

doi:10.11835/j.issn.1000-582X.2015.03.012

门机流固耦合与数值风洞的数值仿真模拟

徐承军, 陈德斌, 张圣贤

(武汉理工大学 物流工程学院, 武汉 430063)

摘要:港口向离岸深水化、设备密集化的发展对港口装卸设备的防风能力提出了更高要求,文中以港口门座起重机为对象,对突发强阵风下门座起重机的风场特性、整机风载进行了研究。运用计算流体力学理论和流固耦合分析方法,分析了强阵风作用下码头前沿流体场的压力和流速分布特征。运用 ADINA 的流固耦合分析功能,对起重机进行了数值风洞模拟与分析,并对不同工况下起重机各个坐标方向上的风载荷合力以及合力矩进行了量化计算,根据结果对门座起重机的防风方式进行了分析,从而为目前港口起重机的防风安全提供管理策略和理论依据。

关键词:流固耦合;流体力学;门座起重机;ADINA

中图分类号:U653.92

文献标志码:A

文章编号:1000-582X(2015)03-0087-06

Simulation of portal crane windbreak based on numerical wind tunnel and fluid-structure interaction

XU Chengjun, CHEN Debin, ZHANG Shenxian

(Logistics Engineering College, Wuhan University of Technology, Wuhan 430063, P.R.China)

Abstract: The offshore, deepwater and equipment concentration development trends of port requires better windbreak capacity of port handing equipments. The portal crane is taken as research object, and the wind field's characteristics and whole crane wind load of the portal crane under sudden strong winds or gusts are researched. The CFD theory and FSI analysis methods are used to analyze the distribution of pressure and velocity in the apron fluid field. According to the results, the fluid structure interaction analysis function of ADINA software are used to make numerical wind tunnel simulation and analysis, and quantify wind load's composite force and moment in each coordinate direction of the crane. Base on above results, the ways of port windbreak are analyzed and the results will provide management strategy and theoretical basis for windbreak safety of port crane.

Key words: fluid structure interaction; fluid dynamics; portal crane; ADINA

随着中国对外贸易量的加大以及经济的快速增长,对港口的装卸效率提出了更高的要求。不仅港口装卸设备持续向大型化、高速化方向发展,港口自身也在向离岸深水化、设备密集化发展。由于港口起重机的作业区域通常都位于码头前沿,其结构尺寸和迎风面积大,容易受到风力作用产生破坏性后果。世界各国港口每年都有因台风或风暴袭击造成设备损失的情况发生,其中强风是造成港口起重机毁损的重要原因,特别

收稿日期:2015-03-25

基金项目:国家自然科学基金项目(51175395);交通运输部应用基础研究项目(重点平台)(2011329811220)。

Supported by National Natural Science Foundation of China (51175395) and Ministry of Transport Basic Research for Application(the key platform)(2011329811220).

作者简介:徐承军(1973-),男,武汉理工大学副教授,博士,主要从事大型机械故障诊断系统、结构动力学分析、结构疲劳研究,(E-mail)1027020265@qq.com。

是难预报和难防范的突发性强阵风。这种风灾事故的发生不但严重影响了港口的生产装卸作业秩序和效率,而且造成了巨大的生命财产损失。港口大型机械设备要具备一定程度的抗风能力,按照规定大型港口设备在非工作状态下的抗风能力应不小于 55 m/s,而在工作状态下应不小于 35 m/s,因此研究和落实港口大型港口设备防风对确保码头生产的安全有着重要的意义^[1]。

目前,在计算流体力学的工程应用中,已经有大量的学者进行了广泛的分析与研究。例如:上海海事大学的董达善等^[2]用数字风洞技术,通过对箱体结构的计算流体力学分析,研究了典型起重机的双箱梁结构在风场中的风振效应;武汉理工大学的路世青^[3]通过对不同风载工况下的手工计算与计算机数值风洞模拟的风载效应进行对比分析,利用 ANSYS 对离岸深水港口的岸桥进行了风载分析与研究,并提出了利用大型设备群组来实现防风防台的理念;大连理工大学的孙家斌^[4]利用 ANSYS 的 CFX 模块以数值模拟的方式详细研究了起重机常用基本构件的风载荷系数,针对起重机的设计制造提出了建议;山东大学的桂罗辉^[5]利用 ADINA 软件对单梁龙门起重机进行了流固耦合的风致动力相应分析,并得出了单梁龙门起重机主梁的风振系数与体型系数。然而大部分学者在进行大跨空间结构的计算流体力学分析中使用的主要是流体场的单向耦合方式,仅考虑风场对结构的风载效应,而没有考虑受风载作用下的结构变形反过来同样会对流场造成影响,即流固耦合效应^[6-7]。虽然门座起重机在港口前沿有着相当广泛的使用,但是在数值风洞分析中,基本上没有发现有针对门座式起重机这种复杂结构进行风载分析与计算。

