

桥式起重机安全运行控制技术分析

徐有万

北方铜业有限公司垣曲冶炼厂 山西 运城 043700

摘要: 桥式起重机作为工业生产中广泛应用的物料搬运设备,其运行安全性直接关系到生产效率与人员财产安全。本文以机械结构力学特性为研究基础,从起升机构制动控制、运行机构缓冲保护、防斜拉与防过载机械联动、轨道与车轮接触控制、钢结构疲劳监测与加固技术、安全限位机械互锁系统六个方面,系统探讨了桥式起重机安全运行的关键机械控制技术。通过分析各子系统的工作原理与控制策略,提出了基于机械传动特性与结构动力学响应的安全控制方案。研究表明:合理设计机械制动器摩擦副参数、优化缓冲器能量吸收特性、构建纯机械式超载保护联杆机构、控制轮轨接触几何关系、建立钢结构疲劳寿命评估体系、完善机械限位与联锁逻辑,可显著提升桥式起重机整机运行的安全冗余度。本文研究成果可为桥式起重机的安全设计与技术改造提供理论参考。

关键词: 桥式起重机; 安全控制; 机械制动; 防过载保护; 轨道接触

引言

桥式起重机由桥架金属结构、大车运行机构、小车运行机构、起升机构及电气控制系统构成。在长期重载、高频次作业工况下,机械部件易产生磨损、变形、疲劳裂纹等损伤,进而诱发溜钩、脱轨、过载倾覆等安全事故。现有研究多侧重于电气安全保护装置(如超载限制器、行程开关、变频调速等),对机械本体的安全控制特性关注不足。实际上,机械结构自身的力学行为是安全运行的物理基础,任何电气控制措施均需通过机械执行机构发挥作用。因此,从机械系统动力学与结构强度理论出发,研究桥式起重机安全运行的机械控制技术,具有重要的工程实用价值。本文聚焦于机械传动、金属结构、行走机构及安全装置等关键子系统,分析其在异常工况下的失效模式,并提出相应的控制策略与设计准则,以期形成一套相对完整的机械安全控制技术体系。

1 起升机构制动安全控制技术

1.1 常闭式制动器的制动力矩匹配原则

常闭式块式制动器或盘式制动器是起升机构的标准配置。制动力矩的设计需满足:在额定载荷下,制动器所能提供的最大静制动力矩不得小于1.5倍至2.5倍的负载额定力矩(具体系数根据工作级别确定)。若制动力矩过小,会出现溜钩现象;若过大,则制动冲击加剧,加速传动齿轮、卷筒及钢丝绳的疲劳损伤。从机械控制角度,需建立制动力矩的自适应调整机制。传统方法采用人工调节弹簧压缩量,但实际运行中摩擦衬垫磨损会导致制动力矩衰减。建议采用机械式制动力矩指示器:在制动器杠杆系统上设置刻度指针与磨损极限标志,当指针进入红色区域时提示更换摩擦片^[1]。更优方案是增设机

械式力矩补偿装置——利用碟形弹簧组的非线性刚度特性,使制动力矩在摩擦片整个寿命周期内保持基本恒定。

1.2 双制动器冗余设计

对于M5及以上工作级别的桥式起重机,起升机构应配置两套独立制动器。双制动器的机械协同控制需注意:两台制动器应布置在高速轴(电动机轴或减速器输入轴)的不同侧,避免共因失效。制动器释放动作的同步性通过调整推杆或电磁铁行程实现,要求两侧制动瓦打开间隙差值不超过0.3mm。在紧急制动工况下,两套制动器同时抱闸,制动力矩叠加,需校核传动轴系的扭转强度,防止因冲击扭矩过大造成键槽挤压破坏或联轴器损坏。

1.3 制动器故障的机械检测手段

除电气限位开关外,还应设置纯机械式制动器状态监测装置。例如,在制动臂上安装偏心凸轮与微型行程拨杆——当制动衬垫磨损超限导致制动臂行程超出允许范围时,凸轮拨动限位杆,通过钢缆拉线传递至司机室内的机械指示器,使驾驶人员获得明确警示。这种机械式反馈方式不受电气故障影响,可靠性更高。

2 运行机构缓冲与止挡安全技术

2.1 缓冲器能量吸收特性优化

常用缓冲器包括橡胶缓冲器、聚氨酯缓冲器、弹簧缓冲器和液压缓冲器。从安全控制角度看,应基于运行机构的碰撞速度与质量确定缓冲容量。设运行机构质量为 m ,碰撞速度为 v ,则所需吸收的动能为 $E = 0.5mv^2$ 。缓冲器压缩行程 S 应满足:平均缓冲力 $F_{avg} = E/S$,瞬时最大缓冲力不应超过轨道端部止挡焊缝或起重机端梁截面的许用载荷。液压缓冲器具有恒力缓冲特性,其节流孔

设计使缓冲力在全行程内基本恒定,对结构冲击最小^[2]。建议在高速大车运行机构中优先采用液压缓冲器。缓冲器的选型应留有20%~30%的余量,以应对超速运行或误操作情况。

