

以可靠度為基礎之火災逃生危險評估

Reliability-based Design for Fire Egress Risk Assessment

周柏年*、林元祥**

Po-Nien Chou、Yuan-Shang Lin

摘要

本研究旨在建構與求解以可靠度為基礎之火災逃生危險評估模型，首先建立五個模式模擬人命危險情境屆臨時間，並與區劃空間避難所需時間相競合，再以可靠度為基礎之設計及結構函數的理論為基礎，建構包含五個功能函數的「隨機型區劃空間火災人員避難成敗模式」。再者，界定隨機型模式中參數及其機率分配，以蒙地卡羅模擬方法，產生參數之隨機亂數值，可估計人員面臨任一項或一項以上危險情境導致避難失敗的機率值。模式建構完畢後，舉一舞廳場所為例，其容留人數為 200 人，模擬聚氨酯傢俱火災，研究結果顯示，區劃空間火災人員面臨各項致命情境之機率，以能見度所造成之影響為最大，其次為輻射熱通量、煙層溫度、無力行動劑量分率，最後是一氧化碳濃度。

關鍵詞：火災、逃生避難、蒙地卡羅模擬、可靠度

Abstract

This study aims for developing and solving the model of egress risk assessment based on the reliability-based design. First, this study constructs five models to simulate the time to the untenable conditions, and then compare the simulated times with the required safe egress time. Based on reliability-based design and structure function, “the stochastic model of egress safety/failure in a compartment fire” which consists of five performance functions is proposed. Moreover, stochastic parameters and probability distributions of proposed models are assumed. By performing Monte Carlo simulation, random numbers of parameters are generated and the failure probability of occupants egress due to one or more

* 服務於新竹縣政府消防局。

** 中央警察大學防災研究所教授（通訊作者 Email：YL4@mail.cpu.edu.tw），本文承蒙行政院科技部提供研究經費（計畫編號為 100-2410-H-015-010），謹此致謝。

untenable conditions is obtained. After the model's development, 200 occupants in a disco are taken as an example for illustration. The simulations of polyurethane furniture on fire are conducted. Results show that impact of untenable conditions on failure probability of egress in compartment fires ranks first by visibility, then by radiation heat flux, smoke layer temperature, fractional incapacitating dose, and last by carbon monoxide concentration.

Keywords: fire, egress, Monte Carlo simulation, reliability

壹、前言

回顧各先進國家防火安全工程手冊中，有關不利於人員避難之火場環境或使人員無力逃生之各項危險情境 (untenable conditions)，以下列 6 個危險情境最為常見 (王鵬智，2007; Purser, 2007, 2008)：

- 一、煙層高度 (smoke layer height)。
- 二、對流熱 (convective heat)，常以煙層溫度 (smoke layer temperature) 表示。
- 三、煙的遮蔽性 (smoke obscuration)，或轉換成能見度 (visibility)，常以單位長度之光學密度 (optical density per meter 簡稱 OD/m) 表示。
- 四、窒息性氣體濃度，常以一氧化碳濃度 (concentration of carbon monoxide) 代表。
- 五、輻射熱 (radiant heat)，常以輻射熱通量 (radiant heat flux) 表示。
- 六、以毒性及窒息性氣體轉換之有效劑量分率 (Fractional Effective Dose 簡稱 FED)，常見者包含：無力行動劑量分率 (Fractional Incapacitating Dose 簡稱 FID)，致命劑量分率 (Fractional Lethal Dose 簡稱 FLD)。

由國內王鵬智 (王鵬智，2007) 測量區劃空間火災危害關鍵因子之全尺寸實驗結果得知，「離地面 1.8 m 處測得之輻射熱達到輻射熱通量容忍極限值 2.5 kW/m^2 的時間」小於煙層下降至離地板 1.8 m 的時間。此項輻射熱通量達容忍極限值的時間可視為區劃空間火災避難危險情境屆臨時間 (the time to untenable condition)。如何結合此項時間與避難所需時間 (Required Safe Egress Time, RSET)，甚至擴展考量多項危險情境 (容忍極限時間)；增加危險情境中參數之機率性質；與強化消防安全防護設施後可能的影響，乃重要之研究課題。換言之，本研究期望能深入探討並克服下列三個問題，以期能較全面的評估區劃空間火災人員避難安全之課題。

- 一、國內設計者以替代性 (Route B) 方法驗證區劃空間的防火避難性能時，僅計

算煙層高度達 1.8 m 的時間，倘若能考量實際火災時之多項危險情境，諸如：火場中的對流熱、輻射熱、一氧化碳濃度及致命劑量分率等，是否能更真實且有效評估區劃空間人員無法忍受的程度而導致避難失敗？

- 二、場所內部可燃物眾多，無法逐一詳查可燃物特性，當設計者在未獲得所有參數，譬如：區劃空間內所有可燃物之燃燒熱，以致使用決定型方程式（組）會無法解釋諸多的不確定性（uncertainties），利用隨機型模式，是否可以克服決定型模式不確定性的問題？
- 三、火災危險度評估的結果，較常見的有火災預期死、傷人數（林元祥，2000），若將「人員死傷的事件」等價於「人員面臨一項以上危險情境導致避難失敗的事件」，在相同的火災條件下，區劃空間有無設置火警自動警設備與緊急廣播設備，人員死傷的機率應有差異，如何有效分析裝置該項設備能降低區劃空間火災人員死傷機率的情形？

貳、研究目的與研究方法

基於前言所述，本文進行區劃空間火災避難危險情境及避難失敗之研究，期望能達到下列目的：

- 一、以可預測火源熱釋率、煙生成率的「簡易二層驗證技術」（何明錦、陳俊勳，2007）為基礎，結合區劃空間火災避難危險情境預測方程式，建構動態的（dynamic）「火煙成長子模式」，以預測區劃空間火災避難危險情境屆臨時間，並與「人員避難子模式」所得區劃空間人員個體避難所需時間競合比較，建構「決定型區劃空間火災人員避難成敗模式」。
- 二、以可靠度為基礎的設計（reliability-based design）（Ang and Tang, 1984）結合上述決定型模式，輔以蒙地卡羅模擬方法（Monte Carlo simulation），研擬更貼近火災行為的「隨機型區劃空間火災人員避難成敗模式」。
- 三、建構五個人命危險情境功能函數，模擬區劃空間火災之煙層溫度、能見度、一氧化碳濃度、致命劑量分率、輻射熱通量共五個人命危險情境屆臨時間，並與區劃空間避難所需時間相競合，使全面性的考慮區劃空間火災各種人命危險情境對避難的影響，在模式建構與求解方法上成為可能，期望能大大改善研究的深度與廣度。
- 四、舉相同區劃空間條件之特定用途場所為例，在有無設置火警自動警設備與緊急廣播設備之條件下，評估人員逃生危險程度、傷亡人數，並與火災風險基準比較之。

本研究主要之研究方法如下：

- 一、文獻分析法：蒐集曾利用隨機型評估方法為研究主題之相關文獻，就其研究重點加以分析與應用，並彙整適合用於驗證區劃空間避難安全性能的參數，譬如有焰燃燒（flaming combustion）時，可燃物的一氧化碳生成率、燃燒熱及燃燒效率等參數。另參考先進國家制定各項區劃空間火災避難危險情境，進而建構相關預測方程式。
- 二、蒙地卡羅模擬法：以蒙地卡羅模擬方法配合電腦程式模擬，產生與參數預定機率分配相對應的隨機亂數值，並以本研究建構的決定型模式模擬多次，可評估區劃空間火災人員面臨任一項及一項以上危險情境避難失敗的機率值。

參、研究範圍與研究限制或假設

本研究範圍整理如下：

- 一、本研究所稱區劃空間，可泛指建築技術規則\建築設計施工篇\第一章用語定義第一條第十九款規範之居室¹。
- 二、居室內部堆積可燃物之發熱量（或稱單位面積火載量）應依「建築物防火避難安全性能驗證技術手冊」計算，本研究之居室規模以樓地板面積 200 m² 以下、天花板高度 3 m 以下之單一矩形居室為主，單位面積火載量以 350 MJ/m² 為限，超過者暫不列入本研究範疇。內部裝修材料（含居室天花板、牆面等部分），均符合耐燃二級以上，耐燃三級或未具備耐燃等級之內部裝修材料，暫不列入本研究範疇。
- 三、本文假設建築物為防火構造建築物，設置於建築物之消防安全設備（排煙設備、滅火設備等），其動作情形不列入本研究範疇。本文亦假設火災發展，自起火物延燒至他物，火勢侷限於起火居室內，至於火勢延燒至起火居室外、火勢被撲滅（人為或滅火設備所致）或自行燃燒殆盡等狀態，宜另闢專題探討。
- 四、本研究之區劃空間內部人員，以非睡眠狀態且具自力避難能力人員為主，睡眠狀態或未具自力避難能力人員皆不列入本研究範圍。

