

第三章 車輛行駛時間之探討

(資料來源：張有恆，「都市大眾運輸系統與技術」)

第一節 車輛在站間行駛時間之分析

第二節 營運方式與運輸能源消耗

第三章 車輛行駛時間之探討

(資料來源：張有恆，「都市大眾運輸系統與技術」)

第一節 車輛在站間行駛時間之分析

(資料來源：張有恆，「都市大眾運輸系統與技術」)

大部分的大眾運輸系統都是在擁有不少車站的路線或運輸走廊上服務，因此車輛在站間行駛會有走走停停的現象。使用A型路權的運輸系統(如捷運系統)，其車輛運動的情形幾乎可以事先決定。反之，在地面的大眾運輸系統(公車或電車)，由於外部的干擾，如交通、車流、行人及號誌等，使其旅行時間變異相當大。所以對於地面運輸系統的旅行時間比較無法從事精確的分析。本節的分析主要是針對使用完全專用路權的運輸系統來討論，對於地面運輸系統而言，則須經過一些修正。

爲了分析車輛在站間的旅行行爲，本節首先定義車輛行駛的基本變數，並且找出大眾運輸車輛的基本變數值；其次是討論大眾運輸車輛在路線上可能的行駛方式；最後則探討車輛在站間行駛的運動方程式與圖形。圖3—23顯示出一般車輛在站間運動的所有基本變數及其可能的行駛方式。

一、車輛行駛之基本變數

大凡探討車輛特性、旅行時間、班距、時刻表編排及旅客舒適程度等，均須瞭解車輛行駛的基本變數。這些變數是由距離和距離對時間次第微分而得的變數，如下所示：

$$\text{距離} \quad s = f(t) ; \quad (3-46a)$$

$$\text{速度} \quad v = \frac{ds}{dt} ; \quad (3-46b)$$

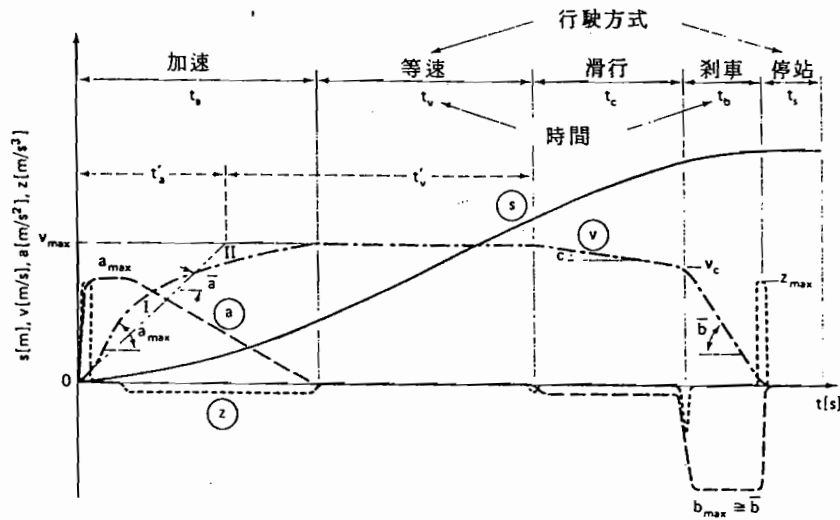


圖3-23 電力車輛在站間行駛方式與基本參數

$$\text{加速度} \quad a = \frac{d^2 s}{dt^2} ; \quad (3-46c)$$

$$\text{和 急動 (Jerk)} \quad z = \frac{d^3 s}{dt^3} \quad (3-46d)$$

距離 s 通常經由時間—距離圖 (Time-Distance Diagram) 來分析。此圖可用於大眾運輸路線之排班、大眾捷運系統區間號誌、車輛行駛於有號誌的交叉路口以及車輛行駛於站間的旅行時間分析。

速度 v 則是時間—距離圖 (見圖3-23) 曲線上任何一點的斜率。此外，分析車輛特性及其對旅行時間的影響，仍以在時間—速度圖上着手較佳，在此圖形上縱座標代表速度，橫座標代表時間，而車輛行駛的距離 (s) 則是曲線下所涵蓋的面積：

$$s = \int v dt$$

由一些典型的車輛行駛行為分析，時間—速度圖經常被用於：

1. 加速度、最大速度、滑行 (Coasting) 等對旅行時間的影響；
2. 站間距離對平均速度的影響；
3. 車輛行駛方式對於能源消耗的影響等。

在路線上行駛的車輛，其最大速度隨路權型態 (C、B 或 A 型路權)、車站配置的幾何關係、站間距離等而異。對於市中心的短程運輸車輛 (如小型公車) 而

言，有時其最大技術速度（Technical Speed）只有40公里／小時；而一般地面之公車其最大速度約為40～65公里／小時，雖然在技術設計上可達到65～80公里／小時；都市大眾捷運系統的車輛，一般而言，其最大速度可達到65～100公里／小時；公車行駛於快速車道上則可達到90公里／小時（55mph）的速度；對區域鐵（RGR）及行駛於較長站距的新型捷運車輛，其最大速度有時可高達120～130公里／小時。

