

# 基于 A \* 算法的无人机跟踪目标的航迹规划

王 瑞<sup>1</sup>, 白晓涛<sup>2</sup>, 魏 青<sup>1</sup>, 吕 明<sup>1</sup>

(1. 海军航空兵学院, 辽宁 葫芦岛 125001; 2. 长春工程技术学院, 长春 130117)

**摘要:** 针对无人机跟踪目标的航迹规划问题, 文章提出了一种双评估函数的改进 A \* 算法; 首先, 根据无人机在跟踪目标时的飞行特点提出了航迹规划策略, 并结合无人机的油耗、航迹长短和机动性能等约束条件来设计中目标点的评估函数和航迹片段的评估函数; 之后, 采用加权法对 A \* 算法进行改进, 以使航迹的优化与时间耗费之间找到平衡点; 同时, 改进在 Open 表中插入与删除节点的方式, 提高计算效率; 最后, 通过对跟踪航迹的仿真, 表明该算法可以快速、有效地为无人机在跟踪目标时规划出优化的航迹。

**关键词:** 无人机; 航迹规划; 跟踪目标; A \* 算法

## Trajectory Planning for Unmanned Aerial Vehicle Tracking Targets Based on A \* Algorithm

Wang Rui<sup>1</sup>, Bai Xiaotao<sup>2</sup>, Wei Qing<sup>1</sup>, Lü Ming<sup>1</sup>

(1. Naval Air Academy, Huludao 125001, China;

2. Changchun Insitute of Engineering Technology, Changchun 130117, China)

**Abstract:** An improved A \* algorithm with double cost functions is proposed to plan the trajectory for Unmanned Aerial Vehicle tracking surface targets. The strategy of trajectory planning for UAV tracking targets is designed at first, based on which the cost functions of mid-object points and trajectory segments are proposed with fuel consumption, length of trajectory, and maneuverability. Then the A \* algorithm is adopted with adding-weight to the evaluations, by which the balance is achieved between trajectory optimization and computing time. Meanwhile the computing efficient is improved by change the method of deleting and adding knot in the open list. At last, the simulation results of tracking trajectory show that the A \* algorithm advanced in the article could plan optimal trajectories for unmanned aerial vehicles tracking target quickly and efficiently.

**Keywords:** unmanned aerial vehicle; trajectory planning; tracking target; a \* algorithm

### 0 引言

对地面或海面目标进行侦察、跟踪, 是无人机 (unmanned aerial vehicle, UAV) 的一项重要任务。所以, UAV 跟踪目标的航迹规划和控制问题已成为无人机导航、制导方面的一个研究热点<sup>[1-4]</sup>。目前, 已经提出并得到验证的 UAV 航迹规划算法有多种, 如 A \* 算法、遗传算法、神经网络、Voronoi 图法、随机路径搜索法 (PRM)、人工势场法、几何法等<sup>[5-6]</sup>。这些算法都需要有明确的航迹终点来作为航迹解算条件, 而 UAV 跟踪目标时的航迹没有确定的终点, 所以这些方法都难以完全适用, 同时, 以上算法也存在计算时效差的问题。

本文针对 UAV 跟踪目标时的航迹特点, 提出了一套跟踪目标的飞行策略, 并利用改进的 A \* 算法来规划航迹, 提高了时效性。

### 1 目标跟踪策略

UAV 的速度往往大于地面或水面目标的速度, 所以在跟踪目标时, 如果 UAV 的速度与目标速度差距过大, UAV 会在目标上方做盘旋以与目标保持同步, 并可全方位监视目

标<sup>[7-8]</sup>。如果两者的速度差距不大, 则 UAV 会采用适度的绕飞以保持一定的距离, 如图 1 所示。为便于分析, 设定 UAV 跟踪水面目标, 此时不需考虑地形, UAV 可做定高匀速飞行, 对 UAV 的航迹规划问题就简化为二维。

