

缆载吊机安全性设计与试验及施工关键技术

刘显晖 邓年春 陈立 李海峰 伍柳毅

(柳州欧维姆机械股份有限公司 广西柳州 545006)

摘要:缆载吊机是大型悬索桥加劲梁架设的关键设备,从其使用工况来说,属特种起重吊装设备的范畴,其安全性倍受关注。作为新型的架桥设备,目前还没有正式的国家标准。通过对缆载吊机结构、机械、液压和控制的设计,并经过厂内和现场的检验试验,来验证了缆载吊机的安全性,同时提出了缆载吊机的施工关键技术。

关键词:悬索桥 缆载吊机 安全性设计与试验 关键技术

DOI: 10.13211/j.cnki.pstech.2016.06.005

缆载吊机作为悬索桥加劲梁架设的专用设备,是依托悬索桥的两根主缆作为支撑,在高空行走移位和对加劲梁进行固位吊装。目前最大单机起重吨位已达到500t,并且有向更大起重吨位方向发展的趋势,属大型起重吊装设备,它的安全性、可靠性和操作方便性显得尤其重要。由于缆载吊机是近年来发展的一种新型设备,根据目前特种设备相关文件和有关产品标准,以及国内外行业对该设备的习惯命名,经相关部门研究决定暂未将缆载吊机列入特种设备目录中。然而根据缆载吊机的实际使用工况,仍需要按照特种设备的要求进行。为此通过对缆载吊机安全性设计、试验和检验、以及多个工程施工关键技术的验证,确保了其使用的安全性。

1 缆载吊机总体结构设计

缆载吊机总体结构主要由1个钢主桁梁、2套在主缆上行走的行走机构、提升和控制系统、吊具装置等几部分组成。其中钢主桁梁部分是由型钢焊接而成的两段箱型负重梁及中间桁架梁构成,两端的箱型负重梁安放主提升设备,是主要的受力构件,中间桁架梁对整体结构起刚性支撑作用,其内空间用于安放控制室及提升附件,并为施工操作提供工作平台。行走机构主要采用步履式和滚轮式两种形式,其结构主要考虑在主缆上行走时能否顺利跨越主缆上的索夹等。提升和控制系统是缆载吊机的中枢机构,由千斤顶、液压泵站、计算机及传感器等组成,用于控制缆载吊机加劲梁吊装、缆上行走就位以及吊机所有的

工作状态和操作过程。吊具装置部分与加劲梁相连,其结构形式可根据工程需要设计。缆载吊机总体结构如图1所示。

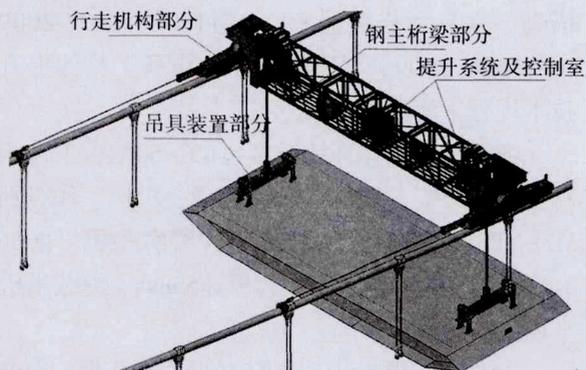


图1 缆载吊机总体结构

2 缆载吊机安全性要求控制点

缆载吊机的使用必须充分考虑其作业环境、使用工况、功能性要求、安全可靠性和操作方便性等,可通过缆载吊机安全性设计、试验及人员培训等多方面保证其施工安全。

(1) 缆载吊机属于安全性要求较高的起重吊装设备,其设计、制造和试验必须满足国家和行业现行技术标准与规范要求,且尽可能高于要求。

(2) 缆载吊机整体结构设计及受力计算,应考虑在主缆上安拆装、行走就位、固定和吊装作业(包括荡移)等各种工况的影响。

(3) 提升和牵引机构必须考虑在故障情况下的应急安全装置和措施。

(4) 控制系统可对载荷、位移进行实时监

转自《装备制造技术》2016年02期

控和显示,具有超载自动停机报警、自动防误操作、数据储存和输出等功能。

3 缆载吊机设计安全性

在充分考虑悬索桥所处的地理位置、桥梁跨径、主缆直径、两主缆间距、加劲梁重量及数量、所需跨越最长索夹的尺寸、最大爬升坡度等基本参数,同时考虑是否有荡移、双机抬吊以及其他特殊要求等多种工况之后,开始对缆载吊机进行设计。

