

# 軌道運輸系統智慧化之安全分析方法研究

## 摘要

近年來國外許多先進國家積極將智慧型運輸系統 ( Intelligent Transportation System, ITS ) 應用於軌道運輸方面, 即為軌道運輸系統智慧化(Intelligent Railway System, IRS), 藉以使其實現自動化與智慧化的理想, 並進一步提升安全、效率、服務品質與環保的目標以滿足社會大眾對軌道運輸未來的需求。本研究經由相關之文獻收集與探討, 認為一般軌道運輸安全分析方法並不適用, 因此選取故障樹分析結合馬可夫分析以因應軌道運輸系統智慧化所衍生的安全問題。

不論國內外, 不難發現平交道是軌道運輸中安全的盲點, 國內每年發生近百起的平交道事故, 因此將 IRS 應用於鐵路平交道, 以提升安全性、降低肇事率, 刻不容緩。交通部近年來進行智慧型平交道安全監測系統的設計與相關實測的工作, 因此在實例研究方面, 本研究便將此一結合型方法實際應用於該平交道系統之安全評價工作, 以驗證軌道運輸系統智慧化對於軌道運輸安全之貢獻程度。

結果發現為智慧型平交道安全監測系統之事故機率確實高於現有平交道, 尤其在 2.35 千小時之前, 兩者之事故率越來越大, 證明智慧型平交道安全監測系統設計良好, 壽期較現有平交道為長; 並發現在智慧型平交道安全監測系統中, 以通訊相關裝置之失效率對於整體安全性影響最大, 而以影像擷取問題較易發生。

## 一. 動機與目的

軌道運輸系統智慧化利用先進的管理決策、通訊、自動控制的技術, 透過對於資訊的收集、處理、傳輸與高度共享, 使得軌道運輸系統不論行車保全、列車控制、乘客資訊系統、票證系統、列車行車監控上都有革新與升級。發展 IRS 的目的, 在於提升軌道運輸的安全、效率、環保與服務品質, 以保持軌道運輸事業與其他運具之競爭性。由於列車本身重量重、所需煞車距長的特性, 相較於公路運輸而言, 軌道運輸更注重安全性, 定位準確性與可靠性, 因此提升安全性、降低肇事可能性, 可說是 IRS 最為重要的目標。各先進國家為提昇軌道安全標準而投入巨資, 目的即是要降低軌道運輸過程中危險發生的機率。畢竟災難事後的彌補與善後, 所耗費的成本往往大於事前的防範。因此越來越多的國家將焦點放在智慧化的技術上, 希望透過更先進的技術實現資訊整合與共享的工作, 以進一步提升軌道運輸安全水準。

IRS 為一個整合性的系統環境, 將衍生出與傳統軌道運輸系統不同的環境, 傳統之分析方式僅提供一般化的準則, 而未能對系統的複雜性、結構性、多點故障、時間相依之行為、標準規範、可靠度等準則而提供安全評價的高低。然而 IRS 為一個包含極廣的軟硬體系統工程建設, 不可能對其作出全面性的安全評價, 然而由事故的歷史資料可知不論國內外之軌道運輸系統中, 平交道經常是最主要的安全事故發生處所, 適逢交通部正進行 IRS 之軌道運輸系統智慧型即時安全檢測與通

報技術之研發與示範計畫，智慧型平交道安全監測系統為重要發展項目之一，因此本研究便將適用於 IRS 之安全分析方法，用於該平交道系統之安全性評價，期能了解 IRS 之相關技術對於鐵路平交道之安全性提升的貢獻程度。

本研究之目的如下：

- 1.廣泛收集與探討 IRS 之相關文獻，以瞭解其特性對於軌道安全之影響。
- 2.針對 IRS 之特性修改傳統安全分析方式，以符合實際狀況。
- 3.將安全分析方法實際應用於智慧型平交道安全監測系統，以驗證其安全性。

## 二.軌道運輸系統智慧化之安全分析方法

軌道運輸系統智慧化以資訊化為基礎，進行資訊收集、處理與共享的動作，使軌道運輸系統更安全、更有效率，其中仰賴大量的新技術與設備進行運作，例如無線通訊技術、運轉監控與診斷系統、先進資訊提供媒介、GPS 衛星定位儀、陀螺儀、歐洲應答器、軌旁電子單元、歐洲環線與無線注入單元等。

IRS 之運作既然建立在許多硬體設備的組成基礎上，在安全的考量上，便不可忽略硬體設備因長時間使用而漸漸質變、故障的問題，因此對於 IRS 平常的安全評價工作上，必須考量其安全性隨時間下降的問題，而軌道安全分析與評價的方式，可以大略分為三類：統計分析方式、指標分析方式、可靠性結構或事故模型。

### 1.統計分析方式

一般是收集歷史中事故的資料，接著進行彙整與統計的工作，例如進行各事故類型發生次數的統計、各種肇事因素的迴歸分析、因子分析、主成分分析等，透過資料的判讀，找出影響事故的主要關鍵因素。

### 2.指標分析方式

利用一系列指標描述系統所處狀態，而選取能夠代表該系統安全性的指標或權重作為評價的依據為其中的關鍵，指標性模型之準確度取決於指標對於系統安全結構的代表性、覆蓋程度與相互間的獨立性。常見的例如每車輛公里、乘客公里或乘客旅次的死傷人數、財產損失多寡等，透過指標可以很容易的與其他國家的軌道系統，甚至其他種類的運具進行比較，近年來部分研究引進個人風險指標與社會風險指標的概念，簡單來說，前者係針對某一個人、某一職業或某特定人物在一段時間內使用某一軌道系統的死亡機率，而後者則探討對於大型事故發生對於社會經濟、民眾心理的衝擊程度。

### 3.可靠性結構或事故模型

係利用系統結構組成與邏輯關係形式的建立來描述事故發生與原因的因果邏輯關係，並進行量化工作，因此與系統間能有較良好的對應關係，模型中的因素結構關係，就是客觀系統的數學抽象形式，較能反映真實的安全水平，但一般而言較為煩雜，常見的方式例如故障樹分析、事件樹分析、故障模式與臨界效

果分析法、可靠度理論等。

基本上，系統安全狀態之水準高低，取決於系統內之安全結構形式與組成因素的狀態，而安全結構形式為系統所處的環境、危險因子與安全保障體系所組成的複雜情境，而安全評價模型就是對安全結構作出量化的形式。亦即利用科學方法，對系統進行預估，評析其生命週期、故障的可能性與潛在的危險，通常是以機率作為衡量基礎，以制定系統的可維護標準。須知系統為各單項設備之組合，而組合的協調性將左右系統運轉的整體效能與安全性，僅設備個體之規格功能符合需求，並不能保證整體系統能有效運轉，因此若能探究本系統內各子系統、子系統內各單元組件的架構與協調性則能對系統之預期目標與潛在危險能事前預知並加以控制。但因軌道運輸系統組成過於複雜，欲針對整體系統作出完整的安全評價並不容易，因此一般常分別針對系統中某一範圍內之軌道系統存在某一階段中存在的安全問題進行分析。

IRS 屬於一個大系統層級，係由許多小單元所構成，透過資訊收集、處理與共享，使各單元能整合起來為一整體系統，亦即 IRS 中人、機、環境的組成，係各自代表系統中各個構成單元與構成事件，而彼此之間的組成關係結構，由系統運作方式、資訊處理共享方式與事故發生成因的邏輯推演而構成，即上述所謂的安全結構形式，而系統整體之安全評價，需透過這種安全結構關係與組成單元的安全性分析所組合而成。如圖 1，系統中如子系統、組件、零件等各成層級，有其各自組成的事件與單元與結構關係，因此一個系統可以以此種方式往下展開至細部層面，亦可以由細部層面往上組成為整體系統。

