

機車倒地方向的力學分析及其在行車事故 鑑定之應用

Mechanics Analysis on Direction of Motorcycle Falls to Ground and its Application in Traffic Accident Reconstruction

張超群 Chau-Chin Chang¹

摘要

本文以力學原理分析機車碰撞或擦撞後的倒地方向，詳細介紹陀螺的特性與陀螺力矩形成的原理。研究表明若碰撞為機車前部（前輪、前輪蓋、前叉、把手、照後鏡等），機車倒地方向主要由陀螺力矩決定；若碰撞為機車後部（車架、車殼、引擎、傳動系統、後懸吊系統、排氣管與後輪等），機車倒地方向主要由碰撞高度與機車重心高度決定。將機車與機車碰撞，機車與汽車碰撞常見的形式，分別加以說明，輔以肇事實例，驗證機車的倒地方向，並製成表格方便參考。由機車倒地方向與車損部位，可以推測交通事故時，機車碰撞時的行向與碰撞形式。

關鍵詞：機車倒地方向、前部、後部、陀螺力矩

Abstract

The study used principles of mechanics to analyze the direction of a motorcycle falls to ground due to collision and introduced the characteristics of gyroscope and derived how the gyroscopic moment would occur in detail. The research results showed that when impact was taken place in front assembly (front wheel, front wheel cover, fork, hand bar and mirror etc.) of a motorcycle, direction of the motorcycle falls to ground would depend on the gyroscopic moment. If the collision was occurred in rear assembly (frame, body shell, engine, powertrain, rear suspension system, muffler and rear wheel etc.) of a motorcycle, the direction of the motorcycle falls to ground would be determined by the heights of the impact and the

¹ 南臺科技大學機械工程系副教授（聯絡地址：71005 台南市永康區南台街1號，電話 06-2533131 轉 3511，E-mail: ccchang@stust.edu.tw）。

center of gravity of the motorcycle. This study analyzed the direction of a motorcycle falls to ground on common types of collision between motorcycle and motorcycle, as well as motorcycle and car with real examples to validate the developed theory. Based on the analyzed results, this study also established tables for easy reference. From the falling direction and damage area of a motorcycle, one can apply the studied results to estimate the impact direction and collision type of the motorcycle.

Keywords: Direction of motorcycle falls to ground, Front assembly, Rear assembly, Gyroscopic moment

一、前言

台灣機車數量繁多，許多騎士又不太遵守交通規則，因此經常發生機車交通事故，其中以機車與機車或機車與汽車的碰撞所佔的比例最高。歐美日等先進國家機車數量相對於汽車少很多，對車輛碰撞和鑑定的研究主要以汽車與汽車碰撞為主 (Macmillan, 1983; Huang, 2002; Brach and Brach, 2005)。在行車事故鑑定中，除了路權外，如何較正確地推估碰撞行向，也是判斷責任歸屬的一個重要依據。國內外對機車與機車及機車與汽車肇事鑑定多以碰撞速度為研究主要目標 (Obenski and Hill, 2002; 宋景芬、張國方, 1999; 羅智寧, 2008; 郭磊, 2008; 林峻弘, 2009)。國內有應用多體系統商業軟體 ADAMS 模擬機車碰撞汽車後的人體受傷及機車碰撞後的運動和倒地方向，但文中對機車倒地方向的原理著墨不多 (林志儒, 2005; 施人維, 2012)。本文將機車視為由兩大部件組成，即由前輪、前輪蓋、前叉、把手、照後鏡等組成的前部，這是因為轉動把手時，前輪、前輪蓋、前叉、把手、照後鏡等會一起轉動；車架、車殼、引擎、傳動系統、後懸吊系統、排氣管與後輪等組合而成的後部，這是因為車架、車殼、引擎、傳動系統、後懸吊系統、排氣管與後輪在機車運動時，雖然後輪有轉動與跳動，但都可視為與車架在同一平面運動，而車殼、引擎、傳動系統、後懸吊系統、排氣管又固定在車架上，對於車架沒有相對運動，故這幾個零組件可視為機車的後部。本文先以簡單的力學原理說明陀螺力矩，分析機車前部與後部碰撞後的倒地方向。接著探討機車與機車碰撞，以及機車與汽車碰撞的常見形式，及其碰撞後的倒地方向。我們由機車倒地方向可以推測機車碰撞時的行向與碰撞形式，這對車輛行車事故鑑定人員或交通警察有實際的幫助。

二、陀螺力矩

機車碰撞後的運動情形和所謂的陀螺力矩關係很大，因此本文先介紹陀螺和陀螺效應 (張超群、劉成群, 2012)。

2.1 陀螺特性

所謂陀螺 (Gyroscope)，是指繞自己的對稱軸高速旋轉的剛體。高速行駛機車的車輪可視為陀螺，其陀螺特性會影響機車的倒地方向。下面我們簡單地討論陀螺的三大特性：定軸性 (Rigidity)、進動性 (Precession)、陀螺效應 (Gyroscopic effect)。本文以正粗體英文表示向量，一般斜體英文代表純量或符號。

2.1.1 定軸性

陀螺定軸性可用角動量定理 (Beer and Johnston, 1999；張超群、劉成群，2008) 加以說明：陀螺的角動量 (Angular momentum) \mathbf{H} 對時間 t 的變化率等於作用於陀螺的合外力矩 \mathbf{M} ，即

$$\frac{d\mathbf{H}}{dt} = \mathbf{M} \quad (1)$$

當合外力矩為零時 ($\mathbf{M}=0$)，陀螺的角動量 \mathbf{H} 守恆 (Conservation of angular momentum)，即 \mathbf{H} 的大小 H 和方向不變。高速旋轉陀螺的角動量沿自轉軸的方向，角動量守恆代表陀螺的自轉軸在空間保持方向不變，這就是陀螺的定軸性。如圖 1 所示之高速直線行駛的機車，圖中 x 、 y 、 z 軸皆固定在前輪上，座標原點為輪心， x 軸是平行地面且沿車輪平面的方向， y 軸是垂直車輪平面並指向車輪左方的方向， z 軸則與 x 軸和 y 軸互相垂直， G 為重心， ε 為前叉後傾角 (Rake angle)。 y 軸是前輪的自轉軸。前車輪所受的合外力矩為零，此時前輪的角動量 \mathbf{H} 守恆，其大小 H 和方向 (自轉軸方向) 不變，因此前輪有定軸性，可幫助機車直線穩定行駛。同理，機車後輪相對於車架雖無法轉向，但高速旋轉的後輪，也具有定軸性，可以防止機車左右傾倒。

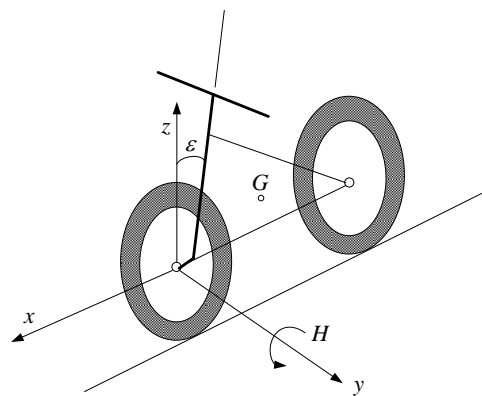


圖 1 機車直線行駛的定軸性

2.1.2 進動性

當合外力矩 \mathbf{M} 的方向與陀螺的角動量 \mathbf{H} 的方向互相垂直時，陀螺的角動量將以角速度 $\boldsymbol{\Omega}$ 轉動，這種轉動稱為進動。考慮高速陀螺，即陀螺的自轉角速度遠大於進動角速度，此時角動量的變化率等於 $\boldsymbol{\Omega} \times \mathbf{H}$ ，因此方程式(1)變成

$$\frac{d\mathbf{H}}{dt} = \boldsymbol{\Omega} \times \mathbf{H} = \mathbf{M} \quad (2)$$

由(2)式可知進動角速度 $\boldsymbol{\Omega}$ 不是沿合外力矩的方向，而是沿與合外力矩互相垂直的方向。陀螺在合外力矩作用下發生進動的特性，稱為陀螺的進動性。另外，方程式(2)的左邊代表陀螺的角動量向量 \mathbf{H} 端點的速度，因此也可這樣說：“陀螺進動的方向是陀螺的角動量向量端點指向合外力矩的方向”。例如圖 2(a)中當騎士騎機車要左彎時，騎士與機車向左側內傾，為了更快速過彎，騎士相對於車身又向左側傾角度 $\Delta\phi$ 。因此，圖 2(a)中騎士側傾角度為 ϕ ，而機車車身側傾角度較小為 $\phi - \Delta\phi$ 。對於一般的騎乘，騎士與機車側傾角度皆為 ϕ ，如圖 2(b)所示。圖 2 中 G_m 為機車的重心， G_p 為騎士的重心，整個人-車系統的重心 G ，系統的重力 mg 對前輪與地面接觸點之外力矩 \mathbf{M} 的方向指向負 x 軸（即繞負 x 軸轉動），前車輪的角動量 \mathbf{H} 的方向為指向正 y 軸（即繞正 y 軸轉動），試圖使前輪向左轉彎而形成進動現象，進動角速度為 $\boldsymbol{\Omega}$ ，如圖 3(a)所示，圖中 x 軸垂直 y 、 z 軸。此時角動量 \mathbf{H} 的端點 A 要轉向外力矩 \mathbf{M} 的端點 B 而形成繞 OD 軸（ z 軸）方向的進動角速度 $\boldsymbol{\Omega}$ ，如圖 3(b)所示。它們之間的關係為(2)式。因此，進動效應會輔助把手逆時針向左轉動，這有助於機車順利向左轉彎。

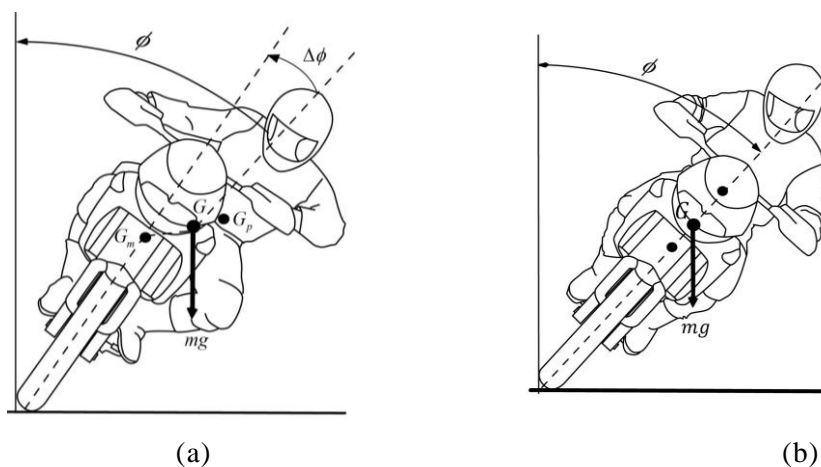


圖 2 機車左彎時之側傾

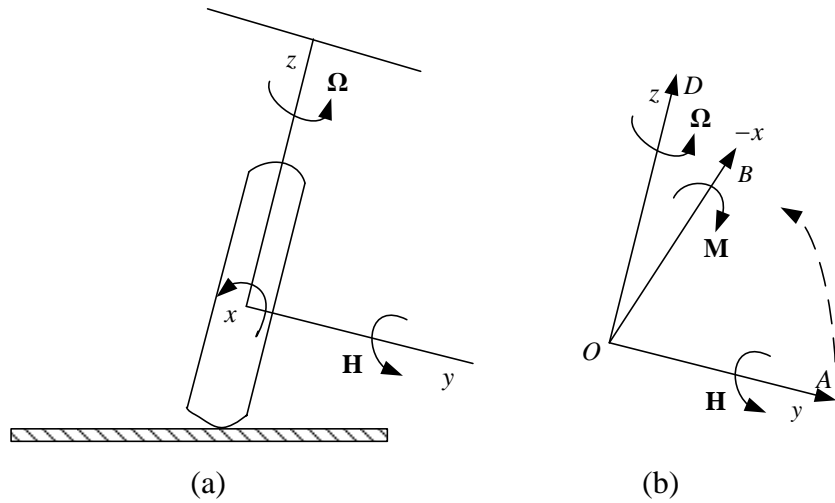


圖 3 機車向左側傾產生的進動

2.1.3 陀螺效應

當陀螺的旋轉軸改變方向（即發生進動）時，就會產生陀螺力矩 (Gyroscopic moment)，這種現象稱為「陀螺效應」。陀螺力矩和迫使陀螺發生進動的力矩大小相等方向相反，作用在迫使陀螺發生進動的施力物或相鄰物體上。由方程式(2)可知，陀螺力矩 \mathbf{M}_{gr} 為

$$\mathbf{M}_{gr} = -\boldsymbol{\Omega} \times \mathbf{H} = \mathbf{H} \times \boldsymbol{\Omega} = I\boldsymbol{\omega} \times \boldsymbol{\Omega} \quad (3)$$