3.1 主要设计标准、规范和安全系数的选择

缆载吊机主要设计标准和规范有:GB/T3811-2008《起重机设计规范》、GB50017-2003《钢结构设计规范》、GB/T3766-2001《液压系统通用技术条件》、JG/T321-2011《预应力用液压千斤顶》、GB/T14370-2007《预应力筋用锚具、夹具和连接器》、DG/TJ08-2056-2009(J11400-2009)《重型结构(设备)整体提升技术规程》等。

缆载吊机工作环境温度 $-10^{\circ}\text{C}\sim 50^{\circ}\text{C}$;工作相对湿度 $\leq 90\%$;整机工作级别A2,机构工作级别M2;工作状态最大风速 25m/s (缆载吊机平面处 3s 阵风);非工作状态最大风速 55m/s (缆载吊机平面处 3s 阵风)。

参照标准规范^{[1]、[2]}和国内外设计经验,安全系数取值如下:钢主桁架结构安全系数取1.48;行走机构和吊具安全系数取1.6;销轴安全系数取2.0;液压千斤顶的安全系数取2.0;提升钢绞线安全系数取2.5,即钢绞线安全工作荷载设定为其破断拉力的40%;跨中挠度控制值为 $1/600$;冲击系数取1.1。

3.2 吊机结构安全性设计

(1) 缆载吊机及加劲梁的重量通过行走机构钢结构主体传给主缆,吊装时需要将支承抱箍抱紧主缆。当有大角度且支撑点不靠近索夹的位置时,还需增加止动块来保证有足够的抗滑力,以提高缆载吊机整体稳定性。如图2所示。

(2) 在有坡度位置两片加劲梁同时起吊(或双机抬吊同一片加劲梁)时,两台吊机牵引千斤顶可以同时利用同一束钢绞线进行牵引定位,以确保安全。如图3所示。

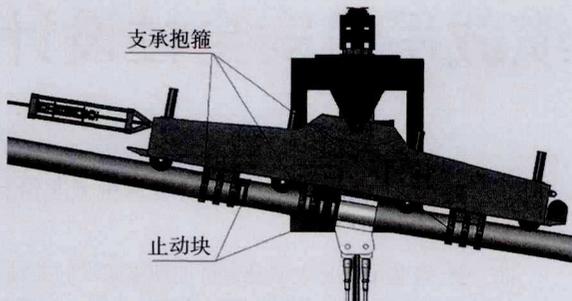


图2 支承抱箍和止动块

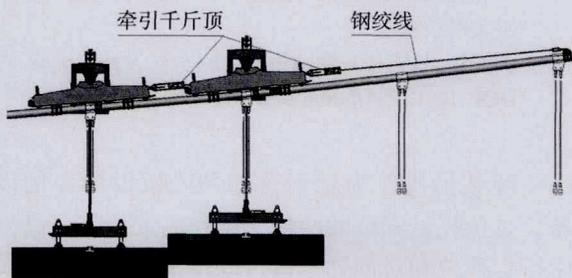


图3 双机相距较近时的位置

(3) 吊机中的钢主桁梁与行走机构之间、提升千斤顶与钢主桁梁之间采用双铰接结构,保证荡移施工时吊机的稳定性,并改善提升千斤顶夹片受力,确保吊装安全。如图4、图5所示。