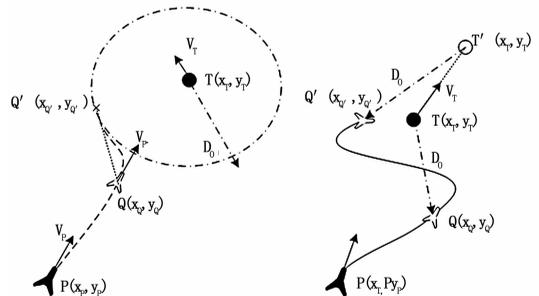


图 1 UAV 跟踪目标策略

不同于 UAV 攻击或侦查固定目标时的航迹规划, 在跟踪移动目标时, UAV 的航迹没有确定的终点。UAV 需要持续不断的跟踪目标, 所以在航迹规划的过程中需要不断地选择合适的中间目标点  $Q(x_q, y_q)$ , 并且在 UAV 当前位置  $P(x_p, y_p)$  与中间目标点  $Q(x_q, y_q)$  之间进行最优的航迹选择。从而, 此时航迹的规划可以分为两步: 选定目标点  $Q(x_q, y_q)$  和规划当前位置与目标点的航迹片段  $\overline{PQ}$ 。之后将  $Q(x_q, y_q)$  点视为当前位置, 选择目标点  $Q(x_q, y_q)$ , 重复以上步骤。采用 A \* 算法来规划 UAV 跟踪目标的航迹, 则需要选择两个评估函

收稿日期: 2014-05-20; 修回日期: 2014-06-23。

作者简介: 王 瑞 (1983-), 河南镇平人, 讲师, 博士, 主要从事飞行控制与飞机仪表设备方向的研究。

数, 来分别选择最优的中间目标点和最优的航迹片段。

## 2 评估函数的选定

采用 A\* 算法来规划 UAV 跟踪目标的航迹, 需要选择最优的中间目标点和最优的航迹片段, 也就需要两个评估函数。

### 2.1 中间目标点的评估函数

由前节的分析可知, UAV 跟踪目标的最佳航迹点的条件是, 该航迹点与目标的距离  $|\overline{QT}|$  为设定距离, 或  $|\overline{QT}|$  最小。

$$\min |\overline{QT}| = \min \sqrt{(x_T - x_Q)^2 + (y_T - y_Q)^2} \quad (1)$$

为保证 UAV 在目标上空的盘旋, 中间目标点的选取应在 UAV 的前方, 即当前位置与中间目标点的向量与 UAV 和目标速度矢量的夹角应最小, 以前者为主。

$$\min \arctg \theta = \min \left\{ q \cdot \arctg \frac{\overline{PQ}}{V_P} + (1-q) \cdot \arctg \frac{\overline{PQ}}{V_P} \right\} \quad (2)$$

式中,  $\theta$  表示夹角之和;  $q$  表示权值, 取值为 0.5~1。此外, 相邻两个中间目标点之间的步长需要合理设定, 步长过小, 增加计算时间, 过大, 则可能规划不出合理的航迹。通过 (1) 和 (2) 式, 可选择最优的中间目标点。

### 2.2 航迹片段的评估函数

航迹片段的评估函数可将之视为有向图的最优路线问题<sup>[7]</sup>。考虑到 UAV 的机动性能和航迹点应满足式 (1), 可构造以下的评估函数<sup>[9]</sup>。

$$W = \min \{ a_1 \cdot W_1 + a_2 \cdot W_2 + a_3 \cdot W_3 \} \quad (3)$$

式中,  $a_i, i = 1, 2, 3$  为权重系数,  $W_i$  为航迹规划的优化指标限制函数,  $W_1$  是航迹长度指标函数,  $W_2$  是 UAV 最小转弯半径约束函数,  $W_3$  为中间目标点与目标的距离约束函数。对于航迹长度约束  $W_1$ , 选取的性能指标可以用以下的广义评估函数所示<sup>[10]</sup>。

$$W_1 = \int_0^L [k\omega_i + (1-k)\omega_f] ds \quad (4)$$

式中,  $\omega_i$  为航路的威胁评估,  $\omega_f$  为航路的油耗评估,  $k$  为油耗与威胁之间的权重系数,  $L$  为航迹片段  $\overline{PQ}$ , 离散形式如公式 (6) 所示。

$$W_1 = \sum [k\omega_i(i, j) + (1-k)\omega_f(i, j)] \quad (5)$$

为保证航迹的可飞性, 需要考虑 UAV 的机动能力, 即使转弯半径  $r_i$  满足以下约束函数。

$$W_2 = \begin{cases} \sum_{i=1}^n \frac{1}{r_i - r_{\min}}, r_i \geq r_{\min} \\ \text{MAX}, r_i < r_{\min} \end{cases} \quad (6)$$

