

GC在参数化拱坝三维设计中应用研究

赵凯华 余 军

(信息中心)

[摘要] 针对二维拱坝设计中存在的非常繁杂的参数计算和图形绘制,以及目前GC在水利工程三维设计中研究较少的状况,本文介绍了GC建模的优点,总结了GC建模的技术路线,以典型双曲拱坝为例介绍了坝体分区建模以及坝上部建筑物建模的关键技术。结合李仙江石门坎拱坝三维建模的应用表明,GC可以完成复杂异形结构体建模,方便地进行设计变更,支持设计方案重用,能够极大提高设计人员的工作效率。

[关键词] 三维建模 Generative Components 脚本编程 参数化拱坝

Generative Components(以下简称GC)是Bentley公司开发的一款基于MicroStation平台的关联参数化建模系统,其最早提出是在2003年,后来由于其工程实践的突出表现(尤其是伦敦的瑞士再保险塔)逐渐进入了公众视野,2007年商业版本GC正式发布。

其优点是能够灵活地创建各类几何形体,支持各种几何和逻辑可能性,为工程师提供了全新的设计方式。GC采用图形方式展示元素及相互关系,支持有效展示与重用设计方案。使用GC,工程师既可完全采用图形方式工作,也可适时将图形与脚本和编程结合使用。GC的参数化规则和关系是用户自定义的,通过界面图形操作和脚本编程的混合方法,设计师能够使用GC模拟出各类几何结构,并且每一个对象都能记录自己的创建方式。

在水利工程中,对于拱坝、蜗壳、尾水管、叉管等异形结构众多,设计计算和绘图复杂,工作量、出图量大,利用GC技术研究水利工程异形结构具有良好的应用价值,可以方便地完成三维建模,并且更改参数便可方便快速完成方案修改。

1 拱坝设计介绍

拱坝是一种建筑在峡谷中的拦水坝,做成水平拱形,凸边面向上游,两端紧贴着峡谷壁,是一种经济性和安全性都很好的坝型。其主要参数有:拱弧的半径、中心角、圆弧中心沿高程的迹线和拱厚。按照拱坝的拱弧半径和拱中心角,可将拱坝分为单曲

拱和双曲拱。

双曲拱是拱坝中最具有代表性的坝型,其水平向弯曲可以发挥拱的作用,竖直向弯曲可实现变中心、变半径以调整拱坝上下部的曲率和半径。一般情况,上部半径大些,可使拱座推力更指向岸里;下部半径小些,可适当加大下部中心角以提高拱的作用。因此,双曲拱坝一般均采用变中心、变半径布置。这样结构设计更合理,但建模时体形计算很复杂,特别在施工详图设计阶段,各种参数的计算和图形绘制工作非常繁杂,有时甚至是手工无法完成的。利用计算机进行参数化三维设计可大大减少工作量,提高设计精度^[1]。

GC在拱坝三维设计上,国内已经有人做了一定应用研究^[2-3],但是研究的深度和适用的坝型有限,本文中研究的拱坝类型具有代表性,由于其特殊的要求,设计更复杂,有必要利用GC对其进行研究建模以更好地对设计提供技术支持。

2 典型抛物线双曲拱坝参数化建模

2.1 技术路线

对于抛物线双曲拱坝来说,其水平及竖向截面都是曲线形。因此,可以通过创建各层水平面上曲线,根据水平面上的曲线分别拟合出上下游的拱面,在根据上下游拱面生成坝体。所以,利用GC进行参数化建模的技术路线为:

(1)定义参数,提取出拱坝的一些特征参数,包括坝顶高程、坝底高程以及相邻特征拱圈的距离、每

作者简介:赵凯华(1985),男,河南省灵宝人,助理工程师,硕士,从事CAD与工程仿真软件开发工作。

一个拱圈上特征点的个数,以及拱冠厚度、左右拱端厚度、弦长、大坝分缝的控制参数等。

(2)根据坝体高程范围,高程进行离散。每个高程的拱圈根据公式,计算每层拱圈上特征点的坐标。

(3)根据(2)中得到的拱圈上特征点的坐标,生成每层拱圈的特征点。

(4)根据(3)生成的特征点,分别拟合出拱坝上游面和下游面。

(5)根据(4)拟合的上下游拱面,生成坝体。

(6)将坝体进行分区。

(7)完成表孔、中孔、闸墩、交通桥等坝上建筑物建模。

物建模。

2.2 坝体部分建模及分区

对于双曲拱坝,其体型通过上下游坝面形状来控制,而上下游坝面的控制点要通过每一层拱圈上的特征点来确定;上下游坝面的拱圈数目、每层拱圈上特征点数目越多,则坝面控制越精确;但是拱圈个数及拱圈上特征点的增加,必将造成计算量的增大,造成绘图效率的降低。因此,在工程误差允许范围内,应选择合适的拱圈个数及每层拱圈上特征点的个数。表1和表2为确定典型拱坝体型的控制参数,保存在 Excel 表格以便 GC 直接调用。

表1 拱坝几何参数插值系数表

几何参数	α_0	α_1	α_2	α_3
拱冠梁中心线坐标 Y_c/m	0.000000	0.210537	4.40400×10^{-4}	-1.91967×10^{-6}
拱冠处厚度 T_c/m	5.002872	0.205861	-1.09114×10^{-4}	7.46822×10^{-6}
左拱端厚度 T_{ar}/m	5.012577	0.287997	-1.27327×10^{-4}	-8.28608×10^{-6}
右拱端厚度 T_{al}/m	5.013301	0.328759	-1.08471×10^{-4}	-2.92989×10^{-6}
左拱中心线拱冠处曲率半径 R_{cr}/m	224.0000	-1.580627	-1.48080×10^{-4}	1.58219×10^{-4}
右拱中心线拱冠处曲率半径 R_{cl}/m	133.0000	-0.412819	-9.32570×10^{-4}	6.85827×10^{-5}

表2 拱圈体型参数表

高程	758	745	728	713	698	683	668	650
左拱圈弦长	115.65	109.18	99.95	91.31	82.18	73.22	57.82	29.42
右拱圈弦长	152.91	140.80	127.02	109.59	91.40	75.24	58.29	26.86
拱冠厚度	5.00	7.51	10.40	12.74	15.04	17.46	20.14	23.92

定义完特征参数后,需在坝体高程范围内对高程进行离散。然后根据设计文件,对于每一个特定高程拱圈中心线按照式(1)确定其特征点位置。表1中给出了拱冠厚度为 T_c 、左拱端厚度为 T_{ar} 、右拱端厚度为 T_{al} 、左拱中心线拱冠处曲率半径为 R_{cr} 、右拱中心线拱冠处曲率半径为 R_{cl} 的插值参数。表2给出了右拱圈弦长 X_r 、左拱圈弦长 X_l 及拱冠厚度为 T_c 在各个高程上的取值。拱圈形状及各几何参数说明如图1所示,各几何参数插值系数按表1取值,插值公式按式(2)计算。

$$y = \frac{-x^2}{2R} + Y_c \quad (1)$$

式中: R 为拱冠处曲率半径,对于左拱段 R 取 R_{cl} ,对于右拱段 R 取 R_{cr} , m ; Y_c 为 y 轴截距, m 。

$$F_0(Z) = \alpha_0 + \alpha_1 Z + \alpha_2 Z^2 + \alpha_3 Z^3 \quad (2)$$

式中: $F_0(Z)$ 为高程为 Z 拱圈的几何参数, m ; Z 为相应拱圈所在的相对高程,按式(3)计算, m ; $\alpha_0, \alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ 为表1中对应的插值系数。

