

文章编号:1000-582X(2010)07-108-07

基于 GIS 的城市污水管网监测维护决策支持系统设计

胡学斌^a, 颜文涛^b, 何 强^a

(重庆大学 a. 三峡库区生态环境教育部重点实验室; b. 建筑城规学院, 重庆 400045)

摘 要:城市污水管网的监测维护是城市水环境管理的重要环节,为了高效维护污水管网,将 GIS 技术和 DSS 技术应用于城市污水管网的监测和维护中,采用 VB 和标准 ActiveX 组件的形式,以 SuperMap Objects 为开发平台,提出基于 GIS 的城市污水管网监测维护决策支持系统(简称 PMMDSS)的构建方法,对空间系统和模型系统进行系统集成,实现污水管网监测维护的决策分析。结合四川岳池的实例研究,开发出能够完成对污水管网的健康状况进行动态监测,提供动态的可视化维护优化决策的应用系统软件,为城市污水管网系统安全运行提供空间决策支持平台。

关键词:城市污水管网;监测维护;地理信息系统;决策支持系统;系统构建

中图分类号:X703

文献标志码:A

Design of GIS-based monitoring and maintenance decision support system for urban sewage pipe network

HU Xue-bin^a, YAN Wen-tao^b, HE Qiang^a

(a. Key Laboratory of Three Gorges Reservoir Region's Eco-environment, Ministry of Education;
b. College of Architecture and Urban Planning, Chongqing University, Chongqing 400045, P. R. China;)

Abstract: Monitoring and maintenance of sewer system is important to city water environmental management. A method for pipeline monitoring and maintenance decision support system (PMMDSS) based on geologic information system (GIS) and decision making system (DSS) is developed for upgrading sewer system maintaining efficiency. Visual basic (VB) and standardized Active X components are employed in PMMDSS, which selected SuperMap Objects as the development platform. PMMDSS integrates the spatial and model system to achieve the decision analysis for the sewer system monitoring and maintenance. An application Software is developed based on a case study in Yuechi Country of Sichuan Province. The software can be used to dynamically monitor the health condition and provide an optimum visual decision making platform for the city sewer system.

Key words: sewage; monitoring and maintenance; GIS; decision supporting system; system construction

城市污水管网的监测维护管理工作是水环境管理的重要环节,如何高效的管理和维护城市污水管道系统,已成为城市管理迫切希望解决的问题。赵新华等(2002)和张力等(2002)在 GIS 平台上利用 VB 语言建立了基于 GIS 的污水管网信息管理系

统,解决了地图和文字信息的统一管理,可存储全部管网图形和属性信息,能方便对管网信息进行双向查询^[1-2];金建华等(2004)对具有污水管网流量计算功能及水质分析功能的 GIS 系统进行了研究^[3];姜永发等(2005)通过建立城市排水管网网络模型和

收稿日期:2010-01-26

基金项目:国家水体污染控制与治理科技重大专项资助项目(2008ZX07315-001)

作者简介:胡学斌(1964-),男,重庆大学副教授,博士,主要从事水污染控制理论与技术方向的研究,(E-mail)xbhu@cqu.edu.cn.

GIS 空间数据模型,利用网络流的最大流的值为最小割的容量计算排水管网的排水量,分析现状管网的排放能力^[4];陈宇辉等(2006)对城市给水排水管网专用 GIS 平台的开发与应用进行一次尝试,可以实现给排水管网资产管理、管线设备统计查询、优化调度、事故处理等一系列功能^[5];田中凯等(2007)以 Oracle 数据库系统和 Arcgis 软件作为软件平台来构建排水设施管理 GIS 系统,实现对排水设施空间和属性信息的综合管理,实现排水设施信息管理的科学化和规范化^[6];赵冬泉等(2008)基于 GIS 对 SWMM 城市排水管网模型的快速构建技术也进行了相关的研究^[7];周玉文等(2009)研究了市政给排水管网 CAD 数据向 GIS 数据的转换过程,探讨其中存在的问题,提出 CAD 到 GIS 数据转换的解决方案^[8];英国学者提出了有选择性污水管道维护的决策支持模型^[9],比利时开发了水规划程序,均对“关键污水管道”或“战略性污水管道”即破坏后预见其维修费用可能最高的管道进行修复,忽略了破坏后维修费用小但是影响后果严重的管道。上述研究均存在评价和决策没有有机结合的问题,借鉴葡萄牙学者提出污水管道系统标准化性能评价模型^[10],将健康评价综合到维护优化决策模型,构建基于 GIS 的城市污水管网监测维护决策支持系统(简称 PMMDSS),先对污水管道进行预报健康度评价,再确定检测次序和检测方案,然后对污水管道的实际综合健康度进行评价,从若干个可行的维护方案中,选取经济、环境和社会效益综合最优的维护方案,为城市污水管网系统可靠、经济、高效运行提供空间决策平台。

