

# 多边形臂架在高空作业平台中的结构设计与优化研究

郑波 田超 何霖鹏

湖南中联重科高空作业机械有限公司, 湖南 长沙 410000

**[摘要]**臂架作为高空作业平台的核心部件,关系到平台的工作稳定性与负载能力,设计力学性能优、重量轻的臂架结构,能够显著提高高空作业平台的作业性能与安全性。本文通过参数优化与有限元分析验证,提出了一种多边形臂架的设计与优化方案。分析与验证结果表明,本文提出的多边形臂架方案,在减轻重量的同时,抗弯性能、稳定性方面优于矩形臂架和传统的U形臂架。

**[关键词]**高空作业平台;多边形臂架;结构优化;稳定性

DOI: 10.33142/ec.v7i12.14554

中图分类号: TH122

文献标识码: A

## Research on the Structural Design and Optimization of Polygonal Arm in High-altitude Work Platforms

ZHENG Bo, TIAN Chao, HE Jipeng

Hunan Zoomlion Access Machinery Co., Ltd., Changsha, Hunan, 410000, China

**Abstract:** As the core component of high-altitude work platforms, the boom is related to the stability and load capacity of the platform. Designing a boom structure with excellent mechanical performance and light weight can significantly improve the operational performance and safety of high-altitude work platforms. This article proposes a design and optimization scheme for a polygonal boom through parameter optimization and finite element analysis verification. The analysis and verification results show that the polygonal arm scheme proposed in this paper is superior to rectangular arm and traditional U-shaped arm in terms of bending resistance and stability while reducing weight.

**Keywords:** high-altitude work platforms; polygonal arm frame; structural optimization; stability

### 引言

在现代化场馆建设、桥梁维修、室内装饰及化工厂反应釜检修等领域;高空作业平台已逐步取代传统脚手架;成为保障操作者安全、提升施工效率及降低风险的关键设备<sup>[1]</sup>。臂架作为高空作业平台的核心部件;其力学性能严重影响高空作业平台的作业高度、跨距及稳定性。

矩形臂架由四块矩形截面平板通过精密拼焊工艺构成,由于其制作方便且具有较好的抗弯与抗扭刚度,早期为各类重型作业机械的首选结构。然而四板拼焊矩形臂架在角焊缝区域常面临应力集中的问题,作业时焊缝位置受力大,降低了结构的性能上限,严重影响了整体结构的耐久性和安全性<sup>[2-4]</sup>。为解决这一问题,设计人员提出了多边形臂架的结构形式,有效改善了其焊缝应力的集中现象。而随着技术进步与市场需求的进化,高空作业平台的设计作业高度、跨距在不断提升,并且对于其轻量化要求也越来越高。此背景下,设计人员对多边形臂架的结构形式进行研究,各种不同形状的多边形臂架也被投入到新产品的使用上。国内外学者与设计人员通过理论计算、有限元分析与试验验证等手段,为多边形臂架的结构设计与优化提供了坚实的理论基础和实践支持,王振兵<sup>[5]</sup>等使用有限元法,对伸缩臂式履带起重机的臂架截面进行优化,提出了

一种抗屈曲能力更强的椭圆形截面; Gašić, M. M.<sup>[6]</sup>基于拉格朗日乘数法和差分进化算法,对汽车起重机的臂架截面进行几何参数的优化分析;李前进<sup>[7]</sup>运用 ANSYS 软件的优化程序,选用零阶优化算法对臂架结构进行优化计算,实现了结构轻量化的目标。

在进行高空作业平台臂架结构设计的过程中,相较于其他起重机构,需要考虑更为复杂的作业工况及载荷组合。目前,国内外高空作业平台的臂架结构,特别是臂架截面的形状仍在不断迭代发展,如何有效优化臂架的设计与制造工艺,缓解焊缝处的应力集中问题,提升结构整体的力学性能,延长设备的使用寿命等是设计与制造人员所关注重要议题。

### 1 多边形臂架结构设计原理

多边形臂架的设计理念结合考虑了结构强度与材料利用效率。采用多边形截面形式,通过调控其边数与角度,能够显著提高臂架结构的抗屈曲能力。在确保臂架具备足够强度与刚度的前提下,多边形的截面形状能够最大化的节约材料,从而达成了轻量化设计的核心目标。此外,此类截面能够更合理地分配和传递应力,避免应力集中现象的发生,并显著减少结构的变形情况,进而确保了臂架结构的整体稳固性与耐用性。

