

基于空间改进型 Voronoi 图的无人机路径规划研究

肖秦琨 高晓光

(西北工业大学电子信息学院,西安 710072)

E-mail:xiaoqinkun10000@hotmail.com

摘要 三维空间路径规划在某些特殊情况下必不可少,如无人战斗机为了降低敌雷达的探测概率,利用山谷或其他特殊地形飞行。在原有基于平面 Voronoi 图的路径规划基础上,将 Voronoi 图的概念进行了推广,提出了“空间改进型 Voronoi 图”的概念。研究了不同威胁体下“空间改进型 Voronoi 图”构图的一些基本原则,包括不同威胁体下“空间改进型 Voronoi 图”作图法,以及突发威胁体下空间局部路径重规划区域原则和空间局部最优路径选择原则等。并将平面路径规划下无人战斗机战场态势感知模型推广到三维空间。仿真结果表明整个模型构架的基本思路可行。

关键词 空间改进型 Voronoi 图 无人战斗机 路径规划

文章编号 1002-8331-(2005)26-0204-04 文献标识码 A 中图分类号 TP18

A Study on Path Layout of UAV Based on 3D Reform Voronoi Diagram

Xiao Qinkun Gao Xiaoguang

(School of Electronic Information, Northwestern Polytechnic University, Xi'an 710072)

Abstract: Path Layout of UCAV on plane has achieved many conclusion. However, path layout of UCAV in Space is useful to special instance. For example, UCAV fly in valley to reduce probability to be detected by radars of enemy. It is necessary for UCAV to do path layout in space. The paper brings out some base principle about composition of a picture for path layout in space, including improved Voronoi base on different threat in space, a principle area of renew layout of local path, and way to choose a optimiz path of renew layout of local path etc, and obtain some useful conclusion. At the same time, we spread UCAV apperceive models of plane to space too. At the end, the emulational experiment proves that the idea is right.

Keywords: improved Voronoi in space, UCAV, path layout

1 引言

路径规划是研究无人战斗机(UCAV)的重要基础课题之一。无论基于战场相同威胁点^[1]得到的 Voronoi 图进行的路径规划研究,还是基于不同威胁点得到的“改进型 Voronoi 图”^[2]进行的路径规划研究,或是成功的用于环境已知的路径规划的 PRM 算法^[3]及 lazy PRM 算法^[4],甚至近年来许多文献提出的运动规划(Motion Planning)的概念^[5-7],大都是基于平面进行的路径规划,这样处理在无人机飞行高度高的情况下是合理的。但也存在这样的情况:如无人机为了降低敌雷达的探测概率,利用山谷或其他特殊地形飞行,此种情况下,三维空间的路径规划就非常必要了。那么,是否可以将成熟的基于平面 Voronoi 图的路径规划思想拓展到空间领域,构建基于空间相同威胁体或不同威胁体下的三维 Voronoi 图,以其作为空间路径规划的基本模型?本文就此问题作一些初步探索。

2 三维空间中局部路径构图原则

2.1 三维空间中不同威胁体下初始路径图构型

设局部空域内具有两个威胁体 W_1 和 W_2 , W_2 的威胁值是

W_1 的 k 倍,设威胁体的威胁性可度量,用 $threat$ 表示,当 $k>1$,即 W_1 和 W_2 的威胁值不相等时,有如下性质成立:

性质 1^[2] 设 W_1 和 W_2 是平面内的两个威胁点,并且 W_2 的威胁值是 W_1 的 k 倍,这里 $k>1$,那么到 W_2 的距离是到 W_1 距离 k 倍的点的轨迹是圆。证明略。

我们将这个性质推广到空间状态的两个不同威胁体,得到如下性质:

性质 2 设 W_1 和 W_2 是三维空间内的两个威胁点,并且 W_2

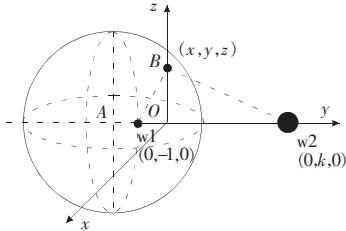


图1 基于不同威胁点的空间坐标系示意图

注: w_1 和 w_2 是空间内的两个威胁点,其坐标分别为 $w_1(0, -1, 0)$ 、 $w_2(0, k, 0)$ 。

基金项目:国家自然科学基金重大研究计划(编号:90205019);高等学校博士学科点专项科研基金(编号:20020699001)

