

文章编号: 2095-4980(2013)02-0304-05

基于遗传算法的机场场面目标冲突解脱方法

王小磊, 罗喜伶

(北京航空航天大学 电子信息工程学院, 北京 100191)

摘 要: 为了解决机场场面运行研究中场面目标冲突解脱的问题, 提出一种基于遗传算法的混合整数规划模型, 详细研究了等待时间权重系数对冲突解脱的影响, 对满足等待时间约束的情况, 进行滑行时刻优化; 不满足等待时间约束时, 将典型冲突避免、滑行规则及安全间隔作为约束条件, 建立场面滑行调度优化模型, 基于遗传算法给出了飞机冲突路径的解脱优化算法。仿真结果表明这方法既可提高场面目标冲突解脱效率, 又能得到滑行最优路径, 验证了模型的可行性。

关键词: 冲突解脱; 遗传算法; 路径优化; 混合整数规划模型

中图分类号: TN911.72

文献标识码: A

Conflict resolution in airport surface based on genetic algorithm

WANG Xiao-lei, LUO Xi-ling

(School of Electronic and Information Engineering, BEIHANG University, Beijing 100191, China)

Abstract: Scene target conflicts uncouple problem is the difficult problem of airport surface operation. A mixed integer programming model is proposed based on genetic algorithm. The impact of waiting time weight coefficients on the conflict uncouple is studied. For the satisfied waiting time constraints, the sliding time will be optimized; otherwise, it will consider the typical conflict avoiding, the slide rules and safety intervals as the constraints. The scene sliding schedule optimization model is established, and the liberation optimization algorithm of the aircraft conflict path is proposed based on genetic algorithm. The experimental results reveal that the proposed method not only can improve the uncouple efficiency of scene target conflicts, but also can achieve the sliding optimal path, which has verified the feasibility of the model.

Key words: conflict resolution; genetic algorithm; path optimization; mixed integer programming model

随着中国民航快速发展, 2011 年国内航空全行业实现运输飞行 556.1 万小时、253.5 万架次, 同比分别增加 8.9% 和 6.0%。但各种不安全事件仍然大量存在, 经统计发生在场面运行下的事故^[1-2]: 冲出/偏出跑道、跑道侵入、擦尾/擦发动机/擦翼尖, 占严重事故征候总量的 62%。解决机场场面目标冲突已成为亟待解决的问题。

近年来, 机场中存在很多制约机场运行效率的场面目标冲突, 主要是跑道、滑行道和停机位。随着滑行过程中的不确定性对场面目标滑行冲突的影响日益凸显, 研究重点也逐渐转移到为提高场面冲突解脱效率进行机场地面滑行路径优化^[3-5]。国内外学者已经对滑行冲突问题进行了大量的研究。其中, 路径优化的方法只是一个局部最优而非全局最优, 只能保证当前航班的操作最优, 而没有考虑到路径优化对后续航班的影响, 代表算法: 启发式 A* 算法^[6]、Dijkstra 算法^[7]。时刻最优的方法是一类混合整数规划问题, 对冲突目标进行等待时刻规划, 确保滑行路径上各网络节点的时刻最优, 其求解的复杂度随航空器的数量增长而急剧增加, 代表算法: J W Smeltink 等提出的场面滑行时刻最优模型^[8], 张莹等建立的混合整数规划模型^[9]。

遗传算法^[10-11]作为一种基于群体智能的启发式优化算法, 具有全局随机搜索寻优, 参数少, 计算量小, 收敛速度快等优点。本文结合等待时间权重系数的研究, 采用遗传算法对冲突路径进行优化, 实现场面目标冲突解脱, 从而保障繁忙机场的场面交通安全有效地运行。

1 建立模型

1.1 机场场面网络图

机场场面网络由跑道、滑行道和节点组成, 见图 1, 以成都双流国际机场为例, 将机场场面系统抽象为二维网络图 $G=(V,E)$, 其中场面网络节点集合为 V , 滑行道有向边集合为 E 。机场网络图中: $(R_1, R_2, \dots, R_6)$ 是跑道脱离口点集, $(A_1, A_2, \dots, A_7)$ 是滑行道交叉节点集、 $(K_1, K_2, \dots, K_{263})$ 为停机位点集; (A_1, A_2) 表示飞机从 A_1 点滑向 A_2 点的有向边。

