

# 臺鐵行車事故風險評估模型

## RAILWAY ACCIDENT RISK EVALUATION MODEL OF TAIWAN RAILWAY SYSTEM

鄭永祥 Yung-Hsiang Cheng<sup>1</sup>

吳文傑 Wen-Chei Wu<sup>2</sup>

(111年12月29日收稿，112年5月1日第一次修正，112年7月2日第二次修正，112年8月17日第三次修正，112年10月12日第四次修正，112年10月17日接受)

### 摘要

依據鐵路法-鐵路行車規則的分類，臺鐵行車事故可分為重大行車事故、一般行車事故以及行車異常事件等三類。在 101-110 年間，臺鐵每年行車事故總次數都超過 500 次以上，除發生頻率密集外，在 107 年和 110 年也發生了兩次正線出軌事故，造成嚴重傷亡。

因此臺鐵營運應建立定期之風險評量，以確保運作具一定之安全水準。本研究嘗試探討臺鐵系統鐵道事故風險評估分析，利用 106-110 年臺鐵行車事故資料，將鐵路營運要素分成人、車、路、設備和環境等五類，利用負二項迴歸檢定行車事故發生次數，利用卜瓦松迴歸檢定行車事故死傷人數，以及利用排序邏輯斯迴歸檢定行車事故嚴重程度的因素，希望探討各項影響行車安全的風險因素及對應之改善對策。

模式實證結果顯示，影響行車事故發生次數最頻繁的為車輛、號誌以及電車線設備類型的故障；而會造成傷亡情形發生的則是：民眾侵入、ATP 故障或未開啟、工程因素、違反法律或行車規章規定以及侵入致列車受損等；透過嚴重程度指標衡量風險程度依序為：民眾侵入、水淹軌面、電車線故障、雷擊、地震、強風、進站、出發或閉塞號誌故障、軌道電路及計軸器故障、轉轍器故障、雙計軸器故障、侵入致路線中斷、異物侵入以及集電弓故障。

- 
1. 成功大學交通管理科學系教授 (聯絡地址：70101 臺南市東區大學路 1 號；電話：06-2757575 轉 53227；E-mail：yhcheng@mail.ncku.edu.tw)。
  2. 成功大學交通管理科學系碩士在職專班。

**關鍵詞：** 鐵道事故、卜瓦松迴歸、負二項迴歸、排序邏輯斯迴歸、臺鐵

## ABSTRACT

*The definition of Taiwan railway accidents can be divided into three categories: major accidents, general accidents and abnormal events. The total number of railway accidents of Taiwan Railway Administrations (TRA) exceeded 500 times per year from 2012 to 2021. In addition to the frequent occurrences, there were also two main line derailment accidents in 2018 and 2021, both of which caused serious casualties. This shows that there are certain safety risks concern of TRA.*

*The TRA's regular risk assessment should be established to ensure the safety level of operation. This study uses data from TRA accidents from January 2017 to December 2021. We use negative binomial regression to test the number of accidents and use Poisson regression to test the number of accident fatalities, and adopt the ordered logistic regression to test the factors of accident severity. The factors were considered in this study including human, vehicle, route obstacles, signal or electrical equipment failures and the environment to realize their influence on accident occurrence and severity.*

*The analytical results show that the most common accidents are failures of vehicles, signals and overhead catenary failure. The situations will cause casualties including people intrusion, ATP failure or failure to turn on, engineering factors, violation of laws or regulations and damage to the train caused by the intrusion, etc. The order of risk measured by severity indicators is human intrusion, track surface flooded, overhead catenary failure, lightning strike, earthquake, strong wind, arrival-departure and signal blocking failure, track circuit and axle counter failure, switch failure, double axle counter failure, route interruption due to intrusion, external object intrusion and pantograph failure.*

**Key Words:** *Railway accidents ; Poisson regression ; Negative binominal regression ; Ordinal logistic regression ; Taiwan Railway Corporation, Ltd.*

## 一、前言

鐵道運輸具有運送距離長且運量大之特性，而安全及準時是鐵道業經營最重要之目標。鐵道營運有賴系統中的人為因素、基礎設施或設備、環境因素、營運車輛和組織管理等營運要素相互之配合，當這些要素出現問題，將導致鐵道在營運中發生事故，即鐵道營運事故<sup>[1]</sup>。過去在國際重大鐵道事故中，曾發生列車火災、列車失去制動力衝撞、貨車出軌爆炸、冒進號誌邊撞、列車對撞及超速出軌等情形，造成了嚴重的人員傷亡、財產損失、鐵道設備毀損和環境破壞的慘重結果<sup>[2]</sup>。因此鐵道業者應建立完善安全管理制度，將安全

理念落實到管理及維修保養過程，以持續監控並定期評估改善，以有效避免人為之不安全行為及預防設備及設施之不安全狀態。

運輸業能否永續經營除有賴經營策略規劃外，需有效利用風險管理來作為安全改善措施之指導<sup>[3]</sup>，以有效識別、評估和控制營運安全中潛在的威脅<sup>[4]</sup>。在風險的範疇中，最具公信力的評量方法之一，是將風險概率(P)乘上損害嚴重性(C)而得到風險(R)的乘積<sup>[5]</sup>。然風險是複雜的交互作用概念，除了機率和損害之外，更受到各種不同因素的影響，如：不確定性、曝光和情境<sup>[6]</sup>。風險評估與分析的重要性，是藉由定期診斷鐵路系統可靠度及穩定度，消除反覆發生的危險行為、透過預防管理降低風險源，以及藉由錯誤學習來擬訂預防對策<sup>[7]</sup>。

鐵道運輸風險之評估，常利用安全風險指標做為衡量基礎，指的是每百萬列車公里發生的死亡率<sup>[8]</sup>。臺鐵 100 年至 110 年的安全風險指標，其值介於  $0.65 \times 10^{-6}$  至  $1.64 \times 10^{-6}$  死亡人數/百萬列車公里間，數據顯示臺鐵長期風險水準呈現下降趨勢，主要原因是過往臺鐵營運系統中，最容易發生死傷事故多集中在平交道和旅客自行打開折疊門所造成的傷亡，在鐵路立體化工程和列車自動門改造計劃的實施後，已大幅的降低了這兩種事故發生率。然臺鐵的安全風險指標却不是呈現平穩的下降趨勢，特別是 107 年和 110 年的二次重大行車事故造成嚴重傷亡，事故發生前一年安全指標分別為  $0.87 \times 10^{-6}$  和  $0.65 \times 10^{-6}$  死亡人數/百萬列車公里，而事故當年的安全風險指標則上升至  $1.09 \times 10^{-6}$  和  $1.64 \times 10^{-6}$  死亡人數/百萬列車公里，由於重大事故之死亡人數增加導致安全風險指標大幅度攀升。若使用英國最低合理可行準則(ALARP)<sup>[9]</sup>來判斷分析，此準則以不可忍受風險臨界值  $10^{-4}$  以及可忽視風險臨界值  $10^{-6}$  來作為風險判斷基準，其值代表每年因鐵道活動發生產生的死亡機率，依據該準則之認定，臺鐵 100-110 年的風險水準僅落在可容忍區。綜合上述二種判斷指標，顯示臺鐵營運安全處於不穩定狀態，當累積多種危險因子同時出現時，便有極高機會出現重大行車事故，而造成嚴重傷亡。臺鐵為了避免重大鐵道事故一再發生，分析和探討過去的事故是重要基本工具<sup>[10]</sup>，以建立風險評量的方法。

鐵道事故之發生，常因多重危險因素之交互作用所引起<sup>[11]</sup>。因此，鐵道系統風險的分析與評估工作是非常重要的，其主要目的在辨識鐵道系統中，擾亂營運系統正常運作的不良事件和組織缺點，以確保鐵道內、外在營運要素，都循著標準作業程序而運作<sup>[7]</sup>。正因鐵道系統存在不同類別的干擾因素，使得鐵道行車事故也區分為運轉事故(train accidents)、移動事故(moving accidents)以及非移動事故(non-moving accidents)三種不同種類<sup>[12]</sup>，代表不同的鐵道事故有不同呈現形式，其風險間之觸發條件也不同<sup>[13]</sup>。鐵道事故風險評量方法，可以使用統計模型進行檢定，當事故資料呈現統計顯著水準時，更能客觀的量化鐵道事故風險<sup>[8]</sup>；此外，在採用的衡量指標上，要能確實識別鐵道營運系統所產生之風險類型，因風險是抽象的概念，若能讓風險來源具體化，則有助於針對問題制定對策因應。綜上所述，本研究目的如下：利用臺鐵過去五年間所發生之不同類型事故資料進行統計分析，以建立臺鐵發生事故的風險以及嚴重度的分析模式，並就過去之資料分析找出在不同條件下之影響因子，進而研擬所對應之風險改善對策。

## 二、文獻回顧

事故是導致損失、損壞或傷害的意外或計劃外事件<sup>[14]</sup>，起因存在於複雜系統各層面之連鎖反應<sup>[15]</sup>。常藉由風險管理來探索潛藏系統中可能危險因子。在可接受的成本下，判斷對風險的承受能力，達成系統安全目標的極大化<sup>[16]</sup>。過往對於事故的探討，雖然分成了不同的系統考量，但事故發生頻率和嚴重度是很重要之衡量指標，主要是可判斷事故與自變數間的影響關係，本節針對事故的發生頻率和嚴重程度進行文獻回顧並做小結。

### 2.1 事故頻率

頻率常被使用在探討交通安全的範疇，通常是指在特定時間內及特定地理空間發生的事故件數<sup>[17]</sup>。由於事故件數為非負整數，因此頻率分析常使用計數資料迴歸模型來進行檢定安全評估和事故預測。卜瓦松和負二項迴歸模型也在事故頻率分析中獲得廣泛應用<sup>[18]</sup>。在事故頻率之分析中，普遍存在過度分散情形，也就是變異數大於平均數，因此負二項迴歸較為廣泛使用，因卜瓦松模型需遵從變異數與平均數相等之嚴格假設<sup>[19]</sup>。

過往研究有大量文獻分析車輛碰撞與頻率間可能因素之探討，Wang & Abdel-Aty<sup>[20]</sup>的研究，使用廣義估計方程 (GEE) 和負二項式作鏈接，針對不同類別碰撞頻率構建模式，實證結果指出碰撞頻率與發生碰撞地的交通流量相關、多時相號誌通常發生較多交通碰撞事故、距離較寬的交叉路口，以及左轉車與直行車碰撞事故頻率較多，而為有效減少碰撞事故發生，應從不同模式考慮左轉碰撞，才能擬訂有效降低碰撞事故之對策。

Kabir, Remias, Lavrenz, & Waddell<sup>[21]</sup>探討交通號誌性能對總碰撞次數間的關係，在研究中使用隨機參數負二項式方法構建模式，使用車輛軌跡數據和創建性能指標，了解號誌性能和安全性間之關係。實證結果指出，主要道路和次要道路的 AADT、速限、右轉專用車道及交叉路口與事故呈現正相關，透過對號誌性能測量，可以優化交通號誌或為交通號誌基礎設施提供訊息。