陀螺力矩 \mathbf{M}_{gr} 的大小 M_{gr} 近似於

$$M_{gr} = I\omega\Omega \quad (4)$$

其中 \mathbf{H} ：轉子的自轉角動量， $\mathbf{H} = I\boldsymbol{\omega}$ ； $\boldsymbol{\Omega}$ ：轉子的進動角速度； I ：轉子繞自轉軸的慣性矩； ω ：轉子的自轉角速度。

下面的簡單實驗有助於對陀螺效應的理解：如圖 4(a)所示，一個人將轉動的輪子（例如自行車車輪）上下移動，速度大小為 v ，此時車輪只繞輪軸（ y 軸）以角速度 ω 自轉，並沒有繞 z 軸轉動（進動）（ $\boldsymbol{\Omega} = 0$ ），根據公式(3)知 $\mathbf{M}_{gr} = 0$ ，人手不會感覺到陀螺力矩，也就是輪子沒有陀螺效應。但是，當人用雙手將輪子逆時針繞 z 軸以角速度 Ω 轉動（進動）時，如圖 4(b)所示，因為是雙手施力矩使輪子進動，這時根據公式(3)會產生繞 x 軸順時針方向的陀螺力矩作用於人的雙手上，右手感受到握把向下壓的力，左手感受到握把向上拉的力。

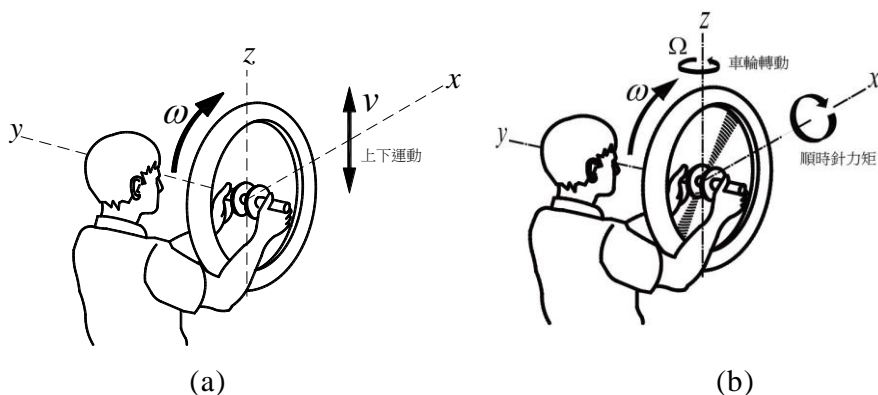


圖 4 陀螺效應

2.2 機車轉向時的陀螺效應

如圖 5 所示，設機車前輪繞其自轉軸 y 軸轉動的角速度為 ω ，當騎士施加力 F_C 於右把手，使機車以角速度 $\dot{\delta}$ 繞其轉向軸 DE 逆時針向左轉動，角速度 $\dot{\delta}$ 在前輪鉛垂軸 (z 軸) 的投影為 $\Omega = \dot{\delta} \cos \varepsilon$ ， ε 為前叉後傾角， \mathbf{n}_x 、 \mathbf{n}_y 和 \mathbf{n}_z 分別為沿 x 、 y 、 z 軸的單位向量。對前車輪而言 Ω 就是進動角速度，此時產生的陀螺力矩 M_{gr} 作用於車架上，會使車身繞 x 軸向右傾，造成轉向較吃力。

參考圖 5，機車轉向產生的陀螺效應可用圖 6 的前輪角動量變化說明：

機車直線行駛時前輪的角動量為 \mathbf{H}_1 ，如圖 6 中之(I)所示；當騎士轉動把手使前輪左轉時前輪的角動量變為 \mathbf{H}_2 ，如圖 6 中之(II)所示；角動量由 \mathbf{H}_1 至 \mathbf{H}_2 的方向改變產生角動量變化 $\Delta\mathbf{H}$ ，如(III)所示； \mathbf{M} 代表造成角動量的變化 $\Delta\mathbf{H}$ 所需要施加的扭矩，其大小和角動量方向的變化率成正比（見方程式(1)），如(IV)所示；此時會產生一個與 \mathbf{M} 大小相等的反力矩（陀螺力矩） \mathbf{M}_{gr} ，因前輪經由轉向軸 DE 與車架相連，因此陀螺力矩 \mathbf{M}_{gr} 沿前車輪的 x 軸作用在車架上，如(V)所示，此陀螺力矩 \mathbf{M}_{gr} 之表達式與大小，如方程式(3)和(4)所示。這個陀螺力矩會使車身有向右傾斜的現象，因為我們轉彎時把手是慢慢轉向，轉向角速度(進動角速度) Ω 小，陀螺力矩較小，所以機車是穩定的。但若機車把手受到擦撞，則因把手轉向較快，轉向角速度 Ω 較大，以致陀螺力矩較大，機車容易倒地（見 2.3 節之說明）。

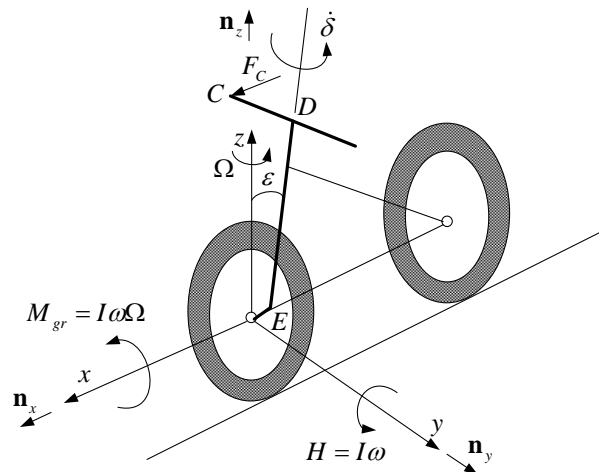


圖 5 轉向產生的陀螺效應

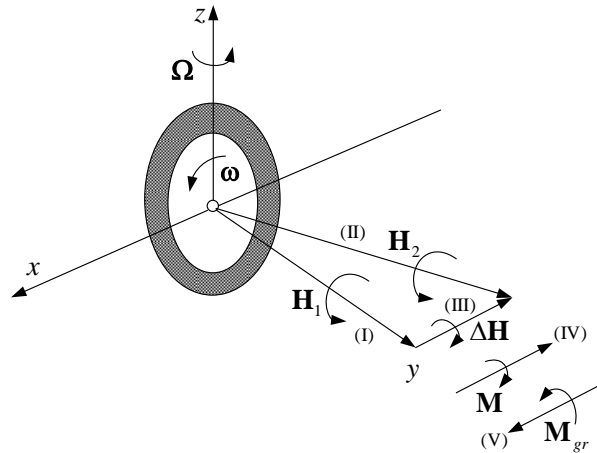


圖 6 前輪轉向產生的陀螺力矩

2.3 陀螺力矩於行車事故鑑定應用之例

如圖 7(a)所示，當行駛中的機車受到從左後側面駛來的汽車的擦撞把手或後照鏡時，機車很容易倒向汽車一邊，我們可用陀螺力矩解釋其中的力學原理。

參考圖 7(b)及圖 5，設機車前輪轉動的角速度大小為 ω ，方向沿 y 軸的方向。設機車前輪中心的質量慣性矩為 I ，則前輪的角動量 \mathbf{H} 為

$$\mathbf{H} = I\omega\mathbf{n}_y \quad (5)$$

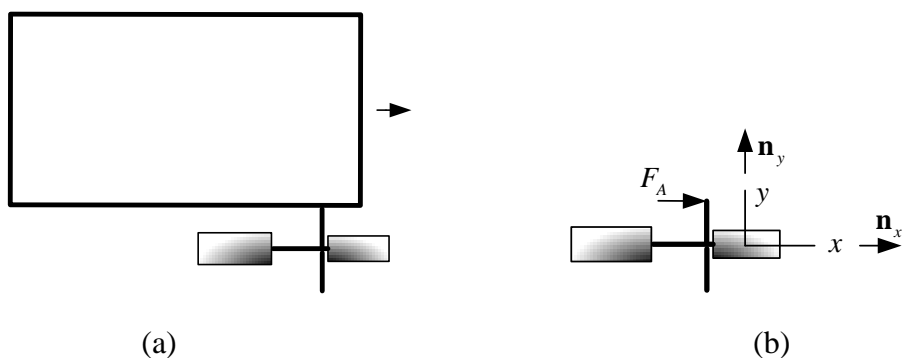


圖 7 機車把手受到汽車的擦撞

其中 \mathbf{n}_y 為沿 y 軸方向的單位向量。當汽車從後側碰到機車把手後，力 F_A 作用於左側把手上，使機車的把手順時針向右轉動，獲得角速度 $\dot{\delta}$ ，其方向沿轉向軸 DE （見圖 5）。此角速度 $\dot{\delta}$ 在前輪 z 軸方向的分量為

$$\mathbf{\Omega} = -\dot{\delta} \cos \varepsilon \mathbf{n}_z = -\Omega \mathbf{n}_z \quad (6)$$

其中 ε 為機車的前叉後傾角， \mathbf{n}_z 為沿 z 軸的單位向量。進動角速度 $\mathbf{\Omega}$ 將改變前輪的角動量向量 \mathbf{H} 的方向，由此產生一陀螺力矩：

$$\mathbf{M}_{gr} = -\mathbf{\Omega} \times \mathbf{H} = (-I\omega\dot{\delta} \cos \varepsilon) \mathbf{n}_x = -I\omega\Omega \mathbf{n}_x \quad (7)$$

其中 \mathbf{n}_x 為指向 x 軸的單位向量（見圖 5）。前輪經由轉向軸 DE 與車架相連，因此陀螺力矩 \mathbf{M}_{gr} 沿前車輪的 x 軸作用在車架上，將使機車向左倒向汽車，這對騎士及乘員是很危險的。進動角速度 $\mathbf{\Omega}$ 、角動量 \mathbf{H} 、陀螺力矩 \mathbf{M}_{gr} 的方向如圖 8 所示。

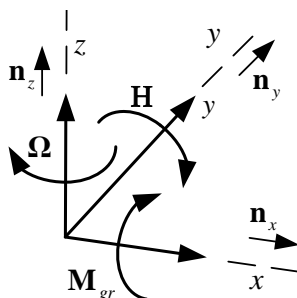


圖 8 進動角速度、角動量與陀螺力矩

例如圖 9 中之 B 車是左倒，分析其原因是 B 車被 A 車從後方擦撞到左把手，機車把手順時針向右轉動，產生的陀螺力矩使機車左倒，碰到汽車右側車身後，向右前方刮地滑去。此例題的力學分析，如 2.3 節之說明。

