

全地面起重机

3.1 概述

3.1.1 定义与功能

全地面起重机(all-terrain crane)是将起重系统安装在特制轮式底盘上的起重设备。这种特制底盘可长距离高速行驶,同时具有油气悬架、多轴转向、蟹行和多轴驱动等特点,对狭小和崎岖不平或泥泞场地具有很好适应性。因此,该类起重机相比于汽车起重机,具有更高的机动性,以及集机械结构、电子通信、液压传动、电气控制于一体的集成性。被广泛用于风电、石油化工、高铁、核电、矿山和市政等大型工程项目。

3.1.2 发展历程与沿革

20世纪70年代末,世界上第一台全地面起重机在德国研制下线,成功开拓了轮式起重机新的领域。然而全地面起重机发展伊始,由于价格高、技术难度大,未能在起重行业推广使用,只是轮式起重机中的“贵族”。但经过50多年的发展,全地面起重机的技术成熟度和产品性能都已达到了很高的水平。目前全地面起重机在大型设备的吊装和城市基础设施建设等方面,逐步取代了大吨位汽车起重机,成为工程机械起重机家族不可或缺的一个组成部分。

世界三大起重机市场之一——欧洲市场中,全地面起重机占主导地位。这跟欧洲国家对于全地面起重机的设计研发投入及重视态度是分不开的。欧洲国家对于全地面起重机研发最早,在多个关键技术的研发,如控制智能化、底盘技术、整机吊载性能优化等方面都处于世界领先水平。全地面起重机约占欧洲起重机行业市场份额的80%。国外某企业经过多年的研发和技术积累,已研制出多桥大吨位全地面起重机,形成了50~1200t各个产品梯队。以日本为主的东亚市场和以美国为主的北美市场,全地面起重机所占比例较小,以中大吨位居多。这同样表明,在大型重物吊装场合,全地面起重机具有得天独厚的优势。

我国对全地面起重机的研究始于20世纪80年代。由于全地面起重机技术复杂,工况多,要求高,加之国外相关技术的封锁,研发工作进展缓慢。在大吨位全地面起重机研发和制造上更是举步维艰。直到2000年,国内起重机厂家仍主要以中小吨位全地面起重机为主。近几年,国内基础设施建设及大型工程项目建设的开展,对起重设施的需求数量增大,全地面起重机以其优异的起重性能,以及移动迅速、操作灵活和可到达性等优点得到了前所未有的发展。国内一些企业抓住机遇,引进技术,在吸收的基础上不断创新。全地面起重机关键技术的突破改变了国内生产全地面起重机的产业结构,提升了我国自主品牌的竞争

力,逐渐减小了对国外全地面起重机的依赖程度。2010年展出了中国首台千吨级全地面起重机 SAC12000、QAY1200、QAY800 也精彩亮相,标志着我国已打破国外 500t 级以上超大吨位全地面起重机的垄断地位,吹响了我国起重军团向大吨位全地面起重机进攻的号角。国内某企业经过八年时间,自主研发与生产了 25~1200t 系列全地面起重机,为国内全地面起重机自主品牌的使用和推广作出了不可磨灭的贡献。2012 上海宝马展上,我国展出了全球最大的全地面起重机 QAY2000,创造了起重能力最大、臂架长度最长、负载行驶能力最强等多项纪录,这是当时全球唯一用伸缩式主臂就能实现 3MW 风机安装的全地面起重机。

3.1.3 国内外发展趋势

全地面起重机今后的主要发展趋势,是采用智能集成控制,通过互联网进行远程监测等。随着新材料、新工艺的应用,起重机不断向大吨位发展,设备的轻量化是必然趋势。另外,对环保方面的要求也变得更加严格。

1. 大型化的发展

为了满足风电设备和大型石油化工设备的安装,满足电厂、电站、锅炉、桥梁、高层建筑吊装大型设备和构件制造的需求,大吨位全地面起重机需求增多,虽然产量不大,但价值量和附加值却很大。在设计起重机时,为了合理地布置总体结构、降低自重,要求具有很高的设计水平,对材料选择和加工工艺,以及液压电气配套件的品质均提出了较高要求。千吨级的全地面起重机加工制造能力是一个企业技术水平和实力的体现。目前最大的全地面起重机的起重量已达到 2000t,如图 3-1 所示。

2. 专用化的发展

针对特种工况的需求,国内外多家企业设计出了能够满足特定化需求的全地面起重机。

这类起重机是在现有设计的起重机基本型上,充分发挥结构能力,增加了满足特种工况需求的功能如图 3-2 所示的利勃海尔 1200t 全地面起重机,具有超大作业幅度,最大可达