$$Z = Z_{顶} - z \quad (3)$$

式中: z 为拱圈所在的绝对高程, m ; $Z_{顶}$ 为拱坝坝顶绝对高程, m 。

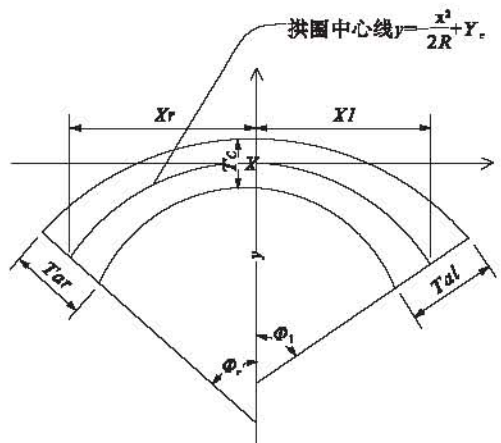


图1 拱圈形状及参数说明示意图

确定拱冠处厚度 T_c 后,式(4)为平面拱圈各部位厚度与弧长的关系。根据拱圈各部位的厚度,计算得到上下游拱圈上特征点,然后根据所有的特征点来拟合得到上下游拱面,从而生成坝体。

$$T_i = T_c + (T_{\omega} - T_c)(S_i - S)^2 \quad (4)$$

式中： T_i 拱圈任意位置厚度，m； T_c 为对应拱圈拱冠厚度，m； T_{ω} 为拱端的拱冠厚度，对于左拱端 T_{ω} 取 T_{al} ，对于右拱端 T_{ω} 取 T_{ar} ，m； S 为左侧段或右侧段拱圈中心线总长度，m； S_i 为拱圈中心线上任意点至坐标原点的中心线弧长，m。

据此，在高程上每隔一定高程按式(1)生成足够多控制点，如图2(a)所示；然后用B样条曲线拟合每一条抛物线，如图2(b)所示；根据式(4)计算得到控制点处的拱圈厚度 T_i ，以控制点为起点，分别向拱圈中心线内法向和外法向生成长度为 $T_i/2$ 的线段作为上下游拱面的控制线，如图2(c)所示；利用控制线的起点和终点分别生成上下游拱面，生成图2(d)所示坝体。

根据设计需要，大坝须设置横缝，横缝为铅直面，按接近径向布置。设置依据为 y 轴截距 B 和横缝与 y 轴交角 ϕ ，数据如表3所示。在图1中依据 B 和 ϕ 确定横缝所在平面，如图3(a)所示，从左到右大坝分块依次为①、②...⑮，横缝编号依次为 F1、F2...F14；然后依次用这些平面去切割坝体，获得图3(b)所示的设置横缝后的拱坝模型。

2.3 坝体上部建筑物建模

拱坝上部的建筑物包括泄洪表孔、中孔、中孔门、交通桥等，由于涉及的细节数量多需要创建大量的 Transactions 去实现，这些 Transactions 记录下了整个模型的点、线、面、体的生成过程，以及求交线，拉伸成体、布尔运算等过程。图4(a)为 GC 的 Transactions 窗口，生成的拱坝及其上部建筑物如图4(b)、(c)所示。

