

三维隧道矢量模型生成方法

陈学工, 季兴, 黄伟

(中南大学 信息科学与工程学院, 长沙 410083)

(csujixing@qq.com)

摘要:在矢量模型的基础上设计一种隧道生成方法,在保证隧道形态正确的同时,将隧道模型的生成与连接处的平滑一次性完成。它首先在中心线上插入垂直的断面组,然后根据隧道截面形状生成一组平行线起始点,并将平行线与断面组求交,最后连接对应断面上的交点完成建模。针对隧道连接处处理这个难点,在隧道连接处插入旋转的断面组,使生成隧道体的同时又完成了连接处的平滑处理,既保证隧道无缝连接又降低了算法的复杂度。

关键词:表面重建;三维隧道;矢量模型;连接;平滑处理

中图分类号: TP391.41 **文献标志码:** A

Generation method of 3D tunnel based on vector model

CHEN Xue-gong, JI Xing, HUANG Wei

(Institute of Information Science and Engineering, Central South University, Changsha Hunan 410083, China)

Abstract: On the basis of vector model, this paper presented a method, which could generate 3D tunnel and smooth joints at the same time while making sure the shape of generated tunnel was correct. It planted a series of vertical sections on center lines firstly. After calculating starting points of parallel lines according to the tunnel shape, it got some points by using the parallel lines intersected with sections, and finally connected the corresponding points on adjacent sections to realize modeling. Concerning the tunnel spicing problem, the method inserted rotated sections on joints, generating tunnel and smoothing the joints at the same time. It ensures the seamlessness of tunnel joints and simplifies the method as well.

Key words: surface reconstruction; 3D tunnel; vector model; splicing; smooth processing

0 引言

在数字矿山系统中,隧道作为采矿生产中将矿藏从工作面运送到地面,以及通风、安全输送工人的通道,必然成为一种重要的空间要素。由于隧道在地下纵横交错,单纯用二维的图形无法直观地表达隧道之间的空间关系,因此隧道的三维表面重建成为数字矿山系统的研究热点。

三维空间数据模型从数据描述格式可分为矢量、栅格和矢量与栅格集成3种。基于矢量表示的模型,它是利用三维空间中的点、线、面、体4种基本元素来构造更复杂的对象,它能精确表达各种三维实体的不规则边界,数据存储格式紧凑^[1-2]。在实际隧道模型应用中,每一条隧道都布置有中线点,隧道完全可以抽象为沿着这些隧道的中线,同时每一个中线点以空间坐标存在,这就决定了矿山隧道的数据模型应以矢量模型为主。

目前在矢量模型的基础上,许多学者对隧道建模进行了大量研究。文献[3]研究的三维巷道建模技术把巷道视为空间网络模型,运用巷道中线和加载截面建立三维巷道模型。文献[4]仿照弧段-节点的拓扑数据结构思想,把巷道分为巷道体和巷道间节点,分别对它们进行三维建模。但上述模型处理方法在连接处难以平滑,在进入巷道内部漫游时,会出现“视线偏离”的问题。为克服这些问题,文献[5]采取首先去除交叉处重叠或错切部分生成巷道体,再对巷道拐弯处进行平滑处理的方法。虽然该方法在一定程度上解决了连接处的平滑问题,但由于它将巷道体的生成与拐弯处平滑处理的过

程割裂开来,造成算法复杂度较高。

考虑到已有建模算法的不足,本文采用四边形逼近法模拟隧道,通过在中线连接部分加载旋转的断面来实现隧道的生成与连接处的平滑,在实际应用中十分简便,并取得了很好的效果。

1 绕任意轴旋转变换简单算法

在隧道生成过程中需要将平行线和断面旋转一定的角度,所以如何简化绕任意轴旋转的算法将显得至关重要。

三维空间中的旋转变换比二维空间中的旋转变换复杂。除了需要指定旋转角外,还需指定旋转轴。若以坐标系的3个坐标轴 X 、 Y 、 Z 分别作为旋转轴,则点实际上只在垂直坐标轴的平面上作二维旋转。此时用二维旋转公式就可以直接推出三维旋转变换矩阵。