图 3-1 中联 2000t 全地面起重机

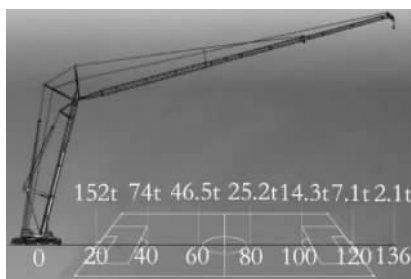


图 3-2 LTM11200 全地面起重机塔臂工况

136m,此时起重量 2.1t,可跨越足球场。

风电设备安装的特点是起升高度较高,可是作业幅度并不大,为满足此类需求,格鲁夫(GROVE)设计出了 GTK1100 型起重机,如图 3-3 所示。

3. 智能化控制技术的发展

将飞速发展的电子技术运用于控制领域,通过可编程控制元件、总线控制技术成功运用,大幅简化控制系统、提高操纵控制性能和安全性能,使大型起重机产品的操纵变得越来越容易、越来越灵敏,更具人性化。近年来发展迅速的多节吊臂单缸顺序伸缩机构就是在集成控制技术发展成熟的基础上发展起来的,可以显著减轻吊臂自重、提高作业性能。各种带有总线接口的发动机、变速箱、液压阀、油泵、马达等控制和执行元件已较为成熟,成为起重机产品发展的重要支撑。

随着起重机产品吨位的增大,智能化显得越来越重要,主要体现在故障自诊断和自动安全保护功能的不断扩展和提升。由于可编程



图 3-3 GTK1100 型起重机

电控技术的逐渐成熟,这类功能的实现显得越来越容易,起重机与互联网相融合正在改变着传统产业的发展进程。

4. 新结构、新材料和新工艺的发展

全地面起重机不同于汽车起重机,尤其对于大型化的全地面起重机,起重臂结构上有更大的优化空间,长臂长已具有明显的几何非线性特性,吊臂截面多采用 U 形或椭圆形,以充分提高薄壳稳定性。单缸插销式伸缩机构虽然原理类似,但仍不断发展,越来越安全可靠。在臂架整体组合上,结合桁架臂的特点,采用超起构造,越来越大地发挥出材料结构强度的潜力。

底盘的越野及灵活机动性能与全地面悬架设计有着密不可分的联系,近些年来在液压系统和电气系统的匹配控制上越来越朝着精细化方向发展。

高强度钢在全地面起重机上的应用非常普遍,而且有的厂家已经尝试采用碳纤维结构来制造出更强、更轻的起重机。在成本可接受的前提下,特种高强度材料的应用将越

来越得到重视。然而特种材料的应用必然会带动相应的加工制造工艺的发展,对特种高强度材料的焊接和折弯成形工艺提出了新的挑战。精益化的发展需要高的性价比,在保证质量的前提下,控制制造成本也是目前的发展要点。

3.2 分类

全地面起重机按吨位大小,可分为小吨位($\leq 50\text{t}$)、中吨位($> 50\text{t}, < 300\text{t}$)、大吨位($\geq 300\text{t}, < 1000\text{t}$)和超大吨位(1000t 及以上)四种。按臂架结构形式,可分为桁架臂式和伸缩臂式两种。

3.3 工作原理及组成

3.3.1 工作原理

全地面起重机主要由上车和下车组成,该类起重机与汽车起重机类似,具有两个操作室:下车操作室为驾驶室,主要负责驾驶操作;上车操作室主要负责起重作业部分的控制。为方便操控,大型全地面起重机部分动作已采用便携式无线遥控操作。诸如德国利勃海尔,美国特雷克斯,日本多田野,国内的徐工、中联、三一等,不同厂家所生产的全地面起重机各有独自的特点。图 3-4 所示为某型 500t 全地面起重机结构示意图。

上车是起重机直接参与作业的部分,主要由起升机构、变幅机构、回转机构、伸缩机构、安全机构和上车操纵机构组成(对于大吨位全地面起重机,上车具有单独的动力系统);下车是起重机的工作基础,主要由底盘、车身、支腿系统、液压系统和电气设备五个基本部分组成,承担着车辆转移及承载上装的功能。

全地面起重机在作业前需要打开活动支腿,建立起重机作业的稳固基础,用以支持起重机的上车作业。上车作业是通过可伸缩的主臂、可 360°回转的转台、可升降的主/副起升机构、可变幅的主臂或塔臂变幅机构单独作业