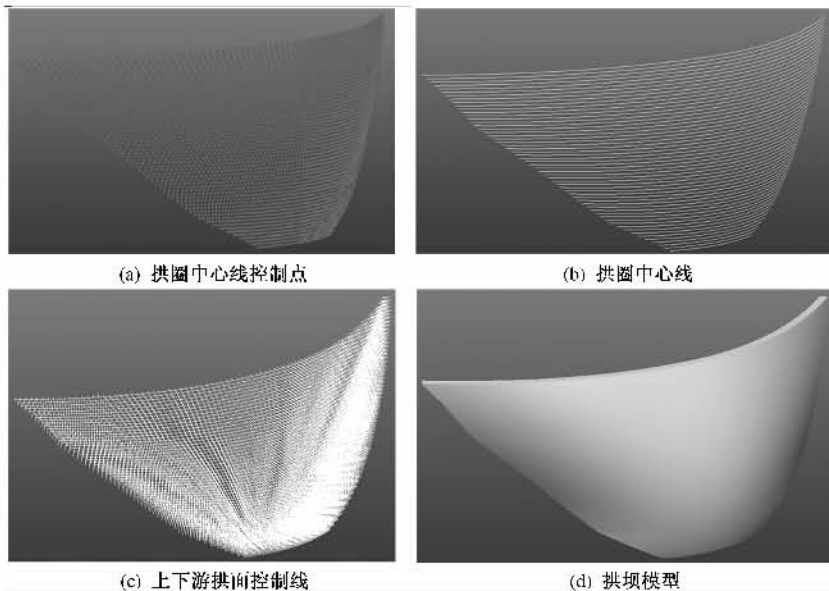


图2 利用GC生成各层拱圈中心线抛物线

表3 大坝横缝位置表

岸别	左岸														右岸															
坝段编号	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	⑨	⑩	⑪	⑫	⑬	⑭	⑮	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	⑨	⑩	⑪	⑫	⑬	⑭	⑮
缝号	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	F8	F9	F10	F11	F12	F13	F14	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	F8	F9	F10	F11	F12	F13	F14		
交角/°	-39.4	-37.5	-34.5	-28.4	-19.5	-7.9	4.0	13.2	21.5	27.2	29.8	31.4	32.7	33.4	-39.4	-37.5	-34.5	-28.4	-19.5	-7.9	4.0	13.2	21.5	27.2	29.8	31.4	32.7	33.4		
截距/m	-165	-141	-118	-104	-93	-87	-116	-120	-126	-141	-166	-195	-223	-255	-165	-141	-118	-104	-93	-87	-116	-120	-126	-141	-166	-195	-223	-255		

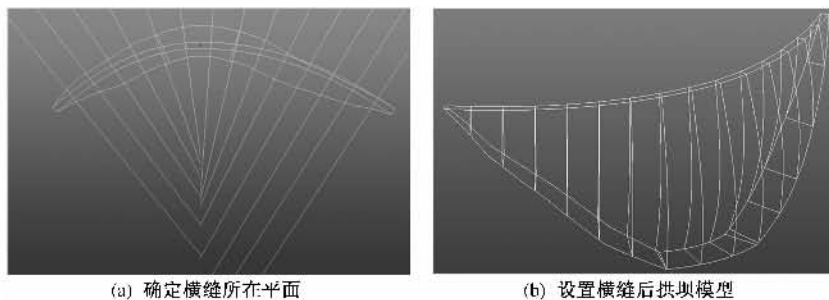
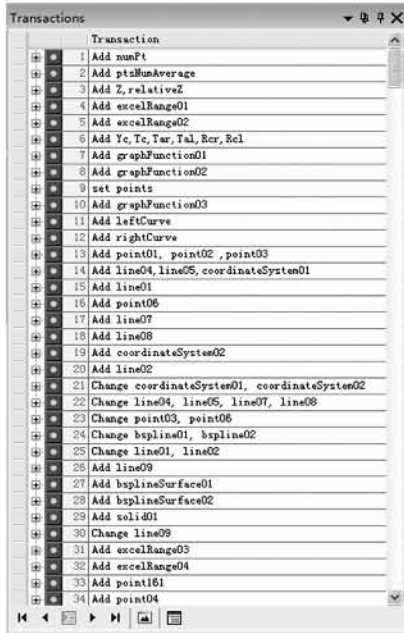


图3 模型横缝设置示意图

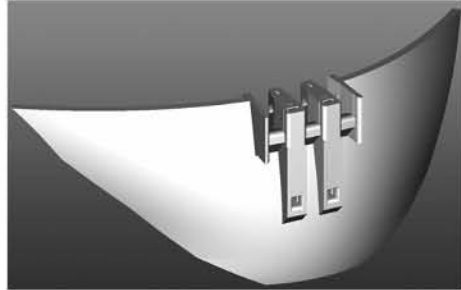
2.4 方案修改

参数化设计要求模型具有数据驱动能力,在这方面 GC 具有从数据库、Excel 表格读写的模块,能够方便的实现和数据库、Excel 之间的数据交换,为参数化建模提供了便利。本文采用 Excel 表格对参

