

## 基于事件驱动型传感器网络的跑道入侵防御<sup>①</sup>

汤新民<sup>②</sup> 陈 平 邢 健

(南京航空航天大学民航学院 南京 210016)

**摘 要** 为避免在机场发生航空器/车辆入侵跑道,将事件驱动型传感器网络引入跑道入侵防御系统中,通过对传感器网络获取的目标探测信息实施融合重建跑道运行态势。根据跑道运行过程建立基于 Petri 网的场面活动模型,定义跑道入侵控制规范将跑道入侵探测与避免问题转化为状态禁止问题。针对模型存在的不可控事件,通过计算满足强控制规范条件的控制率实现逻辑控制器的设计,并证明该逻辑控制器是极大允许。案例研究表明,控制器通过跑道入口停止排灯和滑行管制指令实现跑道入侵防御,该监控算法的复杂度仅与传感器网络节点的布局而非与航空器/车辆的数量有关,更适用于大起降量跑道入侵的监控。

**关键词** 跑道入侵防御系统(RIPS),事件驱动型传感器网络,离散事件监控理论,逻辑控制器设计

## 0 引 言

空中航行服务程序——空中交通管理(PANS-ATM, Doc 4444)中将跑道入侵定义为在机场发生的任何航空器、车辆或人员误入指定用于航空器着陆和起飞的地面保护区的情况<sup>[1]</sup>。跑道入侵已成为影响飞行安全的一个因素,众多研究机构投入大量的精力研究和开发避免跑道入侵的技术设备,主要包括:FAA 提出的机场活动区安全系统(airport movement area safety system, AMASS),该系统通过引接场面探测设备(airport surface detection equipment, ASDE)的信号,为管制员提供场面移动目标的冲突告警<sup>[2]</sup>;由 NASA 研发的跑道入侵防御系统(runway incursion preventing system, RIPS),该系统能够在平视显示器上展示跑道、滑行道及冲突告警等<sup>[3]</sup>;由 Honeywell 公司开发的跑道感知与咨询系统(runway awareness and advisory system, RASS),该系统向机组提供飞机在地面和五边进近时补充的位置信息,增强机组的决策能力<sup>[4]</sup>;由 ICAO 提出的场面活动引导和控制系统(advance surface movement guidance

and control system, A-SMGCS),该系统通过场面监视雷达(surface monitoring radar, SMR)、多点定位(multilateration)获取航空器的位置,实现对区域内所有活动物体自动的引导与控制<sup>[5]</sup>。

以上系统所采用的监视方式本身存在固有的缺陷,具体表现在:(1)现有非协同监视手段如场面监视雷达(SMR),由于其受建筑物遮挡和地杂波、气候影响而不能识别目标;(2)现有非协同监视手段如自动相关监视(automatic dependent surveillance-broadcast, ADS-B)需要机载二次雷达应答机才能获得飞机标识,而场面车辆无法获得标识<sup>[6]</sup>。而采用分布式传感器成本较低,布设难度低,探测精度高,并可通过网内信息融合去除通信中的冗余和降低通信量,重建交通态势信息。Honeywell 公司研制了一种二重红外/磁传感器系统,在机场上设置数百个该类小型无源系统用于探测场面航空器和车辆的位置信息<sup>[7]</sup>;Eric 等人提出将传感线圈安装在机场道面分段的边界上,通过传感器信息确定航空器所处的位置进而实现机场监视<sup>[8]</sup>;Dimitropoulos 等人提出采用磁传感器网络探测和识别机场磁性目标,并将探测数据采用通用的 ASTERIX 格式传送至

① 国家科技支撑计划项目(2011BAH24B06),国家自然科学基金(60879011)与中国民用航空总局联合资助项目。

② 男,1979 年生,博士,副教授;研究方向:先进场面活动引导与控制系统,新一代空中交通管制自动化系统;E-mail: tangxinmin@nuaa.edu.cn  
(收稿日期:2012-12-29)

A-SMGCS<sup>[9]</sup>;程先峰等人提出在跑道入口的侧面安装微波探测传感器,并结合增强型电子进程单系统防止跑道入侵<sup>[10]</sup>。孙毅刚等利用 ZigBee 技术对特种车辆实时定位,并采用 GIS 技术在计算机上直观显示定位数据,在很大程度上避免机场安全事故的发生<sup>[11]</sup>;万江文等提出了一种无线传感器网络的分布式目标跟踪方法可实现目标的局部状态估计<sup>[12]</sup>。

本文将事件驱动型传感器网络引入到跑道入侵防御系统中,通过传感器网络对目标探测信息实施融合重建机场场面滑行态势信息,综合采用离散事件监控理论实现对跑道入侵的监控,通过设计状态反馈控制器实现跑道入侵控制指令决策,并通过跑道入口停止排灯和滑行管制指令实现跑道入侵防御。

## 1 机场跑道入侵防御系统总体方案

### 1.1 跑道入侵防御系统总体框架

图 1 所示为基于事件驱动型传感器网络的跑道入侵防御系统的总体框架。该系统由如下的几部分构成:(1)不断采集飞机/车辆位置、速度的传感器,如跑道、滑行道一侧关键位置布置的微波或主动红外传感器节点;(2)传感器网络信息融合处理器,负责处理来自传感器网络的目标探测信息,不断地更新场面对象状态估计值对交通态势进行重建;(3)实现跑道入侵防御的控制器,依据预先制定的跑道入侵控制规范,接收信息融合处理器发送的目标探测事件,检测可能的跑道入侵并计算控制策略;

