

中文摘要

混凝土浇筑系统计算机仿真,是将水电工程施工同现代化的计算手段结合在一起,使水电工程施工参数分析和选择从凭借施工经验的类比和计算分析,进入到施工过程仿真试验、施工参数数值分析、施工方案优化比较等科学领域。从整个以往的混凝土坝大坝浇筑施工仿真过程来看,存在一定程度的粗线条的勾勒和简化处理,对工程初步的进度分析有一定的宏观指导作用。但是如何使大坝浇筑形象一目了然,查看需详细分析的部位,并得到必要的工程数据,使仿真过程和结果从微观上更结合工程实际,这是当前混凝土坝施工仿真所需要的。

混凝土拱坝浇筑质量要求严,施工强度高,其形体在平面上展示为拱形,不同坝段的浇筑块在平面上既有一定程度的错开又相互关联。本文针对拱坝的工程特点及仓面特征,主要研究混凝土拱坝浇筑施工计算机仿真与仓面设计。它不仅考虑混凝土坝施工动态过程,而且将整个施工过程细化到每一个浇筑仓面。这样可以对每一个仓面的浇筑情况进行分析,为判断浇筑过程的合理性提供依据。

在系统中主要考虑大坝形体子系统、机械子系统、施工控制子系统及仓面设计系统。在系统设计过程中,着重介绍了仓面开仓规则及浇筑机械联合浇筑和干扰规则,并可以根据仓面特性,确立浇筑参数和进行资源配置。系统不仅根据大坝施工不同时期的特征考虑缆机之间安全运行要求,同时还考虑机械组合问题,以充分利用各种资源。

采用数据的集中管理和规范化输出方式,为仓面设计信息的准确性提供了很好的依据。

最后应用此系统对小湾大坝浇筑施工方案进行论证,为小湾混凝土浇筑施工方法的优化选择提供依据,具有一定的工程经济建设意义。

关键词: 混凝土坝施工, 计算机仿真, 仓面设计, 数据库, 小湾, 缆机

Abstract

The selection and analysis of the Hydraulic Project construction parameter were usually compared and analyzed by construction experience. Computer simulation on dam concrete construction system, which combined Hydraulic Project construction with modern simulation methods, turned into the scientism field, such as simulation experimentation of construction process, numerical value analysis of construction parameter, optimization of construction scheme. The foretime study of the concrete dam construction was usually to render in a simple form, which taked macroscopical effect on the preliminary analysis of the schedule. In order to easily achieve the detailed information of the dam construction process, making the simulation process and result microcosmic being closed to project construction was necessarily.

The construction of arch concrete dam required high quality and intensity, which form is arch. The different pouring-cubes were independent as well as connected. Aimed at the characteristic of the arch dam and pouring-cubes, this paper studied simulation on high arch dam construction and the pouring process. Its not only considered the dynamic process of construction but also provided with details of every pouring-cube. We can analyze information of every pouring-cube, which presented reason to the construction process.

The system included four subsystems, such as dam-form subsystem, construction machine subsystem, construction controlling subsystem, pouring process design subsystem. The rule is presented in simulation system to be used in conflicts control and combine-pouring of cranes when many cranes machine working together, it also can establish construction parameter and scheme resources according to different part of dam. In order to make the best of diversified resources, the system not only concerned with the spacial conflict problem on concrete construction, but also involved efficiency utility of machines.

Centralize data management and standardization output were introduced into the system, which provided great deal of reason for information of the pouring process design.

The system verifies the construction scheme in Xiaowan Hydropower Project and optimization scheme is proposed. It is helpful for engineering construction.

Keyword: Concrete-dam Construction, Computer Simulation, Pouring Process Design, Database, Xiaowan Project, Cable Crane

独创性声明

本人声明所呈交的学位论文是本人在导师指导下进行的研究工作和取得的研究成果，除了文中特别加以标注和致谢之处外，论文中不包含其他人已经发表或撰写过的研究成果，也不包含为获得天津大学或其他教育机构的学位或证书而使用过的材料。与我一同工作的同志对本研究所做的任何贡献均已在论文中作了明确的说明并表示了谢意。

学位论文作者签名：石英

签字日期：2005年1月18日

学位论文版权使用授权书

本学位论文作者完全了解天津大学有关保留、使用学位论文的规定。特授权天津大学可以将学位论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索，并采用影印、缩印或扫描等复制手段保存、汇编以供查阅和借阅。同意学校向国家有关部门或机构送交论文的复印件和磁盘。

(保密的学位论文在解密后适用本授权说明)

学位论文作者签名：石英

导师签名：王仁超

签字日期：2005年1月18日

签字日期：2005年1月18日

第一章 绪论

1.1 研究背景

混凝土坝在高坝中占的比重较大，特别是重力坝和拱坝最普遍，其大坝浇筑施工是水利水电工程建设过程中的主要环节，施工速度和质量直接影响着工程建设的工期和质量。在国外，将计算机仿真技术用于混凝土坝施工仿真，始于 20 世纪 70 年代，我国在水电工程混凝土坝施工中应用仿真技术始于 20 世纪 80 年代。由于受结构形式、自然环境、温度控制、资源等各种因素的影响制定切实可行的大坝浇筑施工浇筑计划和在实施过程中分析各种因素的影响，混凝土坝施工系统是一个复杂的系统，如何考虑各种因素的影响，对大坝浇筑施工阶段实施有效的管理与控制是设计与施工管理人员时刻面临的问题。仿真系统为水利工程提供一个不同环境的研究平台，它具有安全、经济、可控，便于观察、便于参与、实用、无破坏性、可多次重复、整体性等特点，可以对仿真控制的效果与作用进行分析比较，以做出科学合理的选择。

在混凝土浇筑过程中不仅包括混凝土入仓过程，还包括仓面上模板架立，钢筋铺设，仓面振捣，清理等工艺，这些工艺不仅需要一定的人力，设备和各种资源，备仓的过程也影响大坝浇筑进程^{[1][2]}。在三峡工程首先将仓面设计引入混凝土浇筑，对保证三峡工程混凝土浇筑质量，合理配备仓面资源，加快混凝土浇筑速度等方面起了重要的作用^{[3][4]}。

通过三峡工程的实践证明进行混凝土浇筑仓面设计十分必要，在混凝土坝浇筑仿真系统中，为强化混凝土浇筑过程管理，确保混凝土浇筑仿真仓面施工的准确性^{[5][6]}，建立仓面设计计算机辅助系统对施工信息进行实时查询、统计、分析，并将混凝土浇筑仿真与仓面设计结合起来将是一个值得深入研究的课题。

1.2 计算机技术在水利工程施工管理与控制中的应用

随着计算机科学和系统模拟技术的迅速发展，使得计算机模拟技术广泛应用于各个领域的复杂过程中。与此同时，计算机模拟技术在水利水电工程施工中也得到了应用。早先的施工仿真技术主要是循环网络仿真技术，它将排队理论和计算机仿真技术应用到网络计划技术中，对施工循环过程和随机时间进行模拟，从而反映施工的循环运行过程^{[7][8]}。随后，循环网络仿真技术成功地应用于高层建筑工程、路桥工程、土方运输工程、管道工程、隧洞开挖工程、水利和港口工程施工中，并逐步发展形成了仿真软件系统 CYCLic Operation NETwork，即

CYCLONE^{[9][10][11]}。

1973 年第十一届国际大坝会议上, D.H.Bassgen 首先结合混凝土坝提出了坝体浇筑过程仿真, 在满足施工浇筑系统实际存在的各项条件和施工准则的情况下, 利用计算机仿真针对缆机进行了浇筑仿真计算, 计算和给出了缆机在仿真浇筑中的效率、浇筑强度等特性, 基本反映出缆机在坝体浇筑过程中的工作情况。D.H.Bassgen 于 1973 年将计算机仿真与循环控制网络结合起来, 对建筑工程混凝土运输进行仿真^[12]。

在国内, 天津大学在水利工程施工系统仿真建模方面走在了全国的前列^[13]。1986 年, 天津大学与成都水利水电勘测设计院首先将计算机模拟技术应用于二滩水电站双曲拱坝浇筑施工模拟, 通过二滩大坝的仿真计算检验, 计算成果符合一般施工规律。20 世纪 90 年代初期, 天津大学将计算机模拟技术与自适应控制系统结合, 建立了堆石坝施工过程管理与施工控制模型, 实现了模拟系统与模拟模型的自调整, 使模拟模型参数可以根据实际施工情况自动调整, 进一步使模拟模型能够反映实际, 从而提高了计算机模拟结果作为控制目标的可靠性^{[14][15]}。

此后, 天津大学将计算机仿真技术应用于多项水利工程, 如水口电站、三峡二期工程、龙滩水电站、溪洛渡水电站、向家坝水电站等, 对大坝混凝土浇筑进行了实时仿真计算, 均取得了良好的实用效果与实际经验^{[16][17]}。随着计算机技术、数据库技术、软件技术、虚拟现实技术的发展, 天津大学王仁超在龙滩工程碾压混凝土坝仿真计算中将数据库引入模拟模型, 并将三维动画技术用于混凝土施工仿真中, 对混凝土大坝分块浇筑仿真的三维动画建模方法和实施手段进行了探讨, 实现了混凝土浇筑的三维动画仿真。同时还在三峡大坝二期混凝土坝施工决策支持系统中将计算机模拟、数据库技术、三维动画技术、面向对象建模、控制理论结合用于三峡大坝混凝土浇筑过程模拟与控制取得了良好的效果^{[18][19]}。另外, 天津大学将计算机模拟与地理信息系统 (Geographic Information System) 结合开发了地下厂房和隧洞开挖系统模拟可视化演示系统^[20]。计算机仿真在水利水电工程施工应用的范围不断拓宽, 武汉水利电力大学、大连理工大学等高校也先后将计算机仿真技术应用于水利工程各方面中^{[21][22][23]}。

纵观近 30 年来计算机仿真在建筑工程施工的研究成果可以发现, 计算机仿真在施工中的应用范围从辅助施工组织设计扩展到结构设计、三维动态显示等; 从仿真单一的混凝土浇筑到仿真土石坝填筑施工、导截流施工、地下工程施工等。应用目标从静态的方案优选发展到动态的实时控制等; 从最初把仿真成果仅仅作为一种不重要的决策参考, 逐渐发展成建筑工程、尤其是大型水电工程规划、设计和施工管理中不可缺少的技术手段^[24]。

1.3 混凝土拱坝浇筑施工仿真研究与仓面设计思想

混凝土坝浇筑施工存在诸多影响因素，这些因素之间相互制约、相互影响，要研究大坝浇筑施工进度，需要了解系统运行特征。

采用计算机仿真大坝施工，丰富了水利水电工程施工的研究方法。长江勘测规划设计研究院结合现代水电工程技术和计算机技术发展，以三峡大坝施工为实例动态仿真系统，包含有计算机跳仓选块、P3 进度软件接口、图形表达三个部分。可对常规混凝土坝和碾压混凝土坝，重力坝和拱坝等不同坝型，缆机、门塔机或皮带机等不同施工机械的任一时段的混凝土坝施工进行动态仿真或浇筑过程再现。系统充分考虑了多种影响条件，计算结果与实际发生量吻合较好，具有良好的实用性，特别针对多种机械的综合模型建立，实时三维图形显示以及与常用进度软件的数据接口等方面，具有一定的通用性^[25]。

影响大坝浇筑进程的因素错综复杂，它与施工导流计划安排，坝体结构和分缝分块，施工期混凝土温度控制措施、混凝土分块浇筑顺序、施工工艺要求以及当地气象、地形等诸多因素有关。要综合考虑多种因素对大坝施工进程的影响，用解析法推导其间的函数关系建立描述这些问题的数学模型显然是不现实的。混凝土大坝建设周期长、投资大，所以在工程开工前需论证各种施工方案，进行方案优选，对混凝土浇筑进行合理的安排，以期在合理工期内，尽量减少工程投资费用。在设计研究和工程管理中，采用计算机仿真技术为工程提供良好的工具。

以往，在制定和论证混凝土坝施工方案和施工进度时，常用类比法，即根据国内外同等类工程，按坝体月上升高度、混凝土浇筑高峰强度等指标来拟定施工进度和总工期。在进行机械设备选型配套时，按其平均生产率进行配备，对机械设备和综合机械设备生产能力在施工中出现的随机性简化处理，按机械的平均生产能力来确定各施工机械的数量，在此基础上增加一定的备用容量。从整个以往的混凝土坝大坝浇筑施工仿真过程来看，存在一定程度的粗线条的勾勒和简化处理，对工程初步的进度分析有一定的宏观指导作用。但是，如何使大坝浇筑形象一目了然，查看需详细分析的部位，并得到必要的工程数据，使仿真过程和结果从微观上更结合工程实际，本文提出了将混凝土坝大坝浇筑施工仿真与仓面设计结合起来的思想。

仓面设计是在分析仓面特征的基础上，结合现场施工条件，按照有关技术要求，结合资源配置，对混凝土浇筑过程详细规划，为施工保质保量的完成提供详细的依据。建立仓面设计辅助系统可以对施工信息进行实时查询、统计、分析，及利用计算机辅助进行混凝土浇筑仓面施工规划。混凝土拱坝浇筑施工仿真和仓面设计在以往的大坝仿真基础上引入以下内容：

对大坝浇筑仓面特征进行细化,特征部位形体特征(孔洞,廊道),不同浇筑机械入仓方式,其中建立缆机同平台与双平台入仓空间干扰与联合数学模型,混凝土分区仓面表示,根据浇筑部位和浇筑特点确立仓面特性。根据仓面特性,确定浇筑参数和进行资源配置,针对不同部位,选用不同的设备组合,以充分发挥机械设备的效率。建立仓面实时分析模块,按照统计查询出来的信息,得出任意时间范围内和任意高程范围内的浇筑块的仓面特征,这样可以对每一个仓面的浇筑情况进行分析,为控制仓面混凝土浇筑工作,实时配置资源,保证工程顺利进行提供了可靠信息。

1.4 系统的实现原理及特点

80年代后期90年代初,面向对象编程技术被提出来,由于采用对象、类和继承等概念,使其开发的系统具有代码可重用性及系统可扩充、可移植、易维护性等特点^{[26][27]}。面向对象分析是系统设计的输入,主要进行软件系统应用环境(即问题域)的分析和用户对系统需求的分析,了解问题域内该问题所涉及的对象、对象间的关系和作用(操作)。面向对象设计是设计软件的对象模型,在软件系统内设计各个对象、对象间的关系(层次关系、继承关系等),每个对象的内部功能的实现,确立对象哪些处理能力应在哪些类中进行描述。面向对象实现是建立对象间的通信方式(如消息模式),确定并实现系统的控制机理、界面、输出形式等。它通过对应用领域的问题空间对象直接建模,符合人类认识客观世界的自然方式^{[28][29][30]}。

水利水电工程之间尽管存在很多的相似性,为了系统设计的通用性、可扩充性和操作的灵活性,有必要采用面向对象方法和技术开发新的模拟系统,以便克服上述困难得到通用的、环境适应性和用户需求适应性强的软件系统^{[31][32]}。根据面向对象方法,在系统分析的基础上,我们建立混凝土拱坝浇筑施工面向对象模型^[33]。系统包含的类主要有浇筑机械类、大坝类和模拟类。整个系统存在以下特点:

(1) 全面采用 Visual C++ 开发平台,软件操作简便;采用面向对象技术,使得本系统可以简便的处理多种类型的浇筑机械及施工控制手段。

(2) 系统后台运算大坝的浇筑过程,前台用大坝平面轮廓示意图和下游立视示意图动态显示坝体浇筑上升情况,可以很直观的看出大坝浇筑上升过程,并且可以分阶段模拟,进行实时调整。

(3) 仓面设计成果以图表的形式直观显示,并且与数据库和 AutoCAD 进行接口设计,具有很强的实用性。
口设计,具有很强的实用性。

(4) 界面简单, 操作灵活, 易于掌握。

1.5 本文研究的主要问题

我国在建或拟建的水利水电工程中, 混凝土拱坝占据了混凝土坝中很大一部分, 例如小湾水电站, 溪洛渡水电站、白鹤滩水电站。可以看出, 拱坝的建设无论在数量上还是在规模上都占有相当的比重, 相应的, 如何指导其施工和施工管理, 提高施工质量, 显得尤为重要。

混凝土拱坝施工系统是一个复杂的系统, 施工过程中存在一些不确定因素的影响, 致使实际施工与施工计划产生偏差。为了从实际施工信息获取影响施工进度因素, 评估实际施工效果, 预测施工发展趋势, 调整后阶段的施工计划, 达到有效管理和控制施工过程的目的, 本文拟对混凝土拱坝浇筑施工仿真与仓面设计进行研究, 主要讨论以下问题:

第二章利用系统仿真的基本原理对混凝土坝施工系统进行分析。从系统的角度来看, 混凝土拱坝施工可以看作是一个系统。首先对混凝土拱坝施工系统分成各个子系统进行介绍, 然后确定系统的构成部件及其功能、部件间的关系, 系统的影响因素, 最后提出混凝土坝施工系统计算机模拟的辅助决策模型建模的主要规则和模拟机制, 并对系统的实现进行了介绍。

第三章主要介绍混凝土坝仓面设计的原则和主要内容。仓面设计是混凝土浇筑必要的技术准备, 是通过施工工艺控制以保证混凝土浇筑质量控制的重要环节和措施。本章从分析仓面特性、选择浇筑方法进行仓面混凝土浇筑施工控制、入仓设备规划、资源配置四个方面着重介绍了仓面设计的步骤。