Ren, Song, Wang, Hu, & Lei<sup>[22]</sup>進行都市交通風險預測研究，透過深度學習模型，將事故數據進行空間和時間離散化處理。由於交通事故有時間和空間上分布不均衡的複雜特性，難以直接用於預測，但若採用頻率來定義事故時，對於交通事故預警系統會呈現正向準確性和有效性。Li, & Wang<sup>[23]</sup>則是針對鐵路營運安全之風險監控，提出了網絡模型。從鐵路系統中的人、機器、環境和管理等因素，進行事故原因的因果分析，主要是因為網絡的節點、邊緣和結構可以清楚解釋複雜的社會和自然問題 Valente<sup>[24]</sup>，基於節點的頻率和等效損壞來獲得節點量化風險。

Liang, Ghazel, Cazier, & El-Kourisi<sup>[25]</sup>歐洲平交道事故佔每年鐵路事故約三成，造成約 300 人的喪命，研究使用普通最小平方法 (Ordinary Least-Squares) 和非線性最小平方法 (Nonlinear Least-Squares) 觀察事故頻率與預測事故頻率間關係，基於所觀察的事故頻率，結合卜瓦松分布和負二項分布，進行累積分布函數分析，實證發現日平均道路交通量、道

路交通事故、日平均鐵路交通量和鐵路限速對事故頻率造成影響，且負二項分布對事故頻率有較高預測率。

## 2.2 事故嚴重程度

嚴重程度是研究交通安全之重要議題，透過嚴重程度檢定，可以找出較高嚴重傷害或死亡的可能性因素，如：事故地點、類型、時間、人為因素或機械故障等。事故嚴重程度通常被定義為分類變量，嚴重程度的值會根據主管單位訂定而不一樣<sup>[26]</sup>。事故嚴重程度的衡量上，當依變數具有兩個以上類別且不具有次序性時，適合使用多項式邏輯斯迴歸，來估計特定事件發生概率；若嚴重度的值具有順序時，層次結構也有它代表涵意時，則適合使用排序邏輯斯迴歸<sup>[27]</sup>。以下為探討事故嚴重程度的模型相關文獻。

Hao et al.<sup>[28]</sup>研究大型卡車和非大型卡車發生平交道事故的傷害嚴重性，嚴重程度分為僅財產損失、受傷以及死亡三類，使用有序機率模型 (Probabilistic Model) 建模，透過邊際效應分析嚴重程度影響。

Lee et al.<sup>[29]</sup>指出天候狀況常是引發嚴重事故的重要因素，尤其在雨天時，能見度差和摩擦係數低，特別容易造成事故發生。透過水深估算結合結構方程模型，對事故嚴重程度定義有交通事故死亡率、傷亡人數和受損車輛數量三種類別。

Liu et al.<sup>[30]</sup>出軌是一種常見之鐵道事故，常造成嚴重的傷亡、列車運行中斷及鐵路設備毀損等結果，使用零截斷負二項迴歸模型，來估計因斷軌所造成的列車脫軌嚴重程度的條件均值，及分位數迴歸估計不同分位數的出軌嚴重程度，嚴重程度則以出軌車輛數量來衡量。

Naznin et al.<sup>[31]</sup>墨爾本有世界最大有軌電車路網，其採用二元邏輯迴歸模型檢定電車嚴重傷害事故的影響因素如車輛、道路、環境和駕駛員等因素，嚴重程度定義為 A 類致命和 B 類非致命傷害。實證結果指出，低地板有軌電車、老舊有軌電車、優先車道和高行駛速度會增加有軌電車致命事故，較高交通流量會降低事故嚴重度。

## 2.3 小結

過去鐵道事故研究，大多集中在組織管理與人為因素<sup>[32][33][34]</sup>、基礎設施與車輛修護<sup>[35]</sup>、以及平交道事故分析與預測<sup>[36][37][38]</sup>等，針對單一因素的行車事故進行探討，但是隨著時空背景改變和營運環境之不同，重大鐵道事故的發生往往是因營運要素彼此間交互作用引起<sup>[11]</sup>，這在過往的文獻中較少提及。在進行臺鐵鐵道事故的研究分析時，若僅針對單一因素及僅針對頻率或嚴重程度來探討分析，可能會疏忽不同營運要素交互作用所衍生之風險，無法有效了解臺鐵營運系統風險之完整性。為能夠全面的檢視系統中風險，除建構在風險概念下的頻率和嚴重程度外，亦可討論營運要素風險與行車事故傷亡人數之關係。

根據海恩法則 (Heinrich's Law)<sup>[39]</sup>，嚴重事故肇因於頻繁發生事件，也就是說嚴重事故

和頻繁發生事件間存在著一定比例關係，因此在事故原因的衡量上，常使用頻率和嚴重程度做為指標。事故頻率主要是以發生次數多寡來進行分析，目的在找出容易發生的原因；事故嚴重程度主要是以事故發生後造成的影響程度來判斷，主要目的在明確定義出事故發生結果的等級，根據等級做風險的管理，以便在有限的成本下，對於風險的改善及控管能夠有先後順序可循；而本研究除了頻率模型<sup>[33][34][35][38]</sup>和嚴重程度模型<sup>[32][36][37]</sup>外，考量臺鐵資料特性，還納入死傷人數做為衡量指標，共有三個檢定模型，死傷人數模型可衡量鐵道事故發生的結果，死傷人數的多寡可以指出單次鐵道事故相對臺鐵鐵道系統風險的影響程度，透過量化死傷數據的使用，了解臺鐵營運所產生之安全風險，以檢討整個臺鐵營運服務的相對安全性及死傷係數之大小。

嚴重程度模型是以頻率、延誤時間和死傷係數組成的綜合衡量指標來進行檢定，死傷人數模型則是以死傷係數做為衡量指標，兩者皆屬行車事故結果指標；嚴重程度模型是在考慮頻率、延誤時間和死傷係數得出風險矩陣。檢定出臺鐵系統中，頻繁發生且造成嚴重影響事故的鐵道營運要素風險來進行風險管理；死傷人數則以死傷係數進行檢定，可檢定出單一重大鐵道事故，臺鐵系統營運之高風險來源，並做出立即的處置，阻絕風險源；這二種指標最大區別則是在於事故結果的認定不同，造成檢定風險的結果不同，主要是希望從不同的角度，辨別鐵道事故風險變數，作為改善措施先後順序之參考依據。

### 三、資料蒐集與分析

#### 3.1 資料蒐集

本研究分析資料主要係蒐集臺鐵營運安全處 106 年-110 年臺鐵行車事故月報表中所登載事故事項進行整理及歸納，整理資料過程發現，因為值班人員不同，事故資料的實際填寫偶有疏漏情形，造成資料的不完整，所幸筆數並不多，並未對資料分析造成影響。

#### 3.2 變數定義與說明

本資料庫記載行車事故發生關係的完整資訊，考量臺鐵組織和營運有其獨特性，為有效了解臺鐵營運風險所在，在進行行車事故資料整理及歸納時，將營運要素分成了 5 個類別，分別為：人為因素、車輛故障、路線障礙、號誌或電力設備故障以及環境因素，接著進行敘述性統計，針對各類別所發生次數較多者設定為自變數，做為檢定對象。本研究以行車事故發生次數、行車事故死傷人數以及事故嚴重程度 3 個探討指標，對臺鐵行車事故進行檢定，以下為自變數架構圖 (圖 1) 及依變數說明表 (表 1)。

##### 3.2.1 自變數定義

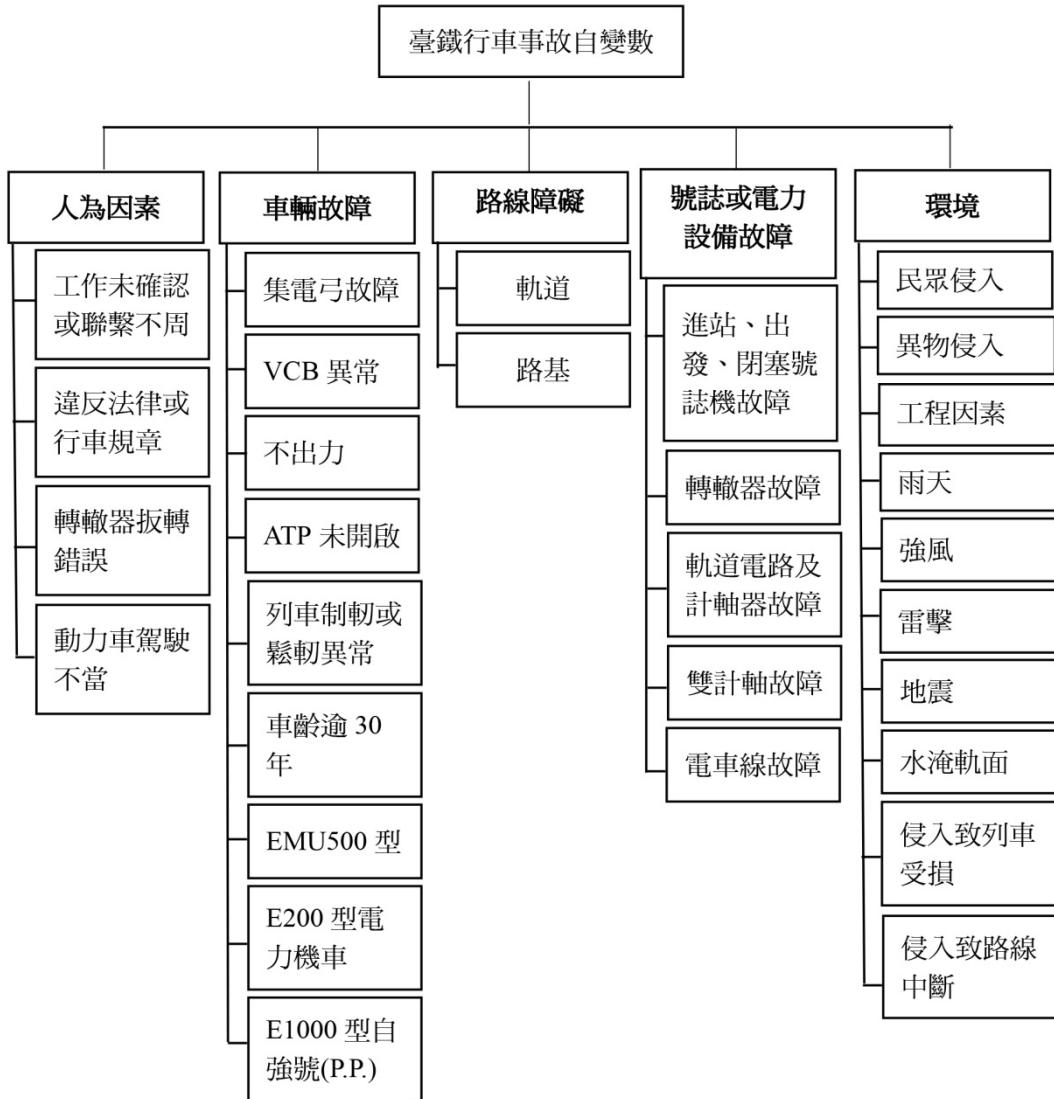


圖 1 自變數關係架構圖

### 3.2.2 自變數說明

1. 人為因素：指員工個人工作上疏失造成的行車事故。
  - (1) 工作未確認或聯繫不周：指工作人員間未互相確認或疏於聯繫，導致事故的發生，例如：未確認號誌、號訊或標誌。
  - (2) 違反法律或行車規章：較常違反的行車規則為，車輛停留時，應採取防止車輛移動之必要措施；ATP 經開機完成後，除系統故障、變更閉塞(與號誌機不合用)，不再