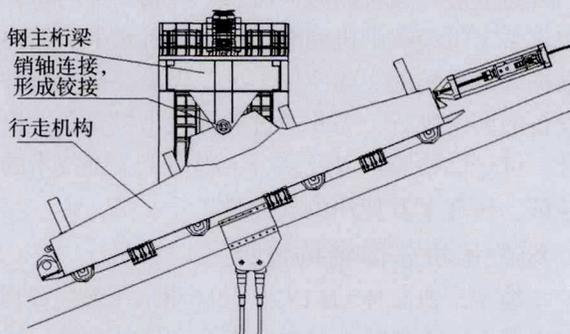


图4 钢主桁梁与行走机构铰接图

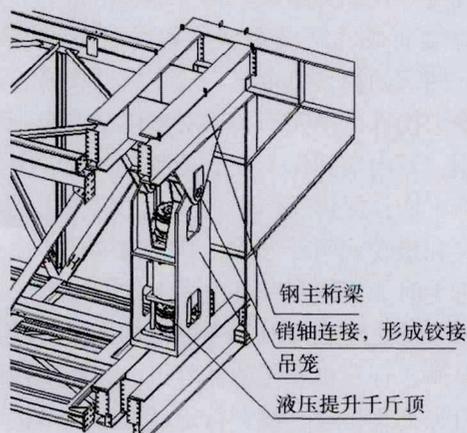


图5 提升千斤顶与钢主桁梁铰接图

(4) 为保证荡移施工和强风时整体结构的稳定性, 增设了可调式抗风装置。如图6所示。

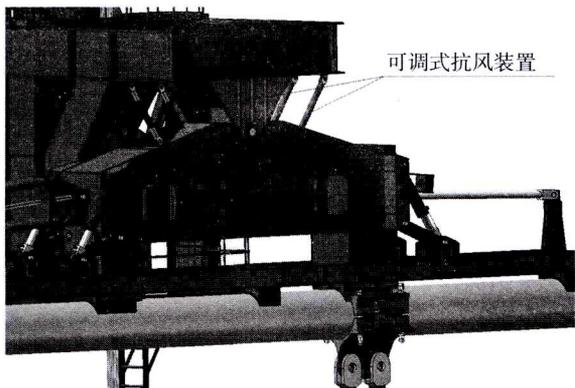


图6 可调式抗风装置

3.3 提升设备安全性设计

提升设备从机、电、液三方面设计了多重安全保障措施。

(1) 夹具严格按照《预应力筋用锚具、夹具和连接器》标准要求验收, 保证了锚固的可靠性。

(2) 提升千斤顶采用整体式夹片夹持机构, 可有效地保证所有夹片的开启或闭合; 千斤顶内部采用导管形式, 可避免钢绞线弯曲和扭绞现象的发生。每台提升千斤顶下方设计有液控安全夹持器, 当千斤顶不工作或有突发事件发生时, 安全夹持器所有夹片夹紧。正常工作时, 安全夹持器所有夹片处于开启状态。如图7所示。

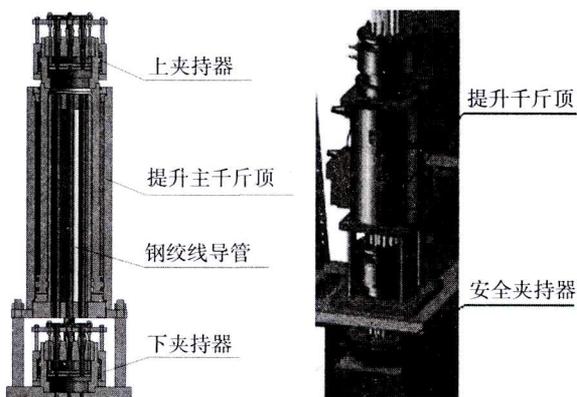


图7 提升千斤顶结构图

(3) 每台千斤顶上安装有液控单向阀和平衡阀, 既能防止因液压管路爆裂或泵站故障时千斤顶被负载带动而坠落, 又能保证带载下放时速度均匀。

(4) 所有液压执行元件分别由相对独立的液压回路供油和控制, 减少因控制元件失灵而造成执行元件的错误动作。同时每个回路都设限系统最高压力, 保护系统安全。

(5) 采用分布式计算机网络控制系统, 硬件上采用屏蔽、光电隔离和滤波等抗干扰保护措施; 软件上采用手自动互锁、不同工况互锁的误操作闭锁方式, 防止误操作现象的发生。同时整个系统还设置有防雷措施。