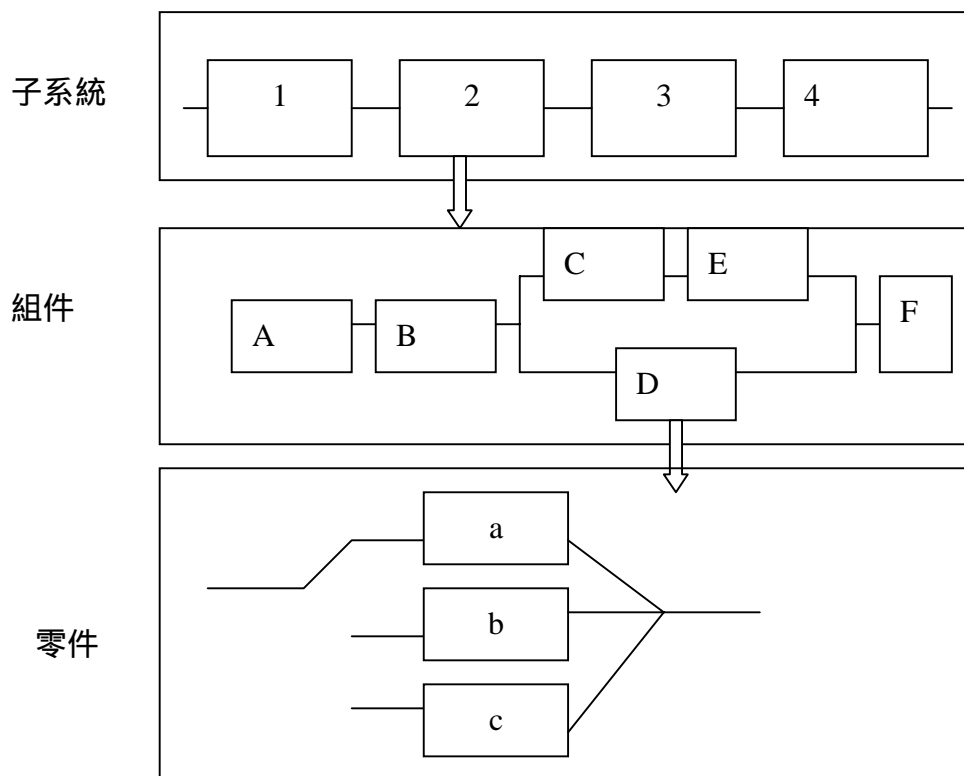


圖 1 安全結構形式示意圖

因此在進行 IRS 之系統安全分析時，應將整個系統一步步的細分為主系統、子系統、組件、零件等，亦即評估整個系統的安全評價，是由系統中細部的組成要素自身的安全程度與構成方式的關係慢慢累積而成。為能較良好反映 IRS 之系統構成的特性，本研究認為應採用可靠性結構模式與事故成因分析的方式，然而由軌道運輸安全文獻的回顧可以發現，在可靠性結構或事故分析方面，大都採用單一方法分析，例如單用 FTA、FEMA 等，然而時間必然是影響 IRS 安全性的重要因素，其許多安全事件均具有依時行為(Time-Behavior)的特性，因此傳統之可靠性結構或事故分析屬於靜態之分析，只能反映某一時間點之系統安全狀態，因此本研究希望能將故障樹配合動態的分析方式，而馬可夫分析因為包含了時間的因子，能充分掌握時間或序列之相依狀況，可說是少數動態的安全分析，又能掌握系統安全結構形式的方式，由於 FTA 與 Markov 兩種方式優缺點可互相彌補

表 1 FMEA、FTA 與 Markov Analysis 比較表

	FMEA	FTA	Markov Analysis
性質	定性分析	定性與定量	定量分析
方式	歸納	邏輯演繹	可靠性結構
形式	表格形式	樹狀結構	狀態轉換
使用時機	設計階段	皆可	分析階段
失效狀況	單點失效	多點失效	多點失效
其他	不考慮人為失誤	考慮人為失誤	考慮人為失誤
	- - -	無法考慮修復性	能考慮修復性
	- - -	單一時間點	時間連續
	- - -	能看出故障原因	看不出故障原因

馬可夫分析涉及時間與狀態變化兩因子，可藉由分析求得某一時間點下的系統可靠度，意即可靠度與時間之關係，這是其他分析方法所無法達成。其特性為

- 1.反映 IRS 中安全事件的依時行為(Time-dependent Behavior)。
- 2.微小故障離大災難爆發時間很短，在任何時間點與狀態之下，能推斷下一步的狀態與機率。

IRS 使得軌道運輸往精密化、自動化、系統化發展，其結構日趨複雜，各系統間關聯也更為密切，微小處的故障將會爆發連鎖反應而造成無可彌補的損失，就算在危險發生時緊急的疏散，並在事後找出肇因所在，仍然屬於消極的做法，因此當發現輕微的異常狀態，須對此作出適當的判斷與處置，而馬可夫分析可貢獻於此，其不但能表現出系統構成的可靠度關係形式，也能分析下一步或任何時間點可能造成之意外災害的動態演變機率，如此能使相關單位決定關鍵的處置措施。例如系統有 1 到 10 共十個元件組成，當 1、2、3 這三個元件同時失效時，會發生火災，而火災又會造成 4、5 兩個元件失效而使人員傷亡，此時若元件 1

失效，則可以將 2、3 兩元件之失效動態演變機率的時間關係圖畫出，以決定是否需要立刻停止營運並發出警告，或者在營運的同時立刻進行維修。因此本研究認為，利用傳統 FTA 結合馬可夫分析的方式，能良好的反映出 IRS 的安全結構與其安全性隨時間而變化的關係，還能對系統之安全關鍵進行探討，對於系統的安全設計上，能提供一定的幫助。故障樹之建構步驟為：