作為本務動力車，或有其他情事經行車調度員指示外，嚴禁隔離系統；調車時，轉轍工應服從調車員或調車司事之指示，謹慎處理轉轍器，以免錯誤；行車實施要點第 298 條，依主號誌機指示進入該號誌機之內方；依鐵路法第 56 條之 1 至第 56 條之 4 規定，鐵路機構應負責鐵路之土木建築設施、軌道設施、保安與防護設備、電信設施、電力設施及車站設備之修建、養護，以及鐵路機車、車輛之檢修，並確保鐵路行車之安全。

- (3) 轉轍器扳轉錯誤：工作人員因扳轉錯誤或未確認轉轍器方位，導致列車出軌。轉轍器扳轉錯誤指的是鐵路從業人員進行轉轍器扳轉時，因未注意或不熟悉所造成的扳轉錯誤，與規章中規定轉轍工調車時應注意事項，主要差別在於是否從事調車工作中的扳轉指別。有關違反法律規章與轉轍器扳轉錯誤的標記方式，當事故報告中所載若為轉轍工因調車工作的原因扳轉錯誤則標記違反法律或規章規定，若非轉轍工因調車工作的原因在現場扳轉錯誤則僅標記為轉轍器扳轉錯誤。
- (4) 動力車駕駛不當：駕駛指營運列車、電力維修車及工程維修車等動力車駕駛員，主要有冒進號誌、停車時未確認制動裝置、超速、控速不當、過站不停或停車位置不當等行為。

## 2. 車輛故障：指動力車故障造成的行車事故。

- (1) 集電弓故障：指將電車線的高壓電力導引致列車的集電設備故障或機件掉落。
- (2) VCB 異常：真空斷路器 (Vacuum Circuit Breaker) 經過中性區間時需打開，等到通過中性區間後再閉合，故障時列車會無法導電而失去動力。
- (3) 不出力：列車或車輛無法提速失去動力。
- (4) ATP 未開啟：列車自動防護系統，超速時有自動制軔功能，常因故障或異常而關閉。
- (5) 列車制軔或鬆軔異常：指列車煞車系統出現問題，當發生煞車系統的機械或電子元件故障或控制系統單元異常等情形時，造成列車無法正常行駛。
- (6) 車輛故障車種：EMU500 型電聯車、E200 型電力機車、E1000 型推拉式自強號及車齡 30 年以上車種共 4 種。車輛故障在設定自變數時，區分為車種故障和機械故障之樣態，主要目的在於檢定其為何頻繁發生車輛故障情形，想要了解原因是否因為車齡過高、車種妥善率不佳還是因為特定機械故障的技術或維護保養問題。車種故障之所以僅列出 EMU500 型、E1000 型自強號以及 E200 型莒光號是因為故障次數較高。車齡及車種資料的建置在初期敘述性統計資料庫中，而車齡及車種資料來源及判斷根據近 3 年臺鐵行車事故初探所整理之資料。

## 3. 路線障礙：指鐵道運行路線障礙造成的行車事故。

軌道、路基：路線主要由軌道 (track) 及承載軌道的路基 (roadbed) 與橋涵等所組成。軌道則包含了有道碴、軌枕、鋼軌及其扣件等損壞，路基則指路基流失或路基下陷等。路線障礙指的是因臺鐵維護養路不善或自然磨耗造成土木結構物或軌道設備發生損壞、變形

或功能異常致影響列車正常運轉之情事。與侵入或天然災害造成路線中斷不同，在研究中資料標註方式也有所區別。

4. 號誌或電力設備故障：指鐵道號誌系統或電力系統故障造成的行車事故。

- (1) 進站、出發或閉塞號誌故障：指示列車准否進入進站、出發或閉塞區間的號誌機發生故障或不顯示的情形。
- (2) 轉轍器故障：指將列車或車輛由一路線轉入另一路線之設備發生故障。
- (3) 軌道電路及計軸器故障或雙計軸故障：指用來判斷該區間是否有列車通行，禁止其他列車進入的裝置發生故障，而這種判斷是否列車佔用情形，臺鐵則有軌道電路和計軸器以及雙計軸器兩套系統。
- (4) 電車線設備：臺鐵電車線設備由電桿、絕緣礙子、懸臂組、主吊線、接觸線及其他支持配件組成。其功能是将 25 kV 交流電線架於軌道上方，並維持在固定高度，列車以集電弓碰觸接觸線將電力引入，來供應電力列車運轉所需電源。由於構造複雜，很容易發生主吊線斷落或設備掉落情形。電力設備故障在資料整理時期有納入發電設備或輸電設備等，但進行敘述性統計時仍以電車線設備故障為主要發生原因，其他電力設備故障次數過於零星，是故未納入自變數的設定。

5. 環境：指受外在環境影響造成的行車事故。

- (1) 民眾或異物侵入：指人員主動性闖入鐵路淨空，造成列車或車輛於月台、鐵路路線或平交道口，發生列車與人員或列車與公路車輛衝撞或碰撞，或外物遭受力的作用，被動性侵入鐵路路權範圍、破壞鐵路設備、擱置障礙物或其他行為，致影響列車或車輛正常運轉之情事。
- (2) 工程因素：指鄰近鐵路軌道、橋梁、邊坡、月台及隧道等地進行的臨軌工程。
- (3) 雨天、雷擊、強風、地震：指因自然氣候，如下雨、雷擊、強風或地震的發生，所造成的行車事故。
- (4) 水淹軌面、軌面溼滑、爬坡：指雨天時淹水，造成停駛條件的水淹軌面，另外在微降雨的情形時，軌面溼滑和爬坡容易造成行車運轉的延誤。
- (5) 侵入致列車受損：指鐵路因發生侵入行車事故，造成列車或車輛有受損情形。
- (6) 侵入致路線中斷：指鐵路因發生侵入行車事故，造成電車線設備損壞或斷落、傳輸電纜中斷、號誌或轉轍器損壞以及路面軌道損壞或中斷，有暫時中斷路線行駛的情形。侵入致列車損壞是為了檢定車體的強度與事故發生時，能否確保旅客生命安全的檢定；侵入致路線中斷考量用意是要檢定當侵入事故發生後，侵入事實造成號誌設備、電車線或路線的損壞，導致延長處理時間的狀況是否會呈現統計上顯著水準，造成了路線上設備的毀損，造成處理時間之延長。

### 3.2.3 依變數定義及說明

表 1 依變數說明表

類型	變數定義	說明
依變數	行車事故發生次數	以事故發生次數為檢定指標
	行車事故死傷人數	以死傷人數為檢定指標
	行車事故嚴重度	以頻率、死傷及延誤時間為綜合指標

### 3.3 資料分析

表 2 為行車事故發生次數，重大行車事故 23 件、佔比為 0.8%；一般行車事故 254 件、佔比為 7.9%；行車異常事件 2936 件、佔比為 91.3%。表 3 為行車事故死傷人數則以重大行車事故死亡人數 68 人、佔比 33%，受傷人數 409 人、佔比 83.8%；一般行車事故死亡人數為 136 人、佔比 66%，受傷人數 66 人、佔比 13.5%；行車異常事件則有 2 人、佔比為 1%，受傷人數 13 人、佔比 2.7%。表 4 則將行車事故資料依據嚴重度排序成 5 個等級，共 3191 筆、另因資料記載不詳排除 22 筆，非常輕微有 487 筆、佔比 15.3%，輕微有 867 筆、佔比 27.2%，普通有 1114 筆、佔比 34.9%，嚴重有 298 筆、佔比 9.3%，非常嚴重有 425 筆、佔比 13.3%。

針對人為因素類型變數進行敘述性統計，這個類別中，符合工作未確認或聯繫不周、違反法律或行車規章規定、轉轆器扳轉錯誤以及動力車駕駛不當佔整體行車事故的比例分別為 5.2%、2.9%、1.3%及 2.6%。針對車輛故障類型變數進行敘述統計，故障車種中，車齡逾 30 年的列車、EMU500 型電聯車、E200 電力機車以及推拉式自強號佔所有行車事故比例分別為 14.4%、12.2%、7.1%及 6.3%；故障樣態中的集電弓故障、VCB 異常、不出力、ATP 故障或未開啟及列車制軔、鬆軔異常佔總行車事故次數比例分別為：1.7%、4.4%、4.6%、3.2%及 7.8%。針對路線障礙類型變數進行敘述統計，主要來自軌道和路基兩方面，佔行車事故比例分別為 1.3%及 0.6%。針對號誌或電力設備故障類型變數進行敘述性統計，包含：轉轆器故障、進站、出發或閉塞號誌故障、軌道電路及計軸器故障、雙計軸故障以及電車線設備故障等 5 個變數，佔行車事故總數比例分別為 5.2%、8.2%、2.3%、0.5%以及 2.2%。針對環境因素類型變數進行敘述性統計，有民眾侵入、異物侵入、工程因素、侵入致列車損壞、侵入致路線中斷、雨天、強風、雷擊、地震及水淹軌面等 10 項，佔行車事故總數比例分別為 8.7%、4.8%、3.3%、2.7%、2.8%、8%、0.5%、0.6%、4.5%及 0.6%。

表 2 行車事故發生次數表

依變數	定義	次數	比例
行車事故發生次數	重大行車事故	23	0.80%
	一般行車事故	254	7.90%
	行車異常事件	2936	91.30%

表 3 行車事故死傷人數次數表

依變數	定義	死亡人數	比例	受傷人數	比例
行車事故死傷人數	重大行車事故	68	33%	409	83.80%
	一般行車事故	136	66%	66	13.50%
	行車異常事件	2	1%	13	2.70%

表 4 行車事故嚴重度次數表

依變數	非常輕微(1)		輕微(2)		普通(3)		嚴重(4)		非常嚴重(5)	
	個數	比例	個數	比例	個數	比例	個數	比例	個數	比例
嚴重程度	487	15.3%	867	27.2%	1114	34.9%	298	9.3%	425	13.3%

## 四、研究步驟及方法

### 4.1 研究步驟

為了有效將災害的發生控制在合理範圍，歐美等先進國家鐵道安全監理和管理，都是採用風險管理做為管理基礎。歐盟在鐵路安全管理則使用 IEC61508<sup>[40]</sup>為規範，將風險視為衡量危險的指標，風險指的是發生機率 (Likelihood) 與嚴重程度 (Consequence) 的組合。本研究亦是在風險觀念架構下進行，使用的是民國 106 年至 110 年行車事故資料，依據行車事故報告中所登載的發生原因、事故地點、發生時間、肇事主體、列車型號、事故類別及影響情形等做為自變數編碼依據，資料總數總共有 3213 筆，自變數資料為二元型態 0 和 1，0 代表不符合所述，1 代表符合所述。自變數的設定，是建立在臺鐵的營運系統中的人員、車輛、路線、設備及環境等 5 個類別營運要素，在各個類別基礎下，進行敘述性統計分析，以事故發生次數多者，做為自變數的設定來進行實證檢定。為了確認自變數具有獨立性，在研究中共進行兩次共線性檢定，第一次則是針對每類別下的自變數進行共線性檢定，確認其獨立性後才會設定為該項的自變數；其次則是針對同一模型中，不同類別下的所有自變數進行共線性檢定，確認具有獨立性後才再進行檢定。