第四章主要介绍系统的数据组织和输出接口设计等问题。因为对大坝浇筑系统进行模拟, 需要大量的数据信息, 数据信息的读入、存储、输出如何进行规范化的管理和输出, 从而为准确提供仓面信息奠定基础, 是十分必要的。

第五章结合小湾工程实例对大坝施工进行模拟计算, 结合小湾仓面施工情况设定了多方案的比较。模拟计算通过设定方案和方案计算比较分析, 给出了不同方案的主要差异点, 并对差异产生的原因进行了分析和论证, 为小湾施工进度控制和方案优化提供了很好的依据。

第二章 混凝土拱坝浇筑施工仿真系统设计

2.1 混凝土坝浇筑系统仿真原理

系统仿真也称为计算机仿真,是指以计算机为主要工具,运行真实系统或预研系统的仿真模型,通过对计算机输出信息的分析与研究,实现对实际系统运行状态和演化规律的综合评估与预测^{[35][36]}。其目的是通过对系统仿真模型运行过程的观测和统计,获得系统仿真输出和掌握模型基本特性,推断被仿真模型的真实参数(或设计最佳参数),以期获得对仿真对象实际性能的评估和预测,进而实现对真实系统设计与结构的改善和优化。它是分析和评价现有系统运行状态的或设计优化未来系统性能与功能的一种技术手段,在工程设计、航空航天、交通运输、经济管理、通讯网络和计算机集成等领域中有着广泛的应用^{[37]-[40]}。

混凝土浇筑系统计算机仿真,是将水电工程施工现代化的计算手段结合在一起,使水电工程施工参数分析和选择从凭借施工经验和类比和计算分析,进入到施工过程仿真试验、施工参数数值分析、施工方案优化比较等科学领域^[2]。大坝施工过程千变万化,混凝土浇筑系统计算机仿真能实现对大坝浇筑过程的有效管理与控制,并利用获得的信息分析实际与计划的差异、评估影响计划执行效果的因素、预测偏差的发展趋势、辅助下阶段施工决策的制定。

根据混凝土拱坝施工系统特性,运用计算机仿真技术、计算机图形技术、信息系统技术、运筹学原理,进行混凝土拱坝浇筑施工仿真研究。因而,在工程设计和施工管理过程中,能确定合理的施工方法,优化选择施工机械及配套组合,制订切合实际的施工进度计划,高效简便地对施工信息进行管理,直观形象地反映复杂施工过程。

2.2 混凝土拱坝浇筑系统分析

作为大体积混凝土的坝体,由于混凝土凝结特性和凝结过程力学特性的影响,为了防止坝体开裂,往往采用分缝分块浇筑形式施工。这样大坝浇筑过程实际上是一个筑块间断、有节奏的上升过程,在这个过程中,混凝土拌和系统将骨料生产系统生产的骨料和水泥、水以及各种添加材料、掺合材料拌和形成混凝土,然后通过运输机械运至坝面上,最后坝面上的浇筑机械按照设计要求将混凝土吊装入仓、铺平振实,形成预定的(平面上的模板限制的范围和高度上的设计高度范围)浇筑块。混凝土坝施工过程除受到结构形式、工艺技术、组织方式及混凝土供应、浇筑设备能力和效率的影响和制约,还受到施工过程中不确定性的自然

环境因素的影响。从而可以把混凝土坝施工看作一个系统。这个系统是处在一定的环境之中，具有一定的内部结构。

混凝土拱坝浇筑质量要求严，施工强度高，其形体在平面上展示为拱形，不同坝段的浇筑块在平面上既有一定程度的错开又相互关联，这对几个浇筑块共同施工时各种浇筑机械的管理调度提出了更高的要求。系统中的服务台（或服务员）为浇筑设备，而浇筑块可以看作服务对象（或顾客）。在混凝土浇筑仓面设计过程中仿真系统针对仓面的具体特征不仅要考虑浇筑设备之间安全运行要求，同时还要考虑浇筑块浇筑方式、浇筑设备及平仓振捣设备的生产率的问题。因此本系统的主要实体为浇筑机械和浇筑块，从系统分析的角度来看，可以划分为大坝形体子系统、机械子系统及施工控制子系统及仓面设计系统^[41]。

（一）大坝形体子系统

通过拱圈、横向截面来描述拱坝的形体。拱圈属性包括拱圈高程、上下游面点列坐标。利用三次插值样条曲线方法，在给出几个坐标点的情况下得到拱圈的形状。横向截面类的属性有缝号、截距、夹角、顶高程、底高程、所属坝段、坝面凸体和坝内孔洞参数。本系统主要是对坝体形体参数进行管理，完成对大坝的分缝分块，计算大坝的总体积和任意坝块、任意高程区间的体积。

（二）机械子系统

机械子系统主要指浇筑机械及平仓振捣机械。浇筑机械其特征参数主要有技术性能参数、布置位置等。其受浇筑范围、拌和系统生产能力、机械熟练程度与效率发挥程度设定以及机械运行联合与干扰等规则的控制。本系统可依据某模拟时刻对大坝浇筑形成的各机械设备的实际使用情况，浇筑机械实际工作情况和拌和系统实际工作信息来灵活控制模拟时段的长度，调整系统参数，从而更加灵活的反映大坝施工的复杂过程。而平仓振捣机械主要是根据浇筑机械的使用情况来进行相应的配置。

（三）施工控制子系统

考虑到实际系统的复杂性，必须对仿真实体进行约束和控制。对大坝浇筑块的控制具体包括时间约束、高差约束、工艺约束、岸坡坝段约束、特殊部位施工约束等。这些约束主要是为了满足大坝混凝土浇筑施工要求，如考虑施工工艺及温控要求对不同坝段、仓面间的高差进行限定。只有当大坝浇筑块同时满足了所有约束，才能进行浇筑活动。

（四）仓面设计系统

仓面设计系统的内容与前三个系统紧密相连，它的内容分布在前三个系统中。仓面设计系统为大坝形体子数据提供混凝土分区区间、混凝土等级、特殊部位的空间范围等详细信息，为坝体分缝分块后浇筑块信息的完整记录提供了很好

的数据基础。同时，仓面设计系统中还设置了仓面资源配置标准，为机械子系统中不同浇筑机械配置资源提供依据。仓面设计系统的建立就是为施工中备仓、浇筑等仓面工作提供指导，而仓面工作又需要施工控制子系统进行约束其浇筑行为。所以说，仓面设计系统并非一个独立系统，它的内容与前面三个系统的相互结合在一起的。

2.3 大坝施工仿真系统建模

2.3.1 模拟机制

大坝浇筑过程模拟采用固定时间步长法，时间步长设为 Δt 。该模拟机制的基本思想是：首先确定模拟时钟每次推进的时钟步长 Δt ，时钟每次由 t 推进 Δt 到达 $t+\Delta t$ 后就检查一次是否有事件发生，若有事件发生，相应地改变系统中相关实体的状态，并认为相应事件发生在 $t+\Delta t$ 时刻。随着计算机性能、计算速度的飞速提高，可以将模拟时钟步长取得很小，使模拟达到所要求的精度。采用这种机制只需设定一个总时钟值来跟踪模拟的进程，在这里我们用有效工作时间的序数值作为时钟计数器，设我们确定的一个时钟值为 T ，对于时刻 T ，我们根据确定的模拟规则（由模拟对象的行为特征所决定）预测 T 时间的一个时间增量（时间步长） Δt 内系统中各个对象活动将发生的状态变化，记录 $T+\Delta t$ 时刻各个对象活动状态的变化，则完成一个过程的模拟。如此进一步增加时间步长，我们可以了解某一个时间段内系统的行为特征^[42]。

混凝土坝浇筑模拟过程中的主要实体有大坝浇筑块、浇筑机械、振捣机械及拌和系统等，故主要描述这些实体的属性及其随时间的变化过程。每一个模拟时钟累进后，即扫描系统中的实体（机械和浇筑块）一次，根据“先到先服务的规则”确定空闲的机械可以浇筑的具备条件的浇筑块。具体模拟过程如下：

(1) 初始化机械、浇筑块和拌和系统的状态。

(2) 对空闲的浇筑机械和处于待浇筑柱块排序。浇筑机械排序的具体规则为：以最早空闲且累计浇筑时间最短的浇筑机械优先安排浇筑；柱块排序的规则为最低块优先浇筑的总体原则，但对接近老混凝土的柱块赋以最高优先权。

(3) 按照空闲浇筑机械的优先顺序和浇筑块优先顺序，尝试确定各个浇筑机械能否对优先浇筑的浇筑块进行浇筑，即新的浇筑块是否具备开仓条件。

(4) 若某个浇筑机械能够浇筑某柱块，判断是否需要其他机械配合，且这些浇筑机械的加入是否会影响其他已浇柱块的浇筑；如果不影响，则进入浇筑状态，否则，不能开仓。

(5) 重复步骤3、4直至所有空闲浇筑机械找不到可以开仓的浇筑块。

(6) 对于尚有空闲的机械, 若存在需要仓面辅助吊装的浇筑块, 安排空闲机械辅助仓面吊装。

(7) 改变浇筑机械和浇筑块的状态并记录开仓浇筑块的参数。

(8) 模拟时钟累进, 重复步骤 2-7 直至达到规定的时间或所有浇筑块均达到顶高程。具体模拟流程图如图 2-1 所示。

2.3.2 建模主要规则

(一) 仓面开仓规则

对于浇筑机械来说, 某一个时间可浇坝块往往有很多, 由于开仓数的限制, 只能选择一块或几块开浇。如何确定即将开浇的坝块, 是大坝混凝土仓面进度安排的一个重要问题。可浇坝块的确定涉及因素很多, 如层间间歇期、相邻坝块高差、特殊部位施工、施工工艺要求等。选择拟浇坝块又必须遵循最低高程原则、坝块均衡原则等。因此, 可浇坝块的选择是一项复杂且具有一定灵活性的工作, 在此可利用计算机进行辅助决策, 将大坝浇筑进程中所有的备仓完毕的浇筑块逐一扫描, 根据程序中设定的施工控制条件来判断哪些坝段可以开浇。

(1) 层间间歇期

层间间歇期是指一个仓面浇筑完毕到浇筑该仓上层仓面所间隔的时间。不同的浇筑部位、不同的浇筑季节往往由于混凝土标号或者结构上的原因, 间歇期时间的确定是不同的。

在本系统中, 层间间歇的选取可以根据具体的工程施工要求, 按照强约束区、弱约束区和脱离约束区选取。另外大坝坝体上布置有导流底孔、泄洪深孔和表孔等结构复杂, 施工难度较大的孔洞部位, 由于对大坝混凝土浇筑进程影响较大, 可以根据现有的施工经验, 对孔洞部位施工间歇期单独选取。

(2) 高差限制

高差限制的主要目的是: 为避免纵缝键槽被挤压, 影响灌浆质量; 避免过大的剪切变形对横缝止水设施的不利影响; 避免先浇块长期暴露, 受气温骤降引起表面裂缝, 高差应该在允许高差范围内, 它包括不同坝块之间的相邻高差、坝段间不同仓面的相邻高差以及坝块之间的最大高差。在施工控制系统中可以根据工程情况进行具体设定。

(3) 浇筑面貌控制

大坝不同部位的浇筑要求按照不同的面貌形状上升, 如河床坝段浇筑为了立模方便要求相邻坝段高低相间地上升, 而岸坡坝段为了保证坝体稳定性要求坝段高程呈现台阶状等, 这也需要坝体筑块上升必须满足这些要求。

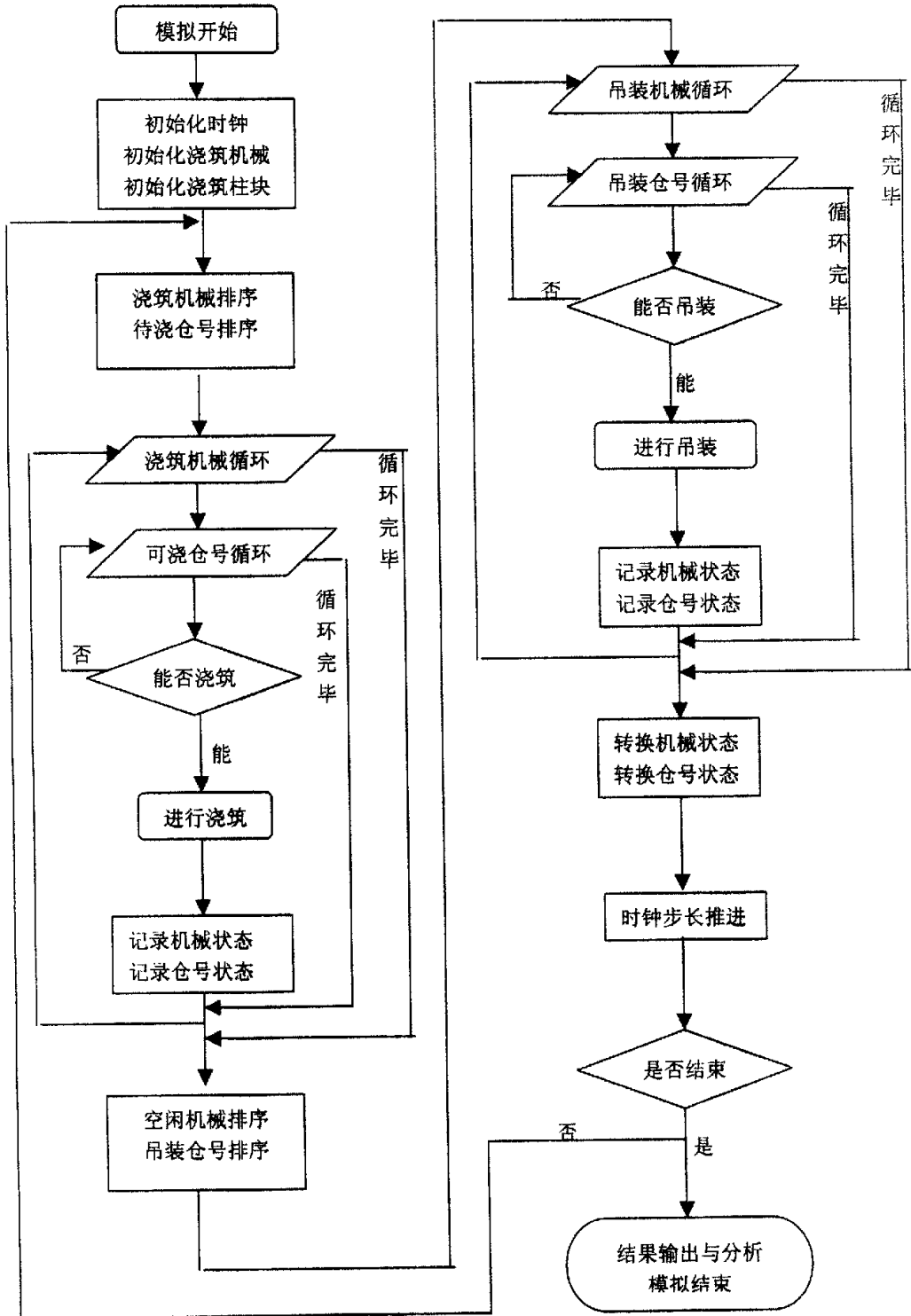


图 2-1 大坝混凝土浇筑施工模拟流程图

(4) 施工工艺要求

一个大坝包括各种构件，它们在施工上有不同的工艺要求，例如，过水时候要求过水缺口内同一个仓之间柱块浇平；导流底孔、泄洪深孔和表孔由于孔洞底板、顶板施工的工艺停工。在系统中，可以根据各部位的结构特点、施工工艺要求，在大坝浇筑至这些部位时，改变控制条件。

(5) 施工干扰限制

在大坝施工过程中，选择的可浇块由于和相邻坝块施工机械干扰或者模板未拆除影响施工等情况，在这种情况下，仓面不允许开仓。

(二) 仓面浇筑机械联合浇筑和干扰规则

本系统给出了可能相关的混凝土运输设备：缆机、塔带机、自卸汽车、胎带机、门机。这些混凝土运输设备的共同参数包括：机械编码、浇筑机械名称、机械类型、机械投入时间、机械退出时间、供料系统名称机械浇筑范围大修一次可浇方量、大修一次需要的时间配合施工的机械顺序与编号、运行参数（包括混凝土吊罐提升、下降、旋转速度）等。在系统中考虑了各种浇筑机械针对各种仓面生产率的发挥问题，具有较好的工程适用性。

我国已建或在建的混凝土拱坝由于地形地质条件限制，浇筑施工方案大多采用缆机承担大坝施工过程中大部分的混凝土浇筑、设备物资的调运工作，例如二滩、小湾及溪洛渡水电站，那么本文主要针对缆机来进行仓面浇筑机械联合和干扰规则的确定，其他浇筑机械的机械联合和干扰规则在原理上是相通的。

大坝混凝土浇筑过程中，存在施工工艺、温度控制、施工管理等诸多方面的要求。由于进度要求布置多台缆机，各台缆机的运行在空间、时间上必然会受到其他缆机的影响，即存在一定的相互干扰，而且，随着大坝的上升，缆机的工作状态和工作条件也发生变化，也就是说，不同的浇筑面貌，缆机之间的干扰状况也不同。以往的混凝土施工仿真研究中往往未能充分考虑施工机械的状态变化及机械参数的随机性，仅以有限的几个参数来描述施工机械，大大影响了仿真系统反映客观实际的真实性。为了使混凝土拱坝浇筑计算机模拟模型更接近实际情况，仿真系统不仅要考虑缆机之间安全运行要求，同时还要考虑浇筑块浇筑方式、缆机生产率的发挥等问题。在此针对混凝土拱坝缆机在浇筑不同浇筑块时相互干扰问题，提出了缆机联合浇筑和干扰控制的模拟规则。