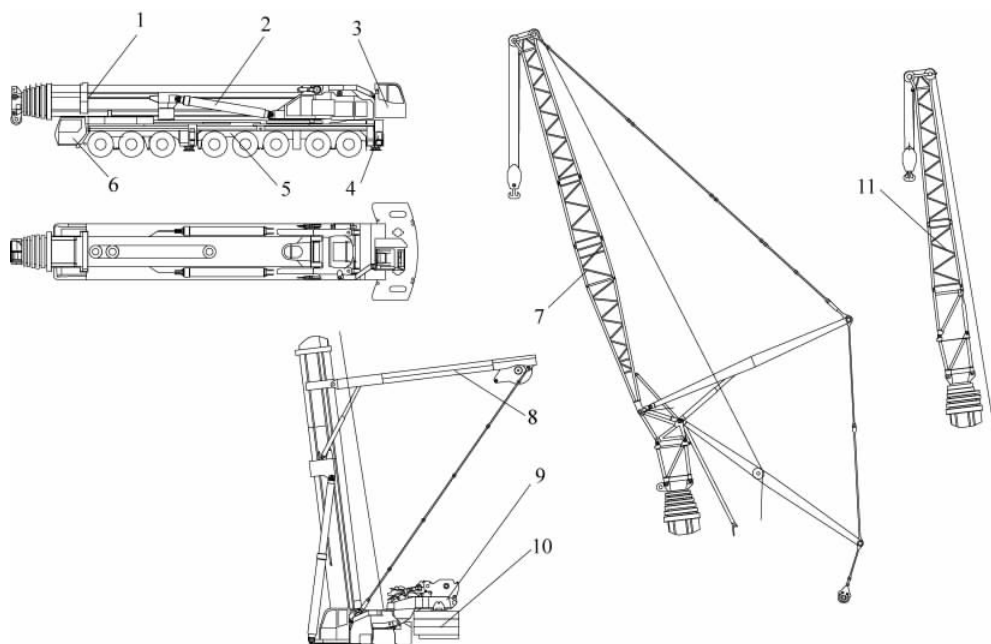


图 3-4 某型 500t 全地面起重机整体结构

1—主臂；2—变幅液压缸；3—上车操纵室；4—后支腿系统；5—全地面底盘；6—前支腿系统；
7—变幅塔臂；8—超起撑杆系统；9—变幅卷扬机构；10—配重；11—固定副臂

或联合作业来完成的。应该按照给定的主/副臂起重性能表或起重性能曲线,正确地选择作业工况,最终实现将液压系统的液动力转化为提升物体的势能,达到吊重作业的目的。

同的结构形式进行组合能够更充分地发挥结构优势。其中,塔臂工况是较为复杂的工况,兼顾了履带起重机的塔臂工况特点。图 3-5 所示为全地面起重机塔臂工况臂架结构图。

3.3.2 结构组成

全地面起重机由上至下可分为两大承载结构部分,即上车结构(臂架结构、转台结构)与下车结构(车架结构、支腿结构)。由于与汽车起重机相近,类似结构可参见 2.3 节,此处不再赘述。全地面起重机与汽车起重机的底盘部分有差异,同时大吨位全地面起重机工作时具有更多的臂架结构组合。

1. 臂架结构组成

全地面起重机的臂架结构可以分为主臂结构和副臂结构。

主臂结构为薄壁箱形伸缩臂结构。副臂形式按照是否可以变幅又可分为固定副臂与变幅副臂(塔臂),吨位较大的全地面起重机臂架结构还包括了超起结构,每种结构形式具有独特的特点。根据不同的吊装工况来选择不

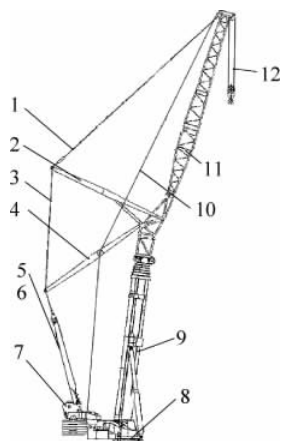


图 3-5 全地面起重机塔臂工况臂架结构图

1—前拉板；2—前撑杆；3—后拉板；4—后撑杆；
5—塔臂变幅；6—钢丝绳；7—卷扬机构；8—转台；9—主臂；10—吊载钢丝绳；11—塔式副臂；
12—吊钩

以利勃海尔某型全地面起重机为例,臂架系统常用的组合形式如图 3-6 所示,从左到右依次为主臂(T)、主臂+超起装置(TY)、主臂+固定副臂(TF)、主臂+超起装置+主臂延伸