1 系统总体设计

1.1 设计思想

建立管网健康状况的动态监测系统,提供维护优化决策方案和事故处理等功能;建立面向管理的污水管网监测决策支持系统,使管网信息由静态的

手工作业或计算机管理转变为动态 GIS 管理,最终实现管网信息的实时在线 GIS 管理。

系统应具备以下功能:地形图的存储管理、局部修改和更新;污水管网基础空间和属性数据存储管理和编辑功能;污水管网属性和空间数据查询以及统计功能;污水管网健康度监测功能;污水管网维护优化决策功能;紧急事故处理和抢修预案功能;多种输出功能等。

污水管网监测维护决策支持系统选用 SuperMap Objects 为地理信息系统平台,利用地理信息系统理论和技术,在建立管网基础信息库的基础上,结合污水管网管理的业务流程,实现对污水管网综合信息的科学管理,是对污水管网进行科学管理的决策支持系统。基于 ActiveX 组件,采用 Visual Basic 的开发语言,选用关系型数据库管理系统进行功能模块的开发。

1.2 总体结构

通过对 PMMDSS 的系统目标和功能需求分析,得到 PMMDSS 的总体功能结构(图 1),大致可分为 4 大基本功能:1)数据管理,包括了空间数据管理和属性数据管理,其中空间数据管理主要完成对基础空间数据管理和管网空间数据管理,属性数据管理完成对管网属性数据和其它属性数据(如地下水位、地质状况和土壤类型等)的管理。2)模型管理,包括数据处理模型和数学模型,其中数学模型完成对管道混凝土结构可靠度和失效概率的计算,对污水管道进行预报健康度评价和实际健康度评价计算,污水管道的维护优化决策,以及污水管道事故影响评价和最短维护路径计算。数据处理模型主要完成对数据模型的计算结果或初始属性数据进行处理,可完成投影计算、聚类分析和统计运算。3)决策分析,可完成对污水管道的社会环境影响评价,预报健康度分析评价以及检测次序分析。4)系统管理,主要是完成对用户和系统参数的管理。