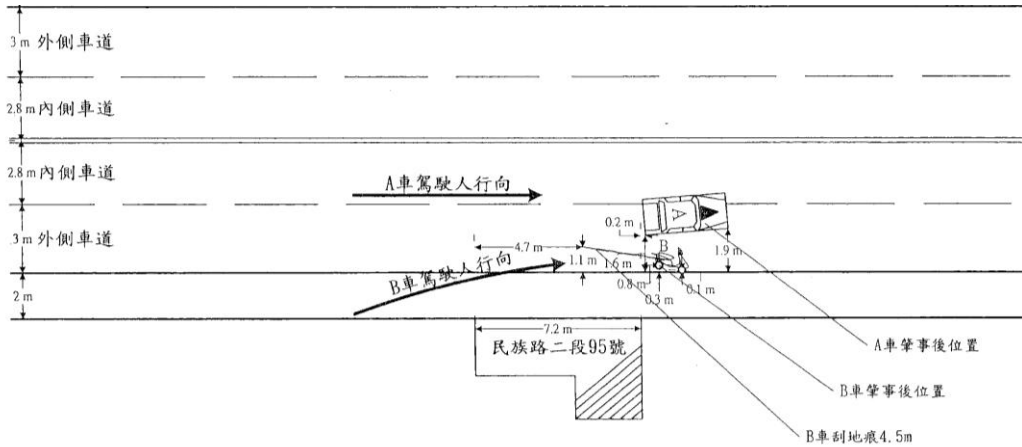


圖 9 陀螺力矩之應用

三、機車與機車碰撞的倒地方向

為了判斷機車倒地方向，我們將機車視為由兩大部件組成，即由前輪、前輪蓋、前叉、把手與照後鏡等組成的前部；車架、車殼、引擎、傳動系統、後懸吊系統、排氣管與後輪等組合而成的後部。機車與機車發生交通事故的情形大致可分為以下幾種：

3.1 機車 A 前部垂直碰撞機車 B 後部

機車 A 前部垂直碰撞機車 B 後部之示意圖，如圖 10(a)所示。機車 A、B 前部與後部之示意圖，如圖 10(b)所示。機車 B 後部被撞後，因後輪相對於車架只有繞後輪軸的自旋運動($\omega \neq 0$)，但後輪相對於車架無法左右轉動，也就是後輪相對於車架並沒有進動($\Omega = 0$)，根據方程式(4) $M_{gr} = 0$ ，因此後輪相對於車架沒有陀螺力矩。雖然整個被撞的機車 B 後部也會繞其轉向軸 DE (見圖 11) 旋轉，而有陀螺力矩作用在機車 B 前部。但因角速度很小，因此陀螺力矩很小，分析時可忽略不計。

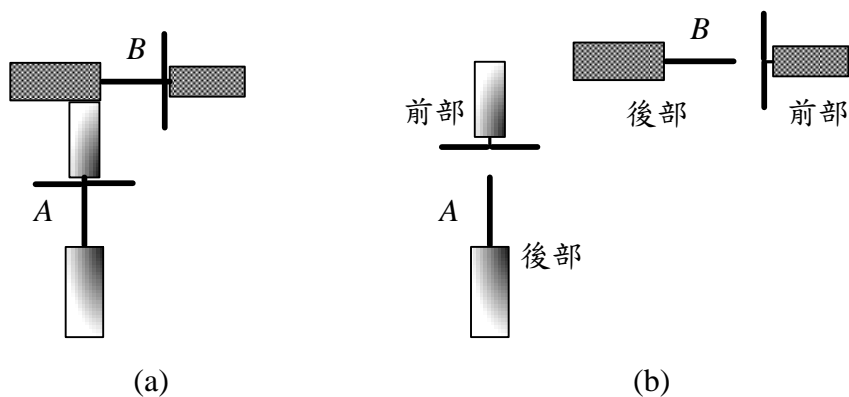


圖 10 機車 A 前部垂直碰撞機車 B 後部

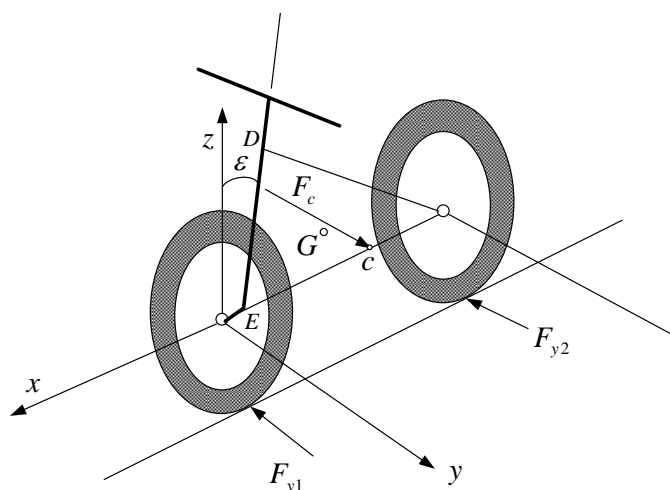


圖 11 機車 B 所受之側向力

假設機車 A 前部垂直碰撞機車 B 後部的碰撞處在 c 點附近，總碰撞力可用一個集中碰撞力 F_c 代替，為簡化分析假設 F_c 的方向平行路面由右向左垂直作用於車身，如圖 11 所示。此時由機車前方看的受力圖和有效力圖 (Beer and Johnston, 1999；張超群、劉成群，2008)，如圖 12 所示。圖中的 $I_G \alpha$ 的方向代表由前面看，碰撞後機車 B 假設的旋轉方向。因質心質量慣性矩 I_G 大於零，若計算出來角加速度 $\alpha > 0$ ，代表碰撞後機車 B 的旋轉方向與假設的方向相同；若計算出來 $\alpha < 0$ ，則代表機車 B 的旋轉方向與假設的方向相反。

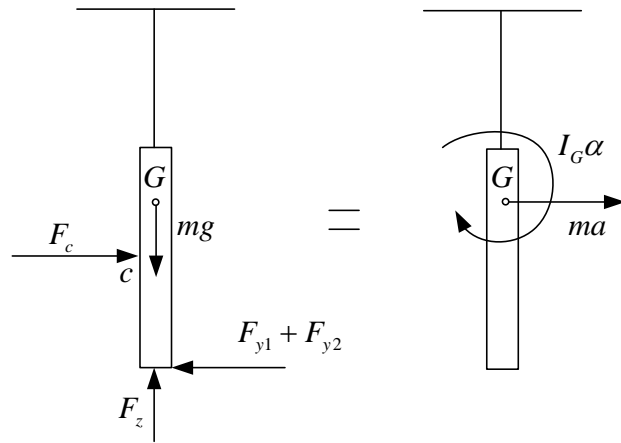


圖 12 機車 B 前視之受力圖和有效力圖（碰撞點 c 低於重心 G ）

參考圖 12， F_z 為路面作用於前後輪胎的正向反力之和， mg 為整個人-車系統重力，質量 m 與加速度 a 的乘積 ma 稱為有效力。若碰撞點 c 低於重心 G ，對 G 點取矩，得

$$\sum M_G = I_G \alpha: (F_{y1} + F_{y2})h - F_c d = I_G \alpha \quad (8)$$

其中 d 為碰撞集中力 F_c 到重心 G 的垂直距離， $(F_{y1} + F_{y2})$ 為路面作用於前後輪胎的側向反力之和。由方程式(8)知:若 $(F_{y1} + F_{y2})h - F_c d > 0$ ，則角加速度 $\alpha > 0$ ，機車 B 左倒；若 $(F_{y1} + F_{y2})h - F_c d < 0$ ，則角加速度 $\alpha < 0$ ，機車 B 右倒。這代表若碰撞點低於重心 G ，碰撞高度越低， d 越大，機車越可能朝碰撞力方向的相反方向倒，對圖 12 是右倒。

參考圖 13，若碰撞點 c 高於重心 G ，對 G 點取矩，得

$$\sum M_G = I_G \alpha: (F_{y1} + F_{y2})h + F_c d = I_G \alpha \quad (9)$$

由方程式(9)知，角加速度 α 恆大於零，機車左倒。這代表若碰撞點高於重心 G ，機車一定沿被撞的方向倒，即左側被撞，機車右倒，稱為左撞右倒；右側被撞，機車左倒，稱為右撞左倒。

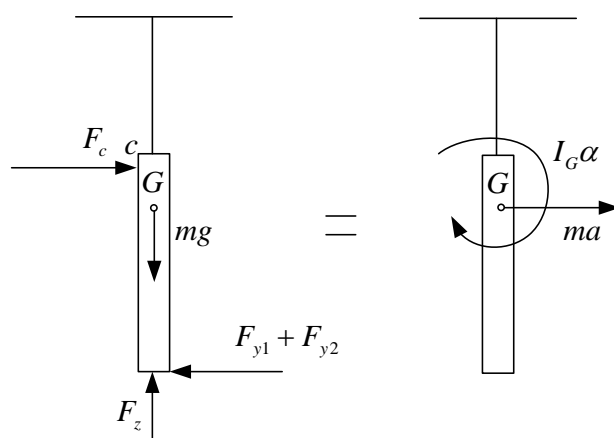


圖 13 機車前視之受力圖和有效力圖（碰撞點 c 高於重心 G ）

也可用力矩的觀念說明機車倒地方向。參考圖 12，若碰撞點 c 低於重心 G ，設碰撞力 F_c 對機車-人系統重心 G 的力矩使機車側傾(Roll)，其對重心側傾力矩 M_i 的大小為 $M_i = F_c d$ ， d 為碰撞點 c 與重心 G 之垂直距離，方向沿正 x 軸。路面作用於前後輪胎的側向反力之和 $(F_{y1} + F_{y2})$ ，對重心 G 的力矩 M_s ， M_s 的大小為 $M_s = (F_{y1} + F_{y2})h$ ，方向沿負 x 軸， h 為重心 G 的高度。因為側傾力矩 M_i 的方向是沿正 x 軸，反作用力產生的側向反力矩 M_s 是沿負 x 軸方向。因此，若 $M_i > M_s$ ，則 B 車為右倒；若 $M_i < M_s$ ，則 B 車為左倒，如圖 14 所示。

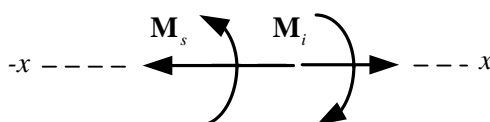


圖 14 機車 B 後部之側傾力矩與側向反力矩

由上述分析可知機車後部被撞後的倒地方向主要由撞擊力對重心之力矩決定，而此力矩之大小又與撞擊點的高度有密切關係：

1. 若撞擊點 c 位於機車-人系統重心 G 的下方：因為側傾力矩 M_i 的方向相同是沿正 x 軸，反作用力產生的側向反力矩 M_s 是沿負 x 軸方向。因此，若 $M_i > M_s$ ，則 B 車為右倒；若 $M_i < M_s$ ，則 B 車為左倒。
2. 若撞擊點 c 位於機車-人系統重心 G 的上方：因為側傾力矩 M_i 、側向反力矩 M_s 的方向相同都是沿負 x 軸， B 車為左倒。也就是說機車將沿被撞的方向倒。

台灣機車以速克達為主，速克達機車重心低，因此碰撞後部時，朝碰撞力方向倒。例如車身左側遭撞，碰撞力方向朝右，機車右倒（左撞右倒）。若車身右側遭撞，碰撞力方向朝左，機車左倒（右撞左倒）。

A 車為前部碰撞，若撞擊後把手順時針向右轉動，則由前述陀螺力矩之分析，A 車為左倒；反之，A 車若撞擊後，把手逆時針向左轉動，A 車為右倒。圖 10 中，因 B 車有向右的切向碰撞力作用在 A 車前輪上，A 車碰撞後把手順時針向右轉動，陀螺力矩使 A 車左倒。

例如圖 15(a)為機車 A 前部垂直碰撞機車 B 後部之例。圖 15(b)為 A、B 車碰撞受力圖，B 車作用於 A 車的切向碰撞力(切線方向碰撞力之簡稱) F_t ，使 A 車碰撞後把手順時針向右轉動，產生的陀螺力矩使 A 車左倒；B 車為速克達，重心較低，後部右側受到 A 車車輪的正向撞擊力 F_c ， F_c 方向朝 B 車左邊，使 B 車左倒。