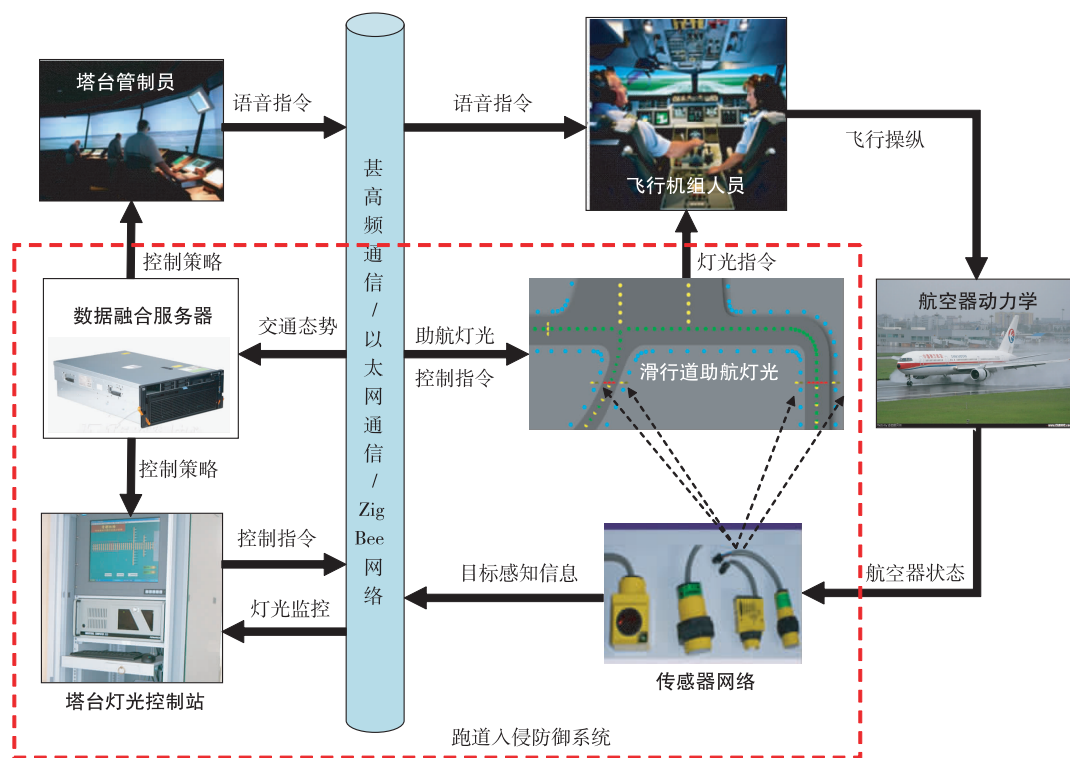


图 1 基于传感器网络的跑道入侵防御系统总体框架

(4)实现场面冲突探测与解脱响应的执行器,如助航灯光系统中的跑道入口停止排灯,根据控制策略实现对航空器/车辆的滑行引导。

### 1.2 基于传感器网络的交通信息采集

事件驱动型传感器不仅能获取航空器/车辆触发传感器时的探测事件信息,而且还能通过多传感器构成的网络对目标探测信息实施融合重建机场场面滑行态势信息,包括离散的(场面上活动目标的

分布、识别)和连续的(航空器/车辆长度、速度)两类交通态势信息。

首先对航空器分布定位采用将机场区域离散化的方法。图 2 所示为某机场场面活动区模型,阴影表示禁止进入区域,其它为允许活动区域。将连接跑道滑行道用虚线表示的分界线划分为多个子活动区域,并在边界线处设置传感器,边界线一般设置在安装有跑道入口停止排灯或跑道警戒灯,以及跑道

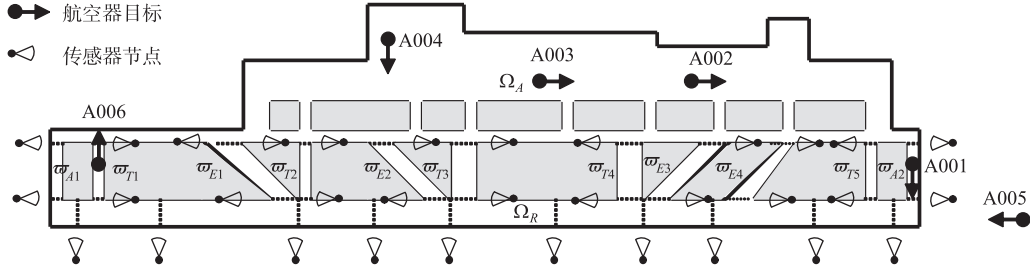


图2 机场活动区域模型

与滑行道的交界处。当航空器/车辆通过该边界线时,传感器节点将探测该穿越信息并触发穿越事件,由此可确定航空器/车辆所在的活动区域。

**定义1:机场活动区域模型** 将允许航空器/车辆滑行的区域定义为机场机动区域(movements area)  $\Omega = \Omega_R \cup \Omega_A \cup \Omega_T$ , 其中  $\Omega_R$  为跑道区域,  $\Omega_A$  为停机坪区域,  $\Omega_T$  为滑行道区域, 且  $\Omega_T = \Omega_T^R \cup \Omega_T^A$ , 其中  $\Omega_T^R$  为连接跑道的滑行道,  $\Omega_T^A$  为连接停机坪的滑行道, 分别进一步将  $\Omega_R$  和  $\Omega_T^R$  通过边界线集  $L$  划分为  $m$  和  $n$  个子区域, 即  $\Omega_R = \cup_{i=1}^m \bar{w}_{Ri}$ 、 $\Omega_T^R = \cup_{j=1}^n \bar{w}_{Tj}$ 。

其次,航空器/车辆的长度和速度等连续信息的精确测量需要利用两个时间同步的传感器网路节点<sup>[13]</sup>。如图3所示,假设两相邻传感器A与B探测到的运动目标开始进入和完全离开的时刻分别为  $\tau_A^1$ 、 $\tau_A^0$  与  $\tau_B^1$ 、 $\tau_B^0$ 。