- 1.明瞭系統特性
- 2.設定頂層事件
- 3.利用事件發生關係邏輯建構故障樹
- 4.蒐集相關事件機率
- 5.計算頂端事件機率

而其中基本事件發生機率，本研究將採用馬可夫分析法計算得之，作為頂層事件計算之基礎。本研究安全評價流程如圖 2。

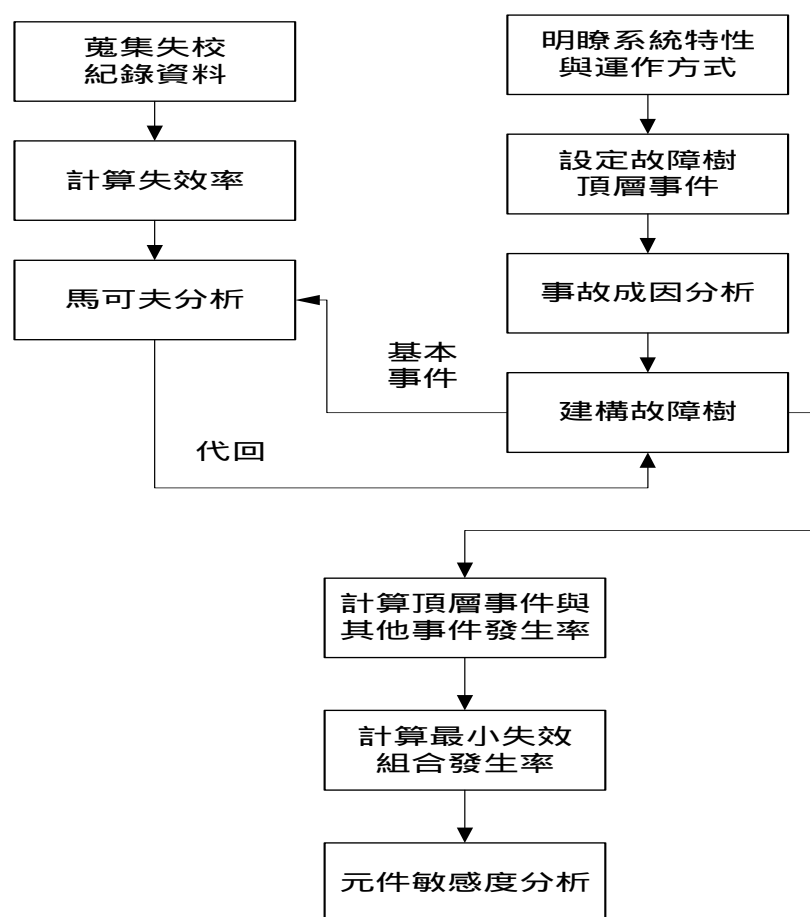


圖 2 安全評價流程

因為 IRS 包含層面廣泛，無法對其進行全面性的安全評價，然而由國內外軌道運輸之事故紀錄，不難發現平交道係為鐵路系統安全上的弱點，適逢交通部正進行智慧型平交道安全監測系統的研究與測試，希望藉此升級並改善我國平交道安全，因此本研究將上述之安全分析方式應用於該平交道系統，實際進行安全評

價，並分析該系統之安全關鍵，以作為相關主管機關改善該系統之參考。

### 三.實例分析

智慧型平交道安全監測系統以 GPS 作為監控中心列車定位的方式，由監控中心遠端遙控柵欄的起降，而平交道以監視攝影機偵測障礙物，影像資訊以中繼式無線電傳輸至監控中心，若判定有障礙物出現，再由監控中心通知駕駛員進行制動。此系統改善現有平交道防護方式的缺點，期能發揮無通報時間延誤、具有確認機制、自動運作等功能，但此系統為一種新概念系統，為國內第一套影像傳輸警示系統，其硬體架構如圖 3 所示，由上到下概分為四種層級：系統、子系統、組件、零件。

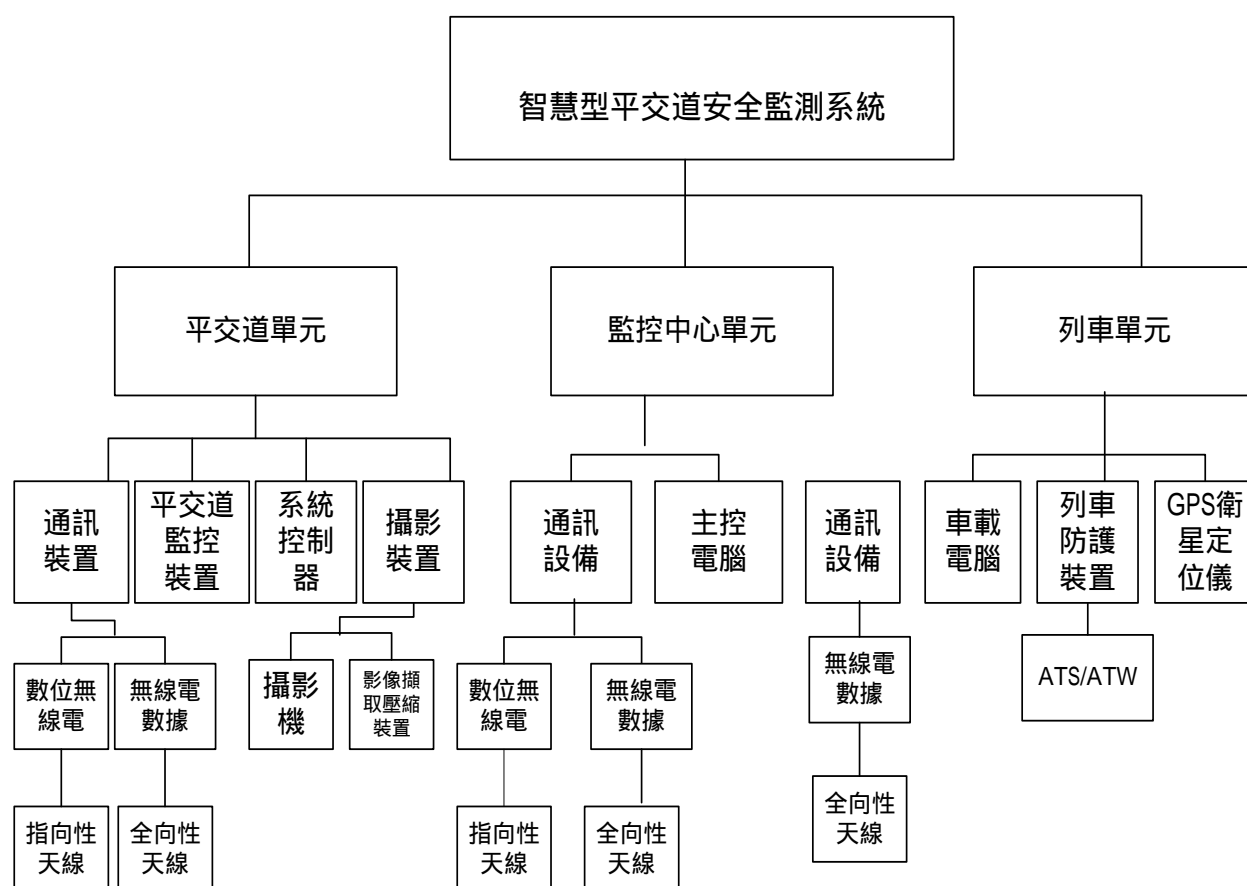


圖 3 智慧型平交道硬體架構圖

智慧型平交道安全監測系統之運作流程如下：

#### 1. 監控中心掌握列車動態

列車透過全球衛星定位系統將定位訊號傳送至監控中心，經過主控電腦處理後，配合監控中心之地理資訊系統之圖形資料加以比對，在面板上顯示監控範圍內之所有列車動態位置，主控電腦並計算出列車目前速度。

#### 2. 確認即將到達平交道之列車

如上，監控中心主控電腦透過列車 GPS 定位訊號與電子地圖比對之後，找

出即將抵達平交道之列車，計算出其與平交道之相對距離，此時根據各列車之速度，計算一適當的距離，並透過無線電數據發送器發出控制指令至該編號之平交道的系統控制器，以控制柵欄放下。原則上來說，平交道之柵欄由放下至列車完全通過之後升起，大約會維持遮斷狀態 25 秒左右，而其中警報器會先發出警告，接著才放下遮斷杆，因此根據該列車現在速度與相對於平交道的距離來計算完全通過時所需的秒數，當秒數小於 25 秒時，監控中心就會發出控制指令使柵欄降下遮斷人車的通行。一般而言，列車若將以時速 120~130 公里（如自強號）通過平交道時，可考慮在距平交道 1200~1500 公尺前即令柵欄放下；反之，列車之通過時速僅有 60 公里（如貨物列車），則可考慮在相距約 800 公尺左右令柵欄放下。

### 3. 平交道監控

平交道在接獲控制指令的同時：

- (1) 平交道監控裝置即開始運作以確認柵欄機械裝置、警報器等是否正常動作，若發現異常（例如柵欄無法放下），則立刻發出警告訊息給監控中心，由監控中心發送緊急制動的命令給列車。
- (2) 攝影裝置開始拍攝平交道影像，將類比式的影像經過數位化處理之後，壓縮成 JPEG 格式的圖檔，接著進行資料分割的動作，將影像資料分割成數個封包分別透過數位無線電傳送至監控中心，經過檢查碼確認的機制，以確保所傳資料無誤，若檢查碼有誤。則僅需重新傳送此一封包即可。