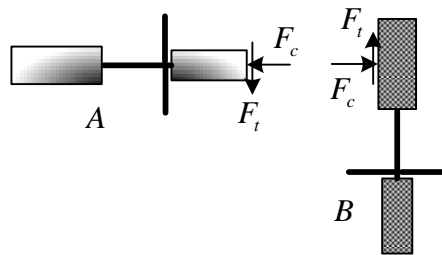
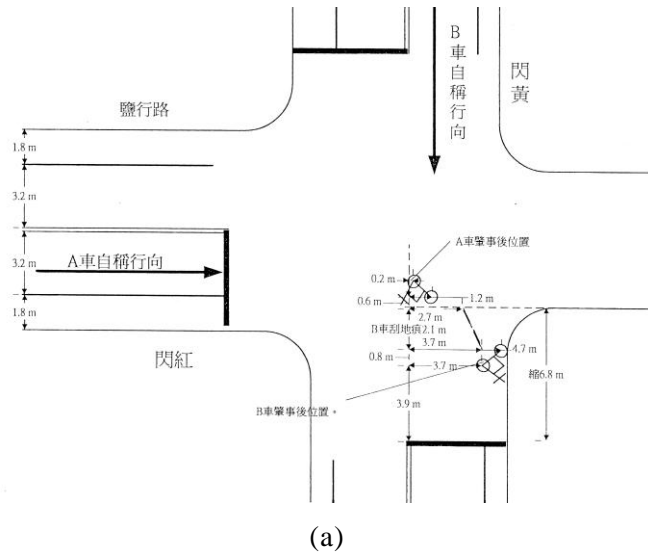


圖 15 機車 A 前部垂直碰撞機車 B 後部之例

小結：本小節只分析機車 B 從 A 車左方來，對各種不同方向的機車 A 前部垂直碰撞機車 B 後部，應用同樣的分析方法，可歸納出，對 A 車：若

B 車從左方來， A 車前部受到向右的切向碰撞力，把手順時針向右轉動，產生的陀螺力矩使 A 車左倒；若 B 車從右邊來， A 車前部受到向左的切向碰撞力，把手逆時針向左轉動，產生的陀螺力矩使 A 車右倒。對 B 車：若 B 車後部右側被撞，向左的正向碰撞力使 B 車左倒（右撞左倒）；若 B 車後部左側被撞，向右的正向碰撞力使 B 車右倒（左撞右倒）。

3.2 機車 A 前部垂直碰撞機車 B 前部

參考圖 16，機車 B 前部受到撞擊，機車 B 左倒或右倒由陀螺力矩決定。機車 A 前部垂直碰撞機車 B 前部之水平受力，畫於圖 17，圖中 F_{y1} 與 F_{y2} 分別為位於路面上作用於前後輪胎的側向反力， F_c 為機車 A 作用於機車 B 前部右側的正向碰撞力， F_c 使 B 車把手逆時針向左轉動，產生的陀螺力矩使其右倒。機車 B 前部之進動角速度 Ω 、角動量 H 與陀螺力矩 M_{gr} ，如圖 18 所示。機車 A 則受到機車 B 作用於機車 A 的切向碰撞力 F_t 及正向碰撞力 F_c ，如圖 19 所示。切向碰撞力 F_t 使把手順時針向右轉動，產生的陀螺力矩使機車 A 左倒。

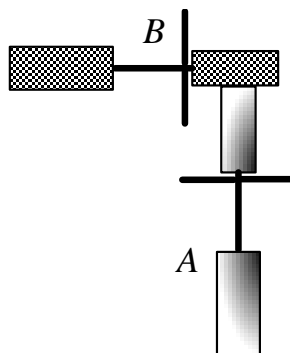


圖 16 機車 A 前部垂直碰撞機車 B 前部

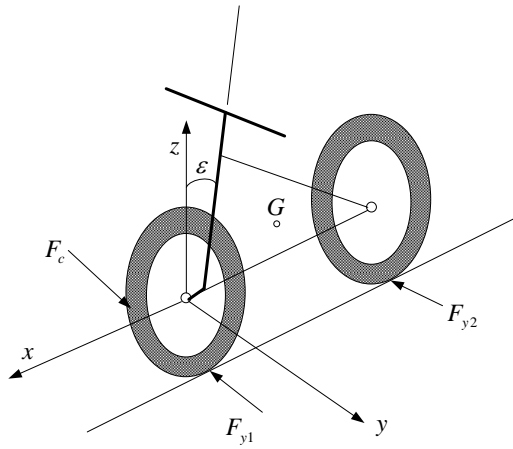


圖 17 機車 A 垂直碰撞機車 B 前部，B 車之 y 方向水平受力圖

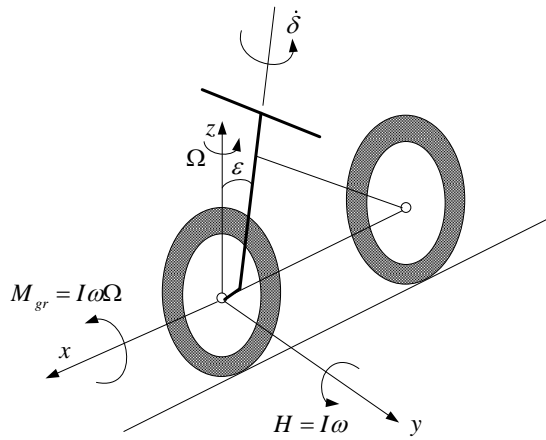


圖 18 機車 B 前部之進動角速度、角動量與陀螺力矩

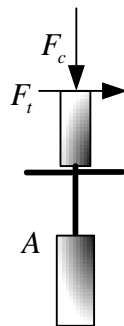
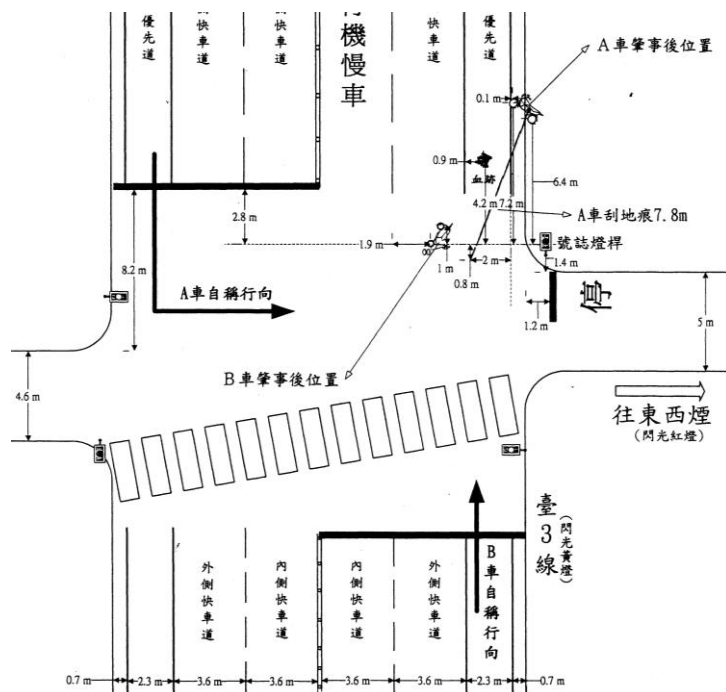


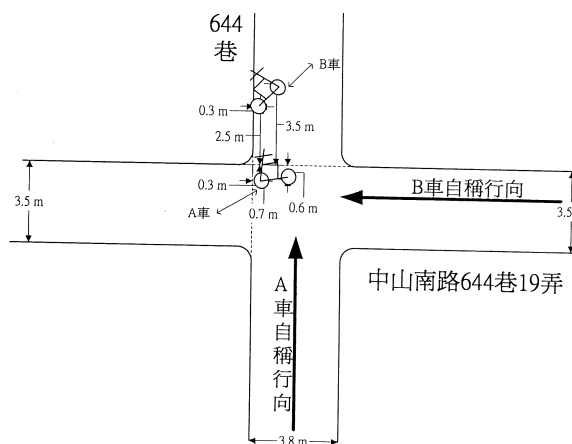
圖 19 機車 A 前部受到機車 B 前部之切向碰撞力及正向碰撞力

圖 20(a)中的機車 B 前部垂直碰撞機車 A 的前部，B 車的正向碰撞力使 A 車碰撞後把手逆時針向左轉動，陀螺力矩使 A 車右倒；B 車前部受到 A

車車輪的切向碰撞力，碰撞力方向朝右使 B 車把手順時針向右轉動，陀螺力矩使 B 車左倒。圖 20(b) 中的機車 A 前部垂直碰撞機車 B 的前部，A 車的正向碰撞力使 B 車碰撞後把手順時針向右轉動，陀螺力矩使 B 車左倒；A 車前部受到 B 車車輪的切向碰撞力，碰撞力方向朝左使 A 車把手逆時針向左轉動，陀螺力矩使 A 車右倒。



(a)



(b)

圖 20 機車 A 前部垂直碰撞機車 B 前部之例

小結：本小節只分析機車 B 從 A 車左方來，對各種不同方向的機車 A 前部垂直碰撞機車 B 前部，應用同樣的分析方法，可歸納出，對 A 車：若 B 車從左方來， A 車前部受到向右的切向碰撞力，把手順時針向右轉動，產生的陀螺力矩使 A 車左倒；若 B 車從右邊來， A 車前部受到向左的切向碰撞力，把手逆時針向左轉動，產生的陀螺力矩使 A 車右倒。對 B 車：若 B 車前部右側被撞，向左的正向碰撞力使把手逆時針向左轉動，產生的陀螺力矩使 B 車右倒；若 B 車前部左側被撞，向右的正向碰撞力使把手順時針向右轉動，產生的陀螺力矩使 B 車左倒。

3.3 機車 A 前部斜撞機車 B 前部

參考圖 21(a)，機車 A 前部斜撞機車 B 前部，其受力圖如圖 21(b) 所示，其中 F_c 為正向碰撞力， F_t 為切向碰撞力。因碰撞部位皆為機車前部，機車左倒或右倒由陀螺力矩決定：

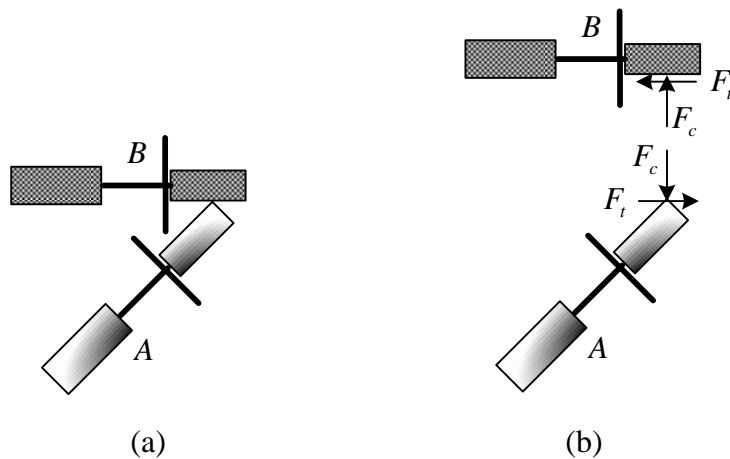


圖 21 機車 A 前部斜撞機車 B 前部及其受力圖

1. A 車碰撞後，正向碰撞力 F_c 與切向碰撞力 F_t 與使把手順時針向右轉動，產生的陀螺力矩使 A 車左倒。
2. B 車碰撞後，正向碰撞力 F_c 使把手逆時針向左轉動，產生的陀螺力矩使 B 車右倒。

圖 22(a) 中的直行的機車 A 與斜向的機車 B 於路口發生碰撞， A 車前部碰撞斜向行駛的機車 B 前部，其受力圖如圖 22(b) 所示。 A 車碰撞後前輪受到 B 車向左上方的切向碰撞力 F_t 及正向碰撞力 F_c ，使把手逆時針向左轉動，產生的陀螺力矩使 A 車右倒； B 車前部受到 A 車車輪的正向碰撞力 F_c 與切向碰撞力 F_t ，使把手順時針向右轉動，產生的陀螺力矩使 B 車左倒。

