

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¹

INVESTIGATING RISK FACTORS OF TRAFFIC ACCIDENTS AT HIGHWAY-RAILROAD GRADE CROSSINGS USING COUNTED DATA STATISTICAL MODELING: A CASE STUDY OF THE TRA SYSTEM

胡守任 Shou-Ren Hu²

紀佳伶 Jia-Ling Ji³

(102 年 1 月 3 日收稿，102 年 7 月 31 日第 1 次修改，102 年 10 月 16 日第 2 次修改，
103 年 3 月 17 日第 3 次修改，103 年 4 月 10 日定稿)

摘 要

鐵路平交道為鐵公路交會之處，鐵公路用路人共同使用該路權。儘管臺鐵局所轄的平交道數相對有限，不過近年來國內平交道事故頻傳，造成人民生命財產的損失，以及顯著的交通延滯與社會成本支出。因此，有必要深入探討平交道事故的主要肇因與風險水準，據以研提有效的改善措施。本研究以離散型計數資料統計模式，分別探討鐵路平交道事故頻率、事故衝擊程度，以及事故風險水準。為完整地評估鐵路平交道之事故風險程度，本研究從離散型計數資料模式家族的卜瓦松迴歸、負二項迴歸，以及零膨脹卜瓦松迴歸模式中，選擇較適當之模式，據以構建鐵路平交道事故頻率

-
1. 本研究承行政院國家科學委員會（科技部）大專學生參與專題研究計畫經費補助（計畫編號：NSC100-2815-C-006-048-E），謹此致謝。研究期間，蒙黃惠珮小姐協助進行資料整理與模式分析等工作，一併致上謝忱。
 2. 成功大學交通管理科學系副教授（聯絡地址：70101 臺南市東區大學路 1 號 成功大學交通管理科學系；電話：06-2757575 轉 53203；E-mail：shouren@mail.ncku.edu.tw）。
 3. 交通大學運輸與物流管理學系碩士。

與事故風險模式；另以排序性羅吉斯迴歸模式，構建平交道事故衝擊程度模式。實證研究結果顯示，每日列車數與公路年平均日交通量等交通曝光量相關因素，為平交道事故的主要肇因；此外，平交道寬度與道路等級等因素，亦為可能的影響因素。最後，針對所構建的模式進行彈性分析與勝算比分析，以提供鐵路平交道主管機關在推動相關安全改善措施前之參考。

關鍵詞：鐵路平交道；事故風險；計數資料統計模式；彈性分析

ABSTRACT

A highway-railroad grade crossing (HRGX) is a spatial location where highway and rail users share the same right-of-way. Despite the number of HRGXs managed by the Taiwan Railways Administration (TRA) is relatively few, a significant number of traffic collisions and severe consequences at the HRGXs in Taiwan has signaled an urgent need for appropriate models to identify the key factors that are associated with the casualty risk levels of an HRGX. This study uses counted data statistical models where Poisson, negative binominal and zero-inflated Poisson regression models are evaluated to analyze crash frequency and risk levels in terms of number of fatalities and injuries in a given time period. Besides, crash severity in terms of number of equivalent injuries per traffic collision is modeled by the ordered logistic regression approach. In the empirical study, using the recent crash and HRGX inventory data provided by the TRA, this study aims to analyze the causal relationships between crash frequency and/or severity and a set of influence factors. The empirical study results indicate that traffic exposure related variables such as daily trains and/or highway average annual daily traffic are the key factors. Besides, grade crossing width and highway type also play different roles on the occurrence and/or consequence of a traffic collision(s) at HRGXs. Finally, elasticity and odds ratio analysis based on the calibrated models are also conducted. The ultimate goal of this research is to provide the HGRX administrative office with a reference before implementing related countermeasures for safety improvement.

Key Words: Highway-railroad grade crossing; Crash risk; Counted data statistical model; Elasticity analysis

一、前言

鐵路平交道為鐵公路交會之處，鐵公路用路人共同使用該路權，以時間隔離的方式來管制往來鐵路兩側的公路交通用路人，只於無列車通過時開放通行；在列車行經平交道之前，事先以警鈴與閃光號誌警告用路人，並放下遮斷桿阻絕車流，惟此時若遮斷桿或機電

設備發生故障，或者用路人因故搶越、闖越平交道，即可能發生交通事故，輕則造成財產損失，重則導致人員傷亡，而後續造成的車輛停等延滯與鐵路營運損失等相關社會成本，則更為可觀。因此在鐵路與公路的平面交會處，吾人必須更加重視平交道相關安全設施的裝置與妥善程度，以預防事故的發生，並提高其安全性，降低事故發生之機率與可能衝擊。

根據交通部臺灣鐵路管理局（以下簡稱「臺鐵局」）民國 101 年的統計年報指出^[1]，截至民國 101 年底，臺鐵局之營運里程共為 1067.3 公里，路線中共總計設有 537 處平交道，平均 1.99 公里就設置一處平交道，顯示國內平交道設置密度相當密集。另以交通部統計年鑑所記載的民國 100 年交通事故資料為例^[2]，當年度臺鐵局行車事故件數總計 812 件，其中行車事故責任屬於鐵路從業人員之事故件數僅 34 件，占整體比率 4.19%，顯示在鐵路行車事故中，大部分皆為無責任事故。近年來由於平交道與鐵路立體化之工程，因此每年平交道之死亡人數有逐年減少之趨勢；然而若以整體運輸系統而言，每年平交道交通事故所造成的平均死亡程度（以「死亡人數／事故件數」表示），仍高於道路交通事故。顯示在鐵路系統中，平交道仍為高風險區，因此如何提升平交道之安全性，實為鐵路營運管理上重要的議題之一。

我國鐵路運輸的發展，至今已有百年以上的歷史，由於平交道為鐵路與公路運輸的交會地帶，其安全性更須受到重視；然而國內有關平交道之基礎資料與研究分析卻相當貧乏，雖然近年來已有若干研究以計數資料統計模式進行鐵路平交道之事故風險分析^[3]；但所蒐集的資料相對有限且過時，例如截至民國 102 年為止，臺鐵局僅於民國 84 ~ 86 年與民國 96 ~ 99 年間兩度進行平交道資料的普查工作，儘管交通部與臺鐵局每年持續蒐集平交道事故資料，然而隨著時間經過，若干平交道屬性已有改變；更重要的是，與平交道安全水準息息相關的曝光量變數，包括：公路交通量與鐵路列車班次數等資料，臺鐵局僅於上述兩次平交道普查時間加以蒐集，因此可用的變數資料項目與分析年限相對有限。

針對平交道事故資料之分析，若僅對個別平交道每天所發生的事故次數進行探討，則因觀察得之樣本多為「無」事故發生，僅有少數之樣本（平交道）為「有（僅發生一次）」事故發生，發生兩次交通事故之樣本微乎其微，因此適合使用羅吉斯迴歸模式；而如果觀察之日期加長（或範圍加大），則可能因擁有少數之觀察樣本具有發生「一件以上之交通事故」之可能性，適合使用卜瓦松迴歸或負二項迴歸模式進行資料分析。

此外，在進行平交道事故資料之因果分析時，也有必要納入更多影響平交道事故之解釋變數，同時蒐集近期的平交道事故與屬性資料，以完整反映平交道事故的因果關係。爰此，本研究擬根據平交道事故資料的不同特性，以計數資料統計模式（counted data statistical models）進行平交道事故資料之分析，並以臺鐵局所提供近期的平交道事故與屬性資料為基礎，探討臺灣地區鐵路平交道屬性與環境因素對平交道事故頻率（crash frequency）、衝擊程度（crash severity），以及事故風險（crash risk level）之影響，希望可以透過變數間的因果關係分析，找出共同且重要的影響變數，以提供後續研擬安全改善對策之參考。

綜合上述，本研究主要的目的如下：

1. 以離散型計數資料統計模式進行平交道事故風險之分析，以探討鐵路平交道屬性與其他環境因素對平交道事故之影響；以及
2. 針對所構建的平交道事故模式進行彈性分析，評估不同影響因素對平交道安全績效之改善程度，以作為平交道主管機關與鐵路營運單位研擬相關安全改善措施之參考。

二、文獻回顧

2.1 國內相關文獻

國內有關鐵路平交道的早期研究，首見於翁茂城^[4]君的「綜合平交道事故複因素迴歸模型之研究」，該研究利用自行撰寫的迴歸分析程式，選擇列車每日平均里程、平交道數目、道路交通每年肇事次數、車輛擁有數與人口數等解釋變數，用以預測未來的平交道肇事次數，藉此分析解釋變數與肇事次數間的關係，以作為政府單位編列預算與改善平交道的依據。其次，在侯光義^[5]君的「鐵路平交道肇事分析與安全改善之研究」，則提供決策者一個決定平交道的改善優先順位的評估方法，並以民國 63 ~ 68 年平交道列車障礙事故的資料為例，透過數量分析法構建列車障礙預測模式，以說明肇事型態，並針對平交道的現狀與防護功能、影響平交道安全的因素、列車障礙預測模式與生命財產損失分析、平交道工程經濟效益分析等議題進行分析，並結合列車障礙預測模式，建立平交道安全等級提升之評估準則，研究內容豐富且成果完整。

