

## Lecture #9

### 鐵路車輛、列車阻力、與牽引力

#### 9.1.5 車輛行駛裝置

##### 1. 輪緣傾斜角度

脫軌造成生命財產的損失，必須設法防止，但造成脫軌的因素甚多，與工務關係較密切者為車輪橫壓與軸重關係變化造成的脫軌。說明如下：

##### (1) 滑上型脫軌 (derailment due to slip)

車輪以其傾斜踏面接觸鋼軌面，受橫壓後，車輪有滑上傾向。參考圖 9-4 (a)。以  $W$  表示車輪重、 $H$  表示橫壓、 $\theta$  表示輪軌接觸點的輪緣傾斜角、 $\mu$  為鋼軌與輪緣間的摩擦係數，當  $H$  增大，而車輪開始上滑時，下式的關係成立：

$$H \cos \theta \geq W \sin \theta + \mu (H \sin \theta + W \cos \theta) \quad \dots\dots\dots \text{(式 9-5)}$$

$$\therefore H \geq \frac{\tan \theta + \mu}{1 - \mu \cdot \tan \theta} \cdot W \quad \dots\dots\dots \text{(式 9-6)}$$

此時車輪將滑上鋼軌導致脫軌，稱為滑上型脫軌。一般言， $\mu$  值小時，容易發生此型脫軌。

##### (2) 爬上型脫軌 (derailment due to wheel climbing)

車輛行駛於急曲線時，輪緣前端與鋼軌頭部側面緊密接觸，如圖 9-4 (b) 所示。此時車輪有爬上軌面傾向，參考圖 9-4 (c)，造成爬上型脫軌，此型脫軌時輪重與橫壓關係為：

$$W \sin \theta \leq H \cos \theta + \mu (W \cos \theta + H \sin \theta) \quad \dots\dots\dots \text{(式 9-7)}$$

$$\therefore H \geq \frac{\tan \theta - \mu}{1 + \mu \tan \theta} \cdot W \quad \dots\dots\dots \text{(式 9-8)}$$

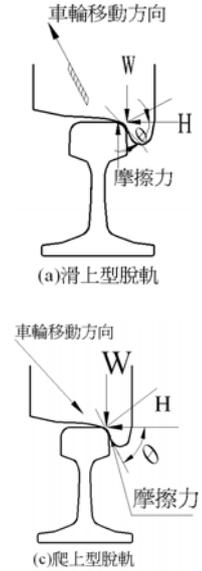
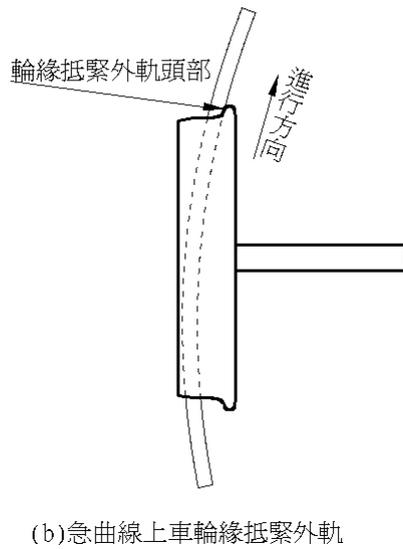


圖 9-4 輪緣與鋼軌的接觸狀態

(3) 脫軌與輪緣傾斜角度關係

將(式 9-6)及(式 9-8)右邊分別對  $\theta$  微分得：

$$\frac{d}{d\theta} \left( \frac{\tan \theta + \mu}{1 - \mu \tan \theta} \right) = \frac{1 + \mu^2}{(1 - \mu \tan \theta)^2 \cos^2 \theta} > 0 \quad \dots\dots\dots (式 9-9)$$

$$\frac{d}{d\theta} \left( \frac{\tan \theta - \mu}{1 + \mu \tan \theta} \right) = \frac{1 + \mu^2}{(1 + \mu \tan \theta)^2 \cos^2 \theta} > 0 \quad \dots\dots\dots (式 9-10)$$

