

## A-SMGCS 滑行道冲突预测与避免控制

朱新平 汤新民 韩松臣

(南京航空航天大学民航学院,南京,210016)

**摘要:**针对先进机场场面引导与控制系统(Advanced surface movement guidance and control system, A-SMGCS)滑行道冲突预测与避免控制,提出基于事件反馈的闭环控制框架,并重点解决对头冲突预测与避免控制问题。建立滑行道受控着色Petri网模型。提出航空器可控滑行路段概念,并给出其对应子模型的生成规则。利用子模型中环路和环路链,给出无对头冲突的充分必要条件。提出对头冲突避免控制策略,以及适合实时控制的对头冲突预测与避免控制算法。算例表明本文能根据场面状态及时识别对头冲突并实现冲突避免。

**关键词:**先进机场场面引导与控制系统;滑行道控制;冲突预测与避免;Petri网

**中图分类号:** V351.11

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1005-2615(2011)04-0504-07

### Conflict Prediction and Avoidance Control for A-SMGCS Taxiway

*Zhu Xinping, Tang Xinmin, Han Songchen*

(College of Civil Aviation, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing, 210016, China)

**Abstract:** The closed loop control architecture based on event-feedback is proposed for conflict prediction and avoidance control of advanced surface movement guidance and control system(A-SMGCS) taxiway. The head-on conflict prediction and avoidance for taxiway is investigated intensively. Controlled colored Petri net model for taxiway is constructed. The controlled taxiing route segment concept is presented, and rules for generating related sub-model are provided. Using loops and loop chains contained in the sub-model, the sufficient and necessary condition for head-on conflict-free operation of taxiway is presented. The avoidance strategies and real time control algorithm for head-on conflict prediction and avoidance are proposed. The example demonstrates that the proposed strategies can identify and avoid head-on conflict on taxiway in time by monitoring the surface state.

**Key words:** advanced surface movement guidance and control system; taxiway control; conflict prediction and avoidance; Petri net

随着航空运输的发展,飞行区场面交通日益拥挤。增建跑道或滑行道来提升场面运行能力的方式往往受制于地理环境因素无法展开,且工程建设周期较长,难以及时发挥效益。因此,借助先进自动控制技术提升场面管制能力受到各方重视。国际民航组织提出的先进机场场面引导与控制系统(Advanced surface movement guidance and control system, A-SMGCS)实施方案,采用多种传感技术

获取场面目标信息并实现冲突控制,已成为场面运行自动化控制系统的实施标准<sup>[1]</sup>,并在欧洲多个机场展开<sup>[2-3]</sup>。A-SMGCS包括监视、控制、路由和引导4个模块。其中,控制模块接收监视模块获取的目标信息,并结合路由模块的路由信息,进行冲突预测与避免控制。本文主要研究控制模块中的滑行道冲突预测和避免控制,并假设其他模块可提供必要信息输入。

**基金项目:**国家自然科学基金(60879011)资助项目;教育部博士点基金(200802871022)资助项目;南京航空航天大学研究生创新基地(实验室)开放基金(200902013)资助项目。

**收稿日期:**2010-07-10;**修订日期:**2010-12-16

**通讯作者:**韩松臣,男,教授,博士生导师,E-mail:hansongchen@nuaa.edu.cn。

当前滑行道冲突控制通常在路由规划时考虑,即通过事先规划使相关航空器在经过各交叉口时具有合理的时间间隔来提前避免冲突<sup>[4-6]</sup>。但该控制方法本质上属于开环控制模式,无法考虑场面实时运行情况。当航空器未在规定时间内通过其路径上某一交叉口、或场面随机性事件(如航空器运行故障等)导致运行条件发生改变时,该控制方式无法为管制员提供实时决策支持。在其他相关研究中,文献[7]从航空器性能角度,建立了航空器非线性滑行控制模型,研究对场面运行过程实施高精度控制的可能性,为实现滑行冲突避免精确控制提供了依据。MIT Lincoln 实验室在场面运行自动化系统中,建立了滑行道节点-路段模型,对滑行道冲突进行预测与告警<sup>[8]</sup>。FAA 的机场活动区安全系统(A-MASS)利用场面地理数据和目标轨迹数据实时探测滑行道冲突,并提供告警信息给管制人员,但该系统仅考虑了交叉口冲突<sup>[9-10]</sup>。文献[11]在此基础上进一步建立先进滑行道引导系统(ATGS),通过自动控制的滑行道中线灯为航空器滑行提供引导,以实现滑行冲突避免。文献[12]将场面运行过程视为离散事件动态系统并构建对应的 Petri 网运行模型和集中式控制器,但仅适用于小型机场场面冲突控制。文献[13]基于不同的航空器位置关系建立了场面冲突预测和告警标准,但并未给出具体实现方法。文献[14]对低能见度下滑行道冲突控制的各种方法对比分析,提出了区块控制和气泡间隔控制相结合的冲突控制方法,并进行了仿真试验。文献[15]研究了基于视频图像分析与定位的飞机滑翔翼尖定位跟踪技术,实现场面防撞。综上所述,迄今对滑行道运行动态模型,以及以此为基础的冲突预测和避免控制方法尚未进行深入研究,且鲜有研究是直接针对 A-SMGCS 滑行道运行控制的。