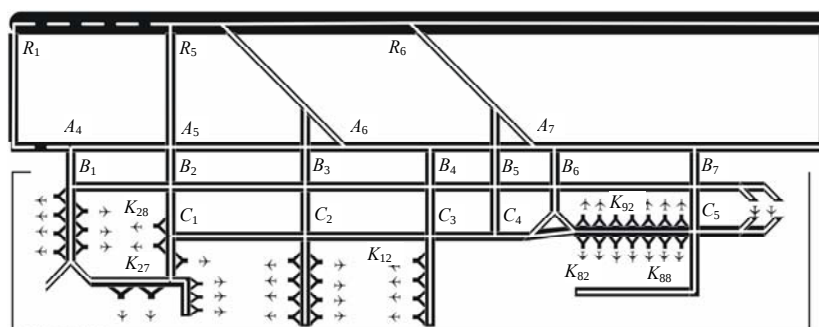


Fig.1 Airport surface network diagram

图1 机场场面网络图

1.2 变量的设定

设 $N=\{F_1, F_2, \dots, F_n\}$ 表示需要规划的飞机集合, 其中进场飞机 $A \in N$, 离场飞机 $D \in N$; $R=\{R_1, R_2, \dots, R_n\}$ 为飞机滑行路径集合, R_i 表示第 i 架飞机 F_i 的滑行路径。滑行路径 R_i 是一个有序点集 $(p_1^i, p_2^i, \dots, p_{k_i}^i)$, 其中 $p_g^i \in V$, $g=1, 2, \dots, k_i$, $(p_g^i, p_{g+1}^i) \in E$, $g=1, 2, \dots, k_i-1$ 。用 (p_g^i, p_{g+1}^i) 表示有向边 (p_g^i, p_{g+1}^i) 是飞机 F_i 滑行路径上的一段, $p_g \in R_i$ 表示节点 p_g 在飞机 F_i 的滑行路径上。进场飞机的预计到达时间为 $ETOA$, 离场飞机的预计起飞时间为 $ETOD$ 。

变量定义如下:

- 1) 定义滑行变量为 X_{ijp_g} , 当 $X_{ijp_g}=1$ 时, 表明飞机 F_j 紧跟在飞机 F_i 之后到达点 p_g ; 而 $X_{ijp_g}=0$ 时, 则相反;
- 2) 定义存在滑行冲突变量是 Y_{ijp_g} , 当 $Y_{ijp_g}=1$ 时, 表明飞机 F_j 紧跟在飞机 F_i 之后到达点 p_g , 并且两飞机不满足最小安全间隔, 即在节点 p_g 发生冲突; 当 $Y_{ijp_g}=0$ 时, 则不存在冲突;
- 3) 定义滑行距离为 $S_{p_g p_{g+1}^i}$, 其为节点 p_g 到 p_{g+1}^i 间的有向边 (p_g, p_{g+1}^i) 的距离;
- 4) 定义当前时刻为 $t_{p_g^i}$, 其为飞机 F_i 在滑行到节点 p_g 处时刻;
- 5) 定义等待时间为 $t_{p_g^i}^j$, 其为飞机 F_j 在节点 p_g 处等待时间;
- 6) 定义最小滑行距离间隔为 d_{ij} , 即飞机 F_i (前机) 和飞机 F_j 之间的最小距离, 最小时间间隔为 t_{ij} ;
- 7) 定义最小安全距离间隔为 ds_{ij} , 即飞机 F_i (前机) 和飞机 F_j 之间的最小安全距离间隔, dt_{ij} 为对应的最小安全时间间隔;
- 8) 定义滑行时间为 $t_{p_g p_{g+1}^i}$, 即飞机 F_i 在有向边 (p_g, p_{g+1}^i) 上的滑行时间;
- 9) 定义 v_i 为飞机 F_i 的场面滑行速度;
- 10) 定义 t_{p_i} 为飞机 F_i 开始滑行的时刻;
- 11) 定义 $t_{p_{k_i}^i}$ 为飞机 F_i 滑行到预定位置的时刻。

1.3 目标函数及约束条件

考虑到地面滑行的航班必须满足最小安全间距和避免冲突的原则, 引入下列约束条件。规定任意 2 架飞机间滑行距离必须大于最小安全距离间隔^[12-13], 其冲突间隔标准为:

$$d_{ij} > ds_{ij} \quad (1)$$

则判定这 2 架飞机 F_i 和 F_j 不会发生冲突。 ds_{ij} 为飞机 F_i (前机) 和 F_j 之间的最小安全距离间隔, 根据民航运行准则^[13], 其距离间隔标准取决于飞机的机型, 见表 1。