作者简介:肖秦琨(1974-),男,博士生,近期研究方向动态贝叶斯网络、无人机路径规划。高晓光(1957-),女,教授、博士生导师,长期从事火力与指挥控制、作战效能分析领域的教学与科研工作。

的威胁值是 W_1 的 k 倍, 这里 $k>1$, 那么到 W_2 的距离是到 W_1 距离 k 倍的点的集合是一个球面。

证明: 首先建立空间坐标系如图 1 所示。设两个威胁点的距离为 J , 在线段 W_1W_2 上选取坐标原点 O , 使得线段 OW_2 的长度是 OW_1 的 k 倍, 线段 OW_1 的长度作为坐标系内的单位长度, 所以 W_1, W_2 的坐标分别是 $W_1(0, -1, 0)$ 和 $W_2(0, k, 0)$ 。假设点 (x, y, z) 到 W_2 的距离是到 W_1 距离 k 倍, 那么得方程:

$$k\sqrt{x^2+(y+1)^2+z^2}=\sqrt{x^2+(y-k)^2+z^2}$$

可简化为:

$$x^2+(y+\frac{k}{k-1})^2+z^2=(\frac{k}{k-1})^2$$

因此, 到 W_2 的距离是到 W_1 距离 k 倍的点的空间点集合是球面, 球半径为 $\frac{k}{k-1}$, 球心坐标 $(0, -\frac{k}{k-1}, 0)$ 。证毕。

以上述定理为基础, 我们可以构建空间不同威胁体下的无人机路径规划方法, 如图 2。首先, 仅考虑威胁点 B, C , 我们可选择球心在 BC 线上, 过 m 点的球面上的任一曲线作为最佳空间路径, 因为此时曲线上任意一点到两点的距离比值为 k , 威胁性最小; 同理, 仅考虑 B, A 两个威胁点, 我们可以选择球心在 BA 线上, 过 l 点的球面上的任一曲线作为最佳空间路径; 仅考虑 B, D 两个威胁点, 我们可以选择球心在 BD 线上, 过 q 点的球面上的任一曲线作为最佳空间路径。

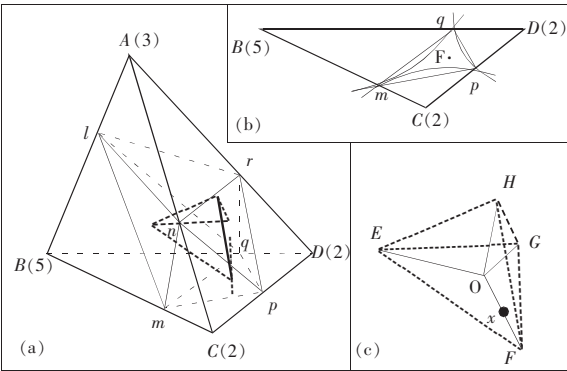


图 2 局部空间不同威胁点连接示意图

注: (a) A, B, C, D 表示威胁性不同的 4 个威胁点; l, m, n, p, q, r 为各边分割点。 (b) m, p, q 为各边分割点; 弧线分别为凸曲面 lmq, nmp, rpq 与 BCD 面的交线; F 为 mpq 的内心。 (c) E, F, G, H 分别为 lmn, mpq, rnp, lqr 的内心, O 为倒四面体 $F-EGH$ 的内接球球心, $x \in OF$ 。

综上, 我们可以选择过 l, m, q 3 点的一个凸曲面作为可规划的路径集合。同理, 若以 A 作为顶点, 我们可以选择过 l, n, r 3 点的一个凸曲面作为可规划的路径集合。若以 C 作为顶点, 我们可以选择过 m, n, p 3 点的一个凸曲面作为可规划的路径集合。若以 D 作为顶点, 我们可以选择过 r, p, q 3 点的一个凸曲面作为可规划的路径集合。而 4 个凸曲面围成的区域我们称为“安全区域”, 若无人机在这个区域内飞行, 则 A, B, C, D 任一一点的对其的威胁性相对较小。

凸曲面 lmq, nmp, rpq 与平面 BCD 的交线如图(b)所示, 为弧线, mq, mp, pq 由于按照弧线进行规划即保证了无人机受到的威胁最小, 而 3 条弧线围成的安全区域的中心, 既 $\triangle mpq$ 的内心 F 就更加安全, 故可以将其作为无人机空间规划的路径点。

