



中华人民共和国国家标准

GB/T 41510—2022

起重机械安全评估规范 通用要求

Safety assessment rules for lifting appliances—General requirements

2022-07-11 发布

2023-02-01 实施

国家市场监督管理总局
国家标准化管理委员会 发布

目 次

前言	I
1 范围	1
2 规范性引用文件	1
3 术语和定义	1
4 安全评估目的、对象、方式和程序	2
5 职责与能力	3
6 安全评估方法	4
7 综合判定及处置措施	15
8 安全评估报告	16
附录 A (资料性) 起重机械剩余寿命估算	17
附录 B (资料性) 起重机械安全评估报告格式	22
参考文献	23

前 言

本文件按照 GB/T 1.1—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》的规定起草。

本文件与 GB/T 6067(所有部分)《起重机械安全规程》、GB/T 28264《起重机械 安全监控管理系统》等标准共同构成起重机械安全使用的国家标准体系。

请注意本文件的某些内容可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别专利的责任。

本文件由中国机械工业联合会提出。

本文件由全国起重机械标准化技术委员会(SAC/TC 227)归口。

本文件起草单位：北京起重运输机械设计研究院有限公司、大连理工大学、北京科正平工程技术检测研究院有限公司、北京起重运输机械设计研究院有限公司河南分院、河南省矿山起重机有限公司、太原重工股份有限公司、浙江省特种设备科学研究院、太原科技大学、宁夏天地奔牛银起设备有限公司、宁波市特种设备检验研究院、中铁科工集团有限公司、上海市特种设备监督检验技术研究院、广东省特种设备检测研究院、中联重科股份有限公司、大连华锐重工起重机有限公司、南京市特种设备安全监督检验研究院、徐州重型机械有限公司、中船第九设计研究院工程有限公司、法兰泰克重工股份有限公司、新乡市起重设备厂有限责任公司、江西起重机械总厂有限公司、科尼起重机械(上海)有限公司、河南卫华重型机械股份有限公司、江西华伍制动器股份有限公司、微特技术有限公司、抚顺永茂建筑机械有限公司、上海共久电气有限公司。

本文件主要起草人：王欣、林夫奎、尚洪、林卫国、须雷、李军、蒋剑锋、徐格宁、赵春晖、姚天富、陶天华、王建儿、李晓钢、刘恩频、姜晓军、罗贤智、李文杰、胡静波、胡海鹏、朱靖、袁秀峰、陈瑞明、滕儒民、刘传贺、朱瑛、高宁、聂福全、杜军华、聂道静、闫利军、王照岳、邵宸。

起重机械安全评估规范 通用要求

1 范围

本文件规定了起重机械安全评估通用的目的、对象、方式和程序、职责与能力、方法、综合判定及处置措施、安全评估报告。

本文件适用于塔式起重机、流动式起重机、臂架起重机、桥式和门式起重机及缆索起重机,其他类型的起重机械可参照执行。

2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中,注日期的引用文件,仅该日期对应的版本适用于本文件;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 3323.1 焊缝无损检测 射线检测 第1部分:X和伽玛射线的胶片技术
- GB/T 3323.2 焊缝无损检测 射线检测 第2部分:使用数字化探测器的X和伽玛射线技术
- GB/T 3811 起重机设计规范
- GB/T 5972 起重机 钢丝绳 保养、维护、检验和报废
- GB/T 6067(所有部分) 起重机械安全规程
- GB/T 6974.1 起重机 术语 第1部分:通用术语
- GB/T 20863.1 起重机 分级 第1部分:总则
- GB/T 22437.1—2018 起重机 载荷与载荷组合的设计原则 第1部分:总则
- GB/T 26951 焊缝无损检测 磁粉检测
- GB/T 26952 焊缝无损检测 焊缝磁粉检测 验收等级
- GB/T 26953 焊缝无损检测 焊缝渗透检测 验收等级
- GB/T 30024—2020 起重机 金属结构能力验证
- JB/T 10559 起重机械无损检测 钢焊缝超声检测

3 术语和定义

GB/T 6974.1界定的以及下列术语和定义适用于本文件。

3.1

起重机械安全评估 safety assessment of lifting appliances

专业技术人员通过安全技术档案审核、现场检查、试验和数据采集、剩余寿命理论估算等方法,对起重机械的结构、机构、液压、电气及其零部件等可能存在的安全隐患进行分析判断,对起重机械的安全状态做出综合性评价的活动。

3.2

降级使用 degrade application

经安全评估,起重机械的安全性能不能达到设计要求,需降低起重机械使用技术参数或限制部分使用功能的情况。

3.3

安全等级 safety class

经安全评估后所确定的起重机械安全级别。

3.4

重要结构件 principal structural member

起重机械金属结构的主要受力构件,因其失效会导致起重机械不安全的结构件。

3.5

关键零部件 critical component

因其失效会导致起重机械不安全的零部件。

3.6

设计寿命 design life

基于起重机械初始设计要求,并考虑工作循环次数以及预期工况的预设载荷谱条件下预估的许用工作时间。

3.7

使用寿命 service life

在实际工作循环数、载荷谱条件下,起重机械从投入使用至达到报废条件的实际工作时间。

3.8

剩余寿命 remaining life

起重机械从当前时间到其报废为止的工作时间。

注:为使用寿命与已使用时间的差值。

3.9

维护 maintenance

为使起重机械保持或恢复到能执行其规定功能的状态而进行的一系列工作。

注:维护分为计划性维护和非计划性维护。维护工作包括保养和维修。

4 安全评估目的、对象、方式和程序

4.1 评估目的

以起重机械安全使用为主要目标,查找起重机械可能存在的安全隐患,分析判断安全隐患的影响程度,综合评价起重机械的安全状态,提出合理可行的安全应对措施,指导影响起重机械安全的危险源(影响起重机械安全的危险根源,包括起重机械本体缺陷、环境危险、违规操作等)监控和事故预防,降低事故发生率,减少损失。

4.2 评估对象

有下列情况之一时,应进行起重机械安全评估工作:

- a) 发现有重要结构件或关键零部件损伤;
- b) 接近/达到/超过设计寿命;
- c) 发生影响起重机械安全的事故;
- d) 受极端环境影响,如暴风、重大地震等,存在安全隐患;
- e) 影响起重机械安全的故障频发;
- f) 起重机械工作状况明显恶化;
- g) 使用单位有需求;
- h) 安全监督管理部门认为有必要。

4.3 评估方式

起重机械安全评估分为现状评估、预测评估和综合评估。具体内容如下：

- a) 现状评估是通过安全技术档案审核、现场检查、数据采集、试验验证等工作，了解起重机械现状的完好状态以及存在的危害、缺陷和损伤等不安全因素，并分析原因及其对起重机械安全使用的影响；
- b) 预测评估是在现状评估基础上，根据后期的作业使用情况，进一步分析危害、缺陷和损伤的变化趋势和速度，预测对起重机械安全可能造成的危害和影响；
- c) 综合评估是根据现状评估和预测评估情况，综合评价起重机械的整体情况，并通过分析构件缺陷、损伤以及材料性能退化的状态、原因及变化趋势，提出起重机械综合评估结论和整机安全等级。

4.4 评估程序

起重机械安全评估程序主要包括安全评估方案编制、安全技术档案审核、现场检查与数据采集及试验、剩余寿命理论估算、整机综合评判和安全评估报告编制，工作程序见图 1。具体要求如下：

- a) 在安全评估前，应根据所评估起重机械的实际情况及本文件规范的内容编制详细的安全评估方案；
- b) 安全技术档案审核范围包括起重机械技术文件及使用、检查、维护、改造、故障、事故等记录；
- c) 现场检查与数据采集及试验包括重要结构件和机械、液压、电气、安全防护装置等关键零部件的目测检查、无损检测、载荷试验和应力测试(如需要)，目测检查应包括对重要结构件、关键零部件的腐蚀、磨损、裂纹、变形等情况检查，无损检测应包括对重要结构件和关键零部件的裂纹与焊缝质量检测，载荷试验应包括对整机承载能力及机构、液压、电气和安全防护装置的运行状况、性能与功能的测试，结构应力测试应至少包括重要结构件的静态和动态测试；
- d) 剩余寿命理论估算应包括采用累积损伤等适用的估算方法，对整机、机构、关键零部件、重要结构件估算剩余寿命；
- e) 整机综合评判应结合安全技术档案的审核情况、现场检查与数据采集及试验结果、剩余寿命理论估算结果，按本文件的规定，判定起重机械安全等级，给出安全评估结论；
- f) 整机综合评判后，按第 8 章内容编制安全评估报告。

