

CASEI

中国特种设备检验协会标准

T/CASEI XXXXX-XXXX

起重机械 安全状况评估 实施指南

Lifting appliances—Safety condition assessment—Practical guidance

（征求意见稿）

20XX-XX-XX 发布

20XX-XX-XX 实施

中国特种设备检验协会发布

目 次

前 言 II

1 范围 1

2 规范性引用文件 1

3 术语和定义 1

4 确定评估对象 2

 4.1 评估需求分析 2

 4.2 成立评估小组 2

 4.3 达成评估意向 2

5 收集评估对象信息 2

 5.1 概述 2

 5.2 评估依据 2

 5.3 静态信息 2

 5.4 动态信息 3

6 确定起重机械限制 3

 6.1 确定使用限制 3

 6.2 确定空间限制 3

 6.3 确定时间限制 4

 6.4 确定其他限制 4

7 划分评估单元 5

8 危险识别 5

9 风险估计准备 5

10 风险估计 6

11 评估对象的综合安全状况等级判定 6

12 风险评价 7

13 评估报告 7

前 言

本文件按照GB/T 1.1-2020给出的规则起草。

本文件由中国特种设备检验协会提出并归口。

本文件负责起草单位：

本文件参加起草单位：

本文件主要起草人：

本文件为首次发布。

起重机械 安全状况评估 实施指南

1 范围

本文件给出了按照T/CASEI 62001-2019对起重机械进行安全状况评估的实施指南，描述了评估过程中每一步有关的方法、工具的应用示例。

本文件适用于在用起重机械的安全状况评估。

本文件的预定使用者是从事起重机械安全评估工作的特种设备执业从业人员。

2 规范性引用文件

下列文件对于本文件的应用是必不可少的。凡是注日期的引用文件，仅所注日期的版本适用于本文件。凡是不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

GB/T 1591 低合金高强度结构钢

GB/T 3811 起重机设计规范

GB/T 15706 机械安全 设计通则 风险评估与风险减小

GB/T 16856 机械安全 风险评估 实施指南和方法举例

GB/T 22696.1-2008 电气设备的安全 风险评估和风险降低 第1部分：总则

GB/T 7826-2012 系统可靠性分析技术 失效模式和影响分析（FMEA）程序（IEC 60812:2006, IDT）

T/CASEI 62001-2019 起重机械 安全状况评估

3 术语和定义

T/CASEI 62001界定的以及下列术语和定义适用于本文件。

3.1 委托方 Clients

可以是起重机械生产单位、业主单位、使用单位等。

3.2 实际误用 Practical misuse

不按设计要求、安全技术操作规程和现行相关法律法规标准规定使用起重机械。

3.3 风险准则 Risk criteria

评估人员与委托方共同确认，用作风险评价和风险减小的依据。

注：风险准则可源于相关法律法规标准、国家和地方政策及企业安全管理需求等。

4 确定评估对象

4.1 评估需求分析

4.1.1 分析评估对象是否符合本文件的评估范围。

4.1.2 分析评估情形是否符合T/CASEI 62001-2019中的4.2。

4.1.3 分析评估需求被满足的可实现性，包括技术可实现性、评估机构的能力水平、评估人员的人身安全风险可接受程度、评估费用等。

4.2 成立评估小组

根据T/CASEI 62001-2019中的4.3和委托方的评估需求，评估机构应成立评估小组。评估小组应由不少于3名具备相应资质和专业技术能力的评估人员组成。如评估对象情况复杂、评估需求较高，评估小组的人员数量可适当增加。

4.3 达成评估意向

评估小组通过沟通问询、资料查阅、实地查勘等形式，对评估对象和评估需求进行充分了解分析，结合自身专业技术能力、规避安全风险能力及经济利益目标，与委托方达成评估意向。

5 收集评估对象信息

5.1 概述

评估人员通过沟通问询、资料查阅、实地查勘等形式收集评估对象信息，包括但不限于评估依据、静态信息和动态信息等。

5.2 评估依据

5.2.1 现行相关有效的法律、法规、规范、标准；

5.2.2 委托方的评估需求及相关管理制度；

5.2.3 评估对象的设计文件（图纸、技术参数、安装及使用维护保养说明、设计预期使用寿命等）。

5.3 静态信息

5.3.1 评估对象的结构外观、实际使用寿命、作业环境、工况条件、工作用途、工作特点等；

5.3.2 评估对象的维护保养记录、维修改造记录、检验检测记录、健康状况概况等。

5.4 动态信息

评估对象处于运行状况下应收集的相关信息，包括功能可实现性、安全保护装置的有效性、作业现场的适宜性等。

6 确定起重机械限制

根据T/CASEI 62001-2019中的5.4，起重机械限制包括使用限制、空间限制、时间限制和其他限制。这一步的操作主要考虑到起重机械在使用过程中，其实际操作使用方法、作业空间、使用年限、维保周期、检验检测检查周期、环境温湿度、防爆要求等是否满足现行法律法规标准和设计要求。

6.1 确定使用限制

6.1.1 概述

该步操作主要是通过查阅待评估起重机械的评估依据（包括现行相关有效的法律法规标准、设计文件等），识别出其关于待评估起重机械的功能描述、操作要求等方面的有关规定，也就是“预定使用”，并通过观察法、访谈法、问卷法等方式获取实际使用方法、操作习惯等信息，识别出其中的“实际误用”，并将二者进行一一比较确认的过程。如对应某一项“预定使用”，存在“实际误用”，则该起重机械发生危险事件造成伤害的概率会有所提高；如不存在“实际误用”，危险事件造成伤害的概率不受影响。

6.1.2 使用限制因素

使用限制因素包括功能用途，使用管理制度，操作人员条件，维保人员条件，吊运要求，吊运空间内地面作业人员数量及其掌握现场危险程度，动作操控习惯，超载情况，超速情况等。

6.2 确定空间限制

6.2.1 概述

该步操作主要是通过查阅待评估起重机械的评估依据（包括现行相关有效的法律法规标准、设计文件等），识别出其关于待评估起重机械的安装地点海拔高度、作业空间环境（室内/室外）、安全运行空间、维保空间等方面的有关规定，并通过观察、试验、测试、测量等方法获取待评估起重机械的实际空间限制条件。如实际空间限制条件不满足评估依据有关规定，则该起重机械发生危险事件造成伤害的概率会有所提高；否则，危险事件造成伤害的概率不受影响。

6.2.2 空间限制因素

空间限制因素包括安装地点海拔高度、作业空间环境（室内/室外）、与周围障碍物或出入区之间的距离、小车行程范围、大车行程范围、起升高度（下降深度）范围、馈电裸滑线与周围设备的距离、起重机与架空电线电缆的距离、吊运物离地面或地面物体的距离等。

6.3 确定时间限制

6.3.1 概述

该步操作主要是通过查阅待评估起重机械的评估依据（包括现行相关有效的法律法规标准、设计文件等），识别出其关于待评估起重机械的整机及结构或零部件的设计预期寿命、检验检测检查周期、维保周期等相关规定，并通过查阅资料、沟通交流等方式获取实际的使用年限、检验检测检查记录、维保记录等时间限制条件。如实际时间限制条件不满足评估依据有关规定，则该起重机械发生危险事件造成伤害的概率会有所提高；否则，危险事件造成伤害的概率不受影响。

6.3.2 时间限制因素

时间限制因素包括起重机械的使用时间、各机构的运转时间、各结构件的总使用时间、机械零件的总使用时间、电气设备及其零部件的使用时间、液压系统及其零部件的使用时间、机械零部件定期润滑情况、起重机械定期检验检测情况、起重机械定期自行检查情况、起重机械定期维保情况等。

6.4 确定其他限制

6.4.1 概述

该步操作主要是针对在露天沿海环境、易燃易爆环境、高温环境、低温环境、有色金属电解车间环境等特殊场合使用的待评估起重机械，通过查阅待评估起重机械的评估依据（包括现行相关有效的法律法规标准、设计文件等），识别出其关于上述特殊场合使用的相关规定，通过观察、测量、沟通交流、查阅资料等方式获取实际的其他限制条件。如该限制条件不满足评估依据有关规定，则该起重机械发生危险事件造成伤害的概率会有所提高；否则，危险事件造成伤害的概率不受影响。

6.4.2 其他限制因素

其他限制因素包括供电电源、环境温度、环境湿度、环境酸碱度、风力、爆炸环境类别及区域等级、冲击电流、电磁干扰性等。

7 划分评估单元

该步操作适用于评估对象为起重机械整体或局部复杂系统，考虑到其结构庞杂、功能复杂，不便于直接进行后续的危险识别、风险估计操作，按照结构特点或功能相关性将其进行逐级分解。根据T/CASEI 62001-2019中的5.5，可将待评估对象细分至2~3级，甚至更多级别。

8 危险识别

8.1 概述

该步骤是对评估对象的危险源进行全面识别，目标是形成一份包含危险、危险状态和危险事件的清单，该清单可给出在何种危险状态下何种情况发生会导致伤害。危险识别的方法主要包括自上而下法和自下而上法两大类。

注：这里的“上”指的是伤害，或者说是危险事件发生引起的直接潜在后果；“下”指的是危险。

自上而下法，是从伤害追溯到危险。针对每一项伤害，均需核查评估对象的每个结构件、零部件及每个功能运行过程是否存在相应危险。常用的自上而下法有故障树分析（FTA）等。

自下而上法，是以所有的危险为起点，考虑在所确定的危险状态下所有可能发生的异常不期望状况及导致的伤害。常用的自下而上法有失效模式和影响分析(FMEA)，失效模式、影响及危害性分析(FMECA)，安全检查法（SR），安全检查表分析法（SCA），故障假设分析法（WI），事件树分析（ETA）等。

8.2 方法举例

8.2.1 采用FMECA进行危险识别、风险估计示例

FMECA（Failure Modes, Effects and Critical Analysis）即：失效模式、影响及危害性分析，是对系统进行分析，以识别潜在失效模式、失效原因及其对系统性能（包括组件、系统或过程的性能）影响的系统化程序。附录 A 为采用 FMECA 对抓斗卸船机进行危险识别、风险估计的示例。

9 风险估计准备

9.1 概述

该步骤是通过外观检查、尺寸测量、应力测试、计算分析、仿真分析等多种测试测量检测方法对危险源的风险状况进行逐一确认，作为后续风险估计的依据。

9.2 方法举例

9.2.1 采用计算仿真分析对金属结构进行风险估计准备

通过计算仿真分析可以掌握金属结构全局的受力状况，得到应力、变形的分布，获得的数据对于确定现场重点检查部位，应力测点的布置，评估缺陷发展和结构剩余寿命等具有重要意义。附录B是采用计算仿真分析对金属结构进行风险估计准备示例。

9.2.2 采用应力测试对金属结构进行风险估计准备

应力测试是通过测量特定点的微应变确定材料的应力应变分布规律及应力集中状况，从而判断结构或构件的强度储备，验证结构或构件设计的合理性。工程上常用的应力测试方法有电测法、光纤光栅法、振弦式应变测量等。附录C是采用电测法对金属结构进行应力测试的示例。

10 风险估计

10.1 概述

该步骤主要是运用数值评分法、风险矩阵法、风险图法等工具确定每种危险源的风险等级的过程。风险由伤害的严重程度和发生概率两个要素组成。风险等级由“伤害的严重程度”和“伤害的发生概率”不同等级的组合来确定的。

10.2 方法举例

附录D为采用风险图法对电气系统进行风险估计的示例。风险图以决策树为基础，图中的每个节点代表一个风险参数（严重程度、暴露、危险事件发生的概率、避免的可能性等），节点的每个分支代表参数的一个等级（例如，轻微程度或严重程度），对于每个危险状态，每个参数都分配一个等级。风险图的路径最终指向一个与选择的等级组合相关的风险指数。

11 评估对象的综合安全状况等级判定

11.1 概述

该步骤主要是基于危险源的风险等级赋值，通过T/CASEI 62001-2019中5.9.2的公式（2）、（4），分别计算得到各个评估单元及整体评估对象的安全状况得分，从而判定各评估单元的安全状况等级和评估对象的综合安全状况等级。评估项目的权重值 α_i 由各评估项目在其所在的评估单元中的功能重要程度及失效后果确定，评估单元的权重值 β_j 由各评估单元在评估对象中的功能重要程度及失效后果综合考虑确定。

11.2 举例

附录E是以一台铸造起重机为评估对象，给出了风险估计及综合安全状况等级判定示例。

12 风险评价

该步骤根据评估对象的综合安全状况等级，向委托单位提出相应的风险减小措施建议，并按T/CASEI 62001-2019中的5.10给定的原则，给出评估结论。

13 评估报告

T/CASEI 62001-2019中的参考附录E给出了报告格式。评估人员也可根据评估对象的具体特点和委托方的需求，做出相应的调整。

附录A

(资料性附录)

评估示例

——采用FMECA进行危险识别、风险估计示例

本次评估对象为一家发电厂的 1 台 1100t/h 的桥式抓斗卸船机，设计预期寿命 15 年，已投入使用 16 年，主要用于从靠港码头的船舱中装卸燃煤，其基本技术参数见表 A.1。

表 A.1 评估对象技术参数信息

跨度	18m	工作级别	A6	额定起重量	22t
起升速度	150m/min		起升高度	22.5m	
小车运行速度	210m/min		大车运行速度	20m/min	

A.1 划分层次

根据桥式抓斗卸船机的结构和作业特点，可将其分为金属结构、起升机构、俯仰机构、小车行走机构、大车行走机构、电气系统、安全保护装置等七个结构部分，并对各个结构部分进行了二级分解。详见图 A.1。

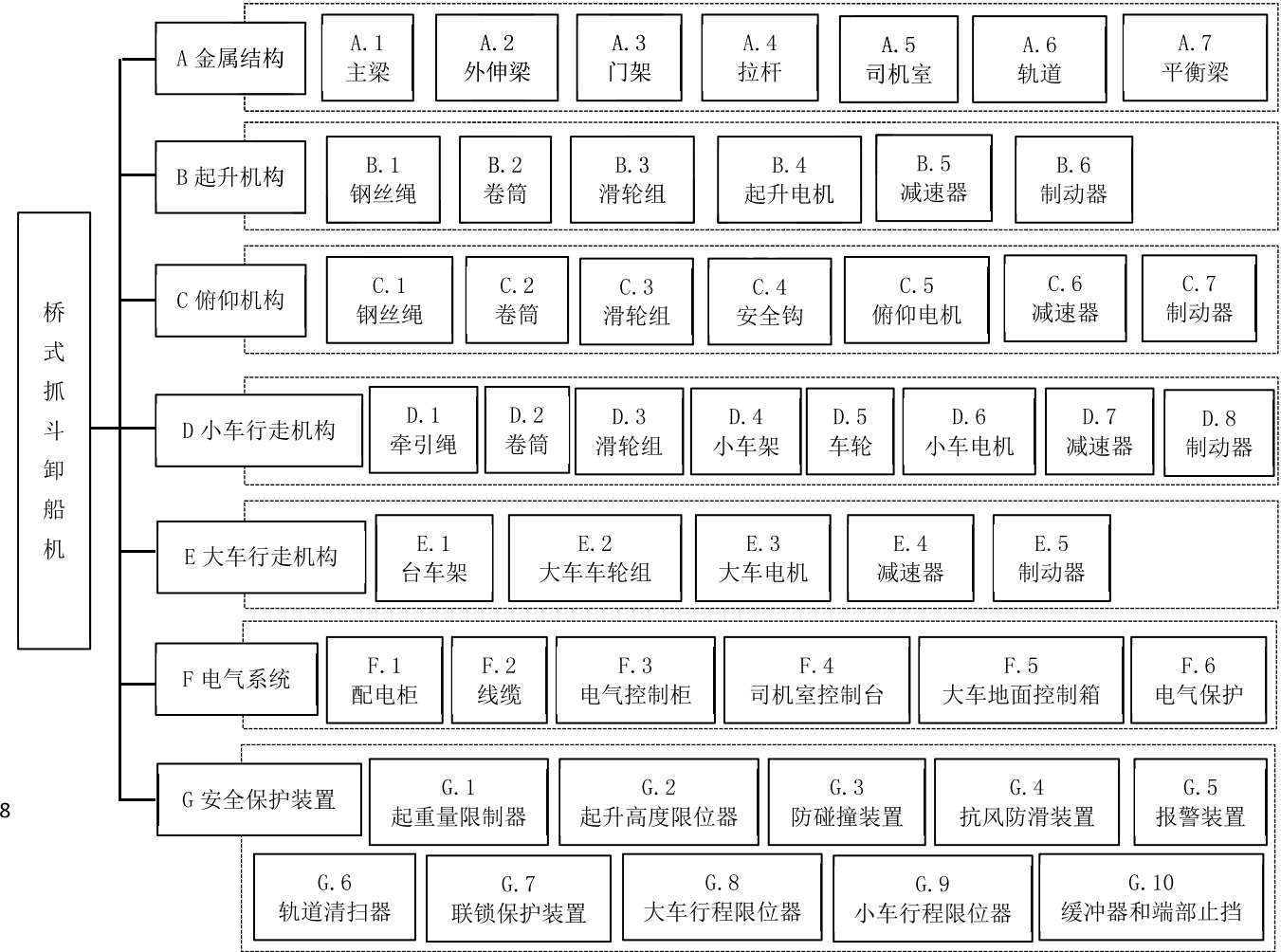


图 A.1 评估对象层次划分框图

A.2 失效严酷度、发生概率等级及风险等级的划分

FMECA 中一般采用风险优先数 RPN 定量表示失效造成的危害性，其可用失效严酷度和失效发生概率的乘积来表示。根据 RPN 的数值大小，可以作为判定风险等级和采取风险减小措施的参考依据。表 A.2 是失效严酷度、发生概率的等级划分情况，表 A.3 是根据 RPN 数值划分风险等级。

表 A.2 失效严酷度、发生概率等级划分

失效严酷度	等级赋值	失效发生概率	等级赋值
失效影响可忽略，不影响起重机继续使用	1	极少发生	1
不会造成事故隐患，会增加维护保养成本	2	很少发生	2
不会直接造成事故隐患，如叠加其他触发因素，可导致事故隐患	3	可能发生	3
直接造成一般事故隐患，导致起重机运行不畅、安全性降低，如叠加其他触发因素，可导致严重事故隐患	4	很有可能发生	4
直接造成严重事故隐患，导致人员伤亡、起重机整体报废	5	极有可能发生	5

表 A.3 根据风险优先数 RPN 确定风险等级

风险等级	风险优先数 RPN
极低	≤ 5
低	$5 < \text{RPN} \leq 10$
中	$10 < \text{RPN} \leq 15$
高	$15 < \text{RPN} \leq 20$
极高	≥ 25

A.3 风险评估结果

根据桥式抓斗卸船机各结构部分的失效机理、历史统计事故数据以及现场勘查得到的危险状态，对该评估对象的风险评估结果如表 A.4 所示。

表 A.4 FMECA 用于桥式抓斗卸船机的风险评估统计表

序号	结构名称	失效模式	失效原因	失效概率	失效严酷度	RPN	风险等级
1	金属结构	拉杆断裂	拉杆锈蚀	3	4	12	中
2		拉杆和主梁连接失效	拉杆和主梁连接板直接存在 1 处裂纹、多处锈蚀	4	5	20	高
3		主梁断裂	主梁各连接处多处锈蚀	3	5	15	中
4		主梁上走台断裂	走台锈蚀	3	3	9	低

5		主梁走台栏杆断裂	走台栏杆锈蚀	5	3	15	中
6		主梁与司机室连接失效	主梁与司机室连接处锈蚀	4	5	20	高
7	起升机构	制动器失灵	制动器液压推动杆液压管套开裂	4	5	20	高
8	电气系统	断电	电缆老化	3	4	12	中
9		漏电	电缆老化 电气控制箱锈蚀	3	4	12	中
10		金属结构接地失效	金属结构跨接线拆除	5	4	20	高
11	安全保护装置	缓冲器失效	缓冲器老化	5	4	20	高

根据上述风险评估结果得知，该评估对象存在高风险 5 项、中风险 5 项、低风险 1 项。使用单位应停止使用，针对中高风险采取相应的风险减小措施，确保其安全运行。

附录B

(资料性附录)

——采用计算仿真分析对金属结构进行风险估计准备示例

B.1 数据获取

设计仿真需要以一定的数据为基础，仿真的准确性是与数据的完整性紧密相关的。数据来源包括设计图样、检验检测报告、维修记录和安全监控记录等。通常在安全评估前，应向委托评估方了解原始资料的情况，尽可能收集到完整的数据。

如果没有可用的数据资料，可以采取实际测量的方式来收集数据，存在的问题是只能获得当前的设备的状态。

如果需要进行结构寿命计算，还需要设备的载荷历史数据，一般可以从安全监控系统中调取，如果无法获得，可以在一段时间内对设备正常工作工况进行统计分析，结合设备使用年限获得整个历史数据。

B.2 实体建模

B.2.1 箱型结构

箱型结构是起重机械常见的一种结构型式，具有制造工艺简单、组装方便、通用性强、便于自动焊、抗扭刚度好等优点。箱型梁截面由上、下翼缘板及腹板构成，截面形式通常是矩形或梯形，如图 B.1 所示。