(6) 为了更好地对现场提升系统、钢绞线收放装置、行走机构运行情况的监视, 确保施工安全及设备正常运行, 吊机上安装有视频监视系统。

3.4 有限元分析结构安全性

为了确保结构的安全性, 根据标准和规范的规定, 针对缆载吊机的无风工作、有风工作、非工作三种条件, 以及垂直提升和最大角度与最大重量的荡移两种工况, 在主缆水平位置和主缆 32° 倾斜位置作业的两种边界状态, 采用许用应力设计法, 分别计算了钢主桁梁、行走机构、提升系统等结构受力。另外还进行了极限吊装工况下的止动块抗滑移和焊接强度校核等方面的分析计算。

3.4.1 吊梁工况分析计算

3.4.1.1 位于跨中(水平)额定荷载有风工作工况和索塔(32°)有风非工作工况

(1) 额定起吊荷载(含吊具装置), 冲击系数取1.1。

(2) 钢结构自重, 钢材密度取 78.5kN/m^3 , 此项荷载由程序自动计入。

(3) 控制室、提升千斤顶、泵站及收线装置等临时荷载约 400kN , 按各自实际位置布置: 收线装置 220kN 作用在底面第二根横梁上, 泵站 80kN 作用在底面上第四根横梁上, 控制室 20kN 作用在底面中间横梁上, 提升千斤顶 60kN 作用在吊点处。

(4) 最大工作风速 25m/s 。如图8、图9所示。

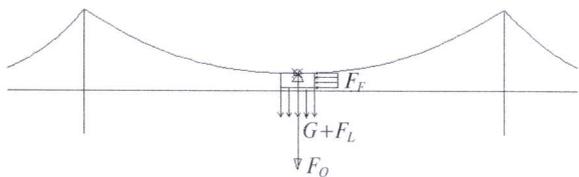


图8 跨中有风工作工况荷载示意图

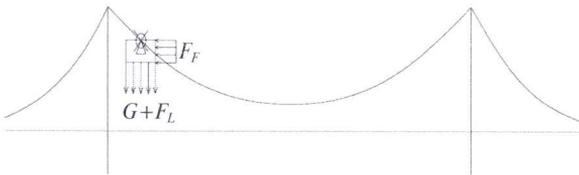


图9 索塔有风非工作工况荷载示意图

其中： F_Q —缆载吊机额定起吊载荷； F_L —作用于钢结构上的临时载荷； G —钢结构自重； F_F —作用于钢结构上的风载荷。

3.4.1.2 荡移工况

当加劲梁无法达到垂直提升位置时，就需要采用荡移施工法，分牵引系统辅助荡移与无牵引系统荡移两种。此时应按实际工况计算其吊重，并按计算结果校核钢结构的强度和刚度。如图10所示。

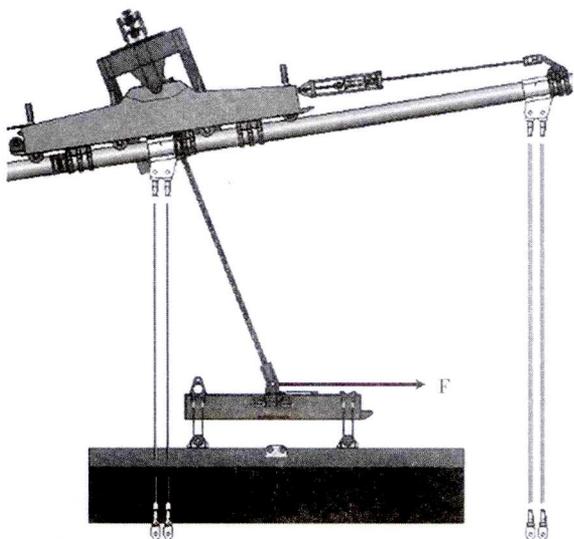


图10 荡移工况受力分析

3.4.2 极限吊梁工况止动块抗滑移分析计算

缆载吊机在吊梁时，由于主缆与水平面成一定角度 α ，吊机自重及吊重产生下滑力 $F=G\sin\alpha$ ，吊机与主缆间摩擦力 $f=\mu N$ ，取计算式 $f \geq F$ ，得出 $\alpha \leq 26.56^\circ$ ，即吊机在主缆角度小于 26.56° 情况下吊梁时，可依靠自身摩擦力不产生下滑；当

