计算[J]. 工程机械,1982(2):12-21.
- [4] 纪爱敏,张培强,彭 铎,等. 起重机伸缩吊臂局部稳定性的有限元分析[J]. 农业机械学报,2004,35(6):48-51.
- [5] 牟瑞平,张 硕. 起重机伸缩臂局部稳定性研究[J]. 建筑机械,2009(2):78-80.
- [6] 齐 成,屈福政. 伸缩臂腹板局部稳定性计算方法研究[J]. 建筑机械化,2011,32(1):56-58
- [7] PIEGL L, TILLER W. The NURBS Book[M]. 2nd ed. New-York:Springer, 2010.
- [8] 施法中. 计算机辅助几何设计与非均匀有理B样条[M]. 北京:高等教育出版社,2001.
- [9] 叶 丽,谢明红. 采用积累弦长法拟合3次NURBS曲线[J]. 华侨大学学报,2010,31(4):383-387.
- [10] 韩庆瑶,董云凤,师向红. 三次NURBS空间曲线的插值研究[J]. 煤矿机械,2007,28(1):44-46.
- [11] 隆 强,谢延敏,杨 川. 基于Foley参数法反算三次NURBS曲线的算法研究[J]. 机械,2012,39(7):5-8,40.
- [12] 徐芝纶. 弹性力学(下册)[M]. 北京:高等教育出版社,1985.
- [13] 奎曙光,谢桂兰. ANSYS操作命令与参数化编程[M]. 北京:机械工业出版社,2004.

[编辑:罗向阳]