### 4. 障礙物判讀

監控中心主控電腦接收所傳回之影像，根據目前之時段、氣候等，由資料庫中篩選出適合的影像加以比對，以判斷有無障礙物出現在平交道。當影像變動值小於一門檻值時，則判定無障礙物，經監控中心人員確認無誤後，待列車完全通過平交道時，監控中心再對平交道發出柵欄升起的指示使柵欄升起；反之若影像之變動值超過一門檻值，則判定有障礙物闖入，立刻發出制動的指令給該列車，以避免發生危險，若經監控中心人員或列車司機確認實際上並無障礙物，則發出指令讓列車緩解制動。

圖 4 為智慧型平交道安全監測系統運作流程圖。



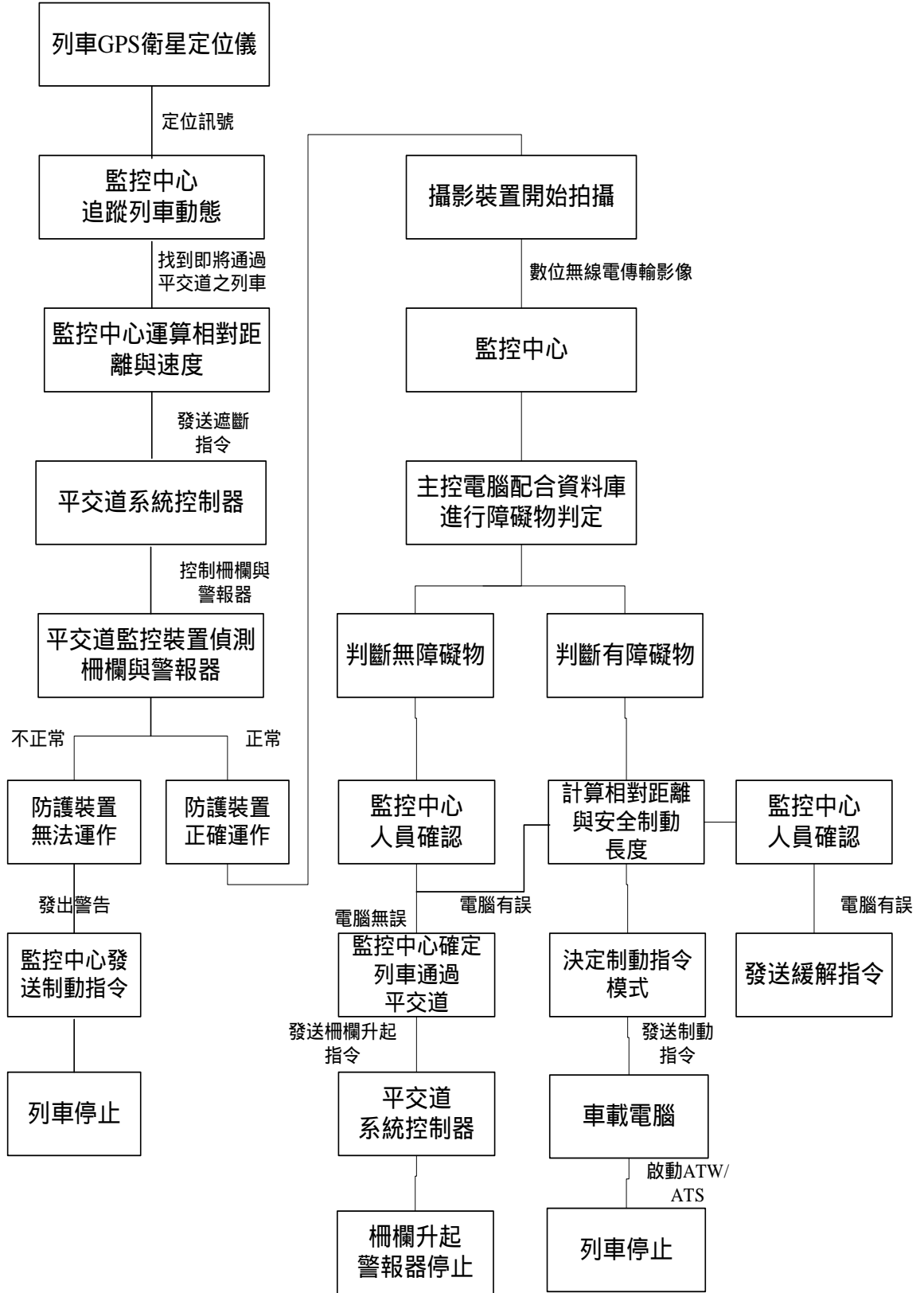


圖 4 智慧型平交道安全監測系統運作流程

平交道最重要的功能就是使公路之人車與鐵路之列車均能安全的通過。事實上，平交道的種種事故中，發生機率最高且結果最嚴重者，即為列車與公路用路人相撞，而智慧型平交道安全監測系統的目的就再於降低列車與公路用路人相撞，至於發生在平交道上的火災、竊盜、出軌等事故，因風險性較低，亦非智慧型平交道安全監測系統所要預防的事故，因此本研究選取「平交道與公路交通衝突」事件，作為 FTA 之頂層事件，如圖 5。

