

港口装卸机械现代设计方法应用与发展分析

舒孙悟

(上海振华重工(集团)股份有限公司 上海 200125)

摘要: 文章针对港口装卸机械的设计,分析了适用于港口装卸机械的现代设计方法,对可靠性设计、有限元设计、动态仿真设计方法进行了简单探究,并论述了现代设计方法的运用。在现代设计方法运用的基础上,探究了港口装卸机械现代化设计方法的发展方向,最终确定港口装卸机械现代设计方法的发展方向是智能化,智能化设计可模拟人脑方式,设计效率更高、误差更小。

关键词: 港口; 装卸机械; 现代设计方法

0 引言

近几年,我国装备制造能力不断提高,对港口装卸机械现代化设计制造水平提出了更高的要求。传统港口装卸机械设计方法为基于古典力学的许用应力设计法、直觉法、类比法,耗时长,精确度差。与此同时,电子计算机技术得到了大范围应用,驱动可靠性工程、人机工程、系统工程等现代设计理论深入发展,为港口装卸机械设计方法升级提供了良好的借鉴。因此,探究港口装卸机械现代设计方法具有非常突出的现实意义。

1 港口装卸机械现代设计方法

1.1 可靠性设计

可靠性设计是聚焦于港口装卸机械不可靠隐患的设计方法,涉及了安全和经济两个方面。在费用允许的情况下,需利用可靠性分析、失效分析、可靠性验证、可靠性分配、可靠性指标、量值等方法,进行港口装卸机械最小失效概率的提前计算,尽可能降低港口装卸机械失效概率^[1]。

1.2 有限元设计

有限元设计本质上是以变分原理为依据进行数学物理数值计算的方法。现代有限元设计的载体是计算机,可随机组合多种机械工作状态,完成线性与非线性、静力与动态分析,满足港口装卸机械复杂结构设计要求^[2]。同时定量计算港口装卸机械复杂结构边界条件,以动态图形表示设计结果,提高大型港口装卸机械关键零部件局部应力计算精确度。

1.3 动态仿真设计

动态仿真设计是根据港口装卸机械运行工况复杂、动态性能受多重因素干扰的特点,借助计算机仿真软件仿真模拟港口装卸机械结构在不同工作状况下承受荷

载情况,以及不同荷载下运行状态、随时间变化,自动输出仿真结果,估算装卸机械在实际环境中运行情况,实现动态设计^[3]。

2 港口装卸机械现代设计方法的应用

2.1 可靠性设计的应用

在港口装卸机械可靠性设计时,根据港口进出口贸易需求,综合考虑天气因素、管理因素与工作状态等影响港口机械可靠性的因素,在数学模型内分析,寻找港口装卸机械可靠性提升的契机。

以化学品港口装卸机械可靠性设计为例,机械所处区域空气盐含量较高,对机械存在化学侵蚀,加之空气相对湿度较大,易加速装卸机械电控设备老化;在工况方面,港口装卸机械承受荷载处于较大水平,运行周期较长,根据运载对象的差异,设备承受冲击力、震荡荷载也具有一定差异。同时化学品成分复杂,对装卸机械具有程度不一的腐蚀作用;在管理方面,港口装卸机械维修保养标准不统一,管理被动趋势突出,加之人员操作失误问题,增加了港口装卸机械故障风险^[4]。基于化学品港口装卸机械可靠性影响因素分析结构,从量化视角,结合前期统计的港口装卸机械工作周期、工作实践、常规载重,进行数学模型构建。

化学品港口装卸机械主要装卸货物为硫化钾、氯化钾时,将硫化钾对装卸机械可靠性影响作为恒定标准,结合化学反应程度,设定氯化钾对装卸机械影响程度为1.2。同理,进行气候环境、工作状态影响因子的设置,得出数学模型见公式(1)。

$$m = \frac{\sum_{k=1}^n x_1^2 + x_2^2 + x_3^2}{n} + \frac{\sum_{k=1}^n y_1^2 + y_2^2}{n} + \frac{\sum_{k=1}^n z_1^2 + z_2^2 + z_3^2}{n} \quad (1)$$

式中： m —港口装卸机械工况综合影响因子；

x_1 —机械作用力；

x_2 —化学品腐蚀；

x_3 —电磁因素；

y_1 —空气盐含量（%）；

y_2 —空气相对湿度（%）；

z_1 —人为操作失误；

z_2 —设备维护周期；

z_3 —维护管理人员水平；

n —影响因子数量；

k —影响因子所在位置。

根据影响因素分析结果，可以确定港口装卸机械设备结构最可靠的设计方案。进而在港口装卸机械使用时间一定的情况下，计算港口装卸机械可靠性，量化对比港口装卸机械可靠性与经济效益，获得最优化的港口装卸机械可靠性设计方案。港口装卸机械可靠性分析模型见公式（2）。

$$S = \frac{\sum_{k=1}^n \left(\int_0^{\infty} (dx + dy + dz) / (R(t) + F(t) + f(t) + E(t))^2 \right)}{n^2 + 1} \quad (2)$$

