

安徽建筑工业学院

毕 业 设 计 （ 论 文 ）

专 业 机械设计制造及其自动化

班 级 06机械（4）班

学生姓名 张 成 文

学 号 06210010437

课 题 塔式起重机的吊臂设计

指导教师 潘 友 杰

2010 年 6 月 1 日

安徽建筑工业学

摘 要

依据GB/T13752-92《塔式起重机设计规范》,用多跨连续外伸梁结构方式,以塔机单吊点水平起重臂作为研究对象,分析了其在各种载荷作用下起升平面内受力情况,根据臂架的工作特点和性能要求,对吊点位置和型钢合理优化设计,建立了臂架控制截面应力分布最均衡和臂架最轻的结构优化数学模型,编制了臂架结构应力计算过程,选取不同的校核段进行了详细计算,并将校核段的不同选择对计算结果的影响进行了对比分析.计算表明合理优化设计后典型工况下臂架各危险截面的应力分布和臂架重量均能够使设计的塔式起重机吊臂结构优、材料省、可靠性高。

关键词 起重臂 优化设计截面 校核

Abstract

Based GB/T13752-92 "tower crane design",with multi-span continuous beam structure extended approach to single-tower suspension points and the boom for the study,analyzed the various loads in lifting plane within the force,according to arm work characteristics and performance requirements,right lifting positions and optimal design of steel and reasonable to establish the stress distribution in the control section boom and jib the most balanced lightest structural optimization model is developed arm structural stress calculation,select a different section of a detailed calculation of check,and check the different options section of the calculation results were compared.calculations show that

the optimal design of a reasonable condition after the boom of the dangerous section of typical stress Boom weight distribution and are able to make the design of the tower crane boom structure of good, materials provinces, and high reliability.

Key words : boomoptimaldesign section **Checking**

目 录

摘要	
Abstract	
第 1 章 绪 论	
1.1 本论文的背景和意义	
1.2 本论文的主要方法 and 研究进展	
1.3 本论文的主要内容	
第二章 塔机小车吊臂设计	
2.1 吊臂的主要结构形式及主要尺寸	
2.1.1 吊臂的主要材料	
2.1.2 吊臂的机构形式	
2.1.3 吊臂的尺寸	
2.1.4 吊点位置的确定	
2.1.5 吊臂运输单元划分	
2.2 吊臂计算简图、载荷、内力计算及在和组合	
2.2.1 吊臂自重小车及变幅机构引起的内力	

2.2.2	吊重引起的内力	.....
2.2.3	水平反力HA(HB)产生的偏心弯矩	.....
2.2.4	风载引起的内力	.....
2.2.5	回转水平惯性力	.....
2.2.6	起升绳牵引力产生的轴心压力	.....
2.2.7	小车轮压产生下弦局部弯矩	.....

目 录

2.3	吊臂截面的选择计算	.....
2.3.1	吊臂的几何特征尺寸计算	.....
2.3.2	整体稳定性的计算	.....
2.3.3	单肢(上、下弦杆)验算	.....
2.3.4	缀条的计算	.....
2.3.5	整体强度计算	.....
设计总结		.....
课题展望		.....
致谢		.....
参考文献		.....
附录一：开题报告		.....
附录二：任务书		.....

第1章 绪论

1.1 本论文的背景和意义

我国塔式起重机五十年代初开始起步,经过四十多年的发展,与国外的差距已大大缩小,并已成为生产塔式起重机大国。但在总体性能、质量、可靠性方面还存在着较大差距。

(1)在产品品种方面:大型、特大型塔机短缺,中、小型品种过剩,并急需更新换代。(2)在产品性能方面:智能化、数字化控制技术差距很大,跟不上市场需求,可靠性差,事故率较高。(3)在试验手段方面:试验手段差,多数厂家不具备对原材料的预处理和配套件进厂检验的能力。(4)在产品结构方面:45tm 以下的小型塔机产量高、但性能差、更新换代周期长。(5)配套件生产方面:企业多,品种重复,生产质量差,直接影响到主机的质量和可靠性。