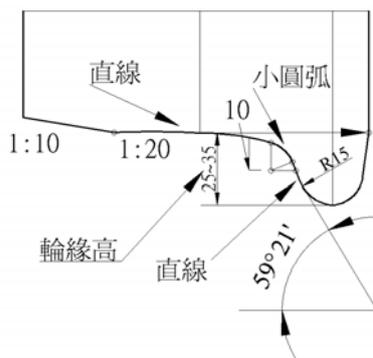


圖 9-5 車輪踏面與輪緣形狀

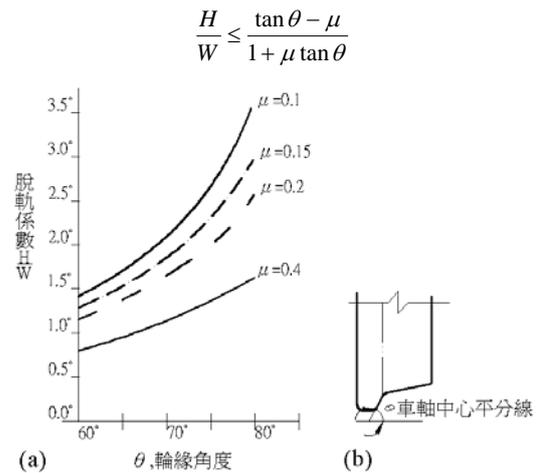


圖 9-6 摩擦係數與脫軌係數的關係

由(式 9-9)及(式 9-10)知： $\theta$  減小，脫軌可能性亦增大。而由圖 9-5 知，當  $H$  增大時，輪軌接觸點向輪緣頂端移動，使  $\theta$  值逐漸減小。故輪重與橫壓  $H$  的比值，可顯示脫軌的危險程度，一般稱  $H/W$  為脫軌係數 (derailment coefficient)。為確保行車安全，脫軌係數宜小於 0.75。

#### 4. 車輪輪廓形狀 (profile):

鐵路車輛的車輪都是兩個一組，固定在一根輪軸上，同時轉動。為令車輛行駛於直線上時，左右擺動不致擴大；同時考慮曲線行駛時，內外鋼軌長度的差異，一般車輪形狀皆略呈錘形，其車輪踏面的斜度約在 $1/10$ 至 $1/40$ 間。

## 9.2 列車阻力

列車阻力種類：出發阻力、行駛阻力、坡道阻力、彎道阻力、隧道阻力、加速阻力

1. 出發阻力：阻礙停車中之車輛啟動之力稱為出發阻力。

通常運轉計劃時對銅襯軸承車輛所採用之出發阻力為  $8 \text{ Kg/ton}$ 。使用滾柱軸承之車輛因車軸與軸承間之摩擦係滾柱之滾動摩擦，故其出發阻力頗小。根據使用該軸承客車之試驗結果，其出發阻力僅在  $1.9 \sim 2.5 \text{ Kg/ton}$  之間，於運轉計劃時為安全計乃採用略大之  $3 \text{ Kg/ton}$  計算，並於  $3 \text{ km/h}$  附近降至最小。

2. 行駛阻力：列車在平坦直線上行駛時所發生之阻力稱為行駛阻力，發生此項阻力之原因頗多，大體可分為下列六項：軸承摩擦阻力、車輪與鋼軌間之摩擦力、空氣阻力、因動搖而發生之阻力、機械阻力、雜阻力

行駛阻力之起因如上述頗為複雜，故欲計算其個別原因之阻力值相加作為行駛阻力，不但不易且計算結果之誤差亦較多，因之通常均根據車輛之實際試驗成績導出實驗公式計算之，通常行駛阻力實驗公式型式如下：

$$R = a + bV + cV^2 \quad \dots\dots\dots \text{(式 9-16)}$$

3. 坡道阻力：列車爬坡時除前述行駛阻力，須多付出一些力，以克服地心引力將車輛本身之重量提至坡道之高度。此項用於將列車重量提高至坡度上之力，通稱為坡度阻力。

路線坡度以千分率表示時，設車輛重量為  $W$  噸，其爬上  $i\%$  上坡的坡道阻力為  $R_i$ 。

$$R_i (\text{Kg}) = W [t] \cdot \sin \alpha \cdot 1000 [\text{Kg}] \cong W \cdot \frac{i}{1000} \cdot 1000 = W \cdot i \quad \dots\dots\dots \text{(式 9-17)}$$