本研究限制或假設可歸納如下：

- 一、本研究所研擬之「隨機型區劃空間火災人員避難成敗模式」，模式之標的結果

¹ 居室：供居住、工作、集會、娛樂、烹飪等使用之房間，均稱居室。門廳、走廊、樓梯間、衣帽間、廁所盥洗室、浴室、儲藏室、機械室、車庫等不視為居室。但旅館、住宅、集合住宅、寄宿舍等建築物其衣帽間與儲藏室面積之合計以不超過該層樓地板面積八分之一為原則。

(target outcome) 為區劃空間火災人員面臨任一項及一項以上危險情境導致避難失敗的機率值。且假設「人員面臨一項以上危險情境導致避難失敗的事件」與「人員死傷的事件」為等價。

二、本研究所發展之「火煙成長子模式」，係以「簡易二層驗證技術」為基礎，參考該驗證技術之缺點（高學賢等，2008）或限制條件，「火煙成長子模式」假設條件如下所列：

- (一) 沒有對外界開口作設定，以致無法反應外界溫度、風速，亦未考慮與外界的能量交換。
- (二) 僅能反映單一空間的煙層變化，無法預測多個鄰近空間的煙層變化。
- (三) 火源成長服從時間火災成長模式，火源位於矩形區劃空間的中心。
- (四) 以二層區域模式計算煙層下降高度。
- (五) 僅以火源輻射熱計算個別人員所在位置之輻射熱通量，未考慮煙層或周圍牆壁散發之輻射熱。

三、以「火煙成長子模式」計算區劃空間火災避難危險情境屆臨時間，亦為避難容許時間（Available Safe Egress Time, ASET），換言之，在本文危險情境屆臨時間等價於避難容許時間。然影響避難容許時間之各項因素，可分為物理、生理、心理等三方面，本研究僅探討物理因素及生理因素，牽涉心理因素（壓力、慌張）者，暫不予考慮。

四、本研究所發展之「人員避難子模式」，係以「建築物防火避難安全性能驗證技術手冊」所列到達區劃空間出口之步行時間及通過區劃空間出口所需時間之公式為基礎，參考上開手冊之基本假設條件，「人員避難子模式」假設條件如下所列：

- (一) 人員在區劃空間內呈均勻分布的狀況。
- (二) 區劃空間未裝置火警自動警報設備，人員開始避難時間服從均勻分配，人員並非一起開始避難；又若區劃空間有設置火警自動警報設備與緊急廣播設備，不考慮火警受信總機與緊急廣播主機之蓄積時間，人員開始避難時間等於定溫式探測器動作時間，此時人員一起開始避難。
- (三) 避難者依指定的避難路徑避難，且無再折回之情形。
- (四) 全數人員均進行避難，無人滅火、無人開啟排煙設備或屬於有效通風面積之窗戶實施排煙作業。

肆、文獻回顧

Ramachandran (2002)； Ramachandran 與 Charters (2011) 在研究各種型態建築物火災時，為考量不同時段的火災成長，其多重交互作用導致火災發展型態的許多不確定性，因此可透過估算各火災型態可能發生的不確定性（機率）及預測其信賴界限（limits of confidence），而推導出非決定型火災模式（non-deterministic models）。渠等模式可約略分為下列兩種類型：1. 機率型（probabilistic），及 2. 隨機型（stochastic）。第一種類型的模式，可簡化定義為有機率運算的通稱，但其中有關機率分布及錯樹機率等運算，並未仔細考量基本物理過程及火災成長期間（時間）的變異量²。第二種類型為推論型模式，具有預測建築物內火災成長演變的能力³。

Hadjisophocleous (1998) 指出性能式設計所使用之判定標準，大致分為下列 2 種：1. 決定型判定基準（deterministic criteria），即人身安全、火災成長與擴散情形、火場暴露與建築結構性能等危害，2. 機率型判定基準（probabilistic criteria），亦即事件危害的程度與事件之可能性等。

Hasofer (1997) 在其研究中將決定型模式轉換成隨機型模式，其所運用的方法有下列 2 種：1. 將決定型的輸入項轉換成隨機型的輸入項，此為較普遍的方法⁴。2. 在模式的方程式中增加隨機項，此意味著模式既有的決定型公式無法精準預測實際觀察值，故有必要導入隨機項，此方式可應用於煙流動模式。

Hasofer 與 Qu (2002) 說明雖然決定型方程式在預測火災的發展有很好的預測力，但輸入參數並非屢屢都可輕易獲得，且部分輸入參數在本質上具隨機性質，無法純然以物理公式推得，導致設計者無法以決定型方程式有效預測火災的發展。克服此種情況的方法是將未知的輸入參數視為隨機變數，假設有 k 個隨機參數，理論上可得到 k 維輸出空間（ k -dimensional output space），再用以可靠度為基礎的設計（Ang and Tang, pp. 333-447, 1984）去計算設計方案成功或失敗的機率，但因模擬火災發展的電腦軟體有太多複雜的評估方程組，不利於上述計算，此時改用

² 此種模式 Ramachandran 稱之為靜態的（static）模式，針對不同建築物型態火災防護及保險問題所重視有關聚集危險度（collective risk）的問題，此種模式即可提供足夠的工具；Ramachandran, G. (2002). Stochastic Models of Fire Growth. Handbook of Fire Protection Engineering, 3rd Edition, pp. 3-381~3-401.

³ 因其具有預測建築物內火災成長演變的能力，故 Ramachandran 視為動態的（dynamic）模式；Ramachandran, G. (2002). Stochastic Models of Fire Growth. Handbook of Fire Protection Engineering, 3rd Edition, pp. 3-381-3-401.

⁴ 本研究採用將決定型的輸入項轉換成隨機型的輸入項此種方法，將決定型火煙成長模式及人員行為模式，轉換成隨機型火煙成長模式及人員行為模式。

蒙地卡羅模擬方法，利用預定的參數機率分配轉換產生相對應的隨機亂數值，經多次模擬後，可得輸出項的機率分佈，以評估設計的可靠度。

Nystedt (2003) 為文探討於住宅安裝偵煙式探測器或住宅型撒水設備等二項火災防護措施，對降低火災死亡人數的影響，研究方式是將火災死亡風險 (risk of fire death) 界定等同於火災發展至人員無法於致命情境屆臨時間前完成避難的機率，並用蒙地卡羅模擬方法克服模型的不確定性，研究結果發現偵煙式探測器及住宅型撒水設備對減少火災死亡風險的效力分別為 11% 和 53%。

Kong 等人 (2012) 研究不同火災熱釋率及火災成長率，對於避難容許時間的影響，研究結果發現設計火災熱釋率在 1000kW 到 3000kW 間，及火災成長率服從平均值為 2000kW 的對數常態情況下，所得避難容許時間模擬數值的機率分布服從對數常態分布。

經上述文獻回顧，本研究採用將決定型的輸入項轉換成隨機型的輸入項此種方法，意即將決定型模式轉換成隨機型模式。

伍、區劃空間火災人員避難成敗決定型模式

一、區劃空間火災人命危險情境方程式

根據何明錦、陳俊勳 (2007) 之研究，區劃空間火災煙層溫度可依式 (5.1) 估算：

$$T = T_0 + \frac{\int_0^t (\dot{Q} - \dot{Q}_w) dt}{C_p \times \rho_s \times Z_s \times A} \dots\dots\dots(5.1)$$

其中

T ：煙層溫度 (K)

T_0 ：初期空氣溫度 (K)

\dot{Q} ：火源熱釋率 (kW)

\dot{Q}_w ：熱損失率 (kW)

C_p ：空氣比熱 (kJ/kg·K)

ρ_s ：煙層密度 (kg/m³)

Z_s ：煙層厚度 (m)

A ：居室樓地板面積 (m²)

根據 Jin (1978) 與 Mulholland (2002) 之研究，發光式照明設備⁵之能見度可

⁵ 根據本文研究範圍，發光式照明設備，係指出口標示燈及緊急照明設備。

依式 (5.2) 估算：

$$S = \frac{8}{K_{10}} = \frac{8 \times V_{room}}{2.3 \times D_m \times \Delta M} \dots\dots\dots(5.2)$$

其中

S ：照明裝置的能見度 (m)

K_{10} ：以 10 為底的對數定義之煙的消光係數 (0.1bel/m or dB/m)

V_{room} ：居室體積 (m^3)

D_m ：以 e 為底的對數定義之煙的單位質量光學密度 (0.1bel · m^2 /g or dB · m^2 /g)

ΔM ：燃燒過的可燃物總質量 (g)

根據 Milke (2002)；Milke 與 Mowrer (1993) 之研究，煙層中的一氧化碳濃度可依式 (5.3) 估算：

$$ppmCO = \frac{M_{air}}{M_{CO}} \times Y_{CO} \times 10^6 = \frac{M_{air}}{M_{CO}} \times \frac{f_{CO}Q}{\rho_s \chi \Delta H_c A (H - Z_s)} \times 10^6 \dots\dots\dots(5.3)$$

其中

ppmCO：煙層中的一氧化碳濃度 (ppm)

M_{air} ：空氣分子量 (29 kg/kmol)

M_{CO} ：一氧化碳分子量 (28 kg/kmol)