笔者应用 ADINA 分析软件,以门座起重机为研究对象进行了数值风洞仿真,分析强风作用下流体场中的压力和流速分布以及风载作用下门机结构产生的应力与变形,并对港口起重设备的防风策略进行了探讨。

1 结构风工程相关理论

1.1 流固耦合

流固耦合(气动弹性)是结构风工程研究的核心问题,它是一种基于结构动力学理论,在对现象作适当简化的基础上,对结构进行受力分析,获得结构风荷载及其响应的理论分析方法。流固耦合问题研究对象是流场与固体变形场间的相互作用,变形固体在流体载荷作用下会产生变形或运动。按照流固耦合的作用机理,该类问题可以分为两类:第一类问题的主要特征是流固耦合的相互作用只发生在两相的耦合界面上,另一类问题的基本特征则是流体与固体之间部分或者全部重叠在一起,不能够明显地分离开来。文中的研究重点主要是第一类流固耦合问题。其耦合作用主要通过求解方程中引入耦合界面上的相互平衡与协调关系来实现。

1.2 计算流体动力学

计算流体动力学(computational fluid dynamics,CFD)是计算风工程的核心内容。通过计算机数值计算和图像显示,对包含有流体流动和热传导等相关物理现象的系统所做的分析。CFD 所依赖的控制方程在数学上为一组偏微分方程,依赖具体流场的特性。目前在实际工程技术应用中常用的数值计算方法主要有限差分法、有限元法、有限体积法和边界元法。

1.3 数值风洞

数值风洞理论基于计算流体动力学原理,选择合适的空气湍流数学模型,结合一定的数值算法和图形显示技术,将风洞结果形象、直观地显示出来。数值风洞模拟相对于风洞实验具有计算周期短、实施成本低的特点,并且对结构平均风荷载的模拟具有较高的精度、计算结果比实验结果更完备。

2 门机数值风洞仿真试验

2.1 门机三维实体模型的建立与处理

选用码头前沿常用的转盘式门座起重机为研究对象,运用 ADINA 进行流固耦合分析。为了避免 ADINA 由于分析处理数据量过大导致无法计算,利用三维建模软件 SolidWorks 按照实际设计参数 1:1 的比例建立实体模型并进行了一定的简化,主要是一些对仿真结果影响不大的局部结构,比如忽略门机中的电机、所有的钢丝绳、铰接部位的螺栓、耳板、螺钉以及梯子走台等。门座起重机的模型如图 1 所示。

网格划分时既考虑门座起重机风载荷及外流场特性模拟计算的准确性,也考虑收敛时间、计算机硬件的限制等,采用六面体对风洞区域进行网格划分,采用四面体网格进行门座起重机的网格划分,并对重要位置



图 1 门机三维实体模型图

Fig.1 Diagram of portal crane three-dimensional entity model

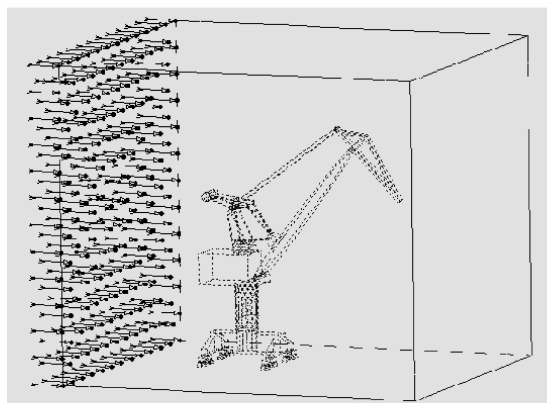


图 2 流体场与结构的三维模型

Fig.2 3d model of the fluid field and structure

的网格密度进行调整。本次门座起重机数值风洞实验生成四面体网格总数为 3 534 554 个,其节点总数为 472 094 个;生成六面体网格总数为 203 408 个,其节点总数为 197 520 个,在 Intel 酷睿 i6 四核,256 G DDR 配置的工作站上运行数值仿真。

2.2 数值风洞相关参数设置

要进行流固耦合计算,需要分别在 ADINA 结构模块(ADINA structures)和流体模块(ADINA CFD)中建立结构模型和流体模型,然后把 2 个模型一起放到 ADINA 流固耦合求解器(ADINA-FSI)中进行求解,通过 2 个模型的耦合求解流体和固体边界之间的作用结果^[6]。