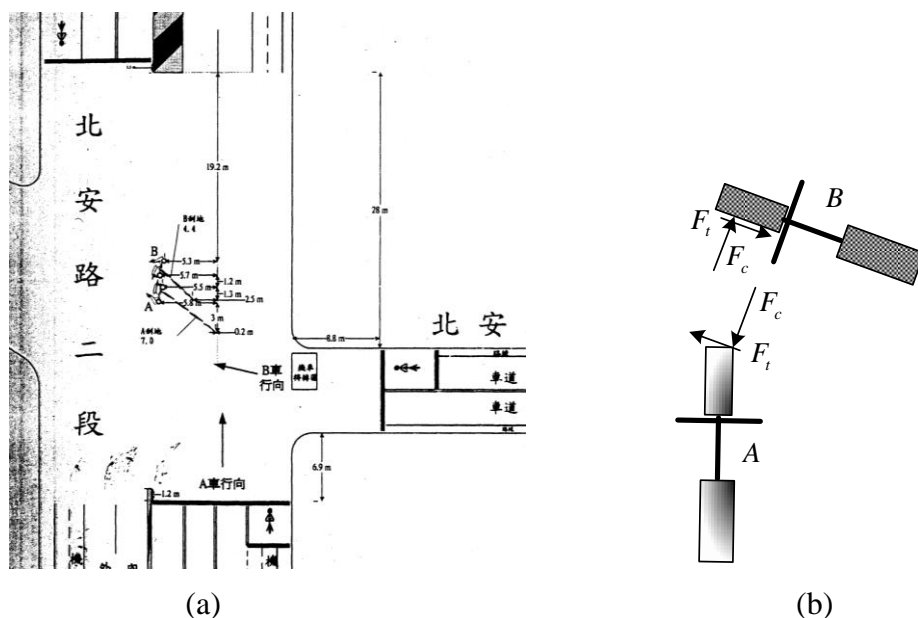


圖 22 機車 A 前部斜撞機車 B 前部之例

3.4 機車 A 前部斜撞機車 B 後部

參考圖 23(a)，機車 A 前部斜撞機車 B 後部，其受力圖如圖 23(b) 所示，其中 F_c 為正向碰撞力， F_t 為切向碰撞力。機車 A 的碰撞部位為前部，故其倒地方向由陀螺力矩決定；機車 B 的碰撞部位為後部，倒地方向類似 3.1 節之 B 車分析。

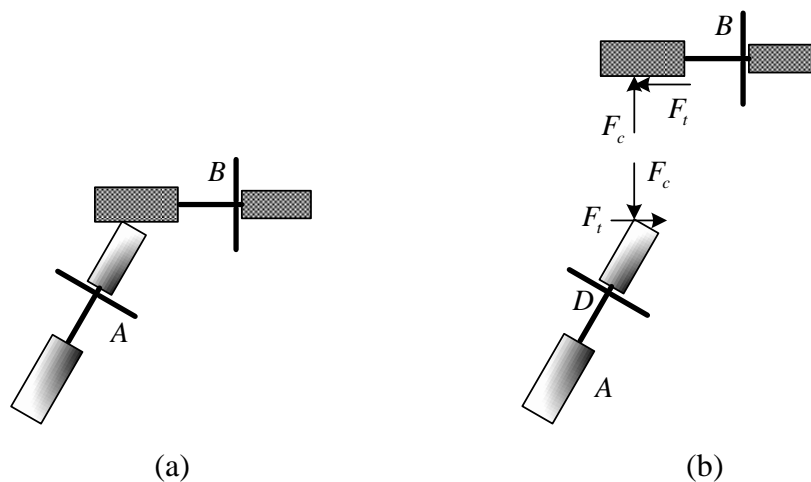


圖 23 機車 A 前部斜撞機車 B 後部及其受力圖

1. 參考圖 23(b)，A 車碰撞後，前部受到向右的切向碰撞力 F_t 與正向碰撞力 F_c ， F_t 對經過 D 點的轉向軸 DE （參考圖 5）的力矩 M_t ，使把手順時針向右轉動， F_c 對轉向軸 D （參考圖 5）的力矩 M_c ，也使把手順時針向右轉動，產生的陀螺力矩造成機車左倒。
2. B 車類似 3.1 節之 B 車分析，正向碰撞力 F_c 造成機車 B 左倒。

3.5 兩機車並行超車時前部發生擦撞

因碰撞部位為機車前部，機車倒地方向由陀螺力矩決定。

1. A 車車速較快，擦撞 B 車（見圖 24(a)、(b)）

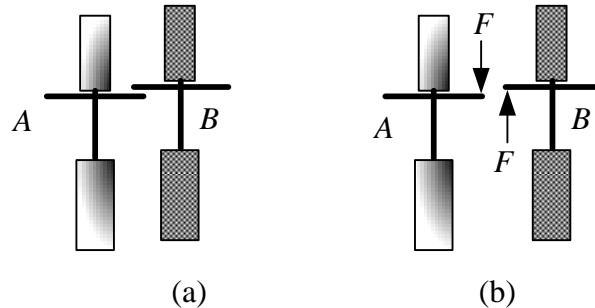


圖 24 兩機車並行前部發生擦撞， A 車車速較快及 A 、 B 車受力圖

- (1) 圖 24(b) 為兩車擦撞受力圖，因 A 車速度較快，故碰撞後碰撞力 F 方向朝後，使把手順時針向右轉動，產生的陀螺力矩使 A 車左倒。
- (2) 參考圖 24(b)， B 車碰撞後，碰撞力 F 方向朝前，把手順時針向右轉動，產生的陀螺力矩使 B 車左倒。

2. B 車車速較快，擦撞 A 車（見圖 25(a)、(b)）

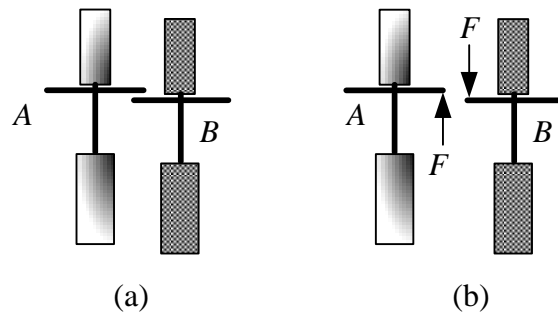


圖 25 兩機車並行前部發生擦撞， B 車車速較快

(1)圖 25(b)為兩車擦撞受力圖，因 A 車速度較慢，故碰撞後碰撞力 F 方向朝前，使把手逆時針向左轉動，產生的陀螺力矩使 A 車右倒。

(2)參考圖 25(b)，B 車速度較快，碰撞後碰撞力 F 方向朝後，使把手逆時針向左轉動，產生的陀螺力矩使 B 車右倒。

小結：從上述兩種情況分析，可知兩車並行前部發生擦撞，若兩車皆為左倒，則左側機車車速較快去擦撞右側機車；反之，若兩車皆為右倒，則右側機車車速較快去擦撞左側機車。

例如圖 26 之 A、B 兩機車並行，A 車超車時右把手擦撞到 B 車左把手，A 車右把手碰撞後受到 B 車左把手的反作用力，把手順時針向右轉動，陀螺力矩使 A 車左倒；B 車左把手受到 A 車右把手的作用力，把手順時針向右轉動，陀螺力矩使 B 車左倒。

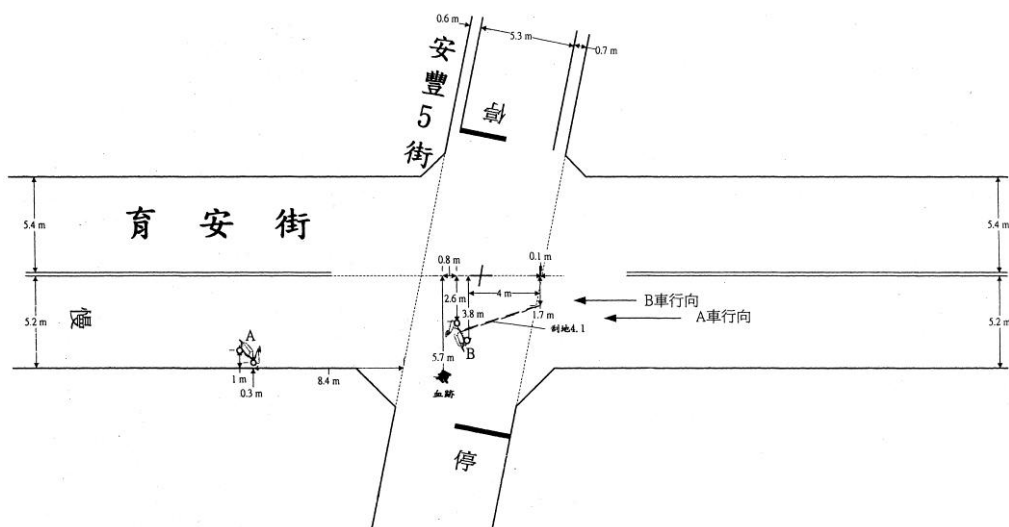


圖 26 兩機車並行發生擦撞，A 車車速較快之例

3.6 兩機車並行後部發生碰撞

兩機車並行時，可能某部機車左偏或右偏，以致兩部機車後部發生碰撞，此時機車 A 與 B 會後部側向力碰撞力 F 作用，如圖 27 所示。因為碰撞發生在機車後部，機車 A 與 B 倒地地方向，由碰撞力 F 類似 3.1 節之 B 車分析，碰撞後右側機車右倒，左側機車左倒。

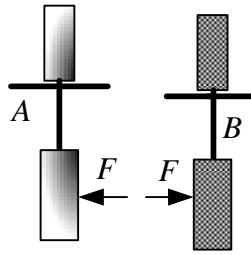


圖 27 兩車並行後部發生碰撞

3.7 機車突然從內側右轉，被直行機車碰撞

如圖 28 所示，這種情況的分析與兩部機車垂直碰撞類似。

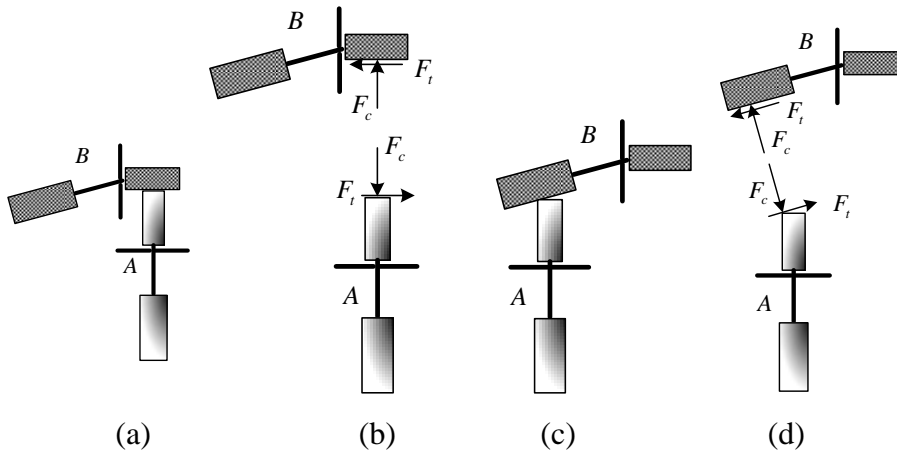
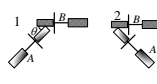
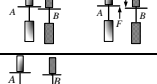