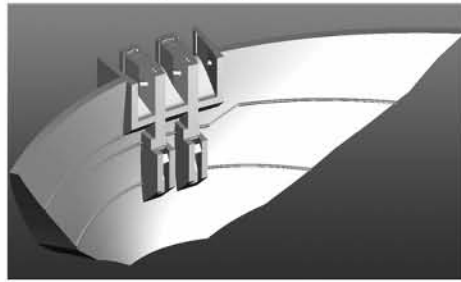
数进行统一管理,在 GC 中读入这些参数,再通过脚本编程来实现参数化建模;要实现方案修改,只需在 Excel 中修改相应参数即可,提高了三维设计的效率。



(a) Transactions 窗口



(b) 上游轴测图



(c) 下游轴测图

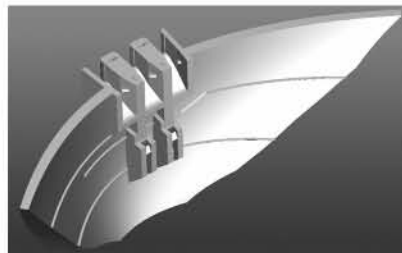
图 4 GC 生成的拱坝模型

对于拱坝,设计方案修改一般会涉及孔数、孔宽以及孔中心线的偏移等影响坝上建筑物布置的参数,以及拱冠中心坐标、拱冠厚度、左右拱端厚度、左右拱中心线拱冠处曲率半径、左右弦长、分区用到的夹角、截距等影响拱坝形体的参数。

以拱冠厚度和左右弦长为例,对设计方案进行修改。在表 1 中拱冠厚度 T_c 对应的参数进行调整, α_0 取值增加到 7.002872,左右弦长均增加 2 m,然后重新生成模型如图 5 所示。



上游轴测图



下游轴测图

图 5 拱坝体型调整

3 石门坎拱坝建模中应用

3.1 应用背景

石门坎水电站位于云南省思茅市墨江县和普洱县交界的把边江上,为云南省李仙江流域水电梯级开发七个梯级电站中的第二级,引水式电站。水库正常蓄水位 756 m,死水位 740 m,总库容为 1.97 亿

m^3 。电站已于 2007 年 1 月 17 日开工,2008 年 11 月 14 日大江截流,2010 年 5 月下闸蓄水,2010 年 6 月投产发电。石门坎坝体为圆弧形双曲拱坝^[4],最大坝高 111 m,拱坝体形采用抛物线双曲拱坝。

3.2 应用实例

设计时从 650 m 高程到 758 m 高程,每隔 2 m 做一个特征拱圈,用变量 z 表示拱圈所在高程,用 Z

表示对应相对高程,在 GC 中可以通过如下脚本语句实现:

```
feature User. Objects. z Bentley. GC.
Features. GraphVariable
{ Value = Series(650, 758, 2); }
feature User. Objects. Z Bentley. GC.
Features. GraphVariable
{ Value = 758 - z; }
```

设计参数存放在 Excel 表格中,然后用 GC 从 Excel 中获取相应参数。但是,这之前需要装载 Excel 库,然后才能用 ExcelRange 特征。GC 获取 Excel 中参数可通过如下脚本语句实现:

```
feature User. Objects. excelRange01 Bentley. GC.
Features. ExcelRange
{
  RangeAddress = "B2:E7";
  SheetName = "Sheet1";
  WorkbookFileName = "E:\GC\SMK.xlsx";
}
```