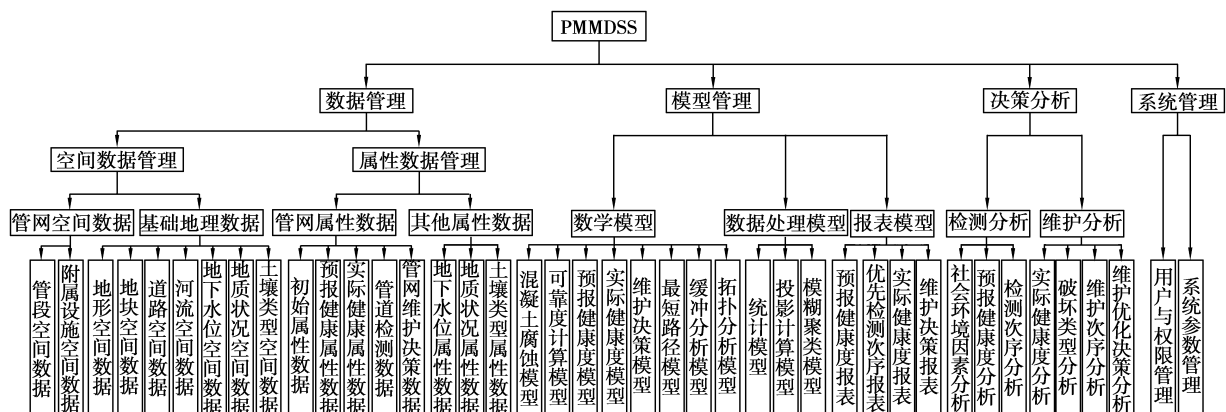


图 1 PMMDSS 的系统总体功能结构图

2 系统构建

2.1 空间系统构建

开发城市污水管网监测维护决策支持系统,对城市范围内的排水管网和相关的社会、环境、经济等信息数据进行管理,便于信息数据的查询和了解区域污水管网的运行状况,如排水管网和排污单位的空间分布、排污管网的水力结构状况、排污管网破坏可能的社会影响等,能够实现信息的修改、添加、删除等基本操作。目前 GIS 已经成为实现空间分析功能的主要工具,许多空间决策支持系统是基于 GIS 平台上开发的^[11-14],通过 GIS 软件为用户提供的 ActiveX GIS 控件,(如 MapX、MapObjects、SuperMap Objects、ArcObject 等),在 VB、VC、Delphi、C++ 等标准的软件开发环境中开发应用系统。

2.2 数据库构建

PMMDSS 数据库可分为空间数据库和属性数据库。空间数据库主要包括基础地理数据和管网空间数据,由地形、地块、道路、河流、地下水位、地质状况、土壤类型等基础地理空间数据和管网的检查井、提升泵站等管段及附属设施空间数据构成。

属性数据库主要由对应空间数据的属性(如地下水位、地质状况、土壤类型、房屋层数等)和污水管网各组成成分(如检查井、提升泵站等)的属性数据(测点号、规模等)构成。主要涉及到以下几个数据库:污水管道空间数据库;污水管道初始属性数据库,包括管网计算表,腐蚀介质浓度表,水力因素表,结构因素表,环境因素表,社会因素表;污水管道预报因素健康属性数据库,包括水力因素、环境因素和社会因素健康属性数据库,结构因素健康属性数据库,污水管道预报综合健康属性数据库;污水管道破坏属性数据库,主要包括实际破坏数据类型和强度;污水管道实际因素健康属性数据库,包括环境因素、社会因素健康属性数据库,状态因素健康属性数据库;污水管道实际综合健康属性数据库;污水管网维护决策数据库,包括污水管道最优维护决策表。

数据库的调用由程序开发设计语言中的数据空间和 GIS 软件来共同实现。采用 ActiveX 数据对象即 ADO 的数据访问方式,程序编写过程中需要执行的数据库操作包括建立与数据库的连接、执行数据库命令和查询、对数据表中数据进行检索、执行 SQL 命令以及关闭数据库连接等。

SQL Server、Sybase、Oracle 等大型数据库管理系统(DBMS)是构建数据库的主要工具,在 ArcSDE 的支持下,可与 GIS 空间数据库进行系统集成。构

建数据库时,将空间数据与属性数据分开组织存贮,把属性数据存储在与商业的关系型数据库中,空间(矢量或栅格)数据存储在与空间数据管理系统中,通过数据表中的关键字段(标示码)来实现属性数据和空间数据的连接,增强了系统数据处理的灵活性。

在构建数据库时,注意与模型库的接口,在数据库设计时需要考虑模型库的输入和输出数据的格式、要求和标准,必要时需要对模型输入数据进行预处理。

2.3 系统模型构建

PMMDSS 模型主要由普通数学模型和专业模型两部分组成:普通数学模型主要包括正态分布模型、聚类模型;专业模型主要包括失效概率模型、预报健康度评价模型、实际健康度评价模型和管网维护优化决策模型。

通过分析费用函数,基于实际健康度根据每段污水管道的健康度评价结果,构建社会、环境与经济多目标维护优化决策模型,总预期费用最小的最优解构成了管网的维护决策矩阵,是一类确定型决策问题。该模型既考虑了把维护工作重点放在有早期破坏趋势的管道上,又考虑了维护费用的节约。