車輛每噸的坡道阻力  $\gamma$  [ Kg ] 為：

$$\gamma [\text{Kg/t}] = i \quad \dots\dots\dots \text{(式 9-18)}$$

4. 彎道阻力：車軸在彎道上運轉時之阻力較在直線上運轉時為大，此項在彎道上增多之阻力稱為彎道阻力。

莫里遜氏曾發表下式：

$$\gamma_c = \frac{1000\mu(G+L)}{2R} \quad \dots\dots\dots \text{(式 9-19)}$$

為處理簡便計，常將坡道上之彎道，依上述求其阻力後，換算為坡度加於實際坡度，稱為換算坡度。例如  $10\%$  上介有半徑  $300$  公尺之彎道時，在該路線上之列車，除行駛阻力等另行計算外；坡道阻力為  $10 \text{ kg/ton}$ ，彎道阻力為

$\frac{600}{300} = 2 \text{ Kg/ton}$ ，兩者合計為  $12 \text{ kg/ton}$ ，恰與  $12\%$  直上坡道之坡度阻力相等，此

$12\%$  即為此時之換算坡度。

設  $i_o$  為換算坡度，即：

$$i_o = i + \frac{600}{R} \quad (\text{一般列車}) \dots\dots\dots (\text{式 9-21})$$

5. **隧道阻力**：列車通過隧道時，隧道內風壓發生變化而增大空氣阻力，其增加幅度與隧道斷面形狀、長度、列車速度有關。

6. **加速阻力**：機車牽引力如大於列車等運轉時之總阻力（即行駛阻力或出發阻力與坡度阻力及彎道阻力之和）其超出總阻力之牽引力乃使列車作加速運動。此項使列車作加速運動之餘裕牽引力稱為加速力。

令  $F$ ：加速力〔Kg〕

$W$ ：列車重量〔ton〕

$\alpha$ ：列車加速度〔m/sec/sec〕

$g$ ：重力加速度 =  $9.8 \text{ m/sec/sec}$

$$\therefore F = \frac{1000W}{g} \alpha = 102W\alpha$$

$\therefore$  列車每噸之加速力  $f$ 〔Kg〕為：

$$f = \frac{F}{W} = 102\alpha \quad \dots\dots\dots (\text{式 9-23})$$

此項加速力  $f$  為假定車輛為完全之直進體時之加速力，但車輛因有車輪、車軸、傳動齒輪或牽引馬達電樞等之迴轉部份，此迴轉部份之迴轉速度與車輛運轉速度成正比，因之運轉速度增加此等之迴轉速度亦比例增加。

一般列車之迴轉速度（慣性力）平均值約為直進加速力之  $6\%$ ，故列車每噸之實際加速力（即加速阻力）即成

$$f = \gamma_{ac} = 102\alpha \times (1 + 0.06) = 108\alpha \quad \dots\dots\dots (\text{式 9-24})$$

若列車於  $T$ 〔min〕時間內，速度由  $V_1$ 〔km/h〕增至  $V_2$ 〔km/h〕，而行駛  $S$ 〔m〕距離時，其加速力  $f$  可表示如：

$$f = 108\alpha = 108 \times \frac{\left(\frac{V_2}{3.6}\right)^2 - \left(\frac{V_1}{3.6}\right)^2}{2S} = 4.17 \frac{V_2^2 - V_1^2}{S} \quad \dots\dots\dots (\text{式 9-27})$$

### 9.3 機車牽引重量

機車牽引定數(nominal tractive capacity)：機車牽引定數係指列車按其「速度種別」規定之站間定時分運轉時，機車能安全牽引之最大重量。此項機車能安全牽引之客貨車重量（即牽引定數），則由機車牽引力及列車阻力之大小所決定。運轉速度愈低，因牽引力愈大而列車阻力愈小，故牽引定數愈大；運轉速度愈高則因牽引力愈小，列車阻力愈大，故牽引定數愈小。

機車牽引重量：

1. 牽引桿牽引力

引擎馬力所發生之動輪周牽引力並非能全部用於牽引客貨車，其中一部份仍被機車之阻力所抵消，故以動輪周牽引力減去機車阻力所剩之力始為實際可用於牽引客貨車者。此項能實際牽引客貨車之力稱為牽引桿牽引力。