本文提出 A-SMGCS 滑行道运行虚拟区间控制方法,也即将整个滑行道系统划分为一系列运行区间,每个区间在同一时刻只允许被一架航空器占用。同时提出基于事件反馈的闭环控制框架如图 1

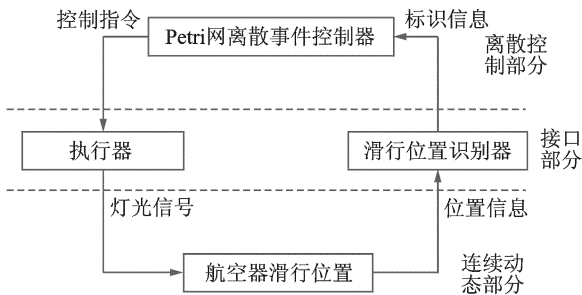


图1 基于事件反馈的滑行道运行控制框架

所示。采用 Petri 网建模滑行道运行过程并实现离散事件控制器。该控制器通过滑行位置识别器识别航空器运行状态,预测潜在冲突并决策控制指令给执行器,然后驱动助航灯光信号切换,从而控制航空器滑行过程以避免冲突。由于该控制器是实现滑行道冲突预测与避免的关键,因此,本文主要对其设计及相关决策过程进行研究。

## 1 滑行道运行冲突类型

滑行道运行冲突,是指在滑行道运行过程中,两架或多架航空器同时经过一个交叉口、滑行路段、或进入一个区域,导致各自无法安全有序滑行的情形。常见的3类滑行道运行冲突为:(1)交叉口冲突,即两架或多架航空器同时请求使用一个滑行道交叉口(图2(a));(2)追尾冲突,即两架或多架航空器同向滑行时,滑行间隔不满足场面安全间隔标准(图2(b));(3)对头冲突,即两架航空器在同一滑行路段上相向滑行(图2(c))。

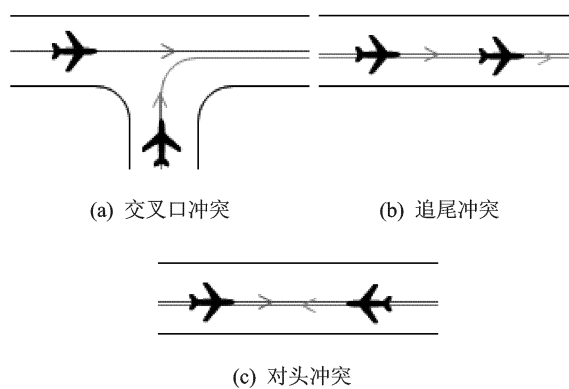


图2 三类常见的滑行道运行冲突

与对头冲突相比,交叉口冲突和追尾冲突发生的地域范围较为狭小,较易发现并迅速制定避免方案。而对头冲突发生的地域范围较大,且由于航空器滑行过程中不能后退,故对头冲突应严格禁止且需要提前预测和避免。本文重点针对此类冲突的预测和避免控制,给出图1中控制器设计和决策过程。

## 2 受控着色 Petri 网构建滑行道动态模型的方法

采用受控着色 Petri 网建模滑行道为多元组  $CCPN = \{P, T, I, O, \zeta, C, B, M\}$ 。其中,  $P = P_L \cup P_C$  为库所集 ( $P_L$  和  $P_C$  分别为滑行道直线段和交叉口运行区间库所集); 变迁集  $T = T_1 \cup T_0 \cup T_c$ 。表示航空器穿越运行区间活动,其中  $T_1$  为入交叉口变迁集,  $T_0$  为出交叉口变迁集,  $T_c$  为直线段运行区间变

越变迁集;将可由停止排灯阻止的航空器穿越区间活动用可控变迁表示,并为对应变迁添加控制库所  $c_i \in C; I(O)$  为模型输入(输出)函数;  $\zeta = \zeta(P) \cup \zeta(T)$  为定义在库所集和变迁集上的颜色集合;  $B \subseteq (C \times T); M$  为模型标识,表示场面运行状态。托肯(库所中“ $\cdot$ ”)代表航空器,其颜色为航空器滑行路径。