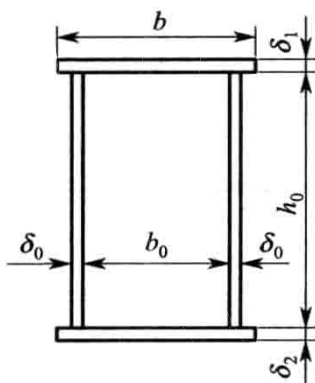


图 B.1 箱型结构示意图

B.2.1.1 梁单元建模

对于细长结构，比如起重机主梁、支腿、臂架梁等结构，不考虑应力集中时，采用梁单元建模比较适合。下文均以 ANSYS 计算平台为例进行介绍。典型的梁单元如图 B.2 所示，节点自由度为 UX, UY, UZ, ROTX, ROTY, ROTZ，即 XYZ 三个方向的平动和绕轴转动。

在为线模型划分网格时，以关键点确定的单元坐标系来确定截面方向，如图 B.2 所示，单元节点 I 到 J 为 X 方向，也就是线方向，关键点 K 定义 Z 方向，最后根据右手定则，确定 Y 方向。

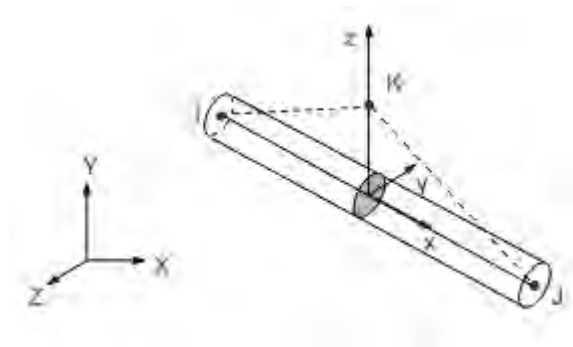


图 B.2 节点三维梁单元

梁单元建模过程是先建立线模型和截面形状，如图 B.3、B.4 所示，然后定义关键点确定单元坐标系及截面的方向，最后将对应的截面属性赋予相应的线，划分网格即可。划分网格后可以打开显示模型的外形特征的选项，用以检查截面设置是否正确，如图 B.5 所示。

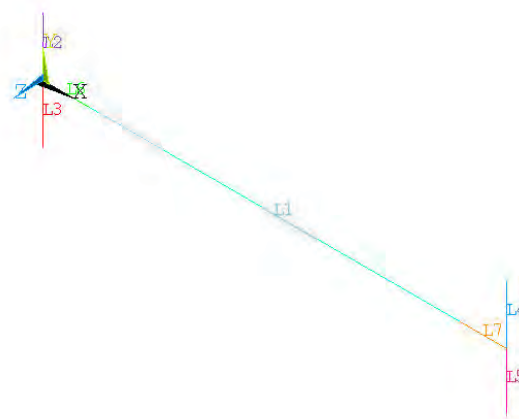


图 B.3 电动单梁起重机线模型

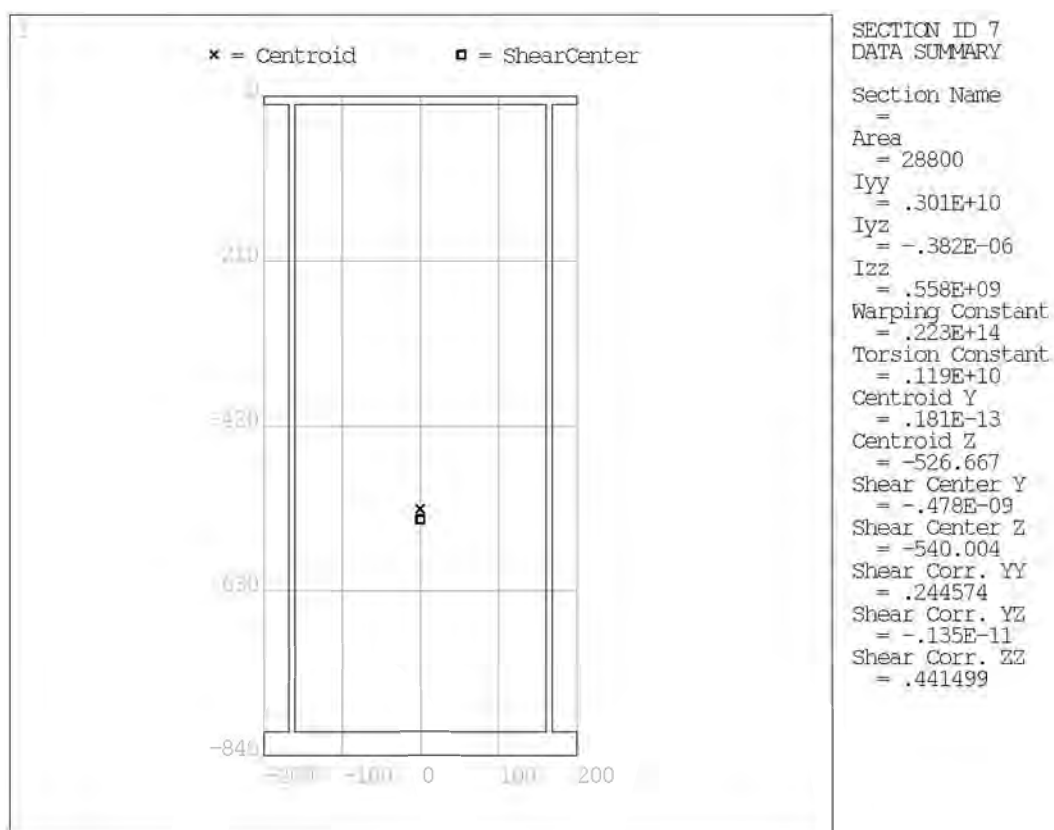


图 B.4 主梁截面形状

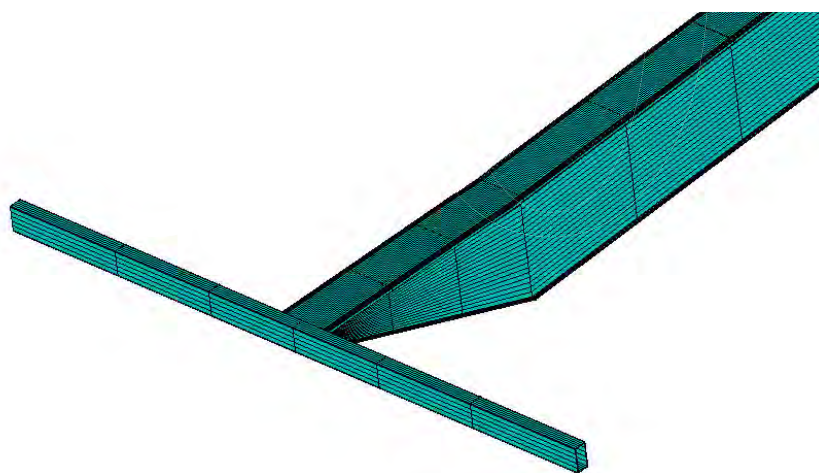


图 B.5 起重机结构梁单元有限元模型（显示截面特性）

梁单元模型完成后，特别需要注意检查截面的方向要与实际结构一致，经常会发生如图 B.6 所示的错误情形，图中左边立柱和右边立柱截面方向设置有误，计算结果也是错误的。

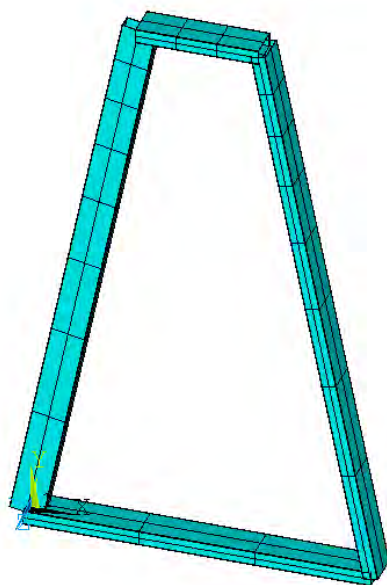


图 B.6 单元方向设置错误的门式起重机支腿梁单元模型

B.2.1.2 板壳单元建模

对于由板材焊接而成的起重机金属结构，采用板壳结构建模是另一种方案，计算结果反映的细节比梁单元模型更多，同时计算量比三维实体单元要小。常用的 4 节点三维空间板壳单元如图 B.7 所示，节点自由度为: UX, UY, UZ, ROTX, ROTY, ROTZ，即绕 XYZ 三个方向的平动和绕轴转动。

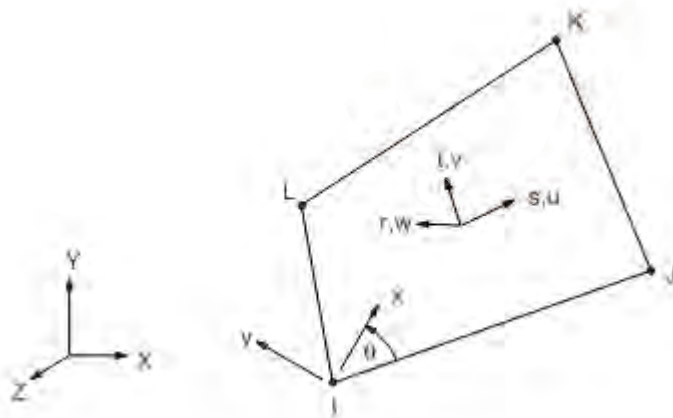


图 B.7 节点空间板壳单元

板壳单元建模方法一般有两种，一种方法是直接建立面结构，另一种方法是先建立实体模型，然后通过抽取中面的方式得到面结构。前一种方法适应于结构比较规则、简单的情形，如图 B.8 所示，后一种方法适应的情形为：已经在其它三维建模软件中建立了完整的三维实体模型，需要采用板壳单元进行划分网格计算。

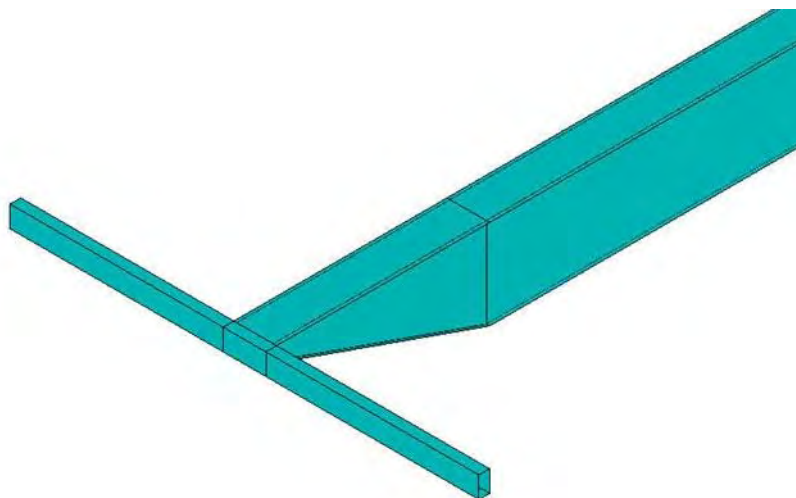


图 B.8 起重机结构板壳模型

与梁单元类似，在模型划分网格后并赋予厚度数据后，可以显示板材的厚度特征。

B.2.1.3 三维实体单元建模

三维实体单元建模需要在建模平台上按照起重机械实际结构尺寸，忽略无需关注的细节，建立三维模型，然后采用实体单元划分网格。典型的三维实体空间单元如图 B.9 所示，节点自由度为 UX, UY, UZ ，即 XYZ 方向的平动。

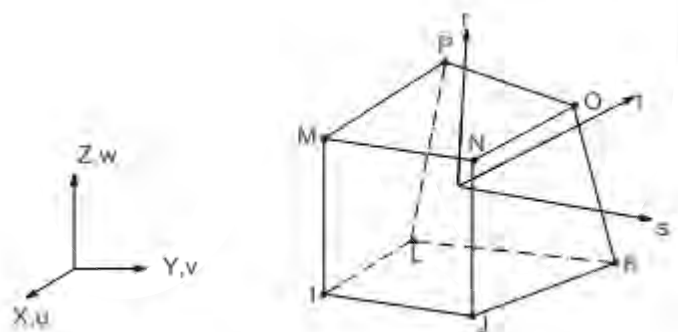


图 B.9 节点三维空间实体单元

由于起重机械的结构主要是板材拼焊而成，结构特点决定了采用板壳单元分析已经能得到比较高精度的结果，采用三维实体单元分析只会增加计算量，对精度不会有大的提高，因此只有必要时才采用三维实体单元建模，比如需要研究焊缝应力应变分布，轮压作用点的应力应变分布。如图 B.10 所示，是电动单梁起重机主梁的局部三维实体有限元模型，目的是研究局部轮压对结构强度和稳定的影响。

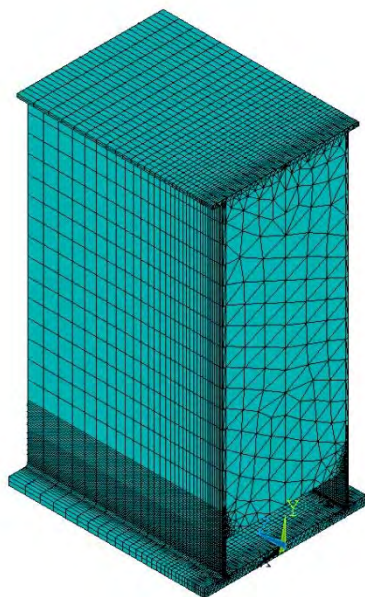
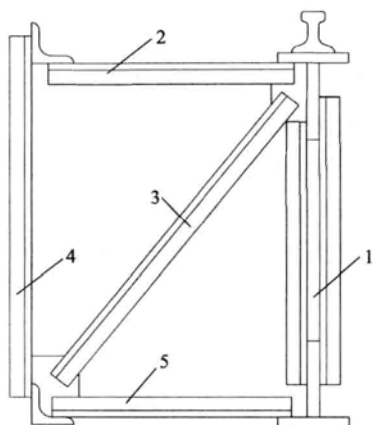


图 B.10 起重机局部结构三维实体有限元模型

三维实体单元建模需要考虑结构细节比较多，模型相对复杂，因此一般是在专业的建模软件中建立实体模型，再导入有限元模型中进行网格划分等操作。

B.2.2 桁架结构

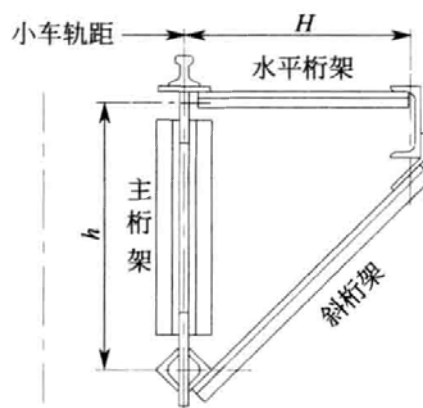
桁架结构是起重设备另一种常见的结构型式，具有自重轻、迎风面积小、维修方便等特点，如图 B.11 所示。



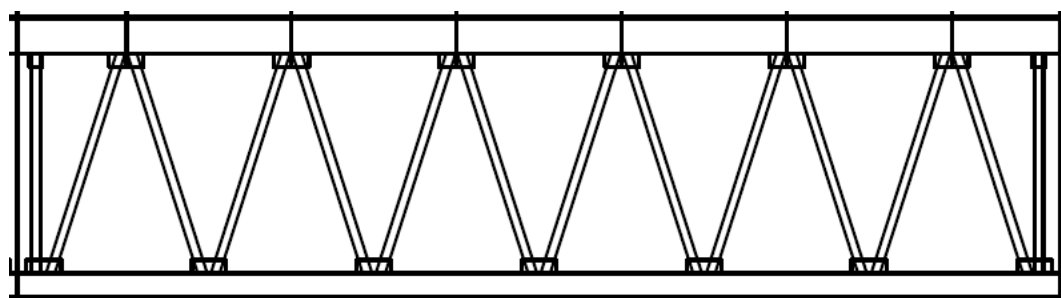
(a) 四桁架式双梁门式起重机主梁截面（单根）

1-主桁架；2-上水平桁架；3-斜撑杆；

4-副桁架；5-下水平桁架



(b) 三角形截面主梁截面



(c) 桁架正面结构

图 B.11 桁架结构示意图

B.2.2.1 杆单元和梁单元建模

桁架结构由许多杆件组成，通常可以用杆单元和梁单元建模，梁单元已介绍过，杆单元结构如图 B.12 所示，自由度为 UX, UY, UZ ，即 XYZ 方向的平动。与梁单元不同，杆单元只能传递轴向拉力和压力。

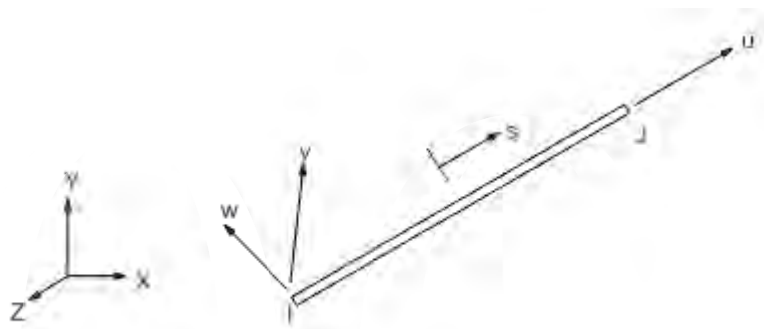


图 B.12 节点 3 维空间杆单元

常见的桥门式起重机主梁，为了提高承载力，桁架的上主弦杆和下主弦杆采用型钢组焊的结构，截面尺寸较大，既能承受拉力和压力，又能承受弯矩作用。而连接上下主弦杆的支撑杆，截面尺寸较小，可以看成只承受拉压的杆件。因此对桁架结构建模时，对上下主弦杆应采用梁单元建模，而其它次要杆件则可以采用杆单元建模。

建模方法与梁单元建模方法类似，先建立线模型，如图 B.13 所示。然后根据主弦杆的截面形状和尺寸，建立截面模型，如图 B.14、B.15 所示，最后划分网格，显示杆件结构，如图 B.16 所示