通常所稱之牽引桿牽引力係指機車在平直線上之牽引桿牽引力（機車在坡道及彎道時須扣除機車之坡道及彎道阻力，始為當時之實際牽引桿牽引力），可用下式求之。

$$T_o = T - R\ell \quad \dots\dots\dots \text{ (式 9-28)}$$

- 式  $T_o$ ：在平直線上之牽引桿牽引力(Kg)
- $T$ ：動輪周牽引力(Kg)
- $R\ell$ ：機車行駛阻力(Kg)

2. 牽引重量

牽引桿牽引力如上所述為可實際牽引客貨車之力，故當列車在平直線上以某一等速度運轉時，牽引桿牽引力應與牽引車輛之行駛阻力相等，故此時之牽引重量得按下列方式求之。

$$T_o = \gamma W$$

$$\therefore W = \frac{T_o}{\gamma} \quad \dots\dots\dots \text{ (式 9-29)}$$

- 式  $W$ ：牽引重量(ton)
- $T_o$ ：在平直線上之牽引桿牽引力(Kg)
- $\gamma$ ：牽引車輛行駛阻力(kg/ton)

列車在彎道及坡度上行駛時須再減去機車之彎道阻力及坡度阻力，始為機車在此路線上可牽引客貨車之牽引力。此時牽引車輛之阻力除行駛阻力外另有彎道及坡道阻力，因此在彎坡道上之牽引重量可按下式求之：

$$T_o - (\gamma_g + \gamma_c)W_i = (\gamma + \gamma_g + \gamma_c)W$$

$$\therefore W = \frac{T_o - (\gamma_g + \gamma_c)W_i}{\gamma + \gamma_g + \gamma_c} \quad \dots\dots\dots \text{ (式 9-30)}$$

式  $W$  : 牽引重量 (ton)  
 $W_i$  : 機車重量 (ton)  
 $\gamma_g$  : 坡道阻力 (kg/ton)  
 $\gamma_c$  : 彎道阻力 (kg/ton)

又列車在平直線上開車時之牽引重量得以下式求之。

$$T_o = \gamma_s W$$

$$\therefore W = \frac{T_o}{\gamma_s} \dots\dots\dots (式 9-31)$$

式  $\gamma_s$  : 牽引車輛之出發阻力 (kg/ton)