我国“九五”和“十五”规划都是一个高速发展的规划,将要制订的“十一五”规划会作一些调整,但总的发展速度不会减慢。因此在今后一段的时间里,我国塔式起重机仍处于兴旺时期。根据我国塔式起重机的发展形式和市场需求,在产品品种方面预计今后几年塔式起重机要向大型化(1000tm) 以上的和小型化(40tm)以下的发展;在技术性能方面要向产品智能化、数字化和机一电一液一体化方向发展;在结构型式方面要发展一机多用的塔机,如:吊重、布料、高空作业集为一体等;要加大力度研究解决高性能、高技术含量、高可靠性的塔机,最低限度降低塔机事故率。

吊臂作为起重机组成结构之一,对起重机结构性能和外观质量的改善有着很大不可忽视的作用。起重机吊臂由横截面呈三角形的多节空间刚架拼装组成.刚架由型钢焊接而成,其上弦杆为圆钢管,下弦杆为角钢焊接而成的方管,吊杆为圆钢管.吊臂可根据施工需要拼装成不同的长度,吊臂可在现场组装,运输途中可分节拆开.吊臂承受主要载荷有:

组装后吊臂的自重、拉杆的作用力、小车起吊重物的作用力以及空中风力的载荷。

塔机是各种工程建设中广泛应用的重要起重设备，吊臂作为塔机金属结构的主要部件，其设计计算方法将直接影响整台塔机的设计质量和塔机运行的安全可靠。而随着塔机向大型、重载和超高超长的方向发展，吊臂的设计尤其显得重要。

1.2 本论文的主要方法和研究进展

本论文仍是主要用传统方法进行设计：(1)依据设计要求以及GB/T13752—99《塔式起重机设计规范》和《起重机设计手册》设计该塔式起重机。主要包括吊臂的结构选型、载荷计算、稳定性计算等；(2)以吊臂的某一段作为研究对象，进行稳定性分析，据钢结构设计规范中双向格构式压弯构件的稳定性来确定截面的高度，使计算中的受力分析更加符合实际工况；(3)用AutoCAD 设计出吊臂的二维图，并标注所有尺寸。

1.3 本论文的主要内容

本论文即是吊臂设计的内容主要包括吊臂的结构选型、载荷计算以及强度、刚度、稳定性校核等。

第二章塔机小车吊臂设计

2.1 吊臂的主要结构形式及主要尺寸

2.1.1 吊臂的主要材料

上弦杆 16Mn

下弦杆 20

缀条 20

上弦采用16Mn 实心圆钢，其优点是：迎风阻力小，吊点构造简单，不易发生撞击变形。万一发生撞击变形，容易调整复原，实心圆钢上弦杆与腹杆连接处刚度比较好。下弦杆采用等边角钢对焊的箱形截面杆，具有良好的抗压曲性能，兼作小车轨道。

吊臂采用变截面设计，腹杆的布置方式总体采用三角式布置方式，而限于弦杆选用材料的特性，在水平桁架加设竖腹杆以增大弦杆节间的抗压弯能力。

2.1.2 吊臂的机构形式

本塔式起重机采用小车变幅，根据变力和构造等要求，吊臂结构决定采用等腰三角形截面的型式。

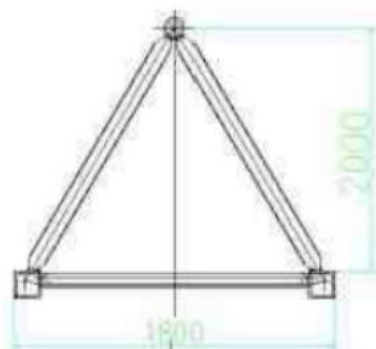
上弦杆使用16Mn 实心圆钢，下弦杆为两个箱型截面，具有良好的抗弯曲性能。每个箱型截面由两个等边角钢焊接而成，兼作小车轨道用。

臂架上设有吊点通过钢丝绳与塔帽顶部连接。为便于安装运输和组合成不同长度的臂架，将吊臂分为若干段，由根部节、端部节和若干标准节组成，各节间通过螺栓和销轴联接。

2.1.3 吊臂的尺寸

截面高度和宽度：根据强度、刚度、稳定

性以及构



造等要求来确定, 对于本设计中的三角形截面的吊臂, 截面高度 $h=(1/50\sim 1/25)L$, 截面宽度 b 应与上塔身宽度配合, 截面简图见图2-1。