圖 28 機車 B 突然從內側右轉，被直行機車 A 碰撞

1. 參考圖 28(a)，機車 A 前部碰撞機車 B 的前部。如圖 28(b) 所示，A 車碰撞後前輪受到向右切向碰撞力 F_t 和正向碰撞力 F_c ，A 車碰撞後把手順時針向右轉動，產生陀螺力矩使 A 車左倒。B 車碰撞後前輪受到向左的正向碰撞力 F_c ，把手逆時針向左轉動，產生的陀螺力矩使 B 車右倒。
2. 參考圖 28(c)，機車 A 前部碰撞機車 B 的後部。如圖 28(d) 所示，A 車碰撞後前輪受到切向碰撞力 F_t 和正向碰撞力 F_c ，A 車碰撞後把手順時針向右轉動，產生的陀螺力矩使 A 車左倒。B 車受到向左的正向碰撞力 F_c ，將 B 車撞成左倒。

限於篇幅上述各種機車與機車的碰撞，主要以 B 車從 A 車左方來發生碰撞，並沒有分析 B 車從 A 車右方來發生碰撞，但其原理是相同。表 1 將機車 A 與 B 之碰撞依 B 車相對於 A 車從左右方來分類，使表格簡易化。

表 1 機車與機車碰撞的倒地方向

機車 A 前部垂直碰撞 機車 B 前部 	B 車從 A 車 左方來	A 車直行	A 車左倒, B 車右倒。
		A 車左閃	1. A 車速度慢, B 車速度快, A 車把手向左閃角度小。A 車左倒, B 車右倒。 2. A 車速度快, B 車速度慢, A 車把手向左閃角度大。A 車右倒, B 車右倒。
	B 車從 A 車 右方來	A 車直行	A 車右倒, B 車左倒。
		A 車右閃	1. A 車速度慢, B 車速度快, A 車把手向右閃角度小。A 車右倒, B 車左倒。 2. A 車速度快, B 車速度慢, A 車把手向右閃角度大。A 車左倒, B 車左倒。
機車 A 前部垂直碰撞 機車 B 後部	B 車從 A 車 左方來	A 車直行	A 車左倒, B 車左倒
		A 車左閃	B 車左倒, A 車倒地方向與上面 A 車前部垂直碰撞 B 車前部, B 車從 A 車左方來, A 車左閃之情況相同。
		A 車右閃	A 車左倒, B 車左倒。
	B 車從 A 車 右方來	A 車直行	A 車右倒, B 車右倒。
		A 車右閃	B 車右倒, A 車倒地方向與上面 A 車前部垂直碰撞 B 車前部, B 車從 A 車右方來, A 車右閃之情況相同。
機車 A 前部斜撞機車 B 前部	B 車從 A 車 左方來		1. A 車左倒, B 車右倒。 2. A 快 B 慢、碰撞角 θ 小, A 車右倒, B 車右倒; A 慢 B 快、碰撞角 θ 大, A 車左倒, B 車右倒。
	B 車從 A 車 右方來		1. A 快 B 慢、碰撞角 θ 小, A 車左倒, B 車左倒; A 慢 B 快、碰撞角 θ 大, A 車右倒, B 車左倒。 2. A 車右倒, B 車左倒。
機車 A 前部斜撞機車 B 後部	B 車從 A 車 左方來		1. A 車左倒, B 車左倒。 2. A 快 B 慢、碰撞角 θ 小, A 車右倒, B 車左倒; A 慢 B 快、碰撞角 θ 大, A 車左倒, B 車左倒。
	B 車從 A 車 右方來		1. A 快 B 慢、碰撞角 θ 小, A 車左倒, B 車右倒; A 慢 B 快、碰撞角 θ 大, A 車右倒, B 車右倒。 2. A 車右倒, B 車右倒。
兩機車並行前部發生 擦撞	左側機車速 度較快		兩機車皆左倒
	右側機車速 度較快		兩機車皆右倒
兩機車並行, 一車左 右偏, 後部發生碰撞			左側機車左倒, 右側機車右倒。
機車突然從內側右 轉, 被直行機車碰撞	機車 A 碰撞 機車 B 前部		A 車左倒, B 車右倒。
	機車 A 碰撞 機車 B 後部		A 車左倒, B 車左倒。

四、機車與汽車(客貨車)碰撞機車的倒地方向

機車與汽車（客貨車）碰撞常見的情況如下：

4.1 兩車並行發生擦撞

1. 汽車在機車左側（見圖 29(a)）

- (1) 汽車 A 速度較快擦撞機車 B 前部， B 車碰撞後，碰撞力 F （見圖 29(b)）使把手順時針向右轉動，由陀螺力矩知機車左倒。
- (2) 機車 B 速度較快擦撞汽車 A ， B 車碰撞後，碰撞力 F （見圖 29(c)）使把手逆時針向左轉動，由陀螺力矩知機車右倒。

2. 汽車在機車右側（見圖 29(d)）

- (1) 汽車 A 速度較快擦撞機車 B 前部，碰撞力使 B 車把手逆時針向左轉動，由陀螺力矩知機車右倒。
- (2) 機車 B 前部速度較快擦撞汽車 A ，碰撞力使 B 車把手順時針向右轉動，由陀螺力矩知機車左倒。

小結：從上述分析可知，兩車並行發生擦撞。若機車向倒向汽車（例如，汽車在左側，機車左倒），這表示汽車車速較快。反之，若機車倒向外側（例如，汽車在左側，機車右倒），這表示機車車速較快。

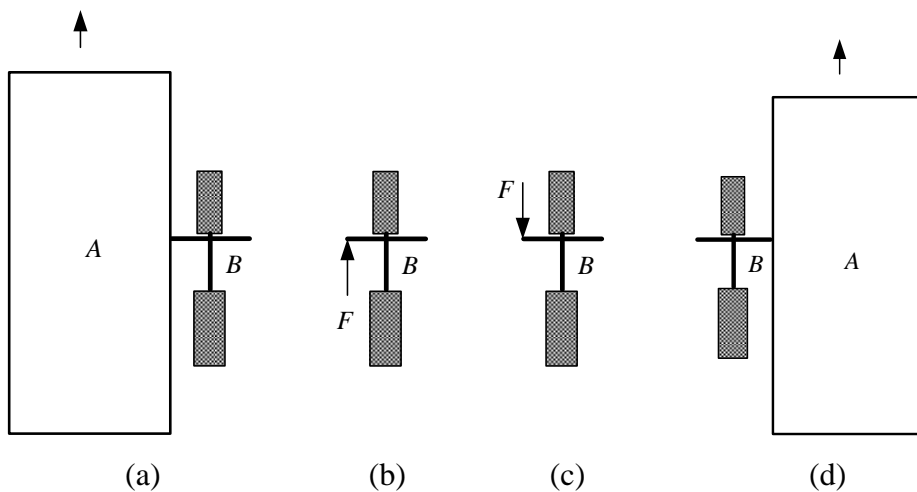


圖 29 機車與汽車並行發生擦撞

4.2 汽車(客貨車)垂直碰撞機車側面

1. 汽車(客貨車)垂直碰撞機車前後部側面(見圖 31(a))

- (1) 應用 3.1 節之分析可知，若汽車保險桿較低，且機車重心較高（如越野車），以致撞擊機車較低的部位，可能變化的結果比較大：若汽車車速較低，機車可能先左倒向汽車，再次被汽車整個車面碰撞而右倒；若汽車車速較高，機車會左倒滑行。若機車重心較低（如速克達機車），遭汽車撞擊後，機車右倒。實務上機車右倒機率高。
- (2) 客貨車撞擊機車，因貨車正面較高，機車右倒。

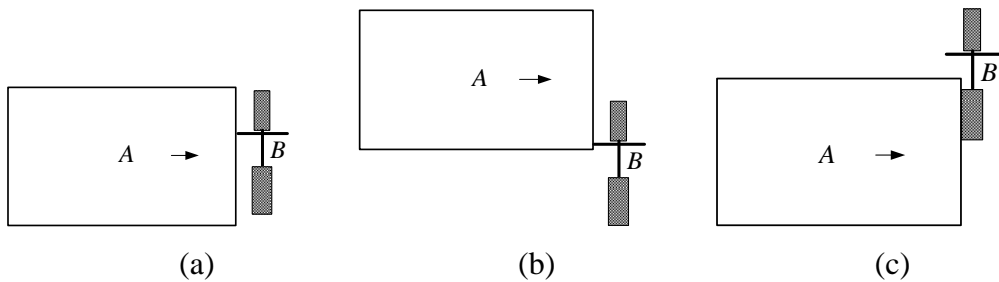


圖 31 汽車(客貨車)垂直碰撞機車側面

2. 汽車(客貨車)垂直碰撞機車前部側面(見圖 31(b))

汽車 A 碰撞機車 B，B 車碰撞後把手順時針向右轉動，由陀螺力矩知機車左倒。但若機車倒地前再次被汽車碰撞，可能右倒，也可能左倒。

3. 汽車(客貨車)垂直碰撞機車後部側面(見圖 31(c))

汽車撞擊機車較高的部位，則機車右倒。若汽車保險桿較低，且機車重心較高以致撞擊機車後部較低的部位，機車可能先左倒，再次被汽車碰撞而右倒。若客貨車撞擊機車，因客貨車較高，撞擊後機車右倒。基本上台灣的機車主要以速克達機車(Scooter)為主，其重心較低，且速克達機車的後部幾乎佔整個機車長度的百分之八十以上，因此速克達機車被側向垂直碰撞，幾乎都往碰撞力的方向倒，即左側被撞，機車右倒（左撞右倒）；右側被撞，機車左倒（右撞左倒）。自行車重心較高，當它被汽車側向垂直碰撞時，由於汽車保險桿較低，自行車倒地方向通常會先與機車相反，即先倒向汽車，然後有可能再發生二次碰撞。

圖 32 中的汽車 B 垂直碰撞速克達機車 A 左側後部車身，因機車重心低且 A、B 車皆有一定車速，造成機車右倒並向右前方滑行一段距離。

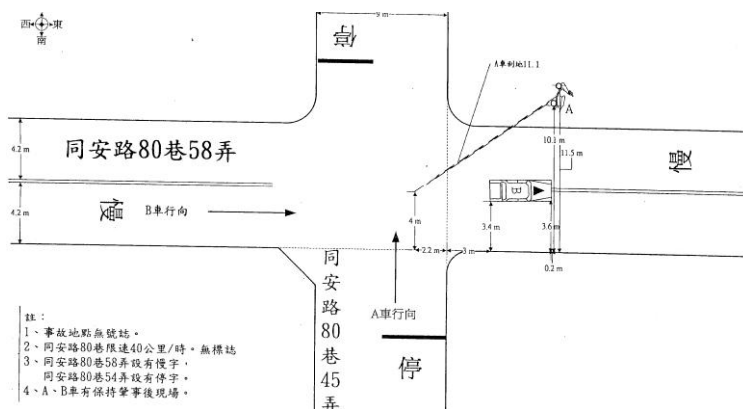


圖 32 汽車垂直碰轉速克達機車側面之例

圖 33 中的小貨車 B 垂直碰轉速克達機車 A 前後部右側，因速克達機車側面後部的尺寸較長，撞擊後部較多，速克達機車重心低，造成機車左倒在車下向前方滑行一段距離。

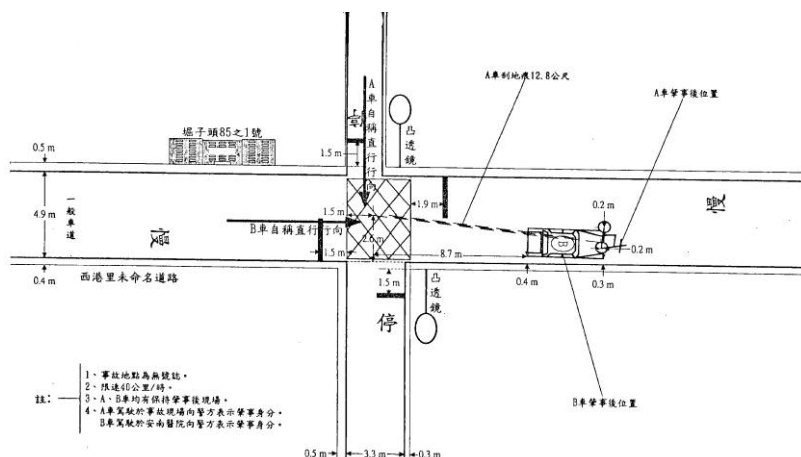


圖 33 貨車垂直碰轉速克達機車側面之例

4.3 機車垂直碰撞汽車側面

1. 機車垂直碰撞汽車側面 (見圖 34(a))