Y_{CO} ：一氧化碳質量分率 (mass fraction of CO)，即每公斤的煙中含有之一氧化碳質量 (kg_{CO}/kg_{smoke})，大部分是以 A. Tewarson (2002) 測量之數據為主，且是在通風良好、有焰燃燒的火災且撒水頭未動作的情境下測量。

f_{CO} ：一氧化碳生成分率 (yield fraction of CO)，即每公斤的可燃物可產生之一氧化碳質量 (kg_{CO}/kg_{fuel})。

Q ：燃燒釋放之熱量 (kJ)

ρ_s ：煙層密度 (kg/m^3)，原公式為空氣密度，為求精準，改為煙層密度。

χ ：燃燒效率 (-)

ΔH_c ：燃燒熱 (kJ/kg)

A ：居室樓地板面積 (m^2)

H ：居室高度 (m)

Z_s ：煙層厚度 (m)

根據 Purser (2002, 2015) 之研究，血液中的一氧化碳血紅蛋白濃度達致容忍極限值或換算為無力行動劑量分率，可依式 (5.4) 估算：

$$F_{I_{CO}} = \frac{\%COHb}{\%D} = \frac{3.317 \times 10^{-5} \times \text{ppmCO}^{1.036} \times \text{RMV} \times t \times V_{CO_2}}{30} \dots\dots\dots(5.4)$$

$$V_{CO_2} = \frac{\exp(0.2468 \times \%CO_2 + 1.9086)}{6.8}$$

其中

- $F_{I_{CO}}$: 無力行動劑量分率 (-)
- $\%COHb$: 血液中的一氧化碳血紅素濃度 (%)
- $\%D$: 使人無意識或意識不清之一氧化碳血紅素濃度 (%)
- ppmCO : 煙層中的一氧化碳濃度 (ppm)
- RMV : 每分鐘呼吸的空氣量 (L/min)
- t : 暴露 (於煙層中的) 時間 (min)
- V_{CO_2} : 二氧化碳乘數因子 (-)
- $\%CO_2$: 煙層中的二氧化碳濃度 (%)

根據 Drysdale (1998) 之研究，火源輻射熱通量依式 (5.5) 估算：

$$\dot{q}_r'' = \frac{\dot{Q}_r}{4\pi R^2} = \frac{\chi_r \dot{Q}}{4\pi R^2} = \frac{\chi_r \alpha t^2}{4\pi R^2} \dots\dots\dots(5.5)$$

其中

- \dot{q}_r'' : 火源輻射熱通量 (kW/m²)
- \dot{Q}_r : 火源輻射熱釋率 (kW)
- χ_r : 輻射比例 (-)
- \dot{Q} : 火源熱釋率 (kW)
- α : 火災成長率 (kW/s²)
- t : 燃燒時間 (s)
- R : 人員跟火源的距離 (m)

經參考美國防火工程師學會手冊 (Purser, p.100, p.118, p.127, p.165, 2002)，各項區劃空間火災危險情境的容忍極限值，詳如表 5-1 所示。

表 5-1 各項區劃空間火災危險情境的容忍極限值

危險情境	煙層溫度	能見度	一氧化碳濃度	輻射熱通量	無力行動劑量分率
容忍極限值	200°C	5 m	1400 ppm	2.5 kW/m ²	1

本研究使用簡易二層驗證技術，得到單位時間的煙層溫度及相關火煙參數，並藉由前述能見度、一氧化碳濃度、無力行動劑量分率及輻射熱通量公式，以及各項容忍極限值，建構「火煙成長子模式」，估算個別人員的 5 項危險情境屆臨時間。

二、避難所需時間

Nystedt (2003) 以居民位置（於起火居室或其他房間）、生理狀態（清醒或睡覺）及警報設備（有設置或未設置），分成數種特定情境，在部分特定情境下，以機率分配方式決定覺知時間（detection time）及反應時間（response time），摘要整理如表 5-2；在其他特定情境下，以警報設備的動作時間（activation time）代表上述 2 個時間之合計。

表 5-2 人員覺知火災時間及反應時間之機率分配

情境	隨機變數	平均值	參數分配	區間
無警報設備、起火居室、清醒	人員覺知火災時間	30 sec	均勻分配	(20, 40)
	人員反應時間	20 sec	均勻分配	(10, 30)

若警報設備之探測器是裝置於天花板的定溫式探測器，根據 Schifiliti 等人 (2002) 之研究，其探測器溫度可依式 (5.6) 計算，若該溫度大於探測器標稱動作溫度，則得到探測器的動作時間。

$$T_{d,n} = \Delta T_{d,n} + T_{d,n-1} = \left[\frac{u_n^{1/2} (T_{g,n} - T_{d,n-1})}{RTI} \Delta t \right] + T_{d,n-1} \dots \dots (5.6)$$

其中

$T_{d,n}$ ：第 n 階段的探測器溫度 (°C)

$\Delta T_{d,n}$ ：第 n 階段的探測器溫度變化量 (°C)

u_n ：第 n 階段的氣體速度 (m/s)

$T_{g,n}$ ：第 n 階段的氣體溫度 $T_{g,n}$ (°C)

RTI：反應時間指數 ($m^{1/2}s^{1/2}$)

在區劃空間火災情境下，上述氣體可分成火羽流或天花板射流，Schifiliti 等人 (2002) 以一系列增長型的穩態熱釋率組合模式，模擬成長型火源 (growing fire)，該類成長型火源所發展的火羽流及天花板射流，其第 n 階段的溫度、速度，分別依下式計算：

$$T_{g,n} - T_{g,(n-1)} = \frac{16.9(\dot{Q}_n)^{2/3}}{H^{5/3}}, \quad u_n = 0.946\left(\frac{\dot{Q}_n}{H}\right)^{1/3}, \quad r \leq 0.18H \quad (\text{火羽流})$$

$$T_{g,n} - T_{g,(n-1)} = \frac{5.38(\dot{Q}_n/r)^{2/3}}{H}, \quad u_n = \frac{0.197\dot{Q}_n^{1/3}H^{1/2}}{r^{5/6}}, \quad r > 0.18H \quad (\text{天花板射流})$$

當 $n=1$ 時，令 $T_{g,(n-1)} = T_a$ ， $u_n = 0$ 。

其中

\dot{Q}_n ：第 n 階段的火源熱釋率 (kW)

r ：與火源中心軸之水平距離 (m)

H ：居室天花板高度 (m)

T_a ：大氣溫度 ($^{\circ}\text{C}$)

根據陳建忠、簡賢文 (2009) 之研究，到達居室出口之步行時間，可依式 (5.7) 計算：

$$t_{travel} = \max\left(\sum \frac{l_i}{v}\right) \dots \dots \dots (5.7)$$

其中

t_{travel} ：居室內任一點到達居室出口之最長步行時間，簡稱到達居室出口之步行時間 (min)。

l_i ：居室內任一點到達居室出口之步行距離 (m)

v ：群集流的步行速度，即居室內所有人員的平均步行速度 (m/min)。

田中哮義 (1993) 實測個別人員的自然步行速度，介於 1 m/s 到 2 m/s，其中男子平均自由步行速度為 1.4 m/s，女子平均自由步行速度為 1.2 m/s，此外，在不同條件下，個別人員的步行速度有若干差異，如表 5-3 所示。

表 5-3 不同條件下個別人員的步行速度表

條件	步行速度	條件	步行速度
小跑步	3.00 m/sec	黑暗中（未知現場）	0.30 m/sec
中跑步	4.00 m/sec	利用肘與膝爬行	0.30 m/sec
快跑步	6.00 m/sec	利用手與膝爬行	0.40 m/sec
急跑步	8.00 m/sec	利用手與足爬行	0.50 m/sec
黑暗中（已知現場）	0.70 m/sec	最低姿勢步行	0.60 m/sec

根據陳建忠、簡賢文（2009）之研究，通過居室出口所需時間，依式（5.8）計算：

$$t_{queue} = \frac{\sum pA_{area}}{\sum N_{eff} B_{eff}} \dots\dots(5.8)$$

其中

t_{queue} ：通過居室出口所需時間（min）

$\sum pA_{area}$ ：居室總人數（人）

p ：各用途居室之收容人員密度（人/m²）

A_{area} ：各用途居室之樓地板面積（m²）

$\sum N_{eff} B_{eff}$ ：單位時間內通過居室出口之人數（人/min）

N_{eff} ：有效流動係數（人/min·m）

B_{eff} ：有效出口寬度（m）

本研究在有、無設置火警自動警報設備與緊急廣播設備 2 種情境下，以定溫式探測器動作時間、人員覺知火災時間加上反應時間，分別代表避難開始時間，再加入避難步行時間及通過出口時間，建構「人員避難子模式」，計算個別人員的避難所需時間。

三、決定型模式推導

以本模式評估一場區劃空間火災試驗後，第 k 位人員面臨一項以上危險情境導致避難失敗，或未面臨任一項危險情境而避難成功，其評估方法如下述：

當 $t_{critical_i,k} - t_{escape,k} < 0$ ，表示第 k 位人員面臨第 i 項危險情境，即避難失敗；反之，當 $t_{critical_i,k} - t_{escape,k} \geq 0$ ，表示第 k 位人員未面臨或即將面臨第 i 項危險情境，即