规定在右手坐标系中,物体旋转的正方向是右手螺旋方向,即从该轴正半轴向原点看是逆时针方向。

1.1 基本步骤

1) 平移物体使旋转轴通过坐标原点。在图1(a)中,将旋转轴的一端 B 点移至坐标原点位置,则待旋转点 P_1 平移至 P'_1 。

2) 沿着旋转轴进行指定角度的旋转。如图1(b)所示,点 P'_1 绕 $A'B'$ 旋转 θ 至 P'_2 。

3) 平移物体使旋转轴移回到原位置。应用逆平移变换将旋转轴移回到图1(a)中所示,使 P'_2 最终移至正确位置 P_2 ,

收稿日期:2010-01-07;修回日期:2010-02-11。 基金项目:国家863计划项目(2006AA06Z114)。

作者简介:陈学工(1965-),男,湖南娄底人,副教授,博士,主要研究方向:GIS、计算机图形学;季兴(1985-),男,湖南常德人,硕士研究生,主要研究方向:计算机图形学;黄伟(1984-),男,湖南浏阳人,硕士研究生,主要研究方向:GIS。

完成点 P_1 绕空间任意轴 AB 旋转 θ 至 P_2 的旋转变换。

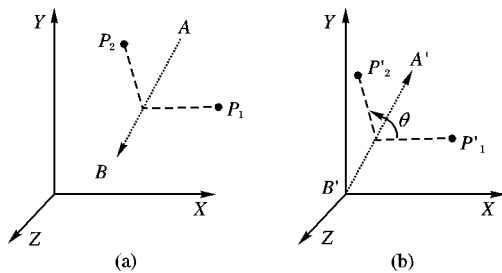


图1 空间点绕任意轴旋转变换

1.2 旋转矩阵

在图1(b)中, $A'B' = [a_x, a_y, a_z]$ 是过坐标原点的且长度为单位长的旋转轴, 旋转角度为 θ , P'_2 为 P'_1 点绕直线 $A'B'$ 旋转后的所在的新的位置, 则物体绕直线 $A'B'$ 旋转变换的矩阵表示如下:

$$\hat{A} = \begin{bmatrix} a_x a_x & a_x a_y & a_x a_z \\ a_y a_x & a_y a_y & a_y a_z \\ a_z a_x & a_z a_y & a_z a_z \end{bmatrix}$$

$$A^* = \begin{bmatrix} 0 & -a_z & a_y \\ a_z & 0 & -a_x \\ -a_y & a_x & 0 \end{bmatrix}$$

$$M = \hat{A} + \cos\theta \cdot (I - \hat{A}) + \sin\theta \cdot A^*$$

M 即为物体绕过原点的轴进行旋转变换的旋转矩阵。

$$P'_2 = P'_1 \cdot M^T$$

利用这一结果, 则绕任意轴旋转的变换矩阵可表示为

$$R(\theta) = TM^T T^{-1} \quad (1)$$

其中: M^T 表示 M 的转置矩阵, T 和 T^{-1} 分别为平移变换的矩阵及逆矩阵。

2 隧道的三维建模算法

隧道可抽象为中心线、隧道断面和隧道的四边形网格, 中心线是用来描述隧道网络拓扑结构, 断面用来描述巷道截面的形状, 四边形网格最终用来描述隧道体, 它由相邻断面对应点相连构成。其中中心线数据通常由用户事先给定, 在此不作赘述。

2.1 隧道横断面建模

在设计隧道断面时通常采用三心拱、圆弧拱、梯形拱等基本形状, 有时结合地质条件或其他工程情况, 也可选择圆形、多边形等类型^[6]。本文以圆弧拱为例, 其他断面可类比进行建模。

一般情况下, 隧道的半径在各处均保持不变, 所以采用一组平行线来表示隧道的边界, 平行线起始点的位置由第一个断面确定。

在不作特殊要求的情况下, 第一个点只需要在与中心线垂直的第一个断面内, 且距中心线的起点距离等于隧道半径即可。如图2所示, 假若 $\vec{OO'} = (a, b, c)$, $\vec{OA} \perp \vec{OO'}$, 则可令 $\vec{OA} = (0, c, -b)$, A 点空间三维坐标可确定为:

$$\begin{cases} x = x_0 \\ y = y_0 + \frac{rc}{\sqrt{b^2 + c^2}} \\ z = z_0 - \frac{rb}{\sqrt{b^2 + c^2}} \end{cases} \quad (2)$$