(1) 缆机联合浇筑规则

大坝浇筑过程中，能够与一台缆机联合的其他缆机数量是有限制的，这种限制往往与缆机位置布局有关，在研究中，我们为每台机械设定了可能联合的机械序列，按照序列选择联合机械。对于序列中的缆机能否与已经选定的机械联合浇筑该浇筑块，本研究考虑了以下条件：

1) 被选的联合机械是否空闲。

2) 两台机械在供料台取料是否干扰, 并满足仓面浇筑作业要求, 鉴于施工质量考虑, 本研究中机械联合尽量满足仓面平铺法浇筑要求。

3) 是否受其他浇筑块浇筑机械的制约, 这种制约就是后面介绍的缆机之间的相互干扰。

(2) 干扰规则

设浇筑仓上、下游方向长度为 L , 单仓浇筑时为本仓号长度, 多仓浇筑时取所有仓号中最上游与最下游点间距离。仓面面积为 S , 宽度为 B , 采用平铺法浇筑, 铺层厚度 h , 单台缆机小时生产率为 Q , 混凝土初凝时间为 t 。

缆机的技术性能将直接影响大坝浇筑进度。缆机运行方式设为复合运动, 缆机一次循环时间构成包括吊罐对位时间、装卸料时间、加减速时间以及缆机水平和垂直升降时间中的大值。缆机水平和垂直升降时间按照供料平台到所浇仓块的实际距离与速度确定。若按照缆机吊罐为 9m^3 , 即 1 罐混凝土形成 0.5m 层厚、面积为 18m^2 ($4.2\text{m} \times 4.2\text{m}$) 的区域。在安排缆机浇筑工作的方式时, 在其工作范围内应解决其间的工作干扰问题, 考虑仓内存在 4.2m 的模板影响距离。

1) 单平台布置

1、单仓开仓时

① 缆机台数必须满足在混凝土初凝时间内层覆盖要求, 即

$$n_A = \frac{0.5S}{t * Q} \quad (\text{取上限}) \quad (2-1)$$

② 考虑塔架移动带来的干扰, 以 9m^3 吊罐考虑, 同平台缆机安全距离应大于 $4.2 \times 3 = 12.6\text{m}$ (3 个条带的宽度), 如图 2-2。

③ 按照老混凝土优先、最低块优先的顺序, 符合最优先条件的仓先开。

2、联合开仓, 开第二个仓时

① 剩余缆机台数必须满足混凝土初凝时间内层覆盖要求, 即

$$n_B = \frac{0.5S}{t * Q} \quad (\text{取上限}) \quad (2-2)$$

② 满足缆机站位要求, 即 $L_{ABC} \geq (n_A + n_B) \times 21 + 4.2$ (2-3)

③ 仓重叠部分 21m 长范围内, 单台缆机能够满足混凝土初凝时间内层覆盖。

如图 2-3 所示。

④ 照老混凝土优先、最低块优先的顺序, 符合最优先条件的仓先开。

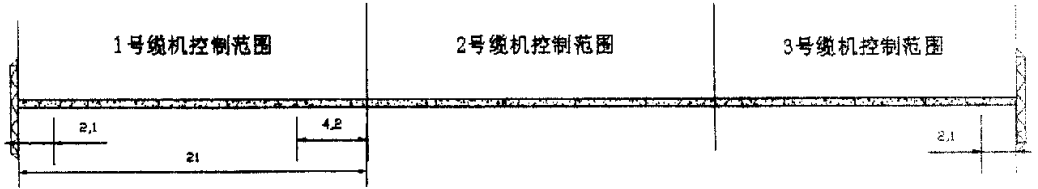


图 2-2 缆机控制范围图

注：为避免 1#缆机移位时对 2#缆机施工造成影响，取 2 个条带宽度作为调剂，缆机间站位距离设定为 $12.6 + 4.2 \times 2 = 21\text{m}$ 。另外，考虑仓面两侧模板的影响，仓面长度 $L_A \geq n_A \times 21 + 4.2$

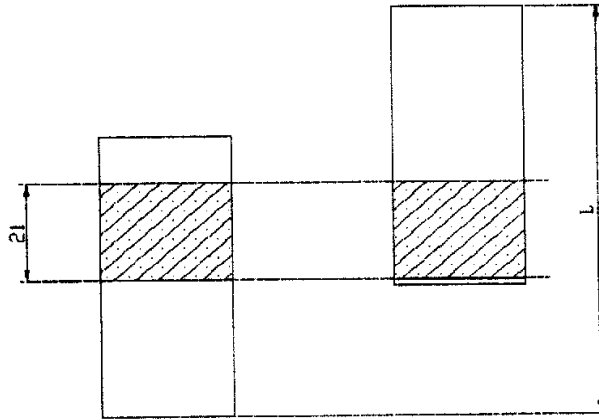


图 2-3 双仓缆机干扰示意图

3、联合开仓，开第三个仓时

① 剩余缆机台数必须满足混凝土初凝时间内层覆盖要求，即

$$n_c = \frac{0.5S}{t \cdot Q} \quad (\text{取上限}) \quad (2-4)$$

② 满足缆机站位要求，即 $L_{ABC} \geq (n_A + n_B + n_C) \times 21 + 4.2$ (2-5)

③ 三仓两两之间重叠部分 21m 长范围内，单台缆机能够满足混凝土初凝时间内层覆盖要求。两两之间同时须满足站位要求，即，

$$L_{AB} \geq (n_1 + n_2) \times 21 + 4.2 \quad (2-6)$$

n_1, n_2 ：两两仓的浇筑缆机台数。

④ 按照老混凝土优先、最低块优先的顺序，符合最优先条件的仓先开。

⑤ 同时开仓数不超过 3 个，不再开第四仓。

2) 双平台布置

缆机双平台布置, 缆机之间可以相互跨越, 调度相对单平台布置灵活, 它对缆机干扰的安全距离的控制没有单平台严格, 因此, 针对缆机双平台布置的情况设置缆机运行要求如下:

①缆机台数必须满足混凝土初凝时间内层覆盖要求, 即

$$n = \frac{0.5S}{t * Q} \quad (\text{取上限}) \quad (2-7)$$

②满足缆机站位要求, 三台以上缆机共同浇筑时, 考虑安全距离即

$$L_{ABC} \geq (N-1) \times SafeDis + 4.2 \quad (2-8)$$

SafeDis: 设定的缆机安全距离, 可以根据缆机双平台布置方式和缆机台数具体确定

③按照老混凝土优先、最低块优先的顺序, 符合最优先条件的仓先开。

④同时开仓数超过 3 个, 不再开第四仓。

注: 在双平台缆机浇筑时, 若为单仓浇筑, 缆机的工作范围 L_{ABC} 即为本仓号长度; 而多仓浇筑时, 缆机的工作范围取所有仓号中最上游与最下游边界点间的距离; N 为所有仓面的缆机台数。

(三) 非混凝土浇筑综合模型建模规则

混凝土坝施工中, 除混凝土浇筑作业是形成大坝的主体作业外, 还有浇筑混凝土和满足大坝使用功能要求的大量的其他作业, 需要混凝土浇筑机械来完成。如满足混凝土成型要求的模板作业和满足结构受力要求的钢筋作业等; 为满足混凝土浇筑需要的混凝土振实设备、施工机具的入仓吊装等, 为满足混凝土养护需要的保温材料、冷却水管、灌浆管路等吊装, 为满足大坝功能要求(泄洪、发电)的闸门、起闭机、压力管道、监测仪器吊装等。这些起重作业在混凝土施工中除在施工管理和施工方法上尽量减少占用起重机, 提高起重机浇筑效率外, 对起重机而言, 仍占有相当比例。这些作业类型繁多, 作业量大, 不定因素更多更繁杂, 用计算机仿真难度较大, 但是对混凝土浇筑来说, 是仓面作业必不可少的一个环节。因此混凝土大坝浇筑计算机仿真系统中, 按照混凝土辅助作业、大型金属结构安装和灌浆工程三类对其进行简化处理。

混凝土坝浇筑辅助作业是指为满足混凝土浇筑需要的模板、钢筋、施工机具、冷却水管、灌浆管道、监测仪器、预埋件等吊装。这些作业一般只是控制混凝土浇筑的开仓时间, 在对应的浇筑仓开浇以后, 一般起重机的浇筑效率不是控制因素。这些作业按混凝土技术要求都应在混凝土浇筑开始时全部完成, 因此在混凝土施工仿真系统中不需要单独按一个活动来对待, 可以在混凝土浇筑开仓的控制条件(即边界条件)中加以简化处理, 浇筑仓机械考虑一定的辅助吊装时间。如

对于泄洪顶模立模，由于模板架立复杂，在仿真系统中设置立模作业时间，当作业时间超过一个浇筑仓的层间间歇要求时，用模板架立时间来代替该部位的混凝土层间间歇允许间歇期。

大型金属结构的吊装是指导流底孔、泄洪孔、压力管道、起闭机等大量金属结构的吊装作业。这些大型金属结构起重量大，占用大坝直线工期，但是数量一般是一定的。对于这些吊装工作，设定其吊装活动发生的部位，在仿真程序中按照施工逻辑关系加入其中。

灌浆工程主要指大坝接缝灌浆、固结灌浆。这些作业有一个共同的特点，那就是必须在大坝施工到一定形象要求下方可进行。如固结灌浆经技术改进后可采用无盖重灌浆，但其施工亦控制混凝土开浇时间。灌浆工程对大坝施工有的不控制大坝形象（如接缝灌浆），但其作业受施工形象直接控制，灌浆作业是枢纽施工进度计划的一个重要内容，有时还控制金属结构安装和大坝能否按期蓄水，因此，可作为一个施工控制条件加入仿真系统中，在工程输出中可以直接查询。

（四）日历时间与有效工作时间

实际施工时，大坝浇筑受到气象等各种随机因素的影响，而这些随机因素的发生在确定型模拟方法中难以准确给予确定，而且也不能随意加以确定。在随机性模拟模型中，如果能够获得这些随机因素的统计特征，则可以很好地反映这些因素对大坝浇筑地影响。但是随机模型一方面需要以大量的统计资料为基础，同时也需要对大坝浇筑过程进行大量次数的模拟，模拟次数与考虑随机因素的维数呈指数量级变化，因此，在缺乏随机因素资料的情况下，难以建立具有说服力的模型。另一方面，与确定型模拟方法相比，大量模拟得到结果统计后也不便于方案比较^[43]。

传统的方法（也是规范方法）是用月存在有效工作天数和每天有效工作小时数来刻画和反映影响大坝浇筑随机因素。以月有效工作时间来反映随机因素的影响，基于这一情况的模拟方法被称为确定型模拟方法。在确定型模拟方法中，目前有两类处理日历时间和有效时间转换的方法。其一是把有效时间即看作日历时间，这种方法每月天数仅有有效时间给定的天数，如月有效天数为 25d，则即对应日历的 1 号到 25 号。这种方法的缺点是模型中如果包含过水等控制性参数，则很难反映到模型中。另外一种方法即为俗称的“拉橡皮筋”方法，本模型即是采用的此方法。该方法有效时间与日历时间是以一定的比例相对应的，如有效工作时间若为 1 时，当前月份的有效工作天数为 28d，日历天数为 31，每天为 20.5h，则有效工作时间若为 1 时相当于 $(31 \times 24) / (28 \times 20.5) = 1.296h$ ，这种方法和上一方法的优缺点正好相反，但可能把有效时间折合到日历时间时出现看上去每天都在浇筑的情况，而实际上浇筑机械最多工作 25d，每天为 20.5h。

2.4 系统构成

混凝土拱坝浇筑施工仿真和仓面设计是在基于 C++ 高级程序设计语言的 Microsoft Visual Studio 软件开发平台开发而成, 开发采用 Windows 风格, 具有良好的通用性与交互性^{[44][45]}。可以在软件开发平台上进行系统总控、人机交互界面设置、主要模型的调整。系统的主界面如图 2-4。

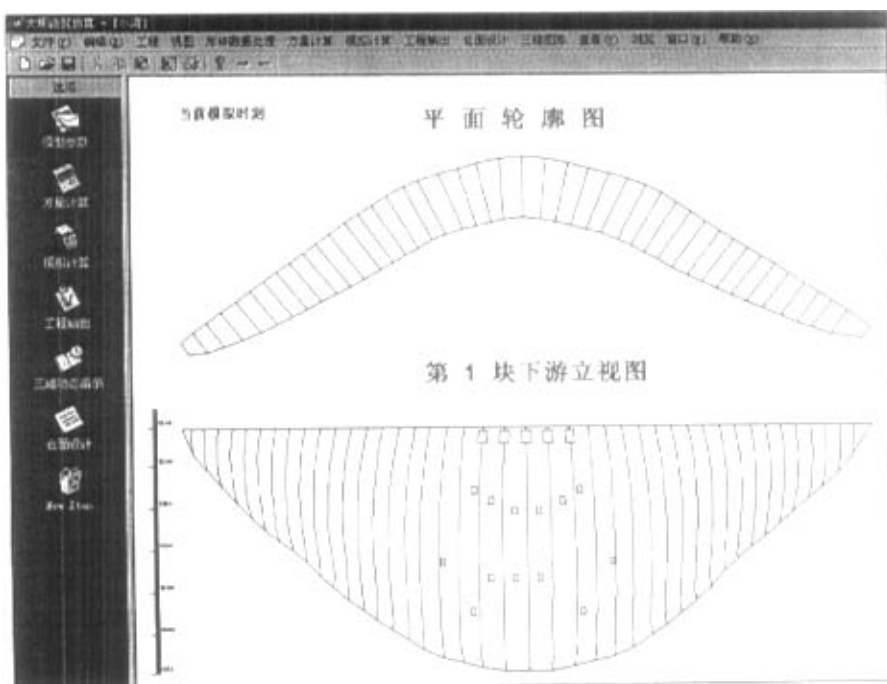


图 2-4 系统主界面

由上可以看出, 系统主要构成包括四个部分: 模型参数、模拟计算、工程输出及仓面设计。界面主要实现功能如下:

(1) 模型参数: 用于构建模拟模型以及运行所必须的参数进行编辑。此模块划分为拱坝形体参数部分、机械参数部分、施工控制参数、仓面设计参数四个主要部分。确认输入后, 点击形体数据处理菜单的分块计算对坝体进行分块, 可以得到任意高程区间任意坝段范围的浇筑块体积统计信息, 进行方量计算查询。

(2) 模拟计算: 此模块为系统的核心模块, 实现大坝浇筑过程的模拟计算及同步二维演示。用户输入模拟的开始时间和结束时间后, 系统后台运算大坝的浇筑过程, 前台用大坝平面轮廓示意图和下游立视示意图动态显示坝体浇筑上升情况。模拟计算可以实现分阶段模拟, 模拟结束时刻可以控制到某一天的某一时, 当对模拟结果不满意时可倒退一个或几个模拟时段和撤消所有模拟时段, 调整参

数后再次进行模拟计算。拱坝模型过程界面图 2-5。

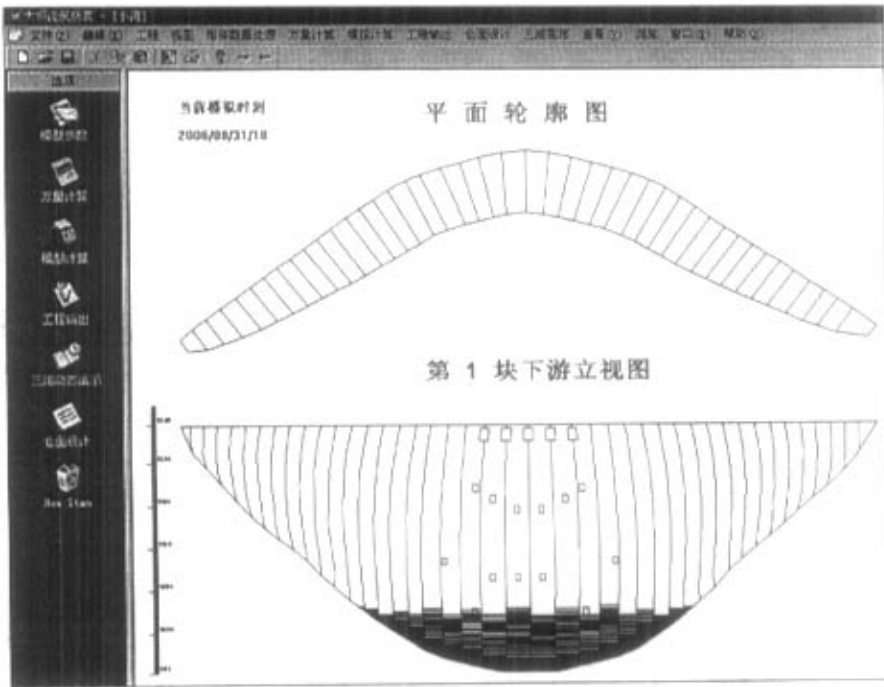


图 2-5 模型过程界面

(3) 工程输出：通过与施工计划差异分析和实际施工影响因素分析辨识，对施工过程实施有效的控制，可以用分阶段模拟思想来调整进度计划。用一系列图形、报表，以简捷直观的形式为工程管理人员提供施工强度、形象进度、机械利用信息等。点击工程输出菜单中的输出到 Excel，可以将数据导入到 Excel 表中，从而可以进一步对结果数据进行整理。