每层拱圈中心线的左半拱和右半拱分别取 50 个控制点,用 B 样条曲线拟合拱圈中心线抛物线方程,确定拱圈中心线特征点坐标 GCScript 函数为:

```
feature User. Objects. graphFunction02 Bentley.
GC. Features. GraphFunction
{
  Definition = Point function( out Point leftPts,
out Point rightPts, out Point centerPts)
```

```
{
  double count = Z. Count;
  double maxX = graphFunction01(); //获取左右弦长范围
  double xPos, yPos; //记录拱圈中心线点坐标 x、y 坐标
  double xRStep, xLStep; //左右拱圈部分横坐标变化的步长
  leftPts = {}; rightPts = {}; centerPts = {} //左右拱圈控制点
  for( int i = 0; i < count; i ++ ) {
    xLStep = maxX [ i ] [ 1 ] / ( numPt - 1 ); //获得右侧弦长离散的步长
    leftPts [ i ] = {}; //右侧拱圈特征点初始化
    for( int j = 0; j < numPt; j ++ ) {
      xPos = j * xLStep;
```

```
yPos = - xPos * xPos / 2 / Rcr [ i ] + Yc [ i ];
leftPts [ i ] [ j ] = new Point ();
leftPts [ i ] [ j ]. ByCartesianCoordinates ( baseCS, xPos, yPos, Z [ i ] );
}
rightPts [ i ] = {}; //左侧拱圈特征点初始化
xRStep = maxX [ i ] [ 0 ] / ( numPt - 1 ); //获得右侧弦长离散的步长
for( int j = 0; j < numPt; j ++ ) {
  xPos = - j * xRStep;
  yPos = - xPos * xPos / 2 / Rcl [ i ] + Yc [ i ];
rightPts [ i ] [ j ] = new Point ();
rightPts [ i ] [ j ]. ByCartesianCoordinates ( baseCS, xPos, yPos, Z [ i ] );
}
centerPts [ i ] = RemoveAt ( Union ( Reverse ( leftPts [ i ] ), rightPts [ i ] ), numPt );
}
};
```

需要利用特征点坐标,用 B 样条曲线拟合得到拱圈中心线近似抛物线方程,GCScript 函数实现语句为:

```
feature User. Objects. graphFunction03 Bentley.
GC. Features. GraphFunction
{
  Definition = function ( int index )
  { int count = Z. Count;
  BSplineCurve childBSpline = {};
  for( int i = 0; i < count; i ++ ) {
    childBSpline [ i ] = new BSplineCurve ( this );
    childBSpline [ i ]. ByPoints ( leftPts [ i ] );
  }
  return childBSpline;
};
```

做出上下游拱面控制线后,利用控制线的起点和终点获得拱面,通过如下脚本语句实现:

```
feature User. Objects. bsplineSurface01 Bentley.
```

```
GC. Features. BSplineSurface
```

```
{ Points = line09. StartPoint; }
```

```
feature User. Objects. bsplineSurface02 Bentley.
```

```
GC. Features. BSplineSurface
```

```
{ Points = line09. EndPoint; }
```

利用上下游拱面生成坝体,通过如下脚本语句实现:

```
feature User. Objects. solid01 Bentley. GC. Features. Solid
```

```
{ Surface0 = bsplineSurface01; Surface1 = bsplineSurface02; }
```

坝上建筑物部分设计众多细节,主要也是通过类似的点、线、面、体进行实现,不再一一说明。

在方案修改后,包括坝体、上部建筑物在内整个模型更新共用时 12 分 40 秒,能够较快实现设计变更。

4 结论

以典型抛物线双曲拱坝为例,介绍了 GC 三维建模的技术思路,能够适用于大多数拱坝的三维设计。在石门坎拱坝的实例应用表明,GC 能够很好地支持异形结构体建模,支持设计方案重用,适用于水利工程,特别适用于异形结构体的三维建模。

参考文献

- [1] 余军,田永生,胡焱等.拱坝三维设计技术应用与研究[J].人民黄河,35(3).
- [2] 陈沉.关联参数化建模系统 Generative Components 在工程设计中的应用初探[J].2012 年 ECIDI/Bentley 中国工程设计软件研究中心,2012:139-145.
- [3] 李端阳,刘晶,田新星.GC 参数化三维建模在水电站设计中的应用[J].中南水力发电,89.
- [4] 杨仲洪,杨和明,曹龙.石门坎水电站常态混凝土双曲拱坝温控技术[J].云南水利发电,26(7).