式中,  $r_{\min}$  是最小转弯半径。

规划航迹上的点应与当前目标的距离保持在设定距离, 或接近设定的距离, 从而有以下的评估函数。

$$W_3 = \begin{cases} \sum_{i=1}^n \frac{1}{|D_i - D_0|}, D_i \neq D_0 \\ 0, D_i = D_0 \end{cases} \quad (7)$$

式中,  $D_i$  为航迹点与目标的距离,  $D_0$  设定的 UAV 与目标的理想距离。

## 3 A\* 算法及其改进

A\* 算法是一种基于启发函数的搜索算法。通过定义并满

足相容性条件 (评估函数), 进而在已知地图中生成的一条最优路径<sup>[11-12]</sup>, 如公式 (8) 所示。

$$f(n) = g'(n) + h'(n) \quad (8)$$

式中,  $g'(n)$  表示当前节点 (第  $n$  个节点) 与起点之间航迹的估计评估;  $h'(n)$  表示当前节点与终点之间航迹的估计评估。A\* 算法加入了与航迹规划有关的启发函数, 对航迹点的搜索方向更加趋向于最终点, 从而减小了搜索深度和节点数少, 提升了效率。但为满足 A\* 算法的可接纳性<sup>[13]</sup>, 任一时刻的  $h'(n)$  不能超过从网格上的方格移动到终点的实际移动耗费  $h(n)$ , 这样 A\* 算法的效率提高, 航迹却优化不够。因此, 考虑对 A\* 算法进行改进。

### 3.1 A\* 算法的改进

通过调整  $g'(n)$  和  $h'(n)$  在启发函数  $f(n)$  中的权重, 来减少估价函数中前后段航迹所占的比例, 以在效率和最优化之间找到一个平衡点, 即调整启发函数如公式 (9) 所示。

$$f(n) = q \cdot g'(n) + (1-q)h'(n) \quad (9)$$

式中,  $q$  为权重比, 考虑到  $g'(n)$  和  $h'(n)$  的权重比不小于 1: 1, 其取值范围为 0.5~1, 当取 1 时, 相当于 Dijkstra 算法。当逐步减小  $q$  即增大  $h'(n)$  的权重时, 效率提高; 反之, 效率降低, 航迹最优。通过调整  $q$ , 可使航迹最优的同时, 提高 A\* 算法的时效性和可接纳性。

根据式 (1)、(2)、(3) 和式 (9) 可将评估函数列写为 A\* 算法的形式。

$$f_T(n) = q \cdot \sum_{\mu=0}^n (|\overline{QT}|_u + \arctg \theta_u) + (1-q) \sum_{\mu=n}^e (|\overline{QT}|_u + \arctg \theta_u) \quad (10)$$

$$f_L(m) = q \cdot \sum_{\mu=0}^m W_u + (1-q) \sum_{\mu=m}^e W_u \quad (11)$$

其中,  $f_T(n)$  用于评估中间目标点,  $f_L(m)$  用于评估局部最优航迹。  $h'(n)$  为节点  $n$  以后的飞行路线的估计值, 假定 UAV 采用大圆线飞行。

### 3.2 A\* 算法的步骤

编写 A\* 算法程序时, 需要构造 Open 表和 Closed 表分别用于存储待扩展的节点和已扩展的节点<sup>[14]</sup>。由于传统 Open 表在节点的插入速度和删除速度相互制约, 不能同时满足高效性, 所以根据已有文献<sup>[15]</sup>所报道的方法, 采用改进的双向链表的 Open 表标记插入排序方法, 有效提高了算法的速度。

A\* 算法在改进之后的流程如图 2 所示。

在图 2 中, 关于目标点 Q 的选定流程与下面的最优航迹优化过程是相似的, 所以在图 2 中从略。

## 4 跟踪航迹仿真

根据设计的 A\* 航迹规划算法, 针对 UAV 跟踪静止和移动目标时的航迹进行仿真, 仿真环境为 Matlab7.6。对于移动的目标, 需要考虑其位置的变化, 即取以下设定。

$$\begin{aligned} x_T(k+1) &= x_T(k) + v_x \Delta T \\ y_T(k+1) &= y_T(k) + \Delta T \end{aligned} \quad (12)$$