主缆角度大于该值时，需安装止动块，一个止动块可提供摩擦力120kN。取最危险角度 32° 计算：下滑力 $F=3444.5\text{kN}$ ，摩擦力 $f_1=2756.2\text{kN}$ ，配套六块止动块提供摩擦力 $f_2=12 \times 6=720\text{kN}$ ，则 $f_1 + f_2 \geq F$ ，即吊机安装了止动块后在主缆角度 32° 时吊梁亦不会产生下滑。若算上某大桥 32° 处索夹的抗滑移力6930kN，吊机牵引千斤顶拉力1500kN，则安全系数 $n=(6930+1500+2756.2+720)/3444.5 \approx 3.46$ 。如图11所示。

注：以上计算中 μ 取钢与橡胶间摩擦系数0.5；吊机自重取1500kN；吊重取5000kN。

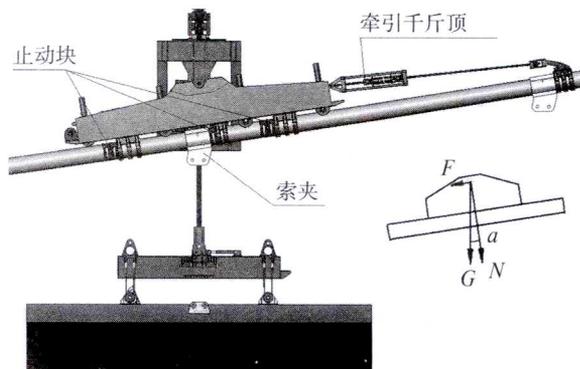


图11 极限工况止动块抗滑移分析

通过有限元分析计算可知，结构的最大应力集中处在钢主桁梁结构与行走机构的连接处，确保了上述区域的应力安全，结构即使在极限施工工况下也是安全的。本缆载吊机的整体设计在强度和刚度上均满足要求。分析结果如图12、图13所示。

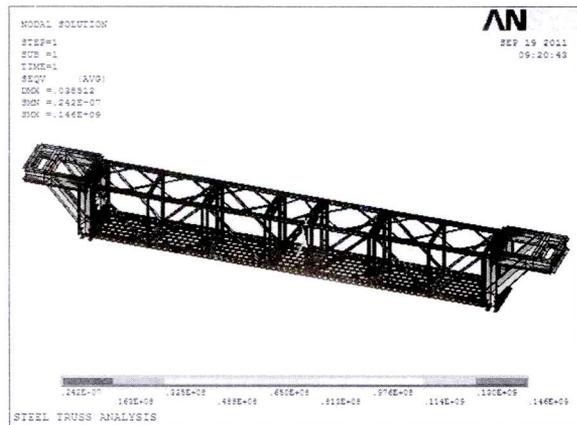


图12 钢主桁梁分析结果

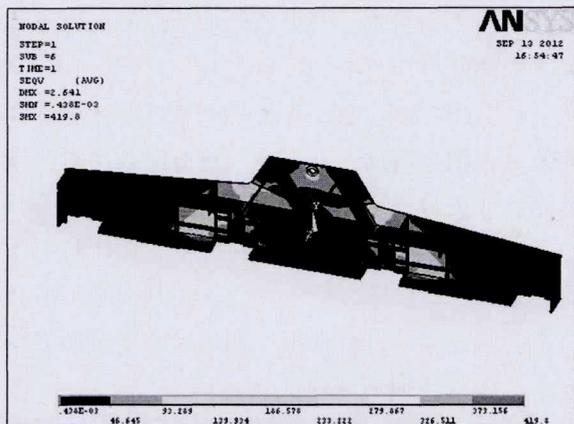


图13 行走机构主体分析结果

4 缆载吊机试验检验

4.1 缆载吊机试验检验标准的选择

每台缆载吊机必须在工厂进行整机型式试验并取得合格证,因该设备不存在于特种设备名录中,故我国目前尚无缆载吊机独立统一的检验规范。根据相关部门的建议,整机选择TSG Q7002-2007《桥式起重机型式试验细则》进行验收,液压提升系统按TSG Q7008-2007《升降机型式试验细则》进行验收。