其中: (x_0, y_0, z_0) 为中心 O 点的三维坐标, r 为隧道半径。

图3(a)为圆弧拱形隧道的断面, 利用圆弧拱宽度 w 和腰高 h 就可以确定断面的形状, 以宽度的一半为圆弧半径 r_0 。为了在三维环境下表达隧道断面, 可将拱顶的圆弧部分用线段逼近的方法表达。

如图3(b)所示, 得到起始点 A 的坐标后, 利用式(1)将点 A 绕该断面法向量旋转 θ 度, 得到的 $B \sim G$ 点, 继续旋转 $\pi/4$ 和 $\pi/2$ 分别得到 H 点和 I 点空间坐标。

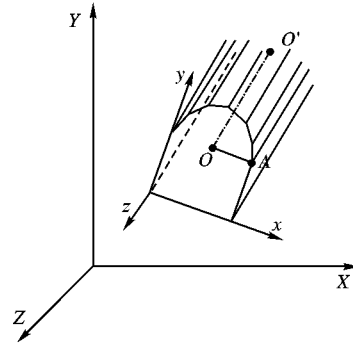


图2 平行线起始点

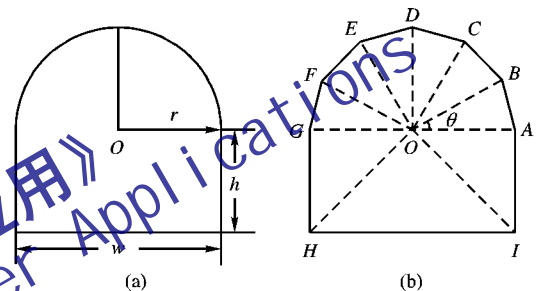


图3 隧道起始位置横截面

以上所求的 $A \sim I$ 点坐标即为第一个断面上平行线的起始点坐标。可以看出, 当 $\theta \rightarrow 0$ 时, 隧道表面等分越细, 隧道在直观上就越接近真实情况, 但计算量也随之越大^[7]。

2.2 直隧道的建模方法

通过隧道断面的计算得到一组平行线的起始点, 平行线的方向向量与中心线的方向向量一致。再在中心线上每隔定长取一个点确定加载断面的位置, 断面的法向量与中心线方向一致。

如图4所示, 用中心线 OO' 的方向作为断面的法向量和平行线的方向向量, 平行线与断面 S_1, S_2, S_3, S_4 分别交于点 $A_1 \sim D_1, A_2 \sim D_2, A_3 \sim D_3, A_4 \sim D_4$ 。

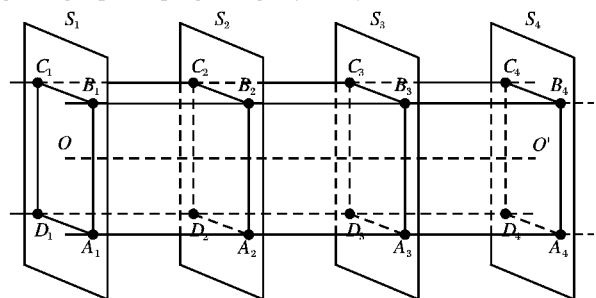


图4 直隧道连接

连接断面上对应的交点, 如 A_1A_2, B_2B_3 , 隐去断面即完成了简单直隧道的建模。

2.3 连接处的平滑处理

在隧道的二维平面图中, 通常用剖面图来表示一段隧道^[8]。当连接处中心线夹角为 θ 时, 断面共需要旋转的角度为 $\pi - \theta$ 。为了达到平滑过渡的效果, 在连接处的起始和结束断

面间插入一组断面来减少每两个断面所需要偏转的角度。

如图5所示,点划线表示隧道的中心线,直线 OA 、 OB 、 OC 、 OD 表示在二维平面中平滑处理时插入的4个断面, O 为旋转轴。

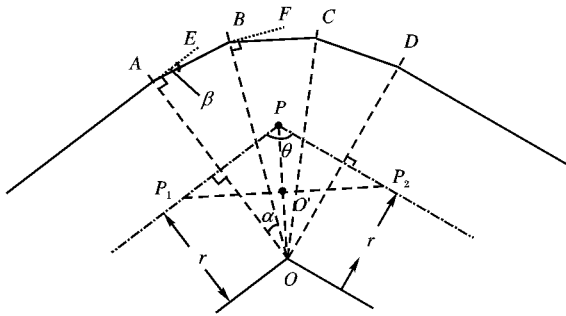


图5 连接处平滑处理二维剖面

设点中心线上的点 P 的坐标为 (x', y', z') 。连接处平滑生成隧道体的过程如下:

1) 计算出 $\angle P_1 P P_2$ 的角平分线 PO 的方向向量 \vec{PO} 。

将向量 $\vec{PP_1}$ 和 $\vec{PP_2}$ 单位化后, O' 为 $P_1 P_2$ 的中点,利用等腰三角形三线合一的性质,中线 PO' 即为角平分线 PO 。

$$\vec{PO} = \frac{1}{2} \times \left(\frac{\vec{PP_1}}{|\vec{PP_1}|} + \frac{\vec{PP_2}}{|\vec{PP_2}|} \right) - (x', y', z') \quad (3)$$

2) 计算空间旋转轴 O 。

旋转轴与中心线所在平面垂直,则方向向量为 $\rho = (m, n, p) = \vec{PP_1} \times \vec{PP_2}$ 。旋转轴上一点 $O(x_0, y_0, z_0)$ 在 $\angle P_1 P P_2$ 的角平分线 PO 上,其坐标为:

$$(x_0, y_0, z_0) = (x', y', z') + \frac{\vec{PO}}{|\vec{PO}|} \times r \times \csc \frac{\theta}{2} \quad (4)$$

则所求旋转轴的点向式方程为:

$$\frac{x - x_0}{m} = \frac{y - y_0}{n} = \frac{z - z_0}{p}$$

3) 计算连接处所插入的旋转断面。

由图5可知该组断面法向量一共需要旋转的角度为 $\angle AOD = \pi - \theta$ 。若在连接处的起始和结束断面间插入 n 个断面,则前后两个断面的夹角为 $1/(n+1) \angle AOD$ 。在本例中, OA 与 OD 之间插入两个断面 OB 、 OC ,因此每两个断面间的夹角为 $1/3 \angle AOD$,即 $\angle \alpha$ 。利用式(1)将断面 OA 的法向量 \vec{AE} 绕 A 点旋转 α 即可得到断面 OB 的法向量 \vec{BF} ,同理将断面 OB 的法向量 \vec{BF} 绕 B 点旋转 α 即可得到断面 OC 的法向量,以此类推。最后得到如图6断面插入的结果。

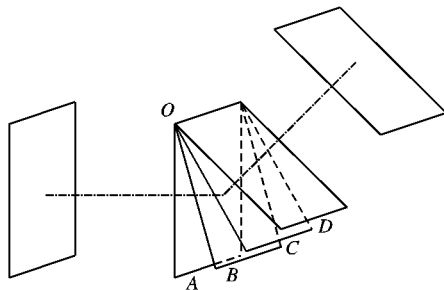


图6 连接处隧道断面组

4) 计算连接处旋转后的平行线组。

插入一组法向量旋转的断面之后,构成隧道边框的平行线的方向向量也要做相应的调整,可将断面的法向量绕交点旋转一定度角得到对应平行线的方向向量。在图5中利用式(1)将断面 OA 的法向量 \vec{AE} 绕 A 轴旋转 β 度角得到平行线 AB

方向向量,由法向量 \vec{BF} 绕 B 轴旋转 β 得到平行线 BC 方向向量,以此类推。利用相似三角形的性质,易证得 $\angle \beta = 1/2 \angle \alpha$ 。

5) 完成连接处隧道建模。

最后将连接处的断面与对应平行线求交,与直隧道建模方法类似,连接断面上对应的交点,即实现连接处隧道的建模。插入的断面数越多,平滑效果越好。

3 隧道体生成步骤与复杂度分析

在隧道半径、横截面形状、光滑程度以及中心线等相关数据给定之后,隧道生成的步骤如下:

1) 在中心线上按照光滑程度计算出一系列断面,连接处插入旋转断面;

2) 在第一个断面上按照隧道断面形状计算出一组平行线的起始点;

3) 平行线从第一个断面上的起始点射出,与第二个断面求得一组交点;

4) 平行线再从断面上交点射出,与下一个断面求交,连接处平行线方向需要做相应平滑处理,重复此操作,直至平行线与最后一个断面求交;