(4) 仓面设计模块：它包括仓面设计的数据管理，仓面信息的统计查询，仓面信息的实时分析及仓面主要信息的输出，在第三章将详细介绍。

第三章 混凝土坝浇筑仓面设计

3.1 仓面设计的定义

仓面施工组织设计（简称仓面设计），是对水工建筑物中最基本的单元工程——一个具体浇筑部位的整个浇筑过程，进行详细规划，以确保混凝土浇筑的各道工序正常、有序并按照质量技术要求进行施工。仓面设计是混凝土浇筑质量控制的重要环节和保证措施^[1]。在大坝混凝土浇筑施工仿真系统中考虑仓面设计是利用计算机对每一个仓面的浇筑情况进行分析，了解机械入仓及浇筑仓内工作的详细过程，同时可以对仓面施工信息进行实时查询、统计、分析。

3.2 仓面设计的原则和内容

3.2.1 仓面设计的原则

（1）应按照高效率的原则，根据混凝土生产系统、浇筑设备等实际信息建立入仓运行路线数学模型。

（2）典型仓面要做到标准化设计。不仅包括仓面的高程、面积等基本特性，对特征部位形体特征（孔洞，廊道）也应详细表示出来，并考虑它们对施工过程的具体影响。

（3）仓面配置资源应合理化，科学的配备设备和机具是加快混凝土浇筑速度，充分发挥资源效率的重要手段。

（4）仓面设计结果输出尽可能采取图表格式，力求简洁明了，方便实用。

（5）根据仓面特征进行多方案的考虑，提高施工方案和机械配套方案定量指标的精度^[3]。

3.2.2 仓面设计的主要内容

仓面设计要在认真分析仓面特征的基础上，结合现场施工条件，按照有关技术要求，结合资源配置，对混凝土浇筑过程详细规划。它包括以下内容：

（一）仓面特性

仓面特性是指浇筑部位的结构特征和浇筑特点。结构特征和浇筑特点包括：仓面高程、所属坝段、面积大小、预埋件及配筋情况；混凝土标号级配分区、升层高度、混凝土浇筑方量、入仓强度和预计浇筑历时。分析仓面特性，确定浇筑参数和浇筑设备入仓方式，避免浇筑块之间的施工干扰，提高论证施工机械配套

方案和施工控制性进度可行性的定量指标的精度。

对于某一个特定的大坝，形体特征，混凝土分区，埋件及配筋等特性所包含的数据一般是固定的，这样可以将每一个混凝土仓作为一个对象，将上述的特性内容作为浇筑仓的固定属性，在仿真之前可以确定下来，为后面的技术要求和浇筑方法的选择奠定基础。

（二）技术要求和浇筑方法

技术要求包括：温控要求、允许铺料间隔时间，浇筑块间歇时间要求及高差控制要求等。浇筑方法包括：铺料厚度、铺料方法、铺料顺序和平仓振捣施工方法。温控要求应明确混凝土入仓温度、浇筑温度、通水冷却时间等；根据混凝土标号、气温和温控要求确定允许铺料间隔时间根据仓面埋件、配筋情况和入仓强度确定铺料厚度；根据混凝土入仓手段，混凝土初凝时间等因素确定铺料方法。

（三）资源配置

资源配置包括设备、材料和人员配置。设备应包括混凝土入仓、平料、平仓振捣、温控保温措施和仓面保洁机具；材料包括防雨和保温材料；人员包括仓面指挥、仓面操作人员，相关工种值班人员和质量、安全监控人员。资源配置根据仓面特性、技术要求和周边条件进行配置，主要是平仓振捣设备配置。

3.3 仓面设计的步骤

在混凝土浇筑实际施工过程中，仓面设计的过程应包括分析仓面特性、明确质量技术要求，选择施工方法、进行合理的资源配置和确定质量保证措施。在混凝土大坝浇筑施工仿真系统中，利用计算机辅助进行混凝土浇筑仓面施工管理，为设计、施工提供对大坝浇筑施工阶段实施有效的管理与控制。它按照以下施工控制过程对仓面设计系统进行设计。

（一）分析仓面特性

在混凝土大坝浇筑施工仿真系统，仓面特性的分析主要包括混凝土品种及布筋情况、仓面面积、仓面结构体形、分层高度和浇筑设备。

大坝作为复杂的实体，其施工过程受诸多内外因素的影响，如气候、机械、施工工艺及混凝土性能等。由于大坝体形很大，根据大坝的体形、结构要求及施工条件等在施工过程中要对坝体进行分缝、分块。水工大体积混凝土浇筑层厚的确定，主要是与温度控制因素有关，在温控要求允许的范围内，可结合模板型式、立模方式、混凝土入仓能力等做适当调整。一般来说，采用较厚的浇筑层比较经济，多分层会增加缝面处理的工作量，造成混凝土损耗，增加模板工作量、增加钢筋接头和钢筋损耗。因此，在温控允许的情况下，应尽量提高混凝土浇筑层厚。一般情况下，对于基础约束区范围内的部位，冬季浇筑层厚 2~3m，夏季不超过

1.5~2m, 脱离基础约束区的部位可相应放宽。在系统设计中, 可根据不同的工程情况来设计浇筑层厚。

当层厚确定以后, 仓面的面积、体积等特性也确定下来。另外根据仓面所处高程、坝段范围也可以获取混凝土分区和钢筋布置情况。以上仓面特性确定以后, 就可以根据仓面特性来选择浇筑设备采用适当的浇筑方法。

(二) 选择浇筑方法进行仓面混凝土浇筑施工控制

采取适用的浇筑方法, 可以加快仓面周转次数, 保证混凝土施工质量, 最终加快施工进度, 因而有必要对浇筑方法进行详细的分析和研究, 选择合适的浇筑方法与施工手段相匹配, 充分发挥浇筑方法的优势。

混凝土浇筑铺料方法一般有平铺法、台阶法。优先采用平铺法, 但在仓面面积较大, 仓面结构复杂, 混凝土温控要求较严, 无法采用平铺法的情况下, 可采用台阶法。采用台阶法浇筑时, 铺料层数不宜过多, 一般为三层, 铺料宽度在满足允许铺料间隔时间的前提下, 尽量采用宽台阶, 做到台阶分明。

建立仓面施工的数学模型。将仓面看作一个系统, 混凝土浇筑应按一定的厚度、次序、方向分层进行。建立混凝土浇筑模型, 通过一个关系式表达如下: $S=(E, R)$ 。

其中 E 为构成该系统的元素集, R 为 E 上确定各元素间关系的关系集, E 的元素集包括入仓铺料、铺料厚度、浇筑块的仓面尺寸 (宽度、长度), 混凝土运输时间、浇筑能力、气温等。混凝土浇筑应持续进行, 为保证浇筑层间不出现冷缝, 应正确对待和处理各元素间的关系^[34]。

层间间歇时间超过混凝土初凝时间, 会出现冷缝, 使层的抗渗、抗剪和抗拉能力明显降低, 如气温一定, 仓面尺寸和浇筑铺料厚度应与混凝土运输浇筑能力相适应。换言之, 当允许层间间歇时间 t (h) 已定后, 为不出现冷缝, 浇筑系统内各部分元素之间关系可满足以下条件:

$$k * p(t - t_1) \geq B * L * h \quad (3-1)$$

式中: k : 混凝土运输延误系数。

p : 浇筑仓要求的混凝土运输能力

t_1 : 混凝土从机口到入仓的时间

B 、 L : 浇筑块的宽度和长度, 单位: 米。

H : 铺料层厚度, 单位: 米。

显然, 分块尺寸和铺料厚度受混凝土浇筑能力的限制, 若分块尺寸已定, 要使层间不出现冷缝, 应采取措施增大浇筑能力; 若浇筑设备浇筑能力有限, 为保证混凝土浇筑质量, 这时应选择适当的浇筑方法。混凝土浇筑, 应按一定的厚度、次序、方向分层进行。混凝土浇筑方法如下:

(1) 平铺法浇筑

混凝土入仓铺料时，混凝土水平层连续逐层铺填，第一层浇完后，再浇第二层，依此类推直至达到设计高程。平铺法浇筑要求下层混凝土初凝之前应覆盖上一层混凝土，否则将出现冷缝^{[1][2]}。

平铺法的特点及范围：

1) 入仓强度要求较高，尤其在夏季高温季节施工时，为不超过混凝土允许间歇时间（3.5h~4h）必须加快混凝土入仓速度。

2) 铺料接头明显，混凝土便于振捣，不易漏振。

3) 平铺法能较好地保持老混凝土的清洁，保证新老混凝土结合的质量。

4) 混凝土入仓能力要与浇筑仓面大小相适应。

5) 可以较好的采用平仓振捣机械，有利于保证质量。

6) 适用于钢筋少或无钢筋、级配、标号比较少的仓面。

由平铺法的以上特点我们可以看出当浇筑设备浇筑能力满足入仓强度、浇筑仓面为素混凝土仓或少筋混凝土仓时，平铺法能较好的满足浇筑要求。在系统设计过程中，可以根据工程施工方法要求，适当的选择浇筑方法。

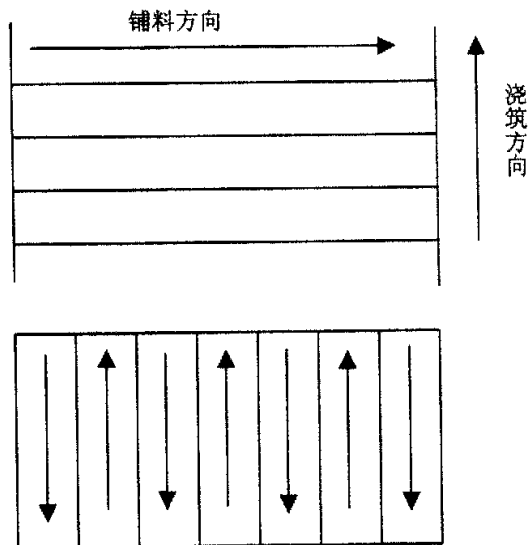


图 3-1 平铺法示意图

(2) 台阶法

混凝土入仓铺料时,从仓面短边一端向另一端铺料,边前进、边加高,逐层向前推进,并形成明显的台阶,直至把整个仓面浇到收仓高程。

台阶法的特点及范围:

1) 不受仓面大小限制,每坯混凝土覆盖面积较小,平仓振捣后的混凝土可在较短时间内覆盖,有利于满足铺料间歇时间的要求。

2) 当仓面内混凝土标号、级配较多时,台阶法施工组织复杂。

由此看出,台阶法虽然在浇筑能力无法提高的情况下,混凝土施工能使层间结合不出现冷缝,但是若入仓能力高,由于平铺法具有分层清楚不易漏振、提高机械设备生产率和保证层间结合质量的特点,应优先考虑。在混凝土坝浇筑系统混凝土入仓边界条件设置时充分考虑到了以上条件。

(三) 入仓设备规划

从以上可以分析出,当一台浇筑机械无法满足浇筑块所需的浇筑能力时,就需要考虑其他浇筑机械能否联合浇筑。浇筑机械之间是否联合取决于浇筑对象——浇筑块行为状态变化需要的浇筑机械能力,具体来说,浇筑机械配合与否一方面要看当前确定的浇筑机械的浇筑能力是否能够满足浇筑块层间结合不出现冷缝的要求。另一方面,要看所有可以浇筑该块的机械能否联合浇筑该块。

当确定采用两台或者两台以上的设备浇筑同一个仓面时,应确定各台设备的浇筑范围和顺序,以达到铺料顺序的要求。必要时对浇筑设备的运行方式做出限定,防止设备在浇筑时空间干扰,影响设备的安全运行和效率发挥,从而对整个大坝的浇筑进程产生影响。

(四) 资源配置

资源配置要合理配套,针对不同部位,选用不同的设备组合,以充分发挥机械设备的效率。人员配置要分工明确,各个环节要有专人负责,材料配置要品种齐全、数量充足、符合技术要求。对于大体积少混凝土仓面,尽量采用平仓振捣机等大型设备,对于结构复杂,混凝土标号,级配品种较多的仓面,宜采用手持振捣器等易于控制的设备。

科学地配备仓面资源是加快混凝土浇筑速度,确定混凝土浇筑质量、控制混凝土浇筑效率的重要手段。三峡二期工程在仓内浇筑、平仓、振捣等方面均采用了机械化作业,仓内配置了专门的平仓振捣设备,其浇筑设备主要以塔带机为主,胎带机、门塔机为辅。振捣机按照振捣棒数有4个振捣棒、5个振捣棒和8个振捣棒。

根据三峡工程经验,8个振捣棒的设计产量 $240\text{m}^3/\text{h}$,实际 $120\text{m}^3/\text{h}$ 左右;5个振捣棒的设计产量 $180\text{m}^3/\text{h}$,实际 $80\text{m}^3/\text{h}$ 左右;4个振捣棒的设计产量 $120\text{m}^3/\text{h}$,

实际 $60 \text{ m}^3/\text{h}$ 左右^[3]。在混凝土拱坝浇筑过程中，由于地形地质条件的限制，缆机往往作为浇筑的主要设备，如二滩、小湾和溪洛渡水电站，根据国内缆机浇筑混凝土经验，缆机浇筑混凝土一般每小时 $8\sim 12$ 罐，若按 9 m^3 考虑，生产率在 $72\sim 108 \text{ m}^3/\text{h}$ 左右。三峡二期典型仓面资源配置参考表 3-1，我们根据三峡二期典型仓面资源配置同时也设定了混凝土拱坝缆机及门塔机浇筑仓面设备资源配置标准，见表 3-2：

表 3-1 三峡二期工程泄洪坝段典型仓面浇筑设备及人员配备表

序号	仓面类型	入仓手段	浇筑设备		人员			
			振捣机+手持振捣器	仓内	振捣机	浇筑工	辅助浇筑工	合计
1	素混凝土仓	塔带机	1台8头+4个 $\phi 100$	1	1	6	2	10
			1台5头+6个 $\phi 100$	1	1	4	2	8
		门塔机	1台4头+4个 $\phi 100$	1	1	4	2	8
			0+6个 $\phi 100$	1	0	6	2	9
2	少筋混凝土仓	塔带机	1台8头+4个 $\phi 100$	1	1	6	2	10
			1台5头+4个 $\phi 100$	1	1	8	2	12
		门塔机	1台4头+3个 $\phi 100$	1	1	4	2	8
			0+5个 $\phi 100$	1	0	7	2	10
3	多筋混凝土仓	塔带机	1台8头+4个 $\phi 80$	1	1	8	3	13
			1台5头+5个 $\phi 80$	1	1	10	3	15
		门塔机	1台4头+4个 $\phi 80$	1	1	6	3	11
			0+6个 $\phi 80$	1	0	9	2	12
4	水平钢筋混凝土仓	塔带机	0+6个 $\phi 80$	1	0	12	3	16
		门塔机	0+5个 $\phi 80$	1	0	10	2	13
5	过流面混凝土仓	塔带机	1台5头+4个 $\phi 100$ +2个 $\phi 80$ (50)	1	1	9	3	14
			0+6个 $\phi 100$ +2个 $\phi 80$ (50)	1	0	10	4	15
		门塔机	1台5头+3个 $\phi 100$ +2个 $\phi 80$ (50)	1	1	7	2	11
			0+5个 $\phi 100$ +2个 $\phi 80$ (50)	1	0	9	2	12

表 3-2 典型仓面浇筑设备配置准则

序号	仓面类型	浇筑部位	入仓手段	浇筑设备配置 (以每台入仓设备计)
				振捣机+手持振捣器
1	素混凝土仓	无孔洞、钢筋	缆机	1台4头+5个 $\Phi 100$
			门塔机	5个 $\Phi 100$
2	少筋混凝土仓	孔洞侧面钢筋, 防震 钢筋	缆机	1台4头+6个 $\Phi 100$
			门塔机	6个 $\Phi 100$
3	多筋混凝土仓	进水口等	缆机	1台4头+5个 $\Phi 100$ +2 $\Phi 80$
			门塔机	6个 $\Phi 100$ +2 $\Phi 80$
4	水平筋混凝土仓	孔洞、廊道底板处	缆机	5个 $\Phi 100$ +2个 $\Phi 130$ + 2 $\Phi 80$
			门塔机	5个 $\Phi 100$ +2 $\Phi 80$

3.4 仓面设计系统

从以上混凝土浇筑仓面设计内容及步骤可以看出来,混凝土浇筑过程不仅仅包含混凝土入仓工艺,还包括仓面上模板架立、钢筋铺设、仓面振捣、清理等各种工艺,这些工艺也需要一定的人力、设备和各种资源。因此,对仓面设计系统的实现工作可分为两部分:其一为浇筑前的准备工作,如立模板,钢筋及大件吊装等,即备仓工作;其二为仓面浇筑工作,包括浇筑设备入仓方式、平仓振捣等。由以上混凝土施工工艺建立了大坝混凝土浇筑仓面设计系统。由于大坝自身内部结构不同,各仓面的型式、备仓工作内容和混凝土浇筑方式是不同的。系统的设计采取了模块化的设计思想,它包括以下内容:

(一) 仓面设计数据管理模块

为使仿真的计算数据简洁明了,对某一特定的大坝形体和机械数据一般建立原始的大坝形体数据和机械数据系统,从而将工程中一些比较固定的数据如大坝结构、分缝分块方案等固定在程序里,作为仿真的前提和基础。仿真的大坝形体的原始数据产生与其分缝分块有关,在此基础上增加特殊数据模块,如导流底孔、泄洪深孔、灌浆廊道等特殊孔洞的几何尺寸、空间位置等方面的数据、混凝土分区区间、混凝土等级、分区的空间范围等数据,这样就可以得到各仓面的所有形

体信息。

(二) 统计查询模块

在所有仿真数据建立以后,根据仓面基本信息结合施工控制条件等进行浇筑模拟,在生成浇筑块时以记录每一个浇筑块的仓面数据记录数组。数组中记录了每一个浇筑块的属性,包括:坝段号、仓号、高程、空间坐标、仓面面积、浇筑块的混凝土方量、混凝土区号等。仓面设计系统利用已经生产的仓面数据和记录的仓面浇筑过程的信息,根据需要的信息进行统计查询。例如每一个仓面的浇筑机械、入仓强度、仓面资源配置等。

(三) 仓面实时分析模块

在模拟过程中随时收集相关信息,将模拟情况与施工计划要求进行比较,进行差异分析,了解各种因素对于仓面浇筑的影响,为仿真过程的顺利进行提供正确的决策这是仓面实时分析的重要作用。按照统计查询出来的信息,我们可以得出任意时间范围内的浇筑块的仓面特征,这样可以对每一个仓面的浇筑情况进行分析,为判断浇筑过程的合理性提供依据。

(四) 仓面结果输出模块

仓面结果输出主要是图表的输出。表格的输出采用与数据库连接的方式,数据可以直接写入数据库中。图的输出实现了 Visual C++与 AutoCAD 之间建立数据通道,图可以直接输出到 AutoCAD 可以在 AutoCAD 软件中更方便的进行图形编辑和查询。这样,不但大大提供了仓面图编制的效率,而且可以更加方便地修改、定制适合要求的仓面信息。另外,由于仓面设计的成果是采用规范化的模块设计,当结果提供给设计、施工或者业主等不同的单位时,可以根据他们的要求,输出所需要的详细信息。

仓面设计系统在混凝土拱坝浇筑仿真系统研究中是整个仿真进程的核心部分,根据仓面特性,应用多种施工分析方法建立模拟模型,用于确定出影响施工的因素和分析各因素对施工的影响程度,区分可控的决策因素和不可控制的环境因素,以利于对施工过程实施更加有效的控制。通过对仓面结果分析,对实际施工与施工计划进行对比,帮助找出导致差异的原因,为将来施工计划的调整与修改提供帮助。我们可以根据仓面分析的内容,根据施工过程中资源、设备等条件的变化,调整模拟模型、模型参数、模拟规则,更加真实地反映混凝土坝施工的复杂过程。仓面设计分析图见图 3-2。

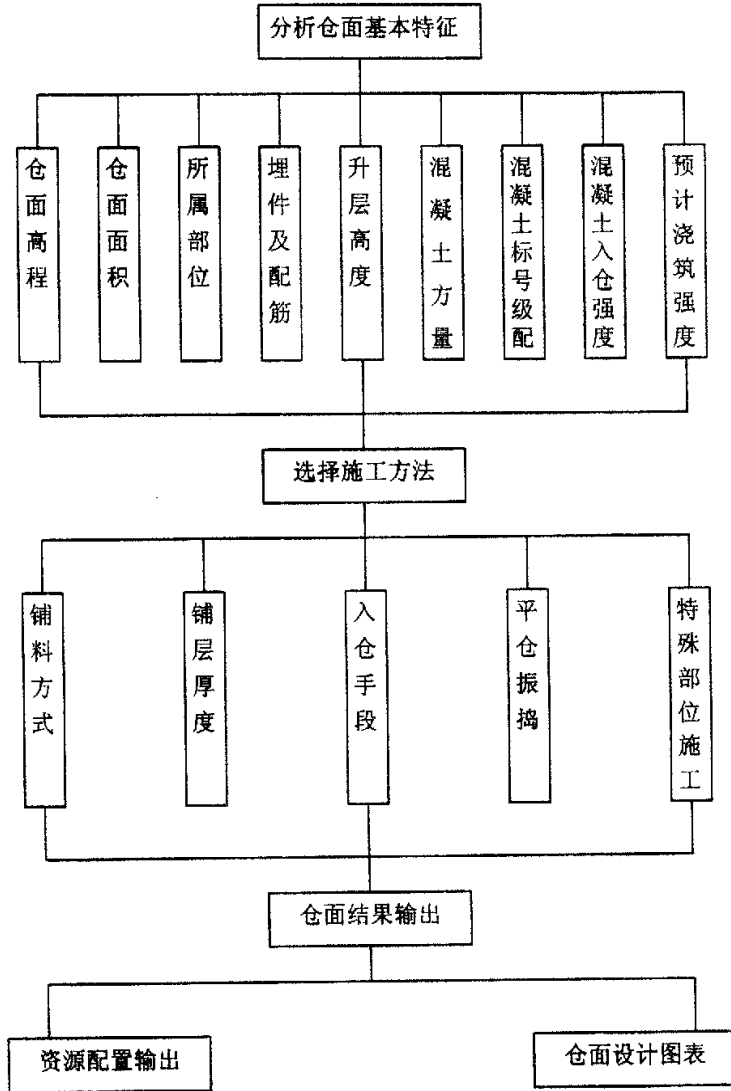


图 3-2 仓面设计分析图

第四章 数据组织及输出实现

4.1 数据组织结构

随着计算机技术的进步，混凝土坝浇筑的施工水平，浇筑规模也飞速发展；同时，由于大坝浇筑的实施是一个动态变化的过程，这就使得在浇筑过程中需要表达的信息和要素呈不断增长的趋势。这一切仅仅以简单的数据表示已不能满足现在施工发展的需要。基于此，混凝土拱坝浇筑施工仿真系统借助强大的图形表达软件 AutoCAD、文档和数据库的接口程序，不仅使得基本数据存储于文档中，模拟过程信息、坝体浇筑实时信息存储在数据库中，而且计算结果可以方便的输出到指定的 Excel 表格中，绘制的图形直接无缝的导入到 AutoCAD 中，不但大大提供了仓面图编制的效率，而且可以更加方便地修改、定制适合要求的仓面信息。这样便于数据的集中管理和规范化输出。下面逐个介绍系统所采用的输出形式，以及它们所包含的内容。数据结构见下图：

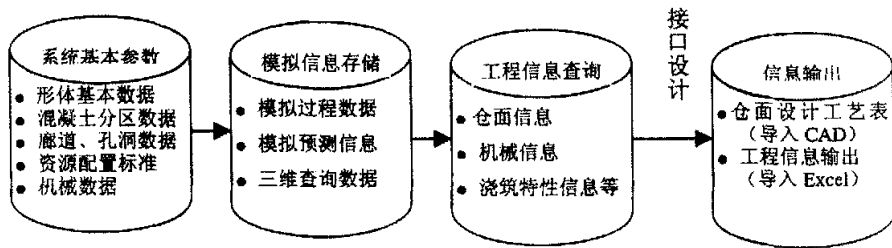


图 4-1 系统数据组织结构图

4.2 界面数据组织

对大坝浇筑系统进行模拟，需要大量的数据信息，混凝土拱坝浇筑施工仿真系统采用了两种方式进行数据的管理，一种是在软件对话框界面直接对数据进行编辑，例如插入、修改及删除等；另一种是针对数据量大，为数据管理方便设置，它采用文档、数据库与系统进行接口设计，将数据保存在文档中，然后通过接口程序将数据读入。这种方式既可以在文档中编辑数据保存后重新覆盖数据，也可以在系统软件界面中直接编辑数据。下面对首先对第一种界面组织数据的方式进行介绍。

目前，计算机用户对用户界面的要求越来越高，良好的用户界面是评估软件

成功与否的重要条件之一。计算机应用程序与用户之间的良好界面，对于用户方便地使用程序，最大程度地发挥程序的效率是非常重要的。采用对话框界面设计组织数据的方式是为了对模拟计算过程中需要的各种计算参数进行直观、有效的管理。它不仅形象直观，能有效的帮助检查各种参数的正确性和合理性，而且在发现错误后修改方便。

在系统设计中，主要是对机械参数，施工控制参数等数据采用了界面直接输入的方式，通过实践证明，这种数据组织方式简单、实用，易于掌握，图 4-2 表示门塔机参数输入对话框。

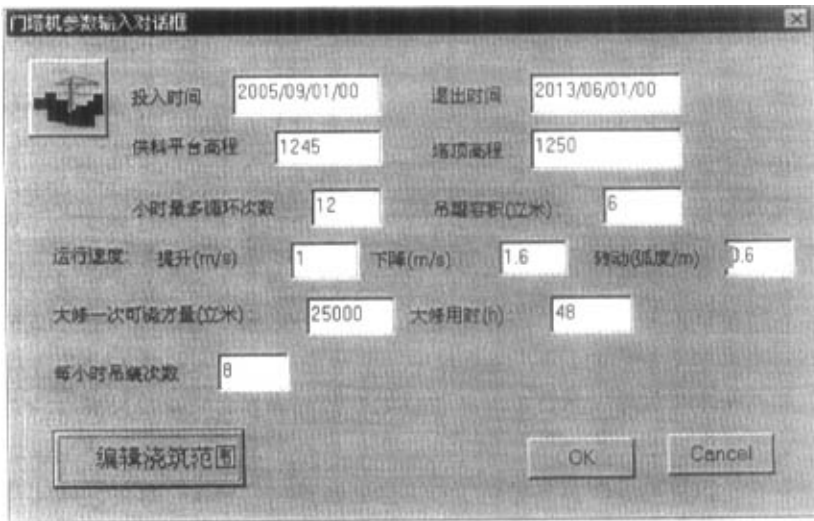


图 4-2 门塔机数据输入界面设计

4.3 数据库接口实现

4.3.1 Visual C++开发数据库技术的特点^{[46][47]}

目前用于数据库开发的前端工具的开发环境有 Delphi、Visual FoxPro、Visual Basic、PowerBuilder 以及即 SQL Server 等。随着 Visual C++的数据库开发功能的不断增强，它作为一种方便易用的前端开发工具在实际开发中被广泛使用。它的优势集中体现在以下几个方面：

(1) 简化的开发过程：Visual C++中提供了 MFC 类库、ATL 模板类以及 AppWizard、ClassWizard 等一系列的 Wizard 工具用于帮助用户快速的建立自己的应用程序，大大简化了应用程序的设计。使用这些技术，可以使开发者编写很

少的代码或不需编写代码就可以开发一个数据库应用程序。

(2) 灵活多变的开发方式: Visual C++提供的开发环境可以使开发者根据自己的需要设计应用程序的界面和功能,而且, Visual C++提供了丰富的类库和方法,可以使开发者根据自己的应用特点进行选择。

(3) 更快捷的数据库访问:为了解决 ODBC 开发的数据库应用程序访问数据库的速度慢的问题, Visual C++提供了新的访问技术——OLE DB 和 ADO, OLE DB 和 ADO 都是基于 COM 接口的技术,使用这种技术可以直接对数据库的驱动程序进行访问,这大大提供了访问速度。

(4) 更强的扩展性: Visual C++提供了 OLE 技术和 ActiveX 技术,这种技术可以增强应用程序的能力。使用 OLE 技术和 ActiveX 技术可以使开发者利用 Visual C++中提供的各种组件、控件以及第三方开发者提供的组件来创建自己的程序,从而实现应用程序的组件化。使用这种技术可以使应用程序具有良好的可扩展性。

4.3.2 数据库接口设计

要准确的进行模拟基本参数的管理、反映出大坝浇筑整体进程的详细信息与每一个仓面的在整个的浇筑过程中的具体情况,计算机仿真与数据库的连接显得十分重要。数据库不仅实现基本参数的管理功能,另外它的存储功能将模拟进程中柱块以及浇筑设备等的各种信息详细记录下来,以实现任意时间、任意高程以及任意浇筑范围的柱块以及浇筑设备等属性查询。

本系统采用文档和数据库相结合,共同完成数据的存储和管理,文档是基于 Microsoft Visual Studio 所开发的应用程序特有的数据存储管理的一种文件格式。本系统中大部分数据采用了基于 MFC (Microsoft 基本类库)提供的模板,以链表的形式组织存储。这样做的优点是系统所处理的对象数量仅受计算机内存量的影响。为维护使用提供了最大程度的通用。为使系统运行更加高效,系统中模拟计算所需要的基础数据(项目模型参数)存储在文档中;而模拟过程信息、坝体浇筑实时信息这部分数据量大,将其存储在数据库中,这样能体现数据库的优越性,同时也方便数据的查询。

4.4 仓面设计图与 AutoCAD 输出接口实现

4.4.1 仓面设计工艺图模板

在三峡工程中,在每一个仓面开仓之前,都对每一个混凝土浇筑仓进行工艺

设计。它将每一个仓面进行标准化设计,采用模块化设计的方法,建立了通用的混凝土仓号浇筑工艺表。在开仓之前,表中所需填写的仓号位置,混凝土特性,来料顺序,入仓机械,资源配置等详细的仓面信息是否到位,由监理单位审核后才能开仓。

从三峡工程的实践表明,实行这样的标准化工艺设计是非常有效的,它能够实时的采集混凝土仓面的详细信息,能够实现仓面所需资源的准确到位,能够为混凝土生产运输作业的优化调度提供良好依据。这样,能辅助混凝土浇筑,保证了混凝土浇筑的质量,提高生产效率和施工现代化管理水平。

在混凝土拱坝浇筑施工仿真系统中,为了使仓面设计的成果为设计、施工及业主单位提供信息,有必要采取一种合适的方式来直观表示。在设计阶段,可以为设计人员合理定制施工控制性进度提供决策;在施工阶段,可以为不能时刻在施工现场的施工调度人员采集施工现场信息提供依据。在仔细研究了三峡工程仓面设计工艺表的基础上,在系统中将仓面设计工艺表首先设计成标准化的表格,与 AutoCAD 实行无缝连接,每一个仓面的信息都可以根据高程或者浇筑时间查询出来,然后输出到 AutoCAD 中。

4.4.2 AutoCAD 接口实现

DWG 文件是 AutoDesk 公司出品的 AutoCAD 系列绘图软件的图形数据文件,是一种加密格式的矢量图形文件。在专业 CAD 软件开发中,往往选用高级语言(如 VC、VB 等)作为主要开发平台,并且为了降低软件的总体成本,要自行开发独立版权的图形支撑系统。这样,就需要着重考虑如何实现 CAD 图形数据的双向交换问题。通常选择与 AutoCAD 进行图形数据交换,实现无缝连接。这样既可充分享用 AutoCAD 强大的图形管理功能,又不妨碍按照自主的方式独立地组织图形数据^{[48][49]}。

下面简单介绍几种可靠读写 DWG 图形文件的方法^{[50][51]}:

(1)通过 AutoDesk 公司提供的 ObjectARX / ADS、VBA 或 VisualLisp 在 AutoCAD 内部操作 DWG 文件。这种方法极为可靠,但是开发难度大、程序调试复杂。在高版本的开发中,由于地址共享及代码编写不当,还可能造成 AutoCAD 系统崩溃。

(2)直接读写二进制加密格式的 DWG 文件。AutoCAD 系列产品版本不断升级,图形数据结构也随之变化。自行编写读写代码,必须分析各版本图形文件结构,针对不同版本编写读写代码,工作量很大,短期内无法实现;购买第三方应用程序接口软件(如 OpenDWG 和 DrDWG 等),其功能很强、性能可靠,但是短期内很难熟练使用,并且需要较大的资金投入。

(3)通过 AutoCAD 软件与 ActiveX 自动化接口实现。程序员只需熟悉 VC 编程、了解 DWG 文件基本知识,很快就能开展工作。这种方法开发周期短,开发费用低,对程序员的知识储备要求低,是经济实用的开发手段。但缺点是运行速度慢,运行时必须安装有 AutoCAD 的相应产品。

在混凝土拱坝浇筑施工仿真系统研究开发中,原系统是在基于 C++高级程序设计语言的 Microsoft Visual Studio 软件开发平台开发而成。那么采用上面所说的第(3)种方法是相对比较适用的,下面来详细介绍第(3)种方法在仓面设计系统中的编程方法和具体实现。

在 AutoCAD R2000 中提供了 100 多个对象的自动化接口,通过这些接口函数,几乎可以完成它的所有功能。同时在 AutoCAD 系列软件中采用了类型库,库中包含了编写 C++接口类的全部信息。Visual C/C++的开发环境可自动读入这些信息,并能自动生成各个对象所对应的 C++接口类,使程序代码工作量大大简化。在编写控制 AutoCAD 的应用软件时,经常用到的接口类见表 4-1。

表 4-1 ActiveX 自动化接口类说明

自动化接口类	主要功能简介
CAcadApplication	应用程序(代表 AutoCAD 应用本身)
CAcadDocument	矢量图形文档(DWG 文件)
CAcadDocuments	矢量图形档群(R2000 以上版本)
CAcadModelSpace	模型空间对象
CAcadPaperSpace	图纸空间对象
CAcadLayer	单个图层对象
CacadLayers	所有图层
CAcadText	文本对象
CAcadTextStyle	字体类型对象