式中： t —港口装卸机械运行时间；

d —常数；

$R(t)$ —港口装卸机械可靠性， $R(t)=F(T)$ ；

T —港口装卸机械失效时间， $T > t$ ；

$F(t)$ —故障率；

$f(t)$ —故障密度， $f(t)=dF(t)/dt$ ；

$E(t)$ —平均寿命。

根据公式（2），可以确定最为可靠的港口装卸机械设计方案，稳定港口装卸机械可靠性与设计成本，为港口装卸机械设计效益达到最高水平提供依据。

2.2 有限元设计的应用

在港口装卸机械有限元设计中，需要借助有限元分析软件。常用的软件为 ABAQUS 非线性有限元解决方案商用软件，可以满足线性分析与非线性分析、结构优化计算与流固耦合计算需求，节省港口建设成本。

在港口装卸机械设计前，需借助 ABAQUS 软件进行非线性计算，了解作用力输入、结果应力与位移输出的关系。在计算过程中，设计者可以直接输入数据，ABAQUS 软件内部可自动利用内部材料库仿真选择适宜的轨道型号，对现有装卸机械结构进行前处理、求解、后处理，先后计算模型输入、网格划分、边界条件输出，促使实际计算的 CAE 模型取代概念化的 CAD 图形。进而开展系列迭

代计算（显示计算或隐式算法），获得位移数据、应力数据。

在获得非线性计算结果后，借助 ABAQUS 软件内结构拓扑优化模块，持续修改最初计算模型内指定优化区域单元材料性质，或者借助形状优化模块，持续移动指定优化区域表面节点，避免局部应力集中，提高港口装卸机械设计合理性、可靠性，降低制造成本。

根据港口运营作业中装卸机械流体计算需求，利用 ABAQUS 软件自带的 CFD 求解器，经流体运动方程式不可压缩流体动量守恒方程（N-S 方程）积分，对机械停靠、海浪拍岸、机械水动力学、机械管道设计等关于不可压缩流体的内容进行计算。比如，港口装卸机械管道运行、机械与水接触、机械指示灯设计等均需进行流固耦合计算。在流固耦合计算前，需要利用守恒方程积分投影方法进行定常流动计算，同时利用 node-centered 方法、cell-centred 有限体积分法等混合式离散方法分别计算流体压力、流速与湍流^[5]。进而在非定常瞬态计算模式下，以湍流涡流黏度、Prandtl 数为基础，事先设定流体压力、流体流速、涡流黏度、温度等边界条件，同时定义广义体力、热流、重力、体热源等边界荷载，输入流体密度、湍流动能、耗散率等变量，进行隐式大涡流仿真，输出流体节点、表面场变量数据（流速、压力、温度、涡流黏度等），消除不良变量引发的误差，确保数值计算精度。

此外，在港口装卸机械噪声计算、热量输出计算与电磁计算时，需利用 ABAQUS 软件二次开发流程化计算模块，开发流程见图 1。

如图 1 所示，在 ABAQUS 软件二次开发过程中，首先需要进入计算机辅助设计系统；其次，经关联接口直接翻译人员输入数据，完成 CAD 向 CAE 格式转换，并全面监控转换过程；再次，分析 CAE 模型，进行标准计算、显示计算和 AMS 计算等系列计算；最后，将计算结果经第三方翻译为后处理可接收的格式。

2.3 动态仿真设计的应用

以桥式抓斗卸船机为例，根据卸船机结构安全设计需求，利用 ANSYS 软件，结合前期桥式抓斗卸船机承受的载荷组合，计算其结构强度、刚度。作用于卸船机的载荷一般包括自重载荷、水平惯性载荷等常规载荷以及风载荷、偏斜运行水平侧向载荷等偶然载荷，同时还具有碰撞载荷、试验载荷等特殊载荷^[6]。根据起重机控制桥式抓斗卸船机起升机构驱动方式差异，将起升状态划分为平稳起升离地、轻微冲击起升、中度冲击起