避難成功。

其中

下標 k 代表第 k 位人員；以下標 i 代表第 i 項區劃空間火災避難危險情境。

$t_{critical_i,k}$, $i=1, 2, 3, 4, 5$ ：第 k 位人員的 5 項區劃空間火災避難危險情境屆臨時間 (sec)，以「火煙成長子模式」估算之。

$t_{escape,k}$ ：第 k 位人員的區劃空間避難所需時間 (sec)，以「人員避難子模式」估算之。

再將面臨一項以上危險情境之人員加總後，可得避難失敗人數；反之，將未面臨一項以上危險情境之人員加總後，可計算避難成功人數。

(一) 火煙成長子模式

本研究將第 k 位人員第 i 項危險情境屆臨時間記為 $t_{critical_i,k}$, $i=1, 2, 3, 4, 5$ ，令 $n_i \Delta t$, $i=1, 2, 3, 4, 5$ ，分別為第 i 項危險情境屆臨時間之累積時間，以本研究發展「火煙成長子模式」之電腦程式計算之，其程序如下：

1. 將已知之各項物理初始條件、區劃空間、人員及可燃物之決定型參數（即在一次或多次模擬中均為常數的輸入項）輸入程式，其數值詳如表 5-4 所示。
2. 以前一單位時間之煙層厚度、密度及相關條件，計算該單位時間之火、煙狀態，俟煙層溫度達到收斂標準後，再行計算該單位時間之煙層密度，若煙層溫度未達到收斂標準，則將煙層溫度疊代後⁶，重新由圖 5-1 流程【2】計算。
3. 以單位時間之火、煙狀態，及人員的呼吸量、位置，計算 5 項危險情境屆臨時間。
4. 待程式計算出所有人員的 5 項危險情境屆臨時間，程式結束。

有關「火煙成長子模式」之計算流程如圖 5-1 所示。

⁶ 煙層溫度之疊代間距採 $10^{-6}K$ ，係參考吳秉宸、蕭嘉俊，「簡易二層法於建築物防火避難之應用研究」，內政部建築研究所研究報告，頁 59 及頁 66，民 96 年 12 月。

表 5-4 「火煙成長子模式」之決定型參數

區劃空間參數	數值	物理初始條件	數值
區劃空間樓地板面積	200m ²	實驗係數(簡易二層法中計算煙生成率的係數 k)	0.076 kg/s · kW ^{1/3} · m ^{5/3}
區劃空間天花板高度	3m	起始溫度	303 K
周圍牆壁熱傳導率	0.04 W/m · K	計算時間間隔	0.1 sec
周圍牆壁厚度	0.125m	可燃物參數	數值
周圍牆壁密度	300 kg/m ³	火災成長率	0.059 kW/s ²
周圍牆壁比熱	1.63 kJ/kg · K	燃燒熱	23900 kJ/kg
排煙口排煙能力	0 m ³ /min	燃燒效率	0.8
人員參數	參數	煙的單位質量光學密度	420 dB · m ² /kg
人員人數	區劃空間內的人數	一氧化碳生成率	0.03kgCO/kgfuel
每分鐘的呼吸空氣量	25 L/min	二氧化碳生成率	1.5 kgCO ₂ /kgfuel

註 1：本研究將內部裝修材料視為周圍牆壁，其區劃空間內部裝修材料為符合耐燃二級的耐燃纖維板 (fiber insulating board)。

註 2：Rohr K. D. (2005) 調查美國住宅火災死亡案例，發現前兩名起火家具為床墊及軟墊椅子 (沙發)，而這兩種家具主要由聚氨酯泡棉 (polyurethane foam) 所構成，國內此類家具材質亦同。本研究遂選定聚氨酯代表區劃空間內的家具，聚氨酯於燃燒過程中，其燃燒效率的變異性相當大 (Yamada T. et al., 2002)，假設燃燒效率為 0.8，並將聚氨酯的燃燒熱 23900 kJ/kg (NFPA, Appendix C, p. 41, 2002)、略大於快速火災成長係數 0.04689 kW/s² 之數值 0.059 kW/s²，分別作為參數值。

註 3：區劃空間內的人數，可擇一方式計算：(1) 依內政部函頒「特定場所容留人數管制指導原則」計算之。(2) 依「建築物防火避難安全性能驗證技術手冊」計算之。

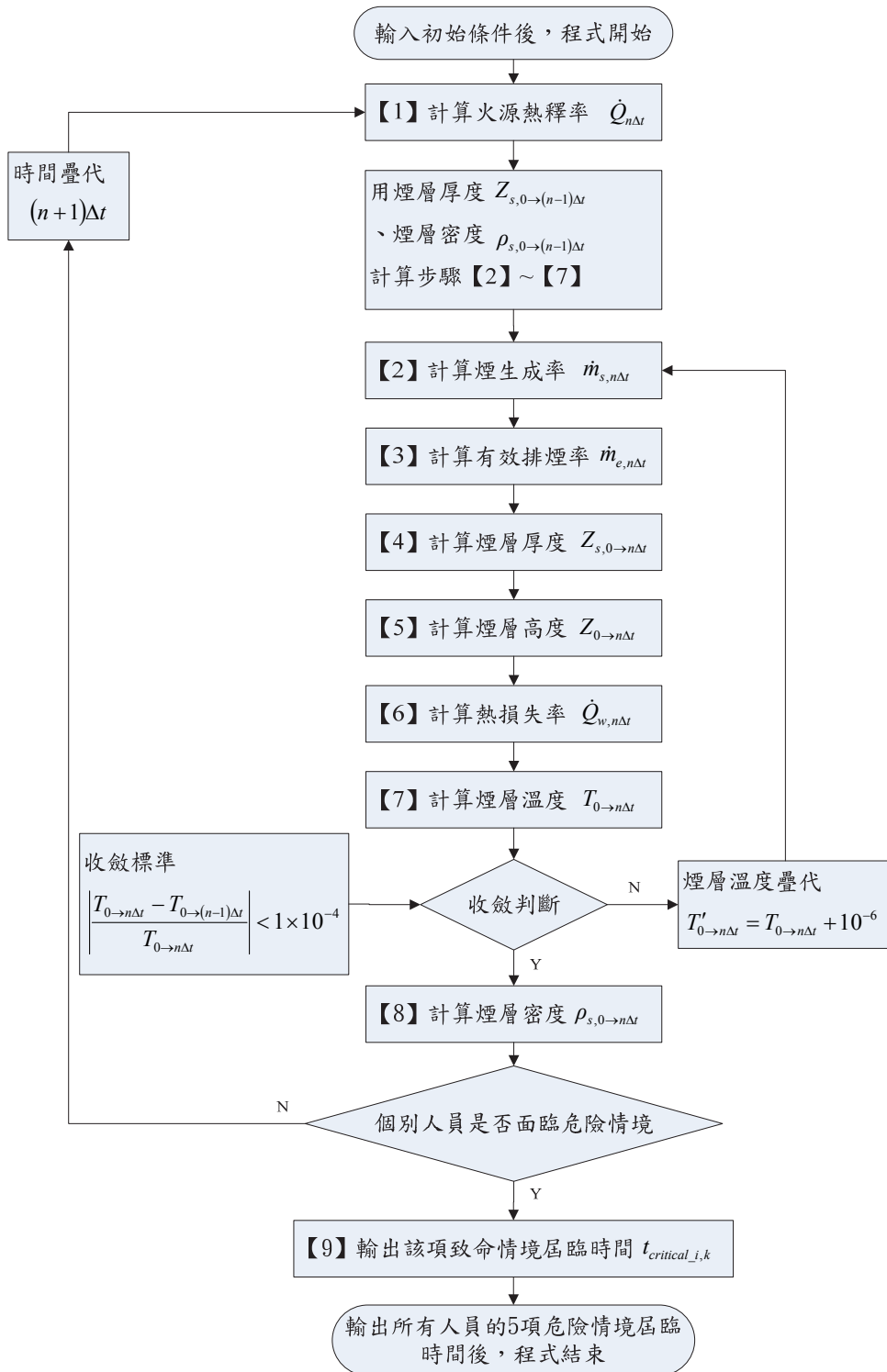


圖 5-1 「火煙成長子模式」計算流程圖

(二) 人員避難子模式

本研究將第 k 位人員的區劃空間避難所需時間記為 $t_{escape,k}$ ，且該時間為第 k 位人員的區劃空間避難開始時間($t_{start,k}$)、到達區劃空間出口之步行時間($t_{travel,k}$)及通過區劃空間出口所需時間($t_{queue,k}$)三者之合計，上述時間均以本研究發展「人員避難子模式」電腦程式計算之，其程序如下：

