

DOI: 10.3969/j.issn.1004-4701.2019.05-06

基于面向对象设计的拱坝多拱梁法应力程序研究

尹水良¹, 周 斌²

(1. 上饶市水利电力勘测设计院, 江西 上饶, 334000; 2. 汕尾市水利水电规划设计院, 广东 汕尾, 516600)

摘 要:多拱梁法计算拱坝应力,可通过向量与矩阵运算实现.采用面向对象的计算机语言,构造向量和矩阵的数据对象,通过操作符重载可使复杂的向量和矩阵运算抽象为简单数字计算.构建模拟拱梁节点网格的数据结构,利用链表遍历技术可方便地模拟传统试载法实现拱、梁的相关计算.通过向量和矩阵运算可形成反力参数矩阵,快速求解或调整拱冠内力或拱、梁分载.通过以上面向对象的程序设计技术,可大大降低程序设计难度.

关键词:拱坝;多拱梁法;面向对象设计;向量与矩阵运算

中图分类号:TV642.42 **文献标识码:**A **文章编号:**1004-4701(2019)05-0341-05

0 引言

20世纪美国垦务局研究和发展的多拱梁法计算拱坝应力的方法。经过引进和发展,我国逐渐积累了丰富的实践经验,使多拱梁法成为了我国拱坝应力计算的一种基本方法。1945年美国生产了第一台电子数字计算机ENIAC,开始了计算机技术的发展,相应的计算机语言也随之发展起来。为了克服软件危机,又产生了面向对象程序设计的思想,发展了一批面向对象程序设计语言,通过对象、类、数据抽象、继承、动态绑定、数据封装、多态性、消息传递等面向对象的概念,大大降低了程序设计的难度^[1]。

1 基于向量与矩阵运算的拱坝多拱梁法原理^[2]

多拱梁法是将坝体视为若干水平拱圈和竖向悬臂梁组成的空间结构,荷载由梁和拱分担,荷载分配可按拱梁共同点变位一致原则来确定的拱坝应力分析方法^[3]。基于向量与矩阵运算的拱坝多拱梁法采用曲面坐标,

将拱梁共同点的荷载、内力、位移的平动和转动(扭转)作用合写为5阶向量,并相应通过5×5矩阵来表述梁或拱的荷载、内力、位移的转换和相互传递关系,从而可通过向量和矩阵的运算进行拱坝的应力计算。

2 试载过程及其编程总体思路

拱坝多拱梁法是在试载法的基础上发展起来的。试载法^[4]先假定拱和梁的分载,分别求出梁和拱的位移,再根据梁和拱共同点的位移差异情况确定下一次试载,基于向量与矩阵运算的试载过程为:

步骤1:根据梁分载内力转换矩阵 $[B_i]$ 和内力传输矩阵 $[TB_i]$,可从梁顶至梁底计算出各梁的节点内力;

步骤2:根据拱分载内力转换矩阵 $[A_i]$ 和内力传输矩阵 $[TA_i]$,可依次计算出从拱冠至拱端的左、右拱圈的节点内力(拱冠内力可取上一次的结果,初次可取无内力);

步骤3:根据上次计算拱座位移(初次计算可取无位移),根据内力位移转换矩阵 $[\delta A_i]$ 和位移传输矩阵 $[\delta TA_i]$ 以及拱温度变位 $[\delta_{ATi}]$,可依次计算出从拱端至拱冠的左、右拱圈的节点位移;

收稿日期:2019-01-03

作者简介:尹水良(1986-),男,大学本科,工程师。

步骤 4: 根据左、右拱圈计算的拱冠节点位移差, 通过拱冠反力参数修正拱冠的内力。

步骤 5: 根据修正的拱冠内力, 重复步骤 2, 可依次计算出从拱冠至拱端的左、右拱圈的节点内力;