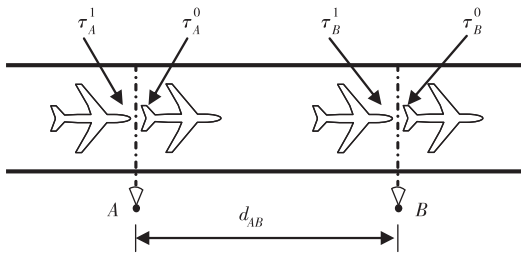


图3 传感器探测活动目标原理

假设已知传感器节点A与传感器节点B之间的固定距离  $d_{AB}$ , 目标长度为  $l$ , 则航空器通过节点A与B的瞬时速度为:  $v_A = \frac{l}{(\tau_A^0 - \tau_A^1)}$ ,  $v_B = \frac{l}{(\tau_B^0 - \tau_B^1)}$ , 则目标的平均速度为

$$v = \frac{l}{2} \cdot \left( \frac{1}{\tau_A^0 - \tau_A^1} + \frac{1}{\tau_B^0 - \tau_B^1} \right) \quad (1)$$

而目标通过节点A与B的时间差为

$$\Delta\tau = \frac{(\tau_B^0 + \tau_B^1) - (\tau_A^0 + \tau_A^1)}{2} \quad (2)$$

由  $v \cdot \Delta\tau = d_{AB}$  可计算得:

$$l = \frac{4d_{AB} \cdot (\tau_A^0 - \tau_A^1) \cdot (\tau_B^0 - \tau_B^1)}{(\tau_B^0 - \tau_B^1)^2 - (\tau_A^0 - \tau_A^1)^2} \quad (3)$$

将  $l$  代入(1)式,即可获得该航空器的速度的测算值  $v$ 。

## 2 机场跑道入侵防御系统模型

### 2.1 跑道运行离散事件动态系统模型

建立被控系统模型是对系统实施监控的第二步,机场场面交通系统是由航空器/车辆和跑道、滑行道、停机坪网络组成的复杂大系统,具有分布式、并发性的特点,对跑道运行状态进行建模是跑道入侵防御的基础。

**定义2:跑道运行模型** 跑道运行模型定义为Petri网  $N_R = \{P_R, T_R, Pre_R, Post_R, m_R\}$ , 其中库所集  $P_R$  表示跑道  $\Omega_R$  所划分的子区域集;变迁集  $T_R$  表示跑道上子区域与下一子区域的边界集  $L_R$ ;  $Pre_R$  与  $Post_R$  分别表示  $P_R$  与  $T_R$  的前向和后向关联关系;  $m_R: P_R \mapsto \mathbb{Z}^+$  为状态标识,表示场面航空器在跑道子区域内分布。

假设图2所示机场的跑道包括主用方向1和次用方向2,对于进近着陆的航空器,增加进近状态库所  $p_A^{(1)}$ 、 $p_A^{(2)}$  分别表示航空器已获得塔台管制员的落地许可。对于起飞离场航空器,增加起飞离场状态库所  $p_D^{(1)}$ 、 $p_D^{(2)}$  分别表示表示航空器已经离地起飞。由于跑道的运行方向是由管制部门确定的,增加两个方向控制库所  $p_C^{(1)}$  和  $p_C^{(2)}$ ,  $m(p_C^{(i)}) = 1$  ( $i = 1, 2$ ) 表示允许该方向运行,否则禁止该方向运行,并建立控制库所到进近变迁  $t_A^{(1)}$ 、 $t_A^{(2)}$  和起飞变迁  $t_D^{(1)}$ 、 $t_D^{(2)}$  的前向和后向弧,如图4所对应的跑道运行模型。

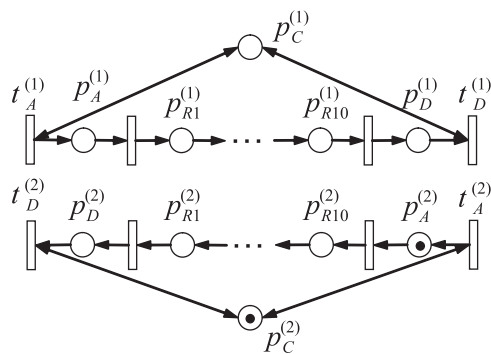


图 4 双向运行的跑道运行模型

**定义 3: 滑行道运行模型** 滑行道运行模型定义为 Petri 网  $N_T = \{P_T, T_T, Pre_T, Post_T, m_T\}$ , 其中库所集  $P_T$  表示连接跑道的滑行道子区域集  $\Omega_T^R$ ; 变迁集  $T_T$  表示航空器所处的子区域与下一子区域的边界集  $L_T$ ;  $Pre_T$  与  $Post_T$  分别表示  $P_T$  与  $T_T$  的前向和后向关联关系;  $m_T: P_T \mapsto Z^+$  为状态标识, 表示场面航空器在滑行道子区域内分布。

如图 2 所示, 离场航空器通过与跑道连接的滑

行道进入跑道, 而进场航空器通过与跑道连接的滑行道进入平行滑行道和停机坪, 增加平行滑行道和停机坪库所  $p_{T/A}$ 。假设所有滑行道均允许双向运行, 因此每段滑行道映射为进出两个库所  $p_i^I$  和  $p_i^O$ , 如图 5 所示为对应的滑行道运行模型。