4.2 缆载吊机出厂试验^[3]

缆载吊机出厂试验的目的是对整套设备在加工后,实际使用之前的安全性进行检验。试验内容包括:空载及行走试验,检验缆载吊机的起升、行走等动作的准确性;额定荷载试验,检验缆载吊机在额定荷载下的应力和变形;超载试验,检验缆载吊机在125%额定荷载下结构的承载能力。如图14所示。加载过程按20%,40%,60%,70%,80%,90%,100%,110%,125%分级加载。试验过程对缆载吊机和反力架进行检查,同时测量应力、应变和挠度。测点位置如图15所示。

超载试验后解除荷载,在空载条件下进行起升、行走等动作的操作和各机构空载速度试验。动作性能试验结果表明,控制系统的动作准确可靠,各工作机构动作平稳,运行正常,无异常震动、冲击、过热、噪声、泄漏等现象。

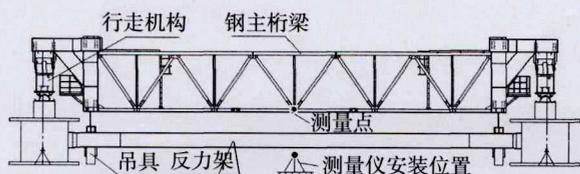


图14 型式试验结构组装置示意图

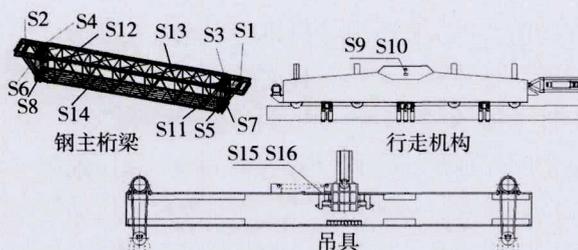


图15 缆载吊机钢主桁梁、行走机构、吊具测点位置图

4.3 缆载吊机现场试验

缆载吊机在主缆上完成全部拼装后需进行现场试验,试验内容包括空载行走、静载和动载试验,以检验缆载吊机机械、液压和控制系统在实桥上运转的准确性和同步性,同时检测钢结构的变形情况,验证其强度和刚度是否符合设计安全要求。

(1) 空载行走试验

经全面检查缆载吊机结构及各连接处的安全和设备调试完成后,启动牵引设备进行缆载吊机的行走试验。试验时,通过实时测量行走机构与相邻索夹的距离来作同步性参考基准,要求上下游按20cm偏差作控制要求,超过该值时便及时调整。缆载吊机正常行走的速度计算,以一次200m长距离行走为时间段,包括行走时间、锚固点的转移时间、抱箍安装和拆除时间等,计算出平均行走速度。

(2) 静载试验

缆载吊机行走至试吊位置处,将全站仪架设在具有良好覆盖观测位置作为整个荷载试验测量观测控制点,然后分别对各测点进行原始数据的采集。测点位置包括缆载吊机钢主桁梁跨中点、行走机构与箱型负重梁铰接的上方。如图16所示。

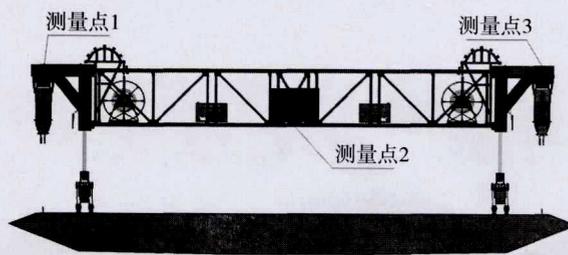


图16 缆载吊机现场测点位置图

试验前,再次检查缆载吊机应当无永久变形、焊缝无裂纹和油漆剥落,各连接处无松动,主要零部件无损坏。然后将试吊加劲梁运至待吊点,就位精度控制在1m以内。安装试吊专用预压配载水袋或配重块,与加劲梁可靠临时连接。启动缆载吊机同步提升,按20%、40%、60%、80%、90%级别分级加载,直至加劲梁被提高20cm。缆载吊机稳载10min后,测量各监测点,同时观察吊机相关部件运转情况并记录。向水袋内注水或加配重块至额定荷载,稳载10min后,再次测量各监测点,观察相关部件运转情况并记录。最后比较相关测量数据,得出试验结果。