交通部運輸研究所在「臺灣地區鐵路平交道事故之研究」^[6]中，針對臺鐵局民國 78 ~ 82 年鐵路平交道事故之肇事型態與特性加以整理與分析，並比較美國、日本兩國平交道事故的肇事率與死亡率，另外對平交道事故原因進行分析，再將事故型態進行交叉分析。該研究建議鐵路平交道的改善方法可從工程、教育與規劃執行等三方面著手，並提供短期及中長期的改善建議，以降低平交道事故之肇事率。其次，前臺灣省政府交通處以「改善鐵路平交道、提昇交通服務水準、減少肇事促進安全」為目標，透過項目分類，分成都市計畫、交通管制、幾何特性及鐵路系統、列車與事故資料等類型制定工作查核表，進行平交道的改善規劃。首先針對鐵路與公路現況進行現場勘查，踏勘的項目包括：鐵路路線幾何資料、列車行車資料、公路幾何特性、交通管制措施、交通特性、交通量與車種組合等項目，並提出改善方案建議，方案包括：平交道防護措施、標誌標線照明改善、公路幾何設計、交通管制措施、鐵路立體交叉等，藉由公路運作、鐵路運轉，以及都市發展等觀點提出改善策略；並將相關改善方案進行評估及經費估算，提出短、中、長期的改善計畫，配合改善計畫進行績效執行與評析，完成改善規劃的目標^[7]。上述鐵路平交道調查與改善計畫，係政府部門第 1 次針對國內平交道進行詳細的普查，相關調查資料亦為後續若干研究所引用^[3]。

鄭子良^[8]君在「先進偵測系統對鐵路平交道安全之影響研究」中，對國內的平交道進行參數的設定及模式的修正，並找出適用於國內違規搶越平交道機率的模式，結合車輛通

過平交道時間的機率模型，計算搶越車輛出現在平交道上時，列車司機員須緊急採取緊制動作的列車位置，最後比較先進偵測系統裝設前後，肇事機率與肇事嚴重程度的變化，作為主管機關在改善平交道事故上的參考。同年詹坤益^[9]於「先進平交道安全控制蓄意闖越行為之系統設計」中提到，應用先進控制技術預測列車到達平交道時間，適度的延長警示時間以產生交通量自然屏障的效果，可有效降低駕駛人蓄意的闖越行為。其次，施鈞明^[10]君在「應用系統模擬於平交道之風險分析」中，針對平交道模擬方面，以 AweSim 軟體作為模擬環境，建構出平交道模擬模式，驗證固定警示時間策略對於提昇平交道安全之效用，並對此估算事故與延滯成本，據以進行風險分析。最後，唐鵬州^[11]君在「平交道模擬模式構建與肇事風險分析」中，利用 C 程式語言建構以鐵路、公路、平交道控制設施等 3 個子系統為基礎的平交道模擬模式，並帶入鐵、公路與平交道設施之相關參數，模擬平交道系統的運作，藉以分析影響平交道事故之原因。

在統計模式的應用分析中，蔡孟紋^[12]在「平交道事故分析之研究」中，曾使用卜瓦松迴歸、負二項迴歸模式，以及零膨脹卜瓦松迴歸等模式探討平交道事故發生頻率、事故風險，以及事故衝擊程度。其次，楊凱評^[13]在「平交道事故頻率與衝擊分析」中，以類神經網路模式探討平交道事故頻率與衝擊程度的主要肇因，並與卜瓦松迴歸等計數資料統計模式的結果進行比較。然而，雖然目前國內已有若干研究以卜瓦松迴歸、負二項迴歸，以及零膨脹卜瓦松迴歸模式進行鐵路平交道之事故頻率、事故衝擊性，以及事故風險等 3 項議題的分析^[3,13]；但上述研究主要使用臺鐵局在 84～86 年間所進行的第 1 次平交道普查資料，年代久遠，且所考慮之變數仍少，缺乏完整之探討。最後，施伯杰^[14]在「以故障樹與事件樹分析法探討平交道事故風險」中，分析影響平交道事故之因素組合與可能造成的後果，並以臺南市生產路平交道為例，探討不同交通管制設施對於平交道安全管理的效果。

上述國內相關研究所引用的平交道事故資料較為過時，無法研提有效的改善對策；因此，若要針對平交道事故進行完整之研究，實有必要考慮更多平交道事故可能影響之因素，並針對近期的交通事故資料進行不同統計模式的比較分析，同時考量各變數對平交道事故的影響程度，進而評估不同改善措施之績效。

2.2 國外相關文獻

Austin 與 Carson^[15]檢視過去美國聯邦運輸部 (U.S. Department of Transportation, U.S. DOT) 發展的平交道事故頻率預測模式，包括：Peabody Dimmick Formula, New Hampshire Index, National Cooperative Highway Research Program Report Hazard Index (NCHRP HI)，上述危險指標法具有複雜的三階公式限制，可能降低其在預測事故頻率的準確性，故該研究利用統計模式進行 1997 與 1998 年的平交道事故資料分析；該研究探討多項傳統的統計迴歸模式，其中以負二項迴歸模式為較佳之預測模式。實證研究結果指出，影響事故頻率的因素包括：交通特性（夜間通過列車數、年平均日交通量 (AADT)、軌道數、車道數、列車速度等）、道路特性（公路有鋪面處理）、平交道特性（停止標誌、閃光或警鈴、斷面性或

木板製的平交道面板)。

Park 與 Saccomanno^[16] 蒐集 1993 至 2001 年間加拿大平交道屬性、曝光量，以及事故的相關資料，利用資料探勘 (data mining)、負二項迴歸模式為基礎，發展平交道事故預測模式，並評估所選擇的對策對於減少事故是否有顯著的效果。研究結果顯示，公路等級、軌道角度、車輛速度、軌道型態、道路寬度等因素會影響事故的發生。爾後 Saccomanno 與 Lai^[17] 同樣利用加拿大 1993 至 2001 年間平交道事故與相關屬性資料，透過卜瓦松迴歸及負二項迴歸模式，以評估減少事故頻率的對策，最後指出警告設施的有無是減少事故頻率的主要因素。

除了以上常見的卜瓦松及負二項迴歸模式之外，亦有學者採用零膨脹卜瓦松 (Zero-inflated Poisson, ZIP) 迴歸與零膨脹負二項 (Zero-inflated Negative Binomial, ZINB) 迴歸模式探討平交道安全之相關議題。Oh 等人^[18] 分析韓國 1998 至 2002 年間，針對 1,800 個平交道、共 402 件的事故資料，透過伽瑪 (Gamma) 模式找出影響平交道事故的因素。該研究指出，統計上常見以卜瓦松及負二項迴歸模式預估事故發生的做法，由於交通事故中常有「零」事故發生的情形，因此往往低估事故發生率，因而該研究採用 ZIP 迴歸模式進行分析；該研究透過年平均交通量、年平均列車數、事故發生次數、道路設計幾何因素、平交道特性等資料進行事故資料之迴歸分析。研究結果發現，伽瑪模式較能評估影響事故發生的解釋變數。

Raub^[19] 利用美國鐵路署 (Federal Railroad Administration, FRA) 有關中西部 7 個州於 1994 至 2003 年所蒐集的事故資料，透過 SAS 統計分析軟體，探討該 10 年間 4 種平交道的警告系統之績效，包括：僅有平交道警告標誌、停止線、閃光燈、柵欄的平交道設施，個別發生的平交道事故次數、傷亡人數、財產損害，並評估 4 種平交道的事故率。研究結果顯示，僅設有停止線作為警告的平交道，發生事故的比率最高；而設有自動告警設施的平交道，事故比率相對較低，顯示主動式告警設施對於平交道事故的防範，具有一定的安全防護效果。

2.3 小結

上述國內、外平交道風險分析之相關研究多以卜瓦松迴歸與負二項迴歸模式作為研究工具，其中每日公路交通量、列車班次數、列車速度、軌道數等因子，為影響平交道事故之重要因素。然而，臺灣地區的平交道特性與國外相關案例不盡相同，且國內公路交通之車流特性與駕駛人行為亦與國外有異，在公路交通方面，與國外不同之處在於臺灣地區的道路環境中，不僅有汽車車流，尚有機踏車混雜於其中，故混合車流的特性更增加問題的複雜性，尤以鐵、公路交會之平交道鄰近區域，甚至有行人穿越其中，人車爭道的情形屢見不鮮。因此有必要針對影響國內平交道安全水準的相關因素進行廣泛的資料蒐集與分析，並歸納重要的影響因素，以提供交通主管機關與鐵路營運單位進行相關施政之參考。

為了對國內平交道事故進行完整的分析，經由國內、外相關文獻的探討可發現，影響

各國平交道事故之相關變數，包括：平交道屬性與環境因素等因素，有助於本研究建構相關統計模式之參考；本研究將嘗試應用計數資料統計模式與其他適當的分析方法，探討造成平交道事故頻率與衝擊程度的主要成因，最後對所校估之模式進行彈性分析，以評估不同改善措施對於提昇平交道安全水準之績效。