臺鐵行車事故資料只有死亡和受傷人數，並沒有財物損失，而受傷資料也未針對輕、重傷加以區別，因此風險分析是以等效受傷係數為量化依據，將臺鐵事故型態指標區分為事故頻率、事故嚴重性以及事故風險等三種<sup>[41]</sup>。由於事故發生次數或死傷人數屬離散型資料，故使用卜瓦松迴歸 (Poisson regression) 及負二項迴歸 (Negative binominal regression) 進行檢定；事故的嚴重度具有排序之特性，因此適合使用排序邏輯斯迴歸 (Ordinal logistic regression) 進行檢定，詳見本實證架構圖 (圖 2)。

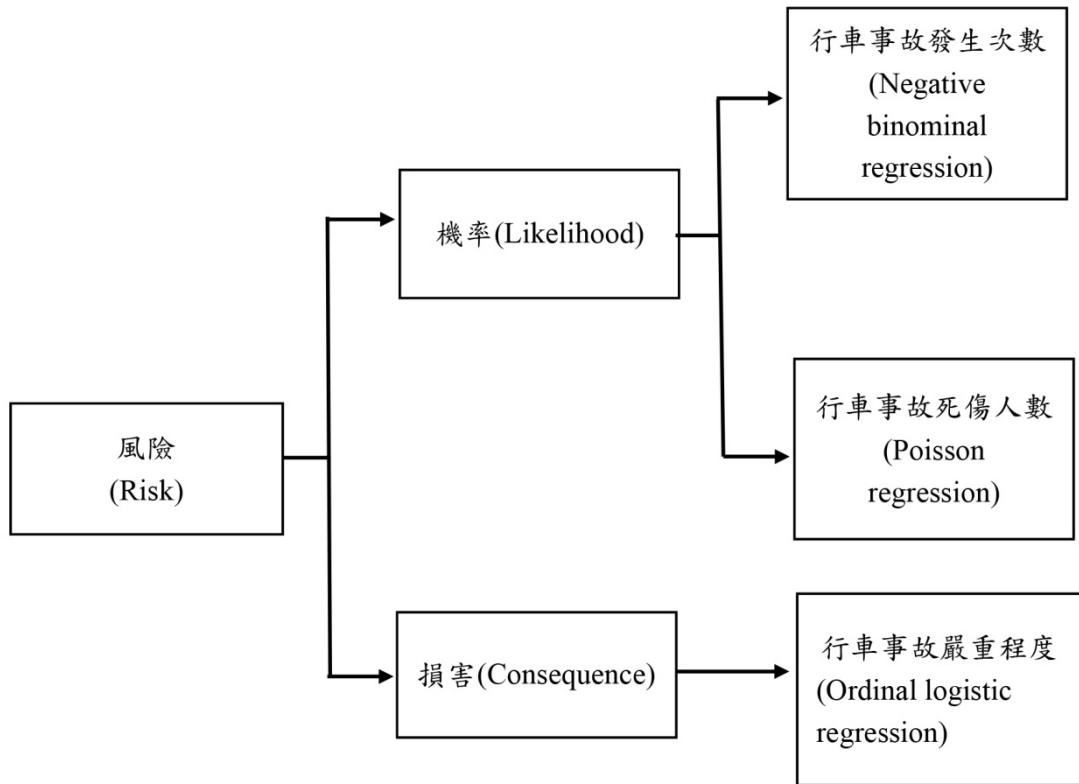


圖 2 研究架構圖

## 4.2 研究方法

### 4.2.1 卜瓦松迴歸 (Poisson regression)

臺鐵行車事故資料屬計數資料，呈現稀少性、間斷性、隨機性等特性，適合使用卜瓦松迴歸模式進行資料分析。卜瓦松迴歸常使用在非負整數計數資料的建模，其依變數常指一段時間內的發生次數，屬間斷型資料，因此以  $Y_i$  代表行車事故概率的計數結果，如下式所列：

$$P(Y_i=y_i)=\frac{\lambda_i^{y_i} \exp^{-\lambda_i}}{y_i!} \quad , y_i = 0,1,2, \dots ; i = 1,2, \dots, n ; \quad (1)$$

P 表示機率集結函數；

$Y_i$ ：卜瓦松機率行車事故可能發生次數；

$\lambda$ ：事故平均發生率；

$i$ ：時間或空間區段數。

#### 4.2.2 負二項迴歸 (Negative binominal regression)

在卜瓦松迴歸模式中，有一項一致性假設，就是限制其樣本變異數必需等於樣本平均數，故當觀察資料呈現過度離散 (Overdispersion) 性質時，容易造成變異數大於平均數，使得虛無假設得到拒絕結果，造成誤差情形發生，為改善此一情形的發生，此時可改採用負二項迴歸模型來處理，它放寬了平均數和變異數的限制，並加入一誤差項，因此負二項迴歸模式可以說是卜瓦松迴歸之特例，負二項迴歸模式的完整機率密度函數如下所示：

$$\text{Var} \{ Y_i \} = E \{ Y_i \} [ 1 + \eta E(Y_i) ] = E \{ Y_i \} + \eta E[Y_i]^2 ; \quad (2)$$

$\Gamma$  為 Gamma 分配， $\eta$  則為離散係數 (Overdispersion parameter)，當  $\eta$  值趨近於 0 時，負二項分配會簡化成卜瓦松分配，當  $\eta$  值顯著不為 0 時，則變異數大於期望值，表示資料有離散的情形。

#### 4.2.3 排序邏輯斯迴歸 (Ordinal logistic regression)

事故嚴重程度通常被定義成一個分類定量，以序數形式來表示嚴重程度，當依變數型態是類別且有順序時，而層次結構具有它的涵意，則應小心資料處理時，不應以連續變數來看待及處理，因此本研究選擇使用排序性邏輯斯迴歸來分析具有排序性問題之模式，它的迴歸模型考慮了數個分類的依變數，適用離散及有序的資料型態，本研究設定排序性邏輯斯迴歸模式共有 5 個類別依變數，因此產生 4 個累積邏輯函數如下：

$$\text{Ln}\left(\frac{P_0}{1-P_0}\right) = \beta_{00} - \sum_{j=1}^J \beta_j x_j ; \quad (3)$$

$$\text{Ln}\left(\frac{P_0+P_1}{1-P_0-P_1}\right) = \beta_{01} - \sum_{j=1}^J \beta_j x_j ; \quad (4)$$

$$\text{Ln}\left(\frac{P_0+P_1+P_2}{1-P_0-P_1-P_2}\right) = \beta_{02} - \sum_{j=1}^J \beta_j x_j ; \quad (5)$$

$$\text{Ln}\left(\frac{P_0+P_1+P_2+P_3}{1-P_0-P_1-P_2-P_3}\right) = \beta_{03} - \sum_{j=1}^J \beta_j x_j ; \quad (6)$$

$$\text{而 } P_0 + P_1 + P_2 + P_3 + P_4 = 1 ; \quad (7)$$

$P_0$ ：行車事故嚴重程度為「非常輕微」之機率；

$P_1$ ：行車事故嚴重程度為「輕微」之機率；

$P_2$ ：行車事故嚴重程度為「普通」之機率；

$P_3$ ：行車事故嚴重程度為「嚴重」之機率；

$P_4$ ：行車事故嚴重程度為「非常嚴重」之機率。

### 4.3 小結

卜瓦松迴歸常被用於檢定特定時間、特定地點事故頻率與影響因素間關係，對於隨機且獨立發生的事故能夠有效處理，事故頻率為非負整數特性，卜瓦松模型的分配特性可以幫助評估分散資料，正確解釋數據性質，由於容易發生過度離散情形，此時可以使用負二項迴歸來進行校正。另外，當依變數是離散型態且具兩類以上時，常使用多項邏輯斯來估計事件概率，但當分類的類別具有順序性時，則適合使用排序邏輯斯迴歸。

## 五、實證結果與分析

### 5.1 行車事故發生次數

行車事故發生次數是指各類型行車事故發生次數為衡量標準，對於發生機會較大的事故類型，進行風險因子的探討。因臺鐵一年 600~800 件行車事故事件中，有 500~700 件屬於行車異常事件，其中有近 50% 的行車異常事件為車輛故障、近 20% 為運轉保安裝置故障，有關行車異常事件車輛故障和運轉保安裝置故障雖然名為異常事件，但在交通部和臺鐵的認定上，車輛或設備的故障，造成旅客列車延誤超過 30 分鐘以上仍視為事故，以致件數過多。因此建議臺鐵未來對於行車異常事件的認定應該要有明確標準值，以免造成事故和事件的混淆，並將此列為研究上限制。由於臺鐵每年行車公里數完全不同，為有效反應是營運中發生風險，本研究考慮曝光量的條件求算肇事率並進行檢定，肇事率的單位為總發生次數/當年度列車行駛百萬公里，解釋曝光量越大造成車輛故障數越高。因此，曝光量應用在行車事故發生次數模型的計算為：

1. 曝光量之計算涵蓋 5 個營運要素類別，分別為：人為因素、車輛故障、路線障礙、號誌或電力設備故障以及環境因素類別，考量每個自變數的曝光量後，再進行行車事故發生次數模型的迴歸分析。
2. 每個類別下自變數肇事率之計算為：每年發生次數除以當年度列車行駛百萬公里，例如：車輛故障類別下的集電弓故障是用當年度集電弓故障總次數/當年度營運總的列車行駛百萬公里；E1000 型 (推拉式自強號) 故障是用當年度 E1000 型 (推拉式自強號) 故障總次數/當年度營運 E1000 型(推拉式自強號)總的列車行駛百萬公里。

表 5 列出行車事故次數卜瓦松迴歸和負二項迴歸模型的參數係數，比較兩個模型下的模式適合度統計量，包括  $\text{Chi}^2/\text{DF}$ 、AIC、BIC 以及對數概似值等。Pearson 卡方若較接近模式自由度，那麼模式對數據的配適度越好<sup>[42]</sup>。當存在多個統計模型時，可透過 AIC 和 BIC 做為選擇模型的資訊評估準則。AIC 和 BIC 的值愈小，表示模型的配適度愈佳及對數概似值愈大。對數概似值是通過對每個觀測值的估計概似度取對數，並彙總這些對數概似值來計算的，在接近零的意義上，LL 愈大表示模型愈好<sup>[43]</sup>。 $\text{Chi}^2/\text{DF}$ 指的是  $X^2$  卡方分布，通常是指用來檢定資料是否符合某一特定分配，樣本與母體間是否相似，當大於 0.1 時才