吊臂要求:

$$h=2m \quad (h/L=1/35)$$

$$b=1.8m$$

图 2-1

2.1.4 吊点位置的确定

确定吊点位置的原则: 当小车行驶到吊臂端部时, 在吊点处桁架弦杆中产生的最大应力, 于小车行驶到吊点内跨中某处时, 该处桁架弦杆中的最大应力值相等的等强度或等稳定条件。桁架水平式吊臂拉杆吊点可以设在上弦或下弦, 今从减小臂端垂度出发, 吊点设在上弦。

臂架总长 $L=70m$, 采用单吊点结构。取 $L_2/L_1=0.4$, 见图2-2。

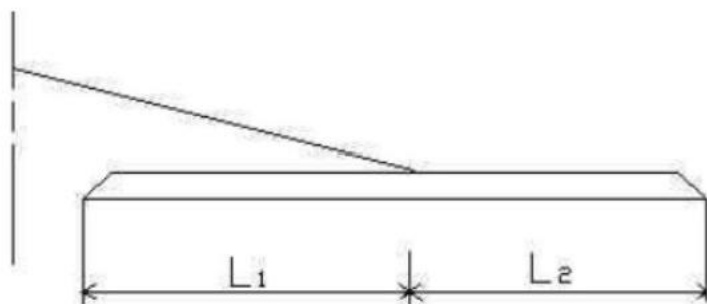


图 2-2

2.1.5 吊臂运输单元划分

考虑到安装运输条件及材料长度的限制, 通常将吊臂做成若干节段(运输单元), 各节段在工厂做好后运到工地, 在工地上再用销轴连接。本设计将吊臂划分为八个运输单元, 起分节尺寸见图2-3。