节+偏心装置+固定副臂(TYVEF)、主臂+变幅副臂(TN)和主臂+超起装置+主臂延伸节+偏心装置+变幅副臂(TYVEN)。

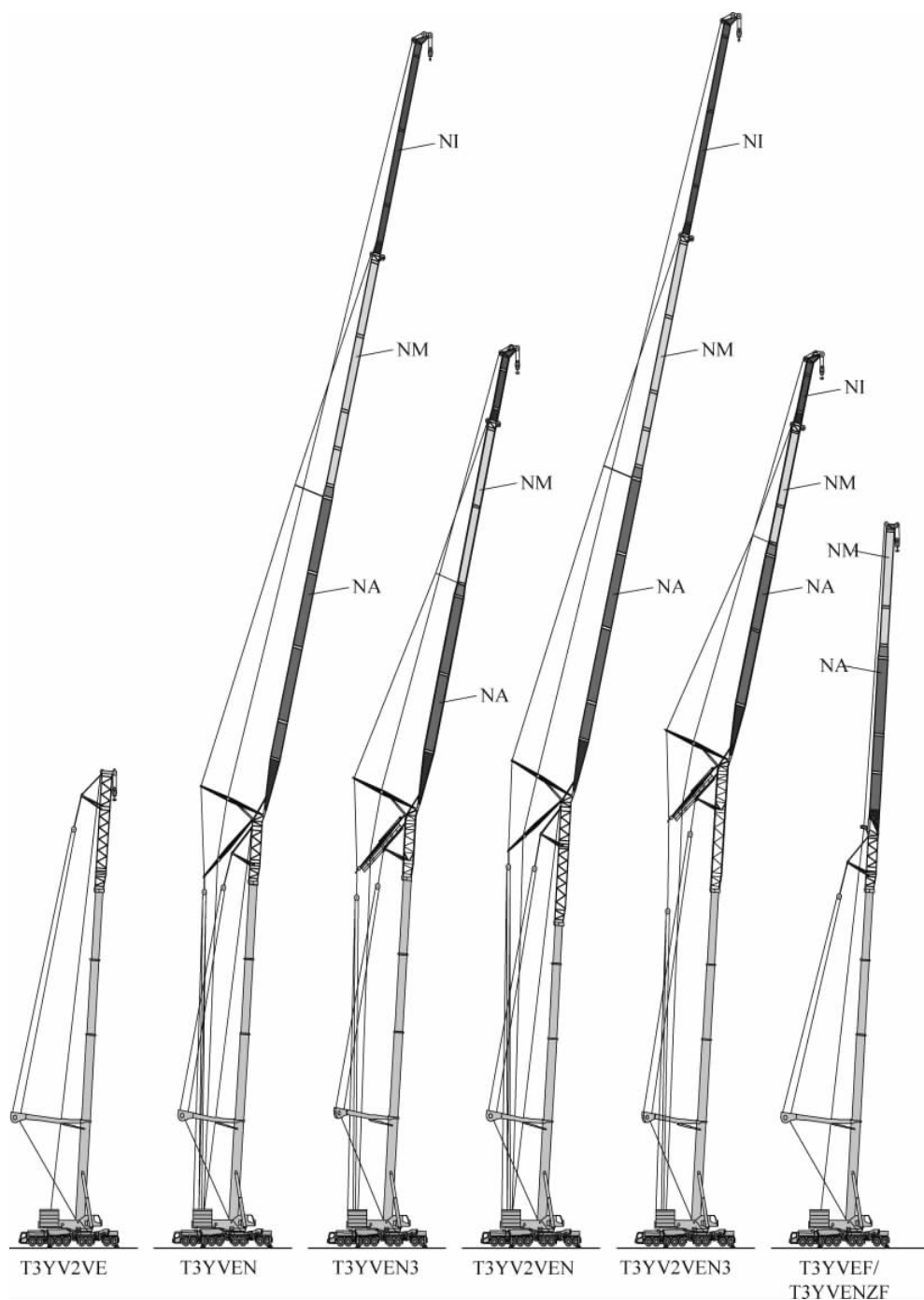


图 3-6 全地面起重机臂架组合作业形式

1) 主臂结构

起重机主臂是上车结构的主体部分,在起重机工作时,主臂要实现伸缩、变幅以保证整车实现相应工况。主臂结构可以参见 2.3.1 节,不同之处在于超大吨位全地面起重机为减轻重量,根据受力,往往对变化明显臂节的下盖板沿纵向采用变壁厚薄板拼焊而成。全地面起重机,尤其是大吨位起重机,主臂伸缩机构主要采用单杠插销式结构。

目前全地面起重机的主臂截面形式主要有折线 U 形截面、U 形截面和椭圆形截面等。不同的主臂截面形式对于起重机的性能影响不同,各起重机生产厂商会兼顾性能与制造成本,根据自身条件和设计需求选择截面形式。