對整體模式有解釋能力。綜上所述，表 5 中所列出的統計參數顯示，負二項迴歸在行車事故發生次數模式中所展現的適合度較具整體解釋能力，因此本模式下以負二項迴歸進行分析。每個變數的 VIF 值皆介於 1.005-1.754 之間，顯示自變數之間並不存在共線性問題，指出每個自變數均具有獨立性，所有自變數可以使用同一模型做檢定；Exp(B) 代表發生率比 (Incident Rate Ratios, IRR)，用來表示自變數每增加單位的發生率的預測變化。大於 1 的值表示隨著自變數的增加，發生率會增加 IRR 一個因子的變化；小於 1 的值表示隨著自變數的增加，發生率會降低 IRR 一個因子的變化。

表 5 行車事故發生次數 Poisson regression 和 Negative binominal regression 模型

自變量	Poisson regression				Negative binominal regression			
	B 係數	標準誤差	P-value	Exp(B)	B 係數	標準誤差	P-value	Exp(B)
<b>車輛故障</b>								
集電弓故障	0.261	0.0911	0.004	1.298	0.483	0.0814	0.000	1.621
VCB 異常	0.179	0.0441	0.000	1.196	0.320	0.0411	0.000	1.378
不出力	0.184	0.0478	0.000	1.203	0.352	0.0407	0.000	1.421
ATP 故障或未開啟	0.126	0.0440	0.004	1.134	0.261	0.0499	0.000	1.298
車輛制軔鬆軔異常	0.216	0.0380	0.000	1.242	0.415	0.0406	0.000	1.514
EMU500 型(電聯車)	0.611	0.0363	0.000	1.842	0.625	0.0303	0.000	1.868
E200 型(莒光號)	0.655	0.0541	0.000	1.926	0.788	0.0639	0.000	2.200
E1000 型(推拉式自強號)	0.323	0.0329	0.000	1.382	0.335	0.0292	0.000	1.398
車齡逾 30 年	1.229	0.0570	0.000	3.418	1.252	0.0472	0.000	3.497
<b>號誌或電力設備故障</b>								
進站、出發或閉塞號誌故障	0.250	0.0269	0.000	1.284	0.337	0.0281	0.000	1.401
轉轍器故障	0.224	0.0297	0.000	1.250	0.311	0.0307	0.000	1.365
軌道電路及計軸器故障	0.221	0.0320	0.000	1.247	0.309	0.0334	0.000	1.362
雙計軸故障	0.217	0.0327	0.000	1.242	0.304	0.0336	0.000	1.356
電車線故障	0.170	0.0413	0.000	1.185	0.258	0.0420	0.000	1.294
Log-likelihood	-232429.680				-22140.948			
Chi <sup>2</sup> /DF	168.466				0.560			
AIC	464889.360				44311.895			
BIC	464980.485				44403.020			
N	3213				3213			

P-value 主要是用在計算及檢定統計量，衡量樣本資料接受或拒絕虛無假設的程度，其值介於 0 與 1 之間，一般定義  $p < 0.05$  表示有統計上顯著意義。檢定結果可以看出，臺鐵發生行車次數呈現統計上顯著性意義的類型為車輛故障、號誌或電力設備故障，這都是屬於臺鐵本身營運設備故障所引起的行車事故，臺鐵每年的行車事故件數居冠為車輛故障，其中 EMU500 型區間車、E200 型電力機車、E1000 型推拉式自強號 (PP) 和車齡逾 30 年列車，除呈現統計上顯著性水準，發生率比也都呈現正相關，顯示以上營運車種故障風險高；車齡逾 30 年的列車  $IRR = 3.497$ ，指出是最容易發生故障的車種，顯示車齡與故障率呈正比，而臺鐵車齡偏高，因此故障率也偏高；另外，EMU500 型電聯車、E200 型電力機車及 E1000 型推拉式自強號等三車種呈顯著正相關， $IRR$  值分別為 1.868、2.2 及 1.398，顯示當這三種車種列車班次愈多時，在臺鐵營運之交通曝光量愈大，造成列車故障發生次數就會愈高。

而列車或車輛常發生的故障原因有：集電弓故障、VCB 異常、不出力、ATP 故障以及車輛制軔、鬆軔異常等情形，而這 5 種故障樣態發生率比也都呈現正相關且  $IRR$  值相近，指出這 5 種的故障樣態是常常造成臺鐵列車或車輛故障的原因；集電弓是列車行駛時，經由架空電車線，取得電力的供電設備，一但毀損時，列車將無前進動力；VCB 是一種安全開關，在列車經過中性區間時關閉電源，常因為直流成份過高及調壓閥不良問題，造成無法閉合失去動力；不出力指的是電門無法提速，主要原因有電子卡故障、馬達故障及供電模組 GTO 不良；ATP 是列車安全警示裝備，主要用來確保列車行駛速度限制在安全速度內，常因為當機而造成故障；車輛制軔、鬆軔異常主要有分配閥不良及停留制軔故障問題，嚴重時會造成燒軸情形發生；上述 5 種變數，在車輛故障類別上，都呈現顯著正相關， $IRR$  值分別為 1.621、1.378、1.421、1.298 及 1.514； $IRR$  用來表示自變數每增加單位的事務頻率的預測變化，以  $IRR$  值來判斷車輛故障風險而言，車種故障的故障風險大於機械故障的故障風險，顯示整體而言，引起臺鐵車輛故障原因，還是以車種妥善率為主。

臺鐵目前號誌系統為中央行車控制系統 (Centralized Traffic Control, CTC)，包括有聯鎖裝置、閉塞裝置、列車位置偵測系統 (軌道電路及計軸器)、列車自動防護系統 (ATP)、號誌機 (進站、出發、掩護及中途閉塞等)、電動轉轍器以及平交道防護系統，屬歐洲列車控制系統等級 1 (ETCS L1)，主要就是用來指揮及調度列車行駛、控速或險阻的設備。在本研究中，進站、出發或閉塞號誌故障、轉轍器故障、軌道電路或計軸器系統以及雙計軸系統故障等 4 種故障樣態，呈現顯著正相關， $IRR$  值分別為 1.401、1.365、1.362 及 1.356。進站、出發或閉塞號誌設備，指的是列車在車站或站間行駛時的依據，常因為繼電設備老舊或傳輸線路等問題導致故障；轉轍器是改變列車行進路線的設備，因列車經過時發生震動，在長年磨損下，經常有鎖錠桿位移和查桿位移及斷損；軌道電路或計軸器系統和雙計軸系統，主要是號誌系統中，用來提供列車位置和行進訊息，主要功能為運轉整理及確保行車安全，軌道電路故障常是因為熱脹冷縮作用，導致絕緣夾膠退化、接頭脆化或繼電設備老舊等所致。

近年來臺鐵逐漸將軌道電路系統汰換為雙計軸系統，主要原因是軌道電路系統是利用短路原理來偵測列車所在位置，然而鋼軌生鏽氧化後，會因絕緣不佳，導致電路傳導功能

將弱化，造成無法成功偵測列車位置，肇生危險；但計軸器也有它的缺點：斷電後須重置方能正確計算軸數、電磁干擾以及臺鐵是否掌握維修技術，而目前設置雙計軸路段僅有臺中高架、屏潮高架以及南迴鐵路等路段。臺鐵電力設備可以分成：發電設備、輸電設備、變電設備以及電車線設備，相較於電車線設備，其他電力設備故障次數零星，未設定為自變數進行檢定。在本研究中，電車線故障呈現正相關的顯著水準，IRR 值為 1.294，顯示電車線設備的故障、脫落或主吊線斷落等情形愈頻繁時，愈容易造成行車事故的發生。

## 5.2 行車事故死傷人數

利用安全指標分析行車事故關鍵因素時，常藉由死亡係數做為量化的工具，依據不同的死傷規模，做為行車安全的衡量依據。本研究行車事故事件死傷人數的分析，是依據英國鐵路管理辦公室 (Office of Rail Regulation) 定義鐵路事故的等效死亡當量<sup>[44]</sup>及國內運研所安全相關研究<sup>[45]</sup>，將死傷權重定義為 10:1 來換算等效受傷人數，主要目的在避免小數點的出現。在研究中並未使用排序邏輯斯迴歸來分析行車事故死傷模式，主要原因在於排序邏輯斯是序數形式的分類定量，若自行設定恐流於主觀而無法有效檢定。

表 6 列出行車事故死傷人數 Poisson 模型的參數係數，在行車事故死傷人數方面，是以單一樣本 Kolmogorov-Smirnov 檢定來做為是否適合使用 Poisson regression，根據檢定結果符合 Poisson 機率分配，適合用卜瓦松迴歸來進行檢定。進行迴歸檢定前，先確認模式中變異膨脹因子 (VIF)，判斷多元線性迴歸模型的自變數之間是否獨立，每個變數的 VIF 值皆介於 1.003-1.037 之間，顯示自變數間不存在共線性問題，指出每個自變數均具有獨立性，所有自變數可以使用同一模型做檢定。

本模式檢定結果，違反法律或行車規章規定、ATP 故障或停用、民眾侵入、侵入致列車受損以及工程因素等，均呈現統計上顯著意義，且發生率比均呈現正相關，表示這 5 個情形所造成的行車事故，較容易有傷亡的情形發生，依據 IRR 的值，傷亡情形風險大小排序為：民眾侵入 > ATP 故障或停用 > 工程因素 > 違反法律或行車規章規定 > 侵入致列車受損。

按照風險排序最高為民眾侵入 (B=6.03、IRR=415.576)，臺鐵屬傳統平面鐵路，歸類上為 B 型路權 (隔離路權)，鐵路沿線軌道與外部交通高度交錯，許多平交道和營運路線均無法有效阻隔來自兩側的侵入，每年都有民眾自月台、鐵路路線兩側或平交道闖入鐵路淨空，而發生平交道事故或死傷事故；民眾侵入的後果通常都很嚴重，而且因民眾侵入造成行車事故的次數和死亡人數遠超過其他行車事故次數和死亡人數，在 106-110 年行車事故死亡總人數為 206 人，因民眾侵入造成死亡人數為 136 人，佔比約 66%；由於平交道設置有限高門、列車接近指示、警鈴以及遮斷機等裝置，除非發生警鈴與遮斷器同時故障，否則平交道事故通常不歸責於臺鐵，實際上因號誌故障造成平交道事故次數也非常少，106-110 年平交道事故僅 1 起歸責於臺鐵號誌系統故障，其他 43 件均歸責於用路人原因，因此平交道事故的發生，用路人當時身心狀態和違規行為才是發生主因。另外因侵入而造

成列車受損呈顯著水準正相關 (B=1.32、IRR=3.744)，顯示侵入而發生碰撞導致列車有損壞情形發生時，較容易出現傷亡狀況，當列車在碰撞時，車體愈容易發生損壞情形時，發生死傷的風險會較高。

表 6 行車事故死傷人數 Poisson 模型

自變量	Poisson regression			
	B 係數	標準誤差	P-value	Exp(B)
<b>人為因素</b>				
違反法律或行車規章規定	4.352	0.6433	0.000	77.620
<b>車輛故障</b>				
ATP 故障或未開啟	5.582	0.7895	0.000	265.660
<b>環境</b>				
民眾侵入	6.030	0.6618	0.000	415.576
侵入致列車受損	1.320	0.5524	0.017	3.744
工程因素	4.518	0.6313	0.000	91.647
Log-likelihood	-3398.672			
Chi <sup>2</sup> /DF	32.386			
AIC	6804.279			
BIC	6840.729			
N	3213			

