

混凝土坝浇筑仿真中的缆机干扰与联合问题研究

王仁超, 王晨旭

(天津大学 水利工程仿真与安全国家重点实验室, 天津 300072)

摘要: 施工中的缆机相互干扰与联合问题对于高混凝土坝坝体浇筑进度与浇筑质量有着较大影响, 在施工仿真中对该问题进行研究, 一方面可以更加准确的对施工过程进行模型, 另一方面也能更好的指导实际施工。采用空间分析和冲突识别等技术, 结合工程实际, 提出了适用于多种施工条件下处理缆机浇筑干扰与联合问题的模拟规则。利用该规则建立高混凝土坝浇筑仿真模型, 并结合 AutoCAD 二次开发平台, 开发出了高混凝土坝浇筑仿真及可视化系统。经过工程实例验证, 所提出的规则以及建立的模型能够较准确的模拟大坝混凝土的浇筑过程, 对于指导实际工程施工具有重要意义。

关键词: 混凝土坝浇筑; 缆机; 干扰; 联合干扰; 空间分析; 冲突识别; 仿真

中图分类号: TV642.1

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2015)02-0195-05

Research on interference and union problem of cable machine in concrete-dam pouring simulation

WANG Renchao, WANG Chenxu

(State Key Laboratory of Water Conservancy Engineering Simulation and Safety, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: The problem of mutual interference and union between cable machines has greater influence on the schedule and quality of concrete dam pouring. The research on this problem is helpful for the simulation of concrete process as well as the better guidance of actual construction. By using the technology of spatial analysis and conflict recognition and combining with the reality, the paper proposed the simulation principles of concrete-dam pouring in various conditions for handling the mutual interference and union of cable machines and set up the simulation model of high concrete dam construction. Combining with AutoCAD two times development platform, the paper developed the simulation and visual system for concrete-dam pouring. The engineering application example shows that the rule and model proposed can simulate the dam pouring process accurately and has guidance significance for the construction of actual engineering.

Key words: concrete-dam pouring; cable machine; interference; union interference; spatial analysis; conflict recognition; simulation

1 研究背景

位于高山峡谷中的高混凝土坝浇筑往往选择缆机作为混凝土浇筑的主要手段^[1]。对于混凝土体量较大的坝, 往往配置3台以上的缆机, 如国内建成的锦屏水电站拱坝和溪洛渡水电站拱坝均在单平台上配置了5台平移式缆机, 小湾水电站拱坝在双平台上配置了6台平移式缆机^[2], 建设中的白鹤滩水电站拱坝在高低平台上布置了7台平移式缆机, 同时

设置了高低供料线供料。坝体浇筑过程中缆机运用、调配不仅关乎坝体浇筑进度, 同时也间接影响坝体浇筑质量^[3]。为此, 缆机之间相互干扰以及联合浇筑问题是混凝土坝浇筑过程中的重要问题之一。

在混凝土坝浇筑施工中, 需将大坝分解成数万个浇筑块分别浇筑。该过程是一个动态随机过程, 若采用人工方法对浇筑块的顺序进行排序, 不仅效率低, 而且无法根据浇筑情况的变化进行及时调整。随着计算机仿真技术的发展, 国内外学者在混凝土坝浇筑

收稿日期: 2014-09-22; 修回日期: 2014-10-31

作者简介: 王仁超(1963-), 男, 山东龙口人, 博士, 教授, 硕士生导师, 主要研究方向: 大型工程系统分析、项目管理及计算机仿真。

通讯作者: 王晨旭(1989-), 男, 山西忻州人, 硕士研究生, 主要从事计算机仿真研究。

计算机仿真方面,取得了较多的成果。石英^[5]结合小湾工程混凝土浇筑施工,研究了仓面施工方法对大坝浇筑进程的影响;李喆等^[6]提出了缆机联合浇筑和缆机干扰控制的重合度和充裕度规则;杨毅^[7]将空间分析应用到大坝仓面的备仓施工中;吴斌平等^[8]提出了基于边缘优先准则和空间冲突模型的缆机选择机制。