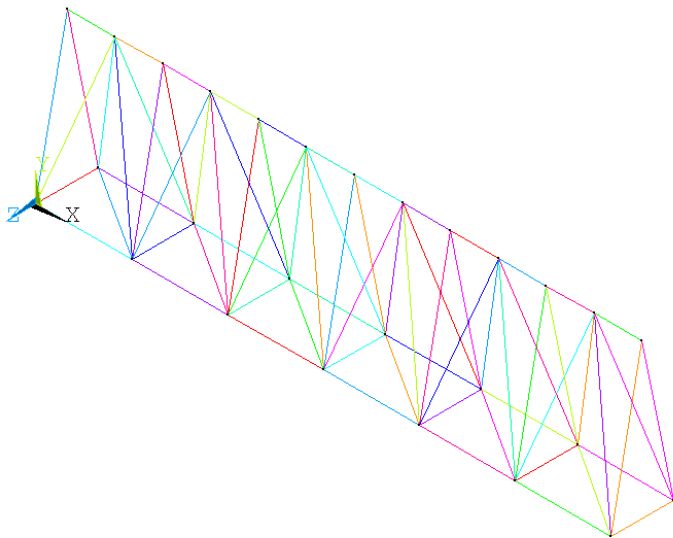


图 B.13 桁架起重机主梁线模型

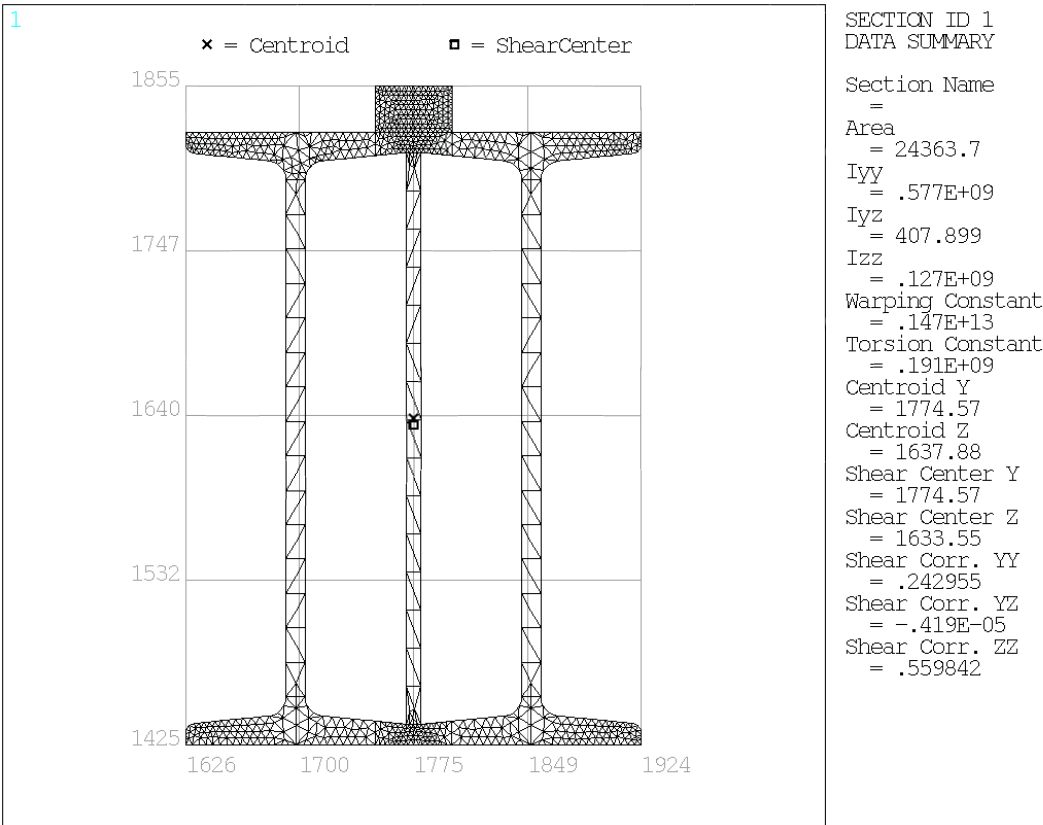


图 B.14 上主弦杆截面

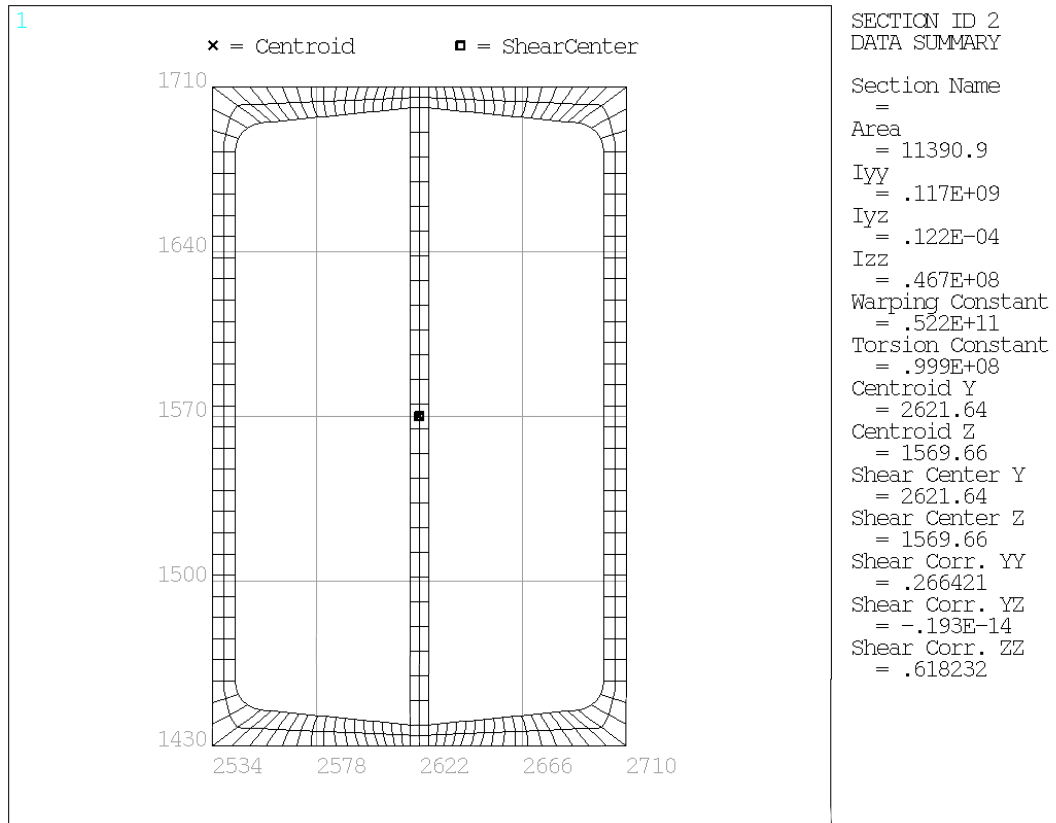


图 B.15 下主弦杆截面

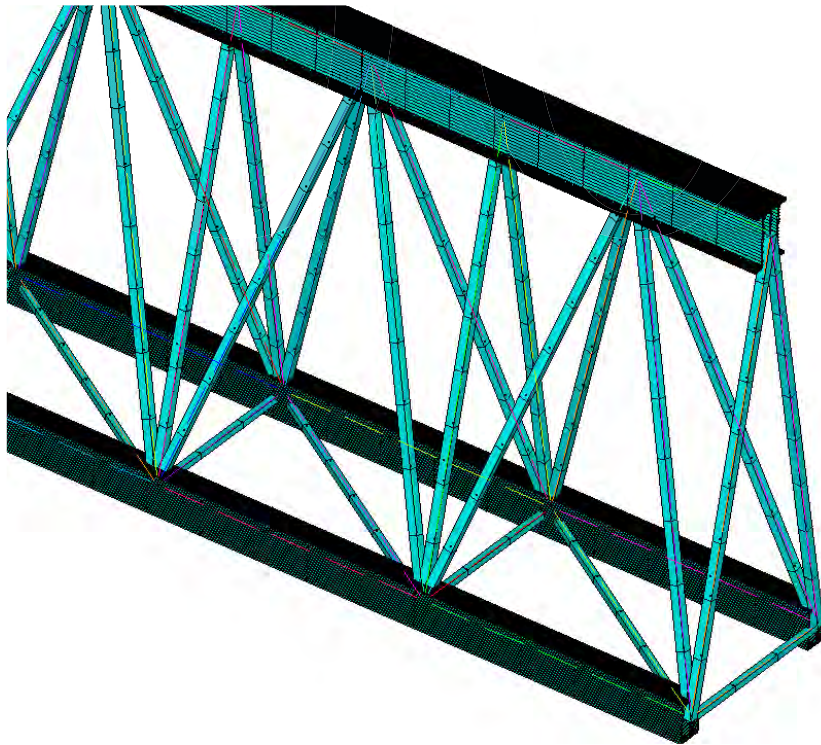


图 B.16 桁架结构主梁单元有限元模型

B.2.2.2 实体单元建模

与箱型结构类似，桁架结构三维实体单元建模方法也不常用，如果需要对局部进行受力分析，才需要建立三维实体单元模型，比如节点的局部受力，其建模方法与箱型梁实体建模类似，不再赘述。

B.3 边界条件设置

B.3.1 部件

对于桥式起重机和门式起重机，单独对主梁进行建模计算，一般可按简支梁设置。对于臂架类起重机，单独对臂架建模则需要根据实际约束来设置，至少要释放销轴处绕轴转动的自由度。

对于桥门式起重机的端梁和支腿，单独建模计算涉及与主梁之间的传力和自由度耦合，一般不建议单独建模计算。如果计算中需要重点考虑端梁和支腿，建议仍然建立整机模型，但是在主梁划分的网格时，单元划分得少些，这样既能达到计算准确的目的，又不会明显扩大计算规模。

B.3.2 整机

起重机整机的边界条件设置没有明确统一的规定，主要是根据车轮与轨道的约束关系和运行制动器的设置情况来进行自由度耦合。不同的自由度耦合组合计算结果不同，具体如何设置还是要根据计算目的、经验等因素来确定。图 B.17 给出了桥式起重机边界条件设置的示意图，在图中 D1~D4 和 X1~X6 设置自由度耦合。

表 B.1 给出了一种自由度耦合设置组合，考虑到大车车轮与轨道边缘有间隙，使得整个结构可以沿 X 方向移动，因此大车运行机构只耦合一侧横向（X）的自由度（D3、D4）；考虑到驱动轮带有制动轮而从动轮可以自由转动，纵向（Y）只耦合设置制动器的车轮（D2、D3）；上下方向（Z）均耦合；所有旋转自由度均不耦合。小车的边界条件（X1~X6）类似设置。设置结果如表所示，表中 0 表示不耦合该方向自由度（释放自由度），1 表示耦合该方向自由度（约束自由度）。

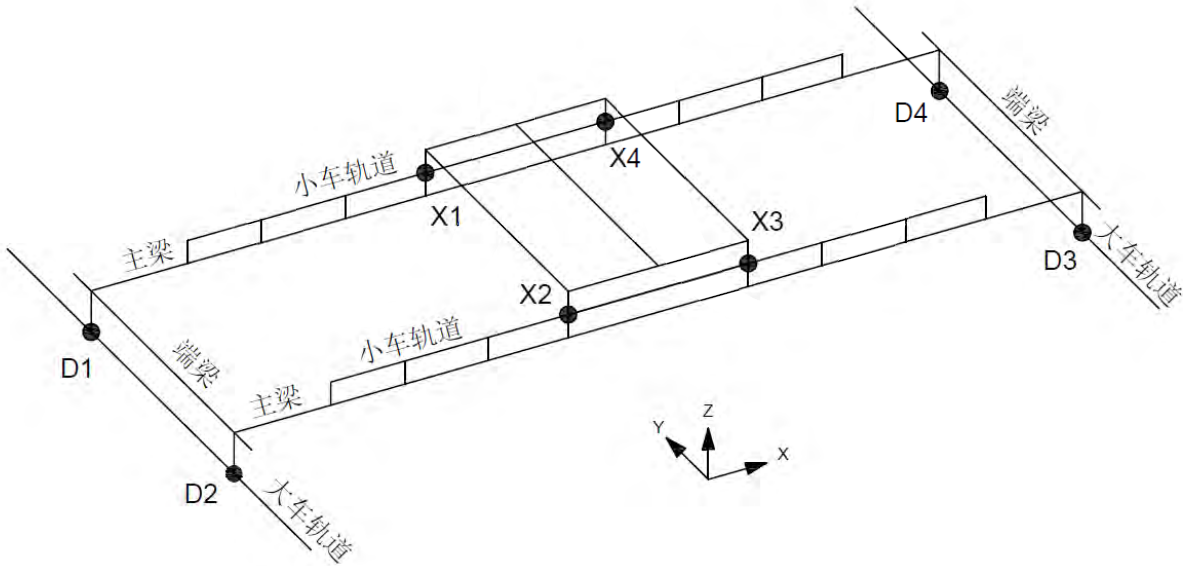


图 B.17 桥式起重机边界条件设置示意图

表 B.1 桥式起重机自由度耦合示例

节点		X 方向	Y 方向	Z 方向	ROTX	ROTY	ROTZ
小 车 机 构	X1	1	0	1	0	0	0
	X2	1	1	1	0	0	0
	X3	0	1	1	0	0	0
	X4	0	0	1	0	0	0

大 车 机 构	D1	0	0	1	0	0	0
	D2	0	1	1	0	0	0
	D3	1	1	1	0	0	0
	D4	1	0	1	0	0	0

B.4 实例

B.4.1 计算目的

确定一台通用桥式起重机 QD(16+16)t-31.5m A6 的刚度和强度是否满足规范要求。

B.4.2 主要参数

额定起重量：16+16t

跨度：31.5m

工作级别：A6

整机自重：55t

起升速度：1.2~12m/min

小车运行速度：4~40m/min，单电机集中驱动

大车运行速度：10~100m/min，八轮四台电机独立驱动

操作方式：司机室

B.4.3 载荷

自重载荷(不包括小车重量)：42.2t=413.6kN

小车自重：2×6.4t=125.4kN

起升载荷抬吊重量：32t=313kN

放大系数： $\phi_1=1.05$

起升载荷动载系数： $\phi_2=1.112$

运行冲击系数： $\phi_4=1.197$

B.4.4 材料及许用应力

起重机主要结构件钢板材质为 Q345-B，板材的屈服强度值与厚度有关，依据 GB/T 1591 得到表

B.2 所示的屈服强度值。

表 B.2 板材厚度与屈服强度的关系

厚度 (mm)	屈服强度 σ_s (MPa)
$0 < t \leq 16$	345
$16 < t \leq 40$	335

本示例计算点的板材厚度大于 16mm，因此按照 $\sigma_s=335$ (MPa) 计算许用应力，根据 GB/T 3811 得到 B.3 安全系数与许用应力的关系。

表 B.3 安全系数与许用应力

载荷组合	A	B	C
强度安全系数	1.48	1.34	1.22
许用应力 (MPa)	226	250	274

B.4.5 边界条件

这里简化小车机构，将吊重和小车自重以轮压的方式加载到主梁上。简化边界条件设置如图 B.18 和表 B.4 所示。

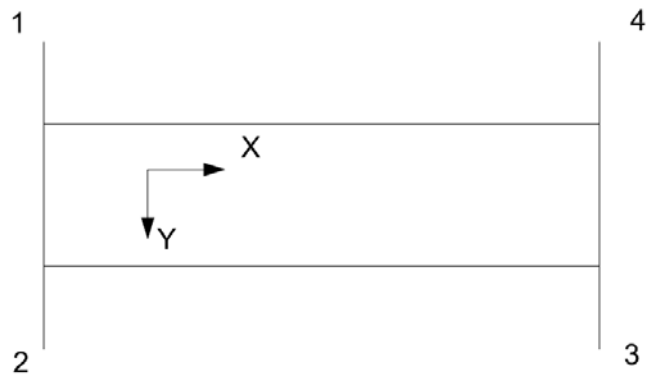


图 B. 18 简化边界条件
表 B. 4 边界条件的自由度耦合

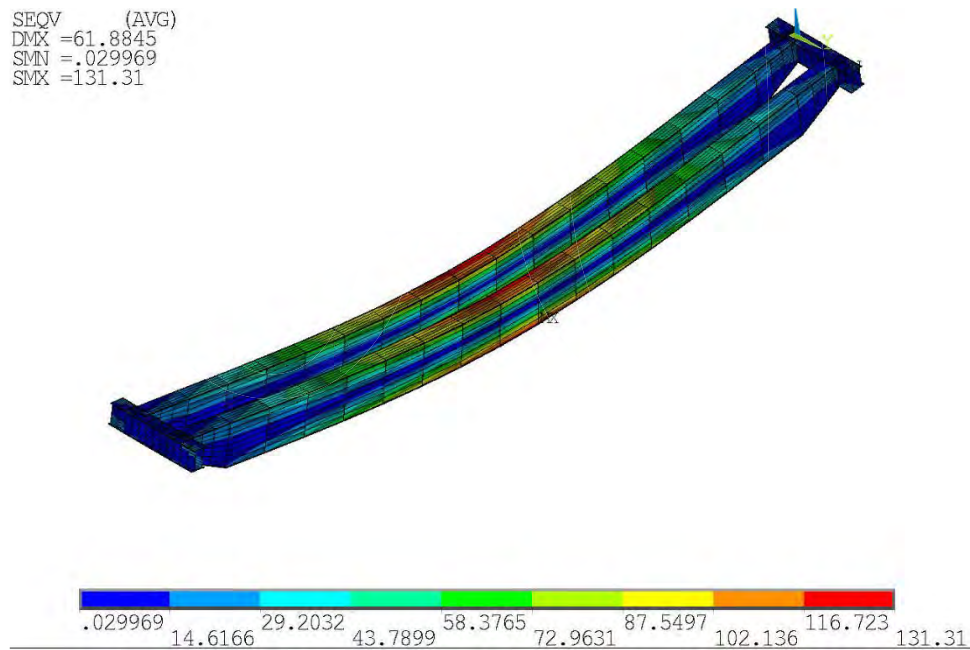
1	2	3	4
UZ=1	UY, UZ=1	UX, UY, UZ=1	UX, UZ=1

B.4.6 建模及结果

采用梁单元建模，具体方法见前文介绍。

B4.6.1 强度校核

加载最大静强度计算工况，计算结果如图 B.19 所示

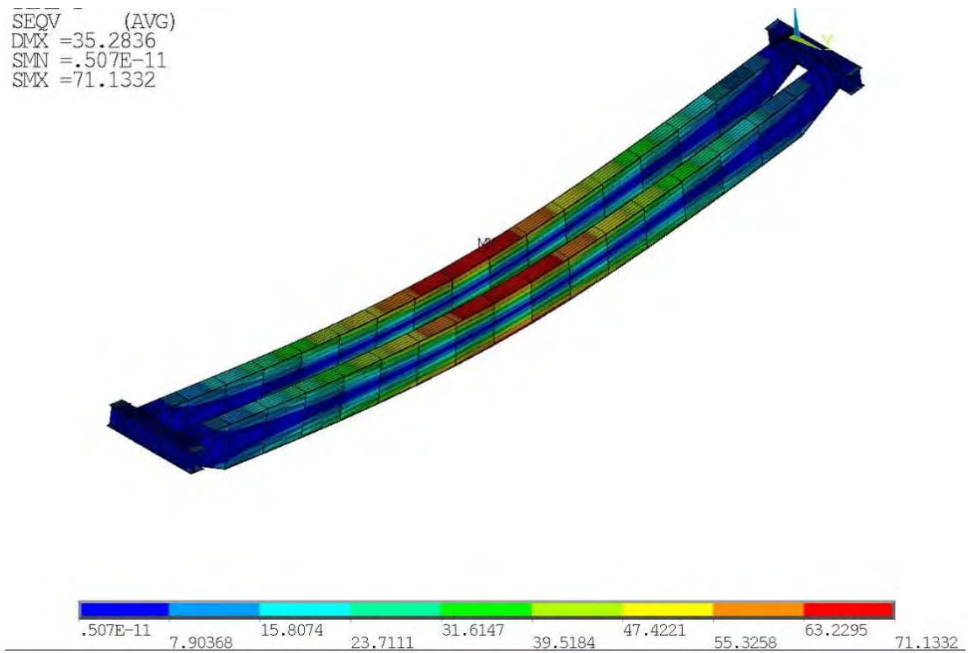


B.19 最大静强度工况计算结果

图中最大应力（SMX）为 131MPa，小于表 B.3 中的许用应力值，因此强度满足要求！

B4.6.2 刚度校核

加载刚度的计算工况，计算结果如图 B.20 所示。



B.20 刚度计算工况结果

从图中可以看到，最大变形（DMX）为 35mm，按照 TSG Q7016-2016 要求，对于设计文件没有规定刚度要求的情况，A6 级桥式起重机的刚度不大于 $S/800$ ，S 为跨度，本例实际计算为 $35/31500 < S/800$ ，因此刚度满足要求！

附录C

（资料性附录）

——采用应力测试对金属结构进行风险估计准备示例

电测法，即使用电阻应变片的测量方法，因为技术成熟，操作方法简单，成本低，精度满足工程要求，在起重机金属结构应力测试中应用最普遍。本示例就电测法进行介绍。

C.1 应力测试点的选择

C.1.1 构件选择的原则

1. 主要受力结构件；
2. 曾经发生过破坏的构件；
3. 经检查发现，存在明显缺陷的构件。

C.1.2 截面的选择原则

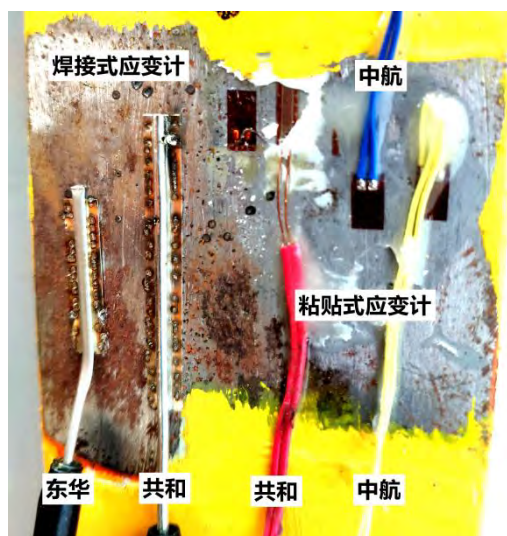
1. 结构设计文件中提及的应力较大的截面；
2. 在受力分析中载荷较大的截面；
3. 便于计算和分析的，具有代表性的截面；
4. 在满足测量目的的前提下，测量截面以少不宜多，以突出重点，提高效率，保证质量；
5. 在现场实施应变计安装工作时方便的，安全的截面；
6. 对结构与受力一样的对称性构件的截面，可以一边构件为主，另一边构件的对应位置上适当布置一些校核监测测点，以保证监测的准确性。

C.1.3 截面上应变计布置的原则

1. 对于轴向受力构件，应变计可以在断面的上下或左右沿轴向方向布置；
2. 对于受弯构件，最大弯矩处断面的边缘或四角沿轴线布置；
3. 对于弯矩与轴向力共同作用的构件，断面边缘不少于四片沿轴向方向布置；
4. 对于少数重要应力监测点，应适当地布置一些校核测点（如贴双应变计），以便提高测量值得可靠性。

C.2 测试准备工作

电阻应变计的种类繁多，按照安装方法的差异可以分为：粘贴式电阻应变计、焊接式电阻应变计、喷涂式电阻应变计、埋入式电阻应变计。就针对工程中应用最多的粘贴式电阻应变计的安装方式进行详细介绍。