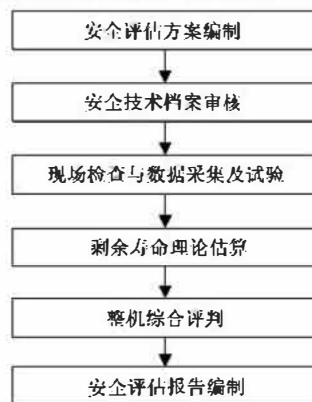


图 1 安全评估工作程序

5 职责与能力

5.1 委托单位

委托单位应是起重机械的使用方、产权方、制造方、第三方(如监管部门、司法机关)中的任意方。委

托单位应提供所评估起重机械在使用过程中的相关作业数据、事故情况、改造、重大修理等可能影响评估内容、结论的相关技术资料。

5.2 安全评估机构

安全评估机构应具备独立、公正开展安全评估的资源条件(包括人员、试验检验仪器等),及有效实施的质量保证体系。

5.3 安全评估人员

安全评估人员应至少满足以下条件:

- a) 具有所评估起重机械的设计、制造、安装、检验等一项或多项专业技术知识和经验的综合能力;
- b) 熟悉有关法律法规和标准;
- c) 掌握起重机械安全评估程序和方法;
- d) 能够判定所评估起重机械的安全性,并能给出保证起重机械安全运行的措施建议。

6 安全评估方法

6.1 安全技术档案审核

起重机械的安全评估应根据实际情况,审核以下技术文件及记录:

- a) 起重机械相关文件,包括法定资质文件、产品质量证明文件、产品使用说明书、维护说明书、安装拆卸说明书等;
- b) 起重机械基本信息,包括主要技术参数(如额定起重量、工作级别、载荷状态级别、设计寿命等)、使用单位、制造单位、出厂日期、规格型号等;
- c) 历次安全评估报告;
- d) 作业使用记录、安全监控数据;
- e) 检查与维护记录,包括日常检查记录、定期检查记录、保养记录、维修记录、零部件更换记录、测试记录、试验记录、事故和故障情况及处理记录等;
- f) 后期的载荷作业与使用情况;
- g) 型式试验报告及有关的设计技术资料。

6.2 现场检验与试验

6.2.1 环境条件

现场检验与试验时,环境条件应满足相关产品的标准要求及测试要求。

6.2.2 检验仪器

检验与试验仪器仪表的精度等级应满足安全评估需求,且应按规定进行检定或校准。

6.2.3 检验与试验项目

6.2.3.1 目测检查

6.2.3.1.1 检查对象

6.2.3.1.1.1 检查项目

对所有可能影响起重机械安全使用的重要结构件、关键零部件、安全防护装置都应进行检查,重要结构件与连接举例见表1,关键零部件举例见表2,安全防护装置举例见表3。除此之外,检查还应

包括：

- a) 受损零部件,包括外观可见裂纹、严重锈蚀、磨损、变形等情况；
- b) 工作异常的结构、机构、液压、电气部件；
- c) 维护记录中显示反复失效与故障频繁的零部件；
- d) 上一次安全评估报告提出的需要重点关注的零部件；
- e) 根据 6.1 的审核结果提出的需要重点检查检测的零部件；
- f) 其他异常零部件。

表 1 重要结构件与连接举例

起重机类型及其他	重要结构件
塔式起重机	起重臂、平衡臂、塔顶、转台、塔身、底架、拉杆、顶升套架
流动式起重机	臂架、转台、车架、履带架、支腿
臂架起重机	臂架、拉杆、桅杆、人字架、转台、立柱、门架、平衡梁
桥式和门式起重机	主梁、端梁、小车架、刚/柔支腿、平衡梁、起重横梁、马鞍架
缆索起重机	支撑结构
重要结构件的连接	焊缝、螺栓、销轴

表 2 关键零部件举例

分类	关键零部件
机械	取物装置(如吊钩、抓斗、吊杆等)、起重用短环链(包括链条与链轮等)、钢丝绳、滑轮、卷筒、减速器、制动装置、联轴器、车轮、滚轮、回转支承、开式齿轮、排绳装置、柔性铰装置、钢丝绳平衡装置、起重葫芦
液压	主回路上的泵、方向控制阀、压力控制阀、流量控制阀、安全阀、马达、油缸、管路与接头、蓄能器
电气	电动机、发动机、发电机、集电器、接触器、指示器、断路器、继电器、控制器、电阻器、控制柜、控制电源、操纵装置、电控线缆、调速装置、触摸屏、变频器
气动	主回路上的气动泵、气动马达、气动控制阀、气室、储气筒、制动软管
通用性部件	司机室、平台、梯子、栏杆、轨道

表 3 安全防护装置举例

起重机械类型	安全防护装置
塔式起重机	起重量限制器、起重力矩限制器、起升高度限位器、下降深度限位器、运行行程限位器、幅度限位器、幅度指示器、联锁保护安全装置、防后倾装置、极限力矩限制装置、回转限位器、回转锁定装置、防碰撞装置、缓冲器、抗风防滑(锚定)装置(行走式)、风速仪、轨道清扫器(行走式)、端部止挡(行走或变幅)、防护罩、防小车坠落保护装置、小车断绳保护装置、检修平台、作业报警装置、航空警戒灯
流动式起重机	起重力矩限制器、起升高度限位器、下降深度限位器、幅度限位器、幅度指示器、水平仪、防后倾装置、风速仪、垂直支腿回缩锁定装置、回转锁定装置、作业报警装置、防护罩、航空警戒灯、角度限制器、倒退报警装置

表 3 安全防护装置举例(续)

起重机械类型	安全防护装置
臂架起重机	起重量限制器、起重力矩限制器、极限力矩限制装置、起升高度限位器、下降深度限位器、运行行程限位器、幅度限位器、幅度指示器、防后倾装置、回转锁定装置、防碰撞装置、缓冲器、端部止挡、联锁保护安全装置、抗风防滑(锚定)装置、风速仪、轨道清扫器、作业报警装置(大车运行)、防护罩、航空警戒灯
桥式和门式起重机	起重量限制器、起升高度限位器、下降深度限位器、运行行程限位器、联锁保护安全装置、缓冲器、抗风防滑(锚定)装置、风速仪、防倾翻安全钩、轨道清扫器、端部止挡(运行机构)、导电滑线的防护装置、作业报警装置、防护罩、防碰撞装置、检修平台、行走纠偏装置
缆索起重机	起重量限制器、起升高度限位器、下降深度限位器、运行行程限位器、缓冲器、端部止挡(运行机构)、抗风防滑(锚定)装置、风速仪、轨道清扫器、防护罩
起重葫芦	起重量限制器、起升高度限位器、下降深度限位器

6.2.3.1.1.2 抽检原则

对于重要结构件和关键零部件检查部位的长度、面积、体积较大的情况,应依据有关标准或制造单位提供的技术文件中规定的抽检方法,进行抽样检查,也可由委托单位与评估机构双方约定。如没有相关规定时,重要结构件和关键零部件的目测检查可采取如下抽检原则:

- a) 目测有明显腐蚀、磨损、变形、裂纹的关键部位应全数检查;
- b) 销轴和销轴孔抽检数量不应少于总数量的 20%,且不应少于 4 个;
- c) 螺栓和螺栓孔抽检数量不应少于相应部位总数量的 20%,且不应少于 20 个;
- d) 重要结构件的整体变形应全数检查,至少应包括 6.2.3.1.1.1 中的重要结构件;
- e) 液压系统主油路上的动力元件、控制元件和执行元件宜全数检查;
- f) 制动装置应全数检查;
- g) 电气中的电阻器、控制柜、接触器、断路器宜全数检查;
- h) 安全防护装置应根据 GB/T 6067(所有部分)以及各产品标准的规定全数检查;
- i) 每根钢丝绳的抽检长度不应少于绳长的 50%,检测位置不应少于 3 处,且分布在经常工作范围内;
- j) 钢丝绳固定端应全数检查。

6.2.3.1.2 检查方法

应按表 4 的规定检查起重机械重要结构件和关键零部件外观上的腐蚀、磨损、可见裂纹、变形、油漆剥落、老化等情况,如:

- a) 检测腐蚀部位的腐蚀面积与腐蚀厚度;
- b) 检测磨损部位的磨损面积与磨损厚度;
- c) 检测可见裂纹的长度、深度和方向;
- d) 检测变形时,应测量实际轴线相对设计轴线的最大偏差值,必要时测量构件横截面的变形。