**定义1** 托肯颜色  $\pi_k = \langle rr(a) \rangle$ , 其中  $rr(a)$  表示任一航空器  $a$  从当前位置开始的后续滑行路径(用库所序列表示),  $k$  为航空器对应的航班号。

**定义2** 标识  $M(p_i) = \pi_k$  表示  $p_i$  中有托肯且颜色为  $\pi_k; M(p_i) = \langle 0 \rangle$  表示库所  $p_i$  中无托肯。

**定义3**  $\zeta(p_i) = \{\pi_1, \pi_2, \dots, \pi_u\}$ ,  $u$  为库所  $p_i$  对应运行区间可能经过的航空器数量;  $\zeta(t_i) = \{\pi_1, \pi_2, \dots, \pi_s\}$ ,  $s$  为变迁  $t_i$  可能经过的航空器数量。

**定义4** 对  $t_{i,m} \in T, p_i \in {}^{(p)}t_{i,m}, p_m \in t_{i,m}^{(p)}$ , 定义  $I(p_i, t_{im}) = I_D$ , 其中  $I_D$  为单位函数, 对托肯颜色不做任何改变。定义  $O(p_m, t_{im}) = UP$ , 其中函数  $UP$  将托肯颜色由  $\langle rr(a) \rangle$  变为  $\langle rr'(a) \rangle$  ( $rr'(a)$  为从  $rr(a)$  中去掉其第一个元素后的剩余库所序列)。

对变迁  $t_{i,m} \in T$ , 其状态使能条件为:

- (1)  $M(p_i) = \pi_k = \langle rr(a) \rangle$ ;
- (2)  $\pi_k = \langle p_i, p_m, \dots \rangle$ ;
- (3)  $M(p_m) = \langle 0 \rangle$ 。

其中, 条件(1)表示库所  $p_i$  对应运行区间正被航空器占用且路径为  $\pi_k$ ; 条件(2)表明此航空器的下一运行区间为  $p_m$ ; 条件(3)表明航空器的下一运行区间未被占用。

如果  $t_{i,m} \in T$  激发, 则在新标识  $M'$  下, 有:

- (1)  $M'(p_i) = \langle 0 \rangle$ ;
- (2)  $M'(p_m) = \pi_k = \langle rr'(a) \rangle$ 。

**例1** 图3为A-SMGCS滑行跑道系统局部运行简图。为不失一般性, 假设直线段和交叉口均允许各类航空器分时双向运行, 也即在不同时段内允许

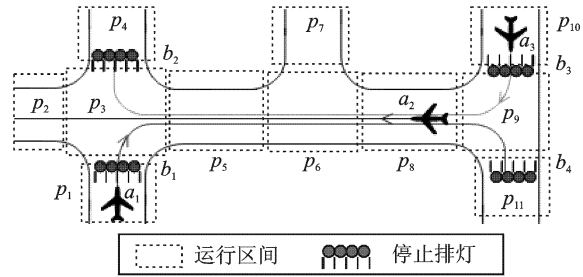


图3 A-SMGCS 滑行跑道系统局部运行简图

各类航空器沿某一方向滑行。利用所给建模方法构建对应的CCPN模型如图4所示。在图4模型中, 每个库所对应一个运行区间且容量为1, 表明对应活动区间在同一时刻只能被一架航空器占用。停止排灯  $b_1, b_3$  分别对进入交叉口区间  $p_3$  和  $p_9$  的航空器起阻挡作用, 因此分别为对应位置的入交叉口变迁  $t_{1,3}, t_{10,9}$  添加控制库所  $c_1, c_4$ ; 同理, 停止排灯  $b_2, b_4$  对离开交叉口区间  $p_3$  和  $p_9$  的航空器活动起阻挡作用, 因此分别为对应的出交叉口变迁  $t_{3,4}, t_{9,11}$  添加控制库所  $c_2, c_3$ 。

假设航空器  $a_1, a_2, a_3$  滑行路径分别为  $\pi_1 = \langle p_1, p_3, p_5, p_6, p_8, p_9, p_{11} \rangle, \pi_2 = \langle p_8, p_6, p_5, p_3, p_2 \rangle, \pi_3 = \langle p_{10}, p_9, p_8, p_6, p_5, p_3, p_4 \rangle$ 。图4中模型的初始标识为  $M(p_1) = \pi_1, M(p_8) = \pi_2, M(p_{10}) = \pi_3$ , 由  $a_1$  的滑行路径  $\pi_1$  可确定变迁  $t_{1,3}$  的激发色属性为  $\zeta(t_{1,3}) = \{\pi_1\}$ , 其他变迁激发色属性也可类似确定。场面上航空器滑行是并发的, 由图3可知, 如果不加以控制, 航空器  $a_1$  进入交叉口后, 必将与航空器  $a_2$  形成直线段对头冲突。A-SMGCS可采用两种方式避免对头冲突: (1)通过路由模块发布新的路由指令, 引导对应航空器经过交叉口后选择新的滑行路径; (2)不改变航空器的滑行路由, 而控制其在交叉口外实施等待。本文面向第二种避免方式, 给出具体实现方法。