之一。这就好比老虎跳火圈, 总要选择火圈中威胁性最小的点并以尽可能垂直的方式通过。而无人机亦可选择 F 点并以尽可能垂直于 $\triangle BCD$ 的方式飞行, 才能减少威胁, 提高生存率。同样的道理, E, G, H 也被选中作为路径点。同时, 我们选择倒四面体 $F-EGH$ 的内接球球心 O 作为路径点, 因为线段 FO 在 3 个凸曲面所围成的安全区与以内, 且其上的任一点 x 到面 FEG, FGH, FEH 的距离相等, 而面 FEG, FGH, FEH 可以近似认为是凸曲面 nmp, rpq, lmq 的切平面, 故沿着 FO 飞行, 到三个凸曲面的平均距离最大, 即沿着安全区域中的最佳安全线段飞行, 故威胁性最小, 最安全。故可将 E, F, G, H, O 点连接起来, 即连接 OF, OE, OG, OH 构成基本四面体单元内的局部路径。至此, 我们可得到具有 n 类不同威胁点的空间区域初始路径图的确立方法如下:

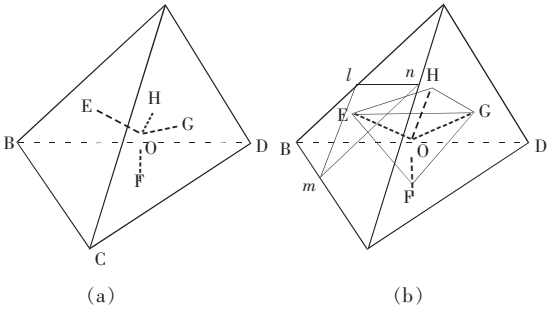


图 3 具有 n 类不同威胁点的空间区域初始路径图

注: (a) A, B, C, D 的 threat 相同, O 为四面体 $A-BCD$ 外接球球心, E, F, G, H 为各三角形外心, $OE \perp ABC; OF \perp BCD; OH \perp ABD; OG \perp ACD$ (b) A, B, C, D 的 threat 不全相同, O 为内接倒四面体 $F-EGH$ 内接球球心, E, F, G, H 为各面上三角形内接小三角形内心。如: E 为 lmn 内心。

(1) 先将空间上的威胁点进行分组, 任意 4 个威胁位置为一组, 我们用 $STri_k$ 表示任一个四面体, 仅考虑这些组中具有 4 个威胁点所确定的球内不含有其它威胁点性质的组。即如下集合中的组 $STri_k; STri=\{STri_k | STri_k \text{ 中的威胁点 } a_k, b_k, c_k \text{ 和 } d_k \text{ 所确定的球内部不含有其它威胁点}\}$ 。

(2) 对于每组的四个威胁点 W_1, W_2 和 W_3, W_4 , 如果 4 个相同威胁点组成一组, 确定 5 个初始路径点, 如图 3(a) 所示。其中 E, F, G, H 为各三角形的外心, O 为四面体 $A-BCD$ 的外接球球心。若威胁值不全相同, 同样确定相应的 5 个初始路径点 E, F, G, H 和 O , 如图 3(b) 所示。其中点 E, F, G, H 分别为各边上根据相应顶点的威胁值分割所在边的点所组成的内接小三角形内心, O 为倒立四面体 $F-EGH$ 内接球的球心。

(3) 首先连接不同威胁点组所相应的 5 个初始路径点 E, F, G, H, O , 即连接 O 和 E, O 和 F, O 和 G, O 和 H , 同时与相邻的其它路径点相连, 形成初始路径选择图。因为空间路径规划图的基础是平面“改进型 Voronoi 图”^[2], 所以我们可以称上述航路集为“空间改进型 Voronoi 图”。

2.2 基于空间改进型 Voronoi 图的局部路径重规划构图区域

根据 Voronoi 的构图原则及改进型 Voronoi 图的构图思想, 可以得到两个有意义结论, 该结论可用于战场变化环境下二维平面无人机局部路径重规划, 如突发威胁体下局部路径重

规划或威胁体威胁等级随机变化下局部路径重规划的情况。

性质3 在改进型 Voronoi 图中,由于一个威胁点的威胁等级发生变化,只影响该点邻近威胁点所组成的多边形内改进型 Voronoi 图的构造,不影响该多边形以外改进型 Voronoi 图的重新构造。限于篇幅,证明略。