对于缆机台数多,缆机高低平台布置和采用高低供料线供料情况,缆机的调度与运用问题尤为突出,以往的计算机仿真模型虽然有所考虑,但是,多为单供料平台情况。本文在上述成果的基础上,结合空间分析和冲突识别等技术,提出了缆机(主要是平移式缆机)单平台、双平台以及双供料平台下的模拟规则,并建立了缆机联合和干扰问题的仿真模型。对于门机、塔机等其他机械的干扰问题,其空间分析与冲突识别原理是相通的,本文不再赘述。

2 研究方法

空间分析技术主要基于统计学和空间拓扑学,根据工程实际约束条件和规则,把施工对象在实际可利用的施工空间中进行规划布置,从而得到任意时刻最佳的空间规划^[8]。缆机的空间分析结果见图1,根据缆机自身保护和工作效率的要求,将缆机空间分为以下3类:

(1)实体空间:即施工对象自身所占据的空间,大小由对象的几何尺寸所决定。

(2)安全空间:施工对象工作过程中,使自身能够安全运行所需要的空间。缆机取料干扰和大修干扰规则中,主要考虑缆机的安全空间不被侵占。

(3)效率空间:在保证施工质量的前提下,施工对象能发挥并保持较高生产率所需要的空间。在缆机浇筑干扰规则中,需要考虑缆机的安全空间和效率空间不被侵占,保证缆机效率的发挥。

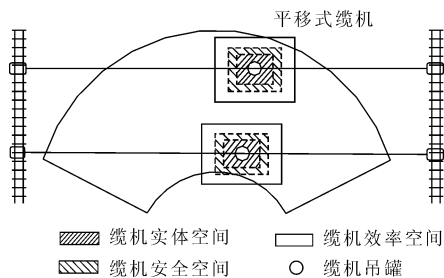


图1 缆机空间分析

3 干扰控制和联合浇筑

3.1 机械联合浇筑规则

某一台缆机与其他缆机联合浇筑的最大数量是

由缆机的布置情况决定的,根据空间分析和冲突识别结果,为每台缆机设定了可能联合的机械序列,在浇筑仿真过程中,根据仓面变化情况,再由以下规则进一步决定缆机之间是否能够联合浇筑^[5]:

(1)是否空闲,即待联合的缆机在当前时刻未处于浇筑状态和大修状态。

(2)是否满足仓面浇筑要求,一般应满足平铺法浇筑所需条件。

(3)不受缆机间的相互干扰制约,即不存在取料干扰、维修干扰和浇筑干扰。

3.2 机械干扰控制规则

根据缆机所在状态不同,将缆机间的相互干扰分为取料干扰、维修干扰和浇筑干扰。

3.2.1 取料干扰 当同平台的缆机供料线位置靠近辐射式缆机固定端时,相邻的缆机缆索之间距离较小,易发生取料干扰。如图2所示,同时开浇的筑块A和筑块B的两端向辐射式缆机的固定端引线,得到与供料线的交点,取供料线上两点最大值为 $l_{\max}$,则当前供料线上的缆机台数 n 应满足 $n \leq l_{\max} / l_{\text{safe}} + 1$, l_{safe} 为当前条件下缆机之间的最小安全距离。若不满足该条件,则两浇筑块不能同时浇筑。

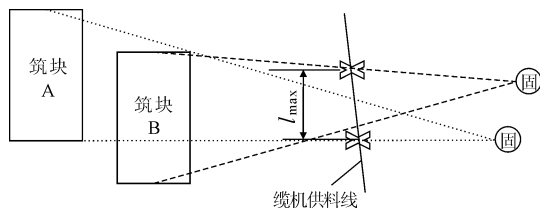


图2 缆机取料干扰

3.2.2 维修干扰 某台缆机处于大修状态时,则其他缆机的活动范围应保持在在该缆机的最小允许的安全距离之外。

3.2.3 浇筑干扰 缆机的干扰情况与大坝当前浇筑面貌、开仓情况、机械运行情况、运输道路的规划等都有关系^[3],分别考虑了缆机单平台和双平台下开一仓和开多仓的浇筑干扰情况。