在门机的数值风洞流固耦合计算中,由于港口门机的结构特性以及数值计算的复杂性,将流场模型大小设置为 $70\text{ m} \times 60\text{ m} \times 60\text{ m}$ 的六面体,即门机外部风场环境的大小,如图 2 所示。门机的外表面设置为 FSI Boundary(流固耦合边界),底部设置为全约束,按照实际工况对流场的一个或者几个面施加流体速度载荷(图 2 中箭头所示),将其作为流场的入风口,而其相对的面即为流场的出风口^[7]。在湍流 $k-\epsilon$ 模型的选择中,采用 AIDNA 提供的 Turbulent Spalart-Allmaras 湍流模型,在模型的前处理阶段,将该湍流条件施加在相应的模型入风口。

2.3 数值风洞计算工况

为了较全面地分析港口起重机受风载的影响,将门机的计算工况分为以下 6 种:

- I 当臂架垂直于轨道方向,并且处于最大幅度;
- II 当臂架与轨道方向呈 45° 夹角,并且处于最大幅度;
- III 当臂架平行于轨道方向,并且处于最大幅度;
- IV 当臂架平行于轨道方向,并且处于最小幅度;
- V 当臂架与轨道方向呈 45° 夹角,并且处于最小幅度;
- VI 当臂架平行于轨道方向,并且处于最小幅度。

在数值风洞中对单台门机进行流固耦合分析时,风的作用方向每变化 45° 为一个计算状态,由于门机是对称结构,因此每个门机计算工况下风向与臂架方向都会依此形成 $0^\circ, 45^\circ, 90^\circ, 135^\circ, 180^\circ$, 记为 a, b, c, d, e 5 个状态,如图 3 所示。

3 门机流固耦合结果分析

3.1 结果显示与分析

通过 ADINA 流固耦合计算,得到各状态流场与结构场的多种信息。对流场压力分布、流场流速分布、以及结构变形等的云图和矢量图进行分析汇总,其中工况 I 的最大结构变形量及最大应力结果见表 1 所示。可以看出,工况 I 下门机迎风面流场压力最大,而由于起重机的遮挡作用,背风面的流场压力则迅速减小,在风向上的风场风速也明显比其他方位的明显减小,但在达到一定距离后,减小的趋势变得不明显。在起重机迎风面垂直于风向的两侧,流场压力与流速却非常大,如图 4 所示。

表 1 各状态下流场与结构场最大变化量及发生位置信息

Table 1 The maximal variation of flow field and structure field and location information under each state

风向 状态	最大应力		最大变形		流场最大正压力		流场最大负压力		最大风速	
	大小/ MPa	发生 位置	大小/ mm	发生 位置	大小/ Pa	发生 位置	大小/ Pa	发生 位置	大小/ (m·s ⁻¹)	发生 位置
a	42.8	变幅 齿条	19.8	象鼻 梁	1 616	迎风面机器房、 圆筒立柱、均衡 梁配重	-2 127		91.8	变幅齿条、象鼻 梁顶端
b	46.6	变幅 齿条	40.8	象鼻 梁顶 部拉 杆	1 926	机器房、圆筒立 柱、均衡梁、人 字架	-2 500	梯形架的上 横梁与变幅 电动机的背 风面	98.5	人字架中部的机 构附近及圆筒立 柱垂直于风速方 向的两侧处
c	43.7	臂架 转台 铰点	46.0		1 980		-2 275		75.4	
d	57.7	变幅 齿条	50.0		3 099		-2 484		148.3	
e	47.4	变幅 齿条	20.7		3 138		迎风面的臂架、 圆筒立柱和均 衡梁		-3 334	

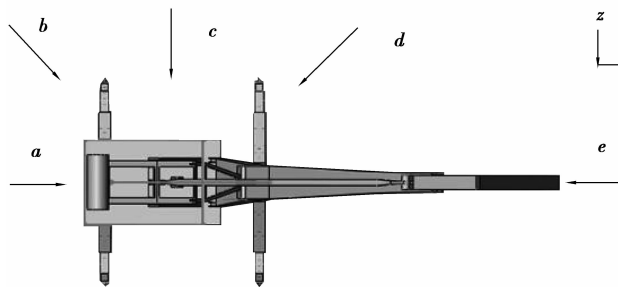


图 3 工况 I 风作用方向示意图(俯视)