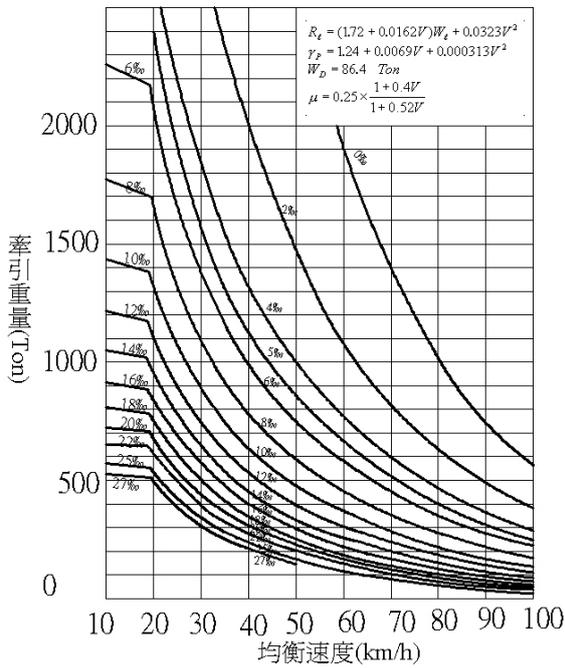


圖 9-15  $R_{150}$  型柴油電氣機車牽引重量 (鋼皮客車) 曲線<sup>(6)</sup>

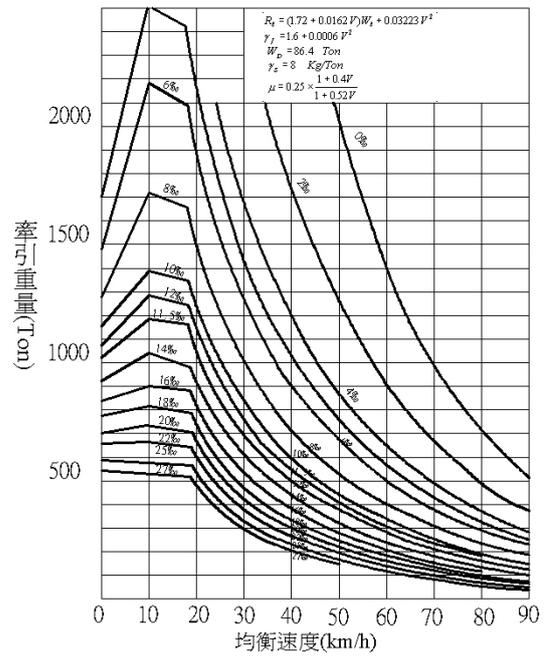


圖 9-16  $R_{150}$  型柴油電氣機車牽引重量 (貨車) 曲線<sup>(6)</sup>

均衡速度(balancing speed)：因機車牽引力隨運轉速度之升高漸減小，而行駛阻力則隨運轉速度之升高而增大，故可推想列車開車後當運轉速度升高至某一速度，牽引力即與阻力相等而達平衡狀態。此時路線及運轉條件如無變化，列車即維持同一速度作等速運轉。此項牽引力與阻力相等（指動輪周牽引力與列車總阻力或牽引桿牽引力與牽引車輛阻力相等），列車保持等速度運轉時之運轉速度稱為均衡速度。

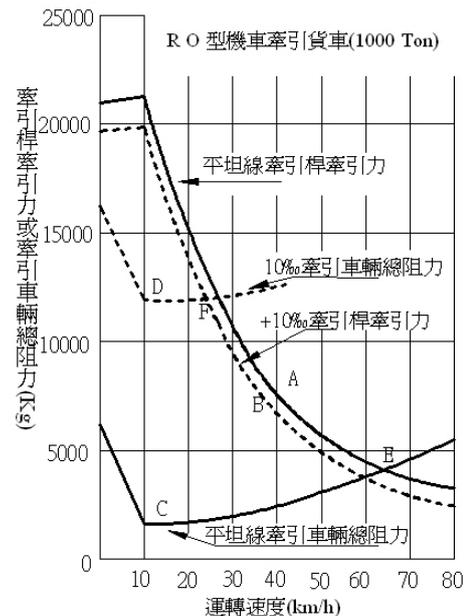


圖 9-17 均衡速度<sup>(6)</sup>

### 9.3.4 機車牽引定數之訂定

#### 1. 支配坡度（查定坡度）

限制機車牽引定數之因素頗多，其中以路線之坡度為最大。**支配坡度 (ruling grade)** 係指在列車運轉區間中對機車牽引定數影響最大之坡度，亦即指列車運轉時需最大牽引力之坡度而言；又因以該坡度查定機車牽引定數，故又名為「查定坡度」。

支配坡度並非一定為該運轉區間內最陡之坡度，較陡之坡度如長度較短且坡度起點處之列車速度較高時，因可利用列車在坡道上降低速度放出之動能幫助列車登坡，故此時之支配坡度即為後述之假想坡度。因此，此時之牽引重量自較按該實際坡度求得之牽引重量為大。坡度長度雖短，但若其起點接近車站，列車出發未幾速度尚未升高已需進入坡道時，因無動能可利用，故此時該實際坡度應視為支配坡度而依此查定牽引定數。綜合上述，可知支配坡度係依實際坡度之大小、坡道之長短、列車在坡度起點處之速度、坡度上之計劃均衡速度等而異。

例題：

### 3.2###列車阻力###

99.37 鐵路列車阻力有那幾種？①基本阻力 ②坡度阻力 ③曲線阻力 ④加速阻力

(A)①②③④ (B)②③④ (C)①③④ (D)①②④

98.16 一般列車車輪踏面之斜度約於多少之間？

(A)1/10至1/30間 (B)1/10至1/40間 (C)1/10至1/50間 (D)1/10至1/60間

97.27 軸承摩擦阻力、輪軌摩擦阻力、空氣阻力、機械阻力、軌道變形阻力等等統稱為下列那一項阻力？

(A) 坡度阻力 (B) 行駛阻力 (C) 彎道阻力 (D) 加速阻力