决策支持系统涉及社会、经济、环境等方面的内容,能够利用来自数据库的静态和动态信息,进行污水管网健康状况的动态预测和实际评价,按照目标函数和约束条件求解决策模型。

3 实例研究

选取四川岳池城东区作为实例进行研究,采用 SuperMap Objects 组件和 VB 语言,依据前文所述系统构建方法,研制出城市污水管网监测维护决策支持系统,实现了管网健康状况评价和维护决策分析等基本功能,在此仅重点对污水管网的维护优化决策模型与 VB 的集成开发进行论述。

3.1 决策优化模型

确定污水管网的维护方案需要考虑经济、环境、社会等多重因素,维护决策应该反映经济、环境、社会效益综合最优的原则。笔者通过构建反映管道实际状况、社会影响、环境影响等方面的综合指标即污水管道实际健康度,并引入一个社会环境惩罚系数 δ ,将多目标决策优化模型简化为单目标决策优化模型^[15]。

目标:总预期费用最小,即检测费用 CI_i 、维护费用 CR_{ki} 和预期破坏费用 CF_{ki} 的总和最小。

$$\min EL_{ki} = CI_i + CR_{ki} + CF_{ki} \quad (1)$$

城市污水管道主动维护的费用不能超过管道的

最大破坏费用,否则可以等到管道破坏后再修补而没有主动维护的必要了,因此应满足以下约束条件

$$CI_i + CR_i < CF_{imax} = \delta \cdot RL_i \cdot CO_i, \quad (2)$$

式中 δ 为第 i 管段的破坏系数, δ 与管道破坏后对区域环境和社会的影响相关,管道对区域环境和社会的影响越大,惩罚系数选取越大。

3.2 功能模块设计

采用模块化结构设计方法,根据系统目标及设计原则,把系统分成若干个符合一定要求的子系统,子系统的划分应便于总系统的功能的实现。子系统

的设计是独立进行的,由若干模块组成。子系统的设计采用由下而上的方法,逐级向上综合,子系统的划分为整个系统的逻辑设计和物理设计提供基础,为整个系统的安全运行提供保证。根据系统所要具备的项目技术内容,结合 SuperMap3.0 的二次开发平台的特点,将污水管网监测维护决策支持系统分成 6 个子系统,分别是地形图库管理子系统、管网输入编辑子系统、管网信息管理子系统、管网健康监测子系统、管网检测维护子系统、管网事故处理子系统(图 2)。

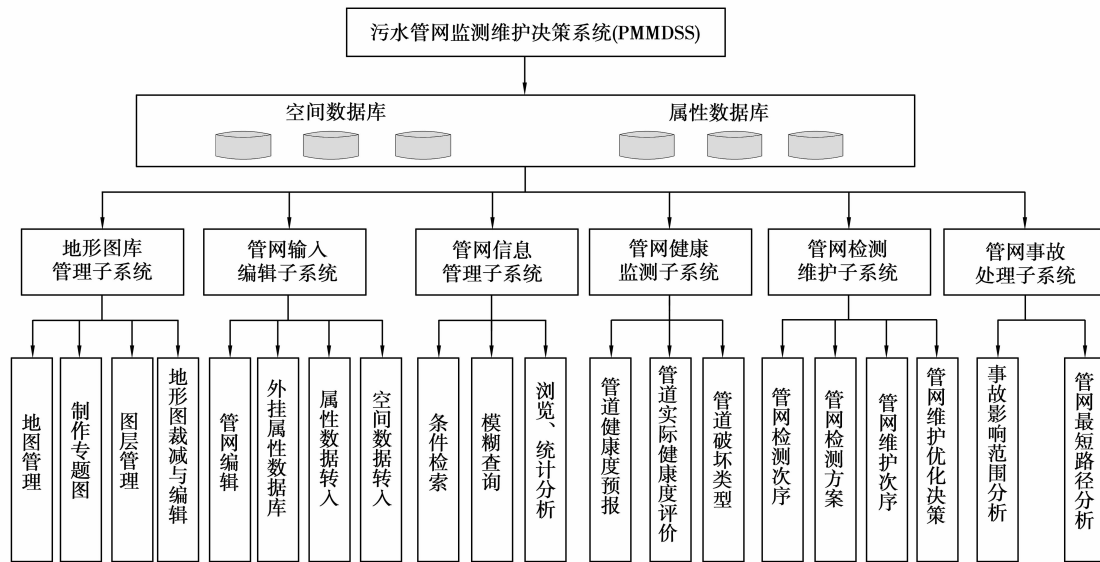


图 2 PMMDSS 的子系统 and 模块结构图

1) 地形图库管理子系统

提供了对地理地图库空间数据和图形属性进行编辑的功能,同时还集成了矢量化和图形输出功能,能够实施灵活高效的图库管理、方便的数据转换,是一个功能较强的图形编辑系统,主要利用 SuperMap3.0 为开发实现平台。