(1)单平台下浇筑干扰处理。基本模型如图3(a)所示,如无特别说明,长度单位均为m,面积单位均为 m^2 。3个浇筑仓A、B、C,其顺河向的长度分别为 l_A 、 l_B 、 l_C ,宽度分别为 w_A 、 w_B 、 w_C ,面积分别为 S_A 、 S_B 、 S_C ,所用浇筑机械数分别为 n_A 、 n_B 、 n_C 。按照A-B-C的顺序开仓。考虑缆机运行安全,吊罐与模板间需要有一定间隔,即模板影响距离为 l_m 。

设单台缆机小时生产率为 $Q \text{ m}^3/\text{h}$,混凝土初凝时间为 $t \text{ h}$,吊罐容积为 $V \text{ m}^3$,采用平铺法浇筑,铺层

厚度为 hm , 则一罐混凝土形成条带宽度 $l_s = (V/h)^{0.5}$ m 的正方形区域。

缆机间最小安全距离为 l_{safe} m, 效率距离(缆机站位距离)为 l_{effi} m。

则缆机浇筑干扰基本规则为:

(1) 开仓数限制: 本研究中最多的开仓数取 3 (根据工程经验, 机械同时开仓数一般小于 3)。

(2) 开仓优先顺序: 按照边缘优先准则(位置处于边缘的缆机优先选用)^[7] 和仿真时钟最小的缆机优先原则, 对缆机的优先级进行排序。按照仿真程序设定的规则(包括如老混凝土优先、最低块优先、特殊部位优先、奇偶坝段优先等原则), 对浇筑仓的优先级进行排序。

(3) 缆机安全距离要求: 考虑缆机塔架移动所带来的干扰, 同平台缆机安全距离取 3 个条带宽度, 即 $l_{\text{safe}} = 3l_s$ 。对于特殊条件下的缆机安全距离, 应根据施工规范和工程实际情况进行调节, 例如某水利工程所处地区年极大风速超过 20 m/s 的天数平均为 100 多天, 必须考虑大风对缆机浇筑的影响。大风会增加缆机吊罐对位的时间, 而且威胁施工安全, 应增加缆机安全距离, 保证施工安全和效率。

(4) 缆机站位距离要求: 为避免某台缆机移动而影响临近缆机施工, 一般需要在安全距离的基础上增加 2 个浇筑条带的宽度, 则缆机站位距离设定为 $l_{\text{effi}} = l_{\text{safe}} + 2l_s = 5l_s$ 。

(5) 缆机台数要求: 开一仓时, 应当满足混凝土初凝时间内的层覆盖要求, 即^[5]

$$n \geq \frac{hS}{tQ} \quad (1)$$

式中: n 为浇筑当前仓所用的缆机台数。当联合开仓时, 对新开仓进行浇筑的缆机台数的也需要满足该要求。

(6) 仓面长度要求: 仓面的长度应满足各个缆机之间的站位距离和模板影响距离要求, 如图 3(b) 所示。

$$L \geq nl_{\text{effi}} + 2l_m \quad (2)$$

式中: L 为上、下游浇筑仓面长度, 单仓浇筑时取本仓号长度, 多仓浇筑时取上下游之间覆盖浇筑仓的最大长度。

(7) 仓面重叠部分的处理: 如图 3(c) 所示。

开两仓时: 仓重叠部分缆机间站位距离 l_{effi} 范围内, 满足层覆盖要求, 即

$$l \geq \frac{h(S_{\text{effiA}} + S_{\text{effiB}})}{tQ} = \frac{hl_{\text{effi}}(w_A + w_B)}{tQ} \quad (3)$$

开三仓时, 三仓重叠部分缆机间站位距离 l_{effi} 范围内, 满足层覆盖要求, 即

$$l \geq \frac{h(S_{\text{effiA}} + S_{\text{effiB}} + S_{\text{effiC}})}{tQ} = \frac{hl_{\text{effi}}(w_A + w_B + w_C)}{tQ} \quad (4)$$