(3) 动载试验

动载试验的目的是验证缆载吊机在超载情况下的动态和制动性能。

额定荷载静载试验后,继续向水袋内注水或加配重块至1.1倍额定荷载。稳载10min后测量各监测点并记录。缓慢将加劲梁提升2m,然后负载下放,重复3次,同时观察缆载吊机相关部件运转情况并记录。比较相关测量数据,得出试验结果。

通过现场试验,来保证加劲梁吊装作业的安全性和可靠性。实测缆载吊机的行走速度、吊具的收放速度和负载的提升速度,从而为测算加劲梁吊装时间提供依据。同时找出吊装过程中存在的不足,并予以纠正。

5 缆载吊机施工关键技术

(1) 安装完成后的首次下行行走,必须用 $\phi 28$ 钢丝绳将缆载吊机锚固端与主索鞍吊耳相连接,作为初次行走的安全保险措施。

(2) 缆载吊机必须是在全面检查确认安全后开始行走,先向上行走30cm进行力系转换,然后解除所有受力约束,让缆载吊机完全具备自行走条件。

(3) 吊机行走时两侧的行走机构必须实时进行观测,确保不同步度控制在20cm以内。不同步度过大会增加吊机整体结构的不平衡性,使连接部件发生较大的扭转形变,从而降低其寿命和安全系数。

(4) 确保行走机构总体受力均衡,受力偏差过大会造成主缆局部变形失圆,破坏主缆的线

型,从而影响行走。可采用增加抱箍的措施来加强主缆的刚度。

(5) 切勿将叉耳式索夹的锁紧螺杆反方向安装,否则会增加索夹高度,造成缆载吊机跨索夹困难或失败,如图17所示。

(6) 支撑靴(或滚轮)的弧度必须与主缆弧度相吻合,如图18所示。建议在紧缆施工后获取主缆实际尺寸进行加工。如果尺寸不符而强行施工,可能会损伤主缆。



图17 装反的锁紧螺杆

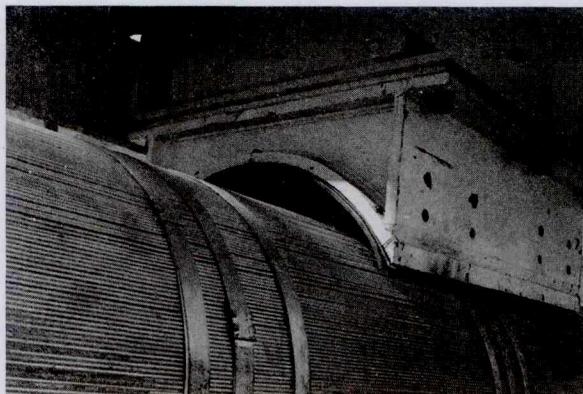


图18 支撑靴与主缆弧度不一致

(7) 在吊装前将钢绞线下放到吊装高度位置处统一裁剪钢绞线长度,可解决吊装时钢绞线长度不均的现象;同时在吊装前需要对钢绞线进行检查和用单孔预紧锚对各根钢绞线进行预紧,待每根钢绞线受力均匀后方可进行正式吊装工作,这是钢绞线吊装时的必须步骤。

(8) 在进行加劲梁吊装或其它作业时,万一在提升千斤顶内部出现钢绞线弯曲和扭绞现象,必须及时处理。该现象的发生通常出现在提升过程,由于夹片保养的时间间隔太长或在夹片