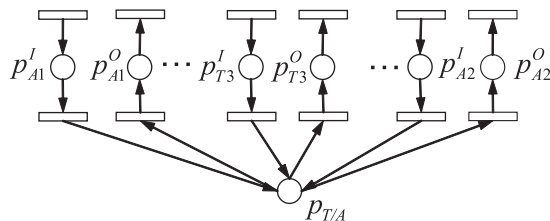


图 5 双向运行的滑行道运行模型

根据跑道和滑行道的连接关系, 建立滑行道运行模型中变迁与跑道活动子区域对应库所之间的有向弧, 得到如图 6 所示的场面活动模型  $N = \{P, T, Pre, Post, m\}$ :

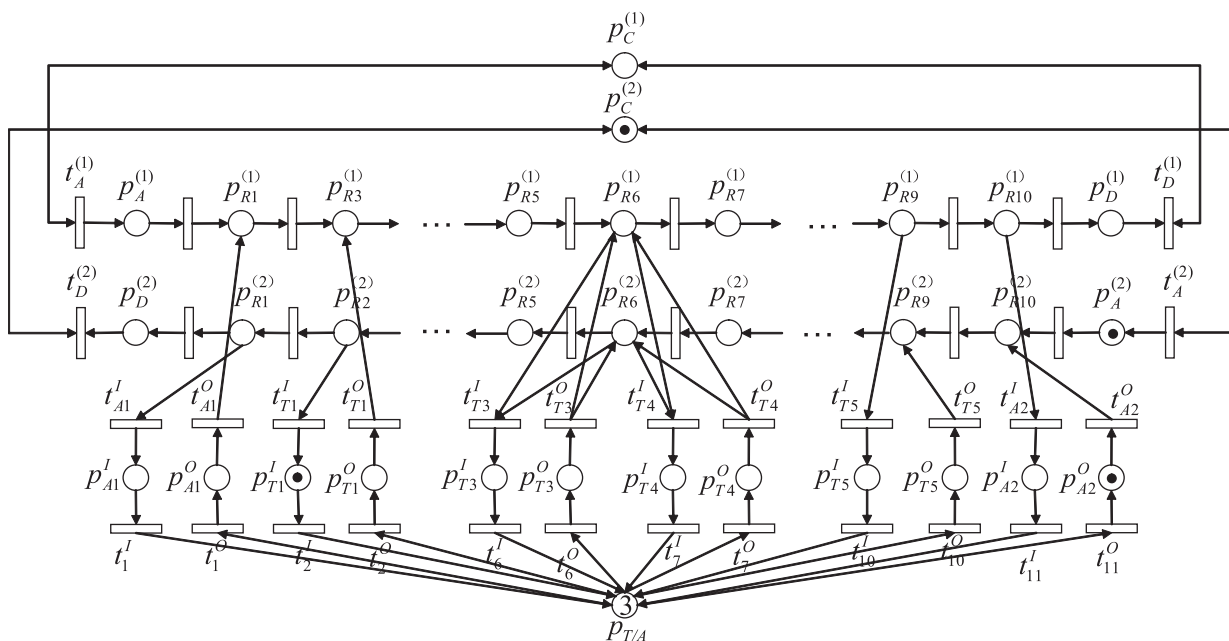


图 6 描述场面航空滑行状态的场面活动模型

假设场面活动模型当前标识为  $m$ , 当航空器/车辆经过一个传感器节点时, 都将产生一个目标探测事件  $e_i \in E$ , 并依此更新场面活动模型标识  $m'$ 。方法是建立传感器节点探测事件到场面活动模型变迁集的映射  $\varepsilon: E \mapsto T$ , 其中  $E$  是目标探测事件集合, 即  $\varepsilon(e_i) = t_i$ , 认为变迁  $t_i$  激发, 令  $u_i$  为对应的变迁激

发向量, 令关联矩阵  $D = Post - Pre$ , 则更新后的场面状态标识为

$$m' = m + D \cdot u_i \quad (4)$$

在不施加状态或活动控制策略的情况下, 可以通过变迁的使能和激发规则来描述由跑道、滑行道和航空器/车辆构成系统的动态行为。假设在标识

$m$  下的使能变迁集为  $S(m)$ , 若  $t_i \in S(m)$ , 表明  $m[t_i > m', m']$  状态下场面是否存在跑道入侵, 变迁  $t_i$  是否允许激发, 取决于跑道运行控制规范。

## 2.2 跑道运行控制规范建模

将航空器/车辆在地面的滑行状态映射为场面活动模型后, 可以将跑道入侵规则转化为跑道活动控制规范。由于线性不等式约束条件具有很强的建模能力, 下面将主要研究将线性不等式约束描述跑道入侵规则中的冲突禁止问题。

场面活动模型状态演变过程中所禁止状态可描述为标识的加权和不超过某一上限, 用线性不等式约束条件:  $L \cdot m \leq b$ , 式中,  $L$  是标识加权矩阵, 而向量  $b$  为标识加权和的阈值向量。跑道入侵常见的场景主要有以下几种<sup>[1]</sup>:

(1) 一架航空器在跑道上起飞或着陆, 禁止另一架航空器穿越跑道滑行。则对应的控制规范可以描述为

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^m m(p_{Ri}^{(1)}) \leq 1 \\ \sum_{i=1}^m m(p_{Ri}^{(2)}) \leq 1 \end{cases} \quad (5)$$

(2) 禁止两架航空器同时同一跑道上起飞或着陆。则对应的控制规范可以描述为

$$\sum_{i=1}^m m(p_{Ri}^{(1)}) + \sum_{i=1}^m m(p_{Ri}^{(2)}) \leq 1 \quad (6)$$

(3) 航空器已发布落地许可, 禁止其他航空器在跑道上起飞或着陆或穿越跑道。则对应的控制规范可以描述为

$$\begin{cases} m(p_A^{(1)}) + \sum_{i=1}^m m(p_{Ri}^{(1)}) \leq 1 \\ m(p_A^{(2)}) + \sum_{i=1}^m m(p_{Ri}^{(2)}) \leq 1 \end{cases} \quad (7)$$