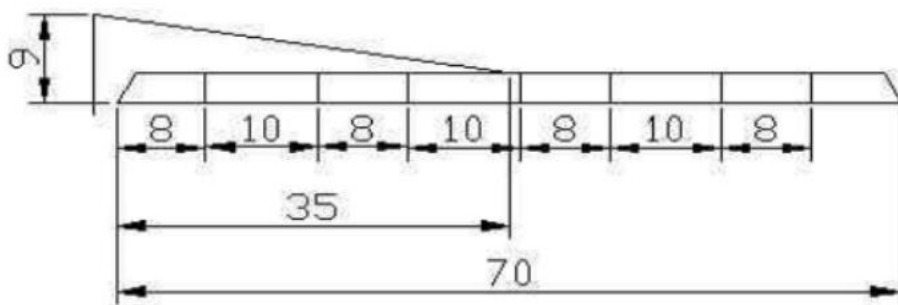


图2-3

吊臂自重 16800 Kg

蝙蝠机构重 330 kg

力矩传感器及装置 10 kg

$ZG=16800+330+10=17140$ kg

2.2 吊臂计算简图、载荷、内力计算及在和组合

(1) 计算简图：在起升平面内，吊臂可作为伸臂梁计算；

在回转平面内，吊臂可视为悬臂梁计算。

载荷组合：自重+吊重+工作状态风载(风向垂直吊臂)+其它惯性力。

计算中忽略离心力等影响，因塔式起重机工作级别为A4

故不验算钢结构的疲劳强度。

(2) 计算工况：

① 在最大幅度起吊额定载荷，风向垂直吊臂，计算吊点 截面和臂架根部截面内力。
即70m, 吊重3.3t, 作用点C。

② 在跨中位置起吊额定载荷，风向垂直吊臂，计算跨中载荷内力，即幅度16m, 吊重12t, 作用点D。

③ 在最小幅度起吊额定载荷，风向垂直吊臂，计算臂架根部截面内力，即幅度3m, 吊重12t, 作用点E。

(3) 计算截面：

① 臂架根部截面A点，该处起升平面内 $M_x=0$ ，但在回转平面内的弯矩 M_y 最大。

② 臂架吊点截面B点，该处起升平面内负弯矩最大。

③臂架跨中截面D点，该处起升平面内正弯矩最大。

2.2.1 吊臂自重小车及变幅机构引起的内力

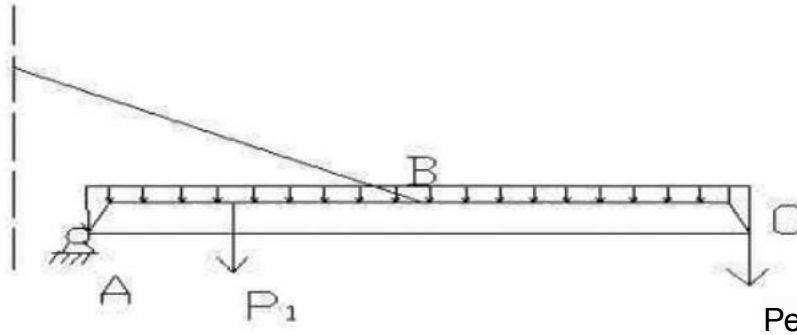


图2-4

先假设吊臂自重为均布载荷 $q=2352\text{N/m}$ ，小车变幅机构自重 $P_1=3243\text{N}$ ，感应装置 $P_2=98\text{N}$ ，吊臂所受载荷如图2-4所示。

$$\sum M_A(F) = 0, M_A(F) = F_B \sin \theta \times 35 + F_B \cos \theta \times 2 - \frac{qL^2}{2} - P_1 \times 8 - P_2 \times 70 = 0$$

拉杆拉力 $F=683711\text{N}$,

$$V_6 = F_2 \sin \theta = 127170\text{N},$$

$$H_4 = 672088\text{N}$$

$$\sum F_1 = 0, A \text{点支反力 } V_6 = qL + P + P_2 - V_0 = 40802\text{N}$$

$$\text{剪力 } Q = 40802\text{N}, Q_0 = 40802 - 3234 - 2352 \times 16 = -64\text{N}$$

$$\text{弯矩 } M = 40802 \times 16 - 16 \times 2352 \times 8 - 3234 \times 8 = 325904\text{N} \cdot \text{m}$$

$$M_{\text{右}} = 2352 \times 35^2 / 2 + 98 \times 35 = 1444030\text{N} \cdot \text{m}$$

2.2.2 吊重引起的内力

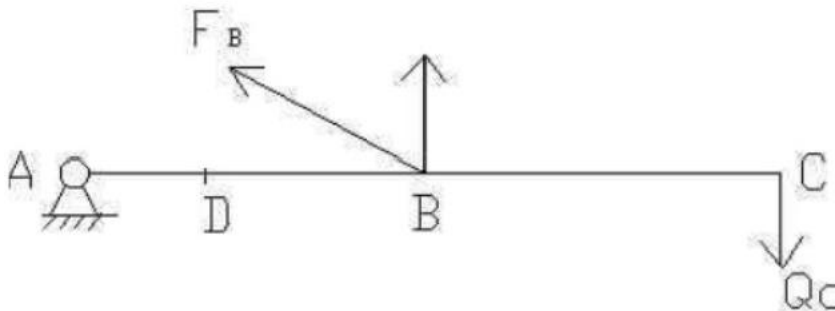


图2-5

工况1: $R=70\text{m}$, $Q=3.3\text{t}$, 吊具重 $q=2\%Q=66\text{kg}$, 起重小车 $q_2=0.4\text{t}$, $V_1=0.8\text{m/s}$, 吊臂

所受载荷如图2-5所示。

起升动载系数 $\phi_2=1.05+0.4(V_1-0.02)=1.29\text{m/s}$

$$Q_c=\phi_2(Q+q_1)g+q_2g=1.29\times(3300+66)\times9.8+400\times9.8=46473\text{N}$$

$$ZM_4=0, V_4\times35+Q_c\times35=0.$$

$$V_4=-46473\text{N}$$

$$ZF_1=0, V_0+V-Q_c=0.$$

$$V_6=92946\text{N},$$

$$H_4=491313\text{N}$$

$$F_8=49957\text{N}$$

剪力 $Q_m=46473\text{N},$

$$Q_x=46473\text{N}$$

弯矩 $M_1=-Q_c\times L/2=-46473\times35\text{N}\cdot\text{m}=-1626555\text{N}\cdot\text{m}$

$$M_0=-46173\times16\quad\text{N}\cdot\text{m}=-743568\quad\text{N}\cdot\text{m}$$