Fig.3 The diagram wind direction in condition I (down)

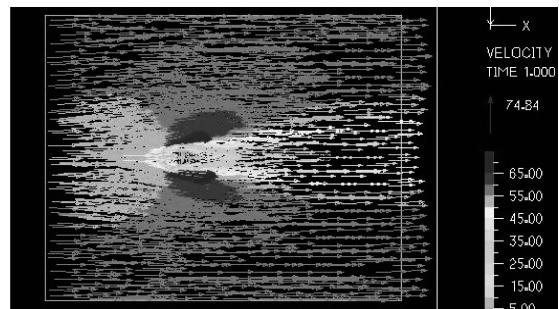


图 4 工况 I 门机周围流场流速分布

Fig.4 The diagram of flow field and velocity distribution around portal crane in condition I

根据结构受风载应力分布云图和矢量图,对各个工况计算风载荷与合力矩,一共有 30 组计算结果,文中例举工况 I 下的 5 种风向状态计算数据如表 2 所示。

综合 30 组计算数据可以看出,门机处于同一回转角度与俯仰位置的情况下,风的方向与臂架方向呈 0° 或者 180° 时,门机整机所受到的风载荷最小,而且此时门机整机受到的倾覆力矩(X 轴合力矩与 Z 轴合力矩)和整机受到的回转力矩都是 5 种风向角度最小的。臂架方向与风向呈 45° 或 135° 的迎风回转角度时,门机臂架受力最不利,而且此时整机受到的回转力矩是最大的(Y 轴合力矩),如工况 I 的 b 状态与 d 状态中所受的合成风载荷(X 轴与 Z 轴合成后的总风载荷)分别达到了 758.83 kN 和 770.23 kN。而当风向与臂架方向垂直的时候,门机整机受到的倾覆力矩是最大的(X 轴合力矩)。

表 2 整机风载荷在工况 I 下的坐标方向的合力与合力矩
Table 2 The resultant force and moment of the coordinates direction under the whole machine wind load in condition I

状态编号	合力/kN			合力矩/(kN·m)		
	X 轴	Y 轴	Z 轴	X 轴	Y 轴	Z 轴
<i>a</i>	422.41	5.46	-9.41	97.91	895.73	-3 802.01
<i>b</i>	455.99	-13.44	606.54	5 460.20	-1 608.71	-4 105.69
<i>c</i>	19.90	18.22	693.96	6 247.79	-1 471.80	-242.83
<i>d</i>	-472.40	46.59	608.35	5 491.18	-1 632.88	4 272.23
<i>e</i>	-417.69	44.53	-4.49	402.80	-885.55	3 780.51

通过对 6 个工况下的不同风向角度的数据统计,还能得知当门机处于同一回转角度时,臂架位于最大幅度的时候所受到的合力比最小幅度时的合力偏小,但是门机所受到的倾覆力矩和转台受到的回转力矩偏大。

利用 ANSYS CFX 软件对工况 I 下 *a* 风向状态进行了 CFD 计算,对比计算结果表明,在不考虑非流固耦合时,门座起重机的结构应力整体变化较小,但是大拉杆以及齿条等细长杆件的应力以及变形有明显减小,究其原因主要是这类杆件更容易受到流体的影响发生变形,导致流场的变化。

3.2 港口起重设备防风策略探讨

在不同风载角度情况下,对单台门机的数值风洞模型进行计算,可以总结以下防风策略。

1) 由于门机迎风面流场压力最大,而背风面的流场压力迅速减小,在沿着风向上的风场风速也明显比其他方位的减小,故当预知有强风来袭时,可将多台港口起重设备尽可能相互靠近后再放下锚锭或安上防风拉索,可起到起重机联合防风的作用。当起重机间距超过一定距离后,起重机集群的联合防风作用将不明显。

2) 通过文中对门机进行各个风向状态的数值风洞流固耦合分析发现,在风向与轨道呈 45° 或者 135° 的工况下整机的风载荷合力与倾覆力矩最大,风的方向与臂架方向相同或相反时,门机整机所受到的风载荷和倾覆力矩最小,当有强风突然来袭时可将门座起重机臂架回转至与风向一致的方向;