同时两两之间重叠部分也须同时满足层覆盖要求。

(2) 双平台下的缆机干扰处理。在缆机双平台布置下, 高平台缆机和低平台缆机之间能够相互跨越, 因此缆机干扰规则比单平台更为宽松, 其运行要求如下:

缆机台数要求: 同单平台类似, 需要满足混凝土初凝时间内的层覆盖要求。

满足缆机间的站位要求: $L \geq nl_{\text{effi}} + 2l_m$, 同单平台类似, 但是不同高程之间的站位距离 l_{effi} 可以比单平台小, 通常取吊罐之间的安全距离(6.5 ~ 7 m 之间)。

满足同平台缆机的站位要求: 当同平台的缆机数超过两台时, 同平台缆机站位要求和单平台的要求相同。

套浇时, 一台缆机覆盖多块, 应满足单台缆机覆盖长度大于缆机效率距离, 即

$$l \geq \sum_{i=1}^n \frac{h_i S_i}{tQ} \quad (5)$$

式中: h_i 、 S_i 为每个浇筑块的面积和层厚; n 为总的浇筑块数目。

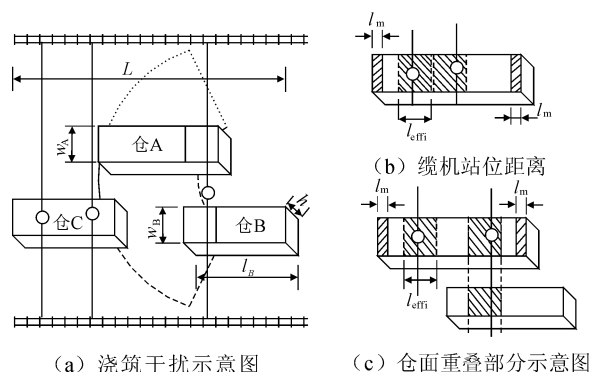


图3 浇筑干扰示意图

4 仿真系统设计

将混凝土坝浇筑过程作为一个系统, 进行系统分析^[9-10]: 缆机为服务台, 浇筑块是服务对象。则混凝土坝施工系统可划分为 4 个子系统: 大坝子系统、机械子系统、施工控制子系统^[11] 和混凝土供应子系统。

(1) 大坝子系统。大坝子系统主要用来存储和

查询大坝的形体模型,并用来计算任意区间和坝段的几何信息,如体积、面积、孔洞参数等。本系统通过 CAD 来建立大坝形体模型,具有建模方便、适用性广、兼容性强的特点^[12]。

(2)浇筑机械子系统。大坝浇筑仿真系统中所说的机械主要指浇筑机械(缆机)。机械的生产能力受到机械效率发挥、浇筑范围、混凝土供料、机械间的干扰和联合等条件的控制。本系统中,可根据实际情况,模拟大坝浇筑机械的实际状态,而且可根据不同的状态来分阶段改变和调整系统参数,从而使模拟更加精确。

(3)施工控制子系统。浇筑块在不同时刻受到不同约束条件的限制,包括岸坡坝段约束、高差约束、时间约束等^[11]。为达到施工质量要求,只有当某筑块同时满足了所有约束要求,浇筑活动才能开始,否则,跳过该浇筑块。

(4)混凝土供应子系统。混凝土供应子系统包括混凝土拌和机械设备、供料线等,本子系统是与机械系统相结合,完成指定坝块一个浇筑块的浇筑。混凝土供应系统中的拌和楼参数主要包括拌和楼的运行参数,供料线主要包括布置参数以及供料范围。

5 工程案例

某混凝土拱坝位于我国西南山区,坝顶高程为 834.00 m,最大坝高为 289 m,共分 31 个坝段,形状为椭圆线双曲拱坝。坝身布置 6 个表孔和 7 个深孔,采用坝肩上方平移式双层缆机布置方案。缆机轨道平台布置在左、右岸坝肩附近,上、下层分别布置 3、4 台缆机。缆机参数选取如下所示:

混凝土覆盖时间取 4 h,最短覆盖时间不小于 3 h。缆机吊罐体积为 9 m³,模板影响距离取 4.2 m^[11]。模拟计算中,全坝段接近老混凝土的仓优先浇筑,岸坡坝段仅次于老混凝土,除此之外,均考虑最低块优先安排浇筑的原则。全坝段除基础区域外,1-14 坝段按照奇数坝段高跳仓浇筑,15-21 坝段按照偶数坝段高跳仓浇筑。22-31 坝段按照奇数坝段高跳仓浇筑。

设定两个施工方案来比较研究大风季节(当年 12 月到次年 3 月)缆机安全距离对缆机干扰以及总浇筑工期的影响。方案 1 中,大风季节缆机之间的安全距离仍取 7 m,方案 2 中,大风季节缆机之间的安全距离取 14 m。利用仿真程序对混凝土坝浇筑过程进行模拟,如图 4 所示。通过计算,方案 1、方案 2 浇筑工期为分别为 46、47.2 个月。计算成果见

图 5-6。

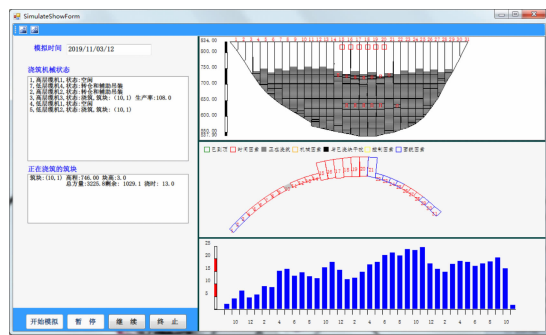


图 4 模拟浇筑过程

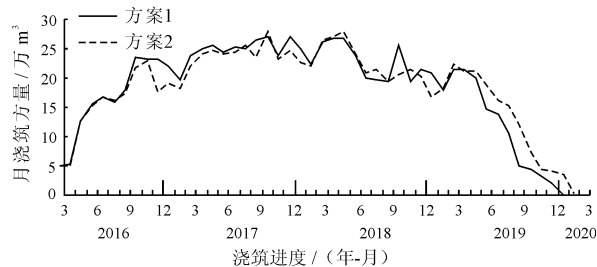


图 5 方案 1 和方案 2 月浇筑强度(方量)对比

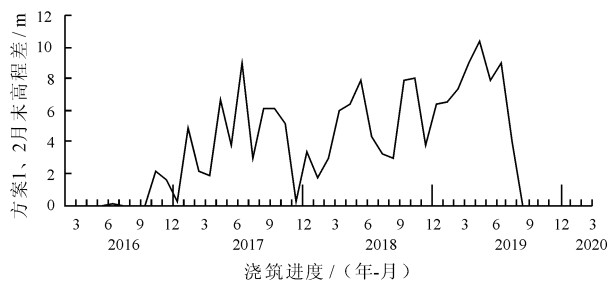


图 6 方案 1 和方案 2 月末最高高程差值变化

可以得出:2016 年 10 月前,两方案月浇筑强度与月末高程变化不大,此时坝体大多数情况下是开一仓,增加缆机安全距离并不影响坝体上升;2016 年 10 月开始,方案 1 的月浇筑强度高于方案 2,方案 1 的坝体上升高度逐步高于方案 2,第 3 个大风季节,两个方案的高程差进一步扩大,差值近 10 m;直到 2019 年 7 月,随着坝体可浇坝段范围缩小和浇筑块体积减小,方案 1 浇筑速度有所降低,方案 2 月浇筑强度有所提高,两者高程的差距逐渐缩小。两者高程进度总的来说相差 6 m 左右,方案 2 工期滞后接近 1.2 个月。以上结果表明:大风季节增加缆机安全距离,对于 610 高程以下影响不大,对于 610~750 影响较大,对于 750 以上影响也不是很大。总体影响在 1.2 个月左右。