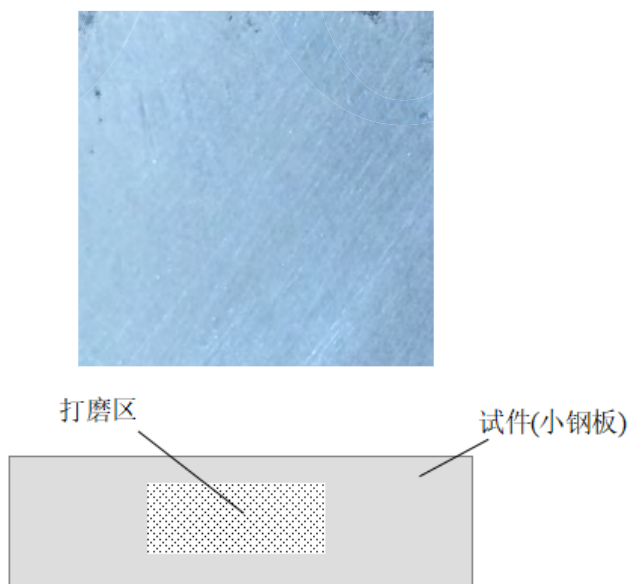
C.1 各厂家应变计示意图

C.2.1 检查和分选应变片

应变片粘贴前应对应变片进行外观检查和阻值测量。检查应变片敏感栅有无锈斑、基底和盖层有无破损，引线是否牢固等。阻值测量的目的是检查应变片是否有断路、短路情况，并按阻值进行分选，以保证使用同一温度补偿片的一组应变片的阻值相差不超过 0.1 欧姆。

C.2.2 粘贴表面的准备

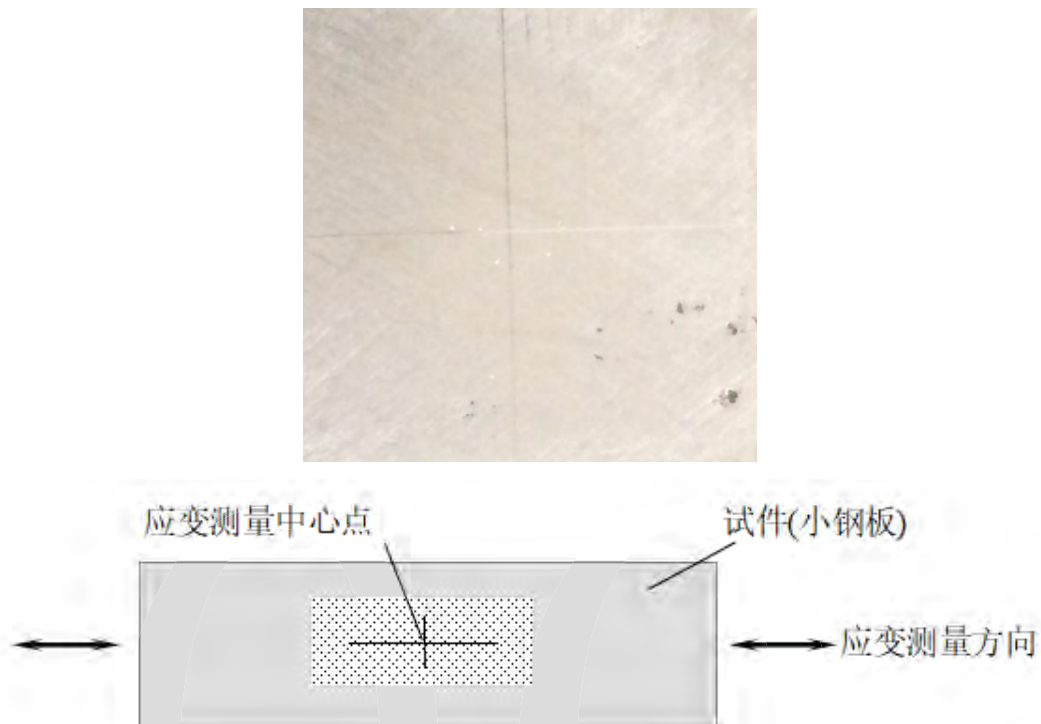
首先除去构件（或试件）粘贴表面的油污、漆、锈斑、电镀层等，用砂布交叉打磨出细纹以增加粘结力，接着用浸有酒精(或丙酮)的脱脂棉球擦洗，并用钢划针划出贴片定位线，再用细砂布轻轻磨去划线毛刺，然后再进行擦洗，直至棉球上不见污迹为止。



C.2 钢结构应变片粘贴处表面处理示意图

C.2.3 测点定位

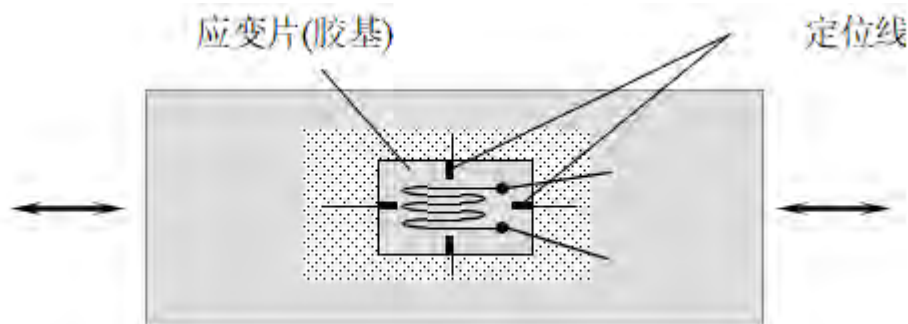
对于钢构件，要在试件上用钢板尺和划针画一个十字线(一根长，一根短)，十字线的交叉点对准测点位置，较长的一根线要与应变测量方向一致。



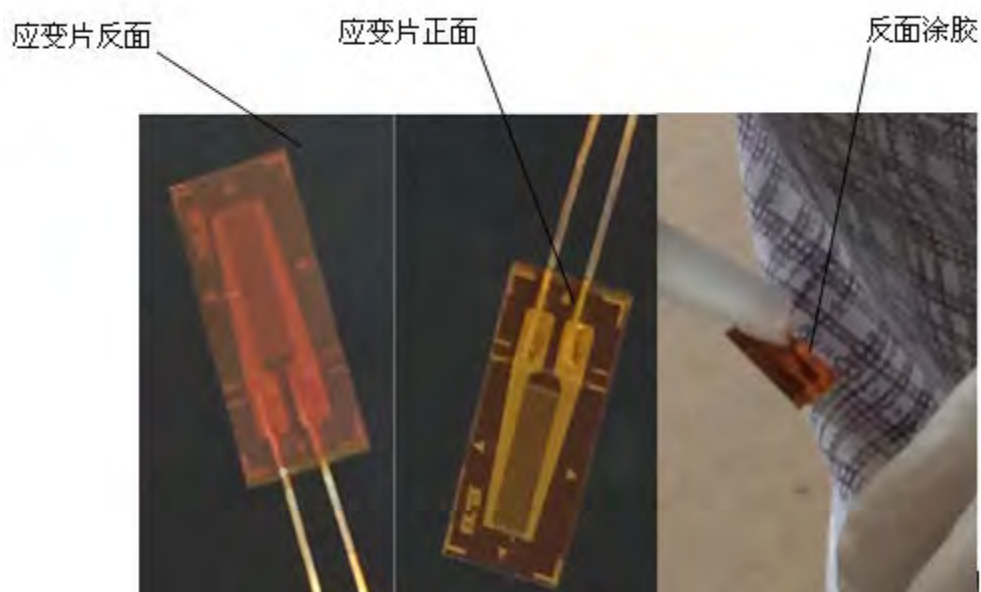
C.3 应变片定位示意图

C.2.4 应变片粘贴

分清应变片的正、反面(有引出线引出的一面为正面)，用左手握住应变片的引线，右手上胶，在应变片的粘贴面(反面)上匀而薄地涂上一层粘结剂(粘结剂应速干且适合长时间检测用)。待一分钟后，当胶水发粘时，校正方向(应变片的定位线与十字线交叉线对准，其电阻栅的丝绕方向与十字线中较长线的方向一致，即保证电阻栅的中心与十字交叉点对准，再垫上塑料薄膜，用手沿一个方向滚压 1~2 分钟即可。

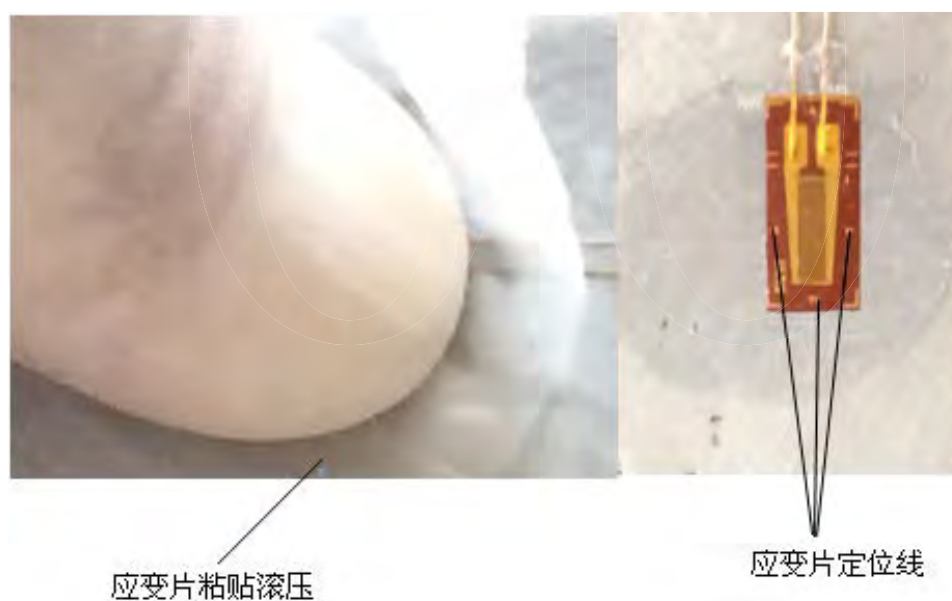


C.4 应变片粘贴示意图



C.5 应变片正面反面图

应变片粘贴完毕后的检查：应变片贴好后，先检查有无气泡、翘曲、脱胶等现象，再用数字万用表的电阻档检查应变片有无短路、断路和阻值发生突变(因应变片粘贴不平整导致)的现象，如发生上述现象，就会影响测量的准确性，这时要重贴。



C.6 应变片定位线图

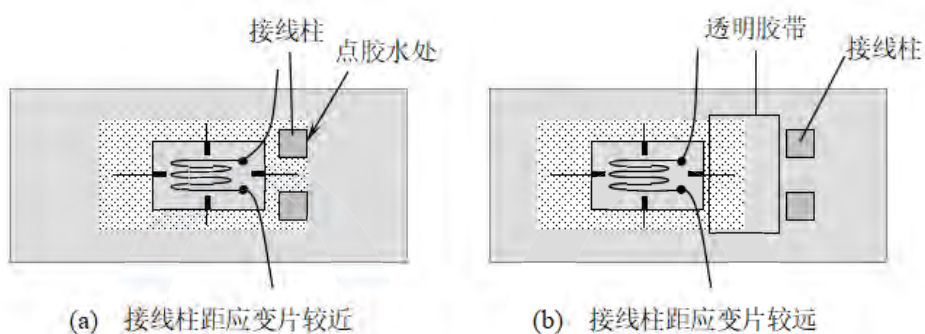
C. 2. 5 接线柱的粘贴

接线柱的作用是将应变片的引线与接入应变仪的导线连接上。用镊子将接线柱按在要粘贴的位置，然后滴一滴胶水在接线柱边缘，待一分钟后，接线柱就会粘贴在试件上。



接线柱定位与粘贴

接线柱薄膜指压



(a) 接线柱距应变片较近

(b) 接线柱距应变片较远

接线柱粘贴示意图

C.7 接线柱黏贴示意图

C. 2. 6 导线焊接

用电烙铁将应变片的引出线和导线一起焊接在接线柱上。

焊接要点：连接点必须用焊锡焊接，以保证测试线路导电性能的质量要求，焊点大小应均匀，不能过大，不能有虚焊。



导线焊接

焊接后的电阻测量

剪掉多余部分引线

C.8 导线焊接示意图

C.2.7 检查

对已充分固化并已联接好导线的应变片，在正式使用前必须进行质量检查。除对应变片作外观检查外，尚应检查应变片是否粘贴良好、贴片方位是否正确、有无短路和断路、绝缘电阻是否符合要求等。

C.2.8 应变计的防护

对照应变计布置方案，确认应变计使用的环境，如存在以下情况影响应变计使用，需要增加防护：

- 工作环境为露天且靠近江边，水汽重，必须经历日晒雨淋，耐得住腐蚀；
- 前后大梁作为检修通道，布置在大梁或通道附近的应变计及导线存在被误碰的可能；
- 在卸船机运行过程中钢丝绳会出现油被挤出飞溅的情况，部分位置会存在钢丝绳油飞溅的。

为了应对上述情况，采取了以下措施：

- 工作环境干燥整洁无其他影响时，如大梁内部，应变计涂抹 704 胶，用以防潮防锈，导线采用合格的屏蔽线。
- 如存在防潮、防锈、防油污、防误伤的需求，如部分卸船机拉杆位置，需要增加适当防护措施保护焊接式应变计及导线，如图所示。可以在应变片外侧增加防护罩并涂抹 704 胶，于构件之间存在相对运动的导线采用软管防护，其余穿入 4 分镀锌管。



C.9 应变计导线防护图



C.10 应变计导线防护图

C.3 数据处理（应变-应力换算）

用电阻应变计测出的是构件上某一点处沿某一方向的线应变，必须经过应变-应力换算才能得到主应力。不同的应力状态有不同的换算关系。下面讨论平面应力状态时的应变-应力换算关系。

C.3.1 单向应力状态

构件在外力作用下，若被测点为单向应力状态，则主应力方向已知，只有主应力 σ 是未知量，可沿主应力 σ 的方向粘贴一个应变片，测得主应变 ε 后，由虎克定律

$$\sigma = E\varepsilon$$

即可求得主应力 σ 。式中 E 为被测构件材料的弹性模量。

C.3.2 已知主应力方向的二向应力状态

如图 33 所示，受内压力作用的钢结构，其表面各点为已知主应力方向的二向应力状态，有主应力 σ_1 、 σ_2 两个未知量，可沿主应力方向，粘贴互相垂直的两个应变片（组成二轴 90° 应变花），测得主应变 ε_1 和 ε_2 ，由广义虎克定律

$$\sigma_1 = \frac{E}{1-\mu^2}(\varepsilon_1 + \mu\varepsilon_2)$$

$$\sigma_2 = \frac{E}{1-\mu^2}(\varepsilon_2 + \mu\varepsilon_1)$$

即可求得主应力 σ_1 、 σ_2 。式中 μ 为被测构件材料的泊松比。

C.4 测试实例

C.4.1 箱型结构示例

C. 4. 1. 1 卸船机的概况



C.11 抓斗卸船机外貌图

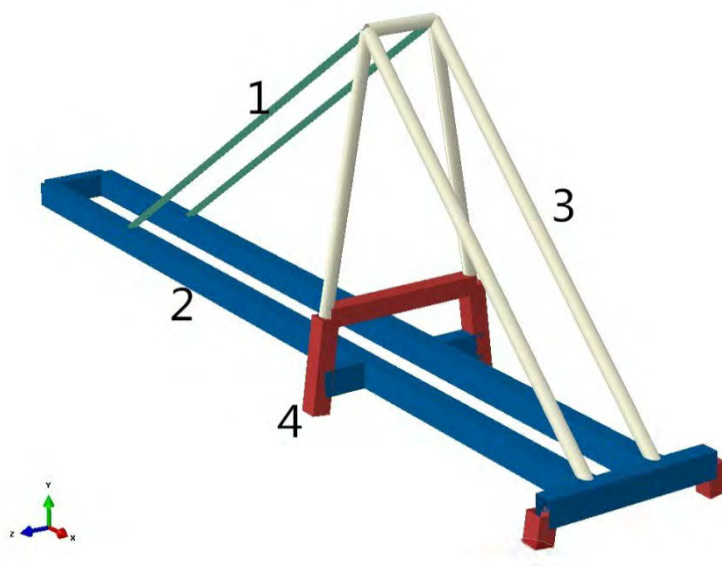
测试对象为一台抓斗卸船机，主要由金属结构、机构、电气控制系统组成，其金属结构主要有前后大梁、前后门架、前后拉杆等；机构主要有起升机构、大车行走机构、小车运行机构、俯仰机构；电气控制系统主要有供配电系统、驱动与控制系统、保护系统等。抓斗卸船机小车的驱动方式可分成自行式和牵引式，该卸船机小车驱动方式为牵引式。该起重机安装在码头轨道上，主要用于从船舱中抓取燃煤并通过自带的漏斗向码头输送机系统送料。其主要技术参数见表 C. 1。

表 C.1 卸船机主要性能参数

额定生产率	350t/h	小车运行速度	100m/min
额定起重量	10t	大车行走速度	20m/min
轨 距	10. 5m	最 大 轮 压	300kN
基 距	18m	主驾驶室移动速度	20m/min
工 作 风 压	≤250N/m2	非工作风压	≤1000N/m2
起升高度	14/14 m	抓斗起升速度	75/35 m/min
电 源	380V, 50Hz	大车行走轮数	16

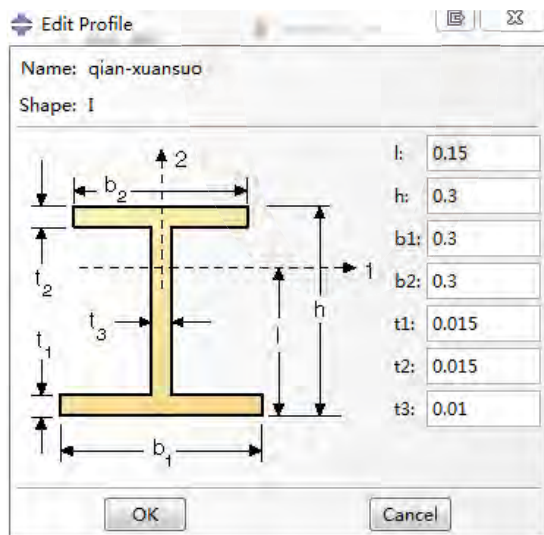
C. 4. 1. 2 卸船机技术结构有限元分析

参照卸船机竣工图，使用有限元软件 ABAQUS 建立卸船机有限元模型如 C. 12 所示。

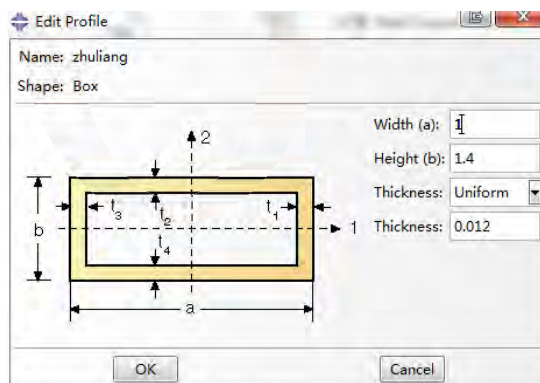


C.12 卸船机有限元模型

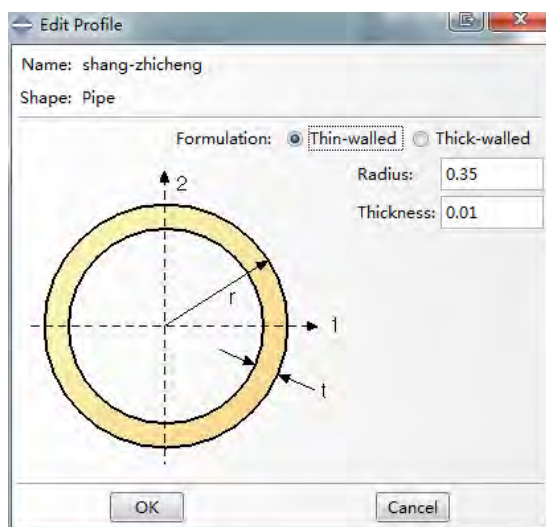
有限元模型中使用梁单元建立各部分模型，图中各部分颜色代表不同截面，截面尺寸如图 C. 13 所示。整体模型采用 kg、kN、m 单位建立。在四个支腿底部设置固支边界。整体模型采用 B31 梁单元进行网格划分，种子尺寸为 1m。



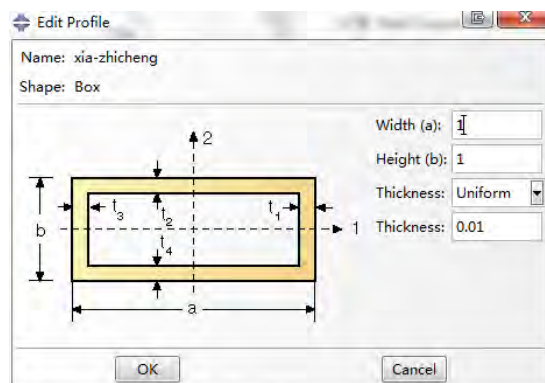
a) 截面 1



b) 截面 2



c) 截面 3



d) 截面 4

图 C.13 各部分截面尺寸

卸船机主体材料按最不利 Q235 计算，结合 GB/T 3811，材料许用应力见表 C. 2。

表 C.2 材料许用应力

材料	板厚/mm	屈服强度/MPa	安全系数/n	许用应力/MPa
Q235	≤16	235	1.34	175
Q235	16~40	235		168

考虑卸船机在抓取运输煤炭的过程中的最不利工况，计算 5 个不利工况，详细工况见表 C. 3。

表 C.3 卸船机计算校核位置

小车位置编号	以近水侧支腿为基点/m	位置说明
1	30	外伸距
2	25.5	前拉杆拉点
3	12.75	近水侧支腿横梁与前拉杆拉点的 1/2
4	0	近水侧支腿横梁
5	-14	内伸距

