

基于重力坝三维设计的 CAD 动态交互系统开发*

张社荣, 撒文奇, 杜成波, 韩启超

(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: 为了在可研阶段合理、快速地制定重力坝设计方案, 减少设计周期和成本, 采用极限状态设计的方法, 利用 VB 6.0 可视化编程工具开发出了一套能够与 CAD 动态交互的重力坝三维设计系统。该系统通过对 AutoCAD 的二次开发实现了重力坝的三维参数化建模, 并对所建三维模型进行结构计算, 将设计与计算紧密结合, 通过动态交互简化了大量复杂数据的计算, 达到精确、快速完成断面设计的目的。经实践检验证明, 该系统大大提高了断面设计效率, 实用性强, 对可研阶段的方案比选具有重大意义。

关键词: 重力坝; 三维设计; CAD; 动态交互; 系统开发

中图分类号: TP391.72 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-3695(2013)01-0165-04

doi:10.3969/j.issn.1001-3695.2013.01.042

Development of CAD dynamic interaction system for gravity dam based on 3D design

ZHANG She-rong, SA Wen-qi, DU Cheng-bo, HAN Qi-chao

(State Key Laboratory of Hydraulic Engineering Simulation & Safety, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: In order to make a design scheme reasonably and fast, as well as reduce the design cycle and cost in the feasibility study stage of gravity dam, this paper developed a 3D-CAD dynamic interaction design system with VB 6.0, based on the limit state design method. The system would produce 3D parametric models of gravity dam and fulfill the structural analysis. Data exchange would happen between the system and AutoCAD by dynamic interaction during the analytical process, which achieved the goal of accurate and fast dam design. In practice it has proved that the system greatly improves the efficiency of the section design and is practical strong. In brief, the system has a great significance to gravity dam design scheme selection in the feasibility study stage.

Key words: gravity dam; 3-dimensional design; CAD; dynamic interaction; system development

0 引言

混凝土重力坝结构简单, 施工方便, 安全度高, 在水电工程中应用广泛。在重力坝断面确定之前往往涉及不同方案的比选、稳定及应力分析计算。重力坝设计在断面设计初期可更改性较大, 但修改某个参数需要重新计算, 重复工作量较大。目前重力坝断面设计计算主要有以下三种方式: a) 纯手工计算; b) Excel 表格与 AutoCAD(以下简称 CAD) 配合计算; c) 纯程序计算。纯手工计算显然已经无法满足现代设计的需要。利用 CAD 图元属性功能得到计算所需数据, 人工输入到 Excel 表格公式中进行计算, 相比纯手工计算已经提高了一个层次, 但是两种软件之间的反复切换操作不但大大降低了设计效率, 反复的人工操作也增大了错误的出现概率。纯程序计算是现在的主流趋势, 此类完善的程序较多, 精确度较好, 但是绝大多数程序以参数输入为主, 计算时需要记录和输入大量的数据, 且计算断面形式相对单一, 不具有广泛的通用性。

目前重力坝设计还处在二维水平阶段, 但人在设计时的原始冲动是三维的, 设计成果是有颜色、形状、材料、尺寸、位置、

复杂运动关系等关联概念的三维实体^[1]。现阶段的水电行业设计工作是从三维到二维, 再从二维到三维的过程, 这种设计方式对设计工程师和施工者都提出了一定的要求: a) 设计者将原始的三维设计概念和思想抽象成相关联的平面三向视图并以二维平面图的形式来展示, 这种设计方式往往难以完全表达设计者的原始设计思想, 易出现差错和缺漏; b) 施工者又要将平面信息想象成三维的形体才可以进行施工, 设计者与施工者之间表达和理解的差异往往也带来了差错。而三维设计则可以完全避免这种三维—二维—三维的繁冗过程。根据三维设计概念直接进行三维设计, 输出的三维设计成果可以非常直观和完整地表达设计师的思想。只有三维设计才能完成思维过程与设计过程的统一, 才是真正意义上的 CAD, 故三维设计是水利水电工程设计的必然趋势。