臂头结构又分为贴板式、对接式和插入式三种。

(1) 贴板式臂头结构

贴板式臂头结构简单,主要用于小吨位的截面为六边形的起重机,承载能力不如箱形结

构。其滑块接触面积小,无上侧滑块,依靠螺纹锁紧。贴板式臂头截面示意图如图 3-7 所示。

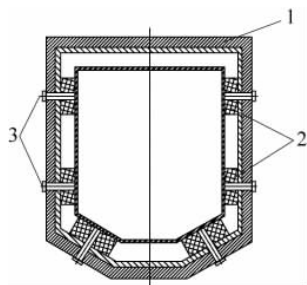


图 3-7 贴板式臂头截面示意图

1—臂头外贴板; 2—滑块; 3—锁紧螺钉

(2) 对接式臂头结构

对接式臂头结构相对复杂,通过采用板加筋形式,使臂头承载能力得到改善,臂头刚度、强度增强。由于臂头与筒体对接操作,存在焊接过程中臂头与筒体自身扭转现象,易导致吊臂产生扭转、抖动、旁弯等。对接式臂头示意图如图 3-8 所示。

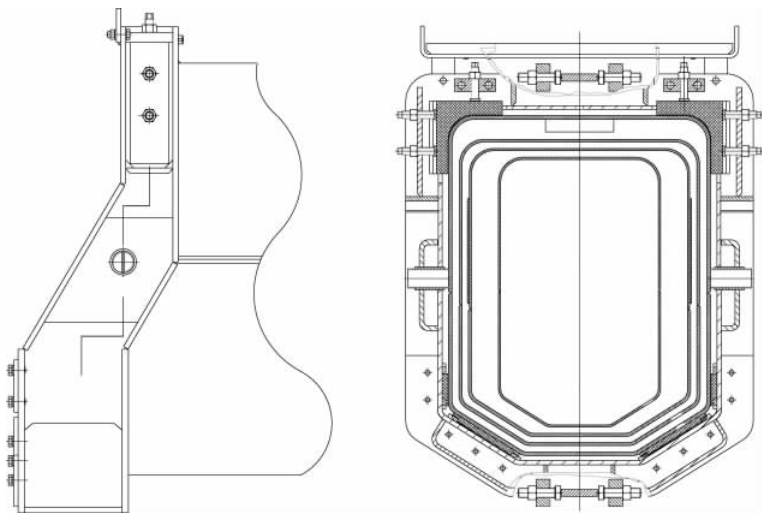


图 3-8 对接式臂头示意图

目前对接式臂头应用的上滑块形式,兼顾了竖直与水平两个方向的控制,且两个方向可以方便地通过螺栓进行调节。下滑块接触面积增大,整体抗扭及承载能力得到加强。下滑块由前面装配挡板固定,装配方便、固定可靠。

(3) 插入式臂头结构

插入式臂头采用嵌入式滑块,可有效增加

吊臂搭接长度,减小臂架搭接处受力,减少下挠和旁弯,从而提升臂架的承载能力,减轻臂架自重,大大提高了整机的起重性能。插入式臂头结构如图 3-9 所示。

插入式臂头结构下部在立板加筋处采用了封板的箱形结构,使刚度、强度进一步加强。上部立板加筋,满足了刚度及滑块布置的要求。

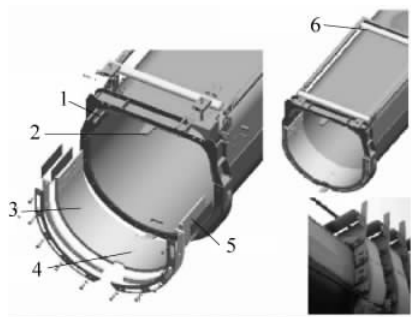


图 3-9 插入式臂头结构

1—头上滑块；2—对中板；3—头下滑块；4—头部铁滑块；5—头侧滑块；6—压绳器

主臂基本臂因为与转台连接,通常有通轴和半轴两种形式,如图 3-10 所示。通轴臂尾结构能有效压缩基本臂尾部在长度方向的尺寸,增加起重臂的有效搭接长度,提高起重臂性能。