式中,  $x_T(k)$ 、 $y_T(k)$  为第  $k+1$  时刻目标的坐标,  $v_x$ 、 $v_y$  为目标速度在坐标轴上的分量,  $\Delta T$  为时间增量, 根据计算速度, 可设为 10。

规划的航迹起始点设定为 (100, 100), 速度大小为 10,

方向为北偏东 30°。目标的速度分为静止和移动两种情形。静

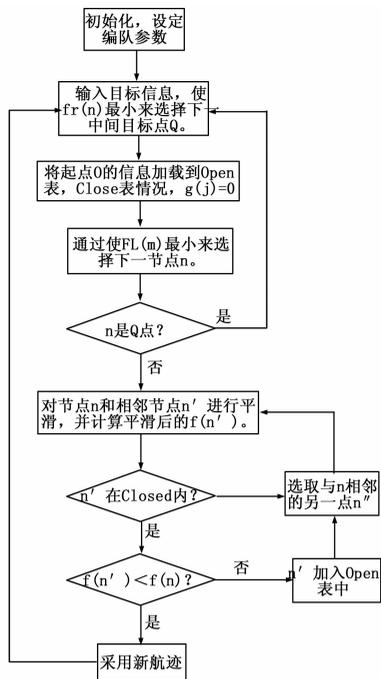


图 2 改进 A\* 算法流程图

止时, 目标位置为 (120, 120); 移动时, 目标起始位置设定为 (100, 130), 速度设定为 2, 方向 135°。中间目标点的步长设定为 10,  $q$  的取值分别设定为 0.5、0.7 和 1, 所得到的仿真结果如图 3 和图 4 所示。

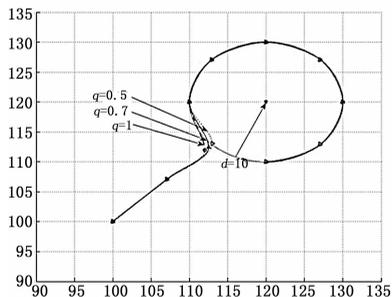


图 3 目标静止时的 UAV 航迹

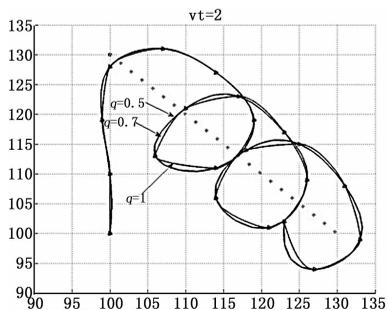


图 4 目标移动时的 UAV 航迹

在图中, 中间目标点分别用不同的点型标出。从图 3 可以看出, 目标静止时, UAV 在距目标一定的距离做盘旋。由于  $q$  取值不同, 在进入盘旋时, 航迹有所波动, 当  $q$  取值 0.7 时

可得到较为满意的航迹。从图 4 可以看出, 当目标以较小的速度 2 移动时, UAV 仍旧会以盘旋的方式跟踪目标, 同样, 当  $q$  取值 0.7 时, 所得到的航迹较为满意。

当目标的速度较大时, UAV 航迹也会随之改变, 如图 5 所示。此时,  $q$  取值 0.7, 当目标速度分别为 6 和 8 时, 该算法所计算的航迹。由图中可以看出, 当目标速度接近 UAV 速度时, UAV 采取绕飞的形式, 绕飞的幅度取决于 UAV 速度与目标速度之差, 差值越大, 绕飞幅度也越大, 反之, 差值小则绕飞幅度也较小。

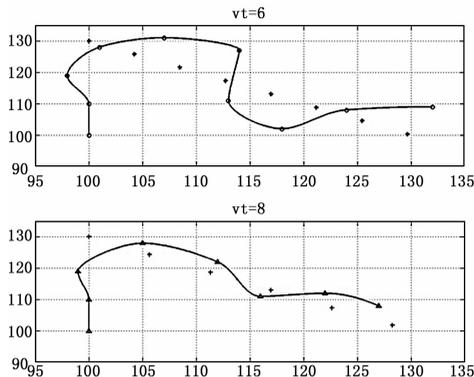


图 5 目标移动速度为 6 和 8 时的 UAV 航迹

目标移动时, 不同  $q$  值所对应的计算时间如表 1 所示。 $q$  取值 0.5 时即为基本的 A\* 算法, 而当  $q$  取值 1 时则相当于 Dijkstra 算法。由表中可以看出, 随着  $q$  值的不断增大, 计算耗费越大。但是, 对比图 3 与图 4 的仿真结果, 随着  $q$  值的增大, 规划的航迹也是逐渐最优的。综上, 可以看出采用不同的  $q$  值对航迹的影响, 随着  $h'(n)$  权重的增加, 航迹优化效果变差, 当  $q$  取中间的 0.7 时, 可以在优化效果与计算时间之间取得平衡。