1. 將已知之各項物理初始條件、區劃空間、人員及可燃物之決定型參數（即在一次或多次模擬中均為常數的輸入項）輸入程式，其數值詳如表 5-2 所示。
2. 區劃空間有設置火警自動警報設備與緊急廣播設備，以定溫式探測器動作時間作為人員的避難開始時間；區劃空間未設置火警自動警報設備與緊急廣播設備，以人員覺知及反應時間的合計值作為人員的避難開始時間。
3. 以個別人員位置、步行速度等參數，計算人員到達區劃空間出口之步行時間及通過區劃空間出口所需時間。
4. 待程式計算出所有人員的避難所需時間，程式結束。

有關「人員行為子模式」之計算流程，如圖 5-2 所示。

表 5-5 「人員行為子模式」之決定型參數

區劃空間參數	數值	物理初始條件	數值
區劃空間長度	14.2 m	起始溫度	30°C
區劃空間寬度	14.2 m	計算時間間隔	0.1 sec
區劃空間天花板高度	3 m	有效流動係數	1.5 人/sec · m
有效出口寬度	2 m	可燃物參數	數值
人員參數	數值	火災成長率	0.059 kW/s ²
人員步行速度	1.3 m/s	燃燒效率	0.8
人員覺知火災時間	30 s	探測器參數	數值
人員反應時間	20 s	標稱動作溫度	57°C
人員位置	均勻分布	反應時間指數	50 m ^{1/2} s ^{1/2}

註 1：本研究參考 Nystedt (2003) 之研究，將無警報設備、起火區劃空間、清醒之情境下，以 30 sec 及 20 sec 分別作為人員覺知火災時間及反應時間之參數值；另參考

田中哮義（1993）之研究，以介於男子及女子之平均自由步行速度 1.3 m/s，作為人員步行速度之參數值。

註 2：本研究將區劃空間界定為矩形，並排除人員於出口前產生滯留的情形，故將有效流動係數訂為標準值 1.5 人/sec · m。由於本研究已將可燃物代表位置設於區劃空間地面正中央，應無可燃物延燒導致出口附近有無法通過之情形，為求簡化，將有效出口寬度訂為區劃空間出口寬度 2 m。

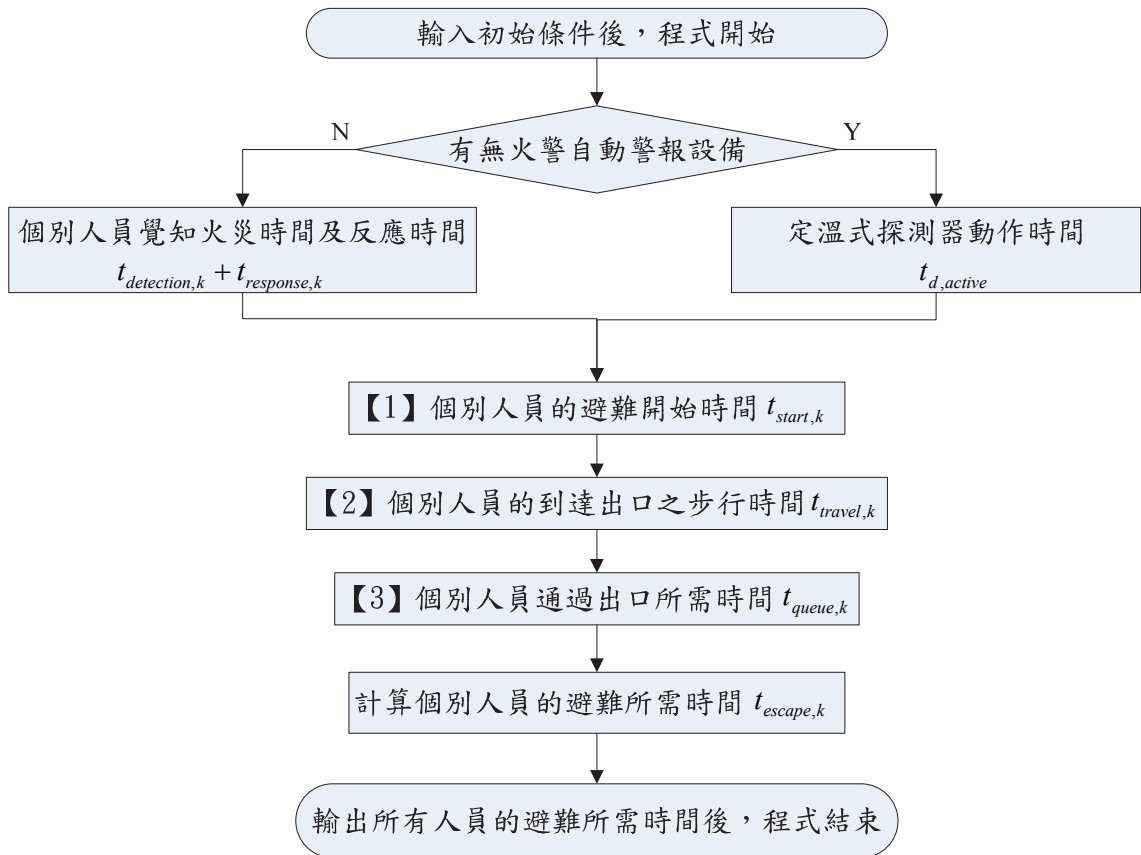


圖 5-2 「人員行為子模式」計算流程圖

四、決定型模式轉換成隨機型模式之構思

本研究研擬之火煙成長子模式與人員避難子模式，其區劃空間參數（樓地板面積、天花板高度、周圍牆壁等）、火源參數（火災成長率、可燃物的燃燒熱、燃燒效率等）與人員避難參數（覺知火災時間、反應時間、步行速度、有效出口寬度及有效流動係數等）均假設為定值（或稱決定型參數），然考量火災參數與人員

參數具隨機性質，若以「決定型區劃空間火災人員避難成敗模式」計算避難失敗人數，較無法涵蓋火災成長與人員避難之動態性質，客觀性稍嫌不足。

本研究下一節之討論，將以可靠度為基礎的設計及結構函數（structure function），建構「隨機型區劃空間火災人員避難成敗模式」，並將部分決定型參數轉換成隨機型參數，輔以蒙地卡羅模擬方法模擬多場區劃空間火災試驗，期望能客觀估算人員避難失敗機率。

陸、隨機型區劃空間火災人員避難成敗模式

一、隨機型模式推導

（一）人員是否面臨任一項危險情境導致避難成敗子模式

設模擬人員是否面臨任一項危險情境之試驗共有 M 次，每次試驗計有 K 位人員，均可能面臨 5 項危險情境，並將任一次試驗稱為第 m 次試驗，任一位人員稱為第 k 位人員，任一項危險情境稱為第 i 項危險情境。

以可靠度為基礎的設計，建構「區劃空間火災人員是否面臨任一項危險情境導致避難成敗子模式」（5 個功能函數），詳細步驟如下：

令 $G_{i,m,k}$ 為第 m 次試驗後第 k 位人員面臨第 i 項危險情境，導致避難失敗或成功的功能函數。

定義 $G_{i,m,k} = t_{critical_i,m,k} - t_{escape,m,k}$ ， $i \in [5]$ ， $m \in [M]$ ， $k \in [K]$ 。

其中

$G_{1,m,k}$ ：第 m 次試驗後第 k 位人員是否面臨第 1 項危險情境（煙層溫度達容忍極限值 200°C ）之功能函數。

$G_{2,m,k}$ ：第 m 次試驗後第 k 位人員是否面臨第 2 項致命情境（能見度達容忍極限值 5 m）之功能函數。

$G_{3,m,k}$ ：第 m 次試驗後第 k 位人員是否面臨第 3 項致命情境（一氧化碳濃度達容忍極限值 1400 ppm）之功能函數。

$G_{4,m,k}$ ：第 m 次試驗後第 k 位人員是否面臨第 4 項致命情境（無力行動劑量分率達容忍極限值 1）之功能函數。

$G_{5,m,k}$ ：第 m 次試驗後第 k 位人員是否面臨第 5 項危險情境（輻射熱通量達容忍極限值 2.5 kW/m^2 ）之功能函數。

$t_{critical_i,m,k}$ ：第 m 次試驗後第 k 位人員的第 i 項危險情境屆臨時間(sec)，其求法等同「火煙成長子模式」第 k 位人員的第 i 項危險情境屆臨時間 ($t_{critical_1,k}$)。

$t_{escape,m,k}$ ：第 m 次試驗後第 k 位人員的區劃空間避難所需時間 (sec)，其求法等同「人員避難子模式」第 k 位人員的區劃空間避難所需時間 ($t_{escape,k}$)。

當功能函數無法成功操作 ($G_{i,m,k} < 0$)，表示第 m 次試驗後第 k 位人員面臨第 i 項危險情境 (之威脅)，即避難失敗；反之，當功能函數成功操作 ($G_{i,m,k} \geq 0$)，表示第 m 次試驗後第 k 位人員未面臨或即將面臨第 i 項危險情境 (之威脅)，即避難成功。