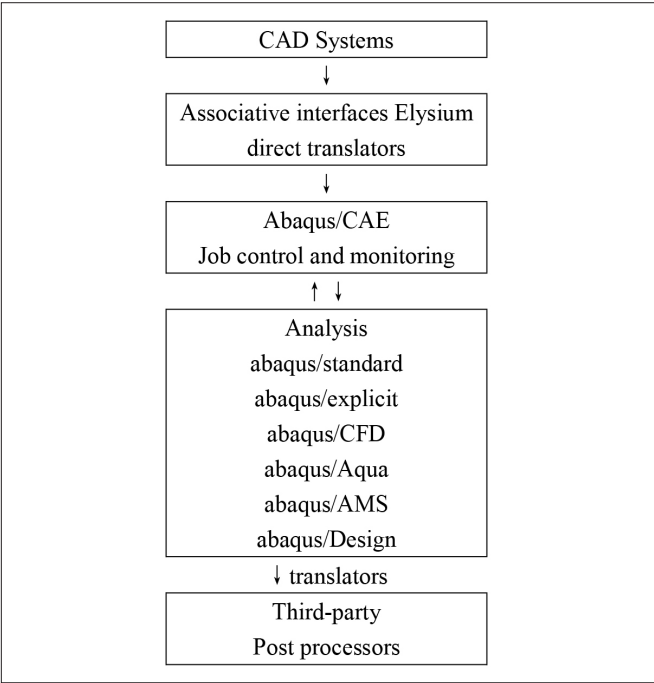


图 1 ABAQUS 软件二次开发流程

升离地、大冲击起升离地，其对应的起升状态级别系数、起升动载荷最小值见表 1。

表 1 不同起升状态下的起升动荷载系数

起升状态	起升动荷载系数	起升状态级别系数
平稳起升离地	1.05	0.17
轻微冲击起升	1.10	0.34
中度冲击起升离地	1.15	0.51
大冲击起升离地	1.20	0.68

在起升动荷载系数确定后，选择不同级别的起升状态，设定起升速度为 160m/min，起小车运行机构制动施加为 8s，稳定起升速度为 80m/min，风速最大为 20m/s，风压为 250N/m²，偏斜运行水平侧向荷载为 40200N。进而设定无风作业、有风作业、非作业有风三个荷载组合，在 ANSYS 软件中模拟不同工况下机械垂直静挠度、应力状态、固有振型，了解结构对不同工况动力荷载响应，确定装卸机械最佳结构控制参数，为装卸机械设计优化提供依据。

3 港口装卸机械现代设计方法的发展

智能化设计是港口装卸机械现代设计方法的主要发展方向^[7]。深度神经网络是智能化设计的代表，可以提高设计效率，并输出具有语义内涵的自然语言表述，满足港口装卸机械智能化管理需要。未来港口装卸机械设计的重点将由结构计算转移到知识库建立上。在常

规知识库构建的基础上，根据港口装卸机械特点，以半自动化构建或全自动化构建方式，构建本体知识库。比如，借助爬虫技术，从百度百科网页、中国知网、图书馆等渠道提取港口装卸机械本体、实例与属性词汇，同时借助高度普适性的 NLP-ICTLAS 汉语分词系统，进行词汇、语句处理，自行添加分词标注，形成用户词典，局部分词标注结果实例见图 2。

分词标注		新词发现
词性类别	门座起重机/n 门机/n 港口/n 码头/n	工作机构
名词 介词 连词 字	起升机构/n 变幅/n 过程/n 幅度/n 搬运/n	运行机构
动词 形容词 区别词	根据/p 空间/n 臂架/n 装置/n 辅助/vn	回转机构
标点符号 数词 方位		自定义—导入

图 2 港口装卸机械分词标注结果实例

在分词标注后，根据统计候选集中分词，剔除低频词汇，将本体及本体之间关系写入知识库，其中本体之间关系见表 2。

表 2 本体之间关系

本体关系	表示符	备注	实例
组成	Part-of	一个本体是另一个本体的一部分	臂架 Part-of 四连杆机构
连接	Has-link	一个本体与另外一个本体连接	平衡梁 Has-link 人字架
位置	Locate-in	一个本体坐落于另外一个本体	装卸机械 Locate-in 港口
功能属性	Has-hadle	一个本体可以装卸另外一个本体	抓斗 Has-hadle 散货物料

在明确本体之间关系后，借助可视化插件 OntoGraf 进行知识库原型搜索，梳理港口装卸机械组成与结构，如港口起重机包括桥式抓斗卸船机、起重机吊具、门座起重机、门式起重机、集装箱起重机、装卸桥等^[8]。基于此，引入 BERT-BILSTM-CRF 模型识别实体，生成港口装卸机械设计逻辑库。在设计者输入港口装卸机械本体数据后，智能检索设计参数，自动计算，实现智能化设计，缩短设计效率，提高港口装卸机械现代化设计制造水平。

4 结语

综上所述，可靠性设计、有限元分析、动态仿真设计等现代设计方法的应用，可以为港口装卸机械设计效率与质量同步提升提供依据。因此，设计人员应根据港口装卸机械的特点，选择适宜的现代设计方法代替许用应力设计法、直觉法、类比法，提高港口装卸机械设计效率，为港口装卸机械设计创新发展提供保障。

(下转第 94 页)