表 1 计算耗费

$q$	收敛时间/s	评估函数	规划航迹
0.5	1.63	0.33	5.37
0.6	1.82	0.42	5.45
0.7	2.05	0.53	5.62
0.8	2.32	0.64	5.65
0.9	2.68	0.89	5.72
1	3.21	1.02	5.88

### 5 结论

针对 UAV 跟踪水面目标的航迹规划问题, 本文设计了盘旋和绕飞的跟踪策略, 并据此分别设定了中间目标点和航迹片段的评估函数。通过对 A\* 算法的改进来提高航迹规划的优化性能和时效性。仿真结果表明, 本文所提方法可以规划出可行的跟踪航迹, 并使提升了计算效率, 降低了计算耗费。但是具体到对航迹的控制, 还需要根据目标的速度进行实时调整, 这对航迹的规划与控制的实效性提出了挑战, 也是以后进一步的研究方向。

参考文献:

[1] 高 晖, 陈 欣, 夏云程. 无人机航路规划研究 [J]. 南京航空航天大学学报, 2001, 33 (2): 135 - 138.

[2] 王景杰, 吴文启, 梁朝阳等. 无人飞行器航迹规划评价方法研究 [J]. 计算机测量与控制, 2012 (8): 2237 - 2241.

[3] 安玉娇, 江辉军, 郑根营, 马 煜. 无人机低空突防航迹规划算法研究 [J]. 测控技术, 2011, 30 (12): 86 - 90.

[4] 王绪芝, 姚 敏, 赵 敏, 胡中华. 基于蚁群算法的无人机航迹规划及其动态仿真 [J]. 指挥控制与仿真, 2012, 34 (1): 29 - 32.

[5] Alex Y, Sanjiv S, Anthony S. An efficient online path planner for outdoor mobile robots [J]. Robotics and Autonomous Systems, 2000, 32: 129 - 143.

[6] 胡中华. 基于智能优化算法的无人机航迹规划若干关键技术研究 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2011.

[7] 罗 建. 基于 Lyapunov 导航向量场的无人机协同跟踪地面目标 [J]. 复旦学报 (自然科学版), 2012, 51 (4): 406 - 413.

[8] 李文超, 袁冬莉. 基于机动目标模型的无人机视场跟踪仿真研究

[J]. 计算机测量与控制, 2011, 19 (2): 402 - 404.

[9] 张得舒, 黄长强, 丁达理等. 基于 A\* 算法的无人机攻击轨迹解算 [J]. 电光与控制, 2011, 18 (3): 18 - 20.

[10] 何平川, 戴树岭. 一种改进的 UAV 三维航迹实时规划算法 [J]. 北京航空航天大学学报, 2010, 36 (10): 1248 - 1251.

[11] 王庆江, 高晓光, 符小卫. 无威胁情况下任意两点间的无人机路径规划 [J]. 系统工程与电子技术, 2009, 31 (9): 2157 - 2162.

[12] 赵真明, 孟正大. 基于加权 A\* 算法的服务型机器人路径规划 [J]. 华中科技大学学报 (自然科学版), 2008 (36): 196 - 198.

[13] Hennebray Michae, Jian Kuod, Nygard Kendall. Dynamic network refinement in automated aircraft route planning [A]. IEEE IT 2007 Proceedings [C]. Chicago: IEEE, 2007: 373 - 377.

[14] 冯乃勤, 王岁花, 郑延斌. OPE 表和 CLOSED 表的合一 [J]. 计算机工程与应用, 2003, 16: 100 - 102.

[15] 张大巧, 鲜 勇, 许立军, 王 剑. 基于改进 A\* 的三维航迹快速规划方法 [J]. 弹箭与制导学报, 2010, 30 (5): 59 - 62.