5) 连接断面上对应的交点,保存所形成的四边形各顶点的坐标值,完成建模。

假定隧道中心点的个数为 n ,隧道断面轮廓线条数为 m ,在最坏的情况下,即任意相邻的3个隧道中点都不在一条直线上,第1)步的时间复杂度 $T_1 = O(n)$ 。第2)步计算轮廓线起始点的时间复杂度 $T_2 = O(m)$ 。第4)步的时间复杂度 $T_3 = O(n \times m)$ 。综上,本文算法时间复杂度 $T(n) = T_1(n) + T_2(n) + T_3(n) = O(n \times m)$ 。

4 实验结果及讨论

测试硬件平台为一台主频为3 GHz的双核PC,1 GB内存,软件开发环境为Windows XP操作系统,VC++ 7.0,显示处理库OpenGL,实验所采用的主要数据结构如下:

```
Class Point3D // 三维点类
{ double m_x; double m_y; double m_z; }
// 隧道中心线类
CArray<Point3D, Point3D> Line3DArray;
Class Quad3D{ // 四边形类
    Point3D m_a; Point3D m_b;
    Point3D m_c; Point3D m_d;
    int m_ID; // 编号
}
// 隧道类
CArray<Quad3D, Quad3D> CTunnel3D;
```

图7用程序生成框架图清晰地展示了隧道模型的组织结构。可以看出,该方法确保了构成隧道的众多四边形无缝拼接以及四边形顶点共面,并在隧道连接处实现了平滑过渡,从而可以使该方法推广到复杂情况的应用。

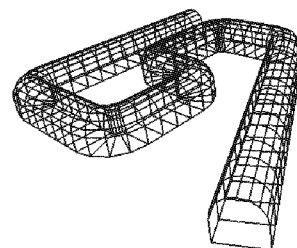


图7 三维隧道框架

在三维场景中设置恰当的光照,可以使虚拟三维隧道获得更真实的视觉效果。图 8 为某矿区的地表、钻孔及隧道组合图与实际隧道漫游效果,为更进一步从内部验证隧道拓扑结构的正确性,漫游时隧道表面采用透明显示,利用 OpenGL 文字显示技术输出前 30 个面片的编号,可以看出该方法使面片存放的编号螺旋式向前,确保隧道建立的拓扑有序,便于进行空间查询与邻接性分析。例如在隧道某侧面片存放的顺序依次为 0、9、18、27、36...,以此类推。

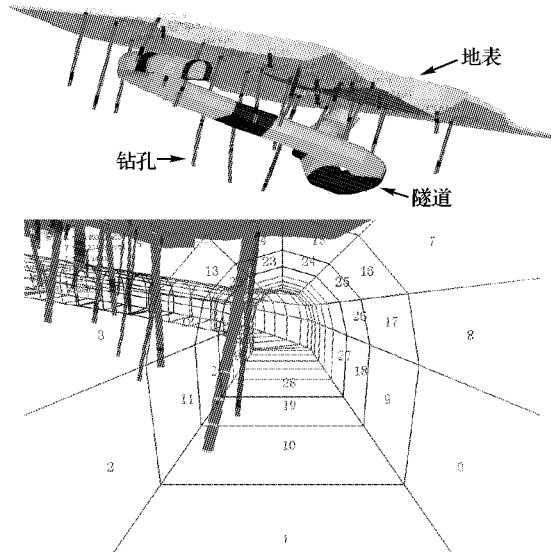


图 8 任意三维隧道虚拟显示

5 结语

任何复杂的隧道都可以看作是直管和弯管的组合。本文从这两种基本模型出发,采用从中心线到隧道断面再到隧道体的方法,每一个构成边框的线段都是从上一个线段的终点出发,确保了两种基本模型的无缝连接以及空间拓扑结构的正确性,继而推广到其他复杂情况。本方法同样适用于中心线在空间任意角度旋转扭曲的情况,并达到令人满意的效果,但中心线中如果包含过于短小的折线,可能会使生成的隧道发生形变,因此,必要时在隧道生成之前对输入的中心线数据进行相应的预处理,避免此种情况的产生。

参考文献:

- [1] 吴信才. 地理信息系统原理与方法[M]. 北京: 电子工业出版社, 2002.
- [2] 崔阳, 王华. 基于 GIS 的城市地下管线数据结构设计[J]. 计算机工程与应用, 2005, 41(36): 230-232.
- [3] 王建民. 三维巷道建模及应用研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2005.
- [4] 魏占营, 王宝山, 李青元. 地下巷道的三维建模及 C++ 实现[J]. 武汉大学学报: 信息科学版, 2005, 30(7): 650-653.
- [5] 孙中昶, 卢秀山, 田茂义. 矿山巷道 3 维建模算法研究及实现[J]. 测绘学报, 2009, 38(3): 250-254.
- [6] 徐志强, 杨邦荣, 王李管, 等. 巷道实体的三维建模研究与实现[J]. 计算机工程与应用, 2008, 44(6): 202-205.
- [7] 陈涵, 郭群勇, 王钦敏. 切片级管线表面三维重建[J]. 计算机应用, 2005, 25(9): 2196-2199.
- [8] 李清泉, 严勇, 杨必胜, 等. 地下管线的三维可视化研究[J]. 武汉大学学报: 信息科学版, 2003, 28(3): 277-282.

(上接第 1551 页)

道畅通等情况下,寻求以发电量最大为目标的最优解。

3.1 DP-PSO 算法与 DP 算法的比较

设置优化时间段,比较 DP-PSO 算法和 DP 算法^[8]的计算结果,粒子群飞行的步长为 0.1 m,则计算结果如表 1 所示。

表 1 三峡水库发电量数值实验

平均入库流量/(Gm ³)	平均出力/GWh	
	DP-PSO	DP
0.159	1210	1203
0.175	1283	1278
0.228	1575	1570
0.249	1680	1675
0.256	1680	1680

3.2 DP-PSO 算法与 DP-GA 的比较

DP-PSO 算法与动态规划-遗传算法(DP-GA)发电量实验对比如表 2 所示。

表 2 DP-PSO 与 DP-GA 发电量数值实验对比表

时段数	平均发电量/GWh	
	DP-PSO	DP-GA
10	123.7	124.1
20	247.5	248.2
30	373.2	374.4
40	495.5	496.8
50	619.9	621.9

从表 1~2 的比较可知:

1) 在相同的条件下,DP-PSO 算法较 DP 算法^[8]计算可靠性更高,优化的结果更加理想。

2) 在相同的条件下,DP-PSO 算法劣于 DP-GA^[2]计算的精确度和优化的结果,但是在计算时间上,DP-PSO 算法则具有明显的优势。

综上,DP-PSO 算法为水库的优化调度提供了一个新的解决方法。

4 结语

结合动态规划和粒子群算法的优点,DP-PSO 算法不仅在实现上较遗传算法容易,而且在计算结果上较动态规划明显提高。分析结果表明,DP-PSO 算法能够克服粒子群算法容易陷入局部最优解的缺点,使全局搜索优化解的可靠性进一步提高,为水库优化调度问题求解提供了一个新的方法与思路。

参考文献:

- [1] 黄强, 王义民. 水电站水库优化调度几种方法的探讨[J]. 水电能源科学, 2000, 18(3): 19-22.
- [2] 刘攀, 郭生连, 刘心愿. 求解水库优化调度问题的动态规划-遗传算法[J]. 武汉大学学报: 工学版, 2007, 40(5): 1-6.
- [3] 陈功贵, 杨俊杰, 高侍红. 基于混合 PSO 的梯级水库优化调度研究[J]. 水力发电, 2007, 33(10): 86-88.
- [4] 黎晓峰, 薛保菊, 李维乾. 基于改进粒子群算法的水库优化调度研究[J]. 水力发电, 2008, 34(11): 107-109.
- [5] 胡建秀, 曾建潮. 具有惯性权重的 PSO 算法[J]. 计算机工程设计, 2006, 23(8): 164-167.
- [6] 莫愿斌, 陈德钊, 胡上序. 动态规划粒子群算法解 PCB 数控钻孔最佳走刀路线问题[J]. 机床与液压, 2006, 28(8): 18-22.
- [7] 彭勇. 变需求车辆路线问题建模及基于 Inver-over 操作的 PSO-DP 算法[J]. 系统工程理论与实践, 2008(10): 76-81.
- [8] 邹进, 张勇传. 三峡梯级电站短期优化调度的模糊多目标动态规划[J]. 水力学报, 2005, 36(8): 925-931.