2) 管网输入编辑子系统

管网输入编辑系统提供方便的网络输入手段,构造网络拓扑关系,建立与管网元素相关的属性数据库和提供污水管网的图形属性编辑工具。属性数据的输入按照污水管网各组成成分进行属性输入;提供可视化的编辑功能;管网属性的储存和更新管理。空间资料输入可由空间数据读入、电子簿直接读入或由其他格式数据转入,以及键盘输入。管网编辑及设计:对管线、管点空间数据的各种操作和编辑;对管线、管点参数和属性的编辑和统改。

3) 管网信息管理子系统

管网信息管理子系统是通过一些有效的方法快

速对目前的管网信息进行全面的了解和详细的分析,从而能够指导管理人员高效率、正确地进行管理和抉择。通过提供的查询工具和各种查询方法方便地得到想要的管网的属性资料和信息,用户可通过管网的属性数据来查询和索引管网的属性数据,也可以通过管网的属性数据来查询和索引管网的属性数据。

4) 管网健康监测子系统

根据初始属性数据对污水管道的健康度进行预报,根据实际检测数据对污水管道的实际健康度进行评价,可得到污水管道的破坏类型,动态监测污水管网的健康状况(图 3~5)。

5) 管网检测维护子系统

根据预报健康度得到管网的检测次序和检测技术方案,根据实际健康度得到管网维护次序和维护优化决策方案。管网维护决策子系统就是为了让污水管道的破坏损失和社会环境影响尽量降到最低,对污水管道进行维护决策的系统(如图 6)。



图 3 预报综合健康度评价图(第 10 年)



图 6 管网维护决策图



图 4 实际综合健康度评价图(第 10 年)



图 5 污水管道破坏类型识别图(第 10 年)

6) 管网事故处理子系统

事故是指污水管网中突发的爆管或泄漏等,这类事故通常会造成较大的经济损失和环境影响,所以事故发生后及时制定事故处理方案是非常重要的。用户只需指定事故发生处,系统将能够自动生成事故的影响范围,并制定出最短抢修路径的处理方案,以便及时排除故障。

3.3 决策分析

明确目标函数和约束条件后,就可以将四川岳池污水管网维护优化决策模型,在 VB 平台上编程

运行,构建随时间动态变化的维护优化决策模型。

在城市污水管网的维护优化决策分析中,以各类费用函数的计算为核心,分析计算不同维护方案下的总预期费用。基于管网的实际健康度,对多种维护方案进行分析计算,最小总预期费用解集构成了城市污水管网的维护决策。通过调控分析系统,可以由用户任意设定惩罚系数 δ ,当惩罚系数 δ 增大时采取维护措施的管段数将增加,当惩罚系数 δ 减小时“不处理”方案的管段数将增加。

管网维护优化计算过程由软件系统自动完成,并将结果在空间上中进行显示。维护优化决策结果由系统自动绘成平面图,具有直观易看的特点,适用于管理者进行决策与分析。

3.4 系统模块

1) 管网属性声明——K_Structure. bas

管网的众多属性、变量、预测、实际、决策结果在一个模块文件中声明(K_Structure. bas)

```
Public NE As Integer '管道总段数
Public Type F_WaterFactor ' * 1 水力因素
Public Type F_EnvFactor ' * 2 环境因素
Public Type F_StrFactor ' * 3 结构因素
Public Type F_SocFactor ' * 4 社会因素
Public Type theElementCon ' * 介质浓度
Public Type theForePipe ' * 管网属性及预报健康度评价
Public Type thePractPipe ' * 实际健康度评价
Public Type theMonPipe ' * 维护优化决策结果
' * 决策调整参数
Public rr As Double, alpha As Double
Public Beta As Double, delta As Double
```