为了提高重力坝三维设计水平, 本文提出了基于重力坝三维设计的 CAD 动态交互系统。此系统以工程设计人员最熟悉的 AutoCAD 为基础, 利用 VB 6.0 程序语言对 CAD 进行二次开发, 着重于系统与 CAD 的动态数据交互, 减少计算过程中计算参数的人为输入, 采用动态交互功能实现计算剖面信息和计算

收稿日期: 2012-05-16; **修回日期:** 2012-06-30 **基金项目:** 国家创新研究群体科学基金资助项目(51021004)

作者简介: 张社荣(1960-), 男, 天津人, 教授, 博士, 主要研究方向为水工结构静动力分析与研究(tjuzsr@126.com); 撒文奇(1985-), 男, 博士研究生, 主要研究方向为水工系统开发; 杜成波(1986-), 男, 博士研究生, 主要研究方向为水工系统开发; 韩启超(1985-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为水工系统可视化。

系统的有效结合,通过动态交互功能减少了大量复杂数据的人为干预,通过计算结果和断面信息的动态交互达到快速、智能化地完成断面设计的目的,可以提高设计人员的工作效率。设计完成的三维成果还可直接导入到 ANSYS 等通用有限元软件中进行数值分析。

1 基于三维设计的 CAD 动态交互系统

1.1 系统总体设计

系统包括前处理、计算、后处理三个模块。其中前处理模块实现坝体三维模型的建立和及时预览;计算模块实现对设计坝体体形的计算;后处理模块实现坝体三维工程图的输出和计算报告的自动生成。系统详细总体设计结构如图 1 所示。

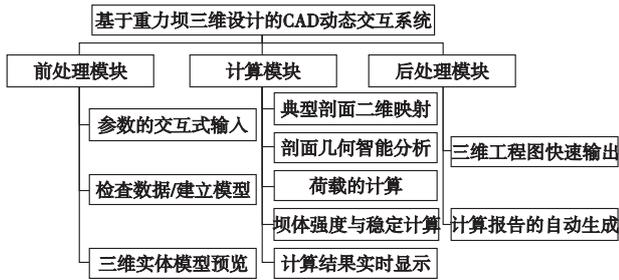


图1 基于重力坝三维设计的CAD动态交互系统总体结构

1.2 系统主要模块功能及实现

1.2.1 前处理模块

此模块的作用是利用三维参数化实体造型技术实现坝体三维模型的建立,为后续的计算和后处理模块提供基础。模块目前包含比较常见的四种重力坝坝段,分别是溢流坝段、转弯坝段、引水坝段及挡水坝段。

参数化实体造型技术^[2]是参数化设计在实体造型中的应用。参数化设计是通过改动图形的某一部分或某几部分的尺寸,改变图形的尺寸约束,自动完成对图形中相关部分的改动,从而实现对图形的快速修改和设计,可极大地提高 CAD 系统的图形输入和几何造型效率。

AutoCAD 中三维模型的建立主要通过两种方式:a)创建一系列的常规三维实体,然后对这些实体进行布尔运算(AcDb::kBoolUnite(并集)、AcDb::kBoolIntersect(交集)和 AcDb::kBoolSubtract(差集)三种类型)实现三维模型的建立;b)建立多段线,形成面域,通过对面域的拉伸、旋转生成自定义形状的三维实体。本系统通过对重力坝单坝段作深入的几何构型分析,得出相互独立的参数,选择第二种方法进行三维模型的建立。以下程序说明溢流坝段三维参数化实体模型的主要创建过程:

```

...
fhbj = Val(Text12(1).Text); fhjd = Val(Text13(1).Text)
‘各种参数的读取
...
Dim YLBPpoint() As Double
‘创建溢流坝断面顶点坐标动态数组,并根据参数赋值
...
Dim Newpline(0 To 1) As AcadLWPolyline
Set Newpline(0) = AcadDoc.ModelSpace.AddLightWeightPolyline