步骤 6: 根据拱圈的拱端内力、梁底的内力和通过伏格特公式得到的地基反力矩阵, 可得到拱座的节点位移。

步骤 7: 根据拱座位移、梁温度变位 $[\delta_{BT_i}]$ 和梁的内力位移转换矩阵 $[\delta B_i]$ 、位移传输矩阵 $[\delta T_s B_i]$, 可依次计算梁底至梁顶的节点位移。

步骤 8: 根据拱座位移、拱温度变位 $[\delta_{AT_i}]$ 和拱内力位移转换矩阵 $[\delta A_i]$ 、位移传输矩阵 $[\delta T_s A_i]$, 可依次计算拱端至拱冠的节点位移。

步骤 9: 比较拱梁共同节点的位移, 若合乎精度则说明试载合理, 否则需要进一步调整试载。

上述试载过程步骤 2~5 可以归并为求解拱圈内力的一大步。现代计算机多拱梁法的内力求解多采用大型稀疏矩阵的迭代法^[3]。事实上也可以借助面向对象设计的相关概念来完成多拱梁法的计算。

采用面向对象的设计方法, 向量与矩阵运算可通过构造相应的向量和矩阵对象, 通过操作符重载使复杂向量和矩阵的数学运算在编程中抽象为简单数字计算, 降低编程难度; 构造链表^[4]等数据结构可模拟拱梁节点网格, 通过链表遍历技术^[4]可分别实现拱、梁的内力、位移计算, 使得试载法编程简单直观; 拱冠内力和分载调整可以根据节点内力和位移的关系 (反力参数矩阵) 求解。

3 向量与矩阵运算的实现与表达

面向对象的编程语言 C++ 可以定义向量或矩阵类, 通过操作符重载和友元函数可定义向量或矩阵的各种运算。例如我们用 Vector 类定义 5 阶向量, 用 Matrix 类定义 5×5 矩阵。Vector 类和 Matrix 类分别定义如下:

```
class Vector
{
public:
    double Value[5]; //5 阶向量
    friend Vector5 operator* (double x, Vector5
```

```
y); //实数乘向量
    double operator*(Vector x); //两向量点积
    Vector operator-(Vector x); //两向量相减
    Vector operator+(Vector x); //两矩阵相加
    Vector( ); //构造函数
    virtual ~Vector( ); //析构函数
};
class Matrix //5×5 矩阵
{
public:
    double Value[5][5]; //5×5 矩阵
    friend Matrix operator *(double x, Matrix y);
//实数乘矩阵
    Matrix operator * (Matrix x); //矩阵与矩阵相乘
    Vector operator *(Vector x); //向量与矩阵的相乘
    Matrix operator -(Matrix x); //两矩阵相减
    Matrix operator +(Matrix x); //两矩阵相加
    Matrix( ); //构造函数
    virtual ~Matrix( ); //析构函数
};
```

由此可以通过数学运算符“+”、“-”、“*”书写向量与矩阵的运算, 使向量和矩阵运算在程序中可以象普通数值一样简洁地表达, 从逻辑概念上将向量和矩阵的数学运算抽象为普通数字计算。

4 计算网格与数据结构

为了采用多拱梁法计算拱坝应力, 需要将拱坝划分为多个水平拱圈和竖直梁, 拱、梁中心线交点即构成计算节点集^[2]。试载过程中需要大量的拱、梁计算, 为方便拱、梁的计算, 节点集采用双向十字链表^[4]模拟; 通过水平指针遍历操作可进行拱圈相关计算, 通过竖向指针遍历操作可进行竖直梁的相关计算; 从而通过双向十字链表的遍历操作就能完成拱、梁的相关计算。

为计算地基变位, 采用水平双向链表^[4]模拟坝基节点集, 链表节点同时存贮对应的拱坝边界节点指针, 通过该指针读写拱坝边界节点的数据, 从而可以通过坝基链表计算拱座位移, 修正坝体链表对应的边界节点