(4) 禁止多架航空器同时占用连接跑道的滑行道, 要求滑行道 A1、T1、E1、T2、E2、T3、T4、E3、E4、T5、A2 最多只允许同时进入一架航空器, 即

$$\begin{cases} m(p_{A1}^I) + m(p_{A1}^O) \leq 1 \\ m(p_{T1}^I) + m(p_{T1}^O) \leq 1 \\ \vdots \\ m(p_{A2}^I) + m(p_{A2}^O) \leq 1 \end{cases} \quad (8)$$

(5) 禁止航空器从用于脱离跑道的滑行道进入跑道起飞。当采用主用方向 1 运行时, 仅允许航空器从 A1、T1 滑行道进入, 而滑行道 E1、T2、E2、T3、T4、E3、E4、T5、A2 均禁止进入, 即

$$\begin{cases} m(p_C^{(1)}) + m(p_{E1}^O) \leq 1 \\ m(p_C^{(1)}) + m(p_{T2}^O) \leq 1 \\ \vdots \\ m(p_C^{(1)}) + m(p_{A2}^O) \leq 1 \end{cases} \quad (9)$$

而采用次用方向 2 运行时, 仅允许航空器从 A2、T5 滑行道进入, 而 A1、T1、E1、T2、E2、T3、T4、E3、E4 滑行道均禁止进入, 即

$$\begin{cases} m(p_C^{(2)}) + m(p_{A1}^O) \leq 1 \\ m(p_C^{(2)}) + m(p_{T1}^O) \leq 1 \\ \vdots \\ m(p_C^{(2)}) + m(p_{E4}^O) \leq 1 \end{cases} \quad (10)$$

## 3 面向跑道入侵的控制器设计

### 3.1 允许约束的判定条件

场面活动模型和运行控制规范建模共同确立了系统的禁止状态, 但由于离散事件动态系统模型中的库所和变迁的属性并不能完全反映机场运行的实际, 为实现禁止状态避免还必须考虑以下问题: 由于场面交通系统中既存在可控事件, 这些事件可通过语音告警、灯光信号等方式实现控制, 也存在不可控事件, 如航空器降落在跑道后选择哪一个跑道脱离口对应的事件  $t_{A1}^I, t_{T1}^I, t_{E1}^I, t_{T2}^I, t_{E2}^I, t_{T3}^I, t_{T4}^I, t_{T5}^I, t_{A2}^I$ , 以及航空器选择何时落地对应的事件  $t_{R1}^{(1)}, t_{R10}^{(2)}$ 。如果所设计的控制器会禁止不可控变迁, 则该控制器是无意义的, 传统的结构控制器设计方法难以适用, 因此本文主要探讨此类非允许约束的逻辑控制器设计方法。

假设场面活动模型对应的关联矩阵表示为  $D$ , 若不可控变迁集用  $T_U$  表示, 不可控变迁集对应的关联子矩阵表示为  $D_U$ , 给出允许约束的判断条件<sup>[14]</sup>。

**引理 1:** 场面活动模型中, 若对于第  $i$  个约束满足  $l_i \cdot D_C^U \leq 0$ , 则约束条件  $l_i \cdot m \leq b$  一定为允许约束。

**证明:** 假设首先假设  $T_U$  是可控的, 参考基于不变量的结构控制器设计算法<sup>[15]</sup>, 所设计的控制器中  $D_i = -l_i \cdot D_U$ , 即有  $D_i \geq 0$ , 则不存在从控制器库所到不可控变迁的有向弧, 因此不会禁止不可控变迁的激发, 此时  $l_i \cdot m \leq b$  为允许约束。得证。

### 3.2 逻辑控制器的设计方法

当某一控制规范对应的不等式不是允许约束时, 记为  $L_U \cdot m \leq b$ , 针对此类约束, 本文采用逻辑控制器的设计方法。

**定义 4: 控制策略** 假设控制率定义为  $u: T \mapsto \{0, 1\}$ , 定义场面活动模型的状态反馈控制策略为函数  $f: M \mapsto U$ , 其中  $M$  是所有状态的集合,  $U$  是所有控制率  $u$  的集合。

**定义 5: 弱控制规范条件** 假设含有不可控变迁的场面活动模型在控制策略  $f$  的作用下, 某时刻的标识  $m$  满足约束  $L_U \cdot m \leq b$ , 则称标识  $m$  满足弱控制规范条件, 记为  $m \in A(m_0)$ 。

**定义 6: 强控制规范条件** 假设  $m$  满足弱控制规范条件, 在此标识下将使能变迁集  $S(m)$  分为使能可控变迁集  $T_C^E$  与使能不可控变迁集  $T_U^E$  两个子集, 若  $\forall t_i \in T_U^E$  激发后得到标识  $m'$  仍然满足  $L_U \cdot m' \leq b$ , 则称标识  $m$  满足强控制规范条件, 记为  $m \in Q(m_0)$ 。