三、資料蒐集與分析

3.1 資料蒐集

本研究的實證分析資料，主要來自臺鐵局於民國 96 至 99 年間、針對全臺各地的平交道進行普查。調查之平交道數共 795 處，其中包括民國 99 年以後已廢除、高架化、封閉、或停止使用之平交道，以及部分調查資料不足之平交道；考量本研究之需求，本研究對於資料不足與非臺鐵主要客、貨運路線上之平交道暫不列入考慮，刪除上述資料後，有效樣本共計 468 處的平交道相關資料。實證研究所蒐集的資料，包含平交道事故資料與平交道相關屬性資料等兩部分：

1. 平交道事故資料

民國 96 至 99 年間，所發生之平交道事故次數、死亡人數，以及受傷人數。

2. 平交道相關屬性資料

此部分又可區分為鐵路營運、平交道相關設施，以及公路特性等相關變數。

3.2 變數定義與說明

本節主要針對平交道名詞與本研究所考慮之變數，進行說明與定義。

1. 安全風險：依據蔡明志^[20]以英國鐵路系統為例，將風險管理之觀念應用於大眾運輸安全管理之作法，當中提及：事故風險係「事件發生之機率與事件發生後之後果的乘積」，意即：風險 (risk) = 發生可能性 (likelihood) × 衝擊程度 (impact)。另根據 Ayyub^[21]的定義，「事故風險」可以視為事故的「可能性或頻率」(likelihood or frequency) 以及「衝擊或嚴重程度」(impact or severity) 的乘積。因此，本研究根據 Ayyub^[21]的定義，分別探討「事故頻率」、「事故衝擊程度」，以及「事故風險」等 3 項風險相關指標的影響變數，希望從不同的角度，找出可能的共同影響變數，以作為後續改善措施的優先對象。
2. 平交道：鐵路與公路交叉路段，為維護列車行經平交道安全通過，設置交通控制設施，以管制人車適當通行。
3. 平交道事故：指在平交道上任何阻礙或干擾列車正常運行的事件，事故不僅可能造成相關人員的傷亡事件，同時亦可能對列車與車輛設備造成損失。
4. 死亡人數：指在觀察期間內，某平交道因交通事故所造成之總死亡人數。

受傷人數：指在觀察期間內，某平交道因交通事故所造成的總受傷人數。

5. 事故頻率：指在觀察期間內，某平交道因交通事故所造成的總事故件數，使用事故頻率當作應變數主要以客觀上事件的多寡來進行事故分析；但在平交道事故中時常見發生事故、卻無人傷亡的情事，因此進一步提出事故風險變數進行平交道安全水準之評估。
6. 事故風險：指在觀察期間內，平交道因發生事故造成死傷人數的總和。在量化的安全風險管理之運作程序上，為能完整地將事故傷亡規模予以量化表示，且希望觀察不同特定變數對於人員死傷的影響（例如：列車速度、車種等），常依不同的傷亡程度擬定對應之傷亡權數，即以「等效死亡當量」(equivalent fatality) 或「等效受傷當量」(equivalent injury) 作為安全風險之衡量單位。本研究以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為例^[22]，基本上1個死亡等於10個重傷或200個輕傷，由於本研究所蒐集的平交道事故資料僅有死亡與受傷之區別，並無輕、重傷的分別，因此定義平交道事故之死傷權重為10：1，即以「等效受傷當量」換算原始資料的死傷人數成為「等效受傷人數」，以量化表示事故的衝擊程度，亦即「等效受傷人數」=10×死亡人數+1×受傷人數。
7. 事故衝擊程度：指平均每件平交道事故造成之人員死傷與財損程度，主要的目的在於評估不同平交道在單位事故的嚴重或衝擊程度，以提供平交道管理單位在進行安全改善時，有關資源配置上之參考。事故衝擊程度等於事故風險程度（以等效死亡人數或等效受傷人數表之）除以事故頻率。由於財產損失資料不易蒐集與衡量，故本研究將著重於交通事故的死傷人數，即：事故衝擊程度=等效死亡人數（或等效受傷人數）／事故頻率。根據上述定義，本研究將事故衝擊程度分為衝擊甚微、輕度衝擊、中度衝擊，以及高度衝擊等4類，詳細分類級距與對應比值內容，請參閱表1說明。事故衝擊程度分級的目的，一方面在於評估不同平交道、在特定期間內的平均事故嚴重程度；另一方面希望透過相關類別變數模型的應用，發掘影響平交道事故嚴重程度的因素，作為後續研提相關改善措施之參考。
8. 平交道屬性變數：分為鐵路營運、平交道相關設施，以及公路特性等3類相關變數，相關變數之定義，請參閱表2內容說明。

表1 衝擊程度分類表

等效死亡人數當量／事故頻率	等級	衝擊程度分類
0	0	衝擊甚微
0.1 ~ 1.0	1	輕度衝擊
1.1 ~ 2.0	2	中度衝擊
2.1 以上	3	高度衝擊

表 2 平交道相關屬性變數一覽表

變 數	定 義	說 明
列車路線別 X_1	0：平溪線、林口線、內灣線、南迴線、屏東線、臺東線、集集線 1：北迴線、宜蘭線、縱貫線、臺中線	列車路線包含縱貫線等主要營運路線與其他支線。
列車班次數 X_2	正整數值 (含零)	列車班次數為該平交道一日所通過列車的總班次數。
平交道種類 X_3	0：半封閉式平交道、人工控制平交道 1：其他平交道 (包含第 1 種平交道、第 2 種平交道、第 3 種甲平交道及專用平交道)	依據我國「鐵路立體交叉及平交道防護設施設置標準與費用分攤規則」 ^[23] 第 14 條之分類，鐵路平交道共分為 6 類。由於第 1 種、第 2 種、第 3 種甲等平交道列車數較多的平交道設有自動警報裝置與遮斷器，部分並有看柵工駐守，故將這類主動式安全防護的平交道設為 1。
平交道寬度 (公尺) X_4	正數值	平交道寬度不一定等於道路寬度，一般平交道區段之寬度比鄰近區域路寬較寬。依據法規，平交道寬度應比道路寬度兩側各加寬 30 公分。
平交道角度 (度) X_5	0：非 90 度 1：90 度	根據交通部頒「公路路線設計規範」 ^[24] 之規定，「平交道之交角不得小於 45 度；未設置警報器或攔路機之平交道，其交角不得小於 60 度。」平交道角度為 0 度表示鐵路與公路平行，交角若為鈍角或銳角，對於行車安全存在危險性，理想狀態為 90 度。
公路等級 X_6	0：省道 1：縣道 2：市區道路 3：鄉道 4：其他 (含村里、巷道、農路、專用道路等)	依平交道所相交的公路等級分類，包含省道、縣道、市區道路、鄉道、以及其他等。
道路寬度 (公尺) X_7	0：小於 3.5 公尺 1：大於等於 3.5 公尺	道路寬度為與鐵路交會的道路實際寬度。
道路坡度 X_8	0：無坡度 1：有坡度	公路縱向坡度往往有短距離的陡坡出現，對於公路行車視距產生不良影響，同時上坡起步或低速檔行進，容易熄火而發生事故。
每日交通量 (PCU) X_9	正整數值 (含零)	以每日計算通過平交道之小型車、機車、大型車等交通量，將之轉換成小客車單位數 (PCU)， $PCU = \text{小客車} \times 1.0 + \text{機車} \times 0.3 + \text{大型車} \times 2.0$ 。

3.3 資料分析

本節針對研究中所使用的變數進行敘述性統計分析，結果如表 3 至表 6 所示。由表 3 的內容可知，在民國 96 至 99 年間，就所分析的 468 處平交道中的事故頻率而言，有 73.29% 的平交道未曾發生過事故，有 19.66% 的平交道發生 1 次事故，約 7.06% 的平交道發生 2 次以上的事故；在事故衝擊程度上，高達 82.69% 的平交道發生事故時並未造成人員傷亡的衝擊，有 16.45% 的平交道發生事故時造成輕度衝擊，約有 1% 的平交道發生事故時造成中度衝擊，另外並無任何平交道發生事故時造成高度衝擊的狀況；最後，在事故風險上，約有 82.69% 平交道發生事故時死傷為 0 人，有 13.89% 平交道發生事故時死傷為 1 人，而有 3.42% 平交道發生事故時造成死傷 2 人以上。

在以平交道相關屬性作為自變數方面，本研究將其區分為鐵路營運相關變數、平交道設施相關變數，以及公路特性相關變數等 3 類。表 4 為鐵路營運相關變數之敘述性統計表，在所蒐集之資料中，在列車路線別變數方面，平交道位於班次數較少之平溪線、林口線、內灣線、南迴線、屏東線、臺東線，以及集集線，占了 40.17%；另外在班次較密集之北迴線、宜蘭線、縱貫線，以及臺中線中，平交道占了總數的 59.83%。上述資料顯示，超過半數的平交道位於班次較密集的路線。另外，每日平均的列車班次數為 116.34 班，標準差為 70.96 班。