ATP 系統能保證列車在安全的速度曲線內行駛而不會闖越險阻 (紅燈) 號誌，若動力車駕駛員行車超過規定的運轉曲線速度時，ATP 系統會就超速部份給予不同的限制性煞車，當超過 3km/h 會進行常用煞車，若超過 5km/h 時則會進行緊急煞車，來確保行車安全。IRR 為 265.66，顯示當 ATP 故障或因故未開啟時，司機員很容易因為分心或機械故障等外在環境交互作用下，因為失去自動告警系統的提醒，造成冒進號誌或超速等行為，因此，當 ATP 故障或未開啟的情況發生愈頻繁時，愈可能造成重大死傷行車事故。

臺鐵的營運環境中，常伴隨著一些重大鐵路改建工程，而這些臨軌工程與一般土建營造工程相比起來，風險更甚，施工過程中的測量、基礎、擋土、結構、建築裝修及路線改善工程等項目，容易發生人員、車輛或機具主動性侵入鐵路淨空，工區物品或材料容易因固定不良且受力作用發生被動性侵入。工區最常發生的危害形式有吊掛作業失控、路基流失、物品的掉落或侵入路線以及工作人員便宜行事，隨意跨越軌道等；因此工程因素呈現顯著正相關，IRR 值為 91.647，顯示當臺鐵沿線的臨軌工程愈多時，上述的工區危害愈容易發生，造成發生傷亡的行車事故風險就愈高。

運輸業常因組織文化、內部管理或作業流程等原因，長時間暴露在潛在危險因子中，

當工作環境變化、員工工作錯誤或違反規定的情形出現時，便造成了重大的意外事故<sup>[46]</sup>，在本模式中，違反法律或行車規章規定變數，呈現顯著正相關，IRR 值 77.62，顯示出當員工違反法律或行車規章工作時，容易導致工作上的人為錯誤，在這種情形下，導致發生死傷的行車事故，也就是說，不遵守相關規章或法律行為每增加一單位時，會提高死傷行車事故的發生機率的 77.62 倍，而根據本研究整理資料，經常發生違反法律或行車規章相關規定有：車輛停留時，應採取防止車輛移動之必要措施，預防車輛溜逸；ATP 經開機完成後，除系統故障或有其他情事經行車調度員指示外，嚴禁隔離系統，目的是藉由告警系統防範人為疏失；調車時，應謹慎處理轉轍器，以免錯誤，主要預防轉轍器開通方向錯誤而擠岔；依主號誌機指示進入該號誌機之內方，主要預防冒進號誌；鐵路機構應確保鐵路行車之安全；辦理工程規劃、設計時，編製符合職業安全衛生法規之安全衛生圖說及規範，並量化編列安全衛生費用。

### 5.3 行車事故嚴重程度

事故嚴重程度主要是表現行車事故發生後，所產生影響的結果指標，鐵道系統發生行車事故時，造成列車時間延誤為必然的結果，然而在基於鐵道系統安全性的考量，發生事故時若造成傷亡，則應將該次傷亡轉化成死傷係數，透過兩者比較來決定該次行車事故嚴重程度為何，這在鐵道事故中，是用來判斷行車事故嚴重程度的關鍵課題。因此本研究以行車事故頻率、行車事故發生導致旅客行程延誤時間以及是否造成旅客傷亡等 3 項情事來做為綜合性指標。依據 IEC61508 提出構成安全風險矩陣有 2 項因素，一個是危害的機率或發生的頻率(表 7)，另一個則是事故結果的嚴重程度(表 8)，由這兩項因素組成風險安全矩陣(表 9)，是提供量化風險的重要依據，並將嚴重程度分為 5 個類別，分別為非常輕微(1)、輕微(2)、普通(3)、嚴重(4)以及非常嚴重(5)。最後透過(表 10)之風險分級表進行風險之判斷。表 7 事故頻率分級及表 8 事故嚴重程度分級的設定，是依據臺鐵公司運務處的訂定來做為嚴重程度等級之轉換。表 9 安全風險矩陣表是依據 ICAO 安全管理手冊的設定，表 10 風險分級表是依據民國 102 年能源部門因應氣候變遷調適策略計劃修改設定。

表 7 事故發生頻率分級表

頻率定義		
等級	可能性分類	詳細描述(每年平均次數)
1	幾乎不可能	1 次含以下
2	不太可能	2-3 次
3	可能	4-20 次
4	非常可能	21-49 次
5	幾乎確定	50 次含以上

資料來源：修改自臺鐵公司運務處

表 8 事故嚴重程度分級表

嚴重程度		
等級	延誤時間	死傷係數
A	181 分鐘以上	1(含)以上
B	121-180 分鐘	0.7-0.9(含)
C	46-120 分鐘	0.5-0.6(含)
D	21-45 分鐘	0.3-0.4(含)
E	20 分鐘以下	0.2(含)以下
	(1).死亡係數為 1，受傷係數為 0.1。 (2).等級認定滿足其中之一即可。	

資料來源：修改自臺鐵公司運務處

表 9 安全風險矩陣表

風險矩陣		嚴重程度				
		A	B	C	D	E
發生 頻率	5	5A	5B	5C	5D	5E
	4	4A	4B	4C	4D	4E
	3	3A	3B	3C	3D	3E
	2	2A	2B	2C	2D	2E
	1	1A	1B	1C	1D	1E

資料來源：ICAO 安全管理手冊

表 10 風險分級表

風險分級		說明
5	Severe	嚴重風險，須優先處理，辦理危機處理計劃。
4	High	高風險，須針對主要風險因子辦理安全評估。
3	Mediate	中度風險，針對風險因子辦理預警與監測。
2	Low	低風險，持續觀察風險因子。
1	Accept	可接受之風險。

資料來源：102 年能源部門因應氣候變遷調適策略計劃

臺鐵行車事故發生原因較複雜，且事後會依責任歸屬之不同也可能有不同事故名稱，事故發生頻率的訂定主要是針對事後認定事故名稱為主，本研究則是在不同事故名稱下辨別事故發生原因，透過檢定找出風險來源。表 7 事故頻率分級表中所定義等級 1 為 1 次以

下代表幾乎不可能發生，在 106 年至 110 年發生總次數少於 4 次以下有正線火災、側線衝撞列車或車輛分離、列車或車輛溜逸以及駕駛失能，5 年平均後發生次數小於 1。若以表 2 重大行車事故和一般行車事故而言，5 年加總為 277 次，平均為 55.4 次，因此表 7 之等級轉換尚屬合理。惟臺鐵每年行車異常事件發生較為頻繁，尤其是車輛故障和號誌故障次數約佔每年行車事故次數之 4 成及 2 成。因此，當加上車輛故障及號誌故障次數，則表 7 事故頻率分級表的等級轉換則不適當，建議未來臺鐵在分類車輛故障和號誌故障事故的標準，應再訂定更明確及嚴謹的認定條件。表 7 事故頻率分級表每年事故發生頻率的轉換級距也應考慮車輛故障和號誌設備故障次數，重新調整較適合之級距。

依「災害防救法」及「交通部災害緊急通報作業要點」鐵路因行車發生災害或事故，預估交通受延遲 2 小時以上者或鐵、公路行車事故、災害發生死亡達三人以上，被認定為災害規模達乙級，應通報交通部。依上述認定條件，鐵路事故嚴重程度的認定常以死傷和延誤時間做為認定基準。依據臺鐵公司表 8 資料亦以死傷和延誤做為嚴重度判斷基準。臺鐵公司事故定義有別於一般公路事故，只要列車未依時刻表表定時間運行達一定時間，即認定為事故。因此事故的嚴重性不必然以死傷的發生為唯一認定標準。當事故的發生造成交通延遲一定時間仍無法恢復時，代表的是營運要素出現問題，亦是營運風險的一種形式。透過死傷和時間價值損失之組合來轉換事故發生後的嚴重程度，藉由將嚴重程度貨幣化，有利對事故嚴重程度完整表達，及相互比較其影響程度。按鐵路機構行車與其他事故損害賠償及補助費發給辦法，因鐵路機構之行車或其他事故，每一位死亡者應酌給之最高金額新臺幣二百五十萬元，與運務處訂定延誤時間 181 分鐘以上造成時間價值損失相同。綜合上述，延誤時間與死傷人數間可以透過財物損失的貨幣化進行轉化。惟二者之間間距調整隨著時空背景和物價指數不同，存在著討論空間，建議可做為後續探討鐵路事故的研究重點。若依變項同時滿足表 8 中的兩項指標時，則以較嚴重等級做為認定，舉例來說，若發生平交道事故導致 6 個人受傷則死傷係數為 0.6，而因為該事故的處理而導致較表定時間延誤 120 分鐘，則可以說這個事故在事故嚴重程度認定為等級 C；反之，若延誤時間為等級 C 的 120 分鐘，而死傷係數為等級 B 的 0.3 時，此時以較嚴重等級 C 認定之。

依據表 7 事故發生頻率分級表和表 8 事故嚴重程度分級表的乘積得到表 9 安全風險矩陣表，比對每次事故在表 9 安全風險矩陣表中位置，可以判斷每一筆事故的發生，歸納在表 10 風險分級表中的何種風險等級，依據表 10 風險分級表的 5 個嚴重程度等級進行風險量化，最終為表 11 行車事故嚴重程度模型統計參數。同樣事故發生，每次處理或造成影響程度不同，嚴重程度可能也不一樣。舉例來說：集電弓在車站停車後發生異常導致無法續行，此時只要將該列車停駛，引導旅客搭乘下班列車，影響程度並不大；但若發生在列車運行中，集電弓脫落致扯斷電車線，則修復時間長，並造成列車運行延誤連鎖效應，影響範圍大，嚴重程度高。因此表 11 行車事故嚴重程度風險值是各項行車事故發生後，透過每次事故發生判定風險分級，進行量化檢定的最終結果。

表 11 行車事故嚴重程度 Ordinal logistic regression 模型

自變量	B 係數	標準誤差	P-value	Exp(B)
臨界				
(嚴重程度排序=1)	-1.309	0.053	0.000	0.27
(嚴重程度排序=2)	0.23	0.0443	0.000	1.258
(嚴重程度排序=3)	2.126	0.0617	0.000	8.377
(嚴重程度排序=4)	2.963	0.0764	0.000	19.357
<b>車輛故障</b>				
集電弓故障	0.626	0.23	0.006	1.87
<b>號誌或電力設備故障</b>				
進站、出發或閉塞號誌故障	1.303	0.0961	0.000	3.47
轉轍器故障	0.995	0.1269	0.000	2.706
軌道電路及計軸器故障	1.104	0.1929	0.000	3.015
雙計軸故障	0.978	0.2564	0.000	2.66
電車線故障	2.819	0.2926	0.000	16.758
<b>環境</b>				
民眾侵入	3.042	0.1321	0.000	20.94
異物侵入	0.63	0.1818	0.001	1.878
侵入致路線中斷	0.941	0.2728	0.001	2.562
水淹軌面	2.914	0.5617	0.000	18.423
雷擊	1.809	0.44	0.000	6.103
地震	1.775	0.2435	0.000	5.901
強風	1.647	0.6361	0.01	5.19
Log-likelihood=-4362.25	Cox-Snell $R^2=0.231$			
Chi <sup>2</sup> /DF=4.874	-2LL(0)=1323.18			
AIC=8758.5	-2LL(B)=485.83			
BIC=8861.658				
N=3213				