轴力 $N_m=-491317\text{N}$

$$N=0$$

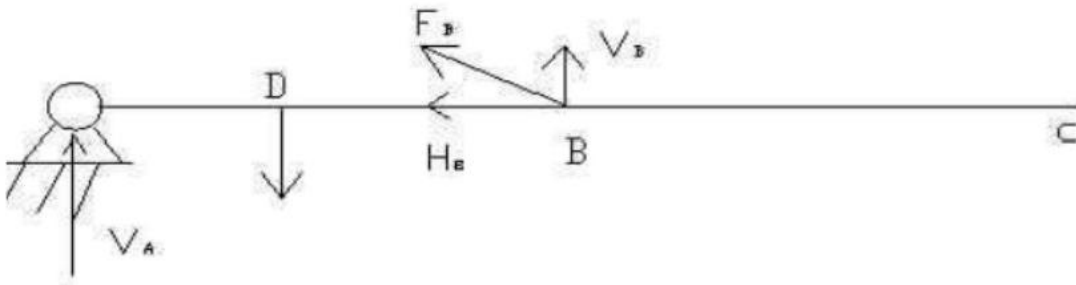


图2-6

工况2: $R=16\text{m}, Q=12\text{t}$, 吊具重 $q_1=2.5\%Q=300\text{kg}$, 起重小车 $q_2=0.4\text{t}$, 吊臂所受载荷如图2-6所示。

$$Q=\phi_2(Q+q)g+q_2g=1.29\times(12000+300)\times9.8+400\times9.8=159417\text{N}$$

$$ZM=0, Q\times(35-16)=V_4\times35$$

$$V_4=86541\text{N}$$

$$EF_7=0, V_8+V_4-Q_0=0.$$

$$V_6=72876\text{N},$$

$$H_8=385223\text{N}$$

$$F=392000\text{N}$$

$$\text{剪力 } Q=86541\text{N},$$

$$Q=-78876\text{N}$$

$$\text{弯矩 } M=86541 \times 16 \quad \text{N.m}=1384656 \quad \text{N.m}$$

$$\text{轴力 } N=-385223\text{N}$$

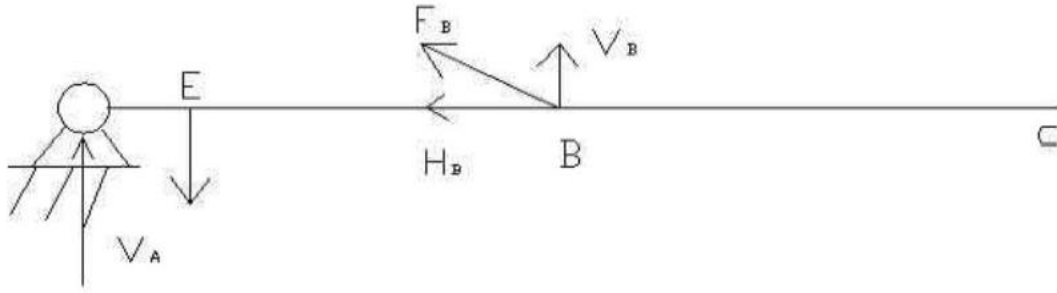


图2-7

工况3: $R=3\text{m}$, $Q=12\text{t}$, 吊具重 $q=2.5\%Q=300\text{kg}$, 起重小车 $q_2=0.4\text{t}$, 吊臂所受载荷如图2-4所示。

$$Q=\varphi_2(Q+q_1)g+q_2g=1.29 \times (12000+300) \times 9.8+400 \times 9.8=159417\text{N}$$