表 4 检查内容

检查项目	检查内容
重要结构件	腐蚀、磨损、可见裂纹、变形、油漆剥落
重要结构件连接	腐蚀、磨损、可见裂纹、变形

表 4 检查内容 (续)

检查项目	检查内容
机械关键零部件	腐蚀、磨损、可见裂纹、变形、卡滞、油漆剥落、缺失状况
液压关键零部件	腐蚀、泄漏
电气关键零部件	老化、接触性能
安全防护装置	腐蚀、磨损、变形、缺失状况

6.2.3.1.3 检查结果判定

应根据表 5 的规定,对各检查对象进行安全判定。表 5 中未列出的其他检测项目判定指标,根据 GB/T 3811、GB/T 6067(所有部分)及各类起重机的安全评估标准、报废标准和产品标准的规定,以及制造单位的技术文件确定各项检测指标值。若指标值在多个文件中规定不一致时,按其中最严格的规定执行。对没有相关规定的检测指标值,可由安全评估机构在具有充分计算和数据依据的基础上来确定。

表 5 目测检查的安全判定

部件名称	检查项目	判定指标	判定结果
钢丝绳	腐蚀、磨损、变形与断丝	达到 GB/T 5972 规定的报废条件时	不符合
		对于吊运炽热金属、熔融金属或者危险品的起重机械用钢丝绳的报废断丝数达到 GB/T 5972 所规定的钢丝绳断丝数的一半时	
		防爆起重机钢丝绳有断丝时	
		除上述情况	符合
GB/T 6067(所有部分)规定的部件	腐蚀、磨损、可见裂纹、变形	达到 GB/T 6067(所有部分)规定的报废条件	不符合
		未达到 GB/T 6067(所有部分)规定的报废条件	符合
其他零部件	裂纹	有明显可见裂纹,使结构不能正常安全承载	不符合
		除上述情况	符合
	腐蚀与磨损	单件断面减薄厚度比 ^a ≥10%,且影响安全使用	不符合
		除上述情况	符合
	泄漏	有泄漏,且使液压系统不能正常安全运行	不符合
		除上述情况	符合

^a 断面减薄厚度比是减薄的厚度与厚度公称尺寸的比值。

6.2.3.2 无损检测

6.2.3.2.1 检测对象

6.2.3.2.1.1 检测项目

检测对象见 6.2.3.1.1 中的重要结构件和焊缝连接及关键零部件。

6.2.3.2.1.2 抽检原则

对于重要结构件和关键零部件检测部位的长度、面积、体积较大的情况,应依据有关标准或制造单

位提供的技术文件中规定的抽检方法,进行抽样检测,也可由委托单位与评估机构双方约定。如没有相关规定时,重要结构件和关键零部件的无损检测可采取如下抽检原则:

- a) 异常部位应全数检测;
- b) 容易出现裂纹的受拉焊缝抽检长度不应少于总长度的 20%,且不应少于 3 处。

6.2.3.2.2 检测方法

应采用磁粉、渗透等方法检测表面缺陷,应采用超声波或射线照相等方法检测内部缺陷。

6.2.3.2.3 检测结果判定

应根据表 6 的规定,对各检测对象进行安全判定。

表 6 无损检测的安全判定

检测项目	判定指标	判定结果
焊缝质量与裂纹	不符合 GB/T 6067(所有部分)规定的焊缝质量或不符合无损检测标准规定 ^a	不符合
	符合 GB/T 6067(所有部分)规定的焊缝质量,且符合无损检测标准规定 ^a	符合
单件裂纹	存在裂纹,不能正常安全承载	不符合
	除上述情况	符合
^a 磁粉检测应符合 GB/T 26951 和 GB/T 26952 的规定,渗透检测应符合 GB/T 26953 的规定,超声波检测应符合 JB/T 10559 的规定,射线检测应符合 GB/T 3323.1 和 GB/T 3323.2 的规定。		

6.2.3.3 载荷试验

6.2.3.3.1 载荷试验主要验证结构的承载能力,机构、液压、电气、安全防护装置的运行状态、运行性能与各项功能。

6.2.3.3.2 载荷试验包括空载试验和额定载荷试验。机构在更换后,还应进行 1.1 倍额定载荷的动载试验。重要结构件在改造或重大修理后,还应进行 1.25 倍额定载荷的静载试验。

6.2.3.3.3 试验前应先按相应产品标准的规定对整机结构、机械零部件的连接固定情况、液压系统、电气系统及安全防护装置等进行检查,确认是否满足载荷试验条件。

6.2.3.3.4 试验程序应符合相应产品试验规范规定。对于降级使用的起重机械,试验载荷应按降级后的载荷选取。

6.2.3.3.5 必要时,对整机进行静刚性测试。

6.2.3.3.6 起重机械的空载试验、额定载荷试验、动载试验和静载试验及静刚性测试,应符合相应产品标准要求。如有一项未达到标准要求,则判定此项试验或测试不合格。

6.2.3.4 应力测试

6.2.3.4.1 通则

主要技术参数发生变化、重要结构件经过改造、重大修理的起重机械,或经检查存在一定结构损伤、需要对整机承载能力做精确评估时,应进行结构应力测试。

6.2.3.4.2 测试工况与测试点

测试工况应按相应起重机械试验标准的要求选取。对于降级使用的起重机械,试验载荷按降级后的载荷选取。应力测试可与载荷试验同时进行。

需要进行应力测试的构件应根据 6.2.3.1、6.2.3.2、6.2.3.3 的检验试验结果及 6.2.3.4.1 确定,应力测试点应根据实际情况选择布置在危险应力区。危险应力区宜包括以下 2 种类型:

- a) 均匀高应力区(该区应力达到屈服应力时,会引起结构件的塑性变形);

b) 应力集中区(该区内屈服应力的出现不会引起结构件整体的塑性变形,但应力集中会影响结构件的疲劳寿命,如孔洞、尖角、焊缝等截面剧变处)。

测试点布置举例见表 7,同时结合结构检查结果在磨损、锈蚀、裂纹及变形较大的部位增加测试点。若检测应力在危险应力区内,应增加相应部位应力检测点的数量。

表 7 测试点布置举例

起重机类型	测试点布置部位
塔式起重机	起重臂、平衡臂、塔身:根部、变截面、变径截面 转台:与回转支承连接主截面、变板厚主截面
流动式起重机	臂架:根部、变截面、变径/变板厚截面 转台:与回转支承连接主截面、变板厚主截面 底盘:与回转支承连接的主截面 支腿:与车架连接的主截面
臂架起重机	臂架:根部、变截面、变径/变板厚截面 转台:与回转支承连接主截面、变板厚主截面 立柱:根部、与回转支承/回转车轮连接的主截面 门座:与上部构件连接截面、变截面、轴线转折截面 大车运行平衡梁:销轴连接截面、变截面、轴线转折截面
桥式和门式起重机	主梁:跨中截面、与刚腿连接截面、变板厚截面、主梁端部的变截面 端梁:与主梁连接截面 刚腿:与主梁连接截面、变截面、变板厚截面、与平衡梁连接截面 柔腿:与平衡梁连接截面 大车运行平衡梁:销轴连接截面、变截面、轴线转折截面
缆索起重机	支撑结构:根部、变截面

6.2.3.4.3 结构应力安全判定

结构应力安全判定按 GB/T 3811 提供的极限状态设计方法进行。结构应力是自重应力和起升载荷应力的合成,其中自重应力可通过计算等方法得出,起升载荷的应力测试数据应在试验载荷静置平稳后采集。在计算均匀高应力区的结构应力时,自重与起升载荷的分项安全系数按 GB/T 22437.1—2018 选取(额定载荷测试工况按载荷组合 A 选取,本体拆装测试工况按载荷组合 C 选取)。在计算应力集中区的结构应力时,自重与起升载荷的分项安全系数见表 8。结构应力的安全评定应按表 8 的规定。

表 8 结构应力的安全判定

测试工况	均匀高应力区		应力集中区		判定指标	安全判定结果
	自重 分项安全系数	起升载荷 分项安全系数	自重 分项安全系数	起升载荷 分项安全系数		
额定载荷 测试工况	按 GB/T 22437.1—2018 的表 4 选取	1.34	1.00	1.00	$\sigma > \lim\sigma$	不符合
					$\sigma \leq \lim\sigma$	符合
本体拆装 测试工况 ^a	按 GB/T 22437.1—2018 的表 4 选取	1.10	1.00	1.00	$\sigma > \lim\sigma$	不符合
					$\sigma \leq \lim\sigma$	符合
σ —— 结构应力,单位为牛每平方米(N/mm ²)。 $\lim\sigma$ —— 极限设计应力,根据 GB/T 3811 提供的方法计算,单位为牛每平方米(N/mm ²)。						
^a 表示诸如流动起重机自起臂或落臂的非作业拆装工况。						