表 11 是嚴重程度模型的檢定參數，臨界值是指明確定義依變數順序排序間的切點<sup>[47]</sup>。潛在得分低於-1.309 歸類為非常輕微程度；潛在得分在-1.309 和 0.23 間歸類為輕微程度；潛在得分在 0.23 和 2.126 間歸類為普通程度；潛在得分在 2.126 和 2.963 間歸類為嚴重程度；得分大於 2.963 則歸類為非常嚴重程度。表中顯示車輛故障、號誌或電力設備故障和環境因素三個類別，在 99%的信賴水準下，集電弓故障、進站、出發或閉塞號誌故障、轉轍器故障、軌道電路及計軸器故障、雙計軸故障、電車線故障、民眾侵入、異物侵入、

侵入致路線中斷、水淹軌面、雷擊、地震以及強風等 13 個自變數，除呈現顯著水準外，其估計係數值均為正，表示對事故嚴重程度的影響具有相關性以及統計上意義。

在本模式中使用優勢比 (Odds Ratio, OR) 來表示自變數的邊際效應，優勢比 (OR) 表示自變數每增加一個單位，落入更高類別變化機率的乘法變化。OR>1 表示自變數每增加一個單位，屬於更高類別的機率就會增加。OR<1 表示自變數每增加一個單位，屬於更高類別的機率就會降低。OR=0 表示自變數每次增加的機率沒有變化。

車輛故障類別下，集電弓估計係數值為正值且呈現統計上顯著水準，OR 值為 1.87，主要原因是當集電弓故障時，很容易拉扯電車線，連帶導致電車線故障或毀損，修復時間久影響時間長。設備類型的故障中，以進站、出發或閉塞號誌故障、轉轍器故障、軌道電路或計軸器故障、雙計軸故障以及電車線故障等 5 種設備發生故障時，對事故嚴重程度影響較大，主要是因為這 5 種設備發生故障時，會影響列車正常運行，甚至是停止運行。號誌或電力設備類型下，嚴重性大小依序為：電車線故障>進站、出發或閉塞號誌機故障>軌道電路及計軸器故障>轉轍器故障>雙計軸故障；電車線設備故障 OR 值為 16.758，電車線故障每增加一個單位，電車線故障造成有更高嚴重程度事故的機率會變化 16.758 倍，多來自於主吊線斷落或架空設備掉落等，修復時間長且會造成路線中斷，因此發生電車線故障，造成列車延誤時間通常較久，由於發生頻率高且容易造成路線中斷，處理時間長，因此嚴重程度在設備故障類型中最高；進站、出發或閉塞號誌、轉轍器和軌道電路或計軸器是車站重要運轉保安裝置，發生故障時會造成號誌異常，列車失去號誌依據，而無法繼續行使，車站可以使用複線運轉開關作複線運轉行車，不變更閉塞號誌，若複線運轉開關無法使用時，須變更閉塞為通信式行車，雖然仍需要處理時間，但因沒有造成路線中斷之虞，相較延誤時間不會如同電車線故障時嚴重。

由於臺鐵為開放系統，列車行駛時，易受外在環境高度干擾，包括自然天候狀況及地質災害等，都是行車安全潛藏危險因子，在環境條件的因子中，民眾侵入、異物侵入、侵入致路線中斷、水淹軌面、雷擊、地震以及強風等變數，呈現顯著水準且 OR>1，顯示這些變數的發生，會導致行車事故有較嚴重的影響，而變數的嚴重程度依序為：民眾侵入>水淹軌面>雷擊>地震>強風>侵入致路線中斷>異物侵入；民眾侵入 OR 值為 20.94，民眾侵入每增加一個單位，民眾侵入造成有更高嚴重程度事故的機率會變化 20.94 倍，由於臺鐵屬於半開放系統，民眾很容易自月台平交道以及路線等地侵入鐵路淨空，常造成死傷情形發生，因此嚴重程度最高；水淹軌面 OR 值為 18.423，當水淹軌面增加一個單位，水淹軌面造成有更高嚴重程度事故的機率會變化 18.423 倍，顯示在極端氣候下，強降雨的情況常造成了低窪地區的淹水，而為預防行車事故的發生，臺鐵以水淹軌面為停駛標準，淹水停駛通常影響層面廣，等待積水消退也需一段時間，因此嚴重程度係數值為次高；雷擊的 OR 值為 6.103 表明，雷擊下的事故嚴重程度是非雷擊下事故的 6.103 倍，雷擊情況的發生常導致電力設備、號誌機、軌道電路或相關行車設備損壞，而且發生時，常造成有路線中斷現象且處理及修復耗費較多時間；地震發生分等級的不同，處理方式也不同，主要預防強震會導致軌道挫屈或電力設備損毀的情形，一樣發生頻率不高，但發生時影響層面

較廣，造成嚴重程度較高；另外異物入侵或因侵入造成電車線設備損壞、號誌設備故障或路線中斷等情事，因發生頻率較高，處理上花費時間有長有短，雖嚴重程度不如前幾項高，但仍對列車安全造成影響。

## 六、結論與建議

近年來，臺鐵已相繼發生兩次重大行車事故，造成嚴重傷亡，顯示出臺鐵營運系統中存在著疏忽與危害，本研究主要目的是為探討在臺鐵營運要素所潛藏的風險，透過風險評量的方法，嘗試檢核臺鐵營運系統安全之問題，並提出改善措施與建議。

### 6.1 結論

1. 本研究是以過往鐵道及交通事故相關文獻回顧及國外軌道風險管理實務做為研究依據，透過事故發生概率、死傷發生概率和嚴重程度做為風險衡量指標，依此檢核臺鐵系統營運所潛存之安全問題，可做為未來探討軌道安全改善之延伸課題。
2. 本研究是以 106-110 年臺鐵行車事故報告書，作為風險評量基礎，針對臺鐵行車事故進行討論。行車事故原始資料經過本研究分析彙總後，轉化成臺鐵營運要素 5 個類別 30 個自變數，透過量化的檢定數據，則可以清楚了解潛在危害風險的大小。
3. 行車事故發生次數模型，指出臺鐵行車事故最頻繁類型，主要都集中在車輛故障和號誌或電力設備故障。鐵路設備故障事故的一再發生，與嚴重程度間存在關係，減少設備事故發生總頻率，可以預防嚴重事故的發生。設備故障風險具有發散效果，常導致二次事故的發生。意思是說，當鐵路系統長期處於不穩定狀態，如此將會過份依賴人員的緊急應變能力，而每個人的能力和經驗不同，常此以往，導致引發意想不到的衍生事故，須謹慎處理，杜絕風險源。
4. 行車事故死傷模型，發生時可能會造成嚴重傷亡，頻率不高但死傷程度高。主要是因工程因素以及違反法律或規章，工程因素主要發生在臨軌工程，工作人員隨意侵入鐵路淨空發生意外；違反法律或規章主要發生在未依規定指派瞭望員，此類事故以 2006 年的崇德事件最為慘重。此類事故多是組織問題所引發，除了重新檢視管理制度、資源分配及工作流程設計是否完善。在安全領域內，組織因素通常與安全管理系統有相關的關係，因此，除了藉由安全管理制度建立良好的組織文化外，也應實施定期風險審視，擬訂工作指導方針。
5. 行車事故嚴重程度模型，發生頻率高且嚴重程度相對高，是指集電弓、號誌及電車線故障，依據行車事故頻率模型指出集電弓、號誌和電力設備屬高頻率發生的事故，且同樣的出現在行車事故嚴重程度的模式中，顯示集電弓、號誌故障和電車線設備故障處理時間相對較長，容易造成列車運行中斷，號誌設備的查修較為困難，有賴經驗傳承，建議臺鐵應進行模組化建置及相關電流監測設備。電車線相關的設備脫落或斷裂在更換上都

需耗費相當時間，由此可知，號誌設備和電車線設備都是相對脆弱的設備，臺鐵在建置時除了應加強硬體的韌性外，也應有相關監控設備，可以事先預防或故障時能夠立即偵測故障點，避免維修人員到現場還要尋找故障點，增加復舊時間，應尋求技術指導提升設備妥善率。而民眾及異物侵入和天然災害為主，主要可以透過工程的消除或確實執法來減少發生，亦應做好預防對策，擬訂相關應變措施因應。

6. 臺鐵營運設備或車輛故障率高，是造成列車經常誤點的主因，而員工迫於趕點壓力，容易造成人為錯誤引發嚴重行車事故，成為惡性循環。在過往的研究中，澳大利亞鐵路事故，使用人為因素分析和分類系統 (HFACS) 進行分析，實證發現，有近半行車事故的發生肇因於設備故障，主要是由於對設備的狀態，疏於維護或缺乏監控計畫，因未落實檢修，導致長期存在設備缺陷，造成出軌事故<sup>[48]</sup>。
7. 為評量行車事故的風險差異，本研究使用了死傷人數和嚴重程度兩種不同指標來衡量鐵道營運風險，結果發現兩種不同的指標下，產生的風險並不同。死傷事故模型多是組織問題所引發或民眾從月台、路線或平交道等地侵入鐵路淨空則涉及到個人生理及心理問題；嚴重程度則主要發生在號誌或電力設備故障以及外在環境影響，且外在環境影響造成的嚴重程度高於號誌設備故障。因為不同模型顯示出不同的營運風險，所以臺鐵在進行風險評量時，應建立多項指標衡量，方能全面檢視存在臺鐵鐵道系統中的危害。

## 6.2 建議

1. 鐵路營運車輛和行車相關硬體設施及設備是鐵路業者營運的基礎，為維護系統的穩定性及可靠性，應規劃零件之生命週期。針對日漸複雜的鐵路系統，設備的維修應改採模組化更換或維修的方式，維護保養觀念，可從傳統故障維修改變為定期汰換模組零件的方式。臺鐵對於提升車輛及設備妥善率，應審視檢修管理制度、維養技術和備品採購等三個層面是否能正常運作。
2. 外部入侵每年都造成臺鐵死傷事故的發生，然而環島路網的臺鐵，缺乏監控系統，急需設置異物偵測系統，主要是用來檢測入侵軌道淨空的動態及靜態物體，希望能有效預防行駛中的列車與危險物體的衝撞，尤其在隧道、邊坡、橋樑及平交道等關鍵地點，因為這些地點有不易巡檢及事故嚴重性較高的特性，透過傳感器和計算機視覺技術，將物體資訊傳送司機員或行控台，以便做出緊急應變，期望能將障礙物對行駛列車造成危險降至最低。
3. 天然災害的發生通常是不可抗力的，國家級災防警報雖然可提早告警及應對，但對天然災害的發生和造成鐵道系統損壞是不可逆轉的，天然災害容易使鐵路路線中斷，影響範圍廣且修復期間長。針對天然災害帶來鐵路系統的損害，除了平時應針對地區特性不同，增加建物結構檢測以及鐵路營運硬體設備的韌性；另外也應該建置互相支援的運輸體系，支援運輸體系需要不同行政體系的互相配合，除了緊急的疏運外，亦可幫助鐵路渡過修復期，滿足社會大眾行的需求。