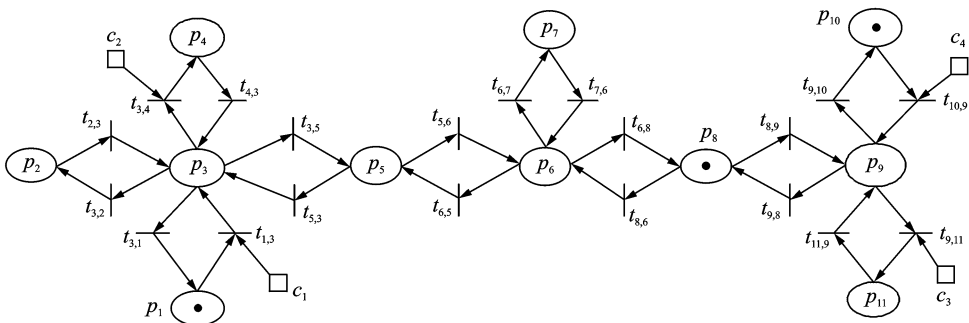


图4 图3所示滑行跑道系统对应的CCPN模型

### 3 对头冲突预测与避免控制

#### 3.1 可控滑行路段与无对头冲突条件

对头冲突实质上是两架或多架航空器场面资源占用过程出现的死锁现象。采用Petri网建模滑行道运行过程后,可采用可达图分析对头冲突。但是,整个滑行道运行模型中库所数量通常达到几百个甚至更多,而真正运行在其中的托肯数量(航空器数量)相对较少。因此,采用Petri网可达图分析对头冲突非常复杂。由例1可知,航空器的滑行路径在同一时刻占用同一区域是引发对头冲突的根本原因,且考虑到A-SMGCS通常对航空器滑行采取分段放行的策略,即每次均将航空器放行至其路径上对其有阻挡作用的停止排灯前为止。因此,可从航空器滑行路径入手,只考虑模型中与其下一放行路段相关联的库所和变迁,以简化对头冲突分析的复杂度。将航空器滑行路径上的每一放行路段称为可控滑行路段,其定义如下。

**定义5** 可控滑行路段。在滑行道运行模型中,可控滑行路段定义为航空器(路径为 $\pi_k$ )所经过区间对应库所组成的序列,记为 $\gamma_k^i = (p_0 p_1 p_2 \dots p_n)$ ,满足条件:(1)  $t_i = {}^{(i)}p_0$  为可控输入变迁;(2)  ${}^{(i)}p_l$  ( $1 \leq l \leq n$ )为不可控变迁;(3)  $p_n^{(i)}$ 为可控变迁。

由定义5可知,可控滑行路段实质上为航空器滑行路径上,连续两个可控变迁之间库所组成的有序序列,托肯进入该路段受到控制库所 $c \in {}^{(i)}t_i$ 的控制。如图4中, $\gamma_1^{1,3} = (p_3 p_5 p_6 p_8 p_9)$ 为航空器 $a_1$ 滑行路径的一个可控滑行路段,通过对应可控变迁 $t_{1,3}$ 的使能控制即可控制 $a_1$ 进入该路段。

记与可控滑行路段 $\gamma_k^i$ 相关的Petri网子模型为 $N = \{P', T', I', O', \zeta', C', B', M'\}$ 。从模型CCPN =  $\{P, T, I, O, \zeta, C, B, M\}$ 生成子模型 $N$ 的规则如下。

**规则1**  $P' = P_k^i \cup P_i$ 。其中, $P_k^i$ 为 $\gamma_k^i$ 中库所组成的集合; $P_i$ 的确定方法为:对 $p \in P/P_k^i, p_j \in P_k^i$ ,

若存在 $t \in T$ ,使得 $p \in {}^{(p)}t, p_j \in t^{(p)}$ ,则 $p \in P_i$ ,并将 $t$ 的集合记为 $T''$ 。同时,对 $\forall p \in P', M'(p) = M(p)$ ;

**规则2**  $T' = T'' \cup T'''$ 。其中, $T'''$ 的确定方法为:对 $p \in P'$ ,若 $M'(p) = \pi_k$ ,且存在 $t \in {}^{(i)}P_k^i$ 满足 $\pi_k \in \zeta(t)$ ,则 $t \in T'''$ 。(其中 ${}^{(i)}P_k^i = \{t | t \in {}^{(i)}p, p \in P_k^i\}$ ,并称之为可控路段库所输入变迁集合);