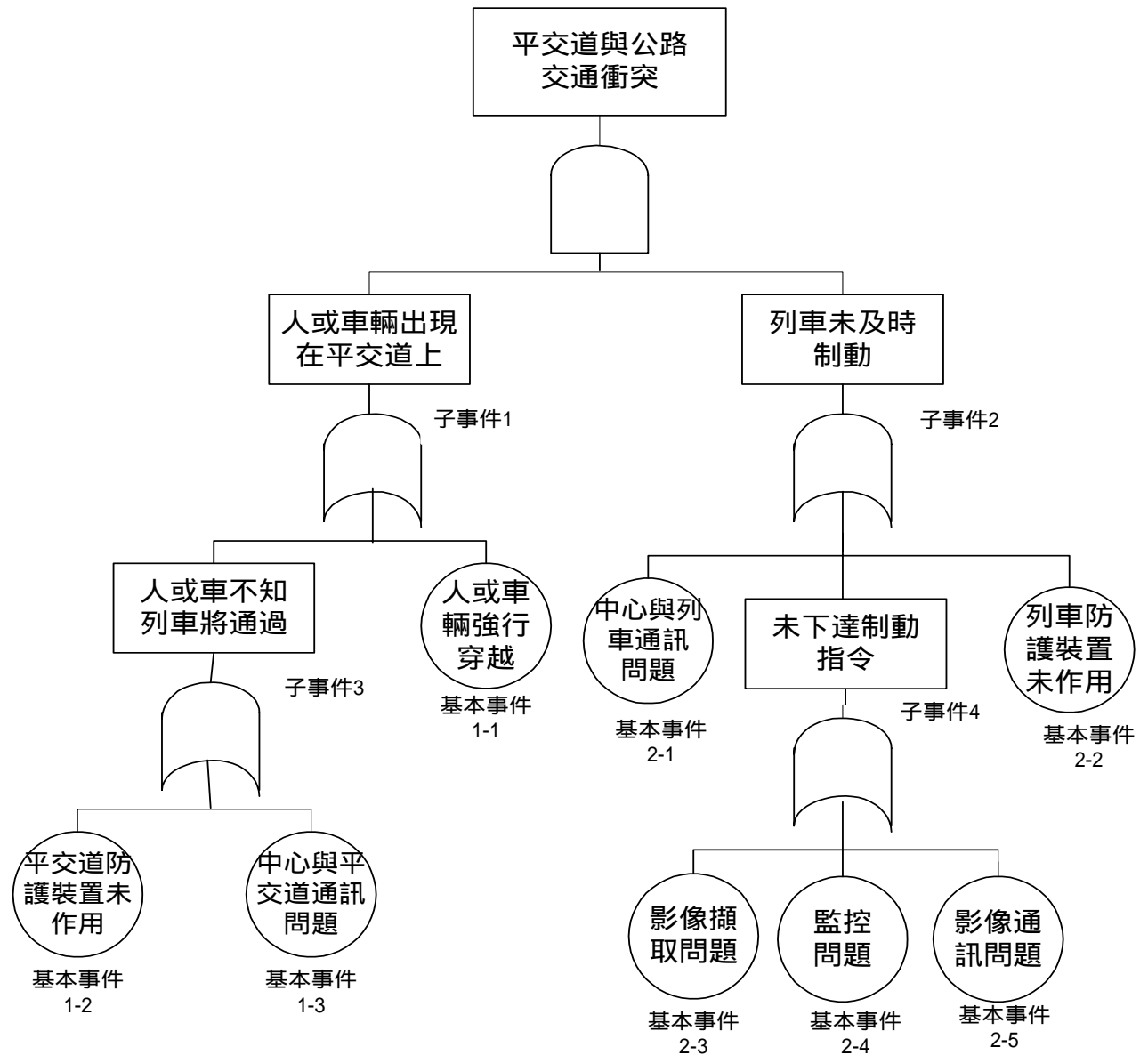


圖 5 智慧型平交道安全監測系統故障樹

為與比較現有平交道之安全性作比較，本研究亦用同用方式分析現有平交道系統，其設有自動遮斷器與自動警報器，並設有看守工日夜看守，當有列車要通過平交道時，若發現有人車闖越，看守工會使用列車防護無線電系統傳遞無線電波給該列車，列車收到後，駕駛室內的車內警示裝置會響，這時駕駛員便要自行停止列車以免撞到平交道上的人車。現有平交道之 FTA 如圖 6

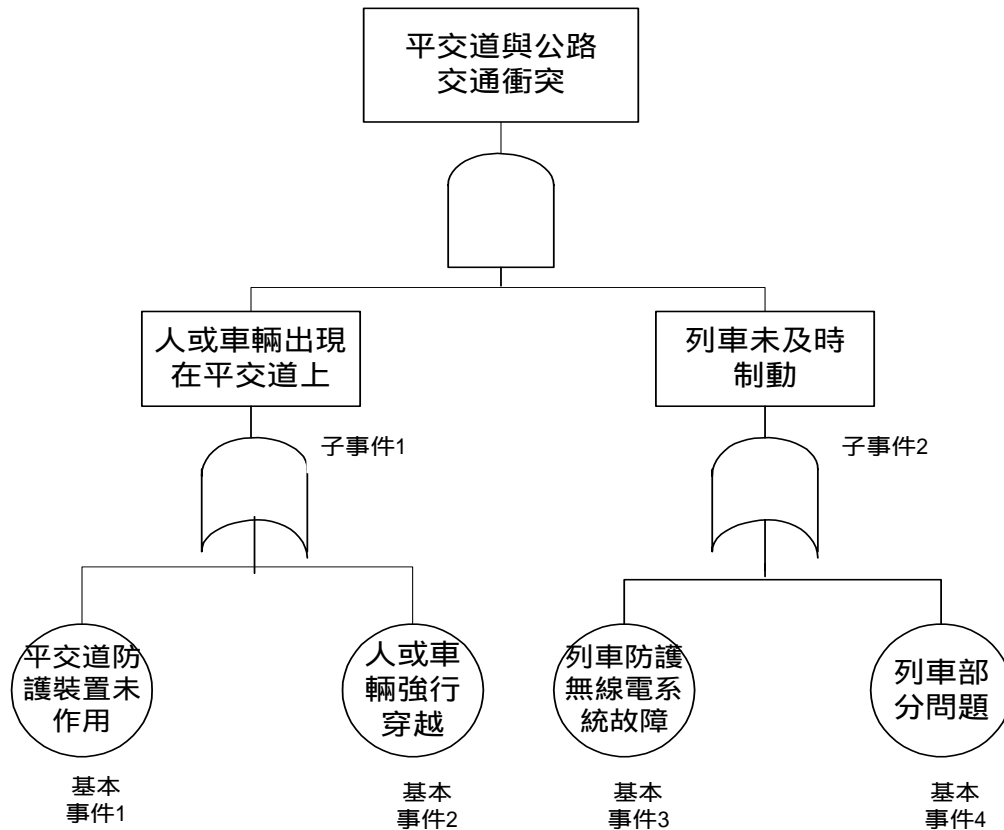


圖 6 現有平交道 FTA

智慧型平交道 FTA 中之基本事件 1-1、1-2、1-3、2-1、2-2、2-3、2-4、2-5 與現有平交道基本事件 1、2、3、4 運用馬可夫分析求算其事件發生率之一般解。其步驟為

Step.1 定出目標對象之可靠性關係方塊圖 (RBD)：

為進行可靠性分析時的基礎工作，分為串聯 (Series) 與並聯兩種形式。系統之構成方式若能以串聯形式表示時。需要所有元件均正常，系統方可運轉，為可靠度最低的形式，但建置成本較低。並聯形式必須所有的元件均故障，系統才會失效，所有元件同時負擔系統運行的工作，但當有元件損壞，剩下之元件必須能負擔系統運作，則當所有元件損壞，系統才會停擺，為可靠度最高的形式，但通常成本較高，需做好成本效益評估。

Step.2 列出目標對象所有可能發生的狀態：

列出系統所有可能的狀態(為離散狀態)，這些狀態分別代表上一步驟中不同的元件失效時的情形，這些失效的元件根據上一步之系統關係圖形，可以判斷對於系統(或該事件)的影響則有失效或正常(發生或不發生)兩種情形。

Step.3 畫出馬可夫各狀態間之轉換圖：

此處必須確定各狀態之間轉移的關係，並以箭號代表轉移方向。

Step.4 求可靠度：

求取各狀態間轉換機率，並代入馬可夫模式計算各狀態發生機率。並根據 RBD 結構，區分出分析目標所有狀態為正常與失效兩種情形，以基本事件發生率。

本研究以失效率 ( Failure Rate ) 作為馬可夫各狀態間之移轉機率，亦即某元件在兩狀態中分別為失效前與失效後，中間以該元件失效率作為兩狀態間轉移的機率。為了計算各組成元件失效率，在資料收集方面，可分為兩大部分，一為國內平交道八十五年至九十二年之事故記錄資料，內容包含事件數、原因、性質與死傷情形，此部分由台灣鐵路局提供。二為列車、平交道、監控中心等相關設備之失效紀錄，該設備若為台鐵既有之設施，如：遮斷桿、列車防護裝置等，則由台鐵之各電務段處提供平交道檢查保養記錄卡，共收集了平交道相關設備近八年之記錄資料，其各設備檢修為固定每月 1 至 2 次，將檢查結果紀錄於卡上，再加上臨時發現故障而維修的紀錄並配合詳細之事故原因紀錄( 以了解該事故之發生原因為那種設備損壞與發生的時間點，若發生原因並非設備損壞造成，便將其原因歸屬到其他事件之失效率中 )，上述資料經整理之後，按照裝置之種類區分完畢後，分別計算各份資料中該裝置之失效率，再求其平均失效率，若該裝置並非台鐵既有之設備，如：衛星定位儀，則由相關製造廠商之品管部門處收集維修紀錄，處理之方式同上，在取得其失效時點之後，便可獲取組成元件之個別單一一個元件的失效率，而紀錄之精確度到達“天”。