```

(YLBPpoint) ‘根据顶点坐标创建闭合多段线

```
Dim Newregion As Variant
```

```
Newregion = AcadDoc.ModelSpace.AddRegion(Newpline)
```

‘将多段线转换成面域

```
Dim Newsolid as Acad3DSolid
```

```
Set Newsolid = AcadDoc.ModelSpace.AddExtrudedSolid(Newregion(0), D, 0)
```

‘将面域按照制定坝段宽度拉伸成三维实体

为满足不同设计阶段的设计需要,使系统具有广泛的适用性,系统允许用户通过以上操作确定坝体断面的基本尺寸后输入细部结构(如闸墩、孔口等)的尺寸完成对于整个重力坝的三维设计。细部结构的尺寸参数输入是否合理是需要经过检验的。为此,系统开发了 CAD 与有限元软件 ANSYS 的接口^[3],通过系统与 CAD 的动态交互以及 CAD 与有限元的动态交互实现了对细部结构整体应力性态的快速判定,并根据规范^[4]规定的应力图形法进行快速的配筋计算。参数化设计界面及效果如图 2、3 所示。

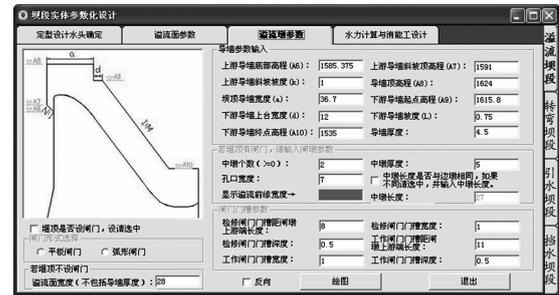


图2 溢流坝段参数化设计参数输入系统界面

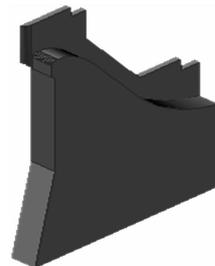


图3 溢流坝段参数化设计成果

1.2.2 计算模块

在重力坝设计初期,为了研究设计的合理性,往往需要对设计进行相应的验证。用户通过选择性的输入坝体典型断面结构参数,首先得到的是更为形象、直观、与设计人员思维过程更加一致的三维模型。然而,参数化快速建立的三维模型的合理性是需要验证的。现行的重力坝设计规范^[4]规定重力坝的设计首先应该选取典型控制断面,并通过强度与稳定计算验证初拟断面的合理性,进而完成整个坝体的设计,是从二维到三维的设计过程,对于三维整体模型如何直接验证其合理性,规范^[4]并没有给出明确的说明。为了与现行的重力坝设计规范接轨,此模块通过三维到二维的映射将三维模型的剖面映射到指定的工作平面上,得到二维平面计算模型,并采用规范^[4]方法对设计进行平面材料力学方法检验。

1) 典型剖面二维映射

二维计算模型的映射过程正是系统与 CAD 的第一次交互过程。系统首先通过 GetEntity 方法向 CAD 发送指令,拾取一

个 Acad3DSolid (三维实体) 图元对象,当用户选择一个图元对象后,CAD 会以变量的形式返回给系统,系统利用 ObjectName 图元属性判断此对象是否为 Acad3DSolid 对象。若不是则给出错误提示对话框,提示用户重新选择;若为 Acad3DSolid 对象,系统会向 CAD 发送 GetBoundingBox 指令得到坝段在水平面上沿坝轴线方向上包络边框的最大和最小坐标点。系统得到此两点坐标后计算其中点;然后系统向 CAD 发送 SectionSolid 指令剖切出坝段的典型剖面 (AcadRegion 面域对象);接着系统利用 GetUCSMatrix 函数从 CAD 中返回坐标转换矩阵 [S];最后系统向 CAD 发送 TransformBy 指令和坐标转换矩阵实现剖面在指定工作面上的重构。第一次动态交互流程如图 4 所示。