6.3 剩余寿命理论估算

6.3.1 设计寿命、使用寿命与剩余寿命

本文件采用线性累积损伤理论进行剩余寿命估算。

整机、机构、机械零件及结构件的设计寿命在起重机械设计时确定,与载荷/应力状态级别和工作级别有关,应由制造单位提供,也可根据使用场合通过 GB/T 3811 进行估算。表 9 中的与设计寿命相关参数按 GB/T 20863.1 的规定确定。

表 9 与设计寿命有关参数

名称	与设计寿命相关参数
整机	使用等级 U,载荷/应力状态级别 Q_p ,载荷/应力谱系数 K_p ,工作级别 A
零部件	使用等级 U,载荷/应力状态级别 Q_{ep} ,载荷/应力谱系数 K_{ep} ,工作级别 A_e

如果实际载荷/应力谱系数与设计时预期的载荷/应力谱系数不同,则实际使用寿命与设计寿命不同,但对于同一个工作级别,具有公式(1)的关系。

$$K_p N_Q = K_{pi} N_{Qi} \dots\dots\dots (1)$$

式中:

- K_p ——设计载荷/应力谱系数;
- N_Q ——设计寿命(工作循环次数);
- K_{pi} ——实际载荷/应力谱系数;
- N_{Qi} ——实际使用寿命(工作循环次数)。

估算剩余寿命时,如果未来的载荷/应力谱系数与实际载荷/应力谱系数相同,则按公式(2)进行计算。否则,应从损伤度角度按 6.3.2~6.3.5 的规定估算。

$$N_y = N_{Qi} - N_{Qu} \dots\dots\dots (2)$$

式中:

- N_y ——剩余寿命;
- N_{Qi} ——实际使用寿命;
- N_{Qu} ——已使用的寿命。

6.3.2 整机剩余寿命的理论估算

起重机械的一个工作循环是指从起吊一个物品起,到开始起吊下个物品时止,包括各机构运行及正常停歇在内的一个完整工作过程。多个工作循环次数构成起重机械的使用寿命。

根据累积损伤原理,起重机械每次作业,由于工作载荷的作用,会对整机造成损伤。则起重机械工作时累积的损伤度按公式(3)计算。

$$D_{Qu} = f_{Qui} \frac{K_{pu} N_{Qui}}{K_p N_Q} \dots\dots\dots (3)$$

式中:

- D_{Qu} ——起重机械实际工作时累积的损伤度;
- f_{Qui} ——放大系数,考虑起重机械实际工作载荷记录和估计的不确定性,按表 10 选取;
- K_{pu} ——起重机械已发生的载荷谱系数,按公式(4)计算。

$$K_{pu} = \sum \frac{P_{Qui}^m n_{Qui}}{P_{Qmax}^m N_{Qu}} \dots\dots\dots (4)$$

式中:

- P_{Qui} ——起重机械的实际起升载荷,单位为千牛(kN);
- n_{Qui} ——起重机械起吊实际工作载荷 P_{Qui} 对应已发生的工作循环次数;
- m ——幂指数,取 $m=3$;

$P_{Q_{max}}$ ——最大额定起升载荷,单位为千牛(kN);
 $N_{Q_{ui}}$ ——起重机械已发生的总工作循环次数, $N_{Q_{ui}} = \sum n_{Q_{ui}}$ 。

表 10 放大系数 f_1

序号	作业数据记录方法	f_1
1	基于系统或计数器自动记录的连续作业数据	1.0
2	基于专门的、主观记录的离散作业数据	1.1
3	基于使用现场有记录的生产数据估计的作业数据	1.2
4	基于使用现场无记录的生产数据估计的作业数据	1.3

起重机械的剩余损伤度按公式(5)计算。

$$D_{Q_y} = 1 - D_{Q_u} \dots\dots\dots(5)$$

式中:

D_{Q_y} ——起重机械的剩余损伤度;

D_{Q_u} ——起重机械实际工作时累积的损伤度。

如果剩余损伤度 $D_{Q_y} \leq 0$, 则表明起重机械工作寿命已到期。如果 $D_{Q_y} > 0$, 则起重机械的剩余寿命按公式(6)计算。

$$N_{Q_y} \leq \frac{K_p \cdot N_Q}{f_{Q_{yl}} K_{py}} D_{Q_y} \dots\dots\dots(6)$$

式中:

N_{Q_y} ——起重机械剩余工作循环次数;

$f_{Q_{yl}}$ ——放大系数,考虑起重机械剩余工作载荷记录和估计的不确定性,按表 10 选取;

K_{py} ——起重机械剩余工作载荷谱系数,如果未知,可取 $K_{py} = K_{pu}$;

D_{Q_y} ——起重机械剩余损伤度。

K_p 、 N_Q 与公式(1)相同。

起重机械剩余寿命年限按公式(7)计算,估算示例参见附录 A。

$$T_{Q_y} = \frac{N_{Q_y}}{n_{Q_y}} \dots\dots\dots(7)$$

式中:

T_{Q_y} ——起重机械剩余寿命年限,单位为年(a);

N_{Q_y} ——起重机械剩余工作循环次数;

n_{Q_y} ——起重机械剩余工作平均的每年工作循环次数,如果未知,可按已发生的平均每年工作循环次数取值。

6.3.3 机构剩余寿命的理论估算

机构的寿命由工作循环次数表示。在起重机械一个工作循环内,各机构可能经受不同的工作循环次数,这与该起重机械实际动作需求有关。

与起重机械剩余寿命估算原理相同,当工作载荷作用在机构上时,会对机构造成损伤,累积的损伤度按公式(8)计算。

$$D_{M_u} = f_{M_{ul}} \frac{K_{cpu} N_{M_u}}{K_{cp} N_M} \dots\dots\dots(8)$$

式中:

D_{M_u} ——机构实际工作时累积的损伤度;

$f_{M_{ul}}$ ——放大系数,考虑机构实际工作载荷记录和估计的不确定性,见表 10;

K_{cpu} ——机构实际工作载荷谱系数,按公式(9)计算;

N_{M_u} ——机构已发生的总工作循环次数, $N_{M_u} = \sum n_{M_{ui}}$;

K_{cp} —— 机构设计寿命与对应的载荷谱系数,见 6.3.1;
 N_M —— 机构工作级别对应的载荷谱系数为 1 时的工作循环次数。

$$K_{cpu} = \sum \frac{P_{Mui}^m n_{Mui}}{P_{Mmax}^m N_{Mu}} \dots\dots\dots (9)$$

式中:

P_{Mui} —— 机构实际工作载荷,单位为千牛(kN);
 n_{Mui} —— 机构实际工作载荷 P_{Mui} 对应已发生的工作循环次数;
 m —— 幂指数,取 $m=3$;
 P_{Mmax} —— 机构最大工作载荷,单位为千牛(kN)。
 机构的剩余损伤度按公式(10)计算。

$$D_{My} = 1 - D_{Mu} \dots\dots\dots (10)$$

式中:

D_{My} —— 机构的剩余损伤度;
 D_{Mu} —— 机构实际工作时累积的损伤度。
 如果剩余损伤度 $D_{My} \leq 0$,则表明机构寿命已到期。如果 $D_{My} > 0$,则机构的剩余寿命按公式(11)计算。

$$N_{My} \leq \frac{N_M K_{cp}}{f_{My1} K_{cpy}} D_{My} \dots\dots\dots (11)$$

式中:

N_{My} —— 机构剩余工作循环次数;
 D_{My} —— 机构剩余损伤度;
 f_{My1} —— 放大系数,考虑机构后期工作载荷记录和估计的不确定性,按表 10 选取;
 K_{cpy} —— 机构剩余工作载荷谱系数,如果未知,可取 $K_{cpy} = K_{cpu}$ 。
 N_M 、 K_{cp} 与公式(8)相同。
 机构的剩余寿命年限可按公式(12)计算。

$$T_{My} = \frac{N_{My}}{n_{My}} \dots\dots\dots (12)$$

式中:

T_{My} —— 机构的剩余寿命年限,单位为年(a);
 N_{My} —— 机构剩余工作循环次数;
 n_{My} —— 机构剩余工作的平均每年工作循环次数,如果未知,可按已发生的平均每年工作循环次数取值。

6.3.4 机械零件剩余寿命的理论估算

当机械零件存在疲劳破坏的可能时,按 6.3.4 估算剩余寿命。

机械零件的寿命由工作循环次数表示。在起重机械一个工作循环内,机械零件可能经受多个应力循环,这与其在该起重机械中的具体位置有关。如果记录有机械零部件的应力历程,可通过雨流计数法对应力进行分级,并统计各分级下的应力循环次数。

与起重机械剩余寿命估算原理相同,机械零件在工作载荷作用下引起的应力,会对其造成损伤,累积的损伤度按公式(13)计算。

$$D_{Cu} = f_{Cu1} \frac{K_{cpu} N_{Cu}}{K_{cp} N_C} \dots\dots\dots (13)$$

式中:

D_{Cu} —— 机械零件实际工作时累积的损伤度;
 f_{Cu1} —— 放大系数,考虑机械零件实际工作载荷记录和估计的不确定性,按表 10 选取;
 K_{cpu} —— 机械零件实际工作应力谱系数,按公式(14)计算;
 N_{Cu} —— 机械零件已发生的总工作循环次数, $N_{Cu} = \sum n_{Cui}$;
 K_{cp} —— 机械零件设计寿命与对应的应力谱系数,见 6.3.1;
 N_C —— 机械零件工作级别对应的应力谱系数为 1 时的工作循环次数。

$$K_{cp} = \sum \frac{\sigma_{Cui}^{n_{Cui}}}{\sigma_{Cmax}^c N_{Cu}} \dots\dots\dots(14)$$

式中:

- σ_{Cui} ——机械零件实际工作应力,单位为牛每平方米(N/mm²);
 - n_{Cui} ——机械零件实际工作应力 σ_{Cui} 对应已发生的工作循环次数;
 - c ——幂指数,与有关材料的性能,机械零件的种类、形状和尺寸,表面粗糙度以及腐蚀程度等有关,由试验得出,可按 GB/T 3811 的计算公式得到;
 - σ_{Cmax} ——机械零件的最大工作应力,单位为牛每平方米(N/mm²)。
- 机械零件的剩余损伤度按公式(15)计算。

$$D_{Cy} = 1 - D_{Cu} \dots\dots\dots(15)$$

式中:

- D_{Cy} ——机械零件的剩余损伤度;
- D_{Cu} ——机械零件实际工作时累积的损伤度。

如果剩余损伤度 $D_{Cy} \leq 0$,则表明机械零件寿命已到期。如果 $D_{Cy} > 0$,则机械零件的剩余寿命按公式(16)计算。

$$N_{Cy} \leq \frac{N_c K_{cp}}{f_{Cyl} K_{epy}} D_{Cy} \dots\dots\dots(16)$$

式中:

- N_{Cy} ——机械零件剩余工作循环次数;
- D_{Cy} ——机械零件剩余损伤度;
- f_{Cyl} ——放大系数,考虑机械零件剩余工作应力记录和估计的不确定性,按表 10 选取;
- K_{epy} ——机械零件剩余工作应力谱系数。
- N_c 、 K_{cp} 与公式(13)相同。

机械零件剩余寿命年限可按公式(17)计算。

$$T_{Cy} = \frac{N_{Cy}}{n_{Cy}} \dots\dots\dots(17)$$

式中:

- T_{Cy} ——机械零件剩余寿命年限,单位为年(a);
- N_{Cy} ——机械零件剩余工作循环次数;
- n_{Cy} ——机械零件剩余工作平均每年工作循环次数,如果未知,可按已发生的平均每年工作循环次数取值。

6.3.5 结构件剩余寿命的理论估算

当结构件存在疲劳破坏的可能时,按 6.3.5 估算剩余寿命。

结构件的寿命由应力循环次数表示。与机械零件相同,在起重机械一个工作循环内,结构件可能经受多个应力循环(如多次往复变幅带来的臂架多次应力循环),这与结构件在该起重机械中的具体位置有关。本文件采用应力幅法估算结构件的寿命,估算涉及的应力为名义应力。名义应力是母材中临近潜在裂纹位置的、按材料纯弹性强度理论计算的应力,不考虑局部应力集中效应。

结构件的应力幅按公式(18)计算。

$$\Delta\sigma = |\sigma_{max} - \sigma_{min}| \dots\dots\dots(18)$$

式中:

- $\Delta\sigma$ ——结构件的应力幅,单位为牛每平方米(N/mm²);
- σ_{max} ——结构件在一个应力循环内的最大应力,拉为“+”,压为“-”,单位为牛每平方米(N/mm²);
- σ_{min} ——结构件在一个应力循环内的最小应力,拉为“+”,压为“-”,单位为牛每平方米(N/mm²)。

结构件上工作载荷作用引起的结构应力,会对其造成损伤,累积的损伤度按公式(19)计算。

$$D_{Su} = f_{Sul} \left(\frac{\Delta\hat{\sigma}}{\Delta\sigma_c / \gamma_{mf}} \right)^m s_{mu} \dots\dots\dots (19)$$

式中：

D_{Su} ——结构件实际工作时累积的损伤度；

f_{Sul} ——放大系数，考虑结构件实际工作应力记录和估计的不确定性，按表 10 选取；

$\Delta\hat{\sigma}$ ——结构件的最大工作应力幅，单位为牛每平方米(N/mm²)；

$\Delta\sigma_c$ ——结构特征疲劳强度，单位为牛每平方米(N/mm²)；

γ_{mf} ——疲劳强度抗力系数，按表 11 选取；

s_{mu} ——结构件实际应力历程参数，按公式(20)计算。

$$s_{mu} = K_{cpu} \frac{N_{Su}}{N_{ref}} \dots\dots\dots (20)$$

式中：

N_{Su} ——结构件已发生的总工作循环次数， $N_{Su} = \sum n_{Sui}$ ；

N_{ref} ——结构特征疲劳强度 $\Delta\sigma_c$ 能够达到的工作循环次数， $N_{ref} = 2 \times 10^6$ ；

K_{cpu} ——结构件实际工作应力谱系数，按公式(21)计算。

$$K_{cpu} = \sum \frac{\Delta\sigma_{Sui}^m n_{Sui}}{\Delta\hat{\sigma}^m N_{Su}} \dots\dots\dots (21)$$

式中：

$\Delta\sigma_{Sui}$ ——结构件实际工作应力，单位为牛每平方米(N/mm²)；

n_{Sui} ——结构件实际工作应力 $\Delta\sigma_{Sui}$ 对应已发生的工作循环次数；

m ——幂指数。

m 、 $\Delta\sigma_c$ 根据应力所处的结构细节，按 GB/T 30024—2020 的附录 D 确定。

表 11 疲劳强度抗力系数 γ_{mf}

可接近性	失效-安全构件	失效-非安全构件	
		对人员无危险	对人员有危险
易接近的接头细节	1.0	1.10	1.20
难接近的接头细节	1.05	1.15	1.25

注 1：失效-安全构件是指那些失效后果较小的构件，例如某一构件的局部失效不会导致整个结构失效或载荷坠落。
注 2：失效-非安全构件是指结构中某一构件的失效将会迅速导致整个结构失效或载荷坠落。

结构件的剩余损伤度按公式(22)计算。

$$D_{Sy} = 1 - D_{Su} \dots\dots\dots (22)$$

式中：

D_{Sy} ——结构件的剩余损伤度；

D_{Su} ——结构件实际工作时累积的损伤度。

如果剩余损伤度 $D_{Sy} \leq 0$ ，则表明结构件寿命已到期。如果 $D_{Sy} > 0$ ，则剩余寿命按公式(23)计算。

$$N_{Sy} \leq \frac{N_{ref}}{f_{Syl} K_{cpy}} \left(\frac{\Delta\sigma_c / \gamma_{mf}}{\Delta\hat{\sigma}} \right)^m D_{Sy} \dots\dots\dots (23)$$

式中：

N_{Sy} ——结构件剩余工作循环次数；

D_{Sy} ——结构件剩余损伤度；

f_{Syl} ——放大系数，考虑结构件剩余工作应力记录和估计的不确定性，按表 10 选取；

K_{cpy} ——结构件剩余工作应力谱系数，如果未知，可取 $K_{cpy} = K_{cpu}$ 。

N_{ref} 、 m 、 $\Delta\sigma_c$ 、 γ_{mf} 、 $\Delta\hat{\sigma}$ 与公式(19)~公式(21)相同。

结构件剩余寿命年限可按公式(24)计算,估算示例参见附录 A。

$$T_{Sy} = \frac{N_{Sy}}{n_{Sy}} \dots\dots\dots(24)$$

式中:

T_{Sy} ——结构件的剩余寿命,单位为年(a);

N_{Sy} ——结构件剩余工作循环次数;

n_{Sy} ——结构件剩余工作的平均每年工作循环次数,如果未知,可按已发生的平均每年工作循环次数取值。

7 综合判定及处置措施

7.1 综合评定方法

根据安全技术档案审核、现场检查、数据采集与试验的状况,结合剩余寿命理论估算结果,将整机安全等级分为4个等级:Ⅰ级(合格)、Ⅱ级(基本合格)、Ⅲ级(降级使用)、Ⅳ级(不合格)。整机安全等级与评估结论评定应按表12的规定。

表 12 整机安全等级与评估结论评定

安全评估状况	整机安全等级	整机评估结论
同时符合下列情况: a) 现场检查项目全部合格; b) 载荷试验合格; c) 若进行结构应力测试,结构应力应满足要求; d) 整机剩余寿命应超过1年; e) 若进行机构、机械关键零部件和重要结构件剩余寿命估算,剩余寿命均应超过1年(不包含1年内需要更换的易损件)	Ⅰ级 (合格)	可以继续使用
同时符合下列情况: a) 现场检查有不合格项,但通过修复或更换后,满足起重机械安全性能; b) 载荷试验合格; c) 若进行结构应力测试,结构应力应满足要求; d) 修复、更换后的整机剩余寿命应超过1年; e) 若进行机构、机械关键零部件和重要结构件剩余寿命估算,剩余寿命均应超过1年(不包含1年内需要更换的易损件)	Ⅱ级 (基本合格)	评估中提出的零部件修复、更换后,可以继续使用
同时符合下列情况: a) 现场检查有不合格项,但通过修复或更换后,满足起重机械降级后的安全性能; b) 降级后的载荷试验合格; c) 按降级后的载荷进行结构应力测试,结构应力应满足要求; d) 降级后的整机剩余寿命应超过1年; e) 若进行机构、机械关键零部件和重要结构件剩余寿命估算,剩余寿命均应超过1年(不包含1年内需要更换的易损件)	Ⅲ级 (降级使用)	可以降级使用,降级程度宜按现场检验与试验中降级幅度最大的项目确定
符合下列情况之一: a) 重要结构件中的主要受力构件失去整体稳定性; b) 现场检查有不合格项,不能修复或无法更换,致使整机不能安全使用; c) 载荷试验有不合格项目,致使整机不能安全使用; d) 若进行结构应力测试,结构应力不能满足要求; e) 整机或重要结构件中有一项剩余寿命未超过1年,且无法修复或更换,致使整机不能安全使用	Ⅳ级 (不合格)	不能继续使用,按整机报废处理

7.2 降级使用规定

起重机械降级使用分为轻度降级与重度降级使用两种,降级使用的参数应符合表 13 的规定。

表 13 降级使用的参数

降级程度	起重力矩或额定起重量	备注
轻度降级	降为设计值的 75%~90%	安全防护装置和起重能力标识做相应调整;平衡重或配重根据降级情况,参照使用说明书或制造单位的技术要求调整
重度降级	降为设计值的 75%以下	

7.3 整机报废规定

7.3.1 整机报废条件

起重机械存在下列情况之一时,应报废:

- a) 达到表 12 规定的报废要求;
- b) 达到起重机械报废标准的规定;
- c) 达到国家其他政策规定的报废要求。

7.3.2 整机报废后处置

起重机械整机报废应遵循经济、安全、低碳、环保、回收利用等原则,由有相应资质的单位,对整机进行解体、压扁或拆除等处置,消除其功能。不应出售和移装使用报废的起重机械。

8 安全评估报告

安全评估报告应至少包括以下内容:

- a) 起重机械基本信息,包括使用单位、制造单位、出厂日期、规格型号及主要技术参数等;
- b) 安全评估依据;
- c) 安全评估仪器仪表;
- d) 安全技术档案审核情况概述;
- e) 现场检查、数据采集与试验情况(包括目测检查、无损检测、载荷试验、应力测试等)、检测数据记录、各检查项目合格判定结果、起重机械现状总结,必要时可加注说明或附图等;
- f) 剩余寿命的理论估算结果;
- g) 安全评估结论与建议,评估建议应包括下一次安全评估的年限和后期作业需要重点关注的重要结构件与关键零部件及相应部位。下一次安全评估的年限可按相应剩余寿命的理论结果的 50%确定。

安全评估报告格式参见附录 B。

附 录 A
(资料性)
起重机械剩余寿命估算

A.1 生产工艺固定的桥式起重机整机剩余寿命估算示例

1 台工作级别为 A7, 额定起重量 $P_{Q_{max}}$ 为 100 t 的通用桥式起重机, 每年的生产工艺流程基本固定, 每年的工作情况记录见表 A.1, 估算工作 20 年后该起重机的剩余寿命。

表 A.1 每年工作记录统计

起重量 P_{Qi}/t	100	90	80	60	40	20	10	合计
循环次数 n_i	4.5×10^3	7.5×10^3	6×10^3	4.5×10^3	3.5×10^3	3×10^3	2.5×10^3	31.5×10^3

起重机已发生的载荷谱系数按公式(4)计算为:

$$K_{pu} = \frac{\sum P_{Q_{ui}}^m n_{Q_{ui}}}{P_{Q_{max}}^m N_{Q_u}} = \frac{100^3 \times 4.5 + 90^3 \times 7.5 + 80^3 \times 6 + 60^3 \times 4.5 + 40^3 \times 3.5 + 20^3 \times 3 + 10^3 \times 2.5}{100^3 \times 31.5 \times 10^3} \times 10^3 = 0.453$$

根据 GB/T 20863.1—2021 中表 4 的规定, 工作级别为 A7, 载荷谱系数 $K_p = 1$ 时的满载工作循环次数 $N_Q = 5 \times 10^5$ 。同一工作级别下的 $K_p N_Q$ 为恒定值, 由此实际载荷谱系数为 0.453 时的使用寿命按公式(1)计算为: $N_{Q_t} = \frac{1 \times 5 \times 10^5}{0.453} = 1.1 \times 10^6$ 次。

考虑工作记录不是自动记录, 根据表 10 的规定, 实际工作的放大系数 $f_{Q_{ul}} = 1.1$, 则起重机实际工作时累积的损伤度按公式(3)计算为:

$$D_{Q_u} = f_{Q_{ul}} \frac{K_{pu} N_{Q_u}}{K_p N_Q} = 1.1 \times \frac{0.453 \times 31.5 \times 10^4 \times 20}{1 \times 5 \times 10^5} = 0.628$$

剩余损伤度按公式(5)计算为: $D_{Q_y} = 1 - D_{Q_u} = 1 - 0.628 = 0.372$

因每年的生产工艺基本固定, 则载荷谱系数不变, $K_{py} = K_{pu} = 0.453$, 按公式(6)计算出工作 20 年后的剩余工作循环次数为:

$$N_{Q_y} \leq \frac{K_p N_Q}{f_{Q_{yl}} K_{py}} D_{Q_y} = \frac{1 \times 5 \times 10^5}{1.1 \times 0.453} \times 0.372 = 3.7 \times 10^5 \text{ 次}$$

因载荷谱系数不变, 剩余工作循环次数也可由使用寿命和已发生的工作循环次数差值得到, 结果与上面的相同。

$$N_{Q_y} \leq \frac{N_{Q_t} - f_{Q_{ul}} N_{Q_u}}{f_{Q_{yl}}} = \frac{1.1 \times 10^6 - 1.1 \times 31.5 \times 10^3 \times 20}{1.1} = 3.7 \times 10^5$$

按平均每年工作循环次数 $n_{Q_y} = 2.1 \times 10^4$ 估算, 工作 20 年后的剩余工作年限按公式(7)计算为:

$$T_{Q_y} = \frac{N_{Q_y}}{n_{Q_y}} = \frac{3.7 \times 10^5}{2.1 \times 10^4} = 17.6 \text{ 年}$$