性质4 在改进型 Voronoi 图中,任意加入一个威胁点,只影响该点邻近威胁点所组成的多边形内改进型 Voronoi 图的构造,不影响该多边形以外改进型 Voronoi 图的重新构造。限于篇幅,证明略。

我们可以将上述两个结论推广到三维空间的局部路径重规划中去。得到如下结论:

性质5 在“空间改进型 Voronoi 图”中,任意加入一个威胁点或由于一个威胁点的威胁等级发生变化,只影响该点邻近威胁点所组成的空间多面体内“空间改进型 Voronoi 图”的构造,不影响该多面体以外“空间改进型 Voronoi 图”的重新构造。

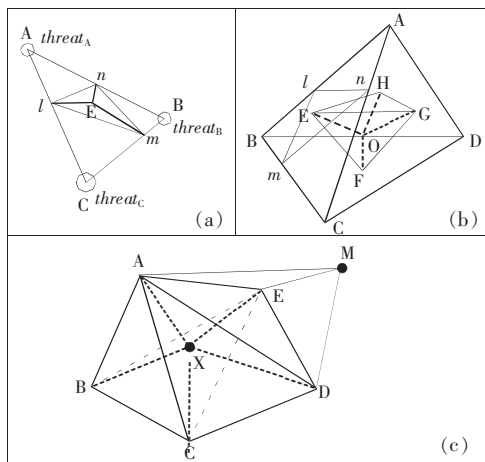


图4 加入点对空间 Voronoi 图影响示意图

注:(a) A, B, C 为 threat 不同威胁体, l, m, n 为各边按顶点威胁性决定的分割点, E 为 lmn 内心;(b) 意义与图3 (b) 相同 (c) 空间基本四面体 $A-BCE, A-CDE, X$ 为后加入点, M 为多面体 $A-BCDE$ 外一点。

证明:

第1: 首先证明,在空间改进型 Voronoi 图中,若构成基本四面体的4点的威胁等级 threat 及位置固定,则该三角形内的空间改进型 Voronoi 图的构造唯一。分两种情况讨论:即构成基本四面体的4个威胁点的 threat 不全相同,threat 全相同两种情况。

(1) 如图4(a)所示,四面体的某一面 A, B, C 三个威胁点组成三角形,其威胁性不全相同。其分割点 l 的位置由 A, C 的威胁等级确定, m 点由 B, C 的威胁等级确定, n 点由 A, B 的威胁等级确定,即有下列等式成立:

$$\frac{l_{Al}}{l_{lC}} = \frac{threat_A}{threat_C}; \frac{l_{Cm}}{l_{mB}} = \frac{threat_C}{threat_B}; \frac{l_{An}}{l_{nB}} = \frac{threat_A}{threat_B}$$

$\therefore A, B, C$ 3点的威胁等级及位置固定 $\Rightarrow l, m, n$ 3点的位置固定。又 \therefore 由公理知,三角形的内心唯一 $\Rightarrow lmn$ 的内心 E 唯一。同理有其他3个面上的 F, G, H 唯一确定。又 \therefore 有公理得出,由 E, F, G, H 4点决定的四面体的内结球球心 O 唯一确定。

\therefore 由 E, F, G, H, O 5点决定的空间改进型 Voronoi 图一定

(2) 若 A, B, C, D 威胁性相同,4个面外心位置不变,又由公理得到,四面体 $A-BCD$ 外接球球心 O 唯一。 \therefore 由 E, F, G, H, O 5点确定的空间改进型 Voronoi 图唯一确定。

第2: 证明在空间改进型 Voronoi 图中,任意加入一空间威胁点,必然引起多面体内部空间改进型 Voronoi 图的重新构造。

(1) 设与 X 相邻的威胁点构成多面体 $ABCDE$ 如图(c)所示,威胁点 X 加入以前,由 delaunay3D 函数的作图原则,多面体各端点相互之间组成基本四面体。

(2) \therefore 由于 X 点的加入, A, B, C, D, E 与 X 点相邻最近,由 delaunay3D 函数的作图原则, X 必然要和相邻任一点连接构成子四面体,使得多面体内原有四面体的连接线被破坏,如图(c)粗虚线。 \therefore 无论该多面体原有威胁点为相同威胁点还是不同威胁等级的威胁点,则连接线的分割点都被破坏,由分割点确定的内心或外心亦被破坏,与 X 点组成的所有四面体内部必然产生新的空间改进型 Voronoi 图。 $\therefore X$ 点的加入,必然导致多面体 $ABCDE$ 内部重新构造空间改进型 Voronoi 图。