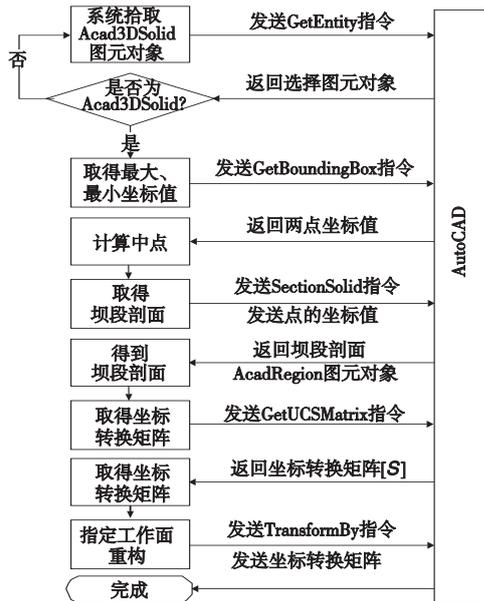


图4 第一次交互流程

2) 剖面几何智能分析

在几何智能分析之前,需要提取二维剖面的几何信息,即系统与 CAD 的第二次交互。首先系统利用 AcadRegion 属性函数 area(面积)与 centroid(质心)从 CAD 中返回其面积与质心世界坐标,面积乘以混凝土容重即得到坝体重量,质心坐标与坝底形心坐标的差值即得到坝体重力对底面形心的力臂;然后将其转换成 AcadLWPolyline (优化多段线) 图元对象,利用其属性函数 Coordinates() 从 CAD 按顺时针顺序返回其所有控制点世界坐标,随后系统对剖面进行几何智能分析^[5]。图 5 给出了不同坝体断面轮廓的几何智能分析图解。

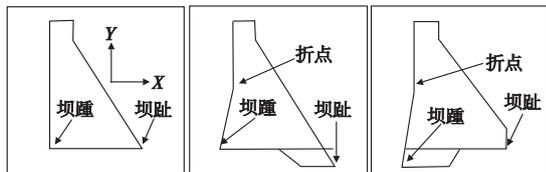


图5 几何智能分析图解

由以上几种坝体断面轮廓可以看出:

a) 断面的坝踵点坐标必须满足式(1):

$$(x, y)_{踵} = \begin{cases} \min \{x_i, i = 1, 2, 3, \dots\} \\ \min \{y_i, i = 1, 2, 3, \dots\} \end{cases} \quad (1)$$

其中, i 为断面控制点的序号,下同。

b) 断面的坝趾点坐标必须满足式(2):

$$(x, y)_{趾} = \begin{cases} \max \{x_i, i = 1, 2, 3, \dots\} \\ \min \{y_i, i = 1, 2, 3, \dots\} \end{cases} \quad (2)$$

c) 坝顶高程点坐标值必须满足式(3):

$$(x, y)_{顶} = \max \{y_i, i = 1, 2, 3, \dots\} \quad (3)$$

d) 上游坝坡折点必须是坝踵的下一个点且 X 坐标值大于坝踵的,满足式(4):

$$(x, y)_{折} = \begin{cases} i_{折} - i_{踵} = 1 \\ x_{折} = x_{踵} & \text{上游无折坡} \\ x_{折} > x_{踵} & \text{上游有折坡} \end{cases} \quad (4)$$

e) 此外还需要得到坝趾前四个点的坐标值,以此来判断下游坝坡的轮廓。计算下游水重的方法不同,如图 6 所示。

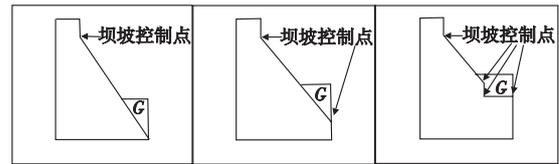


图6 下水重计算示例

至此系统得到了所需要的断面数据信息,系统会根据控制点的坐标判断坝体断面上游是否有折坡,坝底是否为平面,并自动计算上、下游坡度。以图 3 中间断面形式为例系统判别提示为“此剖面上游折坡坡度为 0.2,下游坡度为 0.75,底面为折面!若有误请查看帮助”。