内有其它异物卡住夹片，扭绞出现在荷载由上夹持器夹片向下夹持器夹片转移的一瞬间。具体的处理措施为：对出现钢绞线扭绞的千斤顶必须采用手点动回缩控制的方式将荷载由上夹持器夹片向下夹持器夹片转移，待荷载完全转移到下夹持器夹片，再收回千斤顶继续提升，直到受损的钢绞线顺利通过千斤顶。

(9) 注意跨中主缆与加劲梁面的最小距离，保证缆载吊机能顺利将加劲梁吊装就位。

(10) 为确保安全，缆载吊机施工必须做到吊装时不行走；行走时不吊装。这在缆载吊机的硬、软件上已做了互锁设计。

6 结束语

针对大型特种设备的设计、制造及应用，必须引入安全性设计理念。对整个设备的各个零部

件做到性能可靠，并反复验算和试验验证，对关键施工工艺提出具体的要求及注意事项，以确保使用的安全性。本课题研制的缆载吊机现已成功地完成了湖南矮寨大桥、南京长江四桥、重庆青草背长江大桥、安徽马鞍山长江大桥和武汉鹦鹉洲长江大桥加劲梁的吊装作业。实践结果表明，该类型缆载吊机性能良好、安全可靠，大大缩短了加劲梁吊装施工工期。通过不断地工程应用和优化设计，逐步扩大缆载吊机的使用市场。

参考文献

- [1] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. GB/T 3811-2008起重机设计规范[s]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
- [2] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. GB 50017-2003钢结构设计规范[s]. 北京: 中国计划出版社, 2003.
- [3] 邓年春, 罗珊, 伍柳毅等. LZDJ500T全液压步履式缆载吊机型式试验研究[C]. 武汉: 第二十届全国桥梁学术会论文集, 2012: 1063-1067

信息视窗

《预应力技术》约稿函

《预应力技术》前身为《OVM通讯》和《海威姆预应力技术》。《OVM通讯》创刊于1997年，《海威姆预应力技术》创刊于2000年。2004年，两刊合并为《预应力技术》。由中国科学技术发展基金会欧维姆预应力技术发展基金和柳州欧维姆机械股份有限公司联合主办，双月发行，截止至2016年12月已发行119期。刊名由我国著名桥梁专家、两院资深院士李国豪题写。目前，《预应力技术》在业内已具有较大的影响，被CNKI中国期刊全文数据库、SWIC中文科技期刊数据库和Airiti Library（台湾华艺线上图书馆）等数据库全文收录。

一、办刊宗旨：为预应力技术行业提供一个学术讨论的园地，以便利于交流预应力技术经验，活跃预应力学术气氛，推广预应力技术的应用，促进预应力技术的发展。

二、栏目设置：《预应力技术》开辟预应力技术工程设计与施工、预应力产品开发与应用、预应力技术研讨与交流，新技术、新材料、新结构、新产品的介绍与信息等栏目，刊登国内外有关预应力方面的技术文章与报道。它的发送对象为我国高等院校、科研部门、设计施工单位及有关专家、学者、工程技术人员。

三、征稿对象：凡工作或研究方向涉及预应

力技术，包括桥梁、建筑、水利水电、岩土锚固等领域的广大专家、学者及工程技术人员。

四、来稿须知：

1、为了提高办刊质量，本刊长期向国内外的专家、学者、工程技术人员等征集稿件。来稿一经发表，编辑部按规定支付稿酬，并赠送样刊，欢迎您投稿并来函来电。

2、来稿不涉及保密、署名无争议等，文责自负。本刊有权对文稿进行删改，如不同意删改，请投稿时注明，本刊因工作量大，请作者自留底稿，恕不退稿。

3、来稿请附作者简介，内容包括出生年月、性别、职称、职务、学历、主要荣誉及联系方式（通讯地址/邮编/电话/电子邮箱）。投稿2个月后如无接到采用通知，可另行处理。

《预应力技术》编辑部

稿件寄送及联系地址：广西柳州市阳和工业园阳惠路1号《预应力技术》编辑部

邮编：545006

电话：0772-3116594

传真：0772-3116594

电子信箱：yyljs@ovm.cn

联系人：王英 陆劭红