第3: 证明某一点 threat 变化,引起多面体内路径变化。空间某一点 threat 变化,与之相邻威胁点连线上的分割点变化,无论 threat 是否相同,引起各面上内心及外心变化,四面体的外接球球心及倒四面体的内结球球心亦变化。 \therefore 必引起多面体内路径变化,不影响多面体外路径。

第4: 证明多面体外部空间改进型 Voronoi 图不变。

如图(c),多面体 $ABCDE$ 中设面 ADE 外任意一个威胁点 M 与 A, D, E 构成四面体 $M-ADE$ 。

$\therefore A, D, E, M$ 点均为确定点,其位置及威胁等级均不变,故由第一步结论知 $M-ADE$ 内的空间改进型 Voronoi 图构造唯一确定。 $\therefore X$ 点的加入,不影响面 ADE 外空间改进型 Voronoi 图构造。同理,知面 ABC, ABE, ACD, BCE, CDE 外空间改进型 Voronoi 图无变化。 \therefore 与 X 相邻点的多面体 $ABCDE$ 外的空间改进型 Voronoi 图不因为 X 的加入而变化。证毕。

2.3 基于空间改进型 Voronoi 图的局部最优路径选择原则

在平面路径规划中,对于相同威胁体或不同威胁体的战场而言,我们采用 Voronoi 图或改进型 Voronoi 图表示出所有可能航路集,采用 Dijkstra 算法搜索威胁分布图,求解粗略最短路径。这种算法同样可以推广到三维空间路径规划。而对于空间中由于突发威胁体的加入,或某一威胁体 threat 变化,使得局部“空间改进型 Voronoi 图”进行了重绘,此局部战场具有 m ($m < n$) 种不同威胁体的情况下,我们可以用多面体内“空间改进型 Voronoi 图”来表示局部所有可能航路集,同样应用 Dijkstra 算法求解粗略最短路径,所不同的是,第 j 个点第 i 条边的威胁值变为^[8]:

$$J_{threat, i \rightarrow j} = L_i \left(\frac{1}{d_{(\frac{1}{6} - i, j)}} + \frac{1}{d_{(\frac{1}{2} - i, j)}} + \frac{1}{d_{(\frac{5}{6} - i, j)}} \right) \times threat_j$$

其中 $d_{(\frac{1}{6} - i, j)}$ 表示第 j 个威胁点到第 i 条边 $\frac{1}{6}$ 处距离, $d_{(\frac{1}{2} - i, j)}$ 和 $d_{(\frac{5}{6} - i, j)}$ 所表示意义相同。在此基础上得到任一条边的总价:

$$J_i = k J_{threat, i} + (1 - k) J_{fuel, i}, 0 \leq k \leq 1$$

在局部路径重规划中,原有的路径必然和突发威胁体相邻点组成的多面体有交点,其交点即为局部路径规划的起点和终点,突发威胁体下局部路径规划即指在多面体内的“空间改进型 Voronoi 图”中,在起点和终点之间找到一条代价最小的路径作为最优的局部路径。

3 空间改进型 Voronoi 图下 UCAV 的战场感知模型

空间改进型 Voronoi 图下 UCAV 的战场感知模型分两种情况:(1)威胁点为静止目标,threat 在随机变化。这种情况仅应用最简单的动态贝叶斯网络 (Dynamic Bayesian Network-DBNs)^[9]中的隐马尔科夫模型图形模式进行感知。(2)突发运动威胁体,位置及 threat 都在随机变化。这种情况可应用基于 DBN 的切换线性动态系统 (Switching Linear Dynamic System-SLDS)^[10,11]来感知战场态势。

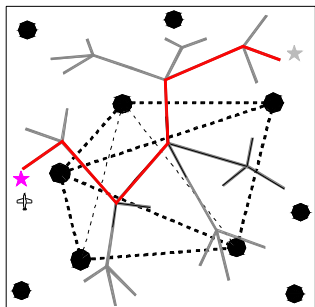


图5 三维空间路径规划仿真示意图

4 仿真

为了验证本文提出的三维路径规划基本原则正确性。我们在 Matlab6.1 环境下进行了仿真。红线为 Dijkstra 算法求解粗略最短路径。

5 结论

本文的贡献在于:(1)将平面 Voronoi 图的概念拓展,提出了空间改进型 Voronoi 的概念,为三维空间下初始路径规划以及局部路径重规划提供了新的思路;(2)给出了空间不同威胁