(二) 人員是否面臨一項以上危險情境導致避難成敗子模式

前一小節係討論人員是否面臨任一項危險情境導致避難成敗子模式，此一小節則擴展為面臨多項危險情境情形，即以結構函數建構「區劃空間火災人員是否面臨一項以上危險情境導致避難成敗子模式」，詳細步驟如下：

$$\text{令 } x_{i,m,k} = \begin{cases} 0, & \text{if } G_{i,m,k} < 0 \\ 1, & \text{if } G_{i,m,k} \geq 0 \end{cases}, \quad i \in [5], \quad m \in [M], \quad k \in [K]。$$

$x_{i,m,k}$ 為第 m 次試驗後第 k 位人員是否面臨第 i 項危險情境，導致避難失敗或成功的指標變數 (indicator variable)。若第 m 次試驗後第 k 位人員面臨第 i 項危險情境導致避難失敗，即第 i 個功能函數無法成功操作，則 $x_{i,m,k} = 0$ ；反之，若第 m 次試驗後第 k 位人員未面臨第 i 項危險情境而避難成功，即第 i 個功能函數成功操作，則 $x_{i,m,k} = 1$ 。

$$\text{令 } \phi_{m,k} = \begin{cases} 0, & \text{if } \prod_{i=1}^5 x_{i,m,k} = 0 \\ 1, & \text{if } \prod_{i=1}^5 x_{i,m,k} = 1 \end{cases}, \quad m \in [M], \quad k \in [K]。$$

$\phi_{m,k}$ 為第 m 次試驗後第 k 位人員是否面臨一項以上危險情境，導致避難失敗或成功的結構函數。若第 m 次試驗後第 k 位人員面臨一項以上危險情境導致避難失敗，即存在 1 個以上功能函數無法成功操作 ($\exists i \in [5] \text{ s. t. } G_{i,m,k} < 0$)，則 $\phi_{m,k} = 0$ ；反之，若第 m 次試驗後第 k 位人員未面臨任一項危險情境而避難成功，即 5 個功能函數均成功操作 ($\forall i \in [5] \text{ s. t. } G_{i,m,k} \geq 0$)，則 $\phi_{m,k} = 1$ 。

假設每次試驗均為獨立事件，則經 M 次試驗後， MK 位人員面臨第 i 項危險情境導致避難失敗的機率值 $P_{fail_i,[M]} = 1 - P_{safe_i,[M]} = 1 - \left(\sum_{m=1}^M \sum_{k=1}^K x_{i,m,k} / MK \right)$ ， $i \in [5]$ 。

同理，經 M 次試驗後， MK 位人員面臨一項以上危險情境導致避難失敗的

$$P_{fail,[M]} = 1 - P_{safe,[M]} = 1 - \left(\sum_{m=1}^M \sum_{k=1}^K \phi_{m,k} / MK \right) = 1 - \left(\sum_{m=1}^M \sum_{k=1}^K \prod_{i=1}^5 x_{i,m,k} / MK \right)。$$

上述機率值以本研究發展「隨機型區劃空間火災人員避難成敗模式」電腦程式計算之，其計算流程如圖 6-1 所示。

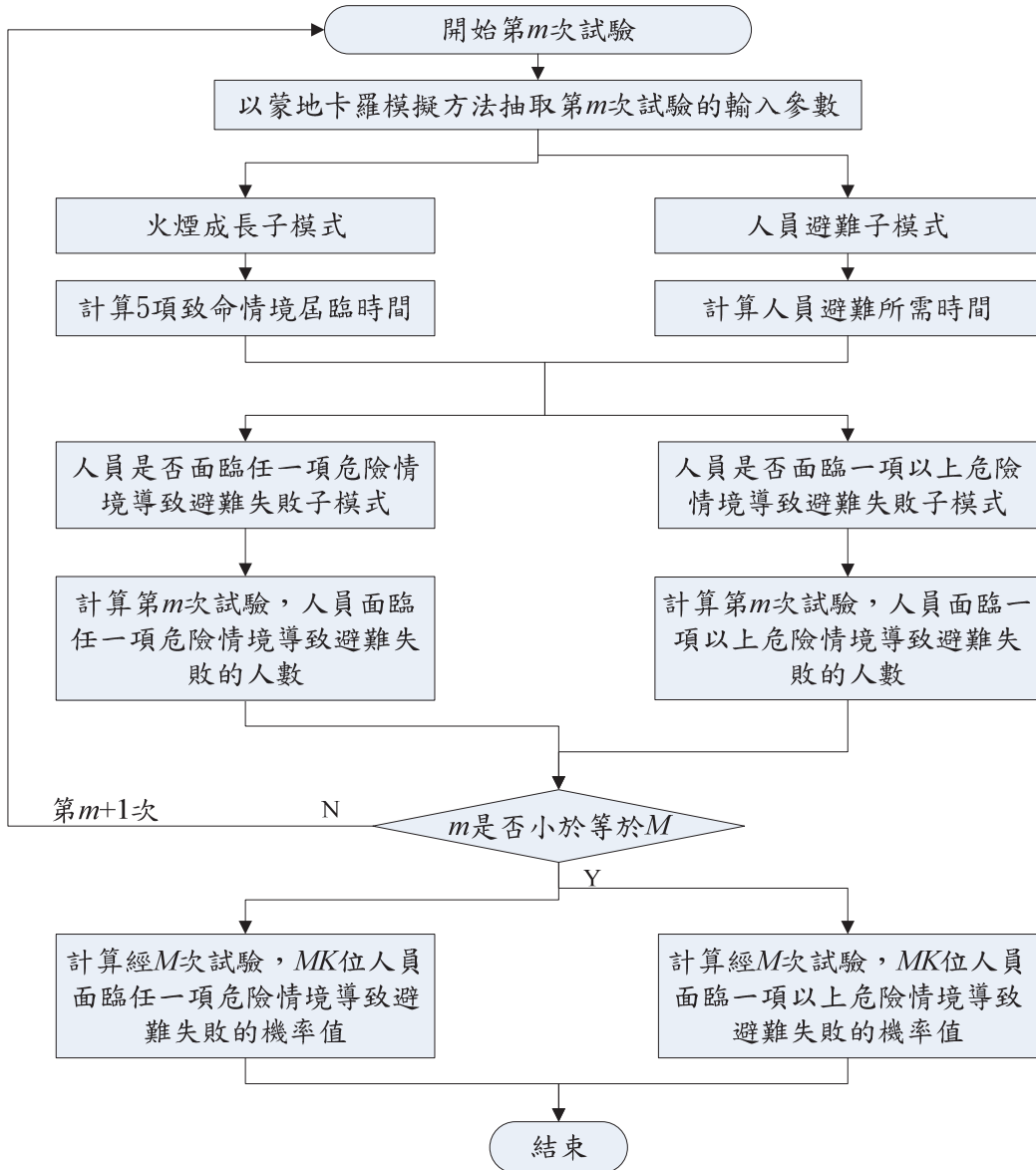


圖 6-1 「隨機型區劃空間火災人員避難成敗模式」計算流程圖

二、界定隨機型參數與模擬

本研究以決定型參數作為隨機型參數之平均值，並參考 Nystedt (2003)、Williams (2003) 及 Kong 等人 (2012) 之研究，訂定各項參數的標準差，並依前述文獻模擬方法，假設多數參數分配服從對數常態分配。本研究所界定之隨機型參數（即在多次模擬中為變數的輸入項）及預定機率分配詳如表 6-1 所示。

表 6-1 隨機型參數及預定機率分配

隨機型參數	平均值	標準差	參數分配
火災成長率	0.059 kW/s ²	0.0059 kW/s ²	對數常態分配
燃燒熱	23900 kJ/kg	956 kJ/kg	對數常態分配
燃燒效率	0.8	0.08	對數常態分配
一氧化碳生成率	0.03 kgCO/kgfuel	0.006 kgCO/kgfuel	對數常態分配
二氧化碳生成率	1.5 kgCO ₂ /kgfuel	0.3 kgCO ₂ /kgfuel	對數常態分配
人員每分鐘的呼吸空氣量	25 L/min	5 L/min	對數常態分配
第 <i>k</i> 位人員步行速度	1.3 m/sec	0.2 m/sec	對數常態分配
第 <i>k</i> 位人員覺知火災時間	30 sec	5.7 sec	均勻分配
第 <i>k</i> 位人員反應時間	20 sec	5.7 sec	均勻分配
定溫式探測器之標稱動作溫度	57°C	2°C	對數常態分配

由蒙地卡羅模擬方法，可得到與隨機型參數預設機率分配相對應之隨機亂數值（姚致平譯，1998），將隨機亂數值代入「決定型區劃空間火災人員避難成敗模式」，所得的結果就如同同一組實驗值，反覆模擬多次，再以「隨機型區劃空間火災人員避難成敗模式」，統計避難失敗人數，即可估算區劃空間火災人員面臨任一項及一項以上危險情境導致避難失敗的機率值，不僅可克服決定型模式的不確定性，評估結果亦較為客觀。