2) 数据库操作模块——K_Access. bas

针对数据库操作,编制了专门的数据库操作模

块(K_Access. bas),方便在各个数据库的调用和操作。

```
Public CONN As New ADODB. Connection
    '* ADO 连接声明
Public RS As New ADODB. RecordSet
'* 数据库文件打开
Public Function OpenDataBase(DBname As String)
As Boolean
'* 数据库文件闭
Public Function CloseDataBase()
'* 新建表单
Public Function AddNewTable ( TableName As
String, DataName() As String, DataType() As
String, DataNE)
'* 运行 sql 命令
Public Function ExecuteSql(ByVal sql As String)
As ADODB. RecordSet
```

3) 数学运算模块——K_Clustering. bas

针对正态分布计算、聚类算法,编制了专门的数学运算模块(K_Clustering. bas)

'* 模糊聚类

```
Public Function Fcm (ByRef Data() As Double,
ByVal Cluster As Long, Optional ByVal
CreateIniCenter As IniCenterMethod =
IniCenterMethod. CreateByHcm, Optional
AntiFuzzy As AntiFuzzyMethod = Max, Optional
Exponent As Byte = 2, Optional Maxiterations As
Long = 400, Optional MinImprovement As
Double = 0.01, Optional ByRef CenterByHandle
As Variant) As FcmInfo
```

'* 硬聚类

```
Public Function HCM (ByRef Data() As Double,
ByVal Cluster As Byte, Optional Maxiterations As
Long = 400, Optional MinImprovement As
Double = 0.01) As HcmInfo
```

正态分布积分

```
Public Function Get _ Normal (x1 As Double)
As Double
```

'* 矩阵计算

```
Public Function Martix_times(A() As Double, B
() As Double, C() As Double)
```

.....

4) 可靠度计算模块——K_Reliability. bas

在管网可靠度计算中,编制了专门的计算模块(K_Reliability. bas)

'* 计算失效概率

```
Public Function Get _ Reliability (inDiameter As
Double, EarthDepth As Double, CNT() As
Double, Beta() As Double, SigmaDz() As
Double, MuDz() As Double)
```

5) 预报健康度评价模块——K_AppraiseModal_Forecast. bas

为预报健康度评价创建了专门的模块(K_AppraiseModal_Forecast. bas)

'* 预报健康度评价

```
Public Function theForePipeToForecast()
```

..... 计算 正负向效指标

..... 分因素预测计算 0~50 年

..... 整体预测计算 0~50 年

End Function

'* 预报健康度数学模型计算核心程序

```
Public Sub AppraiseModal(Xi() As Double, Effect
() As Double, w_Forecast() As Double, Ri() As
Double, RiClass() As Integer, ChangeList() As
Integer, NJ As Integer, Ring As Integer)
```

6) 实际健康度评价模块——K_AppraiseModal_Practise. bas

为实际健康度评价创建了专门的模块(K_AppraiseModal_Practise. bas)

'* 实际健康度评价

```
Public Function thePractPipeToPractice()
```

..... 分因素实际健康度计算

..... 实际测度

..... 实际健康度评估值及健康度等级

End Function

'* 实际健康度数学模型计算核心程序

```
Public Function Get _ AttributeVaule (ai() As
Double, Pra_X As Double, vi As Double)
```

7) 管网维护优化决策模块

为对管网维护进行优化决策,创建了优化决策模型中的专门的程序模块(K_MonDecision. bas)

'* 管网维护优化决策

```
Public Function MonDecision()
```

..... 破坏因素计算

..... 管道计算修复长度

..... 方案费用计算

..... 方案决策

End Function

4 结 论

基于 SuperMap Objects 编制了基于 GIS 的污水管网监测维护决策支持系统——PMMDSS。该系统不仅具有常规的污水管网信息管理的功能,同时还能够进行污水管网监测维护决策功能,能够完成管网的管道失效概率计算、管道预报健康度评估、管道实际健康度评估和管网维护方案的决策。所有污水管网监测维护决策支持系统计算程序采用模块插入,与 SuperMap Objects 开发平台完美结合。PMMDSS 平台用户界面的友好,用户体验良好和计算过程的后台化。