(上接第 122 页)

服务器, 底层设备的数据通过 OPC 通道传输到 OPC 客户端, 并在 VB 中编写磨机负荷控制算法, 最后将得到的控制数据再由 OPC 通道逐级传给底层设备, 同时在 VB 客户端中可以实现对各个参数的设定和报警功能, 达到对磨机负荷的优化控制效果。

3.2 仿真分析

对本文设计的控制策略用 Matlab/Simulink 进行了仿真研究, 用二阶时滞系统代替磨机负荷模型, 其传递函数为:  $G(s) = \frac{e^{-50s}}{700s^2 + 80s + 1}$ , 采用单位阶跃信号作为输入, 并在某一时刻随机加入干扰信号, 仿真结果如图 6 所示。由图可知, 模糊免疫 PID 控制器的调节作用比传统 PID 控制效果要好很多, 其能够使系统有较快的调节速度、较小的系统超调, 且在加入干扰后模糊免疫 PID 控制器能够使系统快速的达到稳定状态。

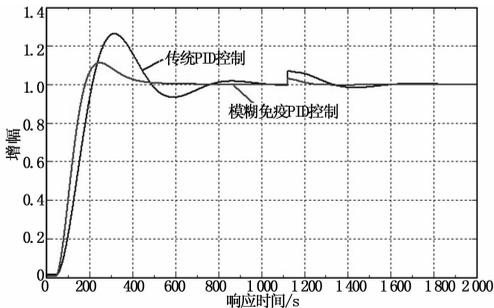


图 6 仿真效果图

4 结语

针对矿厂磨机负荷不易控制的问题, 设计并实现了磨机负荷模糊免疫 PID 自寻优专家控制系统, 用 VB 编写 OPC 客户端及控制程序, 实现对磨机负荷的优化计算与自动控制。仿真实验表明此控制系统较传统的 PID 控制有较好的控制效果,

增强了系统的抗干扰能力。通过在实际矿场一段时间的试运行, 表明本控制器能够降低矿场消耗, 使矿场的经济效益提高了 3%, 且在保证系统安全稳定运行的情况下大大降低了工作人员的劳动强度。

参考文献:

[1] 于仲安, 刘 颖. 基于 PLC 的磨矿分级监控系统设计 [J]. 计算机测量与控制, 2010, 18 (45): 838 - 840.

[2] 汤 健, 赵立杰, 岳 恒, 等. 磨机负荷检测方法研究综述 [J]. 控制工程, 2010, 17 (5): 565 - 57.

[3] 刘月丹. 钢球磨机机制粉系统的优化控制算法研究及实现 [D]. 北京: 华北电力大学, 2011.

[4] 王耀南, 孙 炜, 等. 智能控制理论及应用 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2008.

[5] 马祥兴. 自寻优自调整模糊 PID 控制器的设计与仿真 [J]. 计算机仿真, 2011, 28 (4): 216 - 220.

[6] 曹 晖, 司刚全, 张彦斌, 等. 基于 ANFIS 的自寻优算法在磨机机制粉系统中的应用 [A]. 中国仪器仪表学会第九届青年学术会议论文集 [C]. 2007, 10: 149 - 152.

[7] 张卫东. 基于改进模糊免疫 PID 控制的网络控制系统 [D]. 海南: 海南大学, 2012.

[8] 丁曙光, 束鹏程, 桂贵生. 基于免疫 PID 控制的速度伺服系统的仿真研究 [J]. 机械设计与制造, 2012 (11): 112 - 114.

[9] 文定都. 基于模糊免疫 PID 的电加热炉温度控制系统 [J]. 冶金自动化, 2007 (6): 43 - 46.

[10] 宋乐鹏, 刘 斌, 陈红芬, 吴慧民. 基于 Bang-Bang 模糊自适应 PID 的干燥窑温度控制 [J]. 计算机与应用化学, 2012, 29 (7): 881 - 884.

[11] 张 巍, 卢宇清. 基于在线自适应遗传算法的 PID 参数整定和优化 [J]. 计算机仿真, 2011, 28 (12): 154 - 157.

[12] 邹孝付, 马小平, 焦晓宁. OPC 在煤矿生产中的应用研究 [J]. 工况自动化, 2010, 8 (8): 117 - 120.