兩種平交道系統所求算出之 FTA 各事件發生機率如下表

表 智慧型平交道安全監測系統各子事件發生率

t(千小時)	子事件 3 發生率	子事件 1 發生率	子事件 4 發生率	子事件 2 發生率	頂層事件發生率	平交道安全機率
0	0	0	0	0	0	1
0.2	0.019174308	0.066396896	0.03221516	0.046651183	0.003097494	0.996902506
0.4	0.038604063	0.130819265	0.064439398	0.093476499	0.012228527	0.987771473
0.6	0.058269418	0.193352567	0.096659052	0.140448261	0.027156032	0.972843968
0.8	0.078151443	0.254078203	0.128860819	0.187539727	0.047649757	0.952350243
1	0.098232075	0.313073706	0.161031764	0.234725086	0.073486253	0.926513747

1.2	0.118494084	0.370412924	0.193159326	0.281979444	0.10444883	0.89555117
1.4	0.138921026	0.426166194	0.225231321	0.329278808	0.140327496	0.859672504
1.6	0.159497214	0.480400509	0.257235946	0.376600071	0.180918866	0.819081134
1.8	0.180207677	0.533179676	0.289161779	0.423920995	0.226026059	0.773973941
2	0.201038132	0.584564467	0.320997786	0.471220194	0.275458582	0.724541418
2.2	0.221974946	0.634612763	0.352733313	0.518477121	0.329032198	0.670967802
2.4	0.243005114	0.683379693	0.38435809	0.565672042	0.386568786	0.613431214
2.6	0.264116223	0.730917762	0.415862231	0.612786029	0.447896193	0.552103807
2.8	0.285296431	0.777276981	0.447236226	0.659800934	0.512848078	0.487151922
3	0.306534439	0.822504982	0.478470943	0.706699375	0.581263756	0.418736244

表 5-44 現有平交道各子事件發生率

t(千小時)	子事件 1 發生率	子事件 2 發生率	頂層事件發生率	現有平交道安全機率
0	0	0	0	1
0.2	0.055254762	0.100343304	0.005544445	0.994455555
0.4	0.108659144	0.193802022	0.021058362	0.978941638
0.6	0.160297223	0.280907219	0.045028647	0.954971353
0.8	0.210249033	0.362147635	0.07614119	0.92385881
1	0.258590752	0.437973081	0.113255788	0.886744212
	0.305394893	0.508797569	0.155384179	0.844615821

1.4	0.350730469	0.575002192	0.201670788	0.798329212
1.6	0.394663165	0.636937762	0.251375873	0.748624127
1.8	0.437255495	0.694927246	0.303860757	0.696139243
2	0.478566952	0.749268	0.358574903	0.641425097
2.2	0.518654152	0.800233825	0.415044596	0.584955404
2.4	0.557570974	0.848076857	0.472863039	0.527136961
2.6	0.595368687	0.893029304	0.531681684	0.468318316
2.8	0.632096078	0.935305047	0.591202652	0.408797348
3	0.66779957	0.975101106	0.651172099	0.348827901

兩者安全機率圖形如圖 7

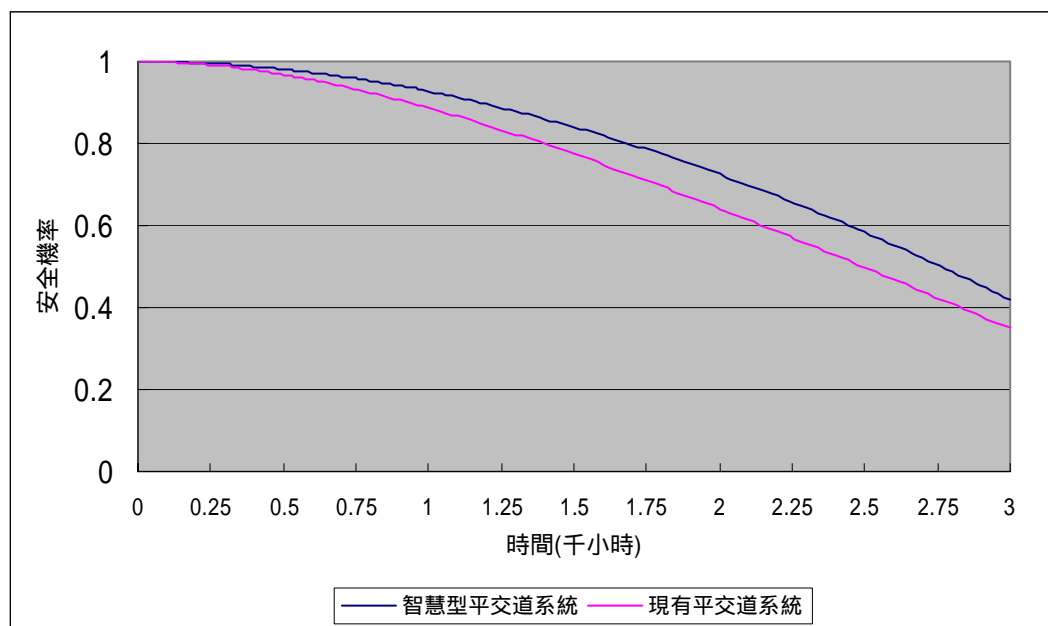


圖 7 智慧型平交道安全監測系統與現有平交道安全機率

智慧型平交道安全監測系統與現有平交道的安全機率對時間的圖形如下，可知智慧型平交道安全監測系統之安全性在任何時點之下，確實高於現有平交道。

圖 8 為兩種平交道安全機率差對照時間的圖形，可知智慧型平交道安全監測系統之安全性在一開始時與現有平交道差距不大，但在 2.3479 千小時之前，智

慧型平交道安全監測系統之安全機率下降的較為緩慢，因此兩者安全性差距越來越大，在 2.3479 千小時兩者安全機率差達到最大的 8.77631%，2.3479 千小時之後，智慧型平交道安全監測系統安全機率下降漸漸較現有平交道為快，因此安全性差距略為縮小。若以國外相關對於平交道安全性之規定，約要維持平交道整體安全機率至少 80% 以上，現有平交道在 1.38665 千小時之後安全機率下降到八成以下（意謂在 1.38665 千小時之內都不做任何檢修的工作），而智慧型平交道安全監測系統可以維持 80% 的安全機率到 1.68201 千小時。