任意的 2 架飞机为避免冲突滑行时间间隔应大于最小时间间隔, 时间间隔约束为:

$$t_{ij} > dt_{ij} \quad (2)$$

根据冲突类型, 场面冲突约束可以细化为:

表1 飞机在滑行道上的最小距离间隔和最小时间间隔标准
Table1 Aircraft taxiway minimum separation standard and minimum time interval standard

front	separation standard/m	time interval standard/s
heavy	300	21.6
medium	200	14.4
light	100	7.2

1) 交叉约束: 2 架飞机 F_i (前机)和 F_j 的路径集合存在交叉点时, 为避免交叉冲突, 必须在节点处满足最小安全时间间隔:

$$t_{p_{g,j}} - t_{p_{g,i}} \geq dt_{ij}, \quad \forall i, j \in R, \quad i \neq j \quad (3)$$

2) 追尾约束: 如果 2 架飞机 F_i (前机)和 F_j 在同一条路径段 (p_g, p_{g+1}) 上同向滑行, 且飞机 F_i (前机)在 F_j 之前到达 p_g 节点, 为避免追尾冲突, 要求飞机 F_i (前机)在 F_j 之前到达 p_{g+1} 节点:

$$X_{ijp_g} - X_{ijp_{g+1}} = 0, \quad t_{p_{g,j}} - t_{p_{g,i}} \geq dt_{ij}, \quad \forall i, j \in R, \quad i \neq j, \quad \forall (p_g, p_{g+1}) \in R_i \cap R_j \quad (4)$$

3) 对头约束: 如果飞机 F_i 在路径段 (p_g, p_{g+1}) 上滑行, 飞机 F_j 在 (p_{g+1}, p_g) 上滑行, 这 2 架飞机应满足约束:

$$X_{ijp_g} - X_{ijp_{g+1}} = 0, \quad t_{p_{g,j}} - t_{p_{g,i}} \geq dt_{ij}, \quad \forall i, j \in R, \quad i \neq j, \quad \forall (p_g, p_{g+1}) \in R_i \cap R_j \text{ 且 } (p_{g+1}, p_g) \in R_j \quad (5)$$

建立地面滑行模型的目的是为了在满足机场地面控制规则及飞机安全间隔条件的前提下, 进行目标冲突解脱, 既要保证飞机间不再发生冲突, 也要保证每架飞机在解脱后继续沿解脱路径向既定位置滑行。也就是说, 要保证每架飞机滑行路径距离尽可能小, 这样花费的滑行时间也最短, 才能达到提高机场运行效率、实现场面目标快速解脱的目的。因此, 可以得到场面总滑行时间最小作为目标函数:

$$F = \min \sum_i T_i = \min \sum_i (t_{p_{k,i}} - t_{p_i}) \quad (6)$$

式中 T_i 为飞机 F_i 在其滑行路径下滑行时间。

现在引入一个等待时刻权重系数 $\alpha (0 \leq \alpha \leq 1)$, α 为调节场面滑行冲突等待时间和优化路径的比例参数。

飞机 F_i 为前机, 且其优先级高于飞机 F_j , 所以飞机 F_j 的等待时间 $t_{p_{g,j}}^j$ 约束为:

$$t_{p_{g,j}}^j \leq \alpha * dt_{ij}, \quad 0 \leq \alpha \leq 1, \quad \forall i, j \in R, \quad i \neq j \quad (7)$$

飞机 F_i 为前机, 且其优先级低于飞机 F_j , 所以飞机 F_i 的等待时间 $t_{p_{g,i}}^i$ 约束为:

$$t_{p_{g,i}}^i \leq \alpha * dt_{ij}, \quad 0 \leq \alpha \leq 1, \quad \forall i, j \in R, \quad i \neq j \quad (8)$$

2 冲突解脱算法的实现

冲突解脱算法步骤如下:

第 1 步: 初始化群体, 群体数目由场面飞机个体决定, 为每个个体(染色体)进行编码, 编码原则依据飞机个体路径节点进行十进制编码; 选用机场场面网络节点作为编码, 使用 $(0, 1, \dots, n-1)$ 这 n 个数来表示滑行路径网络节点, 每架飞机的滑行路径是由这些数码组成的基因编码串。