**规则3** 对 $\forall p \in P', \forall t \in T'$ ,有 $I'(p, t) = I(p, t), O'(p, t) = O(p, t)$ ;

**规则4** 若 $t \in T'$ 在CCPN中有控制库所 $c \in {}^{(i)}t$ ,则 $c \in C'$ 且 $(c, t) \subseteq B'$ 。

上述规则中,规则1将可控滑行路段中库所组成的集合,以及存在输入变迁到其中的库所的集合,一并组成子模型的库所集合,并保持标识不变;规则2将变迁集合 $T'''$ ,以及激发色与子模型库所中所含托肯颜色一致的可控路段库所输入变迁,一并组成子模型的变迁集合;规则3表示子模型的输入输出函数均来自原模型CCPN的输入输出函数;规则4将CCPN与子模型相同变迁的控制库所组成子模型的控制库所,且控制库所与变迁之间关系与CCPN一致。

**例2** 对例1中的模型CCPN,利用与某一可控滑行路段相关子模型的生成规则,得到与 $\gamma_1^{1,3} = (p_3 p_5 p_6 p_8 p_9)$ 相关的Petri网子模型 $N$ ,如图5所示。

图5中 $Y_2 = \{p_5, t_{5,6}, p_6, t_{6,5}, p_5\}$ 称为环路,并进一步定义环路链如下。

**定义6** 若库所 $p_1$ 和 $p_2, p_2$ 和 $p_3 \dots, \dots p_{n-1}$ 和 $p_n$  ( $n > 2$ )相互构成环路,且各环路上变迁具有共同的激发色属性,则称 $n$ 个库所构成环路链,记为 $H_i$ 。

对环路 $Y_j$ 上描述两个不同方向活动的变迁,将其激发色属性分别记为 $\zeta^+(Y_j), \zeta^-(Y_j)$ 。如 $\zeta^+(Y_2) = \zeta(t_{5,6}) = \{\pi_1\}, \zeta^-(Y_2) = \zeta(t_{6,5}) = \{\pi_2, \pi_3\}$ 。同理,对环路链 $H_i$ 上描述两个不同方向活动的变迁,其激发色属性分别记为 $\zeta^+(H_i), \zeta^-(H_i)$ 。如图

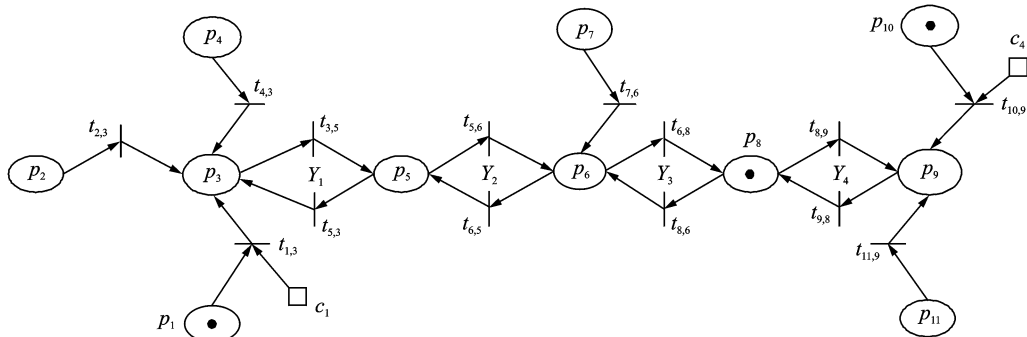


图5 与图4中可控滑行路段 $\gamma_1^{1,3}$ 相关的子模型

5所示,航空器 $a_1, a_2$ 和 $a_3$ 的滑行路径构成环路 $Y_1, Y_2, Y_3, Y_4$ ,其中 $Y_1, Y_2, Y_3$ 构成环路链 $H_1$ ,且 $\zeta^+(H_1) = \{\pi_1\}, \zeta^-(H_1) = \{\pi_2, \pi_3\}; Y_1, Y_2, Y_3, Y_4$ 构成环路链 $H_2$ ,其中 $\zeta^+(H_2) = \{\pi_1\}, \zeta^-(H_2) = \{\pi_3\}$ 。

设子模型 $N$ 有 $n$ 个环路链 $H_i (i=1, 2, \dots, n)$ ,  $m$ 个环路 $Y_j (j=1, 2, \dots, m)$ 且 $Y_j \in H_i$ 。记 $N_i^+, N_i^-$ 分别表示环路链 $H_i$ 上托肯颜色属于 $\zeta^+(H_i), \zeta^-(H_i)$ 的航空器数量; $N_j^+, N_j^-$ 分别表示环路 $Y_j$ 上托肯颜色属于 $\zeta^+(Y_j), \zeta^-(Y_j)$ 的航空器数量。