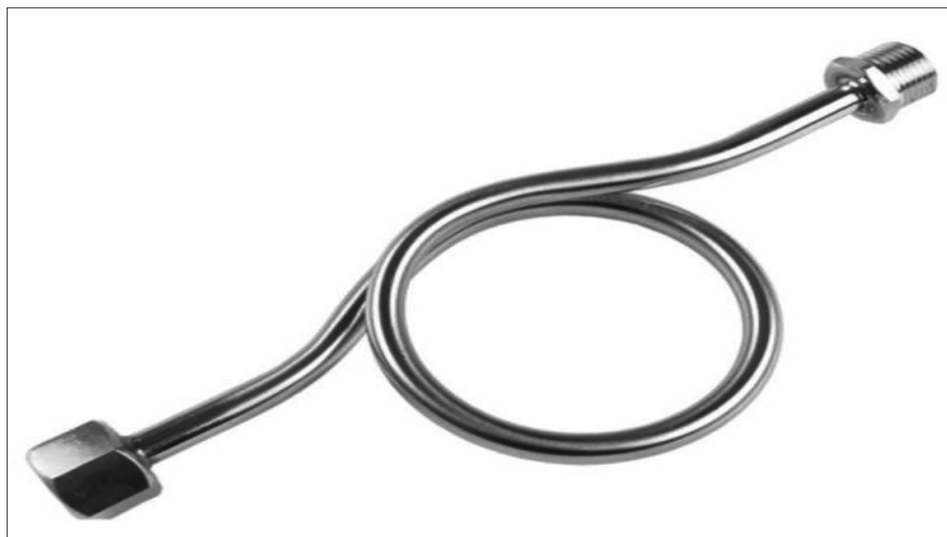


图3 压力表缓冲管(O型管)

才能不断改进使排涝泵站运行管理工作逐步得到完善。

4 结语

排涝泵站属于水利工程,从建设到施工都参照水利规范,但是其中金属管道安装及压力表安装属于机电工程,应该参照机电工程相关规范要求。广东省大多数排涝站都是在市水利局或者代建局建设完成后移交给运行管理单位,运行管理单位参与的时间比较晚,对排涝泵站设计阶段的内容无法改变。即便是运行管理单位一开始组织了排涝泵站工程建设,但是由于运行管理单位专业技术人员比较少,而且专业不齐全,水利管理部门大部分技术人员是水工,水资源相关专业,机电类相对比

较少,技术力量比较薄弱。这样就会对原来设计建设的内容完全认可,会导致建设时产生的错误很难被发现,在使用中存在安全隐患。只有用心观察,大胆质疑然后去寻找根源,才能从根本上解决问题。所以在运行管理中要不断地发现问题,勇于提出并寻找原因,及时进行整改。

本文提出的整改成功案例应进行推广,给其他运行管理单位提供参考,给泵站运行管理增值,泵站运行管理的模式也会越来越完善,对未来排涝泵站的规范化

标准化管理产生积极影响。

参考文献:

- [1] 丁士昭. 全国一级建造师执业资格考试用书机电工程管理与实务:第1版[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2022.
- [2] 中华人民共和国水利部标准. 泵站设备安装及验收规范:SL 317-2015.[S]. 北京:中国水利水电出版社,2015.

作者简介:刘吴越(1983.04-),男,汉族,陕西礼泉人,本科,高级工程师,研究方向:排涝泵站机电设备运行管理。

(上接第90页)

参考文献:

- [1] 宋建明,沈俊华,杜清华. 港口装卸机械整机滚装运输中滚装通道尺度研究[J]. 中国水运(下半月),2019(07):112-113.
- [2] 管建峰,王远飞,徐权鑫. 基于AMESim的8 t液压港口机械升降回路设计与优化[J]. 常熟理工学院学报,2021(05):43-45.
- [3] 贾志龙. 浅析Pro/E技术在工程机械仿真设计中的应用[J]. 现代制造技术与装备,2018(09):51-52.
- [4] 曹胜伟. 探究港口机械电气系统的可靠性设计[J]. 科技创新与应用,2018(33):92-93.

- [5] 孔锐,郑燕萍,张杨. 大树移栽机曲面挖铲的有限元设计[J]. 农业装备与车辆工程,2022(02):57-60.
- [6] 高治理. 模块化设计在控制柜机械设计中的应用[J]. 现代制造技术与装备,2018(11):23-24.
- [7] 李海峰. 试析港口机械电气安全控制系统设计[J]. 中国设备工程,2021(24):78-79.
- [8] 王伟,姚立权,赵春雨. 港口机械数字化设计与关键技术研究[J]. 中国设备工程,2019(06):157-158.

作者简介:舒孙悟(1978.08-),男,汉族,江西宜春人,本科,工程师,研究方向:散货机械设计。