第 2 步: 根据式(9)计算各个个体飞机的适应度:

$$f(x) = \frac{1}{1 + F(x)} \quad (9)$$

式中 $F(x)$ 为目标函数。

第 3 步: 根据式(3)~式(6)场面目标冲突约束, 判定第 2 步计算的适应度是否符合最小安全时间间隔约束和终止条件, 若满足最小安全间隔标准, 则结束计算, 并输出冲突解脱的最优解; 否则转向第 4 步。

第 4 步: 根据飞机优先级和机型, 判定是否符合等待时间约束式(7)或式(8)。若符合, 则重新计算个体适应度并转向第 2 步, 否则转向第 5 步。

第 5 步: 依据适应度选择再生飞机个体, 发生冲突飞机个体的选择概率与场面滑行飞机个体的适应度直接相关, 选择算子计算公式为:

$$P_i = \frac{f(x_i)}{\sum_i f(x_i)} \quad (10)$$

由式(10)可见发生冲突的个体的选择概率较大。适应度高的飞机个体被选中的概率愈高, 适应度低的飞机个体就被淘汰;

第 6 步: 采用交叉概率和变异概率可以随着适应度自动改变的自适应遗传算法。自适应遗传算法中选取的交叉概率 P_c 和变异概率 P_m 的计算公式为:

$$P_c = \begin{cases} \frac{k_1(f_{\max} - f)}{f_{\max} - f_{\text{avg}}}, & f \geq f_{\text{avg}} \\ k_2, & f < f_{\text{avg}} \end{cases} \quad (11)$$

$$P_m = \begin{cases} k_3 \frac{(f_{\max} - f')}{f_{\max} - f_{\text{avg}}}, & f' \geq f_{\text{avg}} \\ k_4, & f' < f_{\text{avg}} \end{cases} \quad (12)$$

式中: $f_{\max}$ 为飞机群体中的最大适应度值; f_{avg} 为飞机群体平均适应度值; f 为进行交叉变异的 2 架飞机个体中较大的适应度值; f' 为要进行变异飞机个体的适应度值; k_1, k_2, k_3 和 k_4 为常数。遗传算法的参数中交叉概率和变异概率的选择是影响遗传算法行为和性能的关键所在, 直接影响算法的收敛性。因此, 按照式(11)和式(12)分别确定交叉概率和变异概率。

第 7 步: 通过交叉和变异分别产生新的飞机个体, 由这些个体构成新一代的种群, 并返回第 2 步。

算法流程见图 2。

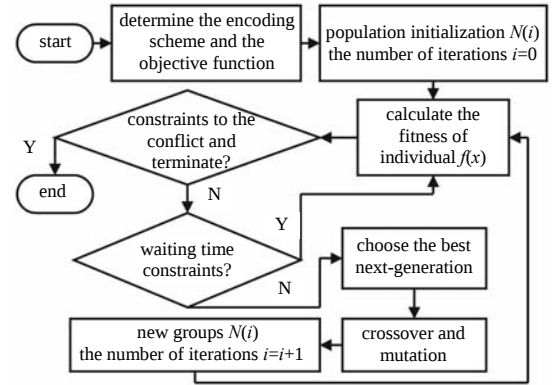


Fig.2 Algorithm flowchart

图 2 算法流程图

3 仿真结果分析

本文选取成都双流国际机场 $T=300 \text{ min}$ 时段的航班计划为仿真对象, 共有 $k=150$ 个起降架次。采用遗传算法进行仿真, 遗传算法中的参数取值为: 种群大小为 $m(0 \leq m \leq 150)$, 杂交概率和杂交概率的计算常数选取如下: $k_1=0.5, k_2=0.9, k_3=0.02, k_4=0.05$, 终止迭代次数为 100; 依照成都双流国际机场的操作细则, 在滑行道和跑道上滑行速度限制为 50 km/h , 滑行最小安全时间间隔标准见表 1。

图 3~图 6 为仿真结果。由图 3 和图 4 可以看出: 从整体上, 当 $0 \leq \alpha \leq 0.5$ 时, 随着 α 的增大, 时刻优化比重增加, 滑行时间 $F = \min \sum_i (t_{p_{ki}} - t_{p_{li}})$ 减小; 而当 $0.5 \leq \alpha \leq 1$ 时, 随着 α 的增大, 路径优化比重增大, 花销增大。因此 α 可以被视为调节场面滑行冲突等待时间和优化路径的比例参数。