**定理1** 子模型 $N$ 中无对头冲突的充要条件为

$$\sum_{i=1}^n N_i^+ \times N_i^- + \sum_{j=1}^m N_j^+ \times N_j^- = 0 \quad (1)$$

证明:充分性。式(1)满足时,表明 $N_i^+$ 和 $N_i^-$ 至少有一个为0,同时 $N_j^+$ 和 $N_j^-$ 中至少有一个为0,也即任一环路或环路链上不存在同时朝相反方向滑行的航空器,因此,子模型 $N$ 中无对头冲突。

必要性。若子模型 $N$ 中无对头冲突,则其任意标识 $M'(p)$ 均可达。假设在 $M'(p)$ 下存在某一环路 $N_j^+ \times N_j^- \neq 0$ (或环路链 $N_i^+ \times N_i^- \neq 0$ ),此时,在对应的环路(或环路链)上必定存在航空器相互竞争同一个滑行路段,从而造成某一标识不可达。故假设不成立,因此式(1)为必要条件。证毕。

### 3.2 对头避免控制策略

**定义7** 对子模型 $N$ 中的任一环路 $Y_j$ (或环路链 $H_i$ ),若变迁 $t \in Y_j$ (或 $t \in H_i$ ),但是 $t^{(p)} \in Y_j$ (或 $t^{(p)} \in H_i$ ),则称变迁 $t$ 为环路 $Y_j$ (或环路链 $H_i$ )的输入变迁。另外,称库所 $p \in {}^{(p)}t$ 为环路(或环路链)的输入库所。

为实现对头冲突避免,只需控制环路或环路链输入变迁的使能激发,使定理1中的式(1)满足即可。分3种情况给出其使能策略。

**策略1** 对任意环路 $Y_j (Y_j \in H_i)$ 的输入变迁 $t$ ,存在库所 $p \in {}^{(p)}t$ 且有 $M'(p) = \pi_k$ ,若 $Y_j$ 满足下列条件之一:

- (1)  $N_j^+ = N_j^- = 0$ ;
- (2)  $N_j^+ \geq 1, N_j^- = 0, \pi_k \in \zeta^+(Y_j)$ ;
- (3)  $N_j^- \geq 1, N_j^+ = 0, \pi_k \in \zeta^-(Y_j)$ 。

则变迁 $t$ 此时对滑行路径 $\pi_k$ 使能。

**策略2** 对任意环路链 $H_i$ 的输入变迁 $t$ ,存在库所 $p \in {}^{(p)}t$ 且有 $M'(p) = \pi_k$ ,若 $H_i$ 满足下列条件之一:

- (1)  $N_i^+ = N_i^- = 0$ ;
- (2)  $N_i^+ \geq 1, N_i^- = 0, \pi_k \in \zeta^+(H_i)$ ;
- (3)  $N_i^- \geq 1, N_i^+ = 0, \pi_k \in \zeta^-(H_i)$ 。

则变迁 $t$ 此时对滑行路径 $\pi_k$ 使能。

**策略3** 临界对头冲突控制策略。

**定义8** 临界对头冲突状态。模型 $N$ 中任意环路 $Y_j$ (或环路链 $H_i$ ),如果其输入库所 $p_m$ 和 $p_n$ 的标识为 $M'(p_m) = \pi_r, M'(p_n) = \pi_c$ ,且满足 $\pi_r \in \zeta^+(Y_j), \pi_c \in \zeta^-(Y_j)$ (或 $\pi_r \in \zeta^+(H_i), \pi_c \in \zeta^-(H_i)$ ),则称模型 $N$ 处于临界对头冲突状态。

在临界对头冲突状态,模型 $N$ 中对应的环路或环路链上有两个输入变迁同时状态使能,此状态对应于两航空器同时请求占用某一滑行路段,此时应根据航空器优先级进行选择。通常进场航空器的优先级高于离场航空器的优先级,专机的优先级高于普通航空器的优先级。

模型 $N$ 处于临界对头状态时,设路径 $\pi_r$ 和 $\pi_c$ 的航空器的优先级分别为 $f(\pi_r)$ 和 $f(\pi_c)$ 。若 $f(\pi_r) < f(\pi_c)$ 时,则 $\pi_c$ 对应的变迁优先使能。

### 3.3 对头冲突预测与避免控制算法

根据上述滑行道对头冲突分析,给出实现对头冲突预测与避免控制算法如下。

(1)在当前状态 $M$ 下,确定滑行道模型CCPN中状态使能的变迁,并由使能其中某一可控变迁 $t$ 的路径 $\pi_k$ ,确定对应航空器的下一个可控滑行路段 $\gamma_k$ 。