$$ZM_4=0, Q \times 32 - V_4 \times 35 = 0$$

$$V_4=145753\text{N}$$

$$ZF=0, V_6+V_4-Q=0.$$

$$V=13664\text{N},$$

$$H_8=72228\text{N}$$

$$F=73499\text{N}$$

$$\text{剪力 } Q=145753\text{N},$$

2.2.3 水平反力 $H_A(H_B)$ 产生的偏心弯矩

$$\text{吊臂自重} \quad \text{N.m}$$

$$M=H_8 \times 2=683711 \times 2=1344167 \quad \text{工况1:} \quad \text{N.m}$$

$$M=H_2 \times 2=491313 \times 2=982626 \quad \text{N} \cdot \text{m}$$

$$\text{工况2: } M_3=H_3 \times 2=385223 \times 2=770446$$

2.2.4 风载引起的内力

(1) 吊臂风载

风载荷计算公式

$$F_4 = C_1 P_1 A$$

按工作状态最大计算风压选 $P=250\text{Pa}$ 依据《塔式起重机设计规范》表8单片结构的风力系数 C_w , 选 $C_w=1.5$

迎风面积按结构件在与风向垂直平面上的投影面积计算

$$A = w A_1$$

式中: A — 结构的迎风面积; w — 结构充实率, 按表9选取 $w=0.3$; A_1 — 结构外形轮廓面积 $A_1=70 \times 2=140\text{m}^2$ 。

$$A = 0.3 \times 140 = 42\text{m}^2$$

$$\text{风载荷 } F = 1.5 \times 250 \times 42 = 15750 \text{ N}。$$

$$\text{均布风压 } q = F/L = 15750/70 \text{ N} = 225 \text{ N}。$$

$$\text{剪力 } Q_w = 15750\text{N}$$

$$Q_w = 225 \times (70-16) = 12150\text{N}$$

$$Q_y = 225 \times 35 = 7875\text{N}$$

$$\text{弯矩 } M_4 = 225 \times 70^2 / 2 = 551250\text{N}$$

$$M_y = 225 \times 54^2 / 2 = 328050\text{N}$$

$$M_y = 225 \times 35^2 / 2 = 137813\text{N}$$

(2) 吊重引起的风载

起吊物品的迎风面积按其实际外形尺寸在垂直风向平面上的投影计算。当迎风面积无法确定时, 作用在物品上的风载荷按额定起重量的3%计算, 沿最不利载荷组合方向水平作用于物品上, 但其值不小于500N。

$$\text{工况1: } Q=3.3\text{t}, \text{ 估算风载 } F, = 3300 \times 9.8 \times 3\% = 970\text{N}$$

$$\text{剪力AC段 } Q_x = 970\text{N}$$

$$\text{弯矩 } M_y = 970 \times 70 = 67900\text{N} \cdot \text{M}$$

$$M_y = 970 \times 54 = 52380 \text{ N} \cdot \text{M}$$

$$M_{oy} = 970 \times 35 = 33950 \text{ N} \cdot \text{M}$$

$$\text{工况2: } Q=12\text{t}, \text{ 估算风载 } F, = 12000 \times 9.8 \times 3\% = 3528\text{N}$$

弯矩 $My=3528 \times 16=56448 \quad N \cdot m$

2.2.5 回转水平惯性力

(1) 吊臂自身重量产生的回转惯性力

$$F_{\text{惯}} = \frac{G \pi n}{30gt} \cdot \frac{L + 2a}{2}$$

吊臂重 $G=17140 \times 9.8=167972N$;

塔机回转机构额定转速 $n=0.7r/min$;

回转机构起、制动时间 $t=4s$;

吊臂根部销轴中心到塔机回转中心的距离 $a=2m$ 。

$$F_{\text{惯}} = \frac{167972 \times 3.14 \times 0.7}{30 \times 9.8 \times 4} \times \frac{70 + 2 \times 2}{2} = 11616N$$

每米惯性力 $q_w=F/70=166N/m$;

剪力 $Q=11616N$

$$Q=166 \times 54=8964N$$

$$Q=166 \times 35=5810N$$

弯矩 $M_1=166 \times 70^2/2=406700N \cdot m$

$$M_0=166 \times 54^2/2=242028N \cdot m$$

$$M_4=166 \times 35^2/2=101675N \cdot m$$

(2) 吊重的惯性力

工况1: $Q_c=(3300+66+400) \times 9.8=36907N$

$$F_{\text{惯}} = \frac{F_Q n \pi R}{30gt} = \frac{36907 \times 0.7 \times 3.14 \times 70}{30 \times 9.8 \times 4} = 4829N$$