另外，表 5 為平交道設施相關變數之敘述性統計表，包含平交道種類和平交道寬度，在所蒐集的 468 處平交道資料中顯示，有 93.59% 的平交道是屬於第 1 種平交道、第 2 種平交道、第 3 種甲平交道，以及專用平交道，僅有 6.41% 的平交道是屬於半封閉式平交道和人工控制平交道；而在 468 處調查的平交道中，平交道的平均寬度為 10.69 公尺，其標準差為 6.37 公尺；在平交道角度上，調查資料顯示約有 66.24% 的平交道與公路交角呈 90 度，僅有 33.76% 的平交道為非正交的狀態。

表 3 應變數之敘述性統計分析表

項目 變數	0 次		1 次		2 次		3 次以上	
	個數	比例	個數	比例	個數	比例	個數	比例
事故 頻率	343	73.29%	92	19.66%	26	5.56%	7	1.50%
項目 變數	衝擊甚微		輕度衝擊		中度衝擊		高度衝擊	
	個數	比例	個數	比例	個數	比例	個數	比例
事故衝擊 程度	387	82.69%	77	16.45%	4	0.85%	0	0%
項目 變數	0 人		1 人		2 人		3 人以上	
	個數	比例	個數	比例	個數	比例	個數	比例
事故 風險	387	82.69%	65	13.89%	13	2.78%	3	0.64%

表 4 鐵路營運相關變數之敘述性統計表

變數	項 目	次數	比例
列車路線別 X_1	0：含平溪線、林口線、內灣線、南迴線、屏東線、臺東線、集集線	188	40.17%
	1：含北迴線、宜蘭線、縱貫線、臺中線	280	59.83%
列車班次數 X_2	平均數	116.34	
	標準差	70.96	

表 5 平交道設施相關變數之敘述性統計表

變數	項 目	次數	比例
平交道種類 X_3	0：半封閉式平交道、人工控制平交道	30	6.41%
	1：其他平交道 (包含第 1 種、第 2 種、第 3 種甲及專用平交道)	438	93.59%
平交道寬度 (公尺) X_4	平均數	10.69	
	標準差	6.37	
平交道與公路交角 (度) X_5	0：非 90 度	158	33.76%
	1：90 度	310	66.24%

表 6 為公路特性相關變數之敘述性統計表，包含：公路等級、道路寬度、道路坡度，以及每日交通量等 4 個變數，從該敘述性分析表中可知，在與鐵路相交的公路等級方面，有 1.92% 為省道公路等級，8.76% 為縣道公路等級，10.9% 為市區道路公路等級，另外有 25.64% 為鄉道公路等級，而有將近半數的平交道是位於村里、巷道、農路、專用道路等公路等級。

在道路寬度上面，有 92.52% 的道路寬度大於 3.5 公尺，只有 7.48% 之道路寬度小於 3.5 公尺。另外在道路坡度的部分，超過半數之道路坡度為有坡度，亦即超過半數之道路是不平坦的，調查資料顯示僅有 21.37% 之道路為平坦。最後，在每日交通量的部分，每日交通量平均約為 4,055 PCUs，標準差為 5,914.06 PCUs。

四、研究方法及步驟

本研究主要針對臺灣地區鐵路「平交道事故頻率」、「事故衝擊程度」，以及「事故風險水準」等風險要項進行探討，根據上述針對事故頻率與事故風險的敘述性統計分析結果，事故頻率或風險資料具離散型資料特性，故本研究嘗試從卜瓦松迴歸 (Poisson regression)、負二項迴歸 (negative binominal regression)、零膨脹卜瓦松迴歸模式 (zero-

inflated Poisson regression) 選取較適當之模式進行分析。此外，根據上述對於平交道事故衝擊程度之定義，事故衝擊程度具有排序性之特性，排序性羅吉斯迴歸模式為適合分析排序性反應變數的模式之一。最後，針對所構建之模式進行彈性分析，據以評估若干顯著變數對於反應變數之影響。以下針對本研究所應用的研究方法，進行概要的說明。

表 6 公路特性相關變數之敘述性統計表

公路等級 X_6	0：省道	9	1.92%
	1：縣道	41	8.76%
	2：市區道路	51	10.90%
	3：鄉道	120	25.64%
	4：其他 (含村里、巷道、農路、專用道路等)	247	52.78%
道路寬度 (公尺) X_7	0：小於 3.5 公尺	35	7.48%
	1：大於等於 3.5 公尺	433	92.52%
道路坡度 X_8	0：無坡度	100	21.37%
	1：有坡度	368	78.63%
每日交通量 (PCU) X_9	平均數	4,054.55	
	標準差	5,914.06	

4.1 卜瓦松迴歸模式

卜瓦松迴歸模式 (Poisson regression) 主要用於處理離散數值資料，為非線性迴歸模式之一，而平交道事故資料為離散且稀少數量的計數資料，因此本研究先從卜瓦松迴歸模式進行分析，說明如下。

假設吾人針對國內 n 處平交道進行調查， A_i 為第 i 處平交道於特定觀察期間內發生事故次數 (或死亡人數、受傷人數) 之計數結果，假設事件次數 A_i 遵循卜瓦松分配，且為非負整數，則其機率密度函數為：

$$P(A_i = a_i) = \frac{e^{-\lambda_i} \lambda_i^{a_i}}{a_i!}, \quad a_i = 0, 1, 2, \dots; i = 1, 2, \dots, n \quad (1)$$

式中，

$P(A_i = a_i)$ ：第 i 處平交道於特定觀察期間內發生 a_i 次事故之機率；

a_i ：特定觀察期間內之事故次數；

λ_i ：第 i 處平交道於特定觀察期間內發生 a_i 次事故之期望事故發生次數。

在卜瓦松迴歸模式中， λ_i 表示第 i 處平交道於特定觀察期間內發發生 a_i 次事故之期望值，且等於其變異數，如式 (2)、式 (3) 所示：

$$E[A_i] = \lambda_i \quad (2)$$

$$E[A_i] = Var[A_i] \quad (3)$$

為確保 λ_i 為正值，故假設 λ_i 和解釋變數向量 X_i 存在指數函數之關係，如式(4)：

$$\lambda_i = e^{\beta X_i} \quad (4)$$

式中，

β ：解釋變數之係數向量；

X_i ：第 i 處平交道於特定觀察期間內之解釋變數向量，例如列車班次數、列車速度等。

結合式 (2) 和式 (4)，可得式 (5)：

$$E[A_i] = \lambda_i = e^{\beta X_i} \quad (5)$$

結合式 (1) 和式 (5)，可得式 (6)：

$$P(A_i = a_i) = \frac{e^{-e^{\beta X_i}} (e^{\beta X_i})^{a_i}}{a_i!} \quad (6)$$

透過最大概似估計法 (maximum likelihood estimation, MLE) 校估參數向量 β ，其概似函數 (likelihood function) 為：

$$L(\beta) = \prod_{i=1}^n \frac{e^{-e^{\beta X_i}} (e^{\beta X_i})^{a_i}}{a_i!} \quad (7)$$

將 $L(\beta)$ 取對數函數，且令 $\ln L(\beta) = LL(\beta)$ ，則：

$$\ln L(\beta) = LL(\beta) = \sum_{i=1}^n \left[-e^{\beta X_i} + a_i \beta X_i - \ln(a_i!) \right] \quad (8)$$

將 $LL(\beta)$ 極大化，以求得 $\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_{q-1}$ ，之最大概似估計量，其中 q 為參數個數。

在模式適合度檢定的部分，卜瓦松迴歸模式以概似比統計量 ρ^2 作為模式解釋能力之指標，主要用來衡量所構建之模式與資料之間是否有良好的配適， ρ^2 值介於 0 ~ 1 之間，其計算方式如式 (9)；其值愈接近 1，則表示模式的解釋能力愈高、反之亦然。

$$\rho^2 = 1 - \frac{LL(\beta)}{LL(0)} \quad (9)$$

式中，

$LL(\beta)$ ：參數估計值 β 之對數概似函數值；

$LL(0)$ ：參數估計值為 0 之對數概似函數值。

卜瓦松迴歸模式之優點，在於其對特定觀察期間內所發生的隨機獨立事件有合理的描述，故可有效處理計數性之資料。雖然卜瓦松迴歸模式為處理離散型分配之隨機變數，但其參數 λ 為連續性變數，因此迴歸式中並不違反解釋變數為連續性之基本假設；然而，該模式的缺點在於當交通事故資料之期望值不等於其變異數時，即資料呈現過度離散 (overdispersion) 的情形時，若以卜瓦松迴歸模式分析，則會導致實際觀測資料之期望值不等於變異數，此時以負二項迴歸模式分析較為合適。