该卸船机的小车为牵引式小车，额定载荷为 22t，为了计算的方便不考虑小车及钢丝绳的自重，在小车对应位置横梁处设置集中载荷 220kN。

经过有限元计算，强度计算结果见表 C. 4。整体模型采用 kg、kN、m 为单位建立，所得应力结果单位为 kPa。

表 C.4 卸船机有限元强度计算结果

小车位置编号	最大等效力/MPa	最大等效力位置	许用应力/MPa
1	26.15	远水侧支腿	175
2	20.38	远水侧支腿	175
3	21.88	近水侧支腿横梁与前 拉杆拉点的 1/2	175
4	12.16	近水侧支腿与主梁的 连接处	175
5	13.80	远水侧支腿	175

卸船机整体应力云图如图 C.14～图 C.18 所示。

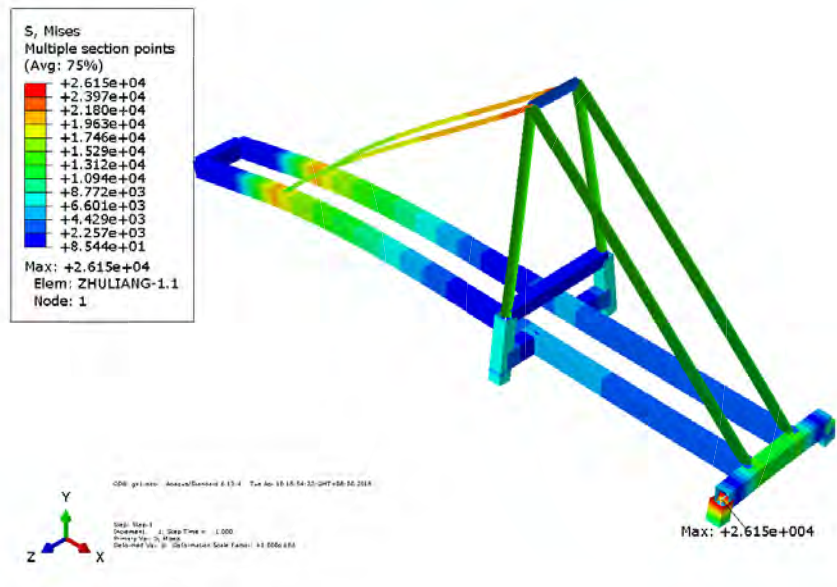


图 C.14 小车处于 1 号位置时的等效应力云图

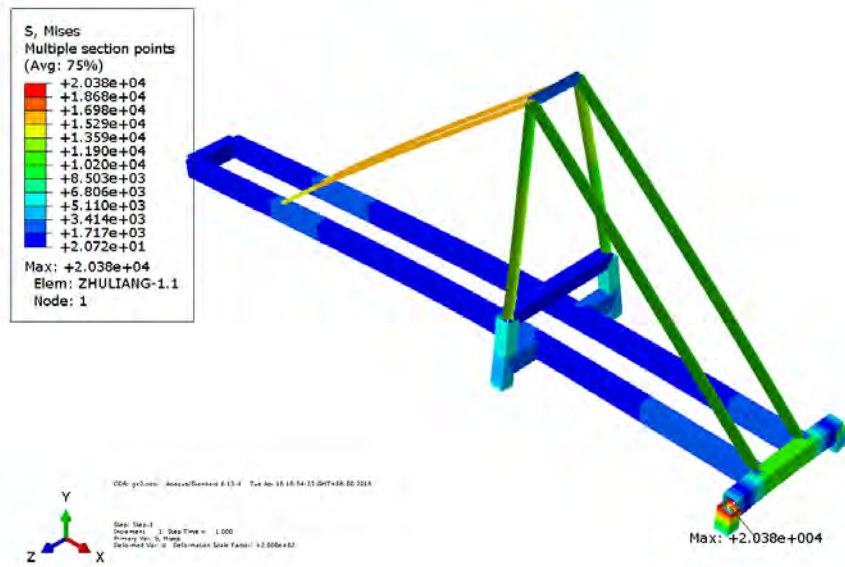


图 C.15 小车处于 2 号位置时的等效应力云图

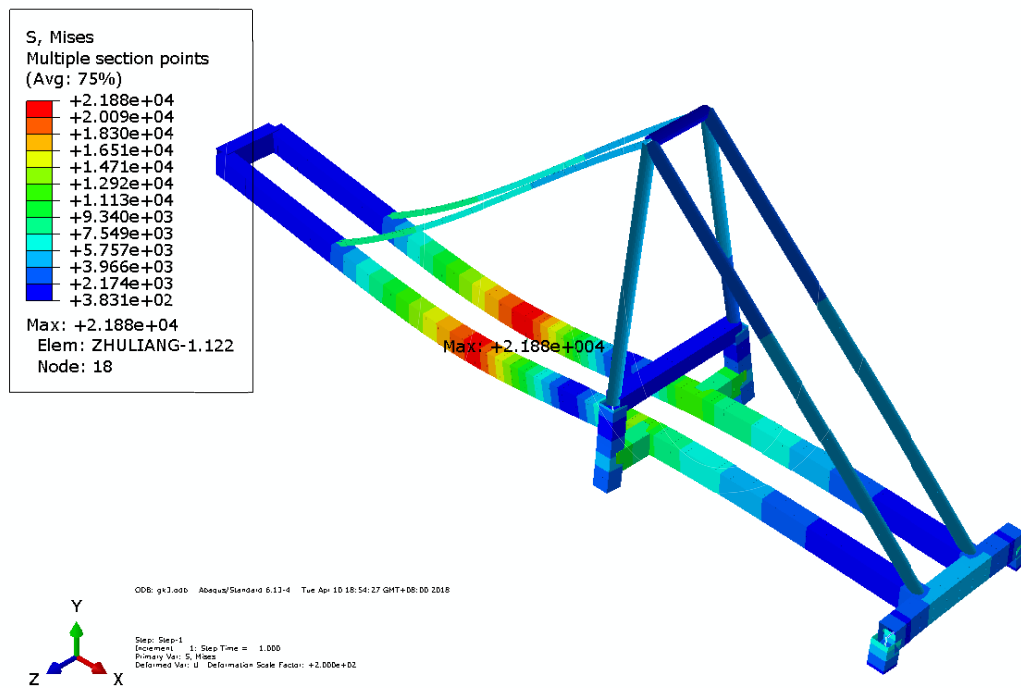


图 C.16 小车处于 3 号位置时的等效应力云图

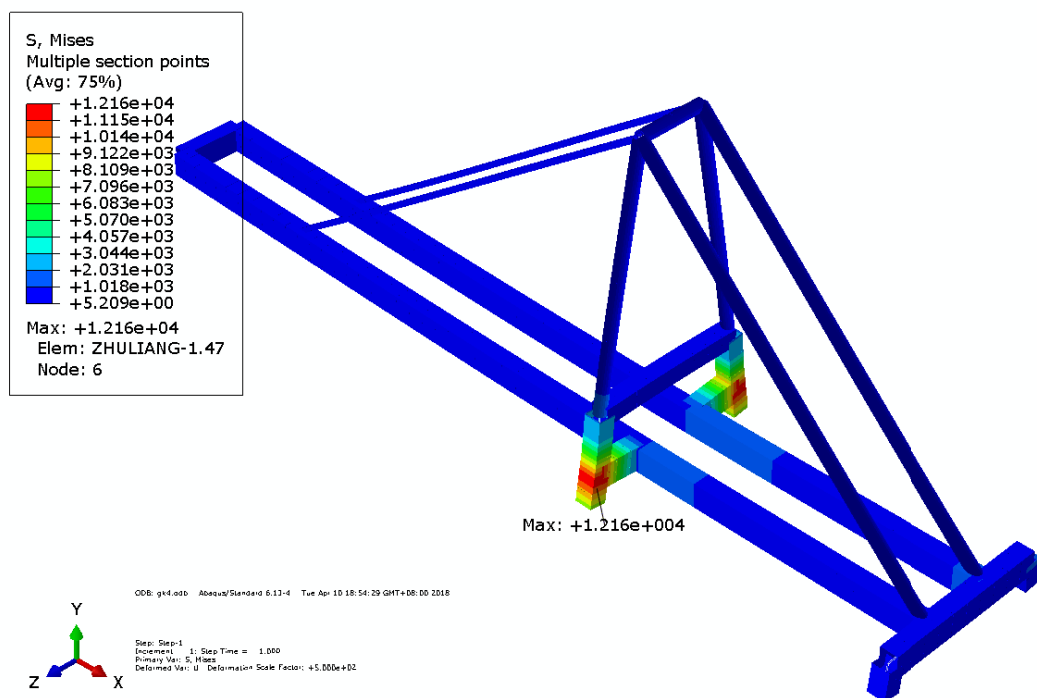


图 C. 17 小车处于 4 号位置时的等效应力云图

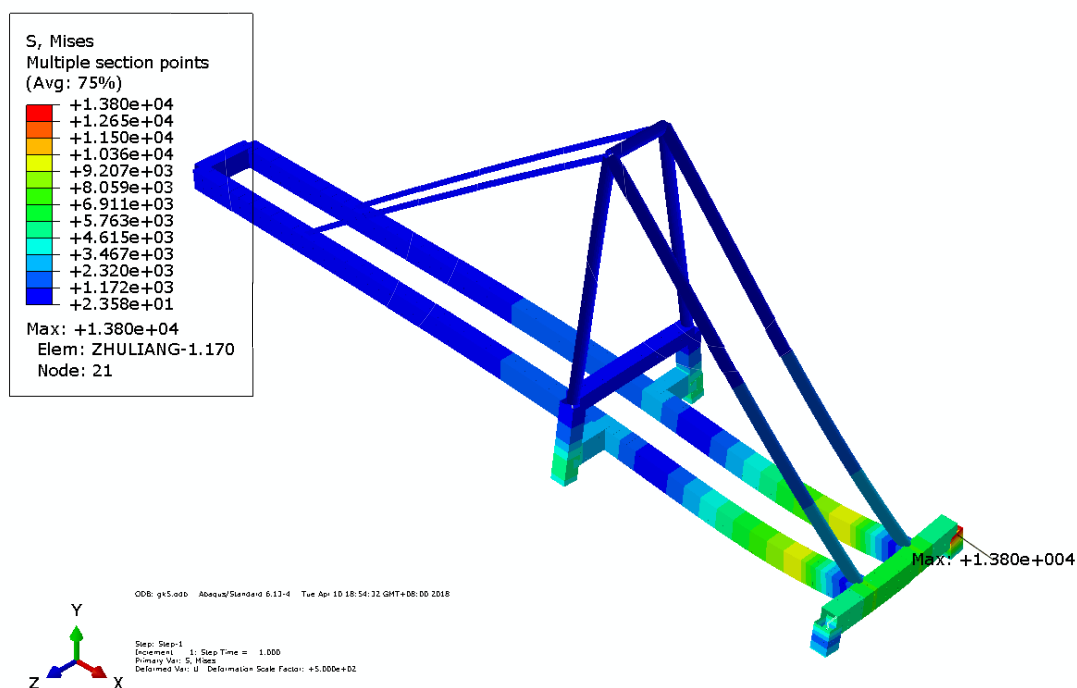


图 C. 18 小车处于 5 号位置时的等效应力云图

3. 应力测试方案（布点方案与测试工况）

本次检测根据使用单位提供的技术文件和现场作业环境情况，并参照了同类机型的选

点方法，选择了主要受力金属结构的危险截面和易发生破坏的截面进行测点布置，测点布置见图 C. 19，测点详细描述见表 C. 5。

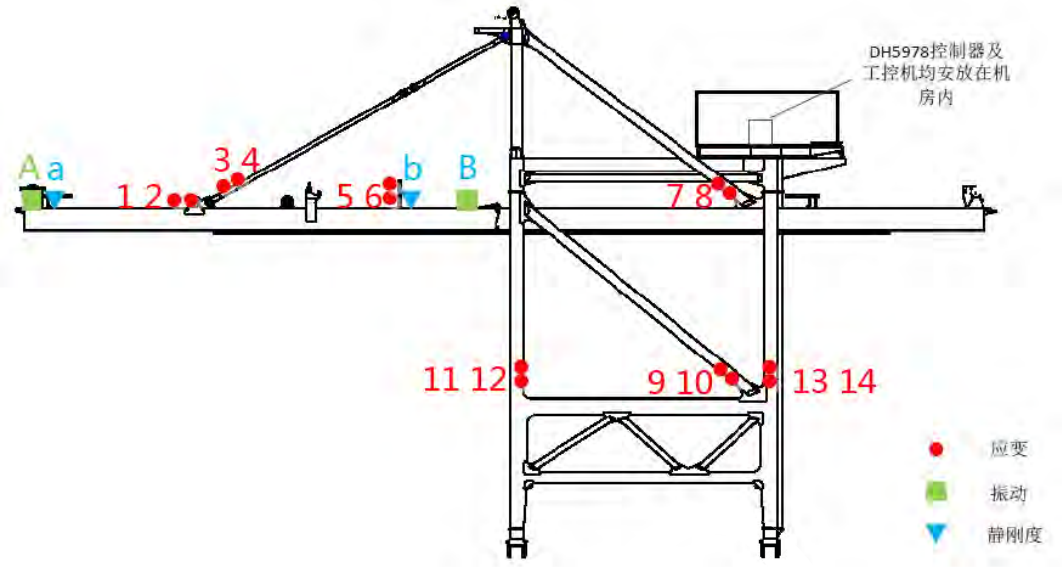


图 C.19 布点示意图

表 C.5 卸船机测点描述表

编号	测点描述	备注
1	右侧主梁悬臂根部	应变
2	左侧主梁悬臂根部	应变
3	右侧前拉杆	应变
4	左侧前拉杆	应变
5	右侧海侧支腿与前拉杆根部之间主梁中部	应变
6	左侧海侧支腿与前拉杆根部之间主梁中部	应变
7	右侧后拉杆	应变
8	左侧后拉杆	应变
9	右侧门腿斜撑	应变
10	左侧门腿斜撑	应变
11	右侧海侧支腿	应变
12	左侧海侧支腿	应变
13	右侧后门腿	应变
14	左侧后门腿	应变

测试工况

1) 静应力测试工况

动载应力测试根据卸船机作业的实际情况，安排载荷运动方式和测试工况，具体步骤安排说明如下：

①系统调零：首先在调零位置把卸船机自行小车停在料斗上方，抓斗搁置在料斗中，钢丝绳松弛，然后进行动态应变仪的调零；

②整个测试的载荷运动过程：动载应力测试按下面所述的载荷轨迹和规定动作进行操作，首先从调零位置起升，然后完成如下工况：

a 自行小车带着满载抓斗行至前大梁极限位置，抓斗处于稳定状态测量 A 点三个方向的位移。

b 自行小车带着满载抓斗行至前大梁江侧门架和前拉杆铰的中间位置，小车后轮压在贴片截面，载荷处于稳定状态测量 B 点垂直方向位移

c 自行小车带着满载抓斗行至江侧门架上方，载荷处于稳定测量 C 点垂直和水平方向位移

d 自行小车带着满载抓斗行至江侧门架与陆侧门架的中间位置，载荷处于稳定测量 D 点垂直方向位移。

③系统回零状态检查：载荷回到调零位置后，钢丝绳松弛，最后检查并记录测试仪器回零数据。

2) 动载应力测试工况

动载应力测试根据卸船机作业的实际情况，安排载荷运动方式和测试工况，动载工况重复二次。

具体测试工况步骤安排说明如下：

①系统调零：首先在调零位置把卸船机自行小车停在料斗上方，抓斗搁置在料斗中，钢丝绳松弛，然后进行动态应变仪的调零；

②整个测试的载荷运动过程：动载应力测试按下面所述的载荷轨迹和规定动作进行操作，首先从调零位置起升，然后完成小车从调零位置起升按照正常作业 10 个工作循环。

③系统回零状态检查：载荷回到调零位置后，钢丝绳松弛，最后检查并记录测试仪器回零数据。

4. 测试结果

(1) 测试结果记录表

静载最大应力为压应力，发生在 5 测点，外载应力值为-45.64MPa，前大梁自重产生的应力约为-28MPa，静载拉应力总和约为-74MPa。

动载最大应力为压应力，发生在 5 测点，外载应力值为-39.04MPa，前大梁自重产生的应力约为-28MPa，静载拉应力总和约为-67MPa。

根据国家标准 GB/T3811-2008《起重机设计规范》许用应力：

$[\sigma] = \sigma_s / 1.34 = 235 / 1.34 = 175.37 \text{ MPa} ;$

各点所测应力均满足《起重机设计规范》要求。

C.6 静应力空载、满载测试工况及动应力测试记录表

测点	静态 1-1/Mpa	静态 1-2/Mpa	动态 1-1/Mpa	动态 1-2/Mpa
1	-14.67	-20.54	-16.70	-19.89
2	-13.13	-11.73	-16.31	-12.24
3	-10.40	-10.06	-11.92	-10.69
4	-11.08	-12.18	-12.30	-10.96
5	-45.64	-45.48	-36.22	-39.04
6	-22.13	-19.66	-19.17	-18.96
7	-21.33	-17.43	-16.48	-16.08
8	-23.96	-22.38	-24.12	-25.82
9	16.49	16.26	15.67	16.51
10	13.12	13.67	12.48	13.84
11	4.89	5.37	12.56	9.63
12	12.28	11.20	11.54	11.48
13	-0.92	-0.54	-1.62	2.36
14	-2.51	-2.73	-3.75	-3.51