不妨设场面活动模型当前标识  $m \in A(m_0)$ , 其状态方程为  $m = m_0 + D \cdot y$ , 则有不等式:  $L_U \cdot (m_0 + D \cdot y) \leq b$ 。不妨设标识  $m$  下的控制率为  $u$ , 某一不可控使能变迁  $\forall t_k \in T_U^E$  对应的激发向量为  $u^{(k)}$ ,  $u^{(k)}$  为第  $k$  个分量与  $u$  的第  $k$  个分量相同, 而其余元素为 0 的单位向量, 如果  $m \in Q(m_0)$ , 则此时控制率  $u$  应该保证  $t_k$  激发后新的标识  $m' = m + D \cdot u^{(k)}$  仍然满足控制规范则要求, 即:

$$L_U \cdot [m_0 + D \cdot (y + u^{(k)})] \leq b \quad (11)$$

令向量  $b' = b - L_U \cdot (m_0 + D \cdot y)$ , 则式(11)可以记作  $L_U \cdot D \cdot u^{(k)} \leq b'$ 。且不可控变迁  $\forall t_k \in T_U^E$  未被禁止。假设  $\|u\|$  表示在标识  $m$  下的控制率  $u$  对应的变迁支集, 综合得控制率  $u$  应当满足:

$$\begin{cases} L_U \cdot D \cdot u^{(k)} \leq b' \\ \|u\| \cap T_U = \Phi \end{cases} \quad (12)$$

跑道入侵防御的目标是在保证航空器/车辆安全、有序的移动的前提下, 提升机场场面交通流容量。因此控制器既需要实现禁止状态避免, 又要最大限度保留系统原有的可达状态, 即要求设计的控制器是极大允许的。

**定理 1:** 对于场面受控活动模型  $(N, f)$ , 其中  $N$  为场面活动模型,  $f$  为逻辑控制器策略, 若初始标识  $m_0$  满足强控制规范条件, 则由标识集  $M = \{m \mid m \in Q(m_0)\}$  到控制率集合  $U = \{u^{(k)} \mid L_U \cdot D \cdot u^{(k)} \leq b', \|u\| \cap T_U = \Phi\}$  的映射  $f$  为极大允许控制。

**证明:** 首先初始标识  $m_0$  满足强控制规范条件, 显然在  $m_0$  下由式(12)给出的单步控制率  $u_1$  得到的标识  $m_1$  满足强控制规范条件, 依此类推可得: 控制策略  $f$  是允许控制。假设存在另一个控制策略  $f'$  是允许的, 且  $\exists m \in M$ , 满足  $f'(m) > f(m)$ , 即控制率  $u = f(m)$  和  $u' = f'(m)$  满足  $u' > u$ 。由于  $m \in Q(m_0)$ ,  $\forall t \in T_U^E$  激发后得到标识  $m'$  仍然满足  $L_U \cdot D \cdot u^{(k)} \leq b'$ , 则一定满足如下两个条件: 其一:

$(\|u\| \cap T_C^E) \subset (\|u'\| \cap T_C^E)$ , 即存在由  $u'$  的某一个分量构成的向量  $u^{(j)}$  满足  $\|u^{(j)}\| \subset T_C^E$ , 但  $\|u^{(j)}\| \not\subset \|u\|$ ; 其二:  $L_U \cdot (m + D \cdot u^{(j)}) \leq b$ , 即  $L_U \cdot D \cdot u^{(j)} \leq b - L_U \cdot m = b'$ 。依据条件(12), 若  $L_U \cdot D \cdot u^{(j)} \leq b'$ , 且  $\|u^{(j)}\| \not\subset T_U$ , 则  $\|u^{(j)}\| \subset \|u\|$ , 两个条件相互矛盾, 因此  $f$  为极大的。得证。

### 3.3 跑道入侵控制指令的映射

跑道入侵控制指令是由场面活动模型中可控变迁的使能状态确定的, 该指令可通过跑道入口停止排灯或滑行引导指令实现<sup>[16]</sup>。

跑道入口等重要位置设置有停止排灯, 停止排灯接通用以指示航空器/车辆停止, 关闭时指示航空器/车辆通行。假设停止排灯处的分界线对应的可控变迁的状态集为  $S_T = \{s_{enable}, s_{disable}\}$ , 停止排灯的状态集为  $S_L = \{s_{on}, s_{off}\}$ 。因此跑道入侵指令的映射可以描述为如下的映射  $\kappa: S_T \mapsto S_L$ , 满足  $\kappa(s_{enable}) = s_{off}, \kappa(s_{disable}) = s_{on}$ 。

而滑行引导指令主要通过安装在塔台或地面管制席位上的场面交通态势显示系统, 或者机载/车载电子活动地图显示。假设航空器/车辆当前的状态为:  $A = \{a_{holding}, a_{taxiing}\}$ , 该航空器所在滑行道段对应库所的输出变迁的使能状态为:  $S_T = \{s_{enable}, s_{disable}\}$ , 而滑行引导指令集合为:  $D = \{d_{start}, d_{taxi}, d_{stop}\}$ , 则航空器运行状态集、变迁使能状态集到管制指令集的映射关系  $\eta: A \times S_T \mapsto D$  可以描述为如表 1 所示的滑行引导控制指令决策模型。

表 1 滑行引导控制指令决策模型

| 航空器/状态 $a$    | 变迁使能状态 $s$    | 滑行引导指令 $d$  |
|---------------|---------------|-------------|
| $a_{holding}$ | $s_{enable}$  | $d_{start}$ |
|               | $s_{disable}$ | $d_{stop}$  |
| $a_{taxiing}$ | $s_{enable}$  | $d_{taxi}$  |
|               | $s_{disable}$ | $d_{stop}$  |

## 4 跑道入侵防御仿真系统及验证

为了验证本文所采用方法的正确性, 开发了跑道入侵防御仿真系统。该仿真系统交通态势信息采集采用 ZIGBEE 无线传感器网络, 网络节点采用 XWWK-CC2530A 模块, 移动目标探测器采用 E18-D50NK 型红外传感器。当车辆/航空器模型通过传感器有效检测区域时输出低电平, 触发并产生目标

探测事件,通过传感器网络和通信处理服务器输入管制终端,用于驱动当前交通态势的改变和检测是否存在跑道入侵,并将反馈控制指令通过传感器网络控制机场助航灯光模型,用以实现跑道入侵防御。