見圖 34(a)、(b)因汽車有平行汽車表面向右的切向碰撞力 F_t 與垂直汽車表面的正向碰撞力 F_c 作用在前輪上， F_t 對經 D 點之轉向軸 (參考圖 5) 的力矩 M_t 使把手順時針向右轉動， F_c 對經 D 點之轉向軸的力矩 $M_c \approx 0$ ，使 M_c 幾乎不影響 B 車碰撞後把手轉動，所以碰撞後機車 B 把手順時針向右轉動，陀螺力矩導致機車左倒。

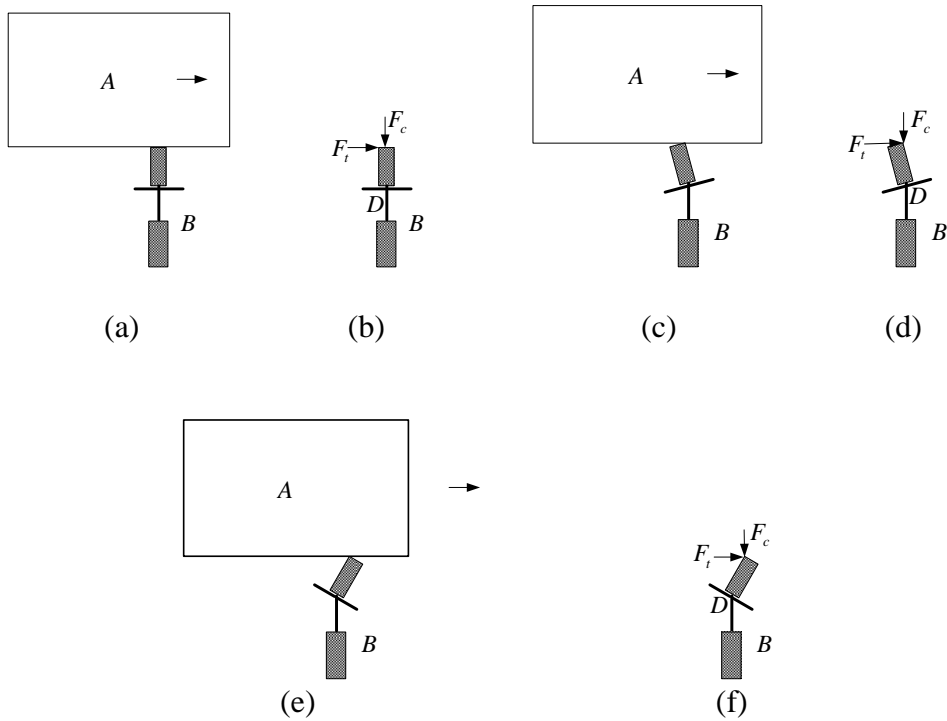


圖 34 機車垂直碰撞汽車側面

2. 機車騎士左閃而碰撞汽車側面（見圖 34(c)）

若機車騎士為了閃躲而將把手向左逆時針轉動而碰撞汽車側面時，其受力圖如圖 34(d)所示。汽車有平行汽車表面向右的切向碰撞力 F_t 作用於機車前部， F_t 對經 D 點之轉向軸（參考圖 5）的力矩 M_t ，使把手順時針向右轉動；騎士左閃，垂直汽車表面作用於機車前部的正向碰撞力 F_c 對經 D 點之轉向軸的力矩 M_c ，使把手逆時針向左轉動。若 $M_t > M_c$ ，把手順時針向右轉動的力矩較大，產生的陀螺力矩造成機車左倒，這種情形發生在汽車速度較快，機車速度較慢，機車左閃的角度小時。若 $M_t < M_c$ ，把手逆時針向左轉動的力矩較大，產生的陀螺力矩造成機車右倒，這種情形發生在汽車速度較慢，機車速度較快，機車左閃的角度大時。實務上機車左倒的機率較高。

3. 機車騎士右閃而碰撞汽車側面（見圖 34(e)）

若機車騎士為了閃躲而將把手順時針向右轉動而碰撞汽車側面時，其受力圖如圖 34(f)所示。汽車作用於機車車輪之切向碰撞力 F_t 與垂直汽車表面的正向碰撞力 F_c ，都使把手順時針向右轉動，產生的陀螺力矩造成機車左倒。

圖 35 中機車 B 垂直碰轉汽車 A 右側車身，因機車的前部受汽車的切向碰撞力作用，使得把手順時針向右轉動，產生的陀螺力矩造成機車左倒。

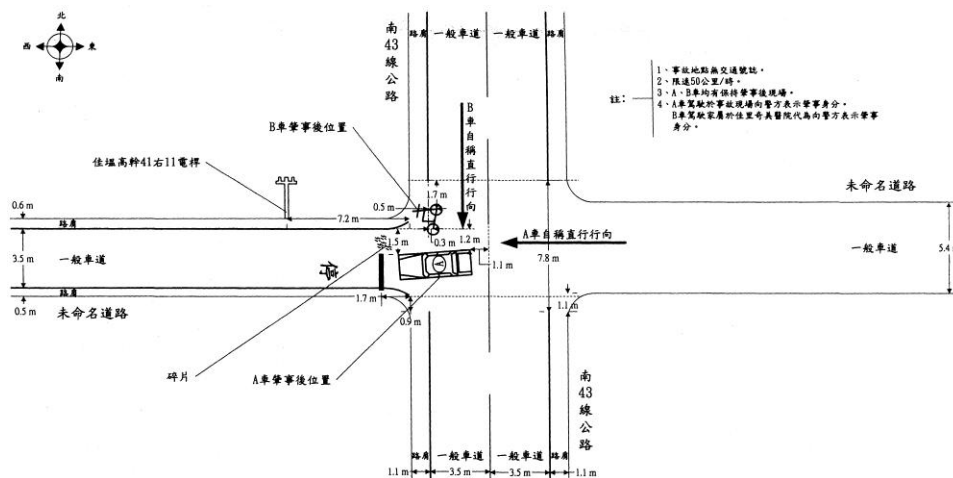


圖 35 機車 B 垂直碰轉汽車 A 右側車身之例

4.4 機車斜撞汽車側面

這種情形經常發生在直行機車碰撞對向左轉汽車，或外側直行機車碰撞內側車道右轉汽車。機車倒地方向的分析方法類似 4.3 節。

4.4.1 直行機車碰撞對向左轉汽車（見圖 36(a)）

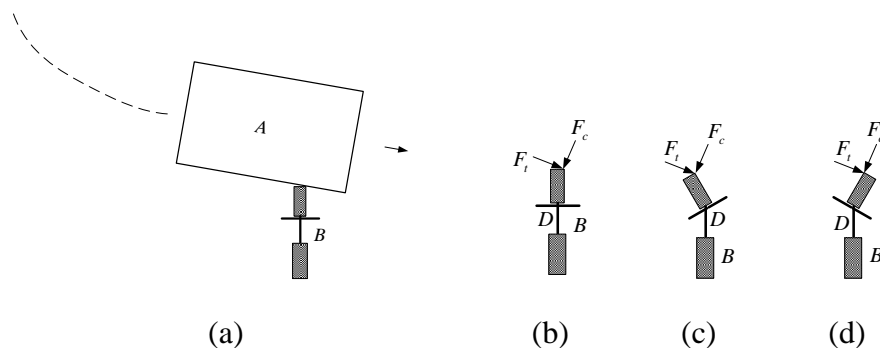


圖 36 直行機車碰撞對向左轉彎汽車

可分機車直行、左閃、右閃三種情況：

1. 直行機車直接碰撞對向左轉之汽車

參考圖 36(b)，直行機車碰撞對向左轉之汽車，平行汽車表面向外的切向碰撞力 F_t 及垂直汽車表面的正向碰撞力 F_c 作用於機車前部， F_t

對經 D 點之轉向軸（參考圖 5）的力矩 M_t 使把手順時針向右轉動， F_c 對經 D 點之轉向軸的力矩 M_c 使把手逆時針向左轉動。若 $M_t > M_c$ ，把手順時針向右轉動的力矩較大，產生的陀螺力矩造成機車左倒，這種情形發生在汽車速度較快，機車速度較慢時；若 $M_t < M_c$ ，把手逆時針向左轉動的力矩較大，產生的陀螺力矩造成機車右倒，這種情形發生在汽車速度很慢，機車速度非常快時，一般而言，發生的機率較低。

2. 直行機車左閃碰撞對向左轉之汽車

參考圖 36(c)，若機車騎士為了閃躲而將把手向左偏，汽車作用於機車前部之切向碰撞力 F_t 對經 D 點之轉向軸（參考圖 5）的力矩 M_t 使把手順時針向右轉動，垂直汽車表面作用於機車前部的正向碰撞力 F_c 對經 D 點之轉向軸的力矩 M_c 使把手逆時針向左轉動。若 $M_t > M_c$ ，把手順時針向右轉動的力矩較大，產生的陀螺力矩造成機車左倒，這種情形發生在汽車速度較快，機車速度較慢，機車左閃的角度小時；若 $M_t < M_c$ ，把手逆時針向左轉動的力矩較大，產生的陀螺力矩造成機車右倒，這種情形發生在汽車速度較慢，機車速度較快，把機車左閃的角度大時。實務上機車左倒的機率較高。

3. 直行機車右閃碰撞對向左轉之汽車

參考圖 36(d)，若機車騎士為了閃躲而將把手向右偏。汽車作用於機車前部之切向碰撞力 F_t 與正向碰撞力 F_c ，對經 D 點之轉向軸（參考圖 5）產生力矩 M_t 與 M_c 。因 F_c 對轉向軸的力臂很短， M_c 較小， $M_t > M_c$ ，把手順時針向右轉動，產生的陀螺力矩造成機車左倒。

4.4.2 外側直行機車碰撞內側車道右轉之汽車（見圖 37(a)）

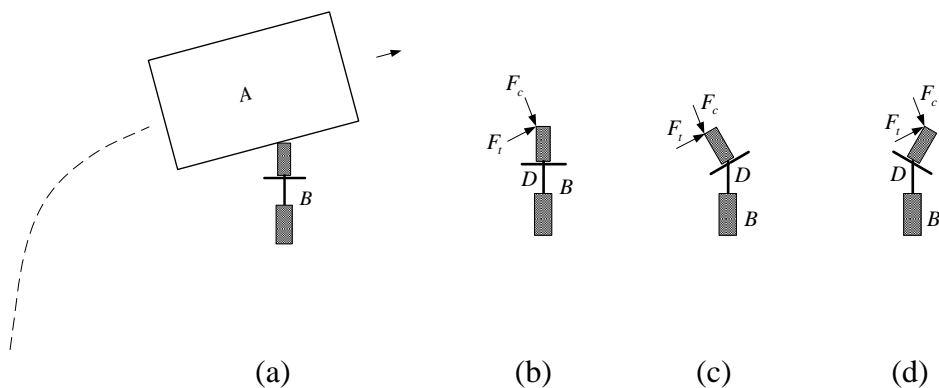


圖 37 直行機車碰撞內側車道右轉彎汽車

類似直行機車碰撞對向左轉汽車之分析：

1. 直行機車直接碰撞內側車道右轉之汽車

參考圖 37(b)，直行機車碰撞左側車道右轉之汽車，平行汽車表面向右的切向碰撞力 F_t 和垂直汽車表面之正向碰撞力 F_c 作用在機車前部。 F_t 與 F_c 對經 D 點之轉向軸（參考圖 5）的力矩分別為 M_t 和 M_c ，他們皆使機車把手順時針向右轉動，產生的陀螺力矩導致機車左倒。