4. 本研究中，侵入、人員違規和工程因素等風險，其中除了侵入性問題屬非歸責臺鐵營運外，人員違規和工程因素都有人為因素的問題存在，臺鐵要減少人為因素問題發生，應該建立良好的安全管理制度，訂定安全政策及目標，並建立正向之組織安全文化。
5. 鑑於重大鐵道事故的發生是因為一些不確定的因素所引發，而本研究缺少之事故間的鏈接關係，因此未來對於鐵路行車事故安全研究，應朝向識別根本原因，找出當中因果關係，透過因果鏈關係與統計數據佐證，以找出事故發生關鍵原因。
6. 依據鐵路行車規則規定重大行車事故、一般行車事故及行車異常事件，看似有程度上之差別，但實際上三種行車事故種類都有可能發生傷亡情形，因此在事故嚴重程度的界定上並沒有明確的準則，導致事故延誤與死傷間無法明確鑑別其嚴重程度，建議應針對鐵道事故訂定嚴重程度界定之規範。
7. 臺鐵公司在事故頻率和嚴重程度等級的認定上，相關次數頻率範圍、延誤時間和死傷係數認定條件，未來應明白訂定條件轉換之依據。

## 參考文獻

1. Liu, J., Schmid, F., Li, K., Zheng, W., "A knowledge graph-based approach for exploring railway operational accidents", *Reliability Engineering & System Safety*, Vol. 207, 2021, 107352.
2. Huang W.C., Shuai B., Zhang G.Y., "Using improved WBS-RBS to identify the risk of railway dangerous goods transportation process", *China Safety Science Journal*, Vol. 28, No. 8, 2018, pp. 93-99.
3. 張新立，「我國運輸業之營運風險與因應對策」，八十八年現代企業如何評估與管理地震風險研討會，民國 88 年，頁 65~67。
4. Pariès, J., Macchi, L., Valot, C., Deharvenge, S., "Comparing HROs and RE in the light of safety management systems", *Safety Science*, Vol. 117, 2019, pp. 501-511.
5. Rausand, M., *Risk Assessment: Theory, Methods, and Applications*, John Wiley & Sons, 2011.
6. Aven, T., *Foundations of Risk Analysis*, John Wiley & Sons, 2012.
7. Szaciłło, L., Jacyna, M., Szczepański, E., Izdebski, M., "Risk assessment for rail freight transport operations", *Eksploatacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability*, Vol. 23, No. 3, 2021, pp. 476-488.
8. 蔡明志、張新立，「軌道運輸營運安全管理技術之研究」，中華民國第六屆運輸安全研討會論文集，民國 88 年，頁 552~570。
9. 鍾志成、孫千山、李治綱、陳一昌、吳熙仁。「國外鐵路系統風險管理實務」，*中興工程*，第 110 期，民國 88 年，頁 552~570。
10. Kaeeni, S., Khalilian, M., Mohammadzadeh, J., "Derailment accident risk assessment based on ensemble classification method", *Safety Science*, Vol. 110, 2018, pp. 3-10.
11. Belmonte, F., Schön, W., Heurley, L., Capel, R. "Interdisciplinary safety analysis of

- complex socio-technological systems based on the functional resonance accident model: An application to railway traffic supervision”, *Reliability Engineering & System Safety*, Vol. 96, Iss. 2, 2011, pp. 237-249.
12. Muttram, R.I., ”Railway Safety's Safety Risk Model”, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, Vol. 216, Iss. 2, 2002, pp. 71-79.
  13. Liu, J., Schmid, F., Zheng, W., Zhu, J., ”Understanding railway operational accidents using network theory”, *Reliability Engineering & System Safety*, Vol. 189, 2019, pp. 218-231.
  14. Wienen, H., Bukhsh, F. A., Vriezolk, E., Wieringa, R. J., ”Learning from accidents: a systematic review of accident analysis methods and models”, *International Journal of Information Systems for Crisis Response and Management*, Vol. 10, No. 3, 2018, pp. 42-62.
  15. Reason, J., *Human error*, Cambridge university press, 1990.
  16. Harms-Ringdahl, L., ”Relationships between accident investigations, risk analysis, and safety management”, *Journal of Hazardous Materials*, Vol. 111, Iss. 1-3, 2004, pp. 13-19.
  17. Lord, D., Mannering, F., ”The statistical analysis of crash-frequency data: A review and assessment of methodological alternatives”, *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, Vol.44, Iss. 5, 2010, pp. 291-305.
  18. Milton, J., Mannering, F., ”The relationship among highway geometrics, traffic-related elements and motor-vehicle accident frequencies”, *Transportation*, Vol. 25, 1998, pp. 395-413.
  19. Washington, S., Karlaftis, M., Mannering, F., Anastasopoulos, P., *Statistical and Econometric Methods for Transportation Data Analysis*, Chapman and Hall/CRC, 2020.
  20. Wang, X., Abdel-Aty, M., ”Modeling left-turn crash occurrence at signalized intersections by conflicting patterns”, *Accident Analysis & Prevention*, Vol. 40, Iss. 1, 2008, pp. 76-88.
  21. Kabir, R., Remias, S. M., Lavrenz, S. M., Waddell, J., ”Assessing the impact of traffic signal performance on crash frequency for signalized intersections along urban arterials: A random parameter modeling approach”, *Accident Analysis & Prevention*, Vol. 149, 2021, 105868.
  22. Ren, H., Song, Y., Wang, J., Hu, Y., Lei, J., ”A deep learning approach to the citywide traffic accident risk prediction”, *2018 21st International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)*, 2018, pp. 3346-3351.
  23. Li, K., Wang, S., ”A network accident causation model for monitoring railway safety”, *Safety Science*, Vol. 109, 2018, pp. 398-402.
  24. Valente, T. W., ”Network interventions”, *Science*, Vol. 337, No.6090, 2012, pp. 49-53.
  25. Liang, C., Ghazel, M., Cazier, O., El-Kourssi, E. M., ”Developing accident prediction model for railway level crossings”, *Safety Science*, Vol. 101, 2018, pp. 48-59.
  26. Michalaki, P., Quddus, M. A., Pitfield, D., Huetson, A., ”Exploring the factors affecting motorway accident severity in England using the generalised ordered logistic regression model”, *Journal of Safety Research*, Vol. 55, 2015, pp. 89-97.
  27. Quddus, M. A., Wang, C., Ison, S. G., ”Road traffic congestion and crash severity: econometric analysis using ordered response models”, *Journal of Transportation Engineering*, Vol. 136, Iss. 5, 2010, pp. 424-435.

28. Hao, W., Kamga, C., Yang, X., Ma, J., Thorson, E., Zhong, M., Wu, C., "Driver injury severity study for truck involved accidents at highway-rail grade crossings in the United States", *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, Vol. 43, 2016, pp. 379-386.
29. Lee, J., Chae, J., Yoon, T., Yang, H., "Traffic accident severity analysis with rain-related factors using structural equation modeling—A case study of Seoul City", *Accident Analysis & Prevention*, Vol. 112, 2018, pp. 1-10.
30. Liu, X., Saat, M. R., Qin, X., Barkan, C. P., "Analysis of US freight-train derailment severity using zero-truncated negative binomial regression and quantile regression", *Accident Analysis & Prevention*, Vol. 59, 2013, pp. 87-93.
31. Naznin, F., Currie, G., Logan, D., "Exploring the impacts of factors contributing to tram-involved serious injury crashes on Melbourne tram routes", *Accident Analysis & Prevention*, Vol. 94, 2016, pp. 238-244.
32. Bugalia, N., Maemura, Y., Ozawa, K., "Organizational and institutional factors affecting high-speed rail safety in Japan", *Safety Science*, Vol. 128, 2020, 104762.
33. Saito, M., "Japanese railway safety and the technology of the day", *Japan Railway & Transport Review*, Vol. 33, 2002, pp. 4-13.
34. Melissa T. Baysari, Andrew S. McIntosh, John R. Wilson, "Understanding the human factors contribution to railway accidents and incidents in Australia", *Accident Analysis & Prevention*, Vol. 40, No. 5, 2008, pp. 1750-1757.
35. Eisenberger, D., Fink, O., "Assessment of maintenance strategies for railway vehicles using Petri-nets", *Transportation Research Procedia*, Vol. 27, 2017, pp. 205-214.
36. Richard A. Raub , "Examination of Highway–Rail Grade Crossing Collisions Nationally from 1998 to 2007", *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, Vol. 2122, Iss. 1, 2009, pp. 63-71.
37. Washington, S., Oh, J., "Bayesian methodology incorporating expert judgment for ranking countermeasure effectiveness under uncertainty: Example applied to at grade railroad crossings in Korea", *Accident Analysis & Prevention*, Vol. 38, Iss. 2, 2006, pp. 234-247.
38. Lu, P., Tolliver, D., "Accident prediction model for public highway-rail grade crossings", *Accident Analysis & Prevention*, Vol. 90, 2016, pp. 73-81.
39. Heinrich, H. W., *Industrial Accident Prevention. A Scientific Approach.*, McGraw-Hill, Second Edition, 1941.
40. 交通部運輸研究所，風險管理應用於鐵路運輸安全之初探—以臺鐵風險分析與評量為例，民國 91 年。
41. 李治綱、鍾志成、林杜寰、張仕龍、張恩輔、陳一昌、張開國、吳熙仁(2009)，「公共運輸之安全績效：臺灣鐵路管理局之個案分析」，*運輸計劃季刊*，第 38 卷，第 4 期，民國 88 年，頁 381-406。
42. SAS User's Guide, The Genmod Procedure, website : [https://support.sas.com/documentation/cdl/en/statug/63033/HTML/default/viewer.htm#genmod\\_toc.htm](https://support.sas.com/documentation/cdl/en/statug/63033/HTML/default/viewer.htm#genmod_toc.htm), Retrieved October 9, 2022。
43. UCLA Regression Models with Count Data, website : <https://stats.oarc.ucla.edu/stata/seminars/regression-models-with-count-data/>, Retrieved October 9, 2022。

44. 胡守任、紀佳伶，「以離散型計數資料統計模式探討鐵路平交道事故風險因素—以臺鐵為例」，*運輸計劃季刊*，第 43 卷，第 2 期，民國 93 年，頁 115-142。
45. 交通部運輸研究所，*風險式與自主式鐵路安全管理制度之實務調查與分析*，民國 107 年。
46. J Reason., "Understanding adverse events : human factors", *BMJ Quality & Safety*, Vol. 4, No. 2, 1995, pp. 80-89.
47. UCLA Statistical Methods and Data Analytics, website : <https://stats.oarc.ucla.edu/stata/output/ordered-logistic-regression/>, Retrieved July 1, 2023 。
48. Baysari, M. T., McIntosh, A. S., Wilson, J. R., "Understanding the human factors contribution to railway accidents and incidents in Australia", *Accident Analysis & Prevention*, Vol. 40, No. 5, 2008, pp. 1750-1757.