4.2 負二項迴歸模式

負二項迴歸模式 (negative binomial regression) 是由卜瓦松迴歸模式衍伸出來的，亦為非線性迴歸模式之一。負二項迴歸模式與卜瓦松模式相似，相異之處在於負二項迴歸模式係透過 Gamma 分配描述負二項迴歸模式之參數，如式 (10) 所示：

$$\lambda_i = e^{\beta X_i + \varepsilon_i} \quad (10)$$

上式可改寫為：

$$\ln \lambda_i = \beta X_i + \varepsilon_i \quad (11)$$

式中，

λ_i ：卜瓦松分配之期望次數；

ε_i ：服從平均數為 1，變異數為 α^2 之 Gamma 分配，其條件機率如式 (12) 所示。

$$P(A_i = a_i | \varepsilon_i) = \frac{\exp[-\lambda_i \exp(\varepsilon_i)] [\lambda_i \exp(\varepsilon_i)]^{a_i}}{a_i!}, \quad a_i = 0, 1, 2, \dots; i = 1, 2, \dots, n \quad (12)$$

$P(A_i = a_i | \varepsilon_i)$ 為在有誤差項的情況下，第 i 處平交道於特定觀察期間內發生 a_i 次平交道事故之機率。

針對式 (12) 進行積分運算，則可得到以下機率分配：

$$P(A_i = a_i) = \frac{\Gamma(\theta + a_i)}{\Gamma(\theta) a_i!} \mu_i^\theta (1 - \mu_i)^{a_i} \quad (13)$$

其中 $\left(\mu_i = \frac{\theta}{\theta + \lambda_i}; \theta = \frac{1}{\alpha}\right)$ ，而且 $\Gamma(\cdot)$ 表示 Gamma 函數。

在負二項迴歸模式中，其期望值與變異數分別如式 (14)、式 (15) 所示：

$$E[A_i] = \mu_i \quad (14)$$

$$Var[A_i] = \mu_i + \alpha\mu_i^2 \quad (15)$$

與卜瓦松迴歸相同，負二項迴歸模式亦可透過最大概似估計法 (MLE) 校估參數 λ_i ，其概似函數為：

$$L(\lambda_i) = \prod_{i=1}^n \frac{\Gamma\left(\left(\frac{1}{\alpha}\right) + a_i\right)}{\Gamma\left(\frac{1}{\alpha}\right)^{a_i}!} \left(\frac{\frac{1}{\alpha}}{\left(\frac{1}{\alpha}\right) + \lambda_i}\right)^{\frac{1}{\alpha}} \left(\frac{\lambda_i}{\left(\frac{1}{\alpha}\right) + \lambda_i}\right)^{a_i} \quad (16)$$

負二項迴歸模式解決了資料期望值與變異數不一定相等之問題，由式 (14) 及式 (15) 可得知， $Var[A_i] = E[A_i][1 + \alpha E(A_i)] = E[A_i] + \alpha E[A_i]^2$ ，由此式可知，當 α 值趨近於 0 時，變異數會趨向等於期望值，則原本的負二項分配就會退化成卜瓦松分配；當 α 值顯著不為 0 時，則變異數會大於期望值。其中， α 值稱為「離散係數」(overdispersion parameter)，當變異數大於期望值時，表示資料有離散的情形。此時，透過 t 檢定 (t -test) 可以判斷是否應採用負二項迴歸模式，其統計假說如下：

$$\begin{aligned} H_0 : \alpha &= 0 \\ H_1 : \alpha &\neq 0 \end{aligned} \quad (17)$$

若檢定結果為拒絕虛無假設 H_0 ，即 α 顯著不為 0，代表事故資料的期望值不等於變異數，此時應採用負二項迴歸模式；若檢定結果不拒絕虛無假設 H_0 ，則表示 α 與 0 並沒有顯著之差異，代表資料之期望值等於變異數，此時建議採用卜瓦松迴歸模式。在模式評估方面，負二項迴歸模式與卜瓦松迴歸模式類似，皆以概似比統計量 ρ^2 作為評估模式解釋能力之指標。

4.3 零膨脹卜瓦松迴歸模式

為了處理資料過度離散之問題，後續則衍生出零膨脹卜瓦松迴歸模式。Oh 等人^[18]考量交通事故中含有過多零事件的發生，往往低估事故的發生率，於是提出零膨脹卜瓦松模式 (zero-inflated Poisson, ZIP)，原則上可以有效解決資料過度離散的情形。零膨脹卜瓦松機率密度函數為：

$$\text{當 } A_i = 0, \text{ 其機率為 } P(A_i = 0) = p_i + (1 - p_i)e^{-\lambda_i} \quad (18)$$

$$\text{當 } A_i = a_i, \text{ 其機率為 } P(A_i = a_i) = \frac{(1 - p_i)e^{-\lambda_i} \lambda_i^{a_i}}{a_i!}, \quad a_i = 1, 2, \dots; i = 1, 2, \dots, n \quad (19)$$

式中，

$P(A_i = a_i)$ ：第 i 處平交道於特定觀察期間內發生 a_i 次事故之機率；

p_i ：第 i 處平交道發生事故之機率；

λ_i ：第 i 處平交道之卜瓦松參數。

在零膨脹卜瓦松迴歸模式中，其期望值與變異數分別如式 (20)、式 (21) 所示：

$$E[A_i] = (1 - p_i)\lambda_i \quad (20)$$

$$Var[A_i] = \lambda_i(1 - p_i)(1 + \lambda_i p_i) \quad (21)$$

由式 (20)、式 (21) 可以看出，在零膨脹卜瓦松迴歸模式中，其期望值與變異數不相等，且變異數大於期望值，如以下所示：

$$\frac{Var[A_i]}{E[A_i]} = 1 + (1 - p_i)\lambda_i = 1 + \left(\frac{p_i}{1 - p_i} \right) E(A_i) > 1 \quad (22)$$

欲判定是否適用零膨脹卜瓦松迴歸模式，則以 Vuong^[25] 所提出之 Vuong 統計量 (Vuong statistics，亦稱 V 檢定統計量) 檢定之：

$$V = \frac{\sqrt{n} \left[\left(\frac{1}{n} \right) \sum_{i=1}^n m_i \right]}{\sqrt{\left(\frac{1}{n} \right) \sum_{i=1}^n (m_i - \bar{m})^2}} = \frac{\sqrt{n}(\bar{m})}{S_m} \quad (23)$$

$$(\text{其中， } m_i = \ln \frac{f_1(a_i | X_i)}{f_2(a_i | X_i)}; \bar{m} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n m_i)$$

式中，

$f_1(a_i | X_i)$ ：零膨脹卜瓦松迴歸模式機率密度函數；

$f_2(a_i | X_i)$ ：卜瓦松或負二項迴歸模式機率密度函數；

$\bar{m}$ ：平均數；

S_m ：標準差；

n ：樣本數。

Vuong 統計量服從標準常態分配，而模式之決策準則以 90% 為信賴區間，當 Vuong

統計量之值大於 90% 信賴區間下之 t 檢定值 1.645，表示其較適合零膨脹卜瓦松迴歸模式；當 Vuong 統計量之值介於 -1.645 與 1.645 之間，則無法判別零膨脹卜瓦松迴歸模式是否為較適合之模式，此時則考慮採用負二項迴歸模式或卜瓦松迴歸模式；當 Vuong 統計量之值小於 -1.645，則適合採用卜瓦松迴歸模式或負二項迴歸模式。有關 V 檢定統計量之決策準則，如圖 1 所示。



資料來源：Vuong ^[25]。

圖 1 Vuong 統計模式決策

4.4 彈性分析

彈性分析主要用來評估模式中解釋變數的單位變化對反應變數之影響，以本研究所構建之鐵路平交道事故頻率模式為例，即為模式中各解數變數變動一定程度對平交道發生事故次數之影響。彈性的定義為：

$$E_{X_{ik}}^{\lambda_i} = \frac{\partial \lambda_i}{\lambda_i} \times \frac{X_{ik}}{\partial X_{ik}} \quad (24)$$

式中，

E ：彈性值；

X_{ik} ：第 i 處平交道之解釋變數 k 之值；

λ_i ：第 i 處平交道於特定觀察期間內發生事故之平均數。

根據式 (11) $\ln \lambda_i = \beta X_i + \varepsilon_i$ ，可得：

$$E_{X_{ik}}^{\lambda_i} = \frac{\partial \lambda_i}{\partial X_{ik}} \times \frac{X_{ik}}{\lambda_i} = \frac{\frac{\partial \lambda_i}{\partial X_{ik}}}{\frac{\lambda_i}{X_{ik}}} = \frac{\beta e^{\beta X_i}}{e^{\beta X_i}} = \beta_k x_{ik} \quad (25)$$

其中， β_k 為 x_{ik} 之係數。

此處彈性的意義為解釋變數變動 1% 時，平均平交道發生事故次數變化之百分比。式 (25) 之計算方式適用於連續變數之彈性計算，稱為直接彈性 (direct elasticity)。