3) 荷载的计算

系统与 CAD 的第三次交互主要是荷载的计算(以上游水压力为例)。设计人员通过交互界面输入上游水位,系统通过内部坐标映射到 CAD 模型中,与坝踵点、上游折坡点坐标进行关联,按照水力学中求解水压力的图解法绘制压强分布图;最后利用 area 与 centroid 属性函数从 CAD 中返回其面积与质心世界坐标,面积即为上游水压力,质心坐标与坝底形心坐标的差值即得到上游水压力对底面形心的力臂。采用同样的方法可以计算出下游水压力、扬压力和淤沙压力等外荷载。至此系统已经得到了全部计算数据信息。输入材料等参数后,系统会根据规范^[4]相关规定和公式自动完成坝体强度与稳定的计算。

4) 计算结果实时显示

这是系统与 CAD 的最后一次动态交互,发生在计算完毕后,即在 CAD 中即时显示计算结果。例如,显示深层抗滑稳定计算中搜索出的最危险滑动面组合和振型分解反应谱法的振型图^[6]。根据抗滑稳定和强度计算,若出现稳定和强度不满足规范^[4]要求,则调整相关参数重新设计断面。

通过以上可以看出,在整个计算过程中,系统保持与 CAD 的动态交互,通过数据的自动传递不仅省去了纯程序计算中输入大量断面几何参数的时间与中间参数计算的复杂编程过程,而且能够计算各种复杂断面形式,且精确度得到很大的提高,具有广泛的适用性。

1.2.3 后处理模块

此模块包含以下两个部分:

a) 三维工程图快速输出。工程图的绘制在设计过程中占用大量的时间,故开发工程图快速输出工程是十分必要的。

工程图快速输出子模块可以快速、批量完成二维及三维工程图的打印输出(输出形式为 pdf 文件),能够快速创建剖视图、剖面图,系统提供等轴测图的三维辅助快速标注功能,免去了用户三维图标注时建立局部坐标系等的繁琐操作,并自动插入标准图框;系统还提供了调色功能,能够保证出图的美观。具体效果如图 7 所示。

b)计算报告的自动生成。此子项的功能是输出材料力学法计算结果到 Microsoft Word 文档中,双击该功能菜单后,系统使用 CreateOleObject 启动 Word,然后以 OLE 方式对 Word 进行控制,按照事先制定的报告模块进行自动输出。

2 工程实例应用

国内某规划阶段水利水电工程主要建筑物为 1 级,确定正常蓄水位为 1 619.0 m,相应下游水位为 1 470.753 m,设计洪水位与正常蓄水位相同,校核洪水位为 1 621.97 m,相应下游水位为 1 497.769 m;拟定坝基最低点高程为 1 422.0 m;地基与混凝土之间的摩擦系数为 1.12,粘聚力为 1.17 MPa;坝基底部岩体层面节理角度变化范围为 50°~75°,节理摩擦系数为 0.985,粘聚力为 1.1 MPa,反倾节理角度变化范围为 17°~60°,节理摩擦系数为 1.16,粘聚力为 1.16 MPa;坝前淤沙高程为 1 540.0 m,泥沙浮容重为 9.5 kN/m³,内摩擦角 24°;当地地震烈度为 VII 度。

根据以上设计资料,首先拟定坝体各参数的初始值并建立参数化三维模型,选定计算工况(分为正常蓄水位、正常蓄水位+地震、校核洪水位三种工况),然后利用系统进行断面的稳定与强度计算。下面以正常蓄水位+地震工况为例介绍计算过程。

2.1 坝体参数化设计

拟定坝体最大坝高 202.0 m,坝段宽度 20 m,坝基长度 163.35 m,坝顶宽度为 16 m,上游折坡高 78.0 m,坡度为 1:0.2,下游面距坝底 167.666~184.838 m 之间为反弧段,反弧半径为 30 m,反弧角度 35.28°,下游坡度为 1:0.75。参数化模型如图 8 所示。