PMMDSS 可以将数学模型计算得到的管道数据绑定到 SuperMap Objects 良好的空间数据库中,运用强大的图像绘制功能和所见即所得的图像查询功能,直接在空间管网图形中显示管道预报健康度评估结果、管道实际健康度评估结果、管网破坏因素、各种维护方案的费用及最优管网维护决策方案。整个查询功能无缝连接,属性信息采用标签和列表结合的方式,清晰明了。

PMMDSS 支持直接查看计算得到的多个数据库,支持排序、选定、关联信息查询等功能,可以在整体上把握某个管道在这个管网体系中的状况,方便使用者对决策结果进行判断,从而得到最优的管网维护处理方案。PMMDSS 提供了针对数据库格式的操作,支持将计算得到的数据库转化为其他同类 GIS 平台所支持的文件格式,方便跨平台的使用,扩展了 PMMDSS 平台结果的通用性。

采用 VB 和标准 ActiveX 组件开发的 PMMDSS 系统,提供了宽阔而良好的接口和二次开发功能,实现了可扩展性和开放性的设计原则,完成系统近期开发目标的同时,为中远期的开发目标提供了良好而牢固的基础平台。

参考文献:

- [1] 赵新华,李琼. 城市排水管网信息 GIS 管理系统设计[J]. 中国给水排水, 2002, 18(9):55-57.
ZHAO XIN-HUA, LI QIONG. Design of GIS-based management information system for urban drainage networks[J]. China Water & Wastewater, 2002, 18(9):55-57.
- [2] 张力,王荣和,王声东. 利用组件式 GIS 软件开发排水管网 GIS 系统[J]. 工业用水与废水, 2002, 33(1):55-57.
ZHANG LI, WANG RONG-HE, WANG SHENG-DONG. Design of urban drainage networks based on GIS[J]. Industrial Water & Wastewater, 2002, 33(1):55-57.
- [3] 金建华,曾德飞,杨晓芳. 城市污水管网地理信息系统设计[J]. 武汉理工大学学报, 2004, 26(5):13-15.
JIN JIAN-HUA, ZENG DE-FEI, YANG XIAO-FANG. Design of a urban sewage pipe network GIS [J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2004, 26(5):13-15.
- [4] 姜永发,张书亮,曾巧玲,等. 城市排水管网 GIS 空间数据模型研究[J]. 自然科学进展, 2005, 15(4):465-471.
JIANG YONG-FA, ZEN QIAO-LING. Research on GIS-based spatial data model for urban drainage networks[J]. Progress in Natural Science, 2005, 15(4):465-471.
- [5] 陈宇辉,刘遂庆. 城市给水排水管网系统专用 GIS 平台开发与应用[J]. 给水排水, 2006, 32(1):101-104.
CHEN YU-HUI, LIU SUI-QING. Development and application of urban water-supply and drainage system based on GIS[J]. Water & Wastewater Engineering, 2006, 32(1):101-104.
- [6] 田中凯,刘晓燕,李木子. 武汉市排水设施管理 GIS 项目实施经验[J]. 中国给水排水, 2007, 23(6):55-58.
TIAN ZHONG-KAI, LIU XIAO-YAN, LI MU-ZI. Discussion on experience of GIS project for wuhan urban drainage facilities management[J]. China Water & Wastewater, 2007, 23(6):55-58.
- [7] 赵冬泉,陈吉宁,佟庆远,等. 基于 GIS 构建 SWMM 城市排水管网模型[J]. 中国给水排水, 2008, 24(7):88-91.
ZHAO DONG-QUAN, CHEN JI-NING, TONG QING-YUAN, et al. Construction of SWMM urban drainage network model based on GIS[J]. 2008, 24(7):88-91.
- [8] 周玉文,张红旗,张晓昕,等. 给排水管网数据从 AutoCAD 至 ArcGIS 转换的研究[J]. 给水排水, 2009, 35(10):115-117.
ZHOU YU-WEN, ZHANG HONG-QI, ZHANG XIAO-XIN, et al. Data conversion of water and wastewater pipe network from autocad to arcgis[J]. Water & Wastewater Engineering, 2009, 35(10):115-117.
- [9] FENNER R A. Approaches to sewer maintenance: a review[J]. Urban Water, 2000(2):343-356.