### 1.1 抗弯模量的积分计算

抗弯模量是衡量臂架抗弯能力的关键参数,通常通过对臂架截面进行积分运算来计算得出。抗弯模量的公式如下,计算原理图如图1所示:

$$I = \int_A y^2 dA \quad (1)$$

在该公式中,  $I$ 表示抗弯模量,  $A$ 是截面面积,  $y$ 是截面上各点到中性轴的距离。计算所得的抗弯模量越大,表示抗弯性能越好,臂架在承受弯矩时的变形越小。在设计阶段,抗弯模量的计算结果可以为优化臂架截面形状和材料分布提供依据,从而确保臂架能够承受较大负载并减少变形。

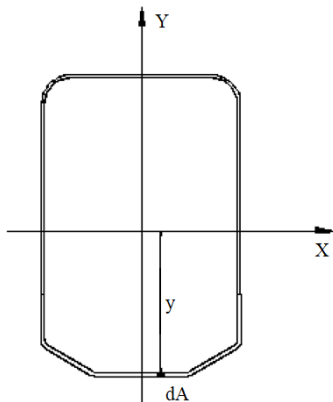


图1 积分计算抗弯模量的示意图

### 1.2 多边形臂架垂向挠度分析

垂向挠度是指在载荷作用下,多边形臂架沿垂直方向的变形量。若臂架的垂向挠度过大,将直接影响平台的稳定性,甚至可能危及作业人员的安全。可以通过以下公式来计算垂向挠度:

$$\delta = \frac{FL^3}{3EI} \quad (2)$$

在该公式中,  $\delta$ 表示垂向挠度,  $F$ 为施加的载荷,  $L$ 为臂架的长度,  $E$ 为材料的杨氏模量,  $I$ 为抗弯模量。垂向挠度与臂架的长度、载荷以及材料的刚度密切相关。通常情况下,随着臂架的长度增加或负载增大,垂向挠度会显著增加,尤其是在长臂架的情况下,变形会更加明显。过大的垂向挠度会导致臂架的稳定性不足,从而影响作业平台的安全性,因此需要保证垂向挠度在合理范围内。在臂架截面设计时,需要分析不同截面的垂向挠度,并根据分析结果进行适当的优化设计,从而提高臂架的稳定性。

## 2 多边形臂架的优化

与同重量的矩形臂架相比,多边形臂架抗弯模量更高,变形量更小,故其具有更强的刚度与抗屈曲能力。在进行多边形臂架截面设计时,通过优化截面形状,能在较大的负载下保持结构的稳定性,从而确保在恶劣工况下不发生变形或失稳现象。本文提出一种异形截面多边形臂架的设计方案,在提高臂架承载能力的同时,还降低了在高负载下发生损坏的风险。

### 2.1 多边形臂架截面设计优化

根据臂架伸缩的特点,滑块一般布置在截面刚度最大的位置。传统的多边形臂架由上下两块折弯件对扣而成,臂架中滑块位置与非滑块位置的板厚分布一致。为解决滑块接触区挤压应力较大的问题,普遍采用增加整体板厚的方法,从而导致臂架较重。本方案将臂架分为四部分,顶部折弯件、底部折弯件与左右两侧腹板,根据抗弯模量计算公式,为提高臂架垂向刚度,顶部折弯件和底部折弯件宜采用厚板;同时为减轻重量,两侧腹板宜采用薄板。针对大截面臂架,薄腹板存在局部屈曲失稳的风险,因此对薄腹板采用折弯凸台的方式进行局部加强,提高局部的刚度。上述由顶部折弯件、底部折弯件和腹板折弯件组成的多边形臂架即本方案所述的异形截面多边形臂架,如图2。

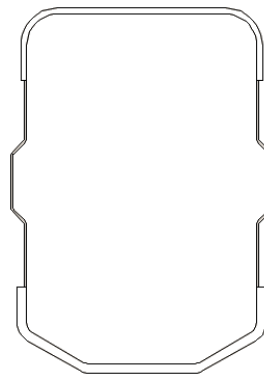


图2 多边形截面臂架示意图

### 2.2 多边形臂架截面参数优化

根据伸缩臂架工作时的受力特点,臂架底板折弯件受力最大。因此对底板折弯件进行结构优化分析,一方面提高臂架的刚度和强度,另一方面减少臂架的整体重量。如图3所示,在高度和宽度受到限制的前提下,假设截面积相等,  $h_1$ 与  $h_2$ 之和不变,底板折弯件的最小厚度变化如下:  $L_2$ 不变时,角  $A$ 增加,  $h_2$ 减小,  $h_1$ 增加,第二截面的厚度增加;角  $A$ 不变时,  $L_2$ 增加,  $h_2$ 减小,  $h_1$ 增加,第二截面的厚度增加。臂架底板的厚度增加,臂架的垂向屈曲性能增强、垂向挠度减小、局部挤压应力变小。在满足臂架性能的前提下,选择合适的底板折弯件的厚度能够实现减重。