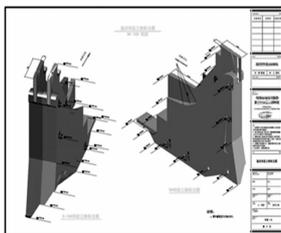


图7 三维工程图输出效果

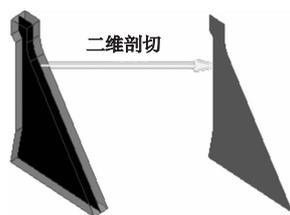


图8 三维参数化建模成果与二维切片

2.2 荷载计算

根据参数化设计结果,系统通过 Inputbox() 输入框读入上、下游水位,上游淤沙高程后,系统经过交互计算得出坝体自重 15 422.825 kN;上游水压力水平分量为 190 358.145 kN,竖直分量为 24 179.688 kN;下游水压力水平分量为 11 658.474 kN,竖直分量为 8 743.890 kN;扬压力为 86 289.211 kN;淤沙压力水平分量为 27 892.814 kN,竖直分量为 11 707.800 kN;地震荷载(振型分解反应谱法)坝头折坡面水平剪力为 11 779 kN,弯矩为 120 840 kN·m,坝基

面水平剪力为 137 210 kN,弯矩为 11 986 000 kN·m。荷载 CAD 动态即时显示效果如图 9 所示。

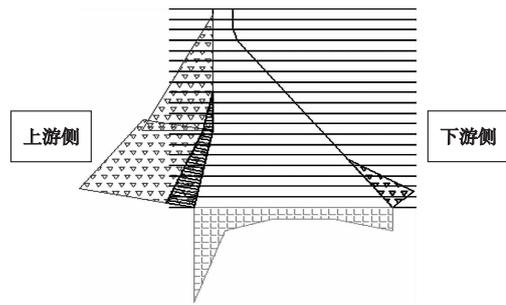


图9 计算荷载CAD分布截图

图 9 中三角填充分别表示上、下游侧水压力分布;四方格填充表示扬压力分布;平行线条填充表示上游侧淤沙压力分布。从 CAD 图中可以看出,所有的荷载均为一个封闭的面域,系统通过动态交互,利用 area 与 centroid 属性函数返回其面积与质心坐标值,经过简单分解处理后即可进行计算。图 9 中的水平横线为振型分解法求解前划分水平条块分界线,用此法计算地震荷载时,需要每一条分界线的几何信息。通过动态交互,系统利用 IntersectWith() 方法从 CAD 中返回每一条分界线与坝体轮廓线的若干个交点坐标,据此坐标值可以方便地得到所有计算数据,较其他方法体现出了较大的优势。图 10 为振型分解反应谱法计算坝体 CAD 前五阶振型图。

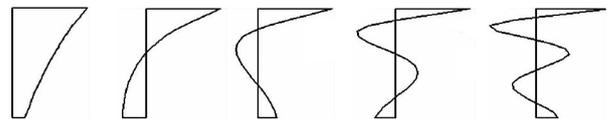


图10 振型分解反应谱法计算坝体CAD前五阶振型图

2.3 计算结果

通过计算得出:在地震作用下,建基面抗滑稳定结构系数为 0.960,深层抗滑稳定结构系数为 0.935,均大于规范^[4] 允许值 0.65。图 11、12 分别为系统自动搜索的最危险滑动面组合 CAD 截图及搜索记录文件。坝踵压应力为 0.729 MPa,无拉应力产生;坝趾的抗压强度结构系数为 1.650,大于规范^[4] 允许值 1.2,满足设计要求;坝头折坡处拉应力为 1.897 MPa,超过了混凝土的抗拉强度,这与实际规律相符,建议在实际工程中提高该部分混凝土强度等级或配置适当钢筋,来保证其抗震安全性。其他两种工况计算结果为:抗滑稳定结构系数最小值 1.574,出现在正常蓄水位工况,大于规范^[4] 允许值 1.2;坝踵均无拉应力产生;坝趾抗压强度结构系数最小值 2.136,出现在正常蓄水位,大于规范^[4] 允许值 1.2。不同工况下稳定和强度均满足设计要求,可知坝体设计合理。