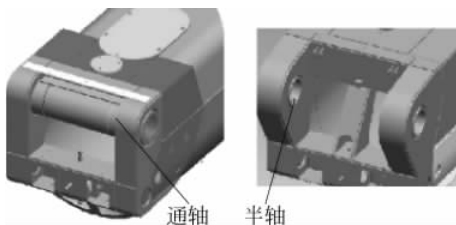


图 3-10 主臂臂尾结构形式示意图

其他臂节的臂尾结构形式常见构造如图 3-11 所示。

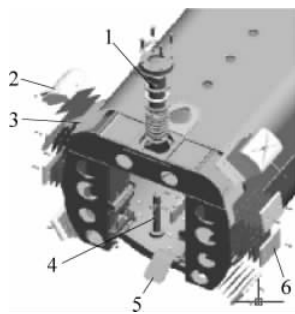


图 3-11 臂尾结构形式示意图

1—臂销；2—尾上滑块；3—调整垫片；
4—大螺栓；5—爬缸器；6—尾部侧滑块

2) 副臂结构

全地面起重机的副臂形式按照是否可以

变幅分为固定副臂和变幅副臂(也称为塔式副臂)两种,如图 3-12 和图 3-13 所示。其结构为由主弦杆和腹杆构成的桁架臂结构,结构件之间的连接多为销轴连接。桁架形式的副臂结构,由于质量轻且承载好,能够大大增加起重机的工作范围,同时以最少的材料获取最大的起重能力,材料的利用效率高。桁架式的副臂结构虽然能够使起重机的工作幅度和起升高度明显提高,但是起重机主臂所受弯矩会使整车的倾翻力矩随之增加。随着副臂结构长度或者带有副臂的结构形式工作幅度的增加,额定起重量会逐渐减小。

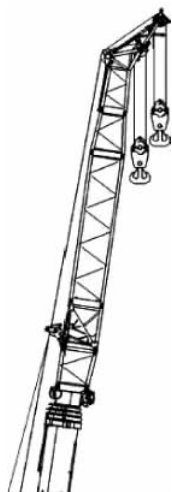


图 3-12 固定副臂结构示意图

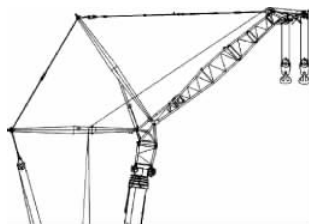


图 3-13 变幅副臂结构示意图

关于副臂的桁架臂制作要求可以参见履带起重机部分(4.3 节)。

2. 转台结构组成

转台是起重机承载的重要连接部件,它通过高强度螺栓与回转支承紧固连接,同时回转支承通过高强度螺栓安装在底盘的专用座圈

上,通过回转机构驱动保证转台可以实现 360° 回转。转台为整体式焊接结构,中小吨位全地面起重机的结构可参见 2.3 节中的有关内容。

大吨位全地面起重机转台除了与上车的起重臂、上车操纵室、起升机构、回转机构、主臂液压缸变幅机构、配重等连接外,还需要考虑臂架组合形式增多后,与变幅拉板、副臂变幅卷扬机构和副起升机构的安装连接,同时转台上也需要安装动力单元,这些变化使转台结构和小吨位起重机在布局上有了明显区别。图 3-14 所示为某型 500t 全地面起重机转台结构。

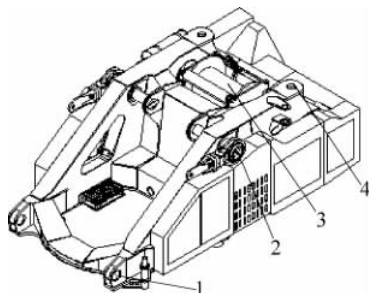


图 3-14 某型 500t 全地面起重机转台结构

- 1—变幅液压缸下铰点；2—主臂根铰点；
3—主卷扬；4—副卷扬及配重支架连接点

3. 车架结构组成

全地面起重机车架结构由车架前段、车架后段、前固定支腿箱总成、后固定支腿箱总成等拼焊而成。车架是全地面起重机的基础骨架,是全地面起重机三大结构件中的一个重要部件。全地面起重机车架多采用由钢板焊接而成的多箱形薄壳结构,构造复杂。在行驶过程中它不仅承受着起重机的自重载荷,还传递着路面的支承力和冲击力。在不平路面上行驶时,车架在载荷作用下可能产生扭转变形以及在纵向平面内产生弯曲变形,当一边车轮遇到障碍时,还能使整个车架扭曲变形。在吊装工作中,起吊载荷所产生的垂直载荷和倾翻力矩,均作用于车架结构之上,它是整个设备的基础,其强度和刚度对保证整车正常工作具有重要意义。

如图 3-15 示出了某一车型典型车架结构。

说明如下:车架前段为槽形梁结构,由第一横梁、左右前小纵梁、第二横梁、左右纵梁、驾驶室支承、吊臂支架等焊接而成。它在起吊重物时不起直接作用,但由于其上安装固定有驾驶室、发动机系统、转向系统等零部件,车架前段除了要承受各种部件的自重,还要承受转向时的扭转变形等。