(2) 主要测点动载应变变化曲线图

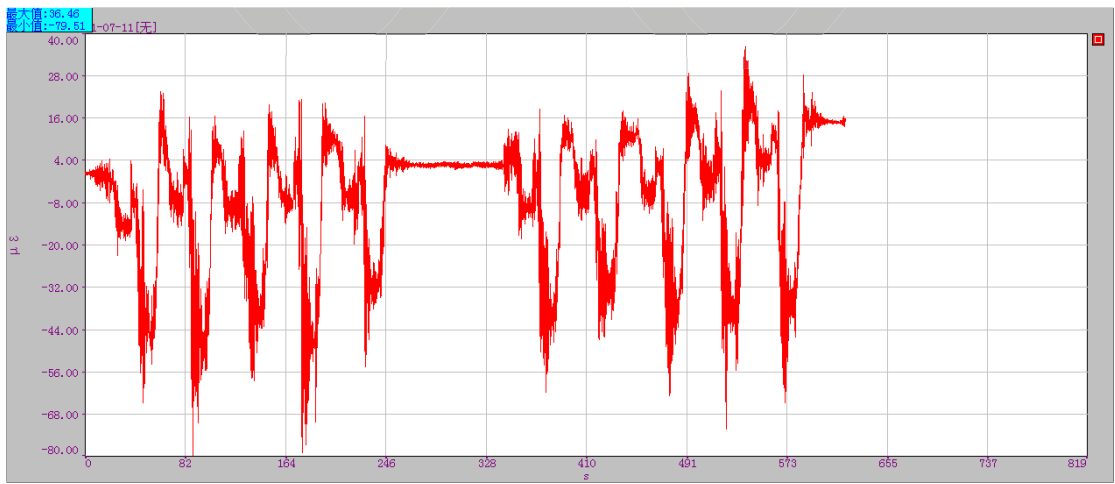


图 C. 20 1 测点试验曲线

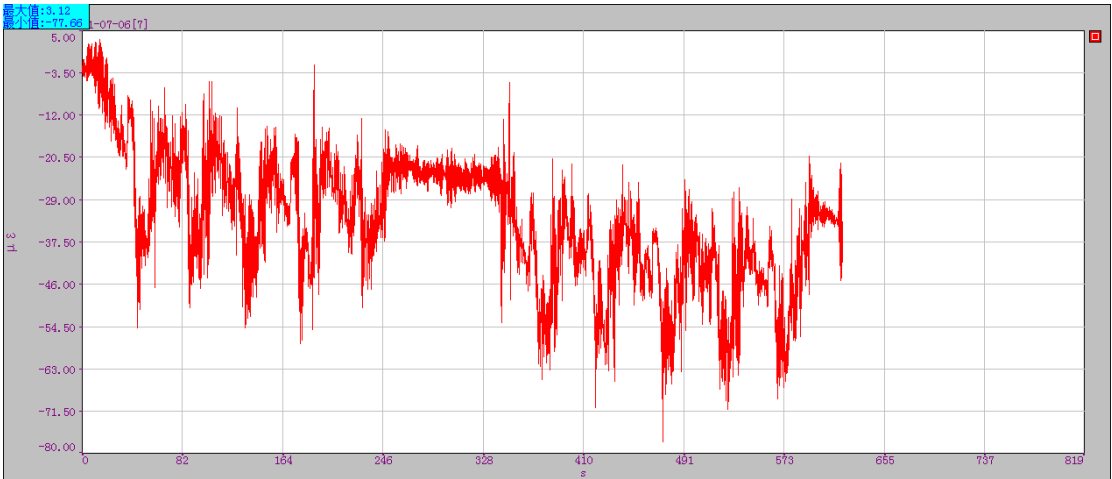


图 C.21 2 测点试验曲线

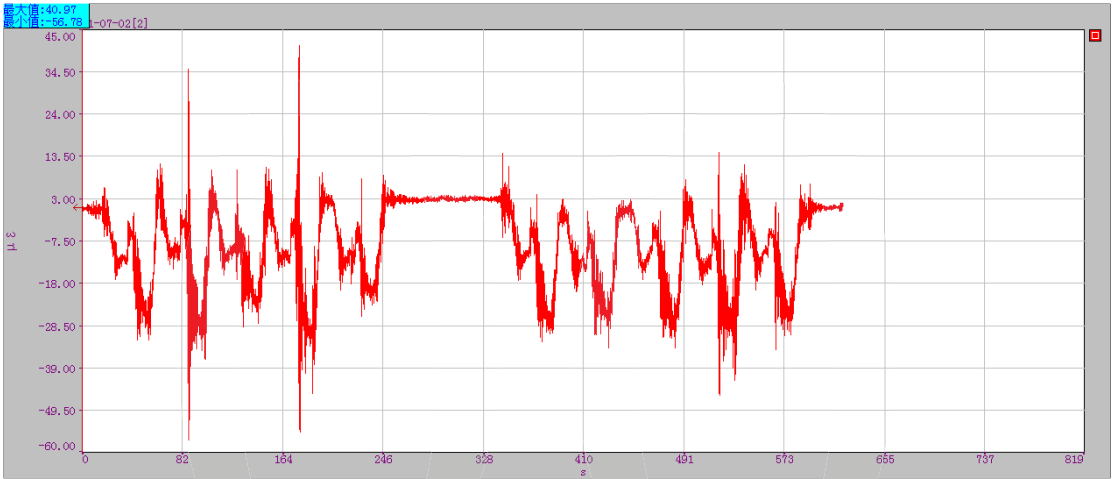


图 C.22 3 测点试验曲线

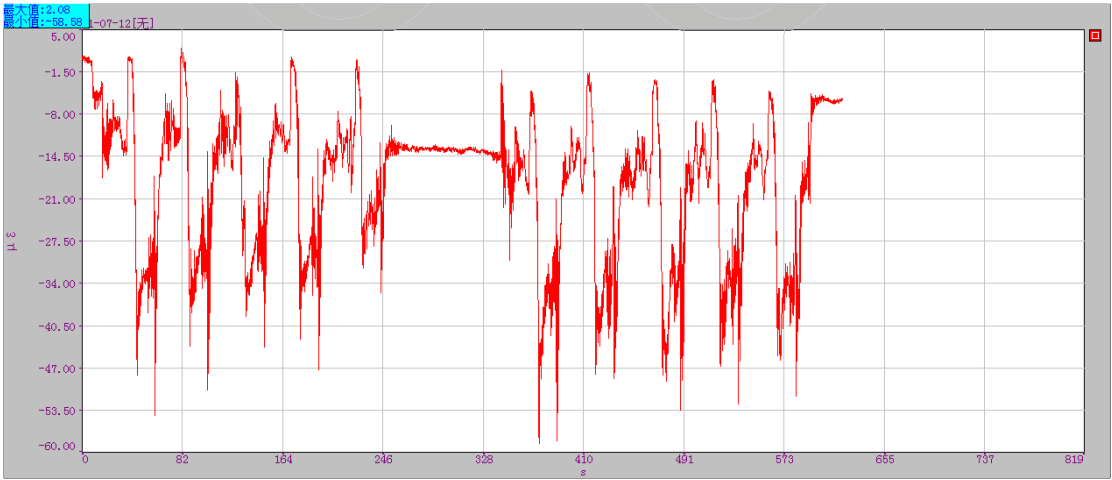


图 C.23 4 测点试验曲线



图 C.24 5 测点试验曲线



图 C.25 6 测点试验曲线

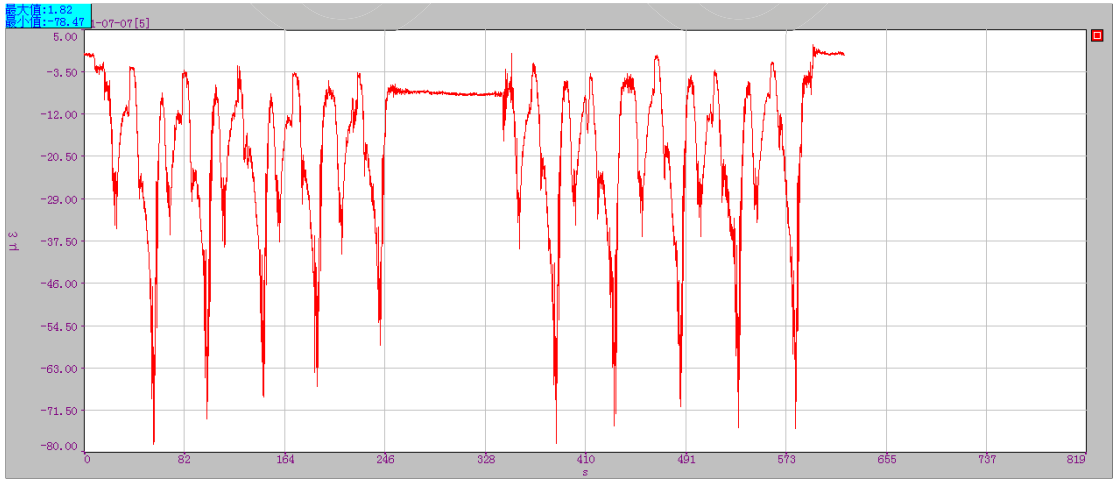


图 C.26 7 测点试验曲线



图 C.27 8 测点试验曲线

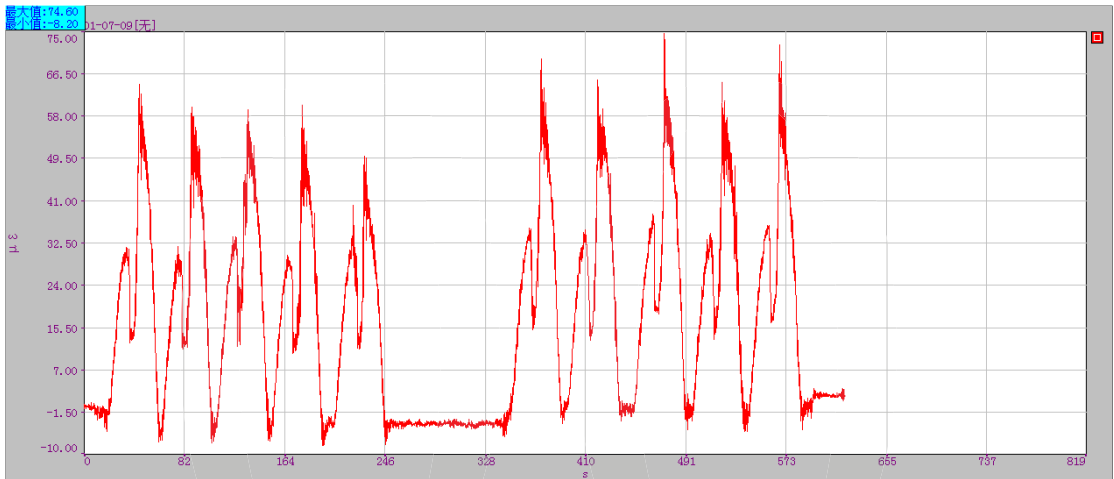


图 C.28 9 测点试验曲线

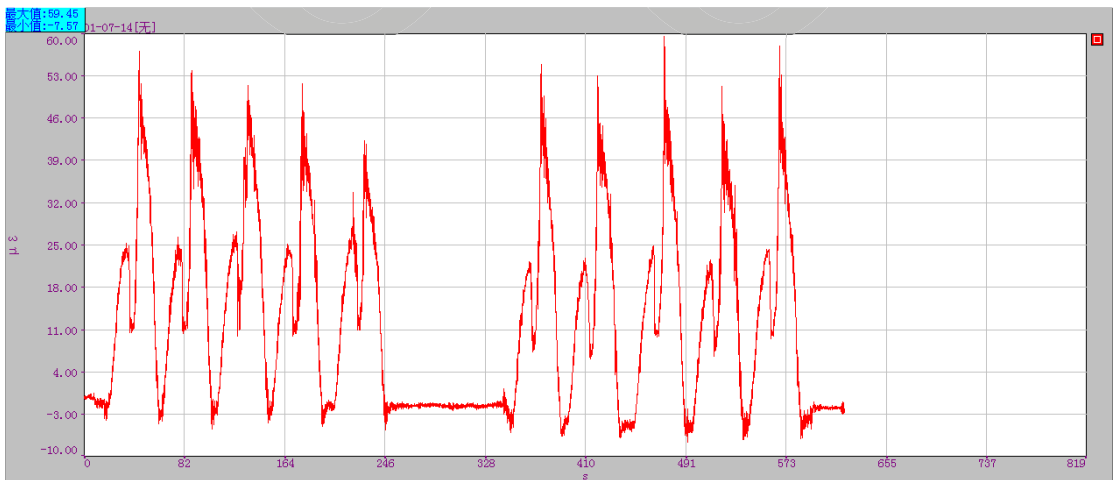


图 C.29 10 测点试验曲线

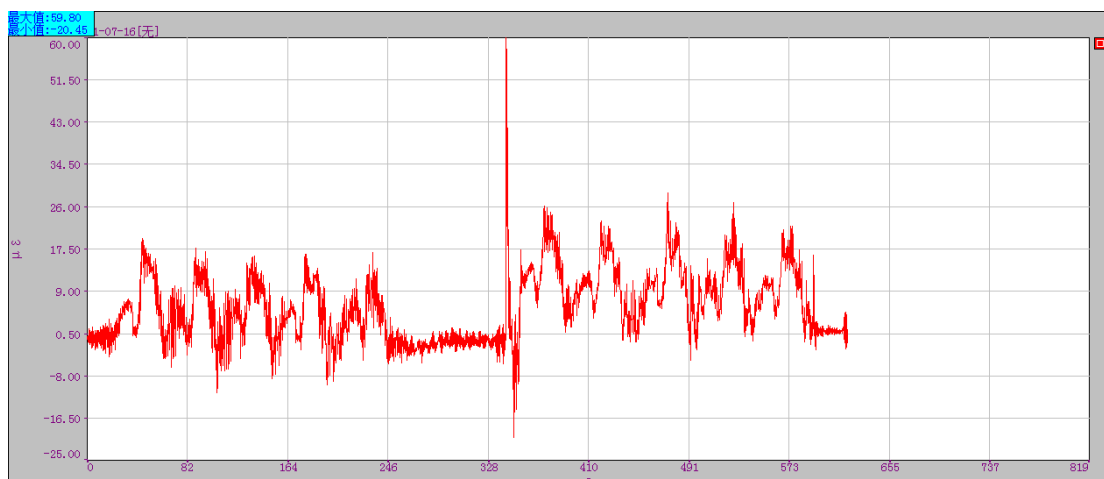


图 C.30 11 测点试验曲线

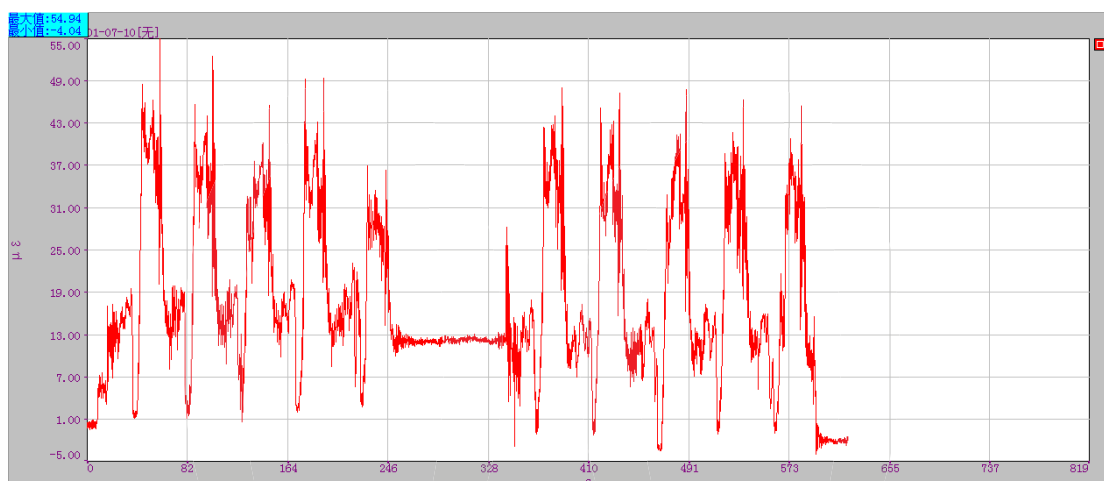


图 C.31 12 测点试验曲线

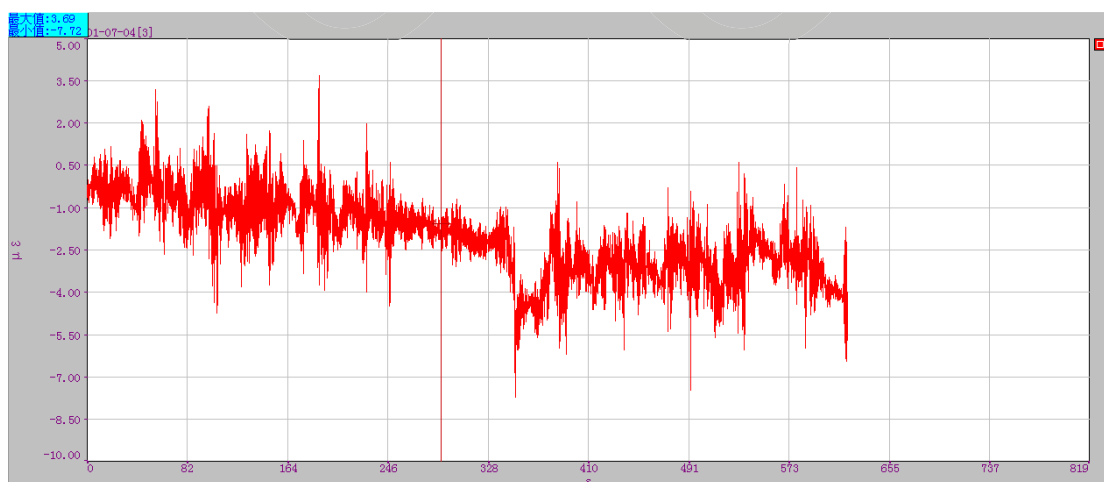


图 C.32 13 测点试验曲线

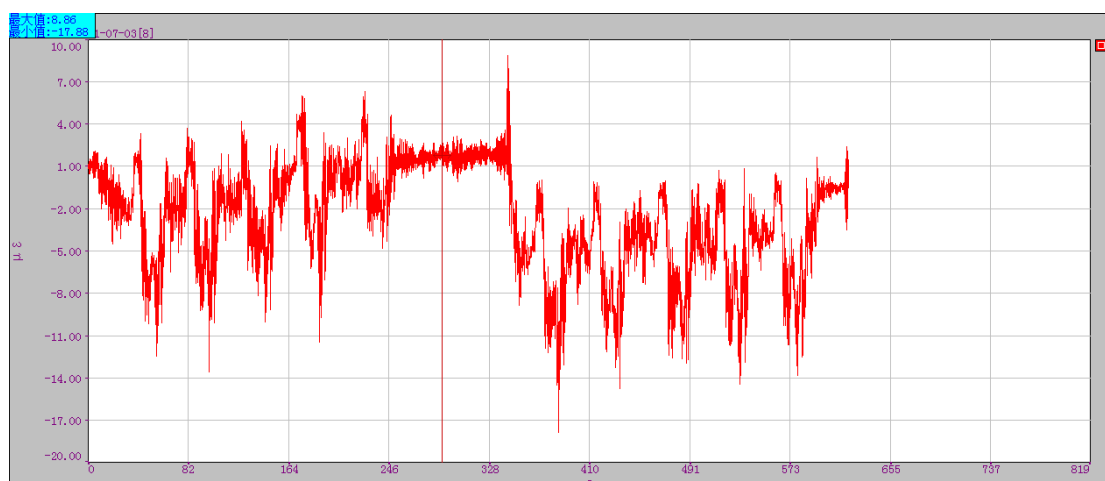


图 C.33 14 测点试验曲线

(二) 桁架结构（架桥机）

1. 检测对象概况

测试对象为一台架桥机，主要由金属结构、机构、电气控制系统组成，其金属结构主要有主梁等；机构主要有起升机构、大车行走机构、小车运行机构、横移机构；电气控制系统主要有供配电系统、驱动与控制系统、保护系统等。主要用于从里梁的铺设。其外貌见图 C.34，主要技术参数见表 C.7



图 C.34 检测对象外貌图

表 C.7 检测对象主要技术参数

规格型号	SDL _B 170t/50m	工作级别	不明
额定起重量	170 t	架设跨度	50 m
起升速度	0.61 m/min	起升高度	不明 m
大车速度	见备注	小车速度	见备注
取物装置	吊具	出厂日期	2006 年 6 月
备注： 起重机行车横移速度：2.93m/min 吊梁纵移速度为：1.3m/min； 整机纵移速度为：1.49m/min； 整机横移速度为：1.22m/min。			

2. 测点布置及工况

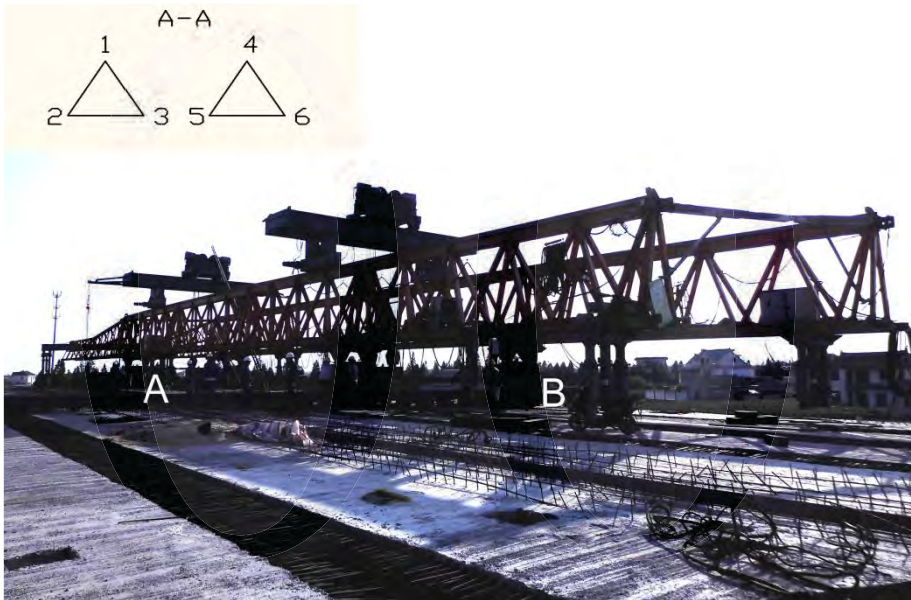


图 C.35 测点布置图

本次检测根据使用单位提供的技术文件和现场作业环境情况，并参照了同类机型的选点方法，选择了主要受力金属结构的危险截面和易发生破坏的截面进行测点布置，测点布置见图 C. 35，测点详细描述见表 C. 8。整个静态应力检测的试验工况详见检测工况表 C. 9。

表 C. 8 测点位置详细描述表

测点号	测点位置
1	左侧主梁(以司机操作方向判定左右)跨中轨道外侧
2	左侧主梁跨中左下弦杆下底面

3	左侧主梁跨中右下弦杆下底面
4	右侧主梁跨中轨道外侧
5	右侧主梁跨中左下弦杆下底面
6	右侧主梁跨中右下弦杆下底面

表 C.9 静态应力检测工况表

工况编号	小车位置	载荷质量(t)	操作要求
静态工况	小车 A 位处	0	空钩落地调“0”;
	小车 A 位处	额定载荷	调“0”结束后,提升额定载荷离地 100-200mm,稳定后读数;
	跨中		提载到跨中位置稳定后读数;
	小车 B 位处		提载运行至小车前限位动作位置稳定后读数;
	跨中		提载到跨中位置稳定后读数;
	小车 A 位处		提载到端部 A 位置稳定后读数;
	小车 A 位处	0	载荷落地,检查回零情况。
以上工况重复两遍静态工况 (1-1 1-2)			

3. 静态应力测试结果

由于该起重机主要金属所用材料主要为 Q235, 其屈服强度为:

$$\sigma_s = 235 \text{MPa}$$

根据国家标准 GB/T3811-2008《起重机设计规范》许用应力:

$$[\sigma] = \sigma_s / 1.34 = 235 / 1.34 = 175.37 \text{MPa}$$

按静态应力检测工况对各测点图形数据进行处理分析, 详细结果见表 C. 10。

表 C.10 静态应力检测结果表

测点号	静态 1-1		静态 1-2	
	应变值	应力值(MPa)	应变值	应力值(MPa)
1	-111.85	-23.49	-143.95	-30.23
2	99.99	21.00	133.24	27.98
3	40.57	8.52	66.67	14.00
4	-113.09	-23.75	-143.60	-30.16
5	86.71	18.21	131.27	27.57