考虑其它因素 $F_m=4829 \times 1.5=7243N$ 。

剪力 $Q=7243N$

弯矩 $M_1=7243 \times 70=507010N \cdot m$

$$M=7243 \times 54=391122N \cdot m$$

$$M_4=7243 \times 35=253505N \cdot m$$

工况2: $Q=(12000+300+400) \times 9.8=124460N$

$$F_{\text{惯}} = \frac{F_Q n \pi R}{30gt} = \frac{124460 \times 0.7 \times 3.14 \times 16}{30 \times 9.8 \times 4} = 3722 \text{ N}$$

考虑其它因素 $F_{\text{惯}} = 3722 \times 1.5 = 5583 \text{ N}$

剪力 $Q = 5538 \text{ N}$

弯矩 $M_1 = 5583 \times 16 \text{ N} \cdot \text{m} = 89328 \text{ N} \cdot \text{m}$

2.2.6 起升绳牵引力产生的轴心压力

工况1: 吊重在C处

$$S_c = \frac{1}{2} \times 1.29 \times (3300 + 66) \times 9.8 = 21276 \text{ N}$$

工况2: 吊重在D处

$$S_0 = \frac{1}{4} \times 1.29 \times (12000 + 300) \times 9.8 = 38874 \text{ N}$$

2.2.7 小车轮压产生下弦局部弯矩

每一轮压为:

$$P = \frac{1}{8} \times 1.29 \times (12 + 0.3 + 0.4) = 2.048 \text{ t} = 20069 \text{ N}$$

$$Mu = 1.4P(0.86 - 0.55) - P \times 0.32 = 16196 \text{ N}$$

$$M_{\text{轮}} = \frac{2}{3} M_{\text{max}} = 10796 \text{ N}$$

2.3 吊臂截面的选择计算

2.3.1 吊臂的几何特征尺寸计算

截面A、D

上弦杆 $\phi 100, 16\text{Mn}$ 实心圆钢

$$I = \frac{\pi 10^4}{64} = 490.6 \text{ cm}^4 \quad A = \pi \times 5^2 = 78.5 \quad r = 2.5 \text{ cm}$$

下弦杆等边角钢 $L140 \times 140 \times 60, b=140 \text{ mm}, d=16 \text{ mm}$

$A = 42.539 \text{ cm}^2$, A 取的比 $2A$ 稍大为 $A_r = 2A = 86 \text{ cm}^2$

$$I_x = \frac{14^4 - (14 - 1.6)^4}{12} = 1231.2 \text{ cm}^4 \quad I_y = 1231.2 \text{ cm}^4$$

$$W_{x\text{F}} = \frac{I_x}{b/2} = \frac{1231.2}{7} = 175.9 \text{ cm}^3 \quad W_F = 175.9 \text{ cm}^3$$

$$r_{x\text{下}} = \sqrt{\frac{I_x}{A_{\text{下}}}} = \sqrt{\frac{1231.2}{85.1}} = 3.8\text{cm} \quad r_{y\text{下}} = 3.8\text{cm}$$

$$A = 78.5 + 2 \times 86 = 250.5\text{cm}^2$$

$$Y_c = \frac{78.5}{250.5} \times 200 = 62.67\text{cm}$$

$$h - Y_c = 200 - 62.67 = 137.33\text{cm}$$

$$\begin{aligned} I_x &= I_2 + (h - Y_c)^2 A L + 2 \times (I_{x\text{下}} + Y_c^2 A) \\ &= 490.6 + 137.33^2 \times 78.5 + 2 \times (1231.52 + 41^2 \times 86) = 215896\text{cm}^4 \end{aligned}$$

$$W_{x\text{上}} = \frac{I_{x\text{总}}}{h - Y_c} = \frac{215896}{137.33} = 15721\text{cm}^3$$

$$W_{x\text{下}} = \frac{I_{x\text{总}}}{Y_c} = \frac{215896}{62.67} = 34450\text{cm}^3$$

$$\begin{aligned} I_{y\text{总}} &= I_{y\text{上}} + 2 \times \left[I_{y\text{下}} + \left(\frac{b}{2}\right)^2 A_{\text{下}} \right] = 490.6 + 2 \times (1231.2 + 90^2 \times 86) \\ &= 1396153\text{cm}^4 \end{aligned}$$

$$W_{y\text{总}} = \frac{I_{y\text{总}}}{b/2} = \frac{1396153}{90} = 15513\text{cm}^3$$