位移。

5 反力参数矩阵以及拱冠内力和分载的求解

完整的拱圈为超静定结构;拱圈在拱冠处切开后,左、右半拱均为静定结构,左右半拱在拱冠处均存在内力,若左半拱的拱冠内力(或内力增量)为 $[F_L]$,右半拱为 $[F_R]$,有 $[F_L] = -[F_R]$ 。为求解拱冠的内力(或增量),可分别取各向的单位力,由拱冠向拱端方向依次算出节点内力,再由拱端向拱冠依次算出节点位移。各向拱冠单位力(单位向量)计算得到的拱冠节点位移列向量依次排列可形成 5×5 拱冠反力参数矩阵 $[I_L]$ 或 $[I_R]$ 。若平衡前有初始位移 $[\delta_L]$ 和 $[\delta_R]$,平衡时有左、右拱圈节点位移一致,有 $[\delta_L] + [I_L] \cdot [F_L] = [\delta_R] + [I_R] \cdot [F_R]$,可改写为 $([I_L] + [I_R]) \cdot [F_L] = [\delta_R] - [\delta_L]$ 。该方程为五元一次方程,可以采用高斯消元法求解拱冠内力(或增量) $[F_L]$ 和 $[F_R]$ 。

拱坝迭代求解时,每一次迭代都需根据拱、梁的位移差重新调整拱、梁分载。任一节点的拱、梁荷载(分别为 $[p_A]$ 和 $[p_B]$)之和为总荷载($[p_{\text{总}}]$),即 $[p_A] + [p_B] = [p_{\text{总}}]$,则任一次迭代产生的拱、梁分载增量(分别为 $[e_A]$ 和 $[e_B]$)满足 $[e_A] = -[e_B]$ 。为求解拱、梁的分载增量,可分别取各向的拱单位分载,由该节点向两拱端逐

节点计算节点内力,再根据内力计算该节点的位移,节点位移列向量依次排列可形成 5×5 拱节点反力参数矩阵 $[I_A]$;分别取各向的梁单位分载,由该节点向梁底逐节点计算节点内力,再根据内力计算该节点的位移,节点位移列向量依次排列可形成 5×5 梁节点反力参数矩阵 $[I_B]$ 。若迭代前有初始位移 $[\delta_A]$ 和 $[\delta_B]$,迭代后有拱、梁节点位移一致,有 $[\delta_A] + [I_A] \cdot [e_A] = [\delta_B] + [I_B] \cdot [e_B]$,亦可写为 $([I_A] + [I_B]) \cdot [e_A] = [\delta_B] - [\delta_A]$ 。该方程为五元一次方程,可以采用高斯消元法直接求解分载增量 $[e_A]$ 和 $[e_B]$ 。由于各节点分载的相互影响,分载调整宜用SOR迭代法^[9]以保持迭代过程的稳定性。

6 工程实例

圣井山水库位于江西省鹰潭市龙虎山景区的白塔河中游左岸支流圣井山水上,是一座以漂流水为任务的水利枢纽工程。圣井山拱坝为细石砼砌块石统一二次曲线双曲拱坝,拱坝坝顶高程 349.00m(黄海高程,下同),底部高程 280.00m,最大坝高为 69.00m。圣井山拱坝于 2014 年开工建设,2016 年完工,原设计采用中国水利水电科学研究院的 ADASO 软件(多拱梁法)、浙江大学的 ADAO 软件进行坝体应力计算。原设计的 ADASO 软件计算成果(以下简称 ADASO 成果)、ADAO

表 1 圣井山拱坝应力计算成果对比表

计算程序或方法		ADASO 成果/MPa		ADAO 成果/MPa		复核成果/MPa		
		校核水位+温升	正常水位+温降	校核水位+温升	正常水位+温降	校核水位+温升	正常水位+温降	
上游面	最大主压应力	应力值	2.12	2.51	2.13	2.68	2.65	2.90
		高程位置	320CR	320CR	320CR	320CR	320CR	320CR
	最大主拉应力	应力值	-1.09	-1.07	-1.33	-1.33	-0.98	-0.93
		高程位置	300RT	300RT	300RT	280CR	300RT	349RT
下游面	最大主压应力	应力值	3.58	3.62	3.84	3.63	2.93	2.85
		高程位置	300RT	300RT	300RT	300RT	310RT	300RT
	最大主拉应力	应力值	-0.30	-0.67	-0.39	-0.51	-0.53	-0.69
		高程位置	280RT	290CR	340LF	290CR	300LF	300LF