假设仿真的场景如图 2 所示:跑道的运行方向为从左向右,一架航空器已经从 T1 滑行道脱离,一架航空器即将着陆,而另一架航空器刚进入跑道入口准备起飞,另有 3 架航空器位于滑行道上滑行。此时场面活动模型的标识如图 4 所示,即:  $m(p_C^{(2)}) = 1, m(p_{T1}^I) = 1, m(p_{A2}^O) = 1, m(p_A^{(2)}) = 1, m(p_{T/A}) = 3$ , 图 7 所示为逻辑控制器计算流程。

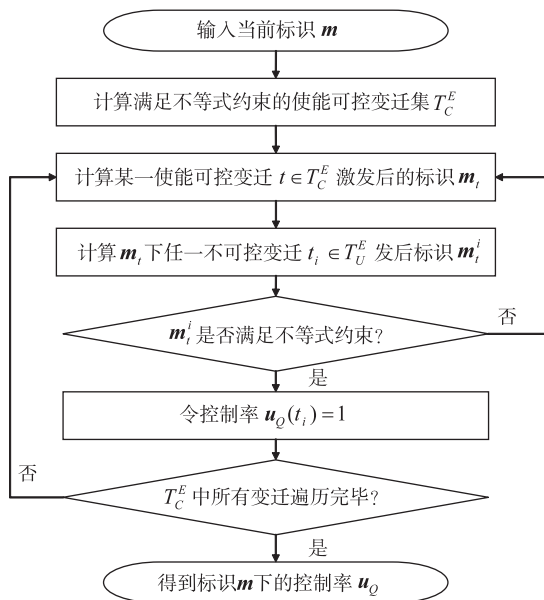


图 7 逻辑控制器设计算法流程

根据可允许约束的判断条件,仅仅约束组(5)、(6)、(7)为允许约束,而约束组(8)、(9)、(10)为非允许约束。满足弱控制规范的可控使能变迁集为  $T_C^E = \{t_2^I, t_{A2}^O, t_{10}^O\}$ , 假设其中某一个变迁依次激发后的标识如表 2 所示,依次记为  $m_1, m_2, m_3$ :

表 2 某一个变迁依次激发后的标识

| 激发变迁       | 激发后的标识 | 激发后被标识的库所                                                |
|------------|--------|----------------------------------------------------------|
| $t_2^I$    | $m_1$  | $p_{T/A}, p_{A2}^O, p_A^{(2)}, p_C^{(2)}$                |
| $t_{A2}^O$ | $m_2$  | $p_{T/A}, p_{R10}^{(2)}, p_{T1}^I, p_A^{(2)}, p_C^{(2)}$ |
| $t_{10}^O$ | $m_3$  | $p_{T/A}, p_{A2}^O, p_{T1}^I, p_{T5}^O, p_C^{(2)}$       |

显然在某一个可控使能变迁激发后的标识  $m_2$  中,不可控变迁  $t_{R10}^{(2)}$  激发后的标识为  $m_4$ , 且  $m_4(p_{R10}^{(2)}) = 1, m_4(p_A^{(2)}) = 1$ , 显然不满足约束(7), 而仅有在标识  $m_1, m_3$  在不可控变迁集  $T_U^E$  激发后仍然满足跑道入侵控制规范不等式约束的要求, 因此得此时的控制率为:  $\|u\| = \{t_2^I, t_{10}^O\}$ 。

进一步采用跑道入侵防御仿真系统验证上述控制策略是否符合跑道入侵防御的要求。该仿真系统软件部分包括人机界面模块、航空器实时仿真模块、与机场场面引导与控制系统的通信模块。整个系统采用基于 JAVA 的多线程设计,在 2G 内存、Intel E8400 的 CPU、512M Geforce 显卡的 Windows XP 操作系统中,仿真系统软件能较好地满足实时性需求。如图 8 所示为通过交通态势显示系统给出的上述仿真场景:A005 为即将着陆的航空器,A001 为进入跑道入口准备起飞的航空器,A006 为从 T1 滑行道脱离的航空器,A002、A003、A004 为正在滑行等待进入跑道的航空器。

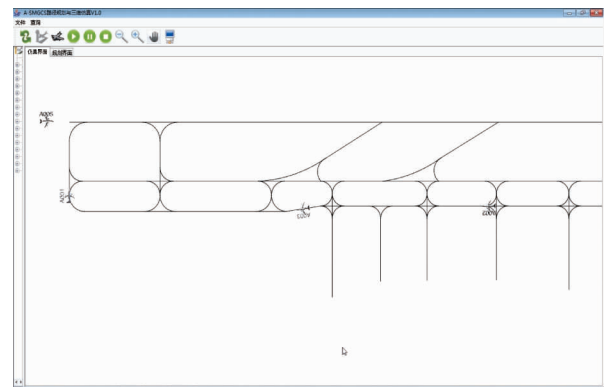


图 8 交通态势显示系统

施加跑道入侵控制器后,对航空器采取了相应的跑道入侵控制措施,其结果如图 9 所示的助航灯光仿真沙盘模型。从该沙盘模型中可以看出:没有对航空器 A005 发出其它任何指令,表明允许其着陆;其

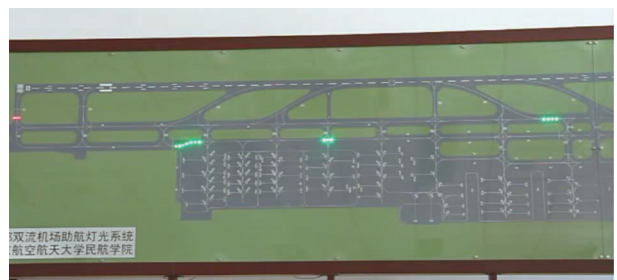


图 9 助航灯光仿真沙盘模型

他正在滑行道上滑行的航空器(A002、A003、A004、A006)前方的绿色中线引导灯亮,表明目前这几架航空器的滑行不会产生跑道入侵;而跑道入口红色停止排灯亮,表明对航空器 A001 施加了跑道入侵控制指令,即禁止两架航空器同时在同一跑道上起飞或着陆。通过仿真证明,场面航空器的运行行为满足跑道入侵防御的要求,因此本方法可以实现机场跑道入侵防御。