混凝土拱坝浇筑施工仿真系统是 Visual C++的开发环境中实现的,在开发环境中,通过 CAcadApplication 接口类实现与 AutoCAD 的应用软件的无缝连接。可以将整个仓面设计工艺表设置成模型空间,同时设置图形空间的大小。在仓面设计工艺表中,所表达的仓面信息很多,我们可以用图层功能进行管理,例如仓面资源设定一个资源管理图层,仓面平面图设定仓面轮廓图层等。每一个图层还可以设定不同的字体和颜色,这样当仓面信息输出到 AutoCAD 中时,可以对仓面所需要表达的不同信息实行分别管理,设计单位也可以直接采用此模板,另外当对所需要的仓面信息进行修改时,具有针对性。

由上可见,在系统中与 AutoCAD 进行图形数据交换,实现无缝连接,规范化仓面信息输出,是一种直观有效的方式。仓面工艺设计表设计见图 4-2。

混凝土仓号浇筑工艺设计表

施工部位	仓号高程 (m)	浇筑面积 (m ²)	浇筑层厚 (m)	浇筑方量 (m ³)	制表日期	制表单位
混凝土特性	分区	混凝土标号			塌落度 (cm) 数量 (m) 拌和楼	
	A区					
	B区					
开仓时间	收仓时间	浇筑历时	入仓强度			
入仓机械						
仓面设备设施						
仓面人员	振捣工	钢筋工	模板工	预埋工	辅助工	仓面负责人
	特殊部位浇筑责任人					
浇筑方法	平铺法		台阶法			
	厚度	台阶宽度	层厚	层次		
施工单位	质检员	仓面责任人	监理单位	签证	旁站	

仓面示意图:

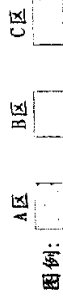


图 4-2 混凝土仓号浇筑工艺设计表

第五章 工程实例

5.1 工程概况

小湾水电站大坝为混凝土拱坝，坝顶高程 1245.0m，最大坝高 292m，小湾拱坝顶弧长 901.771m，从右岸至左岸划分为 43 个坝段，其中非溢流坝段长一般为 20m，溢流坝段受孔洞限制，横缝间距在 18.08m~26.34m 之间，横缝间距未超过纵缝间距（即坝体厚度），横缝间距对坝体温度应力的计算不起控制作用。坝体设永久泄洪中孔 6 个，进口底板高程分别为 1140m、1152.5m 及 1165m，矩形断面，出口孔口尺寸为 6m×6.5m；永久放空底孔 2 个，进口底板高程为 1080m，矩形断面，出口孔口尺寸为 5m×7m。坝身导流底、中孔分别为 2 个和 3 个，进口底板高程分别为 1020m 和 1060m，矩形断面，出口孔口尺寸均为 6m×7m。

系统配置四座 4×3.0m³混凝土搅拌楼。小湾大坝用于混凝土浇筑的设备为五台 30t 进口中高速缆机，配 9m³不脱钩吊罐，分两层布置，上层布置两台，下层布置三台。另外在左岸 1#至 6#坝段设置两台 MQ2000 门塔机辅助浇筑。根据导流度汛和水库蓄水要求，自开始浇筑大坝混凝土至工程完建，大坝混凝土浇筑及接缝灌浆高程见表 5-1。

表 5-1 坝体混凝土浇筑及接缝灌浆高程表

时 间 (年、月)	浇筑高程 (M)	接缝灌浆 高程 (M)	备 注
2005 年 9 月 1 日	953	953	大坝混凝土开始浇筑
2006 年 5 月 31 日	1001	953	
2007 年 5 月 31 日	1065	1045	
2008 年 5 月 31 日	1110	1080	
2009 年 5 月 31 日	1165	1147	
2009 年 10 月 31 日	1185	1169	
2009 年 12 月 31 日	1196	1176	第 1 台机组发电
2010 年 5 月 31 日	1225	1194	
2010 年 6 月 30 日	1228	1197	
2010 年 12 月 31 日	1245	1217	大坝浇筑结束
2011 年 5 月 31 日	1245	1245	接缝灌浆结束

5.2 仿真边界条件

根据施工组织设计确定的大坝浇筑施工方案、浇筑控制性进度等，确定仿真边界条件后进行模拟计算。同时，结合仓面设计，分析影响对大坝浇筑进程的因素，论证小湾工程施工进度计划的可行性。模拟参数确定如下：

5.2.1 模拟基本参数

(一) 大坝形体数据

小湾水电站大坝为混凝土拱坝，坝顶高程 1245.0m，最大坝高 292m，整个大坝分为 43 个坝段进行施工。大坝总体方量约为 $840 \times 10^4 \text{m}^3$ ，小湾大坝形体参数界面见图 5-1。

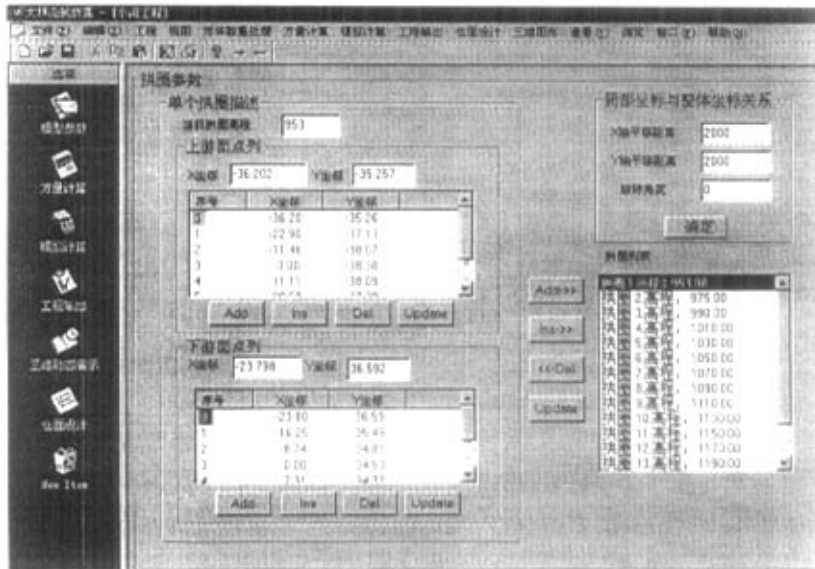


图 5-1 大坝形体参数

(二) 混凝土浇筑期年内各月的有效施工天数

降雨和气温条件对混凝土浇筑均有较大影响，按照资料提供的小湾工程的气象情况，本研究浇筑期年内各月的有效施工天数如下表。日有效工作小时 20.5h。

表 5-2 各月有效工作天数表

月份	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	全年
天数	29	23	28	29	27	24	24	24	25	27	29	30	319

(三) 间歇期及浇筑层厚

间歇期按照强约束区取 5d, 弱约束区取 7d, 脱离约束区取 7d。强约束区浇筑层厚取 1m, 弱约束区浇筑层厚取 1.5m, 脱离约束区取 3m, 若采用台阶法浇筑, 浇筑层厚为 2m, 浇筑铺层厚度 0.5m。强约束区系数 0.2, 弱约束区系数 0.4。各月份混凝土初凝时间均为 4h, 拆模时间 3d。当上层混凝土浇筑间歇时间超过 14d 即认为是老混凝土。

5. 2. 2 施工控制

(一) 特殊部位施工控制参数

满足特定施工工艺要求, 仿真对施工工艺较为复杂的部位, 如导流底孔、泄洪深孔、表孔通过设定间歇及停工时间方式进行模拟, 详细参数设置见下表。

表 5-3 孔洞、缺口等特殊部位施工控制参数

项目	坝段	高程	层厚与间歇期	施工控制
导流底孔	20#~21#坝段	1020	层厚 1.5m	导流底孔底板停 60d 导流底孔顶板停 15d
	24#~25#坝段		间歇 7d	
导流中孔	21#~22#坝段	1060	层厚 1.5m	导流中孔底板停 60d 导流中孔顶板停 15d
	22#~23#坝段		间歇 7d	
	23#~24#坝段			
底孔	19#~19#坝段	1080	层厚 1.5m	底孔底板停 60d 底孔顶板停 15d
	26#~26#坝段		间歇 7d	
泄洪中孔	20#~20#坝段	1165	层厚 1.5m 间歇 7d	泄洪中孔底板停 60d 泄洪中孔顶板停 30d
	21#~21#坝段	1152.5		
	22#~22#坝段	1140		
	23#~23#坝段	1140		
	24#~24#坝段	1152.5		
	25#~25#坝段	1165		
表孔	20#~21#坝段	1215	层厚 1.5m 间歇 7d	表孔底板停 90d
	21#~22#坝段			
	22#~23#坝段			
	23#~24#坝段			
	24#~25#坝段			
抗震钢筋		六层布置	层厚 3.0m 间歇 15d	

(二) 基础处理

完工时间（开浇时间）按照进度要求：1#~3#坝段为2007年6月1日；4#~43# 2005年9月1日。

1#~3#坝段于2007年6月1日开始浇筑，以便形成门塔机平台，安装门塔机浇筑4#~6#号坝段。

(三) 高差控制

相邻坝段间最大高差取12米，至少高差取4米。浇筑面貌采用偶数坝段优先上升地原则。整个大坝最高和最低块高差小于30m。

(四) 老混凝土

当混凝土浇筑间歇时间超过14d即认为形成老混凝土，当混凝土浇筑间歇时间超过10d预警会出现老混凝土，使该仓优先浇筑，但是不允许出现反高差。

5. 2. 3 机械参数

在本工程中，缆机是混凝土入仓垂直运输的主要手段，混凝土浇筑设备为五台平移式缆机，可研阶段方案为双平台布置，缆机之间安全距离设定为13m。左岸1#至6#坝段设置两台MQ2000门塔机辅助浇筑。根据提供的机械技术性能参数，在仿真程序中机械参数设定如表5-4和5-5。

表5-4 缆机主要技术参数表

机械名称	覆盖坝段及高程	主要技术参数说明
平移式缆机 2台+3台 上下层布置	上层2台：6#~43#坝段； 下层3台：12#~43#坝段（下游侧） 缆机可部分覆盖9、10、11坝段）	吊罐容量9m ³ ，额定重量30t，跨度837m，垂度5.5%，空罐升降速度3.0m/s，重罐下降速度3.0m/s，重罐上升速度2.2m/s，水平速度7.5m/s，考虑装卸料、加速、减速时间等固定时间220s；考虑到上下平台的原因，缆机之间运行安全距离控制为13m，每浇混凝土方量20万m ³ ，进行换绳，需要时间3d；初期效率75%，以后每个月按照5%递增。

表5-5 MQ2000型单臂架高架门机主要技术参数表

机械名称	覆盖坝段及高程	主要技术参数说明
MQ2000	1#~6#坝段	吊罐容量6m ³ ，吊罐提升速度1.0m/s，吊罐下降速度1.6m/s，转动速度0.6弧度/m，每浇混凝土方量2.5万m ³ ，进行维修，需要时间2d。

5.3 大坝浇筑施工特点与方案设计

5.3.1 大坝混凝土施工特点分析

(一) 仓面面积分布

从小湾工程水工体型来看,其坝体浇筑仓面面积具有随高程增加逐步减少的特点,即下部仓面面积最大。不同仓面面积仓数及其所占比例如表 5-6 所示。

表 5-6 仓面面积统计表

仓面面积 (m ²)	仓面数	占浇筑数的百分比
>2000	0	0
1800~2000	99	2.99%
1500~1800	253	7.64%
1200~1500	653	19.73%
1000~1200	474	14.32%
800~1000	499	15.08%
500~800	734	22.18%
<500	598	18.07%
合计	3310	100.00%

(二) 平铺法浇筑不同高程区间轮流浇筑一次的时间分析

表 5-7 平铺法浇筑不同高程所有仓面轮流浇筑一次的时间估计表

高程	仓面数	每仓最多可布置缆机数	每仓需要的缆机台数	可以同时开仓数	总面积 (m ²)	拱冠部位缆机生产率 (m ³ /h)	轮流浇筑一遍最短时间 d (h)
953	2	5	4~5	1	3300	57.87	2(40)
1000	16	5	2~4	1~2	23470	83	12.5(250)
1050	22	4~5	3	2	30540	91	12(240)
1100	30	4	2	2~3	37150	99	13(260)
1150	36	3~4	2	2~3	34720	100	12.5(251)
1200	40	2~3	1~2	3	25450	100	9.5(192)
1245	43	1~2	1	3	12730	100	6.5(128)

(三) 大坝混凝土浇筑施工方案设计

针对平铺法浇筑不同高程区间的仓面轮流浇筑一次进行了分析, 见表 5-7。由表 5-7 可以看出: 在高程 $\nabla 1000 \sim 1150$ 区间, 不考虑其他因素影响, 所有仓面轮流浇筑一遍时间在 12 天以上, 若加上立模, 孔洞停工等因素, 在 14 天以内是将所有仓面轮流浇筑一遍难度很高。

在表 5-7 中看出: 缆机由于初期效率、吊深等因素的限制, 浇筑坝体中下部混凝土时生产率低, 而坝体中下部仓面面积较大, 所以若均采用平铺法浇筑, 大仓面往往需要 4 台以上缆机浇筑, 因剩余 1~2 台缆机大部分情况下, 只能被迫闲置, 造成 5 台缆机总体效率会明显降低, 对施工进度影响较大。

针对以上情况我们设计了以下方案: 方案一仓面采用平铺法浇筑, 方案二为适当考虑部分仓面采用台阶法施工, 缆机仓面设备转移时间均为 3 小时。

5.4 大坝浇筑施工模拟计算结果

5.4.1 方案一计算结果

(一) 月浇筑强度

模拟计算混凝土浇筑开始时间为 2005 年 9 月 1 日, 结束时间为 2010/11/26 日, 工期 63 个月, 具体分月浇筑强度统计见图 5-2。

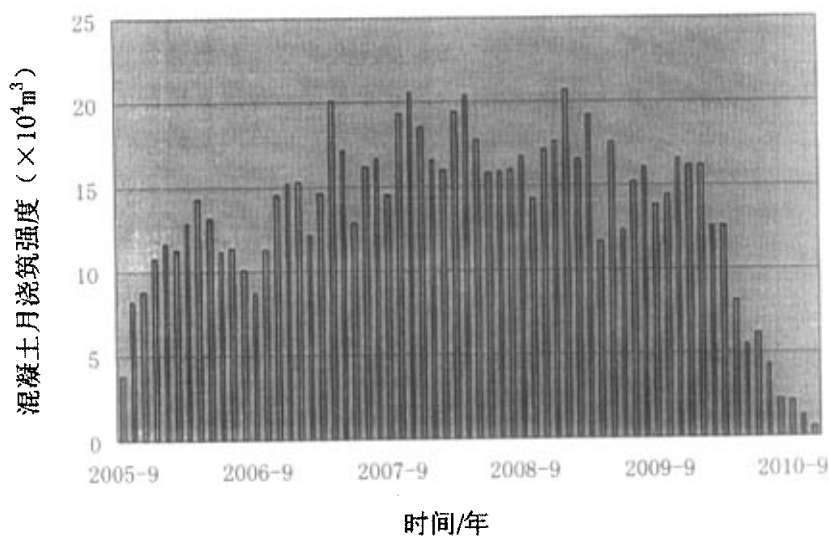


图 5-2 方案一混凝土月浇筑强度

(二) 方案一浇筑高峰年机械强度

从图 5-2 可以看出方案一混凝土浇筑强度年强度最高发生在 2008 年, 年最大混凝土浇筑强度为 $203.6 \times 10^4 \text{m}^3$, 表 5-8 列出 2008 年机械浇筑强度。

表 5-8 方案一 2008 年各机械浇筑强度 (单位 $\times 10^4 \text{m}^3$)

机械名称	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	全年
上层平移 1	3.63	3.1	4.61	4.81	4.4	3.96	2.85	3.79	4.01	3.55	3.95	3.52	46.2
上层平移 2	2.27	1.8	3.02	2.68	1.77	2.28	1.74	2.42	1.89	1.73	2.54	2.75	26.9
下层平移 1	3.54	3.44	3.88	4.17	3.79	3.51	3.73	3.34	3.66	2.97	3.56	3.94	43.5
下层平移 2	2.93	3.62	3.6	4.1	4.02	3.01	4.15	3.16	3.66	3.05	3.6	3.82	42.7
下层平移 3	2.98	3.39	3.72	4.39	3.79	3.04	3.45	3.23	3.59	2.86	3.41	3.36	41.2
门 1	0.55	0.31	0.28	0.09	0	0	0	0	0	0.04	0.02	0.12	1.4
门 2	0.62	0.35	0.32	0.1	0	0	0	0	0	0.05	0.07	0.16	1.7