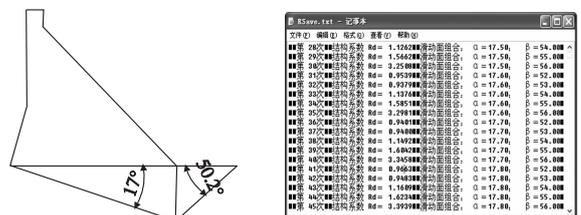


图11 最危险滑动面组合CAD显示 图12 系统搜索记录文件截图

(下转第 175 页)

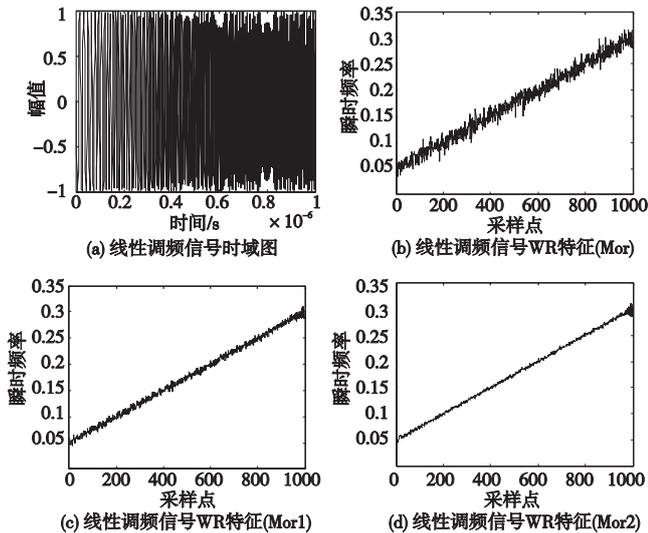


图7 线性调频信号WR特征

从图7对比中可得出,利用改进 Mor2 小波提取线性调频信号瞬时频率精确度相对于原始 Morlet 有较大提高。但在提取特征末端出现相比前面较大的波动,但总体效果相比于 Mor1 和原始 Morlet 小波提取特征曲线较好。虽然噪声影响导致频率估计出现较大误差,但仍能从图中获取到瞬时频率呈线性变化,且与理想情况变化斜率相同。因此,根据第 2、3 章理论分析与图 7 的实验结果可以得出结论:基于改进 Morlet 小波的脊线特征提取精度和抗噪性能要优于基本 Morlet 小波,它能更准确地估计雷达信号的瞬时频率。

5 结束语

本文提出了一种基于改进 Morlet 小波的小波脊线方法。通过分析小波脊线原理和 Morlet 小波各种参数对提取调制雷达信号小波脊线特征曲线的影响,提出改进的 Morlet 小波原子。实验表明,使用改进的小波提取调制信号的脊线特征具有

较好的抗噪性能,在辐射源信号分选识别方面具有较好的应用前景。

参考文献:

- [1] 韩俊,何明浩,冒燕. 低信噪比下雷达信号脉内特征的提取[J]. 雷达科学与技术,2007,3(5):220-223.
- [2] BOUALEM B. Estimating and interpreting the instantaneous frequency of a signal II; algorithms and application [J]. Proceedings of the IEEE,1992,80(4):540-568.
- [3] GUSTAVO L R, JESUS G ALVORA S. Digital channelized receiver based on time frequency analysis for signal interception [J]. IEEE Trans on Aerospace and Electronic Systems,2005,41(3):879-898.
- [4] DJUMVIC I, STANKOVIC L J. An algorithm for the Wigner distribution based instantaneous frequency estimation in a high noise environment [J]. Signal Processing,2004,84(3):631-643.
- [5] DELPART N. Asymptotic wavelet and Gabor analysis extraction of instantaneous frequencies [J]. IEEE Trans on Information Theory, 1992,38(3):644-664.
- [6] 郁春来,万建伟,徐如海,等. 改进小波脊线法算法分析和仿真 [J]. 现代雷达,2005,27(8):46-48.
- [7] 任春辉,魏平,肖先赐. 改进的 Morlet 小波在信号特征提取中的应用 [J]. 电波科学学报,2003,18(6):633-637.
- [8] 陈昌孝,何明浩,朱元清. 基于综合时频检测的雷达信号脉内提取 [J]. 弹箭与制导学报,2008,28(4):215-218.
- [9] 李平,康宏,童宁宁. 一种低信噪比下二相编码信号脉内特征提取方法 [J]. 现代防御技术,2010,38(4):122-126.
- [10] SHEENNA M J. The discrete wavelet transform; wedding the a trous and Mallat algorithm [J]. IEEE Trans on SP, 1992,40(10):2464-2482.
- [11] 余志斌,陈春霞,金炜东. 一种新的 Morlet 小波及其在雷达信号特征提取中的应用研究 [J]. 电路与系统学报,2010,15(1):129-134.
- [12] HONG Liang, HO K C. Identification of digital modulation type using the wavelet transform [J]. IEEE MILCOM,1999(1):427-431.

(上接第 168 页)

3 结束语

本研究基于重力坝极限状态设计的方法和原则,利用 VB 6.0 可视化编程工具实现了重力坝的三维设计程序化,在整个设计过程中通过不断与 CAD 进行动态交互,利用 CAD 强大的几何分析功能,实现了 CAD 设计和计算分析的有效结合,很大程度上提高了计算速度和精度。结合本系统在实际工程中的应用得出以下结论:

a) 基于三维设计方法,通过三维参数化实体造型技术可快速建立重力坝坝体三维实体模型,并满足各个设计阶段的需要,为设计人员提供一个直观的设计成果,大大增强了设计可视化程度。

b) 通过三维参数化设计可快速实现重力坝断面设计,结合动态交互的计算系统可实现对众多方案的快速比选,为设计人员提供了方便。

c) 采用动态交互功能实现设计和计算系统的有效结合,通过动态交互功能减少了大量复杂数据的人为干预,通过计算结果和断面信息的动态交互达到快速、智能化地完成断面设计的目的,使设计人员提高了工作效率。

d) 利用 VBA 技术开发了三维工程图快速输出子模块,能

够快速输出可直接用于工程施工的设计坝段三维、二维工程图纸,并且实现了工程图纸的半自动标注,为设计人员节省了大量的作图劳动时间。

e) 根据本系统计算结果及在工程中的实际应用,计算结果可靠、可满足设计要求,特别是对于水电建设的初期可研阶段具有较大的实用性,可快速评价设计方案和修改方案,缩短设计周期。

f) 本文系统以工程设计人员最熟悉的 AutoCAD 为基础,利用 VB 6.0 程序语言对 CAD 进行二次开发,便于设计人员掌握和理解,故适用性较广。

参考文献:

- [1] 张社荣,顾岩,张宗亮. 水利水电行业中应用三维设计的探讨 [J]. 水力发电学报,2008,27(3):65-69.
- [2] WANG Song-hao, MELENDEZ S, TSAI C S, et al. Parametric design and design associability in 3D CAD [J]. Materials Science Forum, 2008,594:461-468.
- [3] 孙立铸,王爱华. 基于特征的 CAD/CAE 集成中并行建模技术研究 [J]. 计算机应用研究,2009,26(3):917-919.
- [4] 中华人民共和国电力行业标准 DL5108—1999,混凝土重力坝设计规范 [S]. 北京:中国电力出版社,2002.
- [5] 肖岸纯,丁建军. AutoCAD 图形识别系统的研究 [J]. 湖北工学院学报,2004,19(2):48-50.
- [6] 刘国明. 古田溪一级重力坝悬臂梁振型分解反应谱法抗震计算 [J]. 水力发电学报,2004,23(1):31-35.