4.5 排序性羅吉斯迴歸模式

在社會科學領域中，排序性問題相當普遍，常以李克特 (Likert) 類型尺度進行變數之測量，例如「非常不同意、不同意、沒意見、同意、非常同意」，對應的反應變數通常以 1、2、3、4、5 之等整數序列編碼。然而，反應變數之分類類別間有優劣或高低之排序關係存在時，其各類別間之差距為未知；若以李克特類型尺度測量，並直接視為「連續」變數，則隱含一項假設條件，即各類別間之差距相等。在迴歸模式中，若將排序性反應變數作為連續變數處理，則可能產生誤導之結果。因此，當反應變數之類別具有排序性時，則應選擇較適合分析排序性問題之模式，其中排序性羅吉斯迴歸 (ordered logistic regression) 模式為適合分析排序性反應變數的模式之一^[3]。本研究針對平交道事故衝擊程度的定義，其資料具有排序與類別特性，故以排序性羅吉斯迴歸模式構建平交道事故衝擊程度模式，藉以探討平交道相關屬性對平交道事故衝擊程度之影響。

排序性羅吉斯迴歸模式為二元羅吉斯迴歸模式之擴展，其定義如下：

$$a^* = \beta_0 + \sum_{j=1}^J \beta_j x_j + \varepsilon_j \quad (26)$$

式中，

a^* ：無法直接測量的觀測現象之內在趨勢；

β_0 ：截距項；

β_j ：解釋變數 x_j 的係數；

x_j ：鐵路平交道事故衝擊程度之解釋變數；

ε_j ：誤差項。

本研究所構建的鐵路平交道事故衝擊模式，重新定義如下式：

$$a = m, \text{ 若 } \mu_{m-1} < a^* \leq \mu_m, \quad m = 0, 1, \dots, M \quad (27)$$

式中，

a^* ：所觀測之平交道的事故衝擊程度分類；

a ：鐵路平交道事故衝擊程度。

$$\begin{cases} \mu_m : a = m, \text{ 上界門檻值;} \\ \mu_{m-1} : a = m, \text{ 下界門檻值。} \end{cases}$$

μ_m 及 μ_{m-1} 用以區分無法直接測量的觀測現象內在趨勢 a^* 對應的 a 。

若將鐵路平交道事故衝擊程度分為 4 個等級，則 $M = 3$ ，且各等級分別為：

$$a = \begin{cases} 0, & \text{if } \mu_{-1} < a^* \leq \mu_0 \text{ 比值為 } 0 \\ 1, & \text{if } \mu_0 < a^* \leq \mu_1 \text{ 比值介於 } 0.1 \sim 1.0 \text{ 之間} \\ 2, & \text{if } \mu_1 < a^* \leq \mu_2 \text{ 比值介於 } 1.1 \sim 2.0 \text{ 之間} \\ 3, & \text{if } \mu_2 < a^* \leq \mu_3 \text{ 比值為 } 2.1 \text{ 以上} \end{cases} \quad (28)$$

當給定 X 值，則其累積機率如式 (29) 所示：

$$\begin{aligned} P(a \leq m | X) &= P(a^* \leq \mu_m) = P\left[\left(\alpha + \sum_{j=1}^J \beta_j x_j + \varepsilon_j\right) \leq \mu_m\right] \\ &= P\left[\varepsilon_j \leq \mu_m - \left(\alpha + \sum_{j=1}^J \beta_j x_j\right)\right] \\ &= F[\mu_m - (\alpha + \sum_{j=1}^J \beta_j x_j)] \end{aligned} \quad (29)$$

採用 Logit 或 Probit 模式作為排序性反應變數之建立模型函數，則可產生排序性羅吉斯或普羅比迴歸模式。以排序性羅吉斯迴歸模式為例，定義如下：

$$\ln \left[\frac{P(a \leq m | X)}{1 - P(a \leq m | X)} \right] = \mu_m - (\alpha + \sum_{j=1}^J \beta_j x_j) \quad (30)$$

Logit 模式是按照反應變數之分類排序定義之，即模式之發生比是透過該發生比分子中的事件機率，依照排序性連續累積而成。其累積機率計算方式如下：

$$P(a \leq m | X) = P(a^* \leq \mu_m) = \frac{e^{(\mu_m - \sum_{j=1}^J \beta_j x_j)}}{1 - e^{(\mu_m - \sum_{j=1}^J \beta_j x_j)}} \quad (31)$$

透過式 (31) 可推導出鐵路平交道事故衝擊程度 m 之機率，如表 7 所示。

表 7 鐵路平交道衝擊程度分類與等級機率

a^*	比值	衝擊程度等級	機率
$\mu_{-1} < a^* \leq \mu_0$	0	0 (衝擊甚微)	$P(a = 0) = P(a \leq 0)$
$\mu_0 < a^* \leq \mu_1$	0 ~ 1.0	1 (輕度衝擊)	$P(a = 1) = P(a \leq 1) - P(a \leq 0)$
$\mu_1 < a^* \leq \mu_2$	1.1 ~ 2.0	2 (中度衝擊)	$P(a = 2) = P(a \leq 2) - P(a \leq 1)$
$\mu_2 < a^* \leq \mu_3$	2.1 以上	3 (高度衝擊)	$P(a = 3) = 1 - P(a \leq 2)$

在羅吉斯迴歸模式中，發生比表示事件發生之機率與事件不發生之機率的比值，其公式如下：

$$\ln \left[\frac{P(a \leq m|X)}{1 - P(a \leq m|X)} \right] = \beta_{0j} - \sum_{j=1}^J \beta_j x_j \quad (32)$$

本研究中，排序性羅吉斯迴歸模式之反應變數有 4 個類別，則模式包含 3 個累積 Logit 函數：

$$\ln\left(\frac{p_0}{p_1 + p_2 + p_3}\right) = \beta_{00} - \sum_{j=1}^J \beta_j x_j \quad (33)$$

$$\ln\left(\frac{p_0 + p_1}{p_2 + p_3}\right) = \beta_{02} - \sum_{j=1}^J \beta_j x_j \quad (34)$$

$$\ln\left(\frac{p_0 + p_1 + p_2}{p_3}\right) = \beta_{02} - \sum_{j=1}^J \beta_j x_j \quad (35)$$

(其中， $p_0 + p_1 + p_2 + p_3 = 1$)

式中，

- p_0 ：平交道事故衝擊程度為「衝擊甚微」之機率；
- p_1 ：平交道事故衝擊程度為「輕度衝擊」之機率；
- p_2 ：平交道事故衝擊程度為「中度衝擊」之機率；
- p_3 ：平交道事故衝擊程度為「高度衝擊」之機率。

五、模式校估結果與分析

本研究嘗試從卜瓦松迴歸、負二項迴歸、零膨脹卜瓦松迴歸，以及排序性羅吉斯迴歸模式中，篩選出適合評估平交道事故風險因素的模式，並以 LIMDEP V9.0 軟體校估模式，找出造成平交道事故的主要因素。本章將分別針對平交道事故頻率模式、事故衝擊程度模式，以及事故風險模式說明模式校估結果，並針對所構建之模式進行彈性分析或發生比分析，期望在資源有限的情況下，發掘改善幅度最大的變數，據以提出明確的改善建議，以提供鐵路平交道主管單位推動相關政策之參考。

5.1 平交道事故頻率模式

5.1.1 平交道事故頻率模式校估結果

在平交道事故頻率部分，由於零膨脹卜瓦松迴歸模式之 Vuong 統計量為 -0.3118，在 90% 信賴水準下，其值介於查表值 -1.645 與 1.645 之間，因此根據模式選擇決策準則無法判別零膨脹卜瓦松迴歸模式是否為較適合之模式，故考慮採用負二項迴歸模式和卜瓦松迴

歸模式探討之。然而，採用負二項迴歸模式進行分析時，其離散係數並不顯著，顯示平交道事故頻率資料並未呈現過度離散的現象，因此最後選擇卜瓦松迴歸模式進行平交道事故頻率資料之分析。

在顯著水準為 0.05 的情況下，平交道事故頻率模式校估結果如表 8 所示。平交道事故頻率模式之 ρ^2 值為 10.70%，代表相對於 null 模式（模式僅含常數項、不包括任何解釋變數），該模式之解釋能力增加 10.70%。在平交道事故頻率模式中，平交道事故頻率為被解釋變數，即在調查之 4 年期間，平交道事故次數為被解釋變數，並透過變數選擇程序篩選重要的解釋變數。首先將 t 值大於 1.96 及小於 -1.96 之變數保留至模式中，再以逐步迴歸法進行變數選擇，直至模式內之解釋變數皆為顯著。最後篩選出之顯著解釋變數包括：列車路線別（包含：北迴線、宜蘭線、縱貫線、臺中線）、列車班次數、平交道種類為其他（包含：第 1 種平交道、第 2 種平交道、第 3 種甲平交道，以及專用平交道），以及每日交通量等 4 項變數。透過表 8 之模式校估結果可知，估計係數皆為正向，分別說明如下。