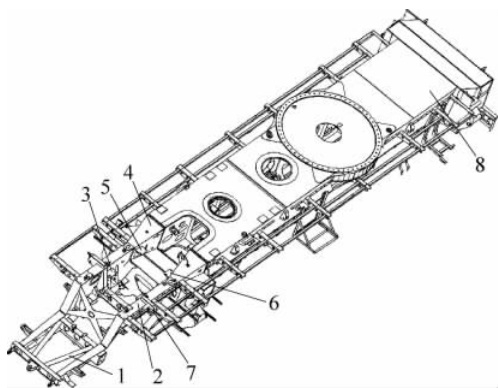


图 3-15 某型全地面起重机车架结构附件名称

- 1—车架前段；2,3—发动机支座；4—发动机后段；
5,6—组件；7—功能附件支座；8—车架附件

车架后段即车架主体部分,采用薄壳封闭大箱形结构,主要由上盖板、左右腹板、槽形下盖板等组成,承受着起重机的自重、吊重和相应的扭矩。为加强抗扭刚度,中间还加了横向的立板和筋板。为保证回转支承的刚性,连接转台部位的上盖板比上盖板的前、后段略厚,且加设了多块纵向和横向的筋板和斜撑板。

4. 支腿结构组成

中小吨位全地面起重机的支腿结构可参见 2.3.2 节所述,多为 H 形支腿,而大吨位全地面起重机多数采用了 X 形摆动支腿。

X 形起重机支腿是安装在车架上可折叠和收放的支承结构,是起重机工作时支承整机的重要部件。该型支腿的支承效果更好,支腿跨距的大小直接影响整车的倾翻稳定性(大吨位全地面起重机的支腿跨距在全伸时候一般超过 10m)。在进行支腿设计时主要考虑其强度和起重机工作时的整车倾翻稳定性,同时行驶状态下支腿结构的布局对整车宽度的影响也要考虑。支腿的结构示意图如图 3-16 所示。

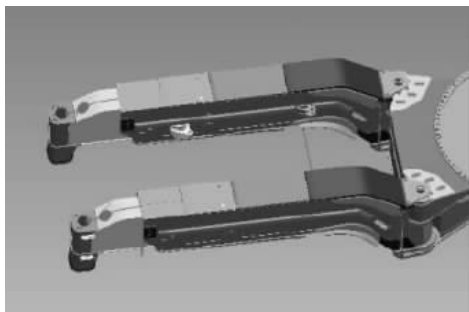


图 3-16 某型全地面起重机 X 形支腿结构

5. 超起结构组成

为了追求更大化的起重能力,充分发挥结构的承载力,可以在标配全地面起重机的基础上,通过增加必要的结构来实现起重能力的提高,这种结构称为超起结构。超起结构是在全地面起重机向长臂长、大吨位发展过程中产生的。一般情况下,最大起重量大于 300 t 的全地面起重机适合配置可供选择的超起装置。图 3-17 所示为徐工 1000t 全地面起重机主臂超起工况工作图。



图 3-17 徐工 QAY1000 型全地面起重机主臂超起工况

- 1—主臂前拉索; 2—拉索预紧装置;
3—超起撑杆; 4—主臂后拉索

超起结构主要由超起撑杆、超起前后拉索(或拉板)和预紧装置组成。根据全地面起重

机臂架系统中各部件间的连接关系,可将不带超起装置的起重臂简化为外伸梁。这种结构在吊载时会产生较大变形,使起重量下降。为解决此问题,在起重臂上增加了超起装置,改变了它的支撑方式,相当于在主臂的臂头添加了弹性约束,大大改善了臂架的受力问题。其受力图如图 3-18 所示。

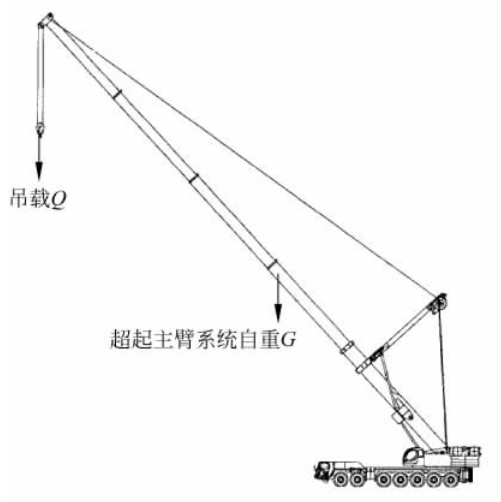


图 3-18 超起主臂系统受力示意图

超起装置作为全地面起重机的关键部件,在提高臂架起重性能上起着至关重要的作用。超起装置一方面能抵消部分吊载对臂头的弯矩,减小对箱形臂架下盖板的应力,降低臂头在变幅平面内和侧向的挠度,同时对提高臂架的侧向稳定性起到了积极的作用,另一方面却增加了臂架的轴向正压力及箱形臂架上盖板的应力。在徐工 QAY1200 型全地面起重机中,超起装置的应用使大臂长状态下挠度减小 20%~30%,起重性能最大提升 400%。