2. 直行機車左閃碰撞內側車道右轉之汽車

參考圖 37(c)，若機車騎士為了閃躲而將把手向左偏，汽車作用於機車前部的切向碰撞力 F_t 和正向碰撞力 F_c ，它們對經 D 點之轉向軸（參考圖 5）的力矩分別為 M_t 和 M_c 。 M_t 使把手順時針向右轉動， M_c 使把手逆時針向左轉動。若 $M_t > M_c$ ，把手順時針向右轉動的力矩較大，產生的陀螺力矩造成機車左倒，這種情形發生在汽車速度較快，機車速度較慢，機車左閃的角度小時；若 $M_t < M_c$ ，把手逆時針向左轉動的力矩較大，產生的陀螺力矩造成機車右倒，這種情形發生在汽車速度較慢，機車速度較快，機車左閃的角度大時。實務上機車左倒機率較高。

3. 直行機車右閃碰撞內側車道右轉之汽車

參考圖 37(d)，若機車騎士為了閃躲而將把手向右偏，汽車作用於機車前部有切向碰撞力 F_t 和正向碰撞力 F_c ， F_t 與 F_c 對經 D 點之轉向軸的力矩分別為 M_t 和 M_c ，他們皆使把手順時針向右轉動，產生的陀螺力矩造成機車左倒。

圖 38 為直行機車 B 撞上對向左轉之汽車 A 的右側車身，因機車前部受汽車的切向碰撞力作用，使得把手順時針向右轉動，產生的陀螺力矩造成機車左倒。

圖 39 為直行機車 B 撞上左側右轉之汽車 A 的右側車身，因機車前部受汽車的切向碰撞力作用，使得把手順時針向右轉動，產生的陀螺力矩造成機車左倒。

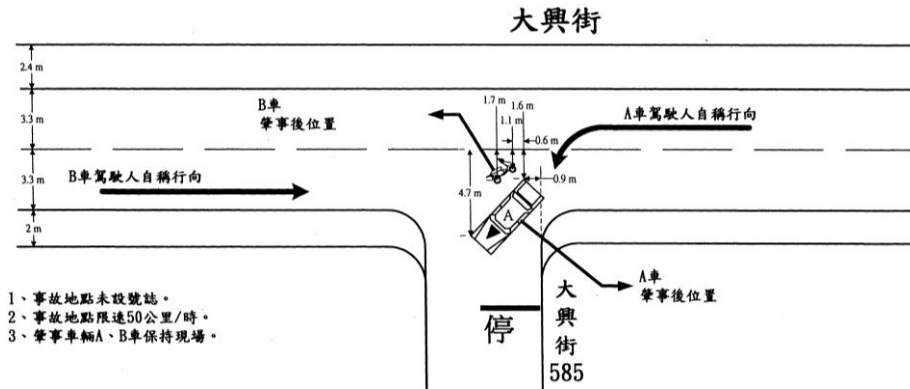


圖 38 直行機車碰撞左轉彎汽車之例

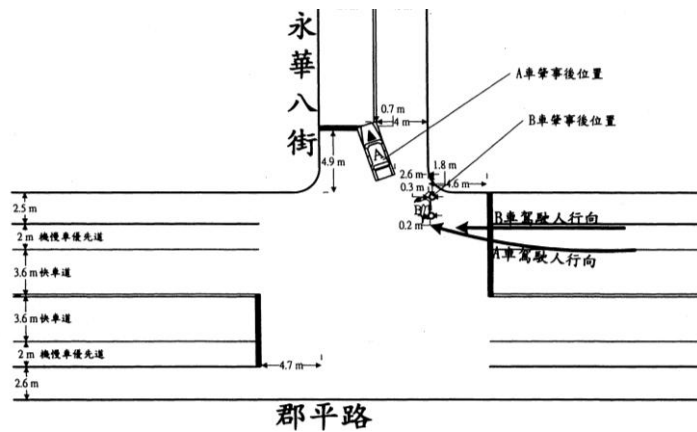
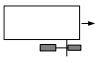
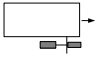
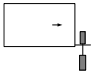
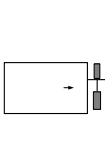
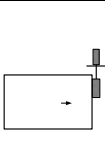
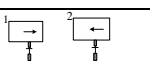
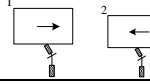
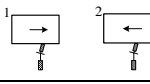
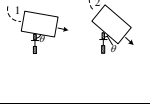
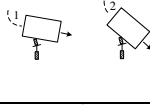
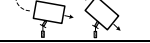

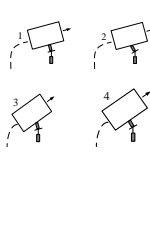



圖 39 直行機車碰撞右轉彎汽車之例

上述各種機車與汽車常見的碰撞形式，並沒有分析所有方向發生的碰撞，但其分析原理是相同。我們用邏輯推理將機車與汽車的碰撞形式和倒地方向製成表 2，方便參考使用。

表 2 機車與汽車(客貨車)碰撞機車的倒地地方向

機車與汽車 並行 車擦	汽車速度較快		機車倒向汽車(汽車在左側, 機車左倒; 汽車在右側, 機車右倒)。
	機車速度較快		機車倒向外側(汽車在左側, 機車右倒; 汽車在右側, 機車左倒)。
汽車(客貨車)垂直碰撞 機車側面	垂直碰撞機車前部側面		機車前部左側被撞, 機車左倒(左撞左倒)。 機車前部右側被撞, 機車右倒(右撞右倒)。
	垂直碰撞機車前後部側面		1. 若汽車保險桿較低, 且機車重心較高(例如越野車), 則機車倒向汽車, 左撞左倒, 右撞右倒, 並可能發生二次碰撞, 使倒地地方向與前述方向相反。 2. 若機車重心較低(例如速克達機車), 則左撞右倒, 右撞左倒。 3. 客貨車撞擊機車側面, 機車倒向非受撞方向, 即左撞右倒, 右撞左倒。
	垂直碰撞機車後部側面		1. 若汽車保險桿較低, 且機車重心較高(例如越野車), 則機車倒向汽車, 左撞左倒, 右撞右倒, 並可能發生二次碰撞, 使倒地地方向與前述方向相反。 2. 若機車重心較低(例如速克達機車), 則左撞右倒, 右撞左倒。 3. 客貨車撞擊機車側面, 機車倒向非受撞方向, 即左撞右倒, 右撞左倒。
機車垂直碰撞 汽車側面	機車直行		1. 汽車左方來, 機車左倒; 2. 汽車右方來, 機車右倒。
	機車左閃		1. 汽車左方來車速快, 機車速度慢, 把手左閃角度小, 機車左倒; 機車速度快, 把手左閃角度大, 機車右倒。 2. 汽車右方來, 機車右倒。
	機車右閃		1. 汽車左方來, 機車左倒。 2. 汽車右方來車速快, 機車速度慢, 把手右閃角度小, 機車右倒; 機車車速快, 把手右閃角度大, 機車左倒。
直行機車對向之 汽車	機車直行		1. 汽機車斜碰撞角度 θ 較大(較正碰撞)時, 機車左倒。(機率高) 2. 汽車速度慢, 機車速度快且汽機車斜碰撞角度 θ 較小時, 機車右倒。
	機車左閃		1. 較正碰撞, 汽車速度快, 機車速度慢, 把手左閃轉動的角度小, 機車左倒。 2. 較斜碰撞, 汽車速度慢, 機車速度快, 把手左閃轉動的角度大, 機車右倒。
	機車右閃		汽機車較正或較斜碰撞, 機車皆左倒。
外側直行 內側轉 右側之 汽車	機車直行		汽機車較正或較斜碰撞, 機車皆左倒。
	機車左閃		1. 汽機車較正碰撞, 機車把手左閃轉動的角度小時, 機車左倒。(機率高) 2. 汽機車較正碰撞, 機車速度快且把手左閃轉動角度大時, 機車右倒。 3. 汽機車較斜碰撞, 機車把手左閃轉動的角度小時, 機車左倒。 4. 汽機車較斜碰撞, 把手左閃轉動的角度小時, 若汽車速度快, 機車速度慢, 機車左倒; 若汽車速度慢, 機車速度快, 機車右倒。
	機車右閃		汽機車較正或較斜碰撞, 機車皆左倒。

五、結論

本文以力學原理分析機車碰撞或擦撞後的倒地方向，詳細介紹了陀螺的特性與陀螺力矩形成的原理。對機車與機車碰撞，及機車與汽車碰撞常見的形式，分別加以說明，輔以實例驗證機車的倒地方向，並製成兩個表，方便參考使用。判斷機車左倒或右倒的基本原則為：若機車行進中碰撞有涉及機車前部（前輪、前輪蓋、前叉、前把手、照後鏡等），若碰撞後機車把手順時針向右轉動，則根據陀螺力矩機車左倒；若碰撞後機車把手逆時針向左轉動，則根據陀螺力矩機車右倒。若碰撞涉及機車後部（車架、車殼、引擎、傳動系統、後懸吊系統、排氣管與後輪等），此時機車倒地方向主要由碰撞高度與機車重心高度決定。速克達機車重心低，因此碰撞後部時，朝碰撞力方向倒。例如車身左側遭撞，碰撞力方向朝右，機車右倒（左撞右倒）。若車身右側遭撞，碰撞力方向朝左，機車左倒（右撞左倒）。由上述的機車倒地方向分析及車損部位，我們可以推測交通事故中，機車碰撞的行向與碰撞形式，作為肇事責任歸屬的參考。

當然有時機車前部被擦撞後形成的陀螺力矩不夠大，機車騎士可能用其操控能力反向旋轉把手；或者機車被撞後又與撞擊車發生二次碰撞等，造成倒地方向與原來相反，但這些情況是比較少的例外。因此，本文用力學原理說明機車碰撞或擦撞後的倒地方向的判斷方法，簡單易懂，可供交通警察或車輛行車事故鑑定委員會委員參考，具有一定的實用價值。

致謝

感謝臺南市車輛行車事故鑑定委員會提供會議案件作為本文案例。

參考文獻

- 宋景芬、張國方(1999)，「摩托車碰撞交通事故再現研究」，*武漢汽車工業大學學報*，第 21 卷第 2 期，頁 1-3。
- 林志儒(2005)，*機車事故之電腦模擬*，臺灣科技大學機械工程系碩士論文。
- 林峻弘(2009)，*機車事故鑑定之行車速度推估研究*，龍華科技大學工程技術研究所碩士論文。
- 施人維(2012)，*汽機車同向碰撞行車事故之模擬*，臺灣科技大學機械工程系碩士論文。

郭磊 (2008), 汽車與兩輪車碰撞事故的仿真研究及應用, 上海交通大學機械與動力工程學院博士論文。

張超群、劉成群 (2008), 應用力學-動力學, 二版, 臺北: 新文京開發出版股份有限公司。

張超群、劉成群 (2012), 摩托車動力學, 臺北: 五南圖書出版公司。

羅智寧 (2008), 汽車與摩托車碰撞事故車速估計建模, 吉林大學碩士論文。

Beer, F. P. and Johnston, E. R. (1999), *Vector Mechanics for Engineering: Dynamics*, 3rd SI Metric ed., New York: McGraw-Hill.

Brach, R. M. and Brach, R. M. (2005), *Vehicle Accident Analysis and Reconstruction Methods*, Warrendale, PA: SAE International.

Huang, M. (2002), *Vehicle Crash Mechanics*, Warrendale, PA: SAE International.

Macmillan, R. H. (1983), *Dynamics of Vehicle Collisions*, Warrendale, PA: Interscience Enterprises.

Obenski, K. S. and Hill, P. F. (2002), *Motorcycle Accident Reconstruction and Litigation*, 3rd ed., Tucson, AZ: Lawyers & Judges Publishing Company.

(收稿 2014/10/23, 第一次修改 2015/3/2, 定稿 2015/10/3)