(三) 缆机综合效率

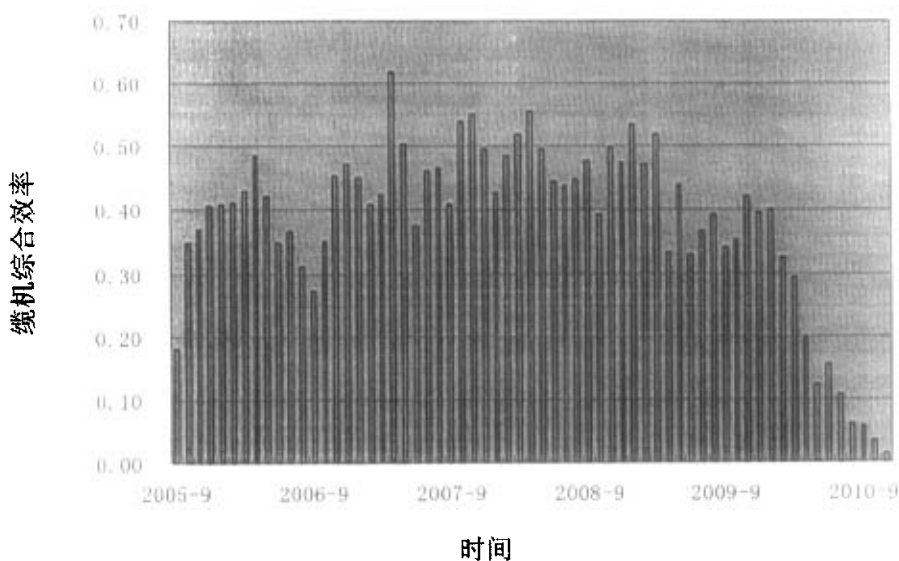


图 5-3 方案一缆机综合效率图

(四) 方案一控制性进度对比

表 5-9 方案一控制性进度对比表

时 间 (年、月)	浇筑高程 (M)		接缝灌浆高程 (M)	
	可研报告	模拟计算	可研报告	模拟计算
2005 年 9 月 1 日	953	953	953	953
2006 年 5 月 31 日	1001	1001	953	970
2007 年 5 月 31 日	1060	1046.5	1040	1024
2008 年 5 月 31 日	1110	1102.5	1080	1087
2009 年 5 月 31 日	1165	1158.5	1147	1135
2009 年 10 月 31 日	1185	1178.5	1169	1159
2009 年 12 月 31 日	1196	1192	1176	1171
2010 年 5 月 31 日	1225	1215	1194	1195
2010 年 6 月 30 日	1228	1215	1197	1195
2010 年 10 月 30 日		1236.5		1207
2010 年 12 月 31 日	1245	1245	1217	
2011 年 1 月 31 日				1222
2011 年 4 月 30 日	1245		1230	1237
2011 年 5 月 31 日	1245		1234	1245
2011 年 8 月 31 日	1245		1245	

从图 5-2 可以看出, 方案一 2007 年冬季混凝土月浇筑强度高于 2008 年冬季混凝土月浇筑强度。原因在于 2007 年 10 月各坝段浇筑高程在 1080 左右, 此时开浇坝段接近 30 个, 多数仓面使用 2 台缆机浇筑, 工作面展开大, 适合缆机浇筑工作。同时, 逐渐进入冬季, 混凝土生产具有保证, 月有效工作时间延长。此时导流中孔已施工完毕, 保证 2007 年冬季浇筑施工不受孔洞施工的影响。多种因素均有利于大坝混凝土浇筑。但 2008 年冬季, 大坝浇筑到达泄洪中孔部位, 所以受孔洞施工影响月浇筑强度偏低。

5.4.2 方案二计算结果

(一) 月浇筑强度

模拟计算混凝土浇筑开始时间为 2005 年 9 月 1 日, 结束时间为 2010/07/08 日, 工期 58.3 个月, 具体分月浇筑强度统计见图 5-4。

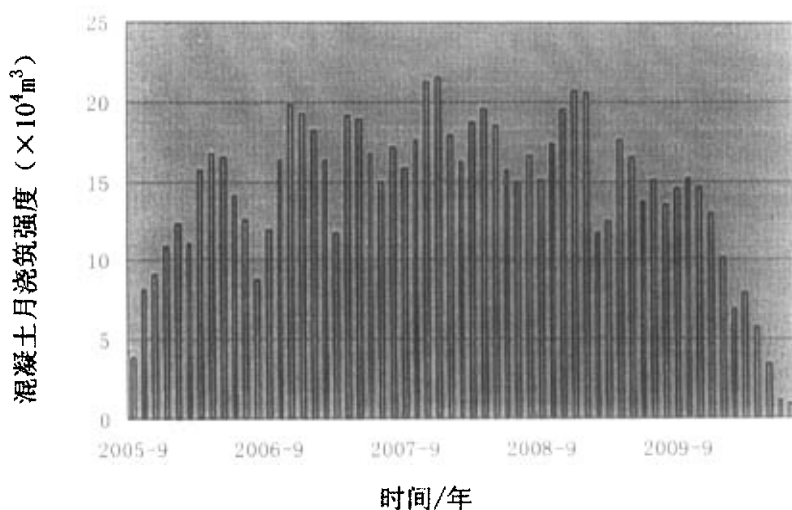


图 5-4 方案二混凝土月浇筑强度

(二) 方案二浇筑高峰年机械强度

从图 5-4 可以看出方案二混凝土浇筑强度年强度最高发生在 2008 年, 年最大混凝土浇筑强度为 $210.8 \times 10^4 \text{m}^3$, 表 5-10 列出 2008 年机械浇筑强度。

在上述二个方案中, 方案一采用平铺法浇筑, 方案二允许使用台阶法浇筑, 方案二计算结果表明, 采用台阶法浇筑的仓面数量大约占总仓面数的十分之一。

表 5-10 方案二 2008 年各机械浇筑强度 (单位 $\times 10^4 \text{m}^3$)

机械名称	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	全年
上层平移 1	4.21	3.62	4.06	4.41	4.3	3.6	3.33	3.37	3.43	4.06	4.61	4.45	47.5
上层平移 2	2.06	1.69	1.91	3.47	2.68	2.4	2.18	2.23	2.03	2.89	2.38	2.81	28.7
下层平移 1	3.28	3.15	4.35	3.56	3.63	2.94	3.05	3.19	2.89	3.3	4.03	4.32	41.7
下层平移 2	3.38	3.86	4.18	4.51	4.58	3.27	3.53	3.95	3.55	3.78	4.23	4.45	47.3
下层平移 3	3.59	3.25	3.81	3.56	3.29	3.46	2.72	3.37	2.93	2.94	3.74	4.38	41
门 1	0.63	0.28	0.18	0.04	0	0.02	0.05	0.22	0.14	0.22	0.28	0.14	2.2
门 2	0.71	0.32	0.2	0.05	0	0.02	0.06	0.24	0.12	0.2	0.38	0.13	2.4

(三) 缆机综合效率

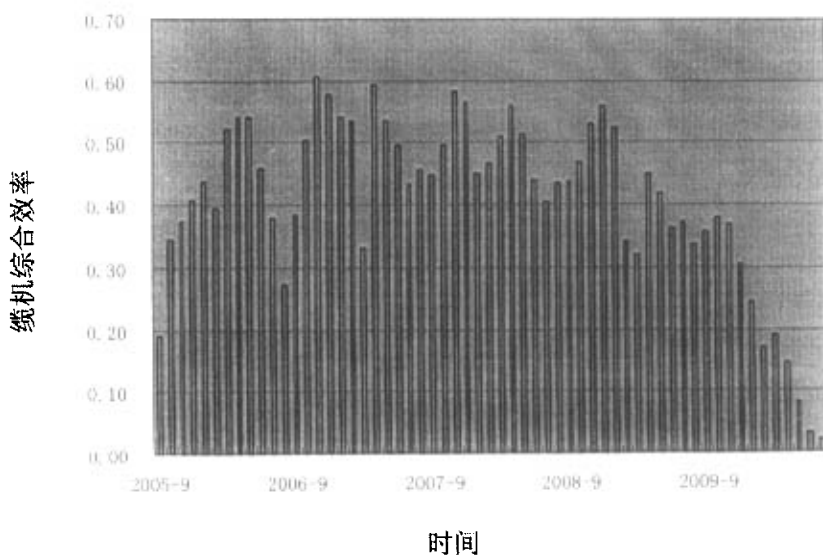


图 5-5 方案二缆机综合效率图

(四) 方案二控制性进度对比

表 5-11 方案二控制性进度对比表

时 间 (年、月)	浇筑高程 (M)		接缝灌浆高程 (M)	
	可研报告	模拟计算	可研报告	模拟结算
2005 年 9 月 1 日	953	953	953	953
2006 年 5 月 31 日	1001	1006	953	970
2007 年 5 月 31 日	1060	1063	1040	1042
2008 年 5 月 31 日	1110	1119	1080	1099
2009 年 5 月 31 日	1165	1175.5	1147	1147
2009 年 10 月 31 日	1185	1199	1169	1171
2009 年 12 月 31 日	1196	1213	1176	1183
2010 年 5 月 31 日	1225	1233	1194	1207
2010 年 6 月 30 日	1228	1236.5	1197	1207
2010 年 07 月 08 日		1245		
2010 年 12 月 31 日	1245		1217	1245
2011 年 4 月 30 日	1245		1230	
2011 年 5 月 31 日	1245		1234	
2011 年 8 月 31 日	1245		1245	

5.4.3 模拟计算结果比较与分析

根据方案计算结果,对方案一和方案二计算结果综合比较如下表:

表 5-12 方案一、方案二综合比较表

项目	工期 (月)	强度(万方)		单台缆机最高强度 缆机/强度/时间	老混凝土量 (万方)
		月最高强度 /月	年最高强度/年		
方案一	63	20.71 2009年1月	203.6 2008年	上层平移 1/4.81 万方 2008年4月	411.9
方案二	58.3	21.56 2007年12月	210.8 2008年	上层平移 1/4.89 万方 2007年12月	347.2

(一) 施工进度分析

从模拟施工进度来看,方案二大坝控制性进度和接缝灌浆均满足要求,虽然方案一大坝施工总工期满足要求,但是控制性进度和接缝灌浆均不满足要求。

(二) 施工强度分析

从表 5-12 看来:方案一年最高强度为 203.6 万方,发生在 2008 年,月最高强度为 20.71 万方,发生在 2009 年 1 月,单台缆机月最高强度为 4.81 万方;方案二年最高强度为 210.8 万方,发生在 2008 年,月最高强度为 21.56 万方,发生在 2007 年 12 月,单台缆机月最高强度为 4.89 万方。单台缆机月最高强度为 4.89 万方。国外单机最高强度有达 7 万方的,国内部分工程以缆机为主的拱坝浇筑月高峰强度也有在 4~5 万方左右的,根据二滩工程施工经验,单台缆机月浇筑强度近 6 万方,本次计算小湾工程最高单台达到 4.89 万方。可见强度方面,是有一定可靠度的。

(三) 老混凝土分析

对老混凝土的定义为:当浇筑仓混凝土浇筑间歇时间超过 14d 即认为是老混凝土,当混凝土浇筑间歇时间超过 10d 预警会出现老混凝土,该仓优先浇筑,但是不允许违背相邻坝段高差约束条件。按照设计院提供资料,混凝土浇筑间歇时间超过 14d 即认为是老混凝土,而老混凝土主要出现在 $\nabla 1000\text{m} \sim \nabla 1160$ 高程。

在 $\nabla 1000\text{m} \sim \nabla 1080$ 高程,浇筑仓面在 14 个仓面以上,而大部分仓面采用 3 台缆机浇筑,若采用平铺法浇筑,3m 层厚,0.5m 铺层,4 小时初凝时间来计算,浇筑一个仓面时间若加上仓面设备转移时间,往往需要一天以上时间,在 14d 内所有仓面是无法轮流浇筑一遍的。

同样,在 $\nabla 1080\text{m} \sim \nabla 1160$,浇筑仓面在 28 个仓面以上,而大部分仓面采用 2 台缆机浇筑,在 14d 内所有仓面是无法轮流浇筑一遍的。这样,老混凝土出现的情况就比较明显。

从表 5-12 看来,方案二老混凝土量比方案一少 55 万方左右,这是因为方案

二允许部分仓面采用台阶法浇筑,那么在 $\nabla 1000\text{m}$ 高程左右,3台以上缆机浇筑,剩余1~2台缆机大部分情况下,让剩下的2台缆机考虑台阶法浇筑,这样,能减少老混凝土量。

(四) 机械效率分析

方案一和方案二下层平台三台缆机综合效率分布均匀,上层平移1相对下层3台略高。可见,浇筑过程中,缆机的组合得到了较好的搭配,缆机联合浇筑时尽量考虑上下层平台搭配浇筑。但是方案二的下层3台缆机平均效率均大于方案一,这是因为方案二中部分仓面考虑台阶法浇筑,当缆机台数为3台时,剩余2台缆机可以考虑用台阶法浇筑。

从图5-3和5-5看出:方案二中,部分仓面考虑台阶法浇筑,缆机浇筑综合利用率高,故总浇筑平均效率相对方案一稍高,且浇筑生产率满足一般的经验。

(五) 仓面分析

从年强度来看,2006年和2007年方案一年强度均小于方案二,这是此时大坝浇筑高程在 $\nabla 980\text{m}\sim\nabla 1090\text{m}$,坝体中下部仓面面积较大,所以若均采用平铺法浇筑,大仓面往往需要3台以上缆机浇筑,因剩余1~2台缆机大部分情况下只能被迫闲置,造成5台缆机总体效率降低,对施工进度影响较大。因此,适当考虑部分仓面用2台缆机采用台阶法施工,对大坝浇筑进程较为有利。

根据表5-13和5-14的分析可以看出,大坝浇筑中下部仓面大部分采用3台以上缆机浇筑一个仓面,缆机空闲多。在中后期,由于缆机大部分两台缆机就可以满足平铺法施工要求,在 $\nabla 1100$ 以上会形成2+2+1浇筑的局面。这时,台阶法优势不大。从图5-6缆机与柱块位置图可以看出,在浇筑高程 $\nabla 1100$ 左右,大坝浇筑时间为2008/05/08/03,三个仓面同时开浇。

表5-13 方案一分高程浇筑特性统计表

高程区间	1台缆机		2台缆机		3台缆机		4台缆机		5台缆机		合计
	浇筑块数	百分比	浇筑块数	百分比	浇筑块数	百分比	浇筑块数	百分比	浇筑块数	百分比	
953.0~1001.0	41	12.46%	42	12.77%	89	27.05%	143	43.47%	14	4.26%	329
1001.0~1060.0	58	11.74%	91	18.42%	340	68.83%	5	1.01%	0	0.00%	494
1060.0~1110.0	45	8.81%	363	71.04%	103	20.16%	0	0.00%	0	0.00%	511
1110.0~1165.0	52	7.67%	623	91.89%	3	0.44%	0	0.00%	0	0.00%	678
1165.0~1185.0	91	34.34%	174	65.66%	0	0.00%	0	0.00%	0	0.00%	265
1185.0~1225.0	470	81.17%	109	18.83%	0	0.00%	0	0.00%	0	0.00%	579
1225.0~1245.0	280	100.00%	0	0.00%	0	0.00%	0	0.00%	0	0.00%	280

表 5-14 方案二分高程浇筑特性统计表

高程区间	1 台缆机		2 台缆机		3 台缆机		4 台缆机		5 台缆机		合计
	浇筑块数	百分比	浇筑块数	百分比	浇筑块数	百分比	浇筑块数	百分比	浇筑块数	百分比	
953.0~1001.0	41	12.31%	93	27.93%	68	20.42%	119	35.74%	12	3.60%	333
1001.0~1060.0	58	10.66%	265	48.71%	217	39.89%	4	0.74%	0	0.00%	544
1060.0~1110.0	45	8.56%	405	77.00%	76	14.45%	0	0.00%	0	0.00%	526
1110.0~1165.0	54	7.95%	625	92.05%	0	0.00%	0	0.00%	0	0.00%	679
1165.0~1185.0	100	37.04%	170	62.96%	0	0.00%	0	0.00%	0	0.00%	270
1185.0~1225.0	476	81.09%	111	18.91%	0	0.00%	0	0.00%	0	0.00%	587
1225.0~1245.0	282	100.00%	0	0.00%	0	0.00%	0	0.00%	0	0.00%	282

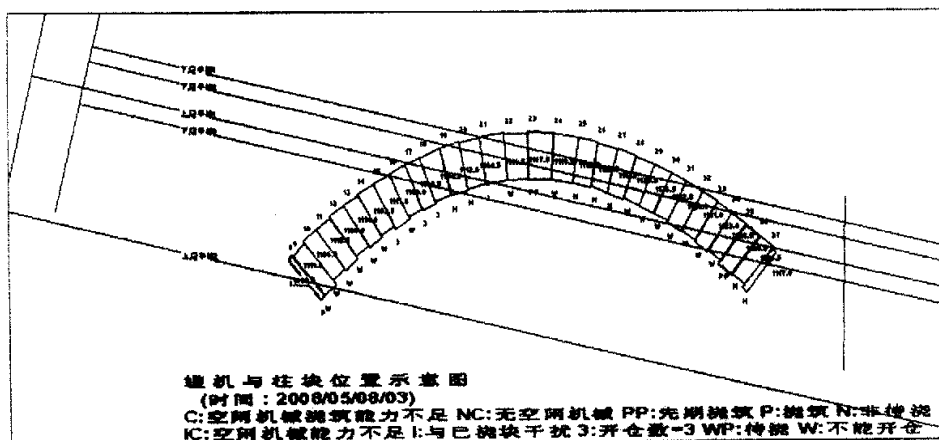


图 5-6 缆机与柱块位置示意图

5.5 仓面设计成果表示

现以方案一 24# 坝段（高程范围 1155.5m—1157m）和 12# 坝段（高程范围 1199m—1202m）为例介绍仓面设计的工程实施。

(1) 仓面在 24# 坝段，开始高程为 1155.5m，升层 1.5m，为 4# 泄洪中孔，属少筋混凝土仓，少筋混凝土仓每台缆机仓面振捣设备配置准则为：1 台 4 头振捣机 ⊕ 6 个 Φ100 振捣棒。按照设计要求，混凝土分区为 A 区，混凝土标号为 R₁₈₀ 400# S₉₀ 14 D₉₀ 250。