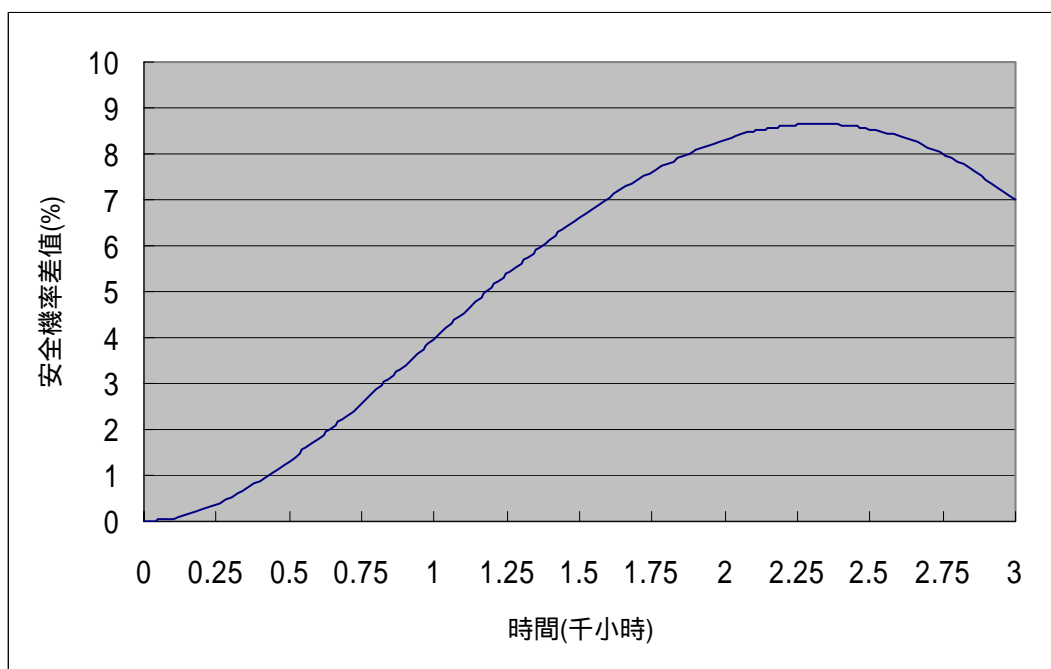


圖 8 智慧型平交道安全監測系統與現有平交道安全機率差值

基本事件以人車闖越平交道最易發生，但因公路人車違規闖越平交道係屬於平交道安全之外部事件，為公路交通單方面之錯誤，而在此事件外之其他基本事件發生率對時間的圖形如圖 9：

其中以基本事件 2-3 影像擷取問題較易發生，而基本事件 2-2 列車防護裝置未作用發生率較低。

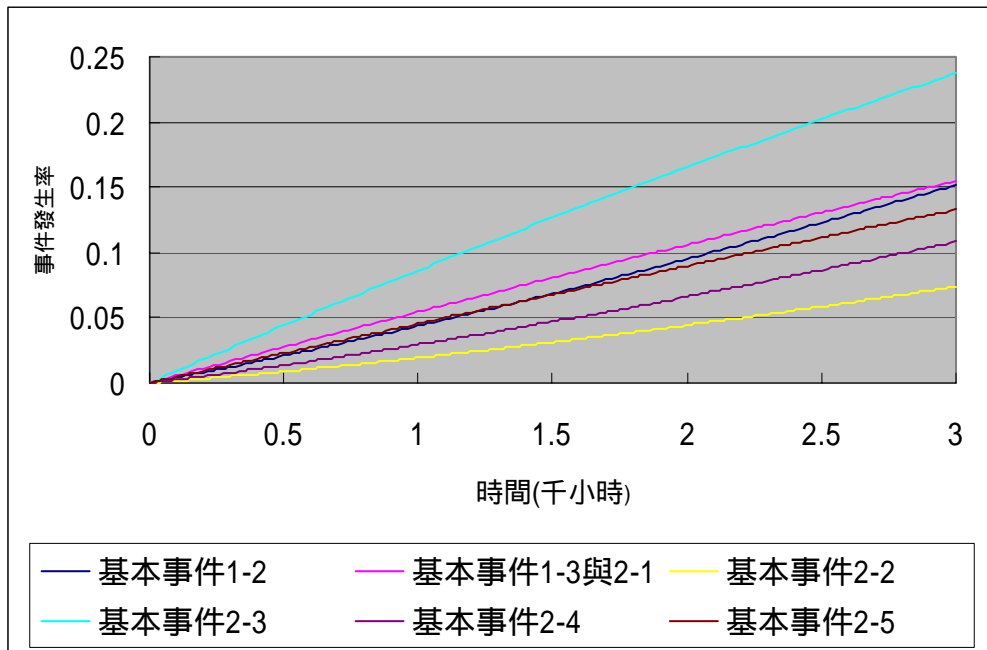


圖 9 基本事件發生率圖

發生頂層事件之最小失效組合（Minimum Cuts）共有 15 組，如下：

- (1)在人或車輛強行穿越平交道的情形下，同時發生監控中心與列車通訊之問題。
- (2)在人或車輛強行穿越平交道的情形下，同時發生列車防護裝置未作用之問題。
- (3)在人或車輛強行穿越平交道的情形下，同時發生影像擷取問題。
- (4)在人或車輛強行穿越平交道的情形下，同時發生監控方面問題。
- (5)在人或車輛強行穿越平交道的情形下，同時發生影像通訊問題。
- (6)在平交道防護裝置未作用的情形下，同時發生監控中心與列車通訊之問題
- (7)在平交道防護裝置未作用的情形下，同時發生列車防護裝置未作用之問題
- (8)在平交道防護裝置未作用的情形下，同時發生影像擷取問題。
- (9)在平交道防護裝置未作用的情形下，同時發生監控方面問題。
- (10)在平交道防護裝置未作用的情形下，同時發生影像通訊問題。
- (11)在監控中心與平交道間之通訊發生問題的情形下，同時發生監控中心與列車通訊之問題。
- (12)在監控中心與平交道間之通訊發生問題的情形下，同時發生列車防護裝置未作用之問題。
- (13)在監控中心與平交道間之通訊發生問題的情形下，同時發生影像擷取問題。



(14)在監控中心與平交道間之通訊發生問題的情形下，同時發生監控方面問題。

(15)在監控中心與平交道間之通訊發生問題的情形下，同時發生影像通訊問題。

各最小失效組合發生率對時間的關係圖如圖 10，可以發現 minimum cut (3) 之發生率明顯高於其他組合，且隨著時間差距越大。minimum cut (1)至 minimum cut (5)均為包含人車闖越平交道事件的組合，而其發生率均高於其他種組合（其中 min cut (13)之發生率十分接近 min cut (2)，亦屬較高之發生率），呼應了國內平交道事故之主因為人車違規闖越的事實。