另外从算法的复杂度来看,假设场面活动模型中变迁数为  $n_l$ ,不可控变迁数为  $n_u$ ,从图 7 给出的逻辑控制器算法可以得到计算复杂度为  $O(n_l \times n_u)$ ,显然基于控制器计算复杂度并不随航空器数目增大而增加,只与传感器网络节点的布局有关,因此更适用高密度机场的监控问题。

## 5 结 语

本文将事件驱动型传感器网络引入到跑道入侵防御系统中,通过传感器网络对目标探测信息实施融合重建机场场面滑行态势信息,同时还采用 Petri 网对跑道的运行状态建模,提出将跑道入侵问题转化为状态禁止和避免。由于模型中存在的不可控事件和不可变状态,提出了一种极大允许逻辑控制控制器设计方法,使得跑道运行满足所期望的安全行为。未来研究的侧重点将是实现航空器/车辆不可测状态下的滑行轨迹的推测,重建完整的场面交通态势。

## 参考文献

- [ 1 ] International Civil Aviation Organization( ICAO ). Manual for Preventing Runway Incursions ( Doc 9870 ). Montreal: ICAO, 2006. 1-60
- [ 2 ] Watnick M. Airport movement area safety. In: Proceedings of IEEE/AIAA 11<sup>th</sup> Digital Avionics Systems Conference, Seattle, USA, 1992. 549-552
- [ 3 ] Steven D Y, Denise R J. Runway incursion and prevention: a technology solution. In: Proceedings of the International Federation of Airworthiness' 31st International Conference, Athens, Greece, 2001. 1-22
- [ 4 ] John J, Scott G, Kevin C. Ground Operations and Advanced Runway Awareness and Advisory System. US patent: 7890248, 2005
- [ 5 ] International Civil Aviation Organization ( ICAO ). Advanced surface movement guidance and control systems ( A-SMGCS ) Manual ( Doc. 9830 ). Montreal: ICAO, 2004. 1-80
- [ 6 ] Gao H, Heuer T, Dimitropoulos K, et al. Safe airport operation based on innovative magnetic detector system. *Intelligent Transport Systems*, 2009, 2( 3 ): 236-244
- [ 7 ] Stauffer D, French H, Lenz J, et al. A multi-sensor approach to airport surface traffic tracking. In: Proceedings The AIAA/IEEE 12<sup>th</sup> Digital Avionics Systems Conference, Fort Worth, USA, 1993. 430-432
- [ 8 ] Chartier E, Hashemi Z. Surface surveillance systems using point sensors and segment-based tracking. In: Proceedings of 20th Digital Avionics Systems Conference, Minneapolis, USA, 2002. 1-8
- [ 9 ] Dimitropoulos K, Grammalidis N, Gragopoulos I, et al. Detection, tracking and classification of vehicles and aircraft based on magnetic sensing technology. *International Journal of Applied Mathematics and Computer Sciences*, 2005, 1( 4 ): 195-200
- [ 10 ] 郭小琴, 孙毅刚, 陈维兴. 机场场面无线传感器网络监控系统关键技术研究. *计算机工程与设计*, 2009, 30( 22 ): 5106-5108
- [ 11 ] 程先峰, 邬秋香, 丁一波. 保障跑道安全的新型解决方案. *空中交通管理*, 2011, 11: 33-38
- [ 12 ] 万江文, 薛皓, 于宁等. 时间异步无线传感器网络的分布式目标跟踪. *高技术通讯*, 2009, 19( 10 ): 1026-1030
- [ 13 ] 崔逊学, 赵湛, 王成. 无线传感器网络的领域应用与设计技术. 国防工业出版社, 2009. 180-195
- [ 14 ] Moody J, Antsaklis P. Petri net supervisors for DES with uncontrollable and unobservable transitions. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2000, 45( 3 ): 462-476
- [ 15 ] Moody J, Yamalidou K, Lemmon M, et al. Feedback control of petri nets based on place invariants. In: Proceedings of the 33<sup>rd</sup> IEEE Conference on Decision and Control, Florida, USA, 1994. 3104-3109
- [ 16 ] 汤新民, 安宏锋, 王翀. 面向冲突避免的航空器场面滑行引导方法. *西南交通大学学报*, 2011, 46( 6 ): 1032-1039

## Runway incursion preventing based on event-driven sensor network

Tang Xinmin, Chen Ping, Xing Jian

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

### Abstract

To prevent aircrafts and vehicles from incurring runway, the event-driven sensor network was adopted into runway incursion preventing systems. Through the fusion of objective detecting signals from the sensor network, the runway operating state was reconstructed. A surface movement model based on Petri Nets was proposed according to runway operating rules and the runway movement controlling regulations were defined, and then the runway incursion detection and prevention were transformed into a state forbidden problem. For the uncontrollable events of the runway movement model, the controlling rule satisfying strong regulation condition was used to construct a logic controller, which proves to be maximally permissive. The illustrated case proved that the controller designed by combining with runway entrance stop-bar lights and taxiing guidance instructions realized the preventing from runway incursions, with its time complexity only depending on configurations of sensor networks rather than the number of aircrafts and vehicles. It is more applicable for high density airports.

**Key words:** runway incursion preventing system(RIPS), event-driven sensor network, discrete event supervisory control theory, logic controller designing