注:LF 表示左拱端,RT 表示右拱端,CR 表示拱冠梁。

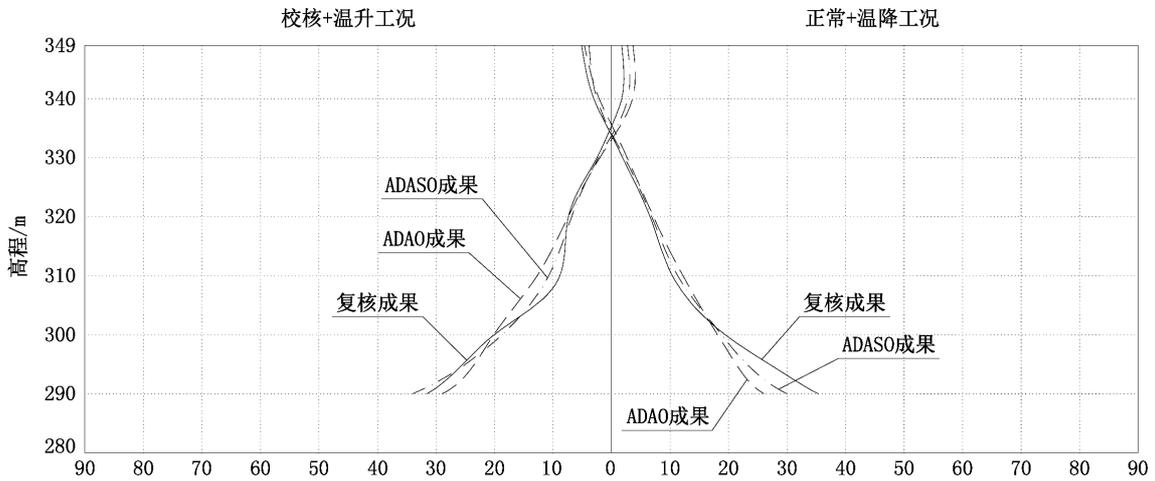


图1 拱冠梁径向分载示意图

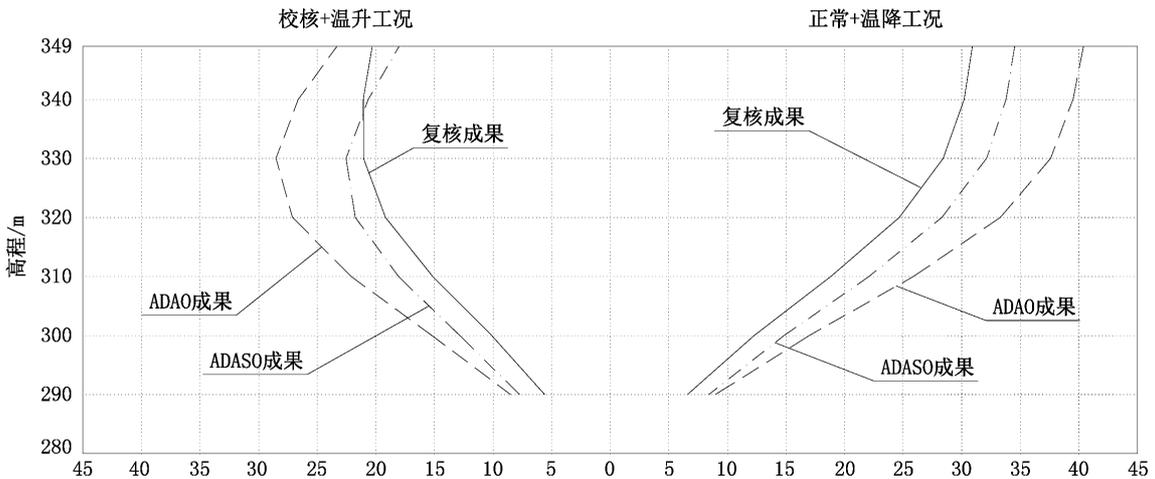


图2 拱冠梁径向位移示意图

软件计算成果(以下简称 ADAO 成果)与采用基于向量运算的拱坝多拱梁法复核计算成果(以下简称复核成果)见表 1, 拱冠梁的径向梁分载、径向位移见图 1 和图 2。

从对比的计算结果上看, 拱冠梁径向分载和径向位移的形态总体相近, 应力成果及其分布特征有一定的差距。新旧程序采取的水温算法、边界分载方法不同, 此外局部算法细节也存在一些差异, 致使应力成果及其分布存在一些差异。有文献对比了不同多拱梁法程序计算的小湾拱坝应力成果, 不同程序的计算成果存在一定的差距^[3]。复核成果和 ADASO 成果、ADAO 成果相比也未超出总体合理范畴。

7 结 论

采用面向对象的计算机语言, 可构造向量和矩阵的数据对象, 通过操作符重载使复杂的向量和矩阵运算抽象为简单数字计算; 构建模拟拱梁节点网格的数据结构, 利用链表遍历技术可实现拱、梁的相关计算。通过以上面向对象和程序设计技术, 可将向量和矩阵运算抽象为普通数字计算, 形象地模拟适合手算的传统试载法, 可达到与迭代法求解大型稀疏阵同等的效果。经与圣井山水库拱坝等工程对比验证, 计算成果也是合理可信的。

参考文献:

- [1] 邵维忠, 杨芙清. 面向对象的分析与设计[M]. 北京: 清华大学出版社, 2013 年.
- [2] 周斌. 基于向量与矩阵运算的拱坝多拱梁法应力计算研究[J]. 人民珠江, 2018(12): 135~146.
- [3] 朱伯芳, 高季章, 陈祖煜, 等. 拱坝设计与研究[M]. 北京: 水利电力出版社, 2002 年.
- [4] 殷人昆. 数据结构(用面向对象方法与 C++ 语言描述)[M]. 北京: 清华大学出版社, 2007 年.
- [5] 郑咸义, 姚仰新, 雷秀仁, 等. 应用数值分析[M]. 广州: 华南理工大学出版社, 2008 年.
- [6] 周斌, 刘宏路. 高店水库砌石拱坝的分缝与封拱[J]. 水电与新能源, 2014(2): 18~20.

编辑: 张绍付

Stress programming of arch dam multi-arch beam method based on object-oriented design

YIN Shuiliang¹ ZHOU Bin²

- (1. Shangrao Municipal Hydraulic and Power Survey and Design Institute of Jiangxi Province, Shangrao 334000, China;
2. Shanwei Municipal Water Resources and Hydropower Planning and Design Institute of Guangdong, Shanwei 516600, China)

Abstract: The calculation of arch dam stress by multi-arch beam method can be realized by vector and matrix calculation. Using object-oriented computer language, data objects of vectors and matrices are constructed, and complex vector and matrix operations can be abstracted into simple numerical calculations through operator overloading. The data structure simulating the node grid of arch and beam is constructed, and the related calculation of arch and beam can be conveniently simulated by using the linked list traversal technology. Through vector and matrix operations, a reaction force parameter matrix can be formed to quickly solve or adjust the internal force of arch crown or load sharing between arch and beam. Through the above object-oriented programming techniques, the difficulty of programming can be greatly reduced.

Key words: Arch dam; Multi-arch beam method; Object-oriented design; Vector and matrix operations

翻译: 尹水良