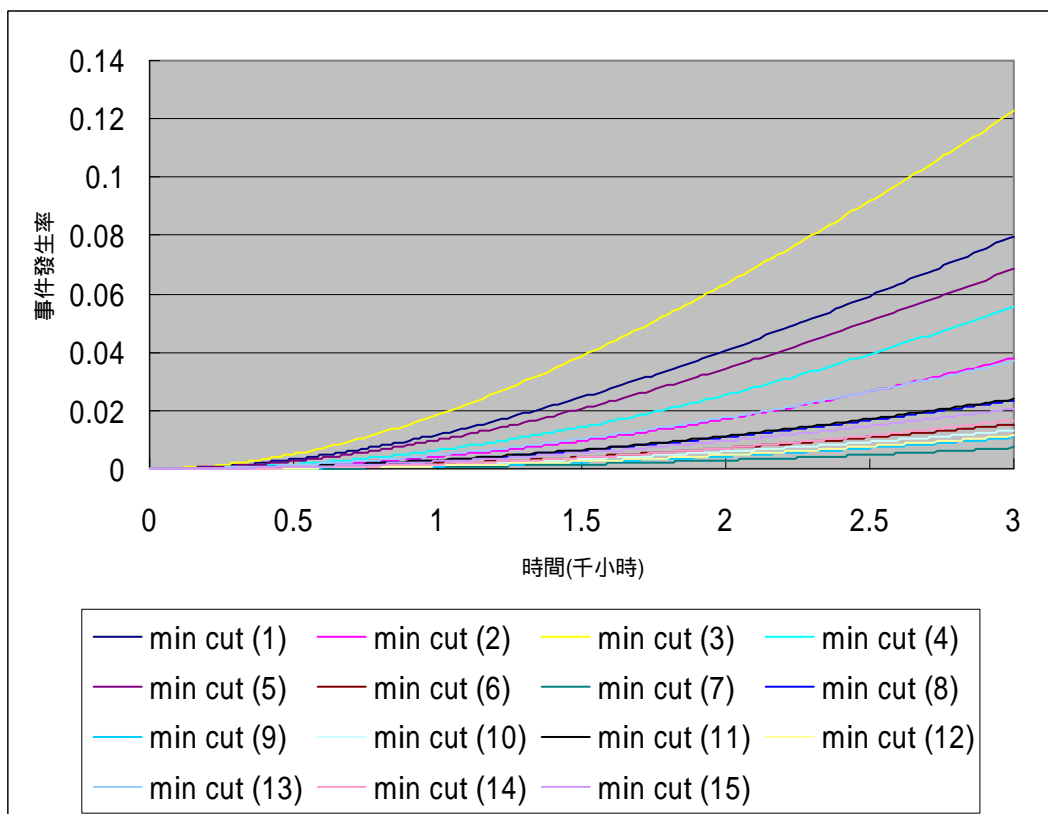


圖 10 最小失效組合發生率圖

為確認智慧型平交道安全監測系統之各組成元件中對平交道整體安全較為關鍵的元件，此處分別將各元件之失效率提高 0.05 次（千小時），以觀察其對安全機率之影響程度。此處利用  $\int (R(t) - R'(t))dt$  以衡量元件敏感程度，其中  $R(t)$  為系統原安全機率， $R'(t)$  為提高某一元件之失效率之後之安全機率。

結果發現各元件之失效率若提高，系統安全機率一開始並至於下降很多，但隨著時間越長之後，將會與原安全機率越差越多，其中以無線電數據通訊裝置失效率提高對安全機率影響最大，其次分別為數位無線電通訊裝置、車載電腦與 GPS 衛星定位儀。無線電數據通訊裝置影響程度約為數位無線電通訊裝置之 2.6

倍，約為車載電腦之 3.8 倍，約為 GPS 衛星定位儀之 3.9 倍。

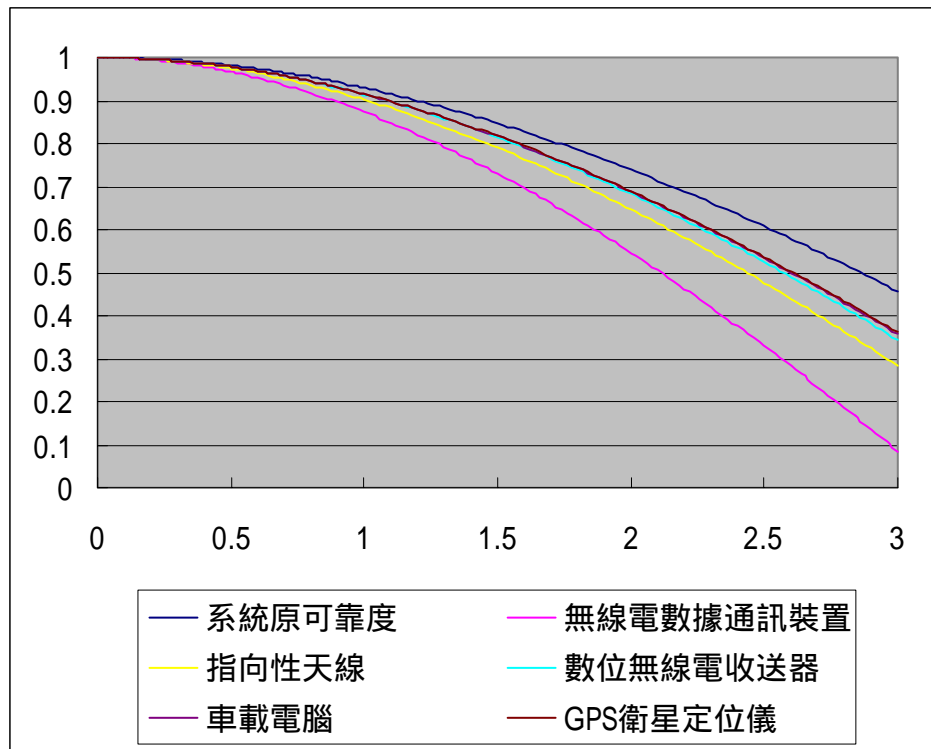


圖 11 元件失效率提高對於安全機率之影響圖

#### 四. 結論

1. 透過對軌道運輸智慧化特性之研究，本研究認為利用故障樹分析結合馬可夫分析的方式將可改善傳統安全分析方式的缺點，以反映出 IRS 之事故因果關係與系統安全結構，亦可反映出系統安全性依時關係，較符合實際 IRS 的情形。
2. 本研究提出之系統安全評價方法在實務上的操作流程，各事件與最小失效組合發生率之計算結果，除可用於比較智慧型平交道安全監測系統與現有平交道之優劣外，亦可為日常檢修保養工作尋覓檢修重點。再者，對於各元件之敏感度分析則可用於確認在設計階段時需以較高品質標準要求的元件。實務上在相關系統建置時，常受限於成本以及日常檢修之人力與時間不足等問題，本研究之安全評價方式將可協助相關軌道營運單位簡易、迅速的量化系統安全狀態以及找出其影響關鍵之處。
3. 對於智慧型平交道安全監測系統的實際安全評價結果如下：
  - (1) 智慧型平交道安全監測系統與現有平交道比較，前者安全性確實高於後者。
    - a. 現有平交道在約 1.39 千小時之後安全機率則降至 80% 以下，而智慧型平交道安全監測系統則可以維持同樣之安全水準到 1.68 千小時。

b.兩平交道安全機率之差距在 2.35 千小時前隨時間而擴大，在 2.35 千小時差距達 8.77%，即智慧型平交道安全監測系統較現有平交道壽期更長或更為耐用。

## (2)智慧型平交道安全監測系統之安全關鍵

### a.事故事件發生率

在故障樹之各基本事件中，以影像擷取裝置問題的事件較易發生，列車防護裝置未作用事件則較不易發生，且兩者發生率之差隨時間而擴大，尤在 3000 小時，差距約為 16.35%。若以最小失效組合的角度而言，以「在人或車輛強行穿越平交道的情形下，同時發生影像擷取問題」之組最小失效組合最易發生，而組合中包含人車闖越平交道事件者，其發生率均較高，顯見公路用路人違規仍是平交道事故之主因。因此除設置智慧型平交道安全監測系統之外，仍須配合安全宣導教育以提升國人守法觀念。

### b.組成元件對安全機率之敏感度

智慧型平交道安全監測系統中，以無線電數據通訊裝置、數位無線電通訊裝置、車載電腦、GPS 衛星定位儀等元件失效率提高時對於整體安全性影響最大，而無線電數據通訊裝置對安全性影響程度約為數位無線電通訊裝置之 2.6 倍，約為車載電腦與 GPS 衛星定位儀之 3.8 ~ 3.9 倍。

## (3)智慧型平交道安全監測系統設計檢修

a.未來大量建置該系統時，若有預算上之限制，可以先針對無線電數據通訊裝置、數位無線電通訊裝置、車載電腦、GPS 衛星定位儀等元件採取較高品質的要求。

b.正式啟用營運時之日常檢修工作，應著重於影像擷取裝置方面，而在 2.35 千小時之前應有較為全面且詳細的檢修保養，但以台鐵目前檢修的頻率而言，有週檢與月檢，次數 1 到 3 次間，只要檢查確實執行，應可足以維持平交道安全監測系統安全之優越性。