(2)依据由可控滑行路段生成与其相关子模型的规则,得到与 $\gamma_k$ 相关的模型 $N$ 。

(3)确定模型 $N$ 中存在的环路 $Y_j$ (或环路链 $H_i$ )及其个数,注意 $Y_j \in H_i$ 。

(4)确定环路 $Y_j$ 的 $\zeta^+(Y_j), \zeta^-(Y_j)$ ,以及其中航空器数量 $N_j^+, N_j^-$ 。

(5)确定环路链 $H_i$ 的 $\zeta^+(H_i), \zeta^-(H_i)$ ,以及其中航空器数量 $N_i^+, N_i^-$ 。

(6)利用 $N_j^+, N_j^-, N_i^+$ 和 $N_i^-$ 计算定理1中式(1),判断是否存在对头冲突。若存在,则提示告警并退出;否则继续。

(7)根据定义7,确定变迁 $t$ 是否为其中环路或环路链的输入变迁,如果是则根据定义8判断模型 $N$ 是否为临界对头冲突状态。若是,则依据策略3使能变迁 $t$ ;否则,依据策略1和策略2使能变迁 $t$ 。

(8)对当前状态 $M$ 下满足状态使能的其他可控变迁重复上述步骤。

(9)当模型CCPN标识 $M$ 更新时,重返(1)进行上述步骤。

复杂度分析:对头冲突预测与避免需要实时监控滑行道运行状态,并决策控制指令,因此有必要分析上述算法的复杂度。首先,考虑生成子模型的

时间复杂度。若当前状态下到达停止排灯位置的航空器数量为 $x$ (也即状态使能的可控变迁个数为 $x$ ),航空器可控滑行路段长度为 $D$ (即库所个数为 $D$ ),则生成所有可控滑行路段对应子模型的时间复杂度为 $O(xD)$ 。其次,考虑所有子模型中识别环路和环路链的时间复杂度。若每个子模型中有 $n$ 架航空器,则识别环路或环路链的时间复杂度分别为 $O(nD)$ , $O((n-1)!)$ ,故在所有子模型中展开环路和环路链识别的时间复杂度为 $O(x(nD+(n-1)!))$ 。通常滑行道系统中停止排灯设置较为均匀,故可控滑行路段不会太长(也即 $D$ 不会太大)。此外,虽然繁忙机场场面上航空器数量众多,但同时到达停止排灯位置的航空器数量不会很多(故 $x$ 不会太大),且同时进入某一子模型的航空器数量不会很多(也即 $n$ 不会太大)。因此,上述对头冲突预测与避免控制算法是简易的,可应用于滑行道实时控制。

## 4 算例分析

以图5所示模型为例,分析其中滑行道对头冲突。该模型为与航空器 $a_1$ 的可控滑行路段 $\gamma_{1,3}=(p_3p_5p_6p_8p_9)$ 相关的子模型。在当前状态下,模型中库所 $p_1, p_8, p_{10}$ 对应的运行区间被航空器 $a_1, a_2, a_3$ 分别占用,其滑行路径分别为:

$$\pi_1 = \langle p_1, p_3, p_5, p_6, p_8, p_9, p_{11} \rangle;$$

$$\pi_2 = \langle p_8, p_6, p_5, p_3, p_2 \rangle;$$

$$\pi_3 = \langle p_{10}, p_9, p_8, p_6, p_5, p_3, p_4 \rangle。$$

(1)确定模型中环路和环路链及其个数。

环路链有2个: $H_1 = \{Y_1, Y_2, Y_3\}$ ,其 $\zeta^+(H_1) = \{\pi_1\}$ 和 $\zeta^-(H_1) = \{\pi_2, \pi_3\}$ ;  $H_2 = \{Y_1, Y_2, Y_3, Y_4\}$ ,其 $\zeta^+(H_2) = \{\pi_1\}$ 和 $\zeta^-(H_2) = \{\pi_3\}$ 。没有独立的环路。

(2)确定环路链中不同滑行方向的航空器数量,并由定理1展开对头冲突判断。

当前状态下,对环路链 $H_1$ 和 $H_2$ ,有 $N_1^+ = 0$ ,  $N_1^- = 1$ ,  $N_2^+ = 0$ ,  $N_2^- = 1$ ,因此定理1中式(1)成立,故可知环路链上无对头运行冲突。

(3)由控制策略决策相关变迁使能。

环路链 $H_1$ 关于 $\pi_1$ 的输入变迁为 $t_{1,3}$ ,其输入库所为 $p_1$ 且 $M'(p_1) = \pi_1$ 。由于 $N_1^+ = 0$ ,  $N_1^- = 1$ ,  $\pi_1 \in \zeta^-(H_1)$ ,由策略2可知,变迁 $t_{1,3}$ 不能使能,也即 $a_1$ 应在交叉口 $p_3$ 外等待,如此则可防止其进入该交叉口后与航空器 $a_2$ 形成对头冲突。