當列車路線為班次數較密集之北迴線、宜蘭線、縱貫線，以及臺中線時，相較於班次數較少之平溪線、林口線、內灣線、南迴線、屏東線、臺東線，以及集集線，其發生的平交道事故頻率會較高。此外，列車班次數愈多，則平交道發生事故次數會增加；即當列車班次數愈多、愈密集，代表平交道之交通曝光量愈大，平交道發生事故頻率就可能增加。在平交道種類的變數上，當平交道種類為其他時（包含：第 1 種平交道、第 2 種平交道、第 3 種甲平交道，以及專用平交道），這些平交道通常皆位於西部幹線、交通量較大的地方，相較於平交道種類為半封閉式平交道與人工控制平交道而言，平交道發生事故次數相對較高。

另一方面，每日交通量變數也是顯著的正相關，亦即當每日交通量之值愈高，平交道發生事故的頻率亦會增加，表示在公路段上之交通曝光量較大，平交道發生事故的頻率相對就會提高。

表 8 平交道事故頻率模式校估結果

變數	估計係數	t 值	p -value
常數項	-3.607	-5.890	0.000
列車路線別（包含：北迴線、宜蘭縣、縱貫線、臺中線）	0.600	2.016	0.044
列車班次數	0.006	3.408	0.001
平交道種類為其他（包含：第 1 種平交道、第 2 種平交道、第 3 種甲平交道，以及專用平交道）	1.263	2.154	0.031
每日交通量（單位：PCU）	0.00003	2.736	0.006
樣本數	468		
$LL(0)$	-377.88		
$LL(\beta)$	-337.46		
ρ^2 值	10.70%		

5.1.2 平交道事故頻率彈性分析

本節主要針對平交道事故頻率模式進行顯著變數之彈性分析，事故頻率的模式之彈性分析結果如表 9。在彈性分析中，當彈性值 >1 時，稱為有彈性 (elastic)；反之，當彈性值 <1 ，則稱為無彈性 (inelastic)。在表 9 的平交道事故頻率彈性分析結果中，彈性值表示當解釋變數變動 1%，平均平交道事故發生次數變動之百分比。彈性分析適用於連續變數之彈性計算，亦即直接彈性之分析。

表 9 平交道事故頻率之彈性分析結果

變數	彈性值
常數項	-1.303
列車班次數	0.002
每日交通量 (單位：PCU)	0.00001

透過彈性值的大小可以得知，在列車班次數的彈性值為 0.002，表示當列車班次數增加 1%，平均平交道事故頻率會增加 0.002%。此外，每日交通量之彈性值為 0.00001，顯示公路側交通量若增加 1%，則平均平交道發生事故頻率將增加 0.00001%。根據彈性分析結果顯示，平交道附近的鐵、公路交通量的曝光量越高，則發生平交道事故頻率或件數也隨之增加。上述彈性分析的量化結果，可以提供鐵路平交道主管機關在研擬相關安全改善措施時之參考。

5.2 平交道事故衝擊程度模式

5.2.1 平交道事故衝擊程度模式校估結果

在平交道事故衝擊程度模式中，模式中的被解釋變數為平交道事故衝擊程度，為等效受傷人數死亡當量除以事故頻率所得，而本研究將平交道事故所造成的衝擊程度分為 4 個類別，亦即：衝擊甚微、輕度衝擊、中度衝擊，以及高度衝擊程度，表 10 為平交道事故衝擊程度模式校估結果、表 11 則為平交道事故衝擊程度模式勝算比 (odds ratio) 校估結果。由表 10 平交道事故衝擊程度模式校估結果可得知，顯著之解釋變數為列車班次數、平交道寬度，以及公路等級為市區道路等 3 項變數。在顯著水準 α 為 0.10 的情況下，平交道事故衝擊程度模式之 ρ^2 值為 8.7810.03%，且模式中顯著的影響變數皆符合吾人的先驗知識，其中列車班次數變數在平交道事故頻率模式與平交道事故衝擊程度模式中皆為顯著的解釋變數，顯示交通曝光量變數對於事故頻率與事故衝擊皆有顯著的影響。

在模式解釋方面，估計係數之正負值代表各變數中，該類別之事故衝擊程度相對於其基底之類別之正負影響效果，本研究以衝擊程度為衝擊甚微 (即類別為 0) 作為參照類別。

根據實證研究結果顯示，顯著變數之估計係數皆為正向，其中，在列車班次數方面，倘若平交道上的列車班次數越多、越密集，代表平交道之交通曝光量愈大，一旦發生交通事故，則平交道發生事故的衝擊程度就越大。另外在平交道寬度估計係數方面也為正值，代表平

表 10 平交道事故衝擊程度模式校估結果

變數	估計係數	<i>t</i> 值	<i>p</i> -value
常數項 1	-3.402	-8.561	0.000
常數項 2	-4.240	6.488	0.000
常數項 3	-7.948	6.438	0.000
列車班次數	0.010	6.039	0.000
平交道寬度	0.033	1.713	0.087
公路等級 (市區道路)	0.767	2.210	0.027
樣本數	468		
$LL(\theta)$	-282.52		
$LL(\beta)$	-257.70		
ρ^2 值	8.78%		

表 11 平交道事故衝擊程度模式勝算比 (odds ratio) 校估結果

變數	發生比之值
常數項 1	—
常數項 2	—
常數項 3	—
列車班次數	1.0013
平交道寬度	1.0042
公路等級 (市區道路)	1.1171

交道寬度愈寬，則平交道發生事故的衝擊程度也越高。平交道寬度變數是指道路在平交道區段之路寬，依據交通部頒「鐵路立體交叉及平交道防護設施設置標準與費用分擔規則」之規定^[23]，平交道鋪設的寬度應比道路之寬度每側加寬 30 公分，由此可看出，當路寬較寬，在同一時間相同的車流速度所能通過平交道的最大流量亦會增加。故推斷平交道寬度愈寬，一般通過的公路交通量愈多，惟兩者並無必然的因果關係；由於較寬的平交道其車種組成隨之複雜，因此一旦發生交通事故，則平交道事故的衝擊程度也會較高。最後，當平交道所相交的公路等級為市區道路，相較於與平交道交會的公路等級為省道、縣道、鄉

道或村里、巷道、農路、專用道路等而言，平交道事故發生的衝擊程度會提高。當平交道所相交的公路等級為市區道路，表示平交道公路側的交通量相對較大且車種組成複雜，甚至於行人與腳踏車騎士夾雜於其中，一旦發生平交道事故，則導致的衝擊程度也會較大。

5.3 平交道事故風險模式

5.3.1 平交道事故風險模式校估結果

本研究透過 LIMDEP V9.0 軟體模式篩選適合之模式進行分析，在平交道事故風險方面，由於零膨脹卜瓦松迴歸模式之 Vuong 統計量為 -0.5205 ，在 90% 信賴區間之水準下，其值介於查表值 -1.645 與 1.645 之間，因此根據模式選擇決策準則無法判別零膨脹卜瓦松迴歸模式是否為較適合之模式，故考慮採用負二項迴歸模式和卜瓦松迴歸模式進行分析。採用負二項迴歸模式進行分析時，其離散係數之 t 值為 5.356 、 p 值 $<10^{-3}$ ，即離散係數顯著不為零，顯示平交道事故風險資料呈現過度離散的現象，因此最後選擇以負二項迴歸模式進行平交道事故風險資料之分析。

在顯著水準為 0.05 的情況下，平交道事故風險模式校估結果如表 12 所示。平交道事故風險模式之 ρ^2 值為 64.63% ，代表相對於 null 模式（模式僅含常數項、不包括任何解釋變數），該模式之解釋能力增加 64.63% 。在平交道事故風險模式中，平交道事故風險為被解釋變數，即在調查之 4 年期間內，因平交道事故造成的死傷人數以「等效受傷當量」化為「等效受傷人數」作為被解釋變數。

透過變數選擇程序篩選重要的解釋變數，首先將 t 值大於 1.96 及小於 -1.96 之變數保留至模式中，再以逐步迴歸法進行變數選擇，直至模式內之解釋變數皆為顯著為止。最後，在該模式中，篩選出之顯著解釋變數包括：列車路線別與平交道寬度等兩項變數。透過表 12 之模式校估結果可知，兩項變數之估計係數皆為正向。

表 12 平交道事故風險模式校估結果

變數	估計係數	t 值	p -value
常數項	-2.554	-4.325	0.000
列車路線別 (包含：北迴線、宜蘭縣、縱貫線、臺中線)	2.329	4.171	0.000
平交道寬度	0.092	2.055	0.040
Alpha	12.6034	5.3560	0.000
樣本數	468		
$LL(0)$	-1281.465		
$LL(\beta)$	-453.242		
ρ^2 值	64.63%		