柒、範例應用

一、範例陳述

哈克飲料店火災案⁷後，舞廳、酒吧及販賣酒精飲品之音樂展演場所(live house)等場所之公共安全頓成焦點。考量建築物組別為 B-1 娛樂場所(舞廳、酒店等)均供不特定人使用，且因其營業型態特殊，多半僅有一個出入口，當容留人數眾多時，一旦發生大火，往往造成慘重的傷亡，故本研究選定娛樂場所(舞廳)作為應用範例，其區劃空間樓地板面積為 200 m²，區劃空間高度為 3 m，區劃空間對角處有 1 個寬度為 2 m 之出入口。

本研究以內政部函頒「特定場所容留人數管制指導原則」，核算娛樂場所(舞廳)容留人數管制量為 200 人，並考量場所有無設置火警自動警報設備與緊急廣播設備，分別以「隨機型區劃空間火災人員避難成敗模式」，估算上述 2 種試驗條件下人員避難失敗的機率值。

二、模擬結果與討論

經 100 次試驗後，2 種試驗條件下，20000 位人員面臨任一項及一項以上危險情境導致避難失敗的機率值(即 $P_{fail_i,[100]}$, $i \in [5]$ 與 $P_{fail,[100]}$)，詳如表 7-1 所示。

表 7-1 經 100 次試驗後人員面臨任一項或一項以上危險情境導致避難失敗的機率值

避難失敗的 機率值 試驗條件	煙層溫度大 於 200°C	能見度 小於 5 m	一氧化碳 濃度大於 1400 ppm	無力行 動劑量 分率達 1	輻射熱通 量大於 2.5 kW/m ²	面臨一項 以上危險 情境
有設備	0.00005	0.00010	0.00005	0.00010	0.00005	0.00015
無設備	0.00095	0.12640	0.00010	0.00015	0.04765	0.13395

備註：有無設備係指有無設置火警自動警報設備與緊急廣播設備。

由表 7-1 機率數值可知，娛樂場所(舞廳)有設置火警自動警報設備與緊急廣播設備，人員面臨任一項或一項以上危險情境的機率值均接近 0；娛樂場所(舞廳)未設置火警自動警報設備與緊急廣播設備，人員最有可能面臨的危險情境者為濃

⁷ 哈克飲料店火災案概要:100年3月6日凌晨1點多,位於臺中市中興街的哈克飲料店(ALA PUB)發生火災,火勢從二樓舞臺區竄出,位於店內二樓看臺區(夾層)的客人逃生不及,造成9人死亡,12人受傷。

煙導致能見度小於 5 m (避難失敗的機率值 0.12640)，次為輻射熱通量大於 2.5 kW/m²，再者為煙層溫度大於 200°C，再次者為無力行動劑量分率達 1 (人員體內一氧化碳血紅蛋白濃度達 30%)，最後是煙層中一氧化碳濃度大於 1400 ppm。

經上述 100 次試驗後，本研究蒐集 20000 位人員的 5 項危險情境個別屆臨時間(即 $t_{critical_i,m,k}$, $i \in [5]$, $m \in [100]$, $k \in [200]$) 與避難所需時間 (即 $t_{escape,m,k}$, $m \in [100]$, $k \in [200]$)，其平均值及標準差，詳如表 7-2。

表 7-2 經 100 次試驗後人員的 5 項危險情境個別屆臨時間與避難所需時間的統計量

試驗條件		屆臨時間與避難 所需時間		煙層溫度 大於 200°C	能見度 小於 5 m	一氧化碳 濃度大於 1400 ppm	無力行 動劑量 分率達 1	輻射熱通 量大於 2.5 kW/m ²	避難所 需時間
		平均值	標準差						
有設備	平均值	158.0 sec	133.1 sec	174.3 sec	181.3 sec	140.4 sec	61.8 sec		
	標準差	6.1 sec	13.0 sec	7.9 sec	6.8 sec	6.9 sec	24.1 sec		
無設備	平均值	158.2 sec	131.1 sec	173.8 sec	181.4 sec	140.6 sec	92.9 sec		
	標準差	5.4 sec	18.3 sec	7.7 sec	7.2 sec	6.3 sec	28.8 sec		

備註：有無設備係指有無設置火警自動警報設備與緊急廣播設備。

由表 7-2 所列時間平均值之大小可知，不論何種試驗條件，若以各項危險情境屆臨時間平均值的大小，作為人員面臨任一項以上危險情境的排序，此排序與 Purser (2002) 對單一居室的火災 (家具為沙發，沙發材料有包含聚氨酯) 分析火災前六分鐘對生命的威脅之順序相似，分別是煙的能見度、輻射熱通量及煙層溫度、一氧化碳濃度、最後是煙的窒息性劑量分率 (窒息性氣體為一氧化碳等)。

三、火災風險接受基準

雷明遠 (2012) 說明概率性風險評估，接受度的標準是將意外事件的或然率，訂為低至合理範圍，或是低至合理可行程度 (as low as reasonably practicable)，英國 1995/97/98/99 年期間，每棟建築物每年火災死亡人數為 2.3×10^{-5} (人/年、棟)，與其他資料搭配，顯示社會大眾可承受的火災風險程度，住家場所建築物每年火災死亡人數為 10^{-6} (人/年、棟)、非住家場所建築物每年火災死亡人數為 10^{-5} (人/年、棟)。本研究將非住家場所建築物每年火災死亡人數為 10^{-5} (人/年、棟)，視為火災的風險已低至合理範圍或合理可行程度。

捌、結論與建議

本文建構區劃空間火災人命危險模式及模擬評估避難失敗之機率，首先以預測火災危險情境屆臨時間與空間人員避難所需時間相競合的構想，建構多重功能函數（五個人命危險情境）；然後，透過模擬區劃空間火災之煙層溫度、能見度、一氧化碳濃度、致命劑量分率、輻射熱通量等五個人命危險情境屆臨時間，與區劃空間避難所需時間，經由競合比較使得估算避難失敗之機率成為可行。本研究有如下的結論與建議。

一、結論

- （一）在全面性考慮區劃空間火災各種人命危險情境、模型建構上與考量其對避難的影響等研究面向上，本文同時考量煙層溫度、能見度、一氧化碳濃度、致命劑量分率、輻射熱通量等情境，研究顯示，成功的建構整合型模式與增進研究廣度，並獲致豐碩的成果，大幅改善以往研究之侷限，也能達到臚列之研究目的。
- （二）以本研究研擬之「隨機型區劃空間火災人員避難成敗模式」，輔以蒙地卡羅模擬方法，評估娛樂場所（舞廳）發生聚氨酯家具火災（火場發展依循 t^2 火災成長模式，火災成長率之平均值為 0.059 kW/s^2 ），人員面臨各項致命情境之機率，以能見度小於 5 m 為最大，其次為輻射熱通量大於 2.5 kW/m^2 ，再者為煙層溫度大於 200°C ，再次者為無力行動劑量分率達 1 （人員體內一氧化碳血紅蛋白濃度達 30% ），最後是一氧化碳濃度大於 1400 ppm 。此項區劃空間火災威脅人命危險因子之排序結果與 Purser (2002) 對單一居室的火災分析火災發生後前六分鐘對生命的威脅之順序相似。
- （三）本研究發現，娛樂場所（舞廳）容留人數達管制量 200 人，增設火警自動警報設備與緊急廣播設備，人員面臨一項以上危險情境導致避難失敗機率（又可定義為人員傷亡的機率⁸）由 0.13395 下降至 0.00015 ，下降達 13.3% ，此下降值相較於 Nystedt (2003) 模擬住宅安裝偵煙式探測器後，火災死亡風險下降達 11% 相去不遠，造成此差異之可能原因包含：本研究與 Nystedt (2003) 採用的火災成長模式、收容人數、人員行為模式及探測器形式均不同，危險情境的標準亦不一致，但整體而言，設置火警自動警報設備與緊急廣播設備，確可降低火災造成人員傷亡的機率。

⁸ 本研究假設「人員面臨一項以上危險情境導致避難失敗的事件」與「人員死傷的事件」為等價，人員面臨一項以上危險情境導致避難失敗機率，可定義為人員傷亡的機率。

- (四) 本研究所舉娛樂場所(舞廳)發生聚氦酯家具火災,容留人數 200 人,若將該娛樂場所(舞廳)視為一棟建築物,在有設置及未設置火警自動警報設備與緊急廣播設備的條件下,該娛樂場所(舞廳)建築物每次火災傷亡人數分別為 $200 \times 0.00015 = 0.03$ (人/次、棟)與 $200 \times 0.13395 = 27$ (人/次、棟)。陳建忠等人(2003)統計我國 1983 年至 2003 年 5 月各類型建築物之總樓地板積、火災件數,並計算出營業場所類建築物單位面積每年火災機率為 3.64×10^{-6} (次/年、平方公尺),依此計算該娛樂場所(舞廳)建築物每年火災機率為 $200 \times 3.64 \times 10^{-6} = 7.28 \times 10^{-4}$ (次/年、棟),在有設置及未設置火警自動警報設備與緊急廣播設備的條件下,該娛樂場所(舞廳)建築物每年火災傷亡人數分別為 $0.03 \times 7.28 \times 10^{-4} = 2.18 \times 10^{-5}$ (人/年、棟)與 $27 \times 7.28 \times 10^{-4} = 1.97 \times 10^{-2}$ (人/年、棟)。