6	59.39	12.47	73.67	15.47
---	-------	-------	-------	-------

静态工况最大应力为压应力，发生在静态工况 1-2 的 1#测点，自重应力 25.41MPa，工作应力 30.23MPa 应力值为 55.64MPa，小于许用应力 $[\sigma]$ 。

各工况所测静态应力值均小于许用应力。在静态工况下，起重机金属结构的静强度满足要求。

附录D

(资料性附录)

——采用风险图法对电气系统进行风险估计示例

本示例参考 GB/T 15706-2012《机械安全 设计通则 风险评估与风险减小》5.5.3 条款和 GB/T 22696.1-2008《电气设备的安全 风险评估和风险降低 第 1 部分：总则》将风险参数划分为 4 类，见表 D.1。

表 D.1 风险图法风险参数划分

风险参数	参数说明		
伤害的严重程度 (S)	轻微伤害 (S1)	严重伤害 (S2)	-
暴露于危险的频率和（或）持续时间 (F)	偶发和（或）短时间 (F1)	频繁和（或）长时间 (F2)	-
危险事件发生的概率 (O)	低（不可能发生） (O1)	中（可能偶尔发生） (O2)	高（可能频繁发生） (O3)
规避或减小伤害的可能性 (A)	在某些情况下可能 (A1)	不可能 (A2)	-

风险图如图 D.1 所示。

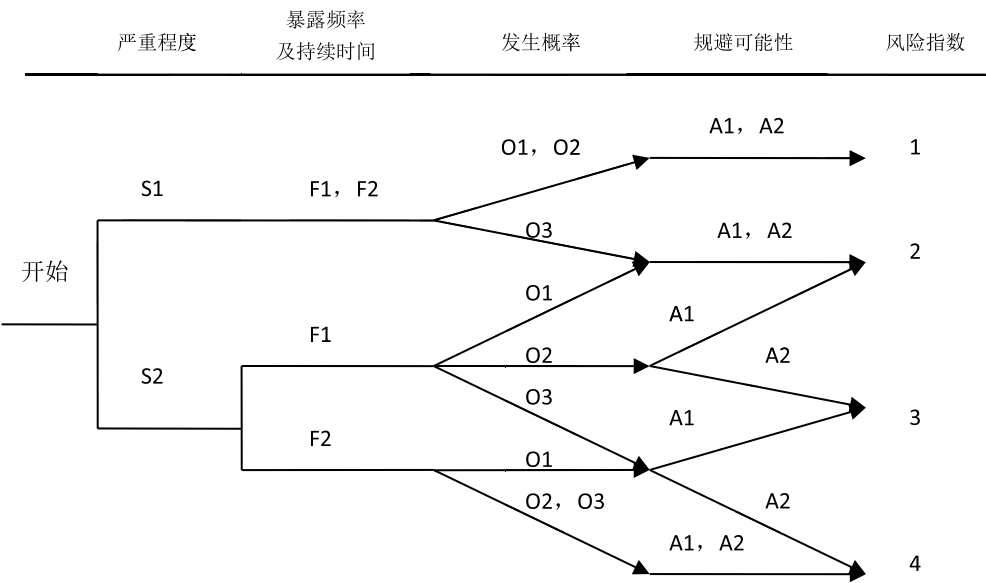


图 D.1 风险图法

根据风险图法得到的风险指数：1 对应最低级（轻微）；2 对应风险低；3 对应风险中；4 对应风险高。对照 T/CASEI 62001-2019 中的风险等级，指数 4 为 I 级（高），指数 3 为 II 级（中），指数 2 为 III 级（低），指数 1 为 IV 级（可忽略）。

表 D.2 是以起重机上电控柜为例，用风险图法分析电气风险。

表 D.2 采用风险图法对电控柜风险估计的结果

初始风险分析									
编号	危险识别				风险估计 风险指数计算				
	危险	危险状态	危险事件	可能的伤害	严重程度 (S)	暴露频次或 持续时间 (F)	发生概率 (O)	规 避 可 能 性 (A)	风险指数 (1~4)
1	电击 危险	电气绝缘失效; 接地故障	电控柜外壳带电	人体触电	S ₂	F ₂	O ₂	A ₁	4
2	着火 危险	连接松动、接触 不良导致联结 点电阻过大而 过热	接线端子过热 引起着火	损坏甚至烧 毁低压电器 元件或是其 它设备	S ₂	F ₂	O ₂	A ₁	4
3	机械 危险	螺栓松动或焊 接处锈蚀断开	电控柜倾覆	电控柜损坏; 压伤人员	S ₂	F ₁	O ₁	A ₁	2

表 D.2 中，严重程度（S）估计应考虑到危险事件能够实际发生的最严重（可信的最坏情况）暴露频次或持续时间、发生概率和规避可能性应以可靠性试验、有关事故统计数据、起重机械历史故障以及与品种、使用环境类似起重机械电气系统相比较的结果为基础。并结合相关法规标准的规定和专家经验进行判断。

附录E
(资料性附录)

——铸造起重机风险估计及安全状况评估等级确定示例

该示例以一台已使用8年的铸造起重机为评估对象，对其进行风险估计和综合安全状况等级判定的示例。

E.1 风险估计

根据T/CASEI 62001-2019中的5.8，采用风险矩阵法进行的风险估计。

表 E.1 风险估计表

评估单元	编号	评估项目		危险源	检验检测与评定方法	检验检测与评定结果	严重程度	发生概率	风险等级	备注
一、金属结构	1.1	强度	结构强度	金属结构材料的强度安全系数 n 不满足 GB/T 3811 标准要求	应力测试	安全系数：n=2.53	A	D	III	
			结构裂纹	主要受力结构件产生裂纹，未采取相应措施或停止使用	外观检查 无损检测	未见异常	A	D	III	
			结构变形	主体结构件（主梁和端梁）产生塑性变形，致使工作机构不能正常安全运行	变形测量	未见异常	A	D	III	
			腐蚀	主要受力结构件发生腐蚀，且断面腐蚀达设计厚度的 10%；主要受力结构件的连接处发生腐蚀，且连接处的强度不能满足设计要求	外观检查 厚度测量 强度计算	未见异常	A	D	III	未腐蚀

评估单元	编号	评估项目		危险源	检验检测与评定方法	检验检测与评定结果	严重程度	发生概率	风险等级	备注
			连接	金属结构的焊缝有明显可见的焊接缺陷；螺栓联接松动，有缺件、损坏等缺陷	外观检查 必要时无损检测	未见异常	A	D	III	
	1.2	静刚度		与原始下挠值（弹性变形）相比，主（副）梁下挠值增加量达到或超过跨度的0.15/1000	变形测量 资料核查	主梁：16；16 mm 副梁：15；15 mm	C	D	IV	弹性下挠（同原始值）
二、机构和零部件	2.1	吊具		（1）吊钩缺陷焊补	外观检查	未见异常	A	D	III	
				（2）吊钩表面有裂纹	外观检查 必要时无损检测	未见异常	A	D	III	
				（3）片式吊钩每一钩片侧向变形的弯曲半径小于板厚的10倍	变形测量	未见异常	A	D	III	
				（4）吊钩危险断面的总磨损量达名义尺寸的5%	外观检查 必要时仪器测量	180t 主钩：1%	A	D	III	
						50t 副钩：0.5%	A	D	III	
						16t 副钩：0%	A	D	III	
二、机构和零部件	2.1	吊具		（5）吊钩的危险断面及钩颈处有塑性变形	外观检查	未见异常	A	D	III	
				（6）片式吊钩钩片之间间隙大于1.5mm	仪器测量	0.35mm	A	D	III	
				（7）片式吊钩衬套磨损量达到设计尺寸的50%	仪器测量	10%	A	D	III	
	2.2	钢丝绳		（1）钢丝绳的规格、型号不符合设计要求，与滑轮和卷筒不匹配	资料核查 尺寸测量	未见异常	A	D	III	

评估单元	编号	评估项目	危险源	检验检测与评定方法	检验检测与评定结果	严重程度	发生概率	风险等级	备注
			(2) 吊运熔融金属的钢丝绳，未采用金属绳芯或金属股芯等有耐高温性能的重要用途钢丝绳	资料核查 外观检查	未见异常	A	D	III	
			(3) 钢丝绳的安全系数未满足 GB/T 3811 表 44 的规定	资料核查 计算分析	未见异常	A	D	III	
			(4) 钢丝绳绳端固定不牢固可靠，压板固定时的压板少于 2 个，且不符合设计要求	外观检查	180t 主起升机构卷筒上，钢丝绳端部有一块压板固定处缺弹簧垫圈	A	C	II	
			(5) 安全圈不符合要求	外观检查	未见异常	A	D	III	
			(6) 钢丝绳有扭结、压扁、弯折、断股、笼状畸变、断芯等变形现象	外观检查	未见异常	A	D	III	
			(7) 钢丝绳直径减少量大于公称直径的 7%	尺寸测量	180t 主起升：3.6%	A	C	II	
					50t 副起升：2.3%	A	C	II	
					16t 副起升：0%	A	D	III	
			(8) 吊运熔融金属的起重机钢丝绳断丝数达到 GB/T5972 报废标准的一半	外观检查	未见异常	A	D	III	
	2.3	卷筒	(1) 绳槽有缺损或不正常磨损	外观检查	未见异常	A	D	III	
			(2) 卷筒有裂纹	外观检查 必要时无损检测	未见异常	A	D	III	
二、机构和	2.3	卷筒	(3) 卷筒壁磨损达到原壁厚的 20%	外观检查 仪器测量	180t 主起升：5%	A	D	III	
					50t 副起升：3%	A	D	III	
					16t 副起升：1%	A	D	III	

评估单元	编号	评估项目	危险源	检验检测与评定方法	检验检测与评定结果	严重程度	发生概率	风险等级	备注
零部件	2.4	滑轮组	(1) 吊运熔融金属的起重机使用铸铁滑轮	资料核查 外观检查	未见异常	A	D	III	
			(2) 防脱绳装置和滑轮罩缺陷	外观检查	未见异常	A	D	III	
			(3) 有影响性能的表面裂纹	外观检查 必要时无损检测	未见异常	A	D	III	
			(4) 轮槽不均匀磨损达到 3mm	外观检查 仪器测量	180t 主起升：1mm	A	C	II	
					50t 副起升：1mm	A	C	II	
					16t 副起升：0.5mm	A	D	III	
			(5) 轮槽壁厚磨损达到原壁厚的 20%	外观检查 仪器测量	180t 主起升：8%	A	C	II	
					50t 副起升：4%	A	D	III	
					16t 副起升：2%	A	D	III	
			(6) 因磨损使轮槽底部直径减少量达到钢丝绳直径的 40%	外观检查 仪器测量	180t 主起升：20%	A	C	II	
					50t 副起升：10%	A	D	III	
					16t 副起升：5%	A	D	III	
二、机构和	2.5	主起升机构钢丝绳缠绕	(1) 未采用 4 根钢丝绳缠绕系统	资料核查 外观检查	未见异常	A	D	III	

评估单元	编号	评估项目	危险源	检验检测与评定方法	检验检测与评定结果	严重程度	发生概率	风险等级	备注
零部件		系统	(2) 钢丝绳缠绕系统中, 采用平衡滑轮	外观检查	未见异常	A	D	III	
	2.6	车轮	(1) 有影响性能的表面裂纹等缺陷	外观检查 必要时无损检测	未见异常	C	D	IV	
			(2) 轮缘厚度磨损达原厚度的 50%	外观检查 仪器测量	主小车: 10%	C	D	IV	
					副小车: 10%	C	D	IV	
					大车: 4%	C	D	IV	
			(3) 轮缘弯曲变形达原厚度的 20%	外观检查 仪器测量	主小车: 5%	C	D	IV	
					副小车: 3%	C	D	IV	
					大车: 4%	C	D	IV	
			(4) 踏面厚度磨损达原厚度的 15%	外观检查 仪器测量	主小车: 5%	C	C	III	
					副小车: 5%	C	C	III	
					大车: 5%	C	C	III	
			(5) 当运行速度低于 50m/min 时, 圆度达 1mm; 当运行速度高于 50m/min 时, 圆度达 0.1mm	仪器测量	主小车: 0.5mm	C	C	III	
					副小车: 0.5mm	C	C	III	
					大车: 0.05mm	C	C	III	
	2.7	电动机	未采用冶金起重专用电动机, 在环境温度超过 40℃ 的场合, 未选用 H 级绝缘电动机或者采取相应的必要措施	外观检查	未见异常	A	D	III	

评估单元	编号	评估项目		危险源	检验检测与评定方法	检验检测与评定结果		严重程度	发生概率	风险等级	备注
二、机构和零部件	2.8	制 动 器	起 升 机 构 制 动 器	(1) 制动器驱动装置（液压推动器）失效或卡阻	外观检查 功能试验	未见异常		A	D	III	
				(2) 制动器机械部件（制动弹簧、制动臂、衬垫、制动轮）失效	外观检查 仪器测量	180t	制动弹簧:未见缺陷	A	D	III	
							制动臂:未见缺陷	A	D	III	
							衬垫:厚度磨损 10%	A	D	III	
							制动轮:厚度磨损 10%	A	C	II	
						50t	制动弹簧:未见缺陷	A	D	III	
							制动臂:未见缺陷	A	D	III	
							衬垫:其中一套制动器的摩擦衬垫磨损量达原厚度的 50%	A	A	I	
							制动轮:厚度磨损 6%	A	D	III	
						16t	制动弹簧:未见缺陷	A	D	III	
							制动臂:未见缺陷	A	D	III	
							衬垫:厚度磨损 5%	A	D	III	
							制动轮:厚度磨损 5%	A	D	III	
				(3) 制动器机械部件（制动弹簧、制动臂、衬垫、制动轮）调整不当	外观检查 仪器测量	未见异常		A	D	III	

评估单元	编号	评估项目		危险源	检验检测与评定方法	检验检测与评定结果		严重程度	发生概率	风险等级	备注
				(4) 制动器驱动装置（液压推动器）推力不足	外观检查 功能试验	未见异常		A	D	III	
二、机构和零部件	2.8	制 动 器	起 升 机 构 制 动 器	(5) 主起升机构制动器未符合以下要求之一： a. 主起升机构设置两套驱动装置，并且在输出轴刚性连接； b. 主起升机构两套驱动装置在输出轴上无刚性连接，或者主起升机构只设置一套驱动装置的，在钢丝绳卷筒上设置安全制动器。	资料核查 外观检查	未见异常		A	D	III	
				(6) 主起升机构设置两套驱动装置，当其中一套驱动装置发生故障时，另一套驱动装置未能保证在额定起重量时完成至少一个工作循环。	资料核查	未见异常		C	D	IV	
			运 行 机 构 制 动 器	(1) 制动器驱动装置（液压推动器）失效或卡阻	外观检查 功能试验	未见异常		C	D	IV	
				(2) 制动器机械部件（制动弹簧、制动臂、衬垫、制动轮）失效	外观检查 仪器测量	主 小 车	制动弹簧:未见缺陷	C	D	IV	
							制动臂:未见缺陷	C	D	IV	
							衬垫:厚度磨损 10%	C	D	IV	
							制动轮:厚度磨损 15%	C	C	III	
						副 小 车	制动弹簧:未见缺陷	C	D	IV	
							制动臂:未见缺陷	C	D	IV	
							衬垫:厚度磨损 5%	C	D	IV	
							制动轮:厚度磨损 4%	C	D	IV	
						车 大	制动弹簧:未见缺陷	C	D	IV	

评估单元	编号	评估项目		危险源	检验检测与评定方法	检验检测与评定结果		严重程度	发生概率	风险等级	备注
二、机构和零部件							制动臂:未见缺陷	C	D	IV	
							衬垫:厚度磨损 10%	C	D	IV	
							制动轮:厚度磨损 10%	C	D	IV	
	2.8	制动器	运行机构	(3) 同一运行机构的两个或四个制动器机械部件(制动弹簧、制动臂、衬垫、制动轮)磨损不一致或调整不当	外观检查 仪器测量	未见异常		C	D	IV	
			制动器	(4) 同一运行机构的某个制动器驱动装置(液压推动器)失效	外观检查 功能试验	未见异常		C	D	IV	
			制动器	(5) 制动器机械部件(制动弹簧、制动臂、衬垫、制动轮)调整不当	外观检查 仪器测量	未见异常		A	D	III	
			制动器	(6) 制动器驱动装置(液压推动器)推力不足	外观检查 功能试验	未见异常		A	D	III	
	2.9	联轴器	起升机构联轴器	(1) 联轴器存在影响其传动性能的轴心线歪斜和径向位移	仪器测量	未见异常		C	D	IV	
			起升机构联轴器	(2) 联轴器螺栓松动或缺损,联轴器的键配合不紧密、松动	外观检查	未见异常		A	D	III	
			起升机构联轴器	(3) 联轴器有裂纹	外观检查 必要时无损检测	未见异常		A	D	III	
			运行机构联轴器	(1) 联轴器存在影响其传动性能的轴心线歪斜和径向位移	仪器测量	未见异常		C	D	IV	
			运行机构联轴器	(2) 联轴器螺栓松动或缺损,联轴器的键配合不紧密、松动	外观检查	未见异常		A	D	III	

评估单元	编号	评估项目		危险源	检验检测与评定方法	检验检测与评定结果	严重程度	发生概率	风险等级	备注
				(3) 联轴器有裂纹	外观检查 必要时无损检测	未见异常	A	D	III	
	2.10	减速机		(1) 减速机固定松动	外观检查	未见异常	C	D	IV	
				(2) 减速机壳体裂纹	外观检查 必要时无损检测	未见异常	C	D	IV	
二、机构和零部件	2.10	减速机		(3) 减速机漏油	外观检查	未见异常	C	D	IV	
				(4) 减速机运行不平稳、有异常振动和噪音	功能试验	未见异常	C	D	IV	
	2.11	司机室		(1) 未采用能提供清洁空气的密封性能良好的封闭司机室	外观检查	未见异常	B	D	IV	
				(2) 司机室内未设降温装置，底板下方未设置隔热板	外观检查	未见异常	B	D	IV	
	2.12	联动控制台		标识不清晰，外壳破损	外观检查	未见异常	A	D	III	
	2.13	吊叉		(1) 出现表面裂纹	外观检查 必要时无损检测	未见异常	A	D	III	
				(2) 轴孔磨损量达到设计直径的 5%	资料核查	1%	A	D	III	
				(3) 出现明显塑性变形	外观检查	未见异常	A	D	III	

评估单元	编号	评估项目	危险源	检验检测与评定方法	检验检测与评定结果	严重程度	发生概率	风险等级	备注
	2.14	起重横梁	(1) 主要受力板材和焊缝出现表面裂纹	外观检查 必要时无损检测	未见异常	A	D	III	
			(2) 轴孔磨损量达到设计直径的 5%	资料核查	1%	A	D	III	
			(3) 盖板和腹板出现塑性变形，板面侧向变形超过板材厚度	外观检查 变形测量	3mm	A	D	III	
	2.15	钢丝绳 平衡杠杆	(1) 出现表面裂纹	外观检查 必要时无损检测	未见异常	A	D	III	
			(2) 轴孔磨损量达到设计直径的 5%	资料核查	1%	A	D	III	
二、机构和零部件	2.15	钢丝绳 平衡杠杆	(3) 厚度减小量达到设计尺寸的 5%	厚度测量	0.5%	A	D	III	
			(4) 出现明显塑性变形	外观检查	未见异常	A	D	III	
三、电气控制系统	3.1	电压波动	正常工作条件下，供电系统在起重机械馈电接入处的电压波动超过额定值的±10%	仪器测量	4.2~5.8 %	A	D	III	
	3.2	电气控制功能	(1) 电气设备与控制功能不正确，未达到设计要求	功能试验	未见异常	A	D	III	

评估单元	编号	评估项目	危险源	检验检测与评定方法	检验检测与评定结果	严重程度	发生概率	风险等级	备注
			(2) 各操纵机构动作方向与标识不一致	功能试验	未见异常	A	D	III	
	3.3	电气绝缘	电路与裸露导电部件之间的绝缘电阻小于 $1\text{M}\Omega$	仪器测量	$0.51\text{ M}\Omega$	A	B	I	
	3.4	电缆、导线敷设	电缆、导线穿过钢管或金属孔洞处未采取保护措施	外观检查	供电电缆进入电气室的入口处未设置保护措施	A	A	I	
	3.5	电气设备防护等级及防护措施	电气设备防护等级不满足 JB/T7688.1 和产品设计要求；电气室内的电气设备，当防护等级为 IP00 时，未采取适当的防护措施（如防护栏杆、防护网等）	资料核查 外观检查	电气室内部分防护等级为 IP00 的控制屏防护栏杆缺失	A	A	I	
	3.6	控制屏设置位置	控制屏未集中设置在隔热、防尘的电气室内	外观检查	未见异常	A	D	III	
	3.7	馈电装置安全距离	起重机上大、小车馈电装置的裸露带电部分与金属结构之间的最小距离小于 30mm	仪器测量	850mm	A	D	III	
	3.8	接地	(1) 电气设备正常情况下不带电的外露可导电部分未直接与供电电源保护接地线连接	外观检查	未见异常	A	D	III	