A.2 生产工艺发生变化的桥式起重机整机剩余寿命估算示例

以 A.1 为例, 但工作 15 年后, 工艺流程发生了变化, 起重机的工作强度和频次加大, 见表 A.2, 估算工作 20 年后该起重机的剩余寿命。

表 A.2 工作 15 年后的每年工作记录统计

起重量 P_{Qi}/t	100	90	80	60	40	20	10	合计
循环次数 n_i	7×10^3	9×10^3	6×10^3	5×10^3	3×10^3	2×10^3	1×10^3	33×10^3

根据表 A.1 工作 15 年和表 A.2 工作 15 年后的每年工作记录进行统计,将表 A.1 的各项工作循环次数乘以 15 年,表 A.2 的各项工作循环次数乘以 5 年,各项求和,得到工作 20 年的总工作记录统计,见表 A.3。

表 A.3 工作 20 年的总工作记录统计

起重量 P_{Qi}/t	100	90	80	60	40	20	10	合计
循环次数 n_i	10.3×10^4	15.8×10^4	12×10^4	9.25×10^4	6.75×10^4	5.5×10^4	4.25×10^4	63.8×10^4

起重机已发生的载荷谱系数按公式(4)计算为:

$$K_{pu} = \frac{\sum P_{Qui}^m n_{Qui}}{P_{Qmax}^m N_{Qu}} = \frac{(100^3 \times 10.3 + 90^3 \times 15.8 + 80^3 \times 12 + 60^3 \times 9.25 + 40^3 \times 6.75 + 20^3 \times 5.5 + 10^3 \times 4.25) \times 10^4}{100^3 \times 63.8 \times 10^4} = 0.477$$

根据 GB/T 20863.1—2021 中表 4 的规定,工作级别为 A7、载荷谱系数 $K_p=1$ 时的满载工作循环次数 $N_Q=5 \times 10^5$ 。同一工作级别下的 $K_p N_Q$ 为恒定值,由此实际载荷谱系数为 0.477 时的使用寿命按公式(1)计算为: $N_{Qi} = \frac{1 \times 5 \times 10^5}{0.477} = 1.05 \times 10^6$ 。

起重机实际工作时累积的损伤度按公式(3)计算为:

$$D_{Qu} = f_{Qui} \frac{K_{pu} N_{Qu}}{K_p N_Q} = 1.1 \times \frac{0.477 \times 63.8 \times 10^4}{1 \times 5 \times 10^5} = 0.7$$

剩余损伤度按公式(5)为 $D_{Qy} = 1 - D_{Qu} = 1 - 0.7 = 0.3$

工作 20 年后的工作情况与工作 15 年后相同,即两者载荷谱系数相同,工作 15 年后的载荷谱系数为:

$$K_{py} = \frac{\sum P_{Qui}^m n_{Qui}}{P_{Qmax}^m N_{Qu}} = \frac{(100^3 \times 7 + 90^3 \times 9 + 80^3 \times 6 + 60^3 \times 5 + 40^3 \times 3 + 20^3 \times 2 + 10^3 \times 1) \times 10^3}{100^3 \times 33 \times 10^3} = 0.543$$

根据工作 15 年后的载荷谱系数,按公式(6)计算出工作 20 年后的剩余工作循环次数为:

$$N_{Qy} \leq \frac{K_p N_Q}{f_{Qy1} K_{py}} D_{Qy} = \frac{1 \times 5 \times 10^5}{1.1 \times 0.543} \times 0.3 = 2.5 \times 10^5$$

由于未来的载荷谱系数与实际工作的载荷谱系数不同,不能由使用寿命减去实际发生的工作循环次数获得剩余工作循环次数。因为未来载荷谱系数加大,工作强度和频次增加,估算出的工作循环次数就会较小,寿命会降低,即 $(1.05 \times 10^6 - 1.1 \times 63.8 \times 10^4) / 1.1 = 3.5 \times 10^5 > 2.5 \times 10^5$ 。

按工作 15 年后的年均工作次数估算,工作 20 年后的剩余工作年限按公式(7)计算为:

$$T_{Qy} = \frac{N_{Qy}}{n_{Qy}} = \frac{2.5 \times 10^5}{33 \times 10^3} = 6.1 \text{ 年}$$

从 A.1 和 A.2 的结果看出,由于载荷谱系数发生变化,工作循环次数也会随之产生变化。因此,不能简单地由使用寿命减去已发生的工作循环次数获得剩余工作循环次数,而应按损伤度方式估算剩余寿命。

A.3 门座起重机整机剩余寿命估算示例

1台50 t门座起重机,额定起重量见表A.4,工作级别为A5,每年的工作记录见表A.5,已工作15年,即将移到另一作业区,根据生产工艺推算载荷谱系数为0.8,平均每年工作次数约 7×10^3 次,估算工作15年后该起重机的剩余寿命。

表 A.4 额定起重量表

工作幅度/m	30~50	50~60	70~80	80~90
额定起重量 $P_{Q_{maxi}}$ /t	50	40	20	15

表 A.5 每年的工作记录

工作幅度/m	30~50	30~50	30~50	50~60	50~60	50~60	70~80	80~90	合计
起重量 P_{Qi} /t	50	40	30	40	30	20	15	15	—
循环次数 n_i	0.7×10^3	1.1×10^3	0.8×10^3	0.7×10^3	0.65×10^3	0.4×10^3	0.3×10^3	0.3×10^3	4.95×10^3

门座起重机的额定起重量随幅度变化而不同,整机电荷谱系数的计算与额定起重量不变的桥式起重机略有不同,公式分母中代入的最大起重量是各幅度下的额定起重量。

起重机已发生的载荷谱系数按公式(4)计算为:

$$\begin{aligned}
 K_{pu} &= \sum \frac{P_{Qui}^m n_{Qui}}{P_{Q_{maxi}}^m N_{Qu}} \\
 &= \frac{50^3 \times 0.7 \times 10^3}{50^3 \times 4.95 \times 10^3} + \frac{40^3 \times 1.1 \times 10^3}{50^3 \times 4.95 \times 10^3} + \frac{30^3 \times 0.8 \times 10^3}{50^3 \times 4.95 \times 10^3} + \frac{40^3 \times 0.7 \times 10^3}{40^3 \times 4.95 \times 10^3} \\
 &\quad + \frac{30^3 \times 0.65 \times 10^3}{40^3 \times 4.95 \times 10^3} + \frac{20^3 \times 0.4 \times 10^3}{40^3 \times 4.95 \times 10^3} + \frac{15^3 \times 0.3 \times 10^3}{20^3 \times 4.95 \times 10^3} + \frac{15^3 \times 0.3 \times 10^3}{15^3 \times 4.95 \times 10^3} \\
 &= 0.583
 \end{aligned}$$

根据 GB/T 20863.1—2021 中表 4 的规定,工作级别为 A5、载荷谱系数 $K_p = 1$ 时的满载工作循环次数 $N_Q = 1.25 \times 10^5$ 。

考虑工作记录不是自动记录,根据表 10 的规定,实际工作的放大系数 $f_{qui} = 1.1$,则起重机实际工作时累积的损伤度按公式(3)计算为:

$$D_{Qu} = f_{qui} \frac{K_{pu} N_{Qu}}{K_p N_Q} = 1.1 \times \frac{0.583 \times 4.95 \times 10^3 \times 15}{1 \times 1.25 \times 10^5} = 0.381$$

剩余损伤度按公式(5)计算为: $D_{Qy} = 1 - D_{Qu} = 1 - 0.381 = 0.619$

考虑未来工作次数需根据生产工艺推算,根据表 10 的规定,实际工作的放大系数 $f_{qy1} = 1.2$,按公式(6)计算出工作 15 年后的剩余工作循环次数为:

$$N_{Qy} \leq \frac{K_p N_Q}{f_{qy1} K_{py}} D_{Qy} = \frac{1 \times 1.25 \times 10^5}{1.2 \times 0.8} \times 0.619 = 8.1 \times 10^4$$

按未来平均每年工作循环次数 $n_{Qy} = 7 \times 10^3$ 估算,工作 15 年后的剩余工作年限按公式(7)计算为:

$$T_{Qy} = \frac{N_{Qy}}{n_{Qy}} = \frac{8.1 \times 10^4}{7 \times 10^3} = 11.6 \text{ 年}$$

A.4 门座起重机结构剩余寿命估算示例

以 A.3 为例,记录 1 年的转台底板变厚度处的焊缝附近结构的应力历程。通过雨流计数法,获得 8 级结构应力幅和相应工作循环次数,结构应力谱分级见表 A.6。变厚度处的焊缝为对接焊缝,厚板斜坡比例为 1:4,焊缝质量等级为 C 级,板厚分别为 $t_1 = 40 \text{ mm}$, $t_2 = 60 \text{ mm}$ 。如果应力谱系数不变,估算