与此同时,环路链 $H_2$ 中的输入库所 $p_1$ 和 $p_{10}$ 满足 $M'(p_1) = \pi_1$ ,  $M'(p_{10}) = \pi_3$ ,且 $\pi_1 \in \zeta^+(H_2)$ ,  $\pi_3 \in \zeta^-(H_2)$ ,因此,由定义8可知,图5所示模型处于临界对头冲突状态。此时应根据策略3作出判断。若

航空器 $a_1$ 的优先级低于 $a_3$ ,则 $a_3$ 优先放行。故综合前面决策结果可知, $a_1$ 须等待 $a_2, a_3$ 均离开其可控滑行路段后方可放行。

## 5 结束语

采用Petri网建模滑行道运行过程,并重点研究对头冲突预测与避免控制问题,提出了适合于实时控制的对头冲突预测与避免控制策略和算法。其意义在于:(1)提出基于事件反馈的滑行道运行闭环控制框架,可对场面事件及时作出反应,保证场面运行安全,弥补了目前所采用开环控制模式的不足;(2)提出航空器可控滑行路段概念,减小冲突预测避免控制问题的求解规模,从而有效地降低了对应算法的复杂度,这一点对实时性要求很高的场面运行控制尤为重要。

关于如何设计图1所给控制框架中的执行器和滑行位置识别器,并将航空器运动惯性等动力学特性考虑进来以提高整个控制过程的精确性,将是下一步研究的重点。

## 参考文献:

- [1] International Civil Aviation Organization (ICAO). Advanced surface movement guidance and control systems (A-SMGCS) manual [S]. Montreal: International Civil Aviation Organization, 2004.
- [2] Besada J A, Soto A, Miguel G, et al. Design of an A-SMGCS prototype at Barajas airport: Airport surveillance sensors bias estimation [C]//Proceedings of the 7th International Conference on Information Fusion. Philadelphia: IEEE, 2005:1343-1350.
- [3] Garcia J, Molina J M, Miguel G. Design of an A-SMGCS prototype at Barajas airport: Data fusion algorithms [C]//Proceedings of the 7th International Conference on Information Fusion. Philadelphia: IEEE, 2005: 1335-1342.
- [4] Garcia J, Berlanga A, Molina M, et al. Methods for operations planning in airport decision support systems [J]. Applied Intelligence, 2005, 22(3): 183-206.
- [5] Marin A G. Airport management: Taxi planning [J]. Annals of Operations Research, 2006, 143(1): 191-202.
- [6] Roling P C, Visser H G. Optimal airport surface traffic planning using mixed-integer linear programming [J]. International Journal of Aerospace Engineering, 2008(1): 1-11.
- [7] Cheng V H L, Sharma V, Foyle D C. A study of

- aircraft taxi performance for enhancing airport surface traffic control[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2001, 2(2): 39-54.
- [8] Hollister W M. Airport surface traffic automation study[R]. DOT/FAA/PS-87/1, Washington D C: Federal Aviation Administration, 1988.
- [9] Watnick M, Ianniello J, Joseph W. Airport movement area safety system[C]//Proceedings of 11th IEEE/AIAA Digital Avionics Systems Conference. Seattle: IEEE, 1992:549-552.
- [10] Ianniello J W, Joseph W, Kruczek R M. Airport surface collision warning system implementation [C]//Proceedings of the IEEE-IEE Vehicle Navigation & Information Systems Conference, VNIS 1993. Ottawa: IEEE, 1993:742-746.
- [11] Katz E S. Evaluation of a prototype advanced taxiway guidance system (ATGS)[R]. DOT/FAA/AR-TN00/9. Washington D C: Federal Aviation Administration, 2000.
- [12] Tang Xinmin, Zhu Xinpeng, Han Songchen. Petri net controller synthesis for advanced surface movement guidance and control system[C]//Proceedings of 2009 IEEE International conference on Information and Automation. Guangzhou: IEEE, 2009:483-488.
- [13] Garcia J, Besada J, Miguel G, et al. Data processing techniques for conflict detection on airport surface [C]//Fifth Eurcontrol-FAA ATM R&D Seminar. Budepest:IEEE, 2003:1-10.
- [14] Teutsch J, Mollwitz V. Virtual block control and separation bubbles in ATC low visibility operations [C]//Integrated Communications, Navigation and Surveillance Conference. Arlington: IEEE, 2009:1-17.
- [15] 孙瑾, 顾宏斌, 侯建波. 基于梯度方向二值模式特征的飞机翼尖跟踪技术[J]. *航空学报*, 2011, 32(1):1-9.