由图 3 和图 5 可以看出: 随飞机架次 $m(0 \leq m \leq 50)$ 的增大, 过多的路径优化, 使时间花销急剧增大。随飞机架次 $m(50 \leq m \leq 100)$ 的增大, 路径优化和时刻等待趋于均衡, 时间花销变化平缓。随飞机架次 $m(100 \leq m \leq 150)$ 的增大, 时刻等待增多, 使时间花销急剧增大。随着飞机种群 $m(0 \leq m \leq 150)$ 的增大, 滑行时间 $F = \min \sum_i (t_{p_{ki}} - t_{p_{li}})$ 增大, 在 $m=80$ 时增长系数最小, 其场面冲突解脱效果最好。

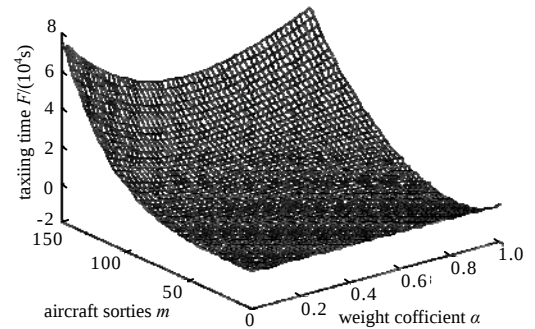


Fig.3 Aircraft sorties m and the weight coefficient α affecting on glide time

图 3 飞机架次 m 和权重系数 α 对滑行时间的影响

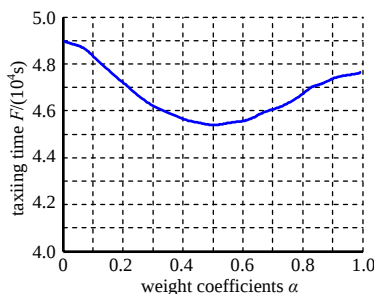


Fig.4 When sorties $m=100$, the weight coefficient α affects on taxiing time

图 4 架次 $m=100$ 时权重系数 α 对滑行时间的影响

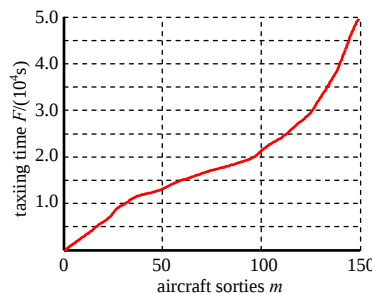


Fig.5 When weight coefficient $\alpha=0.5$, aircraft sorties m affects on sliding time

图 5 权重系数 $\alpha=0.5$ 时架次 m 对滑行时间的影响

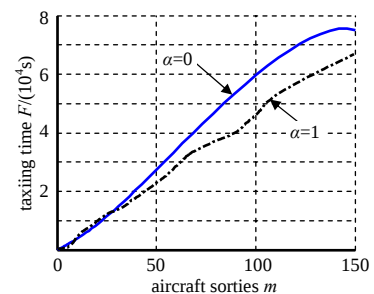


Fig.6 Weight coefficient $\alpha=0$ and 1, comparison of glide times

图 6 权重系数 $\alpha=0$ 和 1 时滑行时间的影响比较

由图 3 和图 6 可以看出: 当 $\alpha=0$ 时, 只考虑优化路径的情况, 当 $\alpha=1$ 时, 只考虑冲突时间等待; 飞机架次 m 较小时, 路径优化优于时刻优化。随着飞机架次 m 增大, 时刻优化优于路径优化。

4 结论

本文研究了基于遗传算法的机场场面目标冲突解脱问题。建立了基于遗传算法的混合整数规划模型,首先,对满足权重系数下的等待时间约束,确定飞机经过冲突节点处的最优时刻;其次,对不满足等待时间约束的冲突,将典型冲突模式、安全时间间隔与滑行跑道运行规则等作为约束条件,并采用遗传算法进行路径优化求解。仿真结果表明:本文算法在权重系数 $\alpha=0.5$ 时,其解脱效率相对最优;在权重系数 α 一定的情况下,滑行时间曲线在飞机架次 $m=80$ 附近变化比较平缓,说明 $m=80$ 时解脱最优,在 $m<80$ 所付代价是滑行花费时间,在 $m>80$ 所付出代价是过多的滑行等待时间。