3) 在港口突遇台风或强大风暴,如果臂架处在最大幅度,则会受到较大的风载荷与倾覆力矩,应将臂架收回保持最小幅度,防止因强风作用造成不利后果。

4 结 论

基于 ADINA 风载流固耦合计算方法,以计算流体动力学为基础,通过对计算流体动力学(CFD)的基本方程及常用湍流数值模拟方法的分析,根据港口装卸设备的防风特点,确定了适合文中采用的风载数学模型。通过 ADINA 的流固耦合分析功能对起重机进行了计算流体动力学的数值分析与模拟,计算出了在不同风向角和不同工况下起重机的结构与周围流场的信息,并绘制出了结构应力分布图、流场压力分布图和流场速度分布图。通过对表面压力进行数值积分,从而对起重机各个坐标方向上的风载荷合力以及合力矩进行量化计算。根据计算结果,提出了港口起重机的防风策略,为港口设备防风技术提出了有价值的建议,有利于港口设备防风管理技术的提高。

参考文献:

- [1] 白鹏.港口大型设备防风探讨[J].价值工程, 2012, 31(30): 62-64.
BAI Peng. Discussion on anti-wind for port large scale equipment[J]. Value Engineering, 2012, 31(30): 62-64.
- [2] 董达善, 俞浩.典型起重机双箱梁结构的 CFD 风载研究[J].中国工程机械学报, 2009, 7(1): 7-12.
DONG Dashan, YU Hao. CFD wind loading analysis on twin-girder-structured cranes[J]. Chinese Journal of Construction Machinery, 2009, 7(1): 7-12.
- [3] 路世青.离岸深水港口大型设备群防风理论与实验分析[D].武汉:武汉理工大学, 2010.
LU Shiqing. Theoretical and experimental analysis of wind resistance ability of offshore deepwater port mechanical group[D]. Wuhan University of Technology, 2010.

- [4] 孙家斌.起重机常用基本构件风载荷系数研究[D].大连:大连理工大学,2008.
SUN Jiabin. Research on wind load coefficients of basic members of crane [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2008.
- [5] 桂罗辉.单梁龙门起重机流体—结构耦合作用风致响应分析[D].济南:山东大学,2010.
GUI Luohui. Numerical analysis of fluid-structure interaction for wind-induced response of single beam gantry crane [D]. Jinan: Shandong University, 2010.
- [6] 岳戈. ADINA 流体与流固耦合功能的高级应用[M].北京:人民交通出版社,2009.
YUE Ge. Advanced application of ADINA fluid and solid-fluid coupling function [M]. Beijing: China Communications Press, 2009.
- [7] 常亚琼.基于 ADINA 的门机风载流固耦合分析与碰撞动力学研究[D].武汉:武汉理工大学,2012.
CHANG Yaqiong. Wind load FSI analysis and collision dynamic research of crane based on ADINA [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2012.
- [8] 徐枫.结构流固耦合振动与流动控制的数值模拟[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2009.
XU Feng. Numerical simulation of fluid-solid coupling vibration and flow control of structures [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2009.
- [9] 全涌,顾明.超高层建筑横风向气动力谱[J].同济大学学报:自然科学版,2002,30(5):627-632.
QUAN Yong, GU Ming. Power spectra of across-wind loads on super high-rise buildings [J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2002, 30(5): 627-632.
- [10] 张杰,赵军,冯武文.某大型塔器流固耦合的数值仿真[J].科技信息,2009(14):455-457.
ZHANG Jie, ZHAO Jun, FENG Wuwen. Solid-fluid coupling numerical simulation of a large column [J]. Science and Technology Information, 2009(14): 455-457.
- [11] 王福军.计算流体动力学分析 CFD 软件原理与应用[M].北京:清华大学出版社,2004.
WANG Fujun. Computational fluid dynamics analysis—the principle and application of CFD software [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2004.
- [12] 郭辉.大跨连续刚构桥风荷载数值模拟及空间风致响应研究[D].长沙:中南大学,2008.
GUO Hui. Numerical simulation of wind load and wind-induced response of long-span continuous rigid frame bridge [D]. Changsha: Central South University, 2008.
- [13] Lee S J, Kang J H. Wind load on a container crane located in atmospheric boundary layers [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2008, 96(2): 193-208.
- [14] Rezk K, Forsberg J. Geometry development of the internal duct system of a heat pump tumble dryer based on fluid mechanic parameters from a CFD software [J]. Applied Energy, 2011, 88(5): 1596-1605.
- [15] Karanth K V, Sharma N Y. CFD analysis of a centrifugal fan for performance enhancement using converging boundary layer suction slots [J]. World Academy of Science, Engineering and Technology, 2009, 36: 381-387.
- [16] Azadi M, Azadi M, Mohebbi A. A CFD study of the effect of cyclone size on its performance parameters [J]. Journal of Hazardous Materials, 2010, 182(1): 835-841.

(编辑 詹燕平)