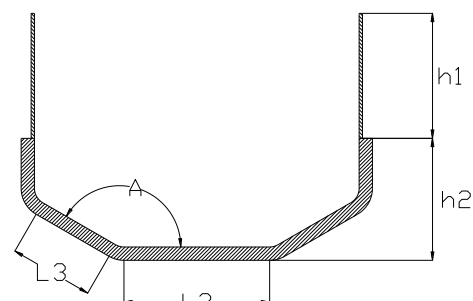


图3 底板的截面示意图

以底板角度 A 为研究对象,可得角度 A 的变化对截面性能、重量和屈曲性能的影响如下图 4 所示。在板厚确定时,随着底板夹角 A 的增加,面积先减少后增加,即重量先减少后增加;随着底板夹角 A 的增加垂向惯性矩  $I_y$  和侧向惯性矩  $I_z$  均增加,即臂架垂向挠度和侧向挠度均减小;随着底板夹角 A 的增加屈曲性能变差,屈曲性能规律是圆形>多边形>矩形,夹角越大,底边越趋近于矩形。且底板大平面越大,屈曲性能越差。

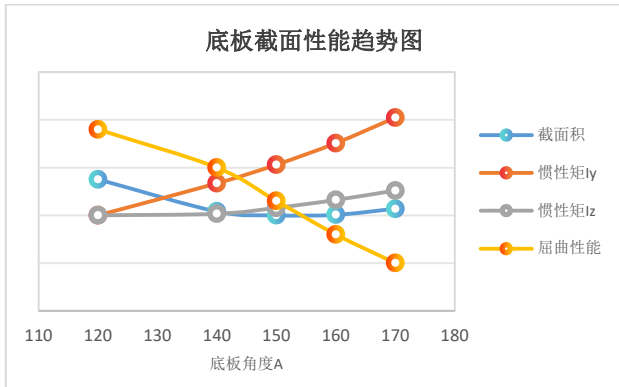


图 4 底板截面性能趋势图

同理,底板的长度  $L_2/L_3$  比值对底板的影响如下:根据惯性矩计算公式,底板的  $L_2$  越长,截面惯性矩越大,臂架垂向挠度变好;底板的  $L_2$  越长,底板屈曲性能越差;底板的  $L_2$  越长,底板面积越大,重量越大;底板的  $L_2$  加长会造成  $L_3$  变短, $L_3$  的极限长度不能短于滑块的宽度,否则无法布置滑块。因此,底板应选择合适的折弯角度 A 和  $L_2/L_3$  比值。

### 2.3 多边形臂架的多目标优化设计

本研究在深入分析多边形臂架结构的力学特性和实际应用需求的基础上,对臂架截面进行多目标优化分析。该设计旨在同步优化臂架的重量、挠度控制及抗失稳性能三大关键指标,确保结构的安全稳定,并达成轻量化与最佳性能的双重目标。为实现此多目标优化,本研究先确立了的优化变量系统,涵盖臂架截面厚度、底板角度 A、 $L_2$  与  $L_3$  长度比、腹板形状及厚度调整等关键参数。然后构建以最小化臂架重量、最优化挠度控制及提升抗失稳性能为目标的函数模型,此模型综合考虑各变量对性能的影响及其相互关系,通过优化迭代算法,寻求最佳参数组合,以实现臂架结构的综合性能最优。

$$\min f(x) = [f_1(x), f_2(x), f_3(x) \dots f_n(x)] \quad (3)$$

$$g_k(x) = 0; h_l(x) \leq 0, x \in \Omega \quad (4)$$

其中:  $x = (x_1, x_2, \dots, x_n)$  ——决策变量向量;

$f_i(x)$  ——第  $i$  个目标函数;

$g(x), h(x)$  ——不等式,等式约束;

$\Omega$  ——可行解空间。

基于上述函数,采用线性规划进行求解。将多目标问题转化为单目标问题,通过线性组合各个目标函数,寻找使总目标函数最优的解。在兼顾各个目标性能要求的同时,寻找最接近理想点的非支配解。对于最小化目标,加入上界作为限制条件;对于最大化目标,加入下界作为限制条件。针对求解结果,利用有限元分析进行验证。