构件截面对x轴回转半径

$$r_x = \sqrt{\frac{I_{x\text{总}}}{A}} = \sqrt{\frac{215896}{250.5}} = 92.84\text{cm} \quad r_y = \sqrt{\frac{I_{y\text{总}}}{A}} = \sqrt{\frac{1396153}{250.5}} = 74.66\text{cm}$$

起升平面，吊臂可看作两端简支外伸梁，其计算长度

$$L_{cx} = \mu_1 \mu_2 L$$

μ_1 —支承条件长度系数，对于两端简支构件 $\mu_1=1$;

μ_2 —变截面长度系数，参考《塔式起重机设计规范》表H4

选择 $\mu_2=1$ 。

在回转平面内，吊臂可看做悬臂梁，其计算长度

$$L_{cy} = \mu_1 \mu_2 \mu_3 L$$

μ_3 —刚拉杆对吊臂侧向位移的约束的长度影响系数，

$$\mu_3 = 1 - \frac{L_{AB}}{2L_{OB}} = 1 - \frac{35}{2 \times 37} = 0.527$$

对于悬臂构件 $\mu_1=2$;

$$\mu_i = \mu_1 L_2 H_3 = 1.054,$$

考虑实际构造情况取 $\mu^*=1.2$

臂架截面对x、y轴的长细比

$$\lambda_x = \frac{L_{cx}}{r_x} = \frac{3500}{92.84} = 37.7$$

$$\lambda_y = \frac{L_y}{r_y} = \frac{1.2 \times 3500}{74.66} = 56.26$$

吊点B处

上弦杆 $\phi 85, 16Mn$ 实心圆钢

$$I = \frac{\pi 8.5^4}{64} = 256.1 \text{ cm}^4 \quad A = \pi 4.25^2 = 56.7 \text{ cm}^2 \quad r = 4.25$$

下弦杆等边角钢 L140×140×60, b=140mm, d=16mm

$$A = 42.539 \text{ cm}^2, A_y = 86 \text{ cm}^2$$

$$I_x = 1231.2 \text{ cm}^4 \quad I_y = 1231.2 \text{ cm}^4$$

$$W_x = 175.9 \text{ cm}^3 \quad W_y = 175.9 \text{ cm}^3$$

$$r_x = 3.8 \text{ cm} \quad r_y = 3.8 \text{ cm}$$

$$A = 56.7 + 2 \times 86 = 228.7 \text{ cm}^2$$

$$Y_c = \frac{56.7}{228.7} \times 200 = 49.58 \text{ cm}$$

$$h - Y_c = 200 - 49.58 = 150.42 \text{ cm}$$

$$I_{xa} = I_x + (h - Y_c)^2 A + 2 \times (I_{yp} + Y_c^2 A_p)$$

$$= 256.1 + 150.42^2 \times 56.7 + 2 \times (1231.52 + 49.58^2 \times 86)$$

$$= 1708429 \text{ cm}^4$$

$$W_{x_{\text{上}}} = \frac{I_{x_{\text{上}}}}{h - Y_c} = \frac{1708429}{150.42} = 11358 \text{ cm}^3$$

$$W_{x_{\text{下}}} = \frac{I_{x_{\text{下}}}}{Y_c} = \frac{1708429}{49.58} = 34458 \text{ cm}^3$$

$$I_{y_{\text{总}}} = I_{y_{\text{上}}} + 2 \times \left[I_{y_{\text{下}}} + \left(\frac{b}{2} \right)^2 A_{\text{下}} \right] = 256.1 + 2 \times (1231.2 + 90^2 \times 86)$$

$$= 1395919 \text{ cm}^4$$

以上内容仅为本文档的试下载部分，为可阅读页数的一半内容。如要下载或阅读全文，请访问：<https://d.book118.com/348073037037007013>