(下转第 122 页)

- [21] 郑怀礼,李凌春,蔚阳,等. 阳离子聚丙烯酰胺污泥脱水絮凝剂的制备[J]. 化工进展,2008,27(4):564-568.
ZHENG HUAI-LI, LI LING-CHUN, YU YANG, et al. Synthesis of cationic polyacrylamide flocculant for sludge dewatering [J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2008,27(4):564-568.
- [22] 卢红霞,刘福胜,于世涛,等. 阳离子聚丙烯酰胺制备条件研究[J]. 化学工程,2008,36(3):72-75.
LU HONG-XIA, LIU FU-SHENG, YU SHI-TA, et al. Study on preparation conditions of cationic polyacrylamide[J]. Chemical Engineering, 2008,36(3):72-75.
- [23] 杭春涛,蒋平平,韩月丽,等. 水溶液聚合制备高固含量阳离子絮凝剂及其应用[J]. 精细化工,2006,23(7):692-695.
HANG CHUN-TAO, JIANG PING-PING, HAN YUE-LI, et al. Preparation and application of high concentration cationic flocculant by aqueous solution copolymerization[J]. Fine Chemicals, 2006,23(7):692-695.
- [24] 丁伟,于涛,曲光森,等. 丙烯酰胺-丙烯酸氧乙基三甲基氯化铵共聚合的竞聚率测定[J]. 应用化学,2009,26(4):392-395
DING WEI, YU TAO, QU GUANG-MIAO, et al. Investigation of the reactivity ratios of acrylamide and 2-acyloyloxyethyl trimethylammonium chloride copolymerization [J]. Chinese Journal of Applied Chemistry, 2009,26(4):392-395.
- [25] 张勤,张幸涛,陈滨,等. 城市污水处理厂污泥调质用絮凝剂的选择[J]. 重庆建筑大学学报,2006,28(1):80-83.
ZHANG QIN, ZHANG XIN-TAO, CHEN BIN, et al. Selection of polymeric flocculant for adjusting the sludge quality of municipal wastewater treatment plant [J]. Journal of Chongqing Jianzhu University, 2006,28(1):80-83.

(编辑 赵 静)

~~~~~

(上接第 114 页)

- [10] CARDOSA M A, COELHO S T, MATOS J S, et al. A new approach to the diagnosis and rehabilitation of sewerage systems through the development of performance indicators[C]// Proceedings of the Eighth International Conference Urban Storm Drainage, 30 August-3 September, 1999, Sydney, Australia. [S. l]: IEEE,1999: 610-617.
- [11] MWENGE KAHINDA J, TAIGBENU A E, SEJAMOHOLO B B P, et al. A GIS-based decision support system for rainwater harvesting (RHADESS) [J]. Physics and Chemistry of the Earth, 2009, 34(13/16):767-775.
- [12] 荆平,贾海峰. 基于 MATLAB 与 GIS 的污水回用决策支持系统开发与应用[J]. 清华大学学报:自然科学版, 2008, 48(3):352-356.  
JING PING, JIA HAI-FENG. Development and application of MATLAB and GIS-based decision support system for wastewater reuse[J]. Journal of Tsinghua University, 2008, 48(3):352-356.
- [13] TSIHRINTZIS V A, FUENTES H R, GADIPUDI R K. Source: GIS-aided modeling of nonpoint source pollution impacts on surface and ground waters [J]. Water Resources Management, 1997, 11(3):207-218.
- [14] BERNER L, BOGOYAVLENSKAYA N, ILIUSHIN S A, et al. Integrated approach to urban facilities maintenance and alarm management [J]. Computers, Environment and Urban Systems, 1995, 19(3):201-206.
- [15] 颜文涛,陈朝晖,龙腾锐,等. 城市污水管道维护优化决策模型的研究[J]. 中国给水排水, 2009, 25(5):95-99.  
YAN WEN-TAO, CHEN ZHAO-HUI, LONG TENG-RUI, et al. Research on municipal sewer maintenance optimization decision model [J]. China Water & Wastewater, 2009, 25(5):95-99.

(编辑 赵 静)