二、建議

- (一) 本文估算該娛樂場所(舞廳)建築物每年火災傷亡人數為 2.18×10^{-5} (人/年、棟),稍高於火災風險接受基準 10^{-5} (人/年、棟),係因本研究以「危險情境」估算死亡及受傷人員,之後如以「致命情境」估算死亡人數,便能確認設計方案,可否將各類型建築物每年火災死亡人數,降低至火災風險接受基準,例如:增設火警自動警報設備、減少容留人數、增加逃生出入口數量等。
- (二) 建議地方政府機關對容留人數經常達到或超過管制量之特定場所⁹,可鼓勵其設置火警自動警報設備與緊急廣播設備,並於緊急狀況時,以連動方式停止高分貝之音樂並播放警示音響,提醒人員朝安全方向避難。
- (三) 本研究尚有許多可改進之處,例如:設定對外界之開口、考慮排煙設備動作效果、連結多個居室空間等,但改進的困難點在於,預測各項危險情境之區域模式,多半是以小規模密閉居室之火災實驗結果作為立論依據,如要以此實驗結果預測有對外界之開口、排煙設備、連結多個居室空間,其煙層的流動及各項危險情境屆臨時間,有待更進一步的研究。
- (四) 本研究所發展之「人員避難子模式」,係假設有焰燃燒且區劃空間人員均全

⁹ 內政部已於 95 年 11 月 16 日以台內營字第 0950806798 號函訂頒「特定用途空間容留人數管制指導原則」,函時請各直轄市、縣(市)政府請其他縣市政府檢視當地需求,如認為有必要對特定用途空間容留人數進行管制時,得引用原則全部或一部,依地方制度法以自治條例定之。目前(2018 年 2 月)有台北市政府及桃園市政府、台中市政府、新北市市政府、高雄市政府、台南市政府、嘉義市政府、基隆市政府等,已發布相關規定,分別訂有容留人數管制之自治規則並據以執行。

數聽從火警自動警報設備與緊急廣播設備之警示立即避難，無人滅火或打開窗戶排煙。實際上，若考量悶燒或有部分人員未聽從警示立即避難，轉而滅火或打開窗戶排煙，宜另闢專題討論前述條件下人員面臨危險情境導致避難失敗之機率。

- (五) 本文建構五個功能函數、設定函數參數之隨機性質，並以蒙地卡羅模擬法評估空間避難失敗機率，後續研究可運用火災模擬軟體（如：FDS），在儘可能設定與本文類似參數下，與本文所得結果進行區劃空間避難失敗機率之比較分析。

參考文獻

- 王鵬智（2007）。*居室火災避難容許時間基準之驗證研究*。未出版之博士論文。國立臺灣科技大學建築研究所，台北市。
- 田中哮義（1993）。*建築物火災安全工學入門*。日本建築センター出版書籍。東京都：日本建築センター。
- 吳秉宸、蕭嘉俊（2007）。*簡易二層法於建築物防火避難之應用研究*。內政部建築研究所研究報告。新北市：內政部建築研究所。
- 何明錦、陳俊勳（2007）。*簡易二層驗證技術手冊之研究*。內政部建築研究所研究報告。新北市：內政部建築研究所。
- 姚致平譯（1998）。*工程或然率（二）：決策、風險與可靠度*（原作者：Ang, H. S. and Tang, H.）。台北市：科技圖書股份有限公司。（原著書名：Probability Concepts in Engineering Planning and Design, Volume II-Decision, Risk, and Reliability）
- 林元祥（2000）。*建築物火災危險度評估與實證調查研究*。中央警察大學出版社，17。
- 高學賢、沈子勝、簡賢文（2008）。*台灣性能式設計防火設計制度之探討*。*災害防救學報*，9(1)，121-150。
- 陳建忠、簡賢文（2009）。*建築物防火避難安全性能驗證技術手冊*。內政部建築研究所出版品，第一版第三刷。新北市：內政部建築研究所。
- 陳建忠、黃玉麟、顏聰、紀人豪、王天志、沈建宏（2003）。*建築物防火安全設計之風險管理及價值分析研究*。內政部建築研究所研究報告。新北市：內政部建築研究所。
- 雷明遠（2012）。*建築物火災風險評估通用指南及量化驗證研究*。內政部建築研究所自行研究報告。新北市：內政部建築研究所。
- Ang, H. S. and Tang, H. (1984), *Probability Concepts in Engineering Planning and*

- Design, Volume II-Decision, Risk, and Reliability*. NY, USA: John Wiley and Sons Press.
- Drysdale, D. (1998), An Introduction to Fire Dynamics, p. 146, John Wiley and Sons.
- Hadjisophocleous, G. V. (1998). Literature Review of Performance-based Fire Codes and Design Environment, *Journal of Fire Protection Engineering*, Vol. 9, No. 1 (pp. 12~40).
- Hasofer, A. M. (1997), A Stochastic Model for Compartment Fire. *Fire Safety Journal*, Vol. 28, No. 3 (pp. 207~225).
- Hasofer, A. M. and Qu, J., (2002), Response Surface Modelling of Monte Carlo Fire Data. *Fire Safety Journal*, Vol. 37, No. 8 (pp. 772~784). Elsevier Science Ltd., SDOS.
- Jin, T. (1978), Visibility through Fire Smoke. *Journal of Fire and Flammability*, 9, p. 135.
- Kong, P., Lu, S. X., Feng, L., Xie, Q. M. (2012), A Monte Carlo analysis of the effect of heat release rate uncertainty on available safe egress time. *Journal of Fire Protection Engineering*, vol.23 (1) (pp. 903-914).
- Milke, J. A. (2002), Smoke Management in Covered Malls and Atria. *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*, 3rd Edition (pp. 4-292~4-310). MA, USA: National Fire Protection Association Press.
- Milke, J. A. and Mowrer, F. W. (1993), *A Design Algorithm for Smoke Management Systems in Atria and Covered Malls*. Report FP93-04, University of Maryland, College Park, USA.
- Mulholland, G. W. (2002), Smoke Production and Properties. *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*, *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*, 3rd Edition (pp. 2-263~2-265). MA, USA: National Fire Protection Association Press.
- Nystedt, F. (2003), *Deaths in Residential Fires*. Report 1026, Department of Fire Safety Engineering Lund University, Sweden.
- NFPA (2002), Fuel Properties and Combustion Data. *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*, 3rd Edition (Appendix C, pp. A-34~A-42). MA, USA: National Fire Protection Association Press.
- Purser, D. A. (2002), Toxicity Assessment of Combustion Products. *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*, 3rd Edition (pp. 2-83~2-171). MA, USA: National

Fire Protection Association Press.

Purser, D. A. (2007), The Application of Exposure Concentration and Dose to Evaluation of the Effects of Irritants as Components of Fire Hazard. *Interflam Proceedings* (pp. 1033–1046), Royal Holloway College, University of London, UK, 3–5th September.

Purser, D. A. (2008), Assessment of Hazards to Occupants from Smoke, Toxic Gases and Heat. Section 2 Chapter 6. *The SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*, (P. J. DiNenno Ed.) 4th ed. (pp. 2-96–2-193), Quincy MA, USA, National Fire Protection Association.

Purser, D. A. (2015), Effects of Pre-Fire Age and Health Status on Vulnerability to Incapacitation and Death from Exposure to Carbon Monoxide and Smoke Irritants in Rosepark Fire Incident Victims, *Hartford Environmental Research, UK*, 6th international symposium-*Human Behaviour in Fire* (pp. 489~500), 28-30th September 2015, Downing College, Cambridge, UK.

Ramachandran, G. (2002), Stochastic Models of Fire Growth. *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*, 3rd Edition (pp. 3-381~3-401). MA, USA: National Fire Protection Association Press.

Ramachandran, G. and Charters, D. (2011), *Quantitative Risk Assessment in Fire Safety*, Spon Press, an Imprint of Taylor & Francis London and New York.

Rohr, K. D. (2005), *Products First Ignited in U. S. Home Fires*. MA, USA: National Fire Protection Association Press.

Schifiliti, R. P., Meacham, B. J. and Custer, R. L. P. (2002), Design of Detection Systems. *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*, 3rd Edition (pp. 4-8~4-9). MA, USA: National Fire Protection Association Press.

Tewarson, A. (2002), Generation of Heat and Chemical Compounds in Fires. *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*, 3rd Edition (pp. 3-82~3-161). MA, USA: National Fire Protection Association Press.

Williams, J. (2003), *Life Safety Risk Assessment for Firecells with a Single Means of Escape*. Fire Engineering Research Report 03/3, University of Canterbury, New Zealand.

Yamada, T. et al. (2002), An Experimental Study of Ejected Flames and Combustion Efficiency, *Proceedings of the 7th International Symposium* (pp. 903-914). International Association for Fire Safety Science Press.