2.2 机械式减速触发装置

电气行程开关存在故障或人为短接的风险。可设置纯机械式减速触发装置:在轨道端头前5~10米处安装楔形斜面块,大车端梁下方对应位置安装滚轮与推杆。当大车行至减速区时,滚轮沿斜面上升,推杆通过杠杆机构联动脚踏制动阀或机械制动器拉杆,强制降低运行速度。该装置独立于电气系统,在电气失控时可作为最后一道防线。

2.3 止挡装置的强度冗余设计

轨道端部止挡应采用铸钢或焊接箱型结构,其抗剪切强度应不低于起重机按额定速度碰撞时所产生的冲击力的1.5倍。止挡与轨道的连接螺栓应进行防松处理(如采用防松垫圈或穿销固定)。大车端梁上应设置与止挡高度匹配的撞头,撞头与端梁的连接焊缝必须进行无损探伤检测。

3 防斜拉与防过载机械保护技术

3.1 滑轮组式防斜拉机械限位器

在起升滑轮组的平衡梁或吊钩横梁处安装机械式偏摆检测装置。当吊钩发生斜拉时,钢丝绳拉力偏离铅垂方向,使平衡梁产生横向位移。设置一个弹性对中机构:平衡梁通过中心回转轴支承,四周由均布的螺旋弹簧约束^[3]。正常垂直起吊时,弹簧变形量对称;斜拉时,梁体向一侧偏移,偏移量超过设定阈值(例如5mm)时,梁体边缘的斜面凸台推动顶杆,顶杆通过钢索拉动安装在卷筒附近的机械式离合器脱开,切断动力输入轴与卷筒之间的扭矩传递。该装置响应速度快,无需外接电源,是电气超载限制器的理想后备保护。

3.2 测力环式机械超载保护

在钢丝绳固定端(例如楔形接头与平衡梁的连接销轴处)串入一个环形测力元件。该元件由高强度弹性钢制成,内部开有径向槽。当载荷超过额定值的110%时,弹性环的径向变形超过安全余量,触发一个锁止销从环体侧壁弹出,卡入固定在结构上的棘齿条内,直接锁住卷筒或制动轮。这种直接机械联锁不存在信号转换延迟,可在超载瞬间立即响应。

3.3 卷筒钢丝绳多层缠绕防乱绳机械控制

钢丝绳在卷筒上多层缠绕时,下层绳受压变形易导致上层绳切入缝隙造成乱绳或卡绳。机械控制措施包括:(1)在卷筒外壳上安装排绳器,利用丝杠与螺母的螺

旋传动实现钢丝绳的轴向有序排列;(2)设置压辊装置,压辊通过弹簧始终压紧最外层钢丝绳表面,防止跳槽;(3)在卷筒端板处安装机械式圈数计数器——端板内侧面加工出与钢丝绳节距匹配的凸轮型面,每缠绕一圈,凸轮推动一个棘轮步进一次,当棘轮累计步进超过允许的最大缠绕圈数时,棘轮上的挡块直接阻挡卷筒传动齿轮,实现机械限圈。

4 轨道与车轮接触安全控制技术

4.1 车轮轮缘与轨道侧面的间隙控制

轮缘与轨道头侧面之间的名义间隙通常为5~10mm。间隙过大会加剧蛇行运动,间隙过小则易产生啃轨。安全控制要求:两侧车轮的平行度偏差每米长度内不得超过0.5mm;同一段梁上两车轮的同位度偏差不得超过3mm。应定期测量并调整车轮轴承座下的调整垫片,使车轮踏面中心与轨道中心线对齐。

4.2 机械式防脱轨装置

在车轮外侧或内侧安装防脱轨钩板。该钩板呈L形,一端固定于车轮轴箱体,另一端延伸至轨道上翼缘下表面下方约5mm处。当车轮轮缘因轨道变形或大梁挠曲而骑上轨顶时,钩板会钩住轨道下沿,阻止进一步脱轨。钩板的强度需按车轮垂直反力的30%~50%校核,且其与轨道下沿的接触面应镶嵌耐磨铜衬套。

4.3 均衡梁式载荷分配机构

四轮或八轮小车常因轨道不平整或车轮制造误差导致个别车轮悬空或过载。采用均衡梁(摇杆)机构实现各车轮的载荷均衡分配。例如,两对车轮安装在一根可绕中心销轴摆动的均衡梁两端,当一侧轨道凸起时,该侧车轮上升,均衡梁摆动,使另一侧车轮载荷自动增加,维持总接触压力恒定^[4]。均衡梁的摆动角度受限位块限制,防止摆动幅度过大导致车轮脱离轨道。该机构可显著减少车轮打滑和异常磨损。

5 钢结构疲劳监测与机械加固技术

5.1 关键焊缝的机械式裂纹监测

在跨中下翼缘板与腹板的角焊缝、端梁转角处等应力集中区域,粘贴预先施加了初始应力的脆性玻璃条或金属箔片。当裂纹扩展至该区域时,基体变形会使脆性条断裂或箔片电阻发生变化。更简单可靠的方案是安装机械式位移放大机构:将两根引伸杆的端部分别焊接在焊缝两侧,引伸杆的另一端连接一个指针与刻度盘。裂纹张口位移经杠杆放大10~30倍后在表盘上显示,操作人员可定期目视读取数据。当累计位移超过0.2mm时即应进行焊缝修复。