选用超起工况后,起重机在吊载前需要对超起拉索适当进行预紧,才能更好地发挥超起装置的作用。国内外不同厂家生产的大型全地面起重机超起装置大同小异,如特雷克斯的侧支撑超起装置(SSL)、利勃海尔的 Y 形拉索装置、格鲁夫的翅形超起装置等。国内全地面起重机中采用的基本上都是 Y 形拉索超起装置。

超起装置的关键技术在于不同工况下预

紧力大小的匹配。为能够提供合适的预紧力，超起拉索在选择上有单倍率和多倍率之分，多倍率可以在不改变预紧装置扭矩输出的情况下提高预紧力。

起重机超起拉索预紧控制方式主要有两种：一是将预定的主臂仰角作为预紧角度，此时控制两侧前拉索张力；另一种是在任意变幅角下控制两侧前拉索长度。两种预紧方式的差别在于所检测的对象不同：一种是通过力传感器检测拉力；另一种是通过旋转编码器检测长度。

全地面起重机在预紧过程中收紧拉索的方法主要有三种：张索缸加固张索绳；马达直接带动卷扬机收紧拉索；马达通过一对齿轮传动带动卷扬机收紧拉索。

1) 张索缸加固张索绳

此方法是在利勃海尔的专利中提出的，其结构如图 3-19 所示。工作原理为：主臂在伸缩过程中张索液压缸完全缩回，伸缩到指定位置后，张索液压缸往外伸出同时绞盘卷起，当旋转编码器检测到已到达指定位置时，液压缸和绞盘停止运动。然后绞盘再次展开，直到绞盘齿缘发出正确信号，告知其已到达与臂长相匹配的位置，通过棘爪锁死。最后张索液压缸缩回，通过限位开关监视其到达最终位置。此方法的优点为可以提供较大的预紧力，充分发挥超起装置的作用。

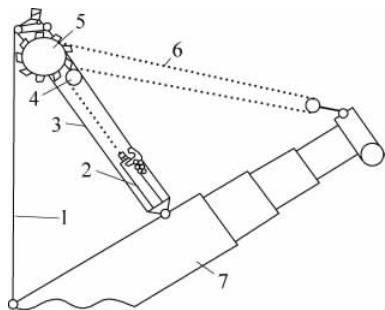


图 3-19 张索缸加固张索绳示意图

1—超起拉板；2—张索液压缸；3—超起撑杆；4—转向滑轮；5—绞盘；6—超起拉索；7—主臂

2) 马达直接带动卷扬机收紧拉索

此方法在国内企业中应用普遍，其结构如

图 3-20 所示，此预紧装置位于超起撑杆的末端。工作原理为：主臂伸缩时，张紧卷扬机放开，在限压阀的控制下，拉索一直被拉紧。拉索收紧是通过马达带动卷扬机滚筒旋转实现的，并通过力传感器或旋转编码器来检测拉力或索长。达到要求后，通过定位液压缸末端传动件卡入棘轮中，实现进一步拉紧拉索与锁死卷扬机滚筒。该方法的缺点为由于放置空间有限，所用马达的驱动力较小，提供的预紧力较小，预紧时需要预设主臂仰角或拉索采用多倍率，因此效率受到影响。

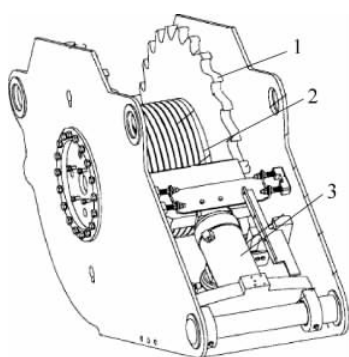


图 3-20 预紧装置示意图

1—棘轮；2—卷扬机；3—定位液压缸

3) 马达通过一对齿轮传动带动卷扬机收紧拉索

此方法与方法 2) 的不同之处为马达和卷扬机之间增加了齿轮传动装置，减速齿轮装置可以增加卷扬机的驱动力，即增加预紧力，相对来说更能有效地实现预紧。此预紧机构在特雷克斯的全地面起重机中得到应用。

除了上面所提及的适当增加拉索预紧力之外，改变两撑杆的夹角大小、撑杆的长度和拉索前后固定点的位置等，也能够提高超起装置的作用效果。针对这方面的研究已有相关论文，其优化问题也是值得进一步探讨的核心技术。

3.3.3 机构组成

全地面起重机主要由起升机构、变幅机构（包含主臂变幅和塔臂变幅）、上车操纵室摆动机构、配重安装机构、回转机构、伸缩机构等