6 结 语

本文针对大坝混凝土浇筑过程中缆机的相互干

扰和联合浇筑问题,对缆机浇筑过程进行空间分析和冲突识别。根据实际情况得到了针对缆机单平台和双平台多种情况下的联合浇筑和干扰控制的模拟规则,并建立了相应的仿真模型。基于离散事件仿真和 AutoCAD 二次开发平台,开发了混凝土坝浇筑模拟系统。对某混凝土坝的多个施工方案进行论证,取得较合理的结果,表明所提出的规则和模型能够较准确的对大坝浇筑过程进行模拟,对于混凝土坝的实际浇筑过程具有指导意义。

参考文献:

- [1] 刘莉英,熊林,陈科全. 缆机在某水电站大坝混凝土施工中的应用与国内外水电工程施工使用情况简介[J]. 工业建筑,2008(S1):975-978+967.
- [2] 巨亚东,郭万里. 多台缆机联合浇筑工艺在小湾水电站大坝混凝土浇筑中的应用[J]. 西北水电,2010(4):59-63.
- [3] 谭志国. 金沙江向家坝水电站缆机运行安全管理[C]//. 中国水力发电工程学会施工专业委员会,中国长江三峡集团公司向家坝工程建设部. 第二届水电工程施工系统与工程装备技术交流会论文集(上),2010.

- [4] 尹志洋. 基于 AutoCAD 的混凝土坝仿真模型构建问题研究[D]. 天津:天津大学,2011.
- [5] 石英. 混凝土拱坝浇筑施工仿真研究与仓面设计[D]. 天津:天津大学,2005.
- [6] 李喆,冯艺,顾丽娜. 基于充裕度规则的小湾水电站坝体浇筑机械布置仿真研究[J]. 水利水电技术,2005,36(2):51-54.
- [7] 杨毅. 水利水电工程施工中的空间分析模型研究及应用[D]. 天津:天津大学,2005.
- [8] 吴斌平,任炳显,钟登华. 基于边缘优先和空间冲突的拱坝浇筑仿真研究[J]. 系统仿真学报,2013,25(7):1560-1567.
- [9] 钟登华,练继亮,吴康新,等. 高混凝土坝施工仿真与实时控制[M]. 北京:中国水利水电出版社,2008.
- [10] 王仁超,石英,李名川,等. 混凝土高拱坝浇筑施工仿真[J]. 天津大学学报,2005,38(7):625-629.
- [11] 周志军. 小湾水电站大坝混凝土浇筑施工过程的空间分析与仿真研究[D]. 天津:天津大学,2007.
- [12] 王仁超,王驰,潘菲菲. 基于 AutoCAD 的碾压混凝土坝仿真研究[J]. 水资源与水工程学报,2013,24(2):83-88.

(上接第194页)

- [7] 杨建东,赵琨,李玲,等. 浅析俄罗斯萨扬-舒申斯克水电站7号和9号机组事故原因[J]. 水力发电学报,2011,30(4):226-234.
- [8] 王桂平. 萨扬水电站817事故及对我国水电站机电设备安全运行的警示[J]. 水电站机电技术,2011,34(3):5-8.
- [9] 贾金生,徐洪泉,李铁友,等. 通过萨扬-舒申斯克水电站事故原因分析看机电设备安全运行问题[C]//. 中国电机工程学会水电设备专业委员会、中国水力发电工程学会水力机械专业委员会、中国动力工程学会水轮机专业委员会、水力机械专业委员会水力机械信息网、全国水利水电技术信息网,第十八届中国水电设备学术讨论会论文集,2011:329-336.

- [10] 职保平,马震岳,王溢波,等. 用于水电站振动信号的积分算法[J]. 振动、测试与诊断,2011,31(5):610-613.
- [11] 纪跃波. 小波包的频率顺序[J]. 振动与冲击,2005,24(3):96-98+110.
- [12] 张德丰. MATLAB小波分析[M]. 北京:机械工业出版社,2012.
- [13] 练继建,王海军,秦亮. 水电站厂房结构研究[M]. 北京:中国水利水电出版社,2007.
- [14] 刘洋,尹崇清. 水轮机非平稳振动信号的小波分析[J]. 人民长江,2012,43(2):101-104.
- [15] 于波,刘忠贤. 水轮机在高水头低负荷工况下振动问题的研究[J],水力发电学报,2001,20(1):58-65.