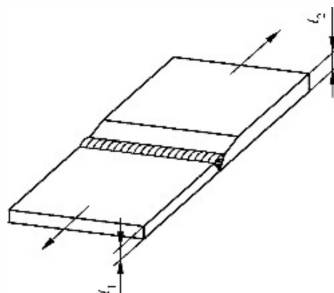
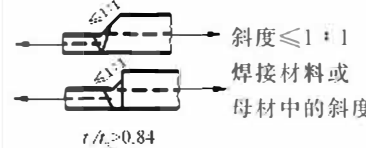
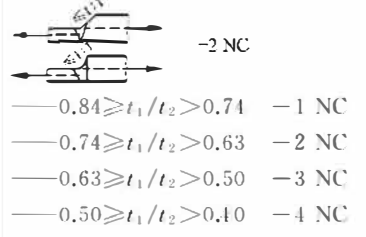
该处结构工作 15 年后该起重机结构的剩余寿命。

表 A.6 结构应力谱分级

结构应力幅/MPa	144	126	108	90	72	54	36	18	合计
应力循环次数	0.78×10^3	0.9×10^3	1.5×10^3	0.9×10^3	0.7×10^3	0.6×10^3	0.6×10^3	0.5×10^3	6.48×10^3

根据变厚度处的焊缝形式,按 GB/T 30024—2020 中附录 D 的规定,其焊缝形式和应力方向符合结构细节序号为 3.5 的形式,见表 A.7。

表 A.7 焊缝形式

结构细节序号	$\Delta\sigma_c, \Delta\tau_c$ N/mm ²	结构细节	要求		
3.5	$m = 3$	 <p>非对称支撑对接接头, 正应力交叉穿过焊缝</p>	基本条件: ——充分熔透 ——具有一般残余应力的构件  <p>斜度 $\leq 1:1$ 焊接材料或母材中的斜度 $t/t_2 > 0.84$</p> 特殊条件: ——具有较大残余应力的构件(如具有抑制收缩的接头构件)  <p>-2 NC ——$0.84 \geq t_1/t_2 > 0.74$ -1 NC ——$0.74 \geq t_1/t_2 > 0.63$ -2 NC ——$0.63 \geq t_1/t_2 > 0.50$ -3 NC ——$0.50 \geq t_1/t_2 > 0.40$ -4 NC</p>		
			100	对接焊缝, 质量等级 B' 级	
			90	对接焊缝, 质量等级 B 级	
			80	对接焊缝, 质量等级 C 级	

根据已知条件,焊缝为对接焊缝,质量等级为 C 级,按表 A.7 的规定,对应的特征疲劳强度为 80 MPa,幂指数 $m = 3$ 。但由于存在较大的残余应力,对照表 A.7 的要求说明,两板板厚比值 $t_1/t_2 = 40/60 = 0.67$,需要对特征疲劳强度降低 2 级(-2NC)。根据 GB/T 30024—2020 附录 E 中表 E.1 的规定,可得 80 MPa 降低 2 级的特征疲劳强度为 $\Delta\sigma_c = 63$ MPa。

按表 11 的规定,本条所述的结构细节属于难接近的接头细节,失效后是非安全构件,对人员有危险,则取疲劳强度抗力系数 $\gamma_{mf} = 1.25$ 。

结构件实际工作应力谱系数按公式(21)计算为:

$$K_{\text{cpu}} = \frac{\sum \Delta\sigma_{\text{Sni}}^m n_{\text{Sni}}}{\Delta\bar{\sigma}^m N_{\text{Si}}} = \frac{(144^3 \times 0.78 + 126^3 \times 0.9 + 108^3 \times 1.5 + 90^3 \times 0.9) \times 10^3}{120^3 \times 6.48 \times 10^3}$$

$$+ \frac{(72^3 \times 0.7 + 54^3 \times 0.6 + 36^3 \times 0.6 + 18^3 \times 0.5) \times 10^3}{144^3 \times 6.48 \times 10^3}$$

$$= 0.364$$

结构件实际应力历程参数 s_{mu} 按公式(20)计算为:

$$s_{mu} = K_{cpu} \frac{N_{sv}}{N_{ref}} = 0.364 \times \frac{6.48 \times 10^3 \times 15}{2 \times 10^6} = 0.018$$

考虑到只连续自动记录 1 年的应力历程,其他各年的应力未自动记录,而是基于每年相同的载荷记录进行估算,根据表 10 的规定,实际工作的放大系数 $f_{sul} = 1.1$,则结构件的实际工作时累积的损伤度按公式(19)计算为:

$$D_{su} = f_{sul} \left(\frac{\Delta \bar{\sigma}}{\Delta \sigma_c / \gamma_{mf}} \right)^m s_{mu} = 1.1 \times \left(\frac{144}{63/1.25} \right)^3 \times 0.018 = 0.461$$

结构件的剩余损伤度按公式(22)计算为: $D_{sy} = 1 - D_{su} = 1 - 0.461 = 0.539$

如果按实际应力谱系数估算剩余寿命, $K_{cpy} = K_{cpu} = 0.61$,实际工作的放大系数 $f_{sy1} = 1.1$,则结构件的剩余工作循环次数按公式(23)计算为:

$$N_{sy} \leq \frac{N_{ref}}{f_{sy1} K_{cpy}} \left(\frac{\Delta \sigma_c / \gamma_{mf}}{\Delta \bar{\sigma}} \right)^m D_{sy} = \frac{2 \times 10^6}{1.1 \times 0.364} \times \left(\frac{63/1.25}{144} \right)^3 \times 0.539 = 11.5 \times 10^4$$

如果按未来平均每年工作循环次数与实际年均工作次数相同,工作 15 年后的结构件剩余工作年限按公式(24)计算为:

$$T_{sy} = \frac{N_{sy}}{n_{sy}} = \frac{11.5 \times 10^4}{6.48 \times 10^3} = 17.7 \text{ 年}$$

A.3 中,如果载荷谱系数不变,按公式(6)计算出工作 15 年后的剩余工作循环次数为:

$$N_{qs} \leq \frac{K_p N_Q}{f_{qs1} K_{py}} D_{qs} = \frac{1 \times 1.25 \times 10^5}{1.1 \times 0.583} \times 0.619 = 12.1 \times 10^4$$

如果按实际年均工作次数作为未来年均工作次数,工作 15 年后的剩余工作年限按公式(7)计算为:

$$T_{qs} = \frac{N_{qs}}{n_{qs}} = \frac{12.1 \times 10^4}{4.95 \times 10^3} = 24.4 \text{ 年}$$

可以看出,整机和结构的剩余寿命是有差别的。因为整机的剩余寿命仅是基于作业载荷循环估算,而一个作业载荷循环下可能存在多个应力循环,相同作业载荷下,不同部位的应力幅大小也会不同,这些因素在整机剩余寿命估算中并未考虑,但在结构的剩余寿命估算中有所考虑,并且还考虑了结构接头细节特征质量对寿命的影响,因此结构的剩余寿命估算将更为准确。如果条件具备,应进行结构剩余寿命估算。整机的剩余寿命估算结果相对粗略,但也具有参考价值。

附 录 B
(资料性)
起重机械安全评估报告格式

起重机械安全评估报告格式见表 B.1。

表 B.1 起重机械安全评估报告格式

报告编号：

委托单位名称			
使用单位名称			
使用地点			
委托单位联系人		委托单位联系电话	
制造单位名称			
改造(重大修理)单位名称			
起重机械名称		类型	
规格型号		设备代号	
产品编号		单位内部编号	
出厂日期		投入使用日期	
主要技术参数			
评估依据			
评估采用的仪器仪表			
安全技术档案审核情况			
现场检查、数据采集与试验情况			
剩余寿命的理论估算情况			
主要问题描述	(本次评估发现的主要问题)		
评估结论	1.整机安全等级与评估结论 2.整机安全评估建议		
备注			
评估组长(签字)	(评估机构专用章或公章) 日期：		
评估组员(签字)			
日期：			
审核人(签字)日期：			
批准人(签字)日期：			

参 考 文 献

- [1] GB/T 20863.1—2021 起重机 分级 第1部分:总则
 - [2] GB/T 25196—2018 起重机 设计工作周期的监控
 - [3] GB/T 31052.1—2014 起重机械 检查与维护规程 第1部分:总则
 - [3] GB/T 36697—2018 铸造起重机报废条件
-