(2) 仓面在 12# 坝段，开始高程为 1199m，升层 3.0m，属素混凝土仓，素

混凝土仓每台缆机仓面振捣设备配置准则为：1台4头振捣机 \oplus 5个 $\Phi 100$ 振捣棒。配置资源见附图，按照设计要求，混凝土分区为C区，混凝土标号为R₃₀ 300# S₉₀ 10 D₉₀ 250。

以上二个仓面设计输出到CAD见图5-6和图5-7。

5.6 结论与建议

(1) 经过模拟计算分析，小湾工程2004年年底截流，2005年9月开始浇筑大坝混凝土，2009年年底第一台机组发电，单以大坝工程来看若全部采用平铺法浇筑，虽然大坝浇筑工期满足要求，但是控制性进度和接缝灌浆均不满足要求。

(2) 从模拟计算情况来看：小湾工程混凝土浇筑高峰年出现在2007年和2008年，年高峰强度 $210 \times 10^4 \text{m}^3$ 左右，出现部位基本在 $\nabla 1040 \sim 1090$ ， $\nabla 1090 \sim 1150$ ，即为仓面面积较大且可浇仓面较多的中间部位，其下部虽然仓面面积大，但可浇仓面相对较少，而其上部虽然可浇仓面多，但仓面面积较小，均不利于缆机效率发挥。

(3) 在高程1000-1060之间，大部分仓面需要3台缆机浇筑，2台缆机不能满足平铺法浇筑要求，即此高程范围内常会出现3台缆机浇筑、2台做辅助工作的情况，不利于缆机浇筑效率的发挥。若允许采用台阶法浇筑，剩余2台缆机也可投入浇筑工作，有利于减少老混凝土的产生。

混凝土仓号浇筑工艺设计表

施工单位	仓号高程 (m)		浇筑面积 (m ²)	浇筑层厚 (m)	浇筑方量 (m ³)	制表日期	制表单位
少筋仓	1155.5	1137.1	1900.8	1.5	1900.8	2004年12月21日	天津大学水利系
混凝土特性	分区	混凝土标号		塌落度 (cm)	数量 (m ³)	拌和楼	
	A区	✓ R _m 400# S _m 14 D _m 250					
	B区						
						仓面示意图:	
						单位: cm	
开仓时间	收仓时间	浇筑历时	入仓强度				
2009/03/31/16	2009/04/01/04	9.2	207.7				
入仓机械	下层平移2	上层平移1					
仓面设备设施	4头振捣机	振捣棒φ100					
	2个	12个					
仓面人员	振捣工	钢筋工	预埋工	辅助工	仓面负责人		
			特殊部位浇筑责任人				
浇筑方法	平辅法	✓	台阶段				
	厚度	0.5	台阶段度	层厚	层次		
施工单位	质检员	仓面负责人	监理单位	签证	旁站		

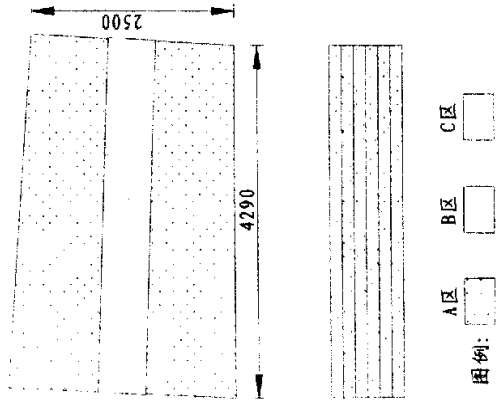


图 5-6 24# 坝段, ∇1155.5 仓面设计工艺图

混凝土仓号浇筑工艺设计表

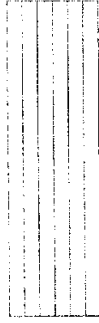
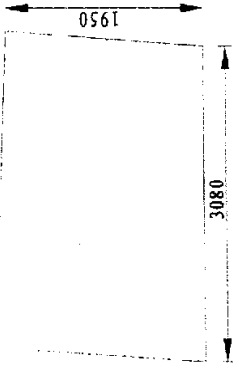
制表单位
天津大学水利系

制表日期
2004年12月21日

仓号 1199.0 浇筑层厚 (m) 3.0 浇筑层厚 (m) 3.0 浇筑方量 (m³) 2043.7
分区 混凝土标号 塌落度 (cm) 数量 (m) 样和模

仓面示意图:

单位: cm



图例: A区 B区 C区

施工部位 素砼仓	仓号 1199.0	浇筑层厚 (m) 3.0	浇筑层厚 (m) 3.0	浇筑方量 (m ³) 2043.7
混凝土特性	分区	混凝土标号	塌落度 (cm)	数量 (m)
	A区			
	B区			
开仓时间 2009/10/27/02	C区	✓ R ₁₀₀ 300# S ₁₀ D ₁₀ 250		
	收仓时间	浇筑历时	入仓强度	
入仓机械	2009/10/28/10	23.8	86.0	
	下层平移1			
仓面设备设施	4头振捣机	振捣棒φ100		
	1个	5个		
仓面人员	振捣工	钢筋工	探埋工	辅助工
				仓面负责人
浇筑方法	特殊部位浇筑责任人			
	平铺法	✓	台阶法	
	厚度		层厚	层次
施工单位	0.5	台阶宽度	监理单位	签证
	质检员	仓面负责人	旁站	

图 5-7 12# 坝段, ▽1199 仓面设计工艺图

第六章 结论

混凝土坝施工系统是一个复杂的系统,如何考虑各种因素的影响,对大坝浇筑施工阶段实施有效的管理与控制是设计与施工管理人员时刻面临的问题。采用计算机仿真大坝施工,丰富了水利水电工程施工的研究方法。从整个以往的混凝土坝浇筑施工仿真过程来看,以往的研究方法对工程初步的进度分析有一定的宏观指导作用,但是如何使仿真过程和结果从微观方面为大坝施工提供更具体的信息是十分必要的。从三峡工程的实际工程经验,可将仓面设计成果作为混凝土坝浇筑施工仿真的补充。

本文首先用系统的观点,从系统的角度对混凝土拱坝施工系统进行分析。首先描述了混凝土坝施工系统存在的问题状况,对其分析确定该系统的目标,然后确定出系统的构成部件及其功能、部件间的关系,系统的影响因素,最后建立了混凝土拱坝浇筑施工仿真系统模型。在模型中对柱块的开仓规则,浇筑机械的运行设置等做了详细的约束,符合工程实际。

同时,本文对混凝土浇筑仓面设计的内容做了详细的介绍,推行仓面设计,作为混凝土浇筑前必要的技术准备及浇筑作业指导的一种重要措施,对规范施工作业、保证工程质量、加快进度等方面发挥了重要的作用。仓面设计由承建单位编制,经现场监理工程师审核批准后执行。本文在仓面设计工程内容的基础上结合计算机仿真技术,利用计算机辅助进行混凝土浇筑仓面施工规划。

采用数据库、AutoCAD无缝接口技术模拟的数据组织和输出提供了方便。并对仓面设计工艺设计表采用标准化设计,这样,模拟结果的输出可以给水利工程建设各方单位提供有效、直观的指导。

最后结合小湾工程混凝土浇筑施工,以计算机模拟模型为核心,辅以模型参数管理、模拟计算、仓面设计、工程输出、实时信息采集等,将混凝土拱坝浇筑施工计算机仿真与仓面设计用于小湾仓面浇筑施工指导中,在确定施工机械布置、调度的基础上,分析了仓面施工方法对大坝浇筑进程的影响,对施工控制性进度进行了论证,提出了合理性的建议。

通过小湾工程的实际应用,说明进行混凝土拱坝浇筑施工计算机仿真研究与仓面设计有一定的工程指导意义。但由于时间和作者知识水平有限,文中错误和不足之处,敬请批评指正,以期在进一步研究中改正和进一步完善。

参考文献

- [1] 《水利水电工程施工手册》编委会, 水利水电工程施工手册——混凝土工程[M]. 北京, 中国电力出版社, 2002.
- [2] 水利电力部水利水电建设总局, 水利水电工程施工组织设计手册(2—施工技术)[M]. 北京, 中国水利水电出版社, 1990.
- [3] 中国长江三峡工程开发总公司 陆佑楣, 三峡大坝混凝土施工[M]. 北京, 中国电力出版社, 2003,175-203.
- [4] 戴会超, 周厚贵. 三峡大坝混凝土快速施工方案及工艺研究[J]. 中国三峡建设, 2002, 7:10-12.
- [5] 王毅, 张弩. 三峡工程三期碾压混凝土围堰快速施工研究[J]. 中国三峡建设, 2002, 10:23-25.
- [6] 郑路, 程新勇, 张勇. 混凝土仓面设计在三峡二期工程中的应用[J]. 中国三峡建设, 2001, 03:6-7.
- [7] Halpin,D.W. CYCLONE—A method for modeling job site processes. Journal of Construction Division[J], ASCE. 1977,103(3):489-499.
- [8] Huang,R.Y. Dynamic interface simulation for construction operations. PhD dissertation, Dept.of Civ.Envir.Engrg., Purdue University, West Lafayette, Ind. 1994.
- [9] Paulson,B.C.Jr. Interactive graphics for simulating construction operation. Journal of Construction Division[J]. ASCE,1978, 104(1):69-76.
- [10] Chang,D. RESQUE:A resource based simulation system for construction process planning. PhD thesis, University of Michigan, Ann Arbor, Mich. 1989.
- [11] Liu,L.Y.and Ioannou,P.G. Graphical object-oriented discrete-event simulation system. Proc.Winter Simulation Conf., 1992,1285-1291.
- [12] 苑克伦, 论坝混凝土施工系统的实时控制, 天津大学硕士学位论文, 1989.
- [13] 王仁超, 卢威. 水利工程计算机模拟若干问题的研究[J]. 水利水电技术, 2001,32(12):22-24.
- [14] 孙锡衡, 齐东海编, 水利水电工程施工计算机模拟与程序设计[M], 北京, 中国水利水电出版社, 1997.
- [15] 钟登华, 郑家祥等编著, 可视化仿真技术及其应用[M], 北京, 中国水利水电出版社, 2002.
- [16] 王仁超, 邱世明, 张立岗. 基于 OOM 的混凝土坝浇筑施工模拟系统[J]. 水利水电技术, 1999,30(12):49-52.
- [17] 王仁超, 彦德, 朱光熙. 堆石坝填筑施工过程的管理与控制[J]. 水力发电学报, 1996,53 (2): 62-70.
- [18] 邱世明, 王仁超, 顾培亮. 混凝土坝施工管理决策系统[J]. 天津大学学报, 2002,35(3):392-396.
- [19] 邱世明, 混凝土坝施工过程管理与控制决策支持系统研究, 天津大学硕士学位论文, 2000.

- [20]钟登华,李景茹,复杂地下洞室群施工交通运输系统仿真与优化研究[J].系统仿真学报,2002,14(2),140-142.
- [21]秦杰,黄达逵等,三峡大坝混凝土施工实时仿真计算[J].大连理工大学学报,2002,5:359-365.
- [22]李勇刚,胡志根,燕乔,混凝土拱坝浇筑仿真的可视化技术研究[J].武汉水利电力大学学报,2000,33(1):33-36.
- [23]吴庆鸣,陈东,唐秋鸿,三峡大坝混凝土浇筑系统计算机仿真软件开发研究[J].武汉大学学报,2000,19(2):54-56.
- [24]郑瑛,王建平,计算机仿真技术在水电工程施工中的应用[J].中国三峡建设,2000,5:39-40.
- [25]翁永红,谢红忠,夏忠平,混凝土坝施工实时动态仿真[M].北京,中国电力出版社,2003.
- [26]Grady Booch. Objected—Oriented Development[J]. IEEE Trans On Software Engineering, 1986,12(2):211-221.
- [27]Chell A. Roberts, Yasser M. Dessouky, An Overview of Object Oriented Simulation[J]. Simulation, 1998, 70(6): 359-368.
- [28]Shi,J., Object-Oriented Technology for Enhancing Activity-Based Modeling Functionality. Proceeding of the 2000 Winter Simulation Conference, 2000, 1938-1944.
- [29]Tamotsu Kamigaki,Nobuto Nakamura, An Object-Oriented Visual Model-Building and Simulation [J].System for FMS Control, 1996, 67(6):373~385.
- [30]朱海滨,面向对象技术——原理与设计[M].长沙,国防科技大学出版社,1992.
- [31]汪成为,郑小军等编,面向对象分析、设计及应用[M].北京,国防工业出版社,1992.
- [32]冯惠军、冯允成,一个面向对象的仿真建模框架[J].系统工程理论与实践,1995.5:61~66.
- [33]顾培亮编,系统分析与协调[M].天津,天津大学出版社,1998.
- [34]郭勇,三峡工程大坝施工监理系统分析与控制研究,天津大学硕士学位论文,2000.
- [35]肖田元,张燕云编,系统仿真导论[M].北京,清华大学出版社,2000.
- [36]刘藻珍,魏华梁编,系统仿真[M].北京,北京理工大学出版社,1998.
- [37]Huang,R.Y. Dynamic interface simulation for construction operations. PhD dissertation, Dept.of Civ.Envir.Engrg., Purdue University,West Lafayette,Ind. 1994.
- [38]Shi,J. Activity-Based Construction(ABC) Modeling and Simulation Method. Journal of Construction Engineering and and Management[J]. ASCE,1999,125(5), 354-360.
- [39]李小梅,黄朝辉.科学计算可视化导论[M].长沙,国防科技大学出版社,1996.
- [40]王小同,杜芳等,可视化仿真及其应用综述[J].计算机工程,1998,24(8):20-23.

- [41]王仁超,石英,李名川,小湾大坝混凝土浇筑施工仿真研究[J].四川大学学报(工程科学版),2004,36(4):10-14.
- [42]钟登华,练继亮.大坝仿真计算中机械浇筑强度分析与优化研究[J].水利水电技术,2003,34(7):47-49.
- [43]古天龙.离散事件动态系统理论综述[J].电子科技杂志,1991,17(3):14-20.
- [44]Kate Gregory 著, Visual C++5 开发使用手册(康博创作室译)[M].北京,机械工业出版社,1998.
- [45]David J. Kruglinski, Scot Wingo. Visual C++6.0 技术内幕[M].北京,希望电子出版社,2001.
- [46]于积贞,VC++在数据库开发中的应用[J].西北民族学院学报(自然科学版),2002,23(3):41-43.
- [47]马如宏,肖勇杰. Visual C++6.0 进行数据库开发的常用技术及 ADO 应用实例[J].盐城工学院学报,2001,14(3):45-48.
- [48]姜仁. VC 中可靠读写 DWG 图形文件的新方法[J].微型机与应用,2002,10:10-12.
- [49]王珏,永 VBA 开发 AutoCAD 2000 应用程序[M].北京,人民邮电出版社,1999.
- [50]韩青峰,吴声松.应用 ActiveX 技术进行 AutoCAD 二次开发[J].工程地质计算机应用,2003,32(4):13-18.
- [51]韦明方. AutoCAD 与高级语言的接口问题探讨[J].淮海工学院学院,1998,7(4):8-12.

发表论文及参加科研情况说明

发表论文

- ◇ 王仁超、石英, 李名川, 小湾大坝混凝土浇筑施工仿真研究, 《四川大学学报》, 2004.8, 美国 EI 数据库全文检索
- ◇ 王仁超、石英, 混凝土高拱坝浇筑施工仿真研究, 《天津大学学报》(待刊), EI 检索源刊
- ◇ 王仁超、褚春超, 石英, 工程工期延误分析的 PBDM 模型, 《系统工程》, 2003.12, 全国中文核心期刊

参加科研项目

- ◇ 糯扎渡水电站土石坝方案料场规划、土石方运输、溢洪道开挖与大坝填筑系统仿真研究, 国家电力公司昆明勘测设计研究院
- ◇ 糯扎渡水利工程斜心墙土石坝填筑系统仿真研究 国家电力公司昆明勘测设计研究院
- ◇ 小湾水电站大坝浇筑计算机仿真研究, 国家电力公司昆明勘测设计研究院
- ◇ 溪洛渡水电站大坝浇筑计算机仿真研究, 中国三峡工程开发总公司
- ◇ 向家坝大坝浇筑计算机仿真研究, 中国三峡工程开发总公司

致谢

本文是在天津大学建筑工程学院王仁超教授的亲切关怀和悉心指导下完成的。论文从开题到定稿，无不渗透着王老师的心血。老师严谨的治学态度、渊博的学术知识、孜孜不倦的敬业精神使我受益非浅。而且为我今后的人生旅途树立了目标和榜样。在此，谨向王老师表示我最诚挚的敬意和衷心的感谢。

在我作硕士论文期间，除了导师的关怀和帮助外，还得到了朱光熙教授的热情帮助，精湛的专业知识，高超的讲授技艺，为我论文的完成提供了大量所需的专业知识，在此，谨致以最诚挚的谢意。另外还感谢国家电力公司昆明勘测设计研究院小湾项目部的各位工程师，为我撰写论文提供了大量非常珍贵的资料。

在我攻读硕士学位的两年多时间里，感谢李名川、杨弢，朱琳在软件开发中的合作和论文研究中的帮助。

感谢师弟邬旺、谭学奇，师妹吴艳在做项目和论文中的热情帮助。

感谢我的父母，他们在我求学期间给予了我巨大的支持和鼓励，这是我前进的动力。向所有在我学习过程中给予过帮助、理解和支持的亲人、老师和同学表达最深切的谢意，这份感激将永驻我心。

最后，向在百忙之中抽出时间对本文进行评审的各位专家学者表示衷心的感谢。