评估单元	编号	评估项目	危险源	检验检测与评定方法	检验检测与评定结果	严重程度	发生概率	风险等级	备注
			(2)起重机械上所有电气设备外壳、金属导线管、金属支架及金属线槽未可靠接地(保护接零)	外观检查	未见异常	A	D	III	
三、 电气控制系统	3.8	接地	(3)PE线重复接地每一处的接地电阻大于10Ω	仪器测量	1.2Ω	A	D	III	
	3.9	短路保护	总电源回路未设置一级短路保护或功能失效	外观检查	未见异常	A	D	III	
	3.10	失压保护	起重机上总电源回路未设置失压保护或功能失效	功能试验	未见异常	A	D	III	
	3.11	零位保护	机构控制器未设置零位保护或功能失效	功能试验	未见异常	A	D	III	
	3.12	过流保护	机构未设置过流保护或功能失效	外观检查	未见异常	A	D	III	
	3.13	断错相保护	起重机供电电源未设置断错相保护或功能失效	功能试验	未见异常	A	D	III	
	3.14	电动机定子异常失电保护	吊运熔融金属的起升机构电动机未设置定子异常失电保护功能	功能试验	未见异常	A	D	III	
	3.15	超速保护	吊运熔融金属的主起升机构及非电阻调速的起升机构未设置超速保护或功能失效	外观检查 模拟试验	未见异常	A	D	III	
	3.1	指示信号、	(1)司机室内未设置起重机总电源开关状态的明显信号指示或功能失效	外观检查 功能试验	未见异常	A	D	III	

评估单元	编号	评估项目	危险源	检验检测与评定方法	检验检测与评定结果		严重程度	发生概率	风险等级	备注
	6	警报及通讯装置	(2) 司机室未设置警示音响装置或功能失效	外观检查 功能试验	未见异常		A	D	III	
			(3) 起重机登机处未设置与司机室联系的通讯装置或功能失效	外观检查 功能试验	未见异常		A	D	III	
	3.1 7	电气装置防振	电气设备安置未考虑必要的防振措施, 电器柜固定不规范	外观检查	未见异常		C	D	IV	
	3.1 8	电气柜布线	电气柜内导线有中间接头, 布线杂乱, 每个接线端子每侧接线超过两根, 连接导线两端的线号、线束号、去向等与电气原理图及配线表不一致或缺失	外观检查	未见异常		A	D	III	
四、安全保护和防护装置	4.1	起升高度限位器	起升机构未装设起升高度限位器或功能失效。吊运熔融金属的起升机构未装设两级起升高度限位器, 第二级起升高度限位器未能分断更高一级的动力源	外观检查 功能试验	未见异常		A	D	III	
	4.2	行程限位器	运行机构未设置行程限位器或功能失效	外观检查 功能试验	小车	副小车运行机构南侧行程限位失效	C	B	III	
					大车	大车运行机构西侧行程限位失效	C	B	III	
	4.3	起重量限制器	起升机构未设置起重量限制器或功能失效	外观检查 功能试验	未见异常		A	D	III	
	4.4	止挡装置	小车及大车轨道端部止挡不可靠、变形	外观检查	未见异常		A	D	III	
	4.5	缓冲装置	小车及大车运行机构未设置缓冲器或损坏或固定缺陷	外观检查	小车	主小车西北侧轨道端部缓冲器损坏	C	B	III	

评估单元	编号	评估项目	危险源	检验检测与评定方法	检验检测与评定结果		严重程度	发生概率	风险等级	备注
						副小车的部分缓冲器损坏	C	B	III	
					大车	大车东北侧缓冲器损坏	C	B	III	
						大车东北侧缓冲器支座焊接部位有焊接缺陷	A	B	I	
	4.6	轨道清扫装置	小车及大车运行机构未设置轨道清扫装置或损坏或间隙超标	外观检查 必要时仪器测量	大车运行机构东侧扫轨板变形		C	B	III	
	4.7	联锁装置	进入起重机械的门、司机室到桥架上的门未设置电气联锁保护装置或失效	外观检查 功能试验	未见异常		A	D	III	
四、安全保护和防护装置	4.8	防护罩	起重机械上外露的有伤人可能的活动零部件未设置防护罩或缺失	外观检查	未见异常		A	D	III	
	4.9	保护网	司机室和导电滑线在同侧时，滑线集电器接触段未设置保护网	外观检查	未见异常		A	D	III	
	4.10	防辐射热措施	(1) 在热辐射强烈的地方，电气设备未采取防护措施	外观检查	未见异常		C	D	IV	
			(2) 起重机直接受高温辐射的部分，例如主梁下翼缘板、吊具横梁等部位未设置隔热板	外观检查	未见异常		A	D	III	

E.2 评估对象的综合安全状况等级判定

E.2.1 评估单元安全状况等级判定

根据评估单元中每个评估项目的风险等级，按照 T/CASEI 62001-2019 中的表 7 对每个评估项目进行赋值，并根据 T/CASEI 62001-2019 中的公式（3）计算得出该评估单元的安全状况得分，再根据 T/CASEI 62001-2019 中的表 8 得出该评估单元的安全状况等级。各评估单元的安全状况等级判定情况详见表 E. 2。

表 E.2 评估单元安全状况等级判定表

评估单元	编号	评估项目	风险等级	风险等级赋值	评估单元安全状况得分	评估单元安全状况等级
一、金属结构	1.1	强度	Ⅲ	2	83.33	二级
	1.2	静刚度	Ⅳ	3		
二、机构和零部件	2.1	吊具	Ⅲ	2	0	五级
	2.2	钢丝绳	Ⅱ	1		
	2.3	卷筒	Ⅲ	2		
	2.4	滑轮组	Ⅱ	1		
	2.5	主起升机构钢丝绳缠绕系统	Ⅲ	2		
	2.6	车轮	Ⅲ	2		
	2.7	电动机	Ⅲ	2		
	2.8	制动器	I	0		
	2.9	联轴器	Ⅲ	2		
	2.10	减速机	Ⅳ	3		
	2.11	司机室	Ⅳ	3		
	2.12	联动控制台	Ⅲ	2		
	2.1	吊叉	Ⅲ	2		

评估单元	编号	评估项目	风险等级	风险等级赋值	评估单元安全状况得分	评估单元安全状况等级
	3					
	2.14	起重横梁	Ⅲ	2		
	2.15	钢丝绳平衡杠杆	Ⅲ	2		
三、电气控制系统	3.1	电压波动	Ⅲ	2	0	五级
	3.2	电气控制功能	Ⅲ	2		
	3.3	电气绝缘	I	0		
	3.4	电缆、导线敷设	I	0		
三、电气控制系统	3.5	电气设备防护等级及防护措施	I	0	0	五级
	3.6	控制屏设置位置	Ⅲ	2		
	3.7	馈电装置安全距离	Ⅲ	2		
	3.8	接地	Ⅲ	2		
	3.9	短路保护	Ⅲ	2		
	3.10	失压保护	Ⅲ	2		
	3.11	零位保护	Ⅲ	2		
	3.12	过流保护	Ⅲ	2		
	3.13	断错相保护	Ⅲ	2		
	3.14	电动机定子异常失电保护	Ⅲ	2		
	3.15	超速保护	Ⅲ	2		

评估单元	编号	评估项目	风险等级	风险等级赋值	评估单元安全状况得分	评估单元安全状况等级
	3.1 6	指示信号、警报及通讯装置	Ⅲ	2		
	3.1 7	电气装置防振	Ⅳ	3		
	3.1 8	电气柜布线	Ⅲ	2		
四、安全保护和防护装置	4.1	起升高度限位器	Ⅲ	2	0	五级
	4.2	行程限位器	Ⅲ	2		
	4.3	起重量限制器	Ⅲ	2		
	4.4	止挡装置	Ⅲ	2		
	4.5	缓冲装置	I	0		
	4.6	轨道清扫装置	Ⅲ	2		
	4.7	联锁装置	Ⅲ	2		
	4.8	防护罩	Ⅲ	2		
	4.9	保护网	Ⅲ	2		
	4.1 0	防辐射热措施	Ⅲ	2		

注：评估单元中的每个评估项目权重值相同。

E.3 评估对象综合安全状况等级判定

得到上述各个评估单元的安全状况得分后，再根据 T/CASEI 62001-2019 中的公式（4），可计算得出评估对象的综合安全状况得分，再根据 T/CASEI 62001-2019 中的表 9 得到评估对象的综合安全状况等级。详见表 E.3。

表 E.3 评估对象综合安全状况等级判定表

评估单元	评估单元安全状况得分	评估单元安全状况等级	权重	评估对象综合安全状况得分	评估对象综合安全状况等级
金属结构	83.33	二级	0.2	0	五级

评估单元	评估单元 安全状况得分	评估单元 安全状况等级	权重	评估对象综合 安全状况得分	评估对象综合 安全状况等级
机构和零部件	0	五级	0.3		
电气控制系统	0	五级	0.25		
安全保护和防护 装置	0	五级	0.25		

《起重机械 安全状况评估 实施指南》编制说明

一、工作简况

（一）任务来源

2019年9月，起草组向中国特种设备检验协会提交《中国特种设备检验协会团体标准立项申报书》，申请立项本文件，并获批正式立项。

（二）标准制定的背景、目的和意义

起重机械安全状况评估是实现起重机械本质安全，科学有效预防起重机械事故、保障起重机械安全运行的重要手段之一。因此，江苏省特种设备安全监督检验研究院联合福建省特种设备检验研究院等 7 家特种设备检验检测行业机构共同起草了中国特种设备检验协会团体标准 T/CASEI 62001《起重机械 安全状况评估》，该标准已于 2019 年 5 月 31 日发布实施。该标准在起草、审核和发布过程中，引起了行业内相关专业人士的广泛关注，起草组也接收到大量的相关问题咨询和意见建议，其中很大一部分都是关于某一具体品种起重机的安全状况评估实施方法或评估过程中某一具体环节的操作要领。虽然，该标准已经针对每个评估环节给出了典型示例，但并未针对某一具体类别、品种的起重机械，根据其结构特点，给出相应的危险识别方法、设计分析方法和检验检测方法应用示例。

基于此，起草组经过研究讨论，决定再行起草一个配套标准《起重机械 安全状况评估 实施指南》，作为T/CASEI 62001《起重机械 安全状况评估》的支撑，拟在T/CASEI 62001《起重机械 安全状况评估》框架下，明确给出相应的危险识别方法、设计分析方法和检验检测方法的应用示例，以进一步满足行业内关于起重机械安全状况评估工作的多样化需求，提高起重机械安全评估水平。

（三）起草单位及主要起草人

略。

（四）主要工作过程

2019 年 5 月 15 日，起草组全体成员在南京召开立项研讨会，讨论本文件立项申报书相关内容，并对后续起草工作安排进行讨论。

2019 年 7 月 2 日，起草组部分成员在南京召开讨论会，确定了标准中涉及到的评估方法及工具，并对每种方法和工具的适用性进行了细化，形成申报书相

关内容。

2019年7月8日，起草组部分成员在南京召开讨论会，进一步细化起草工作分工。

2019年7月17日-19日，起草组部分成员在南京先后召开3次讨论会，对标准中涉及到液压、检验检测及设计分析相关内容进行了讨论，初步确定在附录中给出计算仿真分析、应力分析的风险估计示例。

2020年9月8日，起草组部分成员在南京召开起草工作筹备会，初步确定了标准框架和起草人员工作任务分工。

2020年9月16日，起草组部分成员在南京召开起草工作会，初步确定了标准正文内容，并基本确定了标准附录清单，在附录中增加采用FMECA进行危险识别、风险估计的示例，采用风险图法对电气系统进行风险估计示例。

2020年至2021年期间，由于受疫情影响，标准编制工作进展滞后。

2022年9月2日，起草组部分成员通过视频形式召开了编制工作推进会，对标准附录内容进行了讨论，基本确定了标准初稿内容。为了便于给整机安全评估提供工作依据，以铸造起重机为例，给出了风险估计及安全状况评估等级确定示例。

2023年3月3日，起草组部分成员在南通召开编制工作推进会，对标准初稿进行了讨论论证，并对标准正文条款和附录内容进行了进一步优化。

2024年12月10日，起草组形成了标准征求意见稿。

二、编制原则和确定标准的主要内容

（一）编制原则

标准编制的原则是按照GB/T1.1-2020《标准化工作导则 第1部分：标准化文件的结构和起草规则》的要求进行编制，并遵循以下基本原则。

1. 合理性原则

标准制定的主要依据安全原理相关理论，基于GB/T 16856《机械安全 风险评估 实施指南和方法举例》基本思路，以T/CASEI 62001《起重机械 安全状况评估》为指导，在深入研究、分析、总结的基础上，对起重机械安全状况评估的程序和方法给出了明确描述，本文件在理论层面和法规标准依据上具备合理性。

2. 实用性原则

本文件充分考虑到各特种设备检验机构（以下检验机构）安全评估人员的专业需求，详细给出了安全评估过程中用到的典型方法示例，如附录A中给出了采用FMECA进行危险识别、风险估计的示例，附录B、C中分别给出了采用计算仿真分析方法和应力测试方法对金属结构进行风险估计准备的示例，附录D中给出了采用风险图法对电气系统进行风险估计的示例。上述各类方法加上T/CASEI 62001中提及的风险矩阵法、数值评分法等风险估计方法，基本上可以满足安全评估的大多数工作需求。

3. 可操作性原则

目前，行业内一些检验机构在起重机械安全评估方面已经开展了一些实践和尝试，个别类别起重机械已经形成了地方标准、行业标准、国家标准，但做法各异。本文件坚持风险管理的理念，依据T/CASEI 62001，针对安全评估过程中的每个环节给出了具体的示例，可操作性强。

（二）主要依据

本文件主要依据GB/T 15706 的风险管理理念，参照GB/T 16856的编制思路，以T/CASEI 62001为基本框架，给出了具体的方法示例。

（三）主要内容说明

1. 范围

本文件明确了是对T/CASEI 62001-2019的方法示例，文件的预定使用者是从事起重机械安全评估工作的特种设备执业从业人员，评估对象是在用起重机械。

2. 规范性引用文件

本章列出了本文件条款中直接引用的标准。

3. 术语和定义

本章引用了T/CASEI 62001界定的术语和定义，也根据实际情况引入了“委托方”、“实际误用”、“风险准则”等3个术语和定义，以便于评估人员准确应用本文件开展评估工作。

4 确定评估对象

4.1 评估需求分析

由于起重机械种类繁多，且使用单位安全管理需求多样化，作为评估人员要对评估需求进行认真分析，本文件重点关注了评估范围、评估情形以及评估需求本身被满足的可实现性。评估人员可结合自身实际适当拓展。

4.2 成立评估小组

本条款给出了，评估机构受理评估需求后，评估人员的组成以及资质能力的一般要求。

4.3 达成评估意向

评估小组代表评估机构与评估委托方达成评估意向，形成相应的书面委托文件。

5 收集评估对象信息

5.1 概述

本条款给出了评估对象信息的收集方式及信息类型。

5.2 评估依据

本条款列举出了基本的评估依据，评估人员和委托方也可根据实际情况适当增加。

5.3 静态信息

本条款给出了评估对象在非运行状态下，即可收集的相关信息。

5.4 动态信息

本条款给出了评估对象应在运行状况下收集的相关信息。

6 确定起重机械限制

6.1 确定使用限制

本条款主要强调起重机械使用过程中的安全管理完善程度、操作者的专业性对起重机械危险发生概率的影响。

6.2 确定空间限制

本条款主要强调起重机械使用过程中的空间环境因素对起重机械危险发生概率的影响。

6.3 确定时间限制

本条款主要强调起重机械及各机构、结构件、零部件的使用时间，维护保养时间、检验检测自查时间对起重机械危险发生概率的影响。

6.4 确定其他限制

本条款主要强调起重机械供电电源及环境温湿度、酸碱度、风力等自然环境及爆炸、高温等特殊环境下的适用性及防护程度对起重机械危险发生概率的影响。

7 划分评估单元

本条款主要考虑评估对象的复杂性，为确保评估过程的科学性、合理性、准确性，将其按照相应的结构特点或功能相关性进行逐级分解，便于后续的风险分析工作。

8 危险识别

8.1 概述

自上而下法是一种逆向思维方法，是从伤害追溯到危险。针对每一项伤害，均需核查评估对象的每个结构件、零部件及每个功能运行过程是否存在相应危险，较为耗时费力，且如果评估人员经验不足、考虑不周，或对评估对象结构状况、功能特点、历史事故故障信息的掌握不够的话，容易出现遗漏。因此，该方法主要适用于结构简单、功能单一的小型起重机械，不适合结构复杂、功能繁多的大型起重机械。

自下而上法是一种正向思维方法，是以所有的危险为起点，考虑在所确定的危险状态下所有可能发生的异常不期望状况及导致的伤害。相较自上而下法，自下而上法更容易做到全面彻底，易于初学者使用，可适用于大型起重机械。

8.2 方法举例

附录A为一种采用一种典型的自下而上法进行危险识别的示例，即：采用FMECA对抓斗卸船机进行危险识别、风险估计的示例。

9 风险估计准备

9.1 概述

风险估计准备是风险分析的重要环节，直接决定风险估计的准确性和有效性，根据评估需求和评估对象的具体情况，评估人员可以选择合适的风险估计准备方法。

9.2 方法举例

关于风险估计准备方法有许多种，评估人员在日常检验检测工作中基本上都会接触到。本条款以附录的形式给出了两种专业性较强、操作较复杂的方法。附录B是采用计算仿真分析对金属结构进行风险估计准备示例，附录C是采用电测法对金属结构进行应力测试的示例。

10 风险估计

10.1 概述

本条款中，在确定风险等级前，应结合当前的法律法规要求、委托方的安全管理需求及评估对象的结构特点和工作特性，对“伤害的严重程度”和“伤害的发生概率”进行等级划分，并对每个等级进行定性描述或者赋予其不同的量值来定性表示。然后，根据“伤害的严重程度”和“伤害的发生概率”不同等级的组合来确定风险等级。

特别注意的是，由于FMECA法不仅可以识别危险，还可以对其失效影响及危害性进行分析。因此，FMECA法可将危险识别、风险估计准备、风险估计三个步骤一起实现，最终确定危险源的风险等级。

这里，还有一点需要强调，当评估对象结构庞杂、危险源繁多时，为了突出风险管理重点，减少不必要的计算麻烦，建议评估人员与委托方商定，对风险的可接受程度进行定义。如系“可接受风险”，则舍去，在后续的“评估对象的综合安全状况等级判定”环节可不作考虑；如系“不可接受风险”，则保留，继续纳入“评估对象的综合安全状况等级判定”环节进行逐步计算。

10.2 方法示例

T/CASEI 62001—2019中已对数值评分法和风险矩阵法进行了详细介绍，本文件仅对风险图法进行详细说明。

11 评估对象的综合安全状况等级判定

11.1 概述

本条款中，评估项目的权重值 a_i 和评估单元的权重值 β_j 的取值是关键。评估人员可结合评估需求及评估对象各评估单元或评估项目的重要程度确定取值。

11.2 举例

附录E给出了对1台铸造起重机进行风险估计及综合安全状况等级判定的完整示例。

12 风险评价

本条款主要是结合评估对象的安全状况给出相应的评估结论，并给出相应的风险减小措施建议。如果评估对象的安全状况不被接受，委托单位可以在采取相应的风险减小措施后，重新发起评估需求。

13 评估报告

评估结束后，评估人员应向委托单位出具由评估人员签字、评估机构签章的评估报告。报告格式可参考T/CASEI 62001—2019中的附录E。

三、主要验证的过程和分析

为确保本文件方法合理、实用、操作性强，江苏省特检院作为标准牵头起草单位组织各参与起草单位完成了本文件对7个品种的12台起重机械安全状况评估的适用性验证工作，其中包括：通用桥式起重机2台、通用门式起重机2台、门座起重机2台、岸边集装箱起重机1台、冶金桥式起重机2台、造船门式起重机1台，架桥机2台。适用性验证完成后，标准起草单位根据验证结果对标准进行了修改，

以确保科学性、适用性、合理性。

四、与现行法律、法规和强制性国家标准的关系

本文件是根据我国起重机械行业安全监管的特点，在有关法律法规、安全技术规范和标准的基础上，对其关于起重机械安全评估要求做了具体的明确和细化，本文件制定时充分考虑了和有关法律法规、安全技术规范和标准的协调一致性。当有关法律法规、安全技术规范和强制性国家标准修订时，导致本文件中条款中不适宜的，以最新的有关法律法规、安全技术规范和强制性国家标准规定为准。

五、重大分歧意见的处理经过和依据

无重大分歧意见。

六、其他应予说明的事项

1. 本文件为首次发布。
2. 本文件适用于中国特种设备检验协会会员单位开展起重机械安全状况评估时使用，其他单位可以参照执行。

七、标准实施的建议

建议本文件作为中国特种设备检验协会团体标准发布，由中国特种设备检验协会组织宣贯。

标准起草组

2024年12月10日