体的构图原则-空间改进型 Voronoi 图法;空间局部路径重规划区域原则,证明了给出的相应性质;给出了空间局部最优路径选择原则。并进行了仿真。(3)将平面无人机的感知模型框架中推广到三维空间。(收稿日期:2005 年 4 月)

参考文献

- 1.符小卫,高晓光.一种无人机路径规划算法研究[J].系统仿真学报,2004;(1)
- 2.高晓光,杨有龙.基于不同威胁体的无人作战飞机初始路径规划[J].航空学报,2003;24(5):435-438
- 3.Lydia E Kavraki et al.Analysis of probabilistic road maps for path planning[J].IEEE transaction on Robotics and Automation,1998;14(1):166-171
- 4.Rober Bohlin,Lydia E Kavraki.Path planning using lazy PRM[C].In: Proceedings of the 2000 IEEE International Conference on Robotics and Automation,2000;521-528
- 5.Emilio Frazzoli et al.Real-time motion planning for agile autonomous vehicles[J].Journal of Guidance,Control and Dynamics,2002;25(1):116-129
- 6.Marc W McConley et al.Hybrid control for aggressive maneuvering of autonomous aerial veicles[C].In:Proceedings of the 19th Digital Avionics Systems Conference,2000
- 7.Emilio Frazzoli.Robusthy brid control for autonomous vehicle motion planning[D].Ph D Dissertation.Massachusetts Instatute of Technology,2001
- 8.杨有龙.基于图形模式的表达方式[D].博士学位论文.西北工业大学,2003-04
- 9.Kevin P Murphy.Dynamic Bayesian Networks[M].www.ai.mit.edu/_murphyk,2002-12
- 10.Vladimir Pavlovi'c,James M Rehg,Tat-Jen Cham Kevin P.A Dynamic Bayesian Network Approach to Figure Tracking Using Learned Dynamic Models[C].In:Intl Conf on Computer Vision (ICCV 99),Corfu, Greece,1999-09
- 11.Vladimir Pavlovi'c,Brendan J Frey,Thomas S Huang.Time-Series Classification Using Mix-State Dynamic Bayesian Networks[J].IEEE,1999;609-615

(上接 203 页)

轴的一个递增函数,即,当 $t_i \leq t_j$ 时,有 $A(t_i) \leq A(t_j)$ 。在运用最小平方点估计时,把 A 纳入线性回归模型的构造。

(收稿日期:2005 年 4 月)

参考文献

- 1.Ioannis A Sideris.The use of scenario planning methodology in mobile business as a learning tool[M].ELTRUN,The e-Business Center Athens University of Economics and Business.
- 2.R N Foster,S Kaplan.Creative Destruction,Managing the uncertain future-The value of Scenario Planning[C].In:OFDA Dealer Strategies Conference,IBM Advanced Business Institute,2002
- 3.Eric Best.Probabilities-help or hindrance in scenario planning[R].Technical Report Vol 2,Num 4,The Global Business Network,1991
- 4.Minh Ha Duong.Imprecise Probability Bridges Scenario Forecast

- 5.D Ellsberg. Risk, ambiguity and the Savage axioms[J].Quarterly Journal of Economics,1961;75:643-669
- 6.John Maynard Keynes.A treatise on probability[M].McMillan,London,1921
- 7.F H Knight.Risk,Uncertainty and Profit[M].Houghton Mifflin,Boston,1921
- 8.L A Zadeh.Fuzzy sets as a basis for a theory of possibility[J].Fuzzy Sets and Systems,1978;1(1):3-38,Reprinted in Fuzzy Sets and Systems,1999;100:9-34
- 9.Gert de Cooman.A gentle introduction to imprecise probability models and their behavioural interpretation[M].SYSTeMS research group, Ghent University
- 10.Bruce L Bowerman,Richard T.O'Connell.Forecasting and Time Series:An Applied Approach[M].Third Edition,ISBN: 0-534-37969-9
- 11.Cliff Joslyn.Measurement of possibilistic histograms from interval data[J].Int J General Systems,1997;26(1-2):9-33