5.2 主梁下挠的机械补偿与报警

主梁在长期使用后会产生塑性下挠,影响小车运行平稳性和制动器安装位置精度。可以在主梁下翼缘板下方沿纵向布置一根张紧的钢丝绳或钢带,钢丝绳一端固定于主梁端部,另一端悬挂一个重锤。下挠变形使钢丝绳松弛,重锤下落。重锤杆上设置两个行程挡块:当下挠量达到跨度的1/700时,第一个挡块触发机械敲击铃发出警示音;达到1/500时,第二个挡块推动一个棘爪卡入小车轨道的制动齿条,强制限制小车运行速度。这种纯机械监控方式不依赖电子传感器,可靠性高。

5.3 局部加强的机械加固方法

当检测到疲劳裂纹或刚度不足时,可采用机械加固措施:在裂纹末端钻止裂孔(孔径6~10mm),然后覆盖补强板,补强板与母材通过高强度螺栓摩擦型连接,螺栓预紧力按设计值的70%~80%施加,避免产生附加弯矩。对于下挠严重的主梁,可采用预应力拉杆加固法:在主梁下方增设圆弧形钢拉杆,拉杆两端锚固于主梁端部下翼缘,中间通过张紧螺栓施加预拉力,产生向上的反拱,抵消部分下挠变形。

6 安全限位与机械互锁系统

6.1 蜗轮蜗杆式机械高度限位器

传统的重锤式高度限位器易受钢丝绳摆动影响。可采用蜗轮蜗杆减速机构:在卷筒轴端安装一个蜗杆,带动蜗轮旋转,蜗轮轴上安装一个凸轮组。卷筒每转一圈,凸轮转过一个固定角度。凸轮按预定高度位置(例如吊钩上极限和下极限)加工出凹槽。当凸轮旋转至凹槽对应位置时,一个滚轮落入凹槽,通过连杆机构释放一个锁止爪,锁止爪直接卡住卷筒制动盘或减速器输入轴上的棘轮,实现机械限位。该装置不依赖任何电气元件,且定位精度高。

6.2 龙门架式联锁限位

在桥架与检修平台之间的通道门、司机室门以及栏杆出入口处安装机械联锁装置:门关闭时,联锁推杆压紧一个弹簧储能的棘爪,允许运行机构动作;门一旦打开,推杆撤离,棘爪在弹簧力作用下弹出,卡入大车或小车传动轴上的棘齿盘内,阻止运行。同时,棘爪的位移通过连杆拉动起升机构制动器的常闭弹簧,实现辅助制动。这种机械联锁比电气行程开关更加可靠,因为不

存在触点氧化或线路断裂的问题。

6.3 大小车十字互锁

在某些狭长厂房中,小车运行至主梁端部时可能与正在运行的大车端梁发生干涉。机械式十字互锁方案:在小车端梁侧面安装一个可伸缩的楔形挡块,挡块由小车运行位置凸轮控制。当小车进入距离大车轨道端头1米范围内时,凸轮推动楔形挡块向下伸出,挡块插入大车端梁上预设的梯形槽中,阻挡大车继续向同一方向移动。同时,挡块上的斜面将垂直运动转换为水平运动,通过拉线释放大车制动器,使大车减速。该互锁完全由机械几何约束实现,响应速度极快。

7 结语

本文基于机械系统动力学与结构强度理论,系统研究了桥式起重机的安全运行控制技术,提出六大核心结论:起升机构应采用常闭制动器力矩匹配模型与双制动冗余机制,并配备磨损指示装置;运行机构需结合液压缓冲器、机械减速触发与冗余止挡,形成多级动能吸收体系;防斜拉与防过载宜优先选用滑轮偏摆检测、测力环离合器等纯机械方案,降低对电气系统的依赖;轨道安全需通过控制轮轨间隙、加装防脱轨钩板及均衡梁实现啃轨抑制;钢结构疲劳监测可借助机械式裂纹位移计、下挠重锤报警与预应力拉杆进行低成本在线感知;此外,蜗轮蜗杆限位器、门联锁棘爪等机械互锁系统构成不依赖电力的最终防线。上述技术应根据起重机工况、环境及故障历史灵活组合,并辅以基于量化指标的定期维护,摒弃经验管理。未来可探索机械安全装置与动态载荷监测融合及轻量化下的冗余设计。

参考文献

- [1]董志军.桥式起重机运行防倾覆安全控制技术研究[J].现代制造技术与装备,2025,61(5):201-203.
- [2]周亮.桥式起重机检验检测技术与安全评估措施分析[J].现代工业经济和信息化,2023,13(2):214-215+219.
- [3]马丽.桥式起重机安全管理问题与优化策略研究[J].当代化工研究,2021,(12):64-65.
- [4]方镇斌,姚志敏.冲压车间桥式起重机吊装作业安全性提升研究[J].锻造与冲压,2026,(10):45-49.