由表 12 之平交道事故風險模式校估結果顯示，在顯著水準為 0.05 的情況下，平交道事故風險模式之 ρ^2 值為 64.63%，其值相對較高；但在模式中顯著影響的解釋變數並不多，模式校估結果僅找出兩項顯著變數，且係數皆為正向。在列車路線別方面，倘若平交道位於北迴線、宜蘭縣、縱貫線、臺中線等臺鐵主要的運輸幹線，則平交道事故風險亦較高，主要原因在於這些平交道多位於人車頻繁、且列車班次較多的路線上，發生交通衝突或事故的機率相對較高，因此造成的事故死傷人數亦較其他位於臺鐵支線的平交道事故死傷人數較多，亦即風險程度以「等效受傷人數」的量化指標評估結果，相對風險程度較高。其次，平交道寬度越寬，則平交道發生事故的風險程度也越高；如前所述，平交道寬度與道路寬度呈正向關係，道路寬度越寬，一般而言，道路等級越高、交通量亦較頻繁。因此，平交道寬度越寬，來往的人車可能較密集，一旦發生交通事故，則死傷人數隨之較高，亦即事故風險程度亦較高。

5.3.2 平交道事故風險彈性分析

本節主要針對平交道事故風險模式進行顯著變數之彈性分析，在事故風險模式之彈性分析結果如表 13。在表 13 的平交道事故風險彈性分析結果中，彈性值表示當解釋變數變動 1%，平均平交道事故發生之死傷人數以「等效受傷人數」表示之變動百分比。

透過彈性值的大小可以得知，在平交道寬度的變數上，其彈性值為 0.1457，表示平交道寬度增加 1%，則平交道事故風險之「等效受傷人數」值將增加 0.1457%。

表 13 平交道事故風險之彈性分析結果

變數	彈性值
常數項	-4.0606
平交道寬度	0.1457

六、結論與建議

本研究主要針對臺灣地區鐵路平交道「事故頻率」、「事故衝擊程度」，以及「事故風險水準」等要項進行探討，透過離散型計數資料模式與類別資料模型之應用，進行平交道事故之因果關係分析。針對上述課題，整理本研究的結論如後。

1. 分析臺鐵所提供的最新平交道事故與屬性資料結果顯示，在平交道事故頻率部分，透過模式選擇決策準則以卜瓦松迴歸模式較適合；在平交道事故風險部分，同樣是以卜瓦松迴歸模式較適合；最後分別構建平交道事故頻率與平交道風險模式，並對其進行彈性分析。
2. 在平交道事故頻率模式中，平交道種類為第 1 種、第 2 種、第 3 種甲，以及專用平交道

時，相較於平交道種類為半封閉式與人工控制平交道而言，發生平交道事故的頻率較高，顯示即使在設有遮斷器與警報裝置的主動式平交道，其事故頻率仍然較高，可能與公路側駕駛人的不耐久候或趕時間而闖越平交道有關。此外，列車班次數及每日交通量也是影響平交道事故頻率增加的主要變數，因此若要有效的降低平交道事故頻率，可以考慮如何紓解公路側的交通量，例如提供公路側交通的替代道路，必要時加以立體化，以避免車輛行經若干危險平交道。

3. 在事故衝擊程度模式中，若平交道的寬度越寬，一旦平交道發生事故，其所造成的衝擊將會提高。此外，若與平交道所交會的公路等級為市區道路，一旦平交道發生事故，其所造成的衝擊也會提高。顯示平交道較寬或人車交會頻繁的市區道路，將會提高平交道事故的衝擊程度。
4. 由平交道事故風險模式校估結果可得知，在兩項顯著的變數中，列車路線別相對於平交道寬度對於事故風險的影響更為顯著，亦即平交道位於臺鐵主要幹線的各路線，相對於其他位於支線的平交道，其事故風險程度以「等效受傷人數」衡量之，相對較高。
5. 綜合整理以上平交道事故頻率、事故衝擊程度，以及事故風險等 3 項模式之校估結果，可以得知公路等級的不同、平交道寬度，以及列車班次數或公路交通量等曝光量變數，皆為影響平交道事故多寡與嚴重程度的重要因素。

本文在研究過程中，基於量化風險管理之需要，對於平交道事故資料曾進行若干處理與假設，未來相關研究可以進一步檢討相關假設的合理性，以發掘更關鍵的影響平交道事故的風險因素，以及其他可能影響平交道安全水準的因素。針對未來研究建議，進一步說明如後。

1. 在事故衝擊與風險模式的分析中，有關量化安全風險管理的程序方面，由於各國對於死亡與受傷之權重尚未有統一的定義，因此為了能完整地將事故傷亡量化表示，本研究參考英國的相關作法，暫時將「死亡」與「受傷」之權數設為 10:1；在未來的研究中，建議可以依事故傷亡的程度所對應的直接與間接成本，擬定相對之傷亡權數，透過「等效死亡當量」或「等效受傷當量」作為安全風險之衡量單位，並採用相關的量化模式進行分析。
2. 本研究透過歷史資料的蒐集與分析，探討影響平交道交通事故的主要肇因，在資料蒐集上，無法針對發生事故當下的平交道進行交通量調查，僅能依據臺鐵以某日所調查的交通量為代表，因此可能導致與事故發生當下的真實流量有所落差；未來在進行相關研究時，若能透過自動化的車輛偵測設施蒐集即時交通量資料，不但能提升模式估計的準確性，也可以據以研提更適切的改善建議。
3. 後續相關研究中，可以考慮納入平交道事故發生當時的氣候、尖離峰時間等因素，將交通事故發生當下的環境因素進一步納入考量。此外，若能蒐集穿越平交道的駕駛人行為，以了解駕駛人生心理層面相關因素對於事故發生的影響，並針對平交道資料特性的不同，透過資料分類的前置分析，以進行不同迴歸模式的構建，將更有助於釐清造成平

交道事故的真正肇因，作為未來安全改善之參考依據。

參考文獻

1. 交通部臺灣鐵路管理局，101 年統計年報，民國 101 年。
2. 交通部統計處，交通部統計年鑑，民國 101 年。
3. 胡守任、李治綱、李薇婷，「以計數性資料統計模式探討平交道事故風險」，中華民國運輸學會第 25 屆學術論文研討會論文集，中華民國運輸學會，民國 99 年。
4. 翁茂城，「綜合平交道事故複因素迴歸模型之研究」，成功大學土木工程學系博士論文，民國 64 年。
5. 侯光義，「鐵路平交道肇事分析與安全改善之研究」，成功大學交通管理科學系碩士論文，民國 69 年。
6. 交通部運輸研究所，臺灣地區鐵路平交道事故之研究，民國 85 年。
7. 前臺灣省政府交通處，臺灣地區鐵路平交道改善規劃，民國 87 年。
8. 鄭子良，「先進偵測系統對鐵路平交道安全之影響研究」，中央大學土木工程學系碩士論文，民國 91 年。
9. 詹坤益，「先進平交道安全控制蓄意闖越行為之系統設計」，成功大學交通管理科學系碩士論文，民國 91 年。
10. 施鈞明，「應用系統模擬於平交道之風險分析」，成功大學交通管理科學系碩士論文，民國 93 年。
11. 唐鵬州，「平交道模擬模式構建與肇事風險分析」，成功大學交通管理科學系碩士論文，民國 95 年。
12. 蔡孟紋，「平交道事故分析之研究」，成功大學交通管理科學系碩士論文，民國 95 年。
13. 楊凱評，「平交道事故頻率與衝擊分析」，成功大學交通管理科學系碩士論文，民國 96 年。
14. 施伯杰，「以故障樹與事件樹分析法探討平交道事故風險」，成功大學交通管理科學系碩士論文，民國 97 年。
15. Austin, R. D. and Carson, J. L., "An Alternative Accident Prediction Model for Highway-Rail Interfaces", *Accident Analysis and Prevention*, Vol. 34, No. 1, 2002, pp. 31-42.
16. Park, Y. J. and Saccomanno, F. F., "Collision Frequency Analysis Using Tree-Based Stratification", *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, Vol. 1908, 2005, pp.121-129.
17. Saccomanno, F. F. and Lai, X., "A Model for Evaluating Countermeasures at Highway-Railway Grade Crossings", *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, Vol. 1918, 2005, pp. 18-25.
18. Oh, J., Washington, S. P., and Nam, D., "Accident Prediction Model for Railway-Highway Interfaces", *Accident Analysis and Prevention*, Vol. 38, No. 2, 2006, pp. 346-356.
19. Raub, R. A., "Examination of Highway-Rail Grade Crossing Collisions over 10 Years in Seven

- Midwestern States”, *ITE Journal*, Vol. 76, No. 4, 2006, pp. 21-26.
20. 蔡明志，「風險管理在大眾運輸安全管理管制課題之發展」，**運輸計劃季刊**，第 29 卷，第 1 期，民國 89 年，頁 181-212。
21. Ayyub, B. M., *Risk Analysis in Engineering and Economics*, Chapman & Hall/CRC, New York, 2003.
22. Office of Rail Regulation (ORR), *HMRI Specific Cost Benefit Analysis (CBA) Checklist*, Technical Rep., London, U.K., 2006.
23. 交通部，**鐵路立體交叉及平交道防護設施設置標準與費用分擔規則**，民國 85 年。
24. 交通部，**公路路線設計規範**，民國 100 年。
25. Vuong, Q. H., “Likelihood Ratio Tests for Model Selection and Non-Nested Hypotheses”, *Econometrica*, Vol. 57, No. 2, 1989, pp. 307-333.