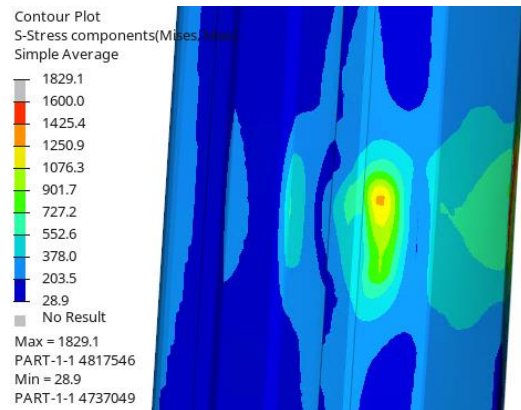
### 3 有限元计算结果及分析

通过多目标优化分析,底板夹角优选为  $135 \sim 165^\circ$ ,在该范围下臂架的重量、性能之间最佳,更优选地角度为  $150 \sim 160^\circ$ 。底板长度  $L_2/L_3$  比值在  $1 \sim 3$  之间,在该范围下臂架的重量、性能之间最佳,更优选地比值为  $1.5 \sim 2$ 。

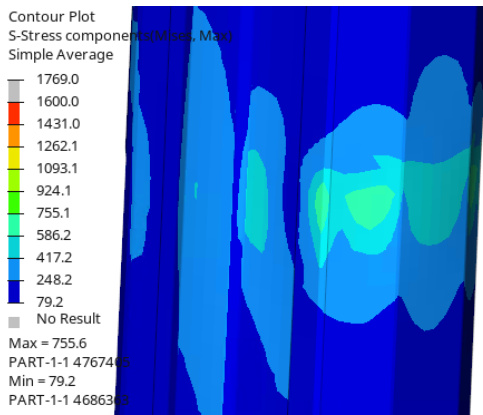
为验证本文所设计的多边形臂架性能,分别建立不同截面臂架的有限元模型,臂架单元类型为壳单元,单元尺寸不大于  $50\text{mm} \times 50\text{mm}$ ;滑块采用体单元建模,并与臂架设置接触关系。在某正常作业工况与载荷条件下,分析有限元计算结果,图为优化前后臂架某相同位置 Von Mises 应力云图,表 1 为应力值具体对比。图 5 反映出优化前臂架存在比较严重应力集中现象,优化后应力集中区域基本消失,并且根据几个点位的应力值对比,也可以发现,在对结构进行优化后,整体应力水平大幅下降。

表 1 优化前后各点位 Von Mises 应力值对比

位置	点位	优化前 Von Mises 应力值	优化后 Von Mises 应力值	差值 (%)
一节臂	点位一	1267.6	952.0	33.1
	点位二	1018.8	920.2	10.7
	点位三	762.5	750.1	1.7
二节臂	点位一	1062.1	812.7	30.7
	点位二	813.4	755.5	7.6
	点位三	556.3	521.9	6.6
三节臂	点位一	800.8	732.1	9.4
	点位二	704.6	692.1	1.8
	点位三	519.1	513.3	-1.1



(a) 优化前



(b) 优化后

图5 优化前后臂架某相同位置 Von Mises 应力云图

#### 4 结论

(1) 采取本文提出优化方法对异形多边形臂架截面进行优化,能够在保证轻量化的同时,有效降低臂架部分区域的应力集中现象,显著提高臂架的刚度与强度,为高空作业平台臂架结构提供了新的设计思路。

(2) 本文提出的方法基于特定目标形状的多边形臂架,对于其他异形臂架截面形状优化方法,还有待后续进一步研究。

#### [参考文献]

- [1]赵腾,王元强,吉江峰.高空作业平台发展现状探究[J].建筑机械技术与管理,2020(1):97-98.
  - [2]姚峰林,丁凡志,杨旭,等.焊接残余应力对实腹式伸缩臂架稳定性影响[J].起重运输机械,2024(18):46-51.
  - [3]孙在鲁.箱型伸缩臂腹板局部稳定临界应力的计算[J].工程机械,1980(12):14-23.
  - [4]白艳强.起重机箱型伸缩臂滑块处局部应力分析[D].山西:太原科技大学,2021.
  - [5]王振兵,李艾民.100t 伸缩臂履带式起重机臂架结构设计和优化分析[J].计算机辅助工程,2012,21(4):4.
  - [6]Gaši MM, Savkovi MM, Bulatovi RR, et al. Optimization of a pentagonal cross section of the truck crane boom using Lagrange's multipliers and differential evolution algorithm[J]. Meccanica, 2011, 46(4): 845-853.
  - [7]李前进,张胜利,等.高空作业车臂架轻量化设计与改进[J].建筑机械化,2019(3):23-25.
- 作者简介:郑波(1989.3—),男,学历:硕士研究生,毕业院校:湖南大学,所学专业:机械工程,目前职称:工程师,目前就职单位:湖南中联重科高空作业机械有限公司。