参考文献

- [1] 赵云帆,陈艳秋. 2005~2008 年中国民航严重事故征候分析及对策建议[J]. 航空安全, 2009(5):53-55. (ZHAO Yunfan, CHEN Yanqiu. 2005-2008 China civil aviation serious incident analysis and countermeasures[J]. Aviation Safety, 2009(5):53-55.)
- [2] 中国民航科学技术研究院. 2011 年中国民航不安全事件统计分析报告[EB/OL]. [2012-03-01]. <http://wenku.baidu.com/view/34529c282af90242a895e567.html>. (General Administration of Civil Aviation of China Academy of Science and Technology. Chinese civil aviation safety incidents statistical analysis report of 2011[EB/OL]. [2012-03-01]. <http://wenku.baidu.com/view/34529c282af90242a895e567.html>.)
- [3] 凌明,张军,罗喜伶. A-SMGCS 系统动态工作方法[J]. 计算机仿真, 2007,24(8):57-60. (LING Ming,ZHANG Jun,LUO Xiling. A-SMGCS system level dynamic method[J]. Computer Simulation, 2007,24(8):57-60.)
- [4] Jean-Baptiste Gotteland,Nicolas Durand,Jean Marc Alliot,et al. Aircraft Ground Traffic Optimization[C]// Fourth International Air Traffic Management R&D Seminar ATM-2001. Santa Fe,NM,USA:[s.n.], 2001:1-9.
- [5] 梁靓,黄玉清,张玲霞,等. 机器人的差分方向控制与实现[J]. 信息与电子工程, 2004,2(3):196-199. (LIANG Liang, HUANG Yuqing,ZHANG Lingxia,et al. Lee would like to differential direction of the robot control[J]. Information and Electronic Engineering, 2004,2(3):196-199.)
- [6] Jesús Garcia,Antonio Berlanga,José M Molina,et al. Planning techniques for airport ground operations[ED/OL]. [2012-03-01]. <http://www.giaa.inf.uc3m.es/investigacion/publicaciones/congresos/internacionales/2002/Garcia-DASC-2002.pdf>.
- [7] JI Rong,HAN Song Chen. Route Optimizing Algorithm of Airport Surface Based on GIS[J]. Transactions of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2005,22(1):71-77.
- [8] Smeltink J W,Soomer M J,DeWaal P R,et al. An optimization model for airport taxi scheduling[C]// Proc. of INFORMS Annual Meeting. Denver:[s.n.], 2004:1-25.
- [9] 张莹,胡明华,王艳军. 航空器机场地面滑行时刻优化模型研究[J]. 中国民航飞行学院报, 2006,17(5):3-6. (ZHANG Ying,HU Minghua,WANG Yanjun. Aircraft airport ground taxiing time Optimization Model[J]. Report of the China Civil Aviation College, 2006,17(5):3-6.)
- [10] 刘长有,丛晓东. 基于遗传算法的飞机滑行路径优化[J]. 交通信息与安全, 2009,27(3):6-9. (LIU Changyou,CONG Xiaodong. According to the airplane of the heredity algorithm skid the path be excellent to turn[J]. Communication Information and Safety, 2009,27(3):6-9.)
- [11] Stephane Mondoloni,Sheila Conway. An Airborne Conflict Resolution Approach Using a Genetic algorithm[C]// AIAA Guidance,Navigation,and Control Conference & Exhibit. Montreal,Canada:[s.n.], 2001:11-16.
- [12] 董莹,安然. 机场航空器地面滑行时间优化研究[J]. 交通运输系统工程与信息, 2011,11(5):141-146. (DONG Ying,AN Ran. Optimization of Aircraft Taxiing Time[J]. Transportation Systems Engineering and Information, 2011,11(5):141-146.)
- [13] ICAO. Advanced surface movement guidance and control systems manual[R]. ICAO-9830, 2004.

作者简介:



王小磊(1986-),男,河南省驻马店市人,在读硕士研究生,主要研究领域为机场场面目标冲突检测与解脱.email:13811551721@139.com.

罗喜伶(1974-),男,江西省泰和县人,副教授,研究领域为计算机视觉、高级场面监视、空中交通管理、新航行系统、自组织网络、信息传输处理、嵌入式系统设计技术等。