加速度（ a ）是由速度對時間求導數而得，有時可繪在時間—加速度圖形上，但通常不畫在時間—加速度圖，而直接對時間—速度圖的速度曲線求其斜率即可求得加速度。

加速度影響能源消耗及旅行時間，特別是在必須經常停車的路線更是如此。加速度最大值通常受限於站立旅客的舒適程度與安全的考慮；雖然有時馬達馬力（在陡坡時）和黏着力（在光滑路面下）也是其限制因素。通常由於旅客舒適及安全因素的限制，使得最大加速度在1.0～1.8公尺／秒²之間；減速度亦受限於旅客因素，其值亦同；但是緊急剎車時通常允許較大的減速度，約在2.0～3.0公尺／秒²之間。

急動（ z ）是每單位時間內加速度的改變量，實際上是影響旅客乘車舒適程度的最重要因素。因為不論速度大小，只要是等速，則車上的乘客並不會感到力的存在；但乘客可感覺到加速度，但若加速度為常數，則乘客可固定自己以對抗加速力；然而，急動是一種欲令乘客失去平衡的力，因此必須設計車輛使其加速度的變化不超過0.5～0.6公尺／秒³。圖3—23亦顯示出在站間運動車輛的“急動”（Jerk）變化的情形。

二、車輛行駛方式

對於大眾運輸的車輛而言，站間運動有四種到五種不同的行駛方式：即加速、等速、滑行、剎車及停站等為一循環。其旅行時間及距離的表示方式，將分別在下面討論。

（一）加速方式（Acceleration Regime）

如圖3—23所示，車輛在站間運動的第一種行駛方式為加速，亦即車輛最初以其可應用的最大加速度 a_{max} 來加速；然後以此加速度保持一段時間後，即逐漸降低

至零，此時車輛速度為最高。

爲了增加車輛的平均旅行速度，最好儘可能的達到車輛的最大加速度，並且長時間的保持此一加速度運動。因爲電動馬達在短暫的時間內，能產生較大的牽引力，所以電動車輛通常比使用內燃機引擎的車輛有較佳的加速特性，即加速率大而且加速時間較長。

對鐵路車輛而言，特別是對具有間接控制系統的車輛，其技術說明書內通常有很精確的最大加速度、平均加速度及最大急動的資料；但公車的技術說明書往往就沒有這些資料，所以必須經由實地測試方可得到這些資料。一般而言，除了公車的引擎常受限制於一非常低的加速度以避免太高的急動外，公車的加速度並未經過精確的設計。

車輛在加速期間，由於加速率可以隨時改變，因之在時間—速度圖上先爲一條直線，然後變爲一凹曲線（凸於原點）。所以要計算這段間隔內的旅行時間及距離並不容易。在圖3—23的 $t-v$ 線可以下面方程式加以計算：

$$v = v_{\max} (1 - e^{-t/\tau}) \quad (3-47)$$

其中 $\tau = v_{\max} / a_{\max}$ ，在某些實例中，所有的變數可經由電腦加以計算。然而對於一般旅行時間之分析而言，極精確是不需要的，所以通常是將加速度視爲一常數（等加速度），以簡化分析過程。通常求得近似值的方法有幾種，(1)當站間距離大到可使車輛達到其最大速度時，則由靜止加速到最大速度的平均加速度 \bar{a} 即被採用。此一平均加速度將經過選擇以使此一加速曲線與在時間—速度圖上的實際加速曲線（圖3—23之I與II）下的面積相等。如該圖所示，當採用 \bar{a} 計算時，則須使用一較短的加速時段 t'_a 和一個較長的等速行駛時段 t'_v ；(2)對於無法達到最大速度的站間距離而言，其平均加速度可以加大，至於準確的加速度值則必須由加速度曲線求得，其最高的可能值是最初的加速度值 a_{\max} 。大眾運輸工程師必須要審慎地分析所使用之 \bar{a} 值是否適當以及是否需要較精確的估計值。

使用等加速度平均值 \bar{a} 的假設，即可將問題簡化很多。若已加速期間爲 t_a ，且行駛距離爲 s_a ，加速期間結束時的速度爲 V' ，則

$$\text{距離：} \quad s_a = \frac{\bar{a} t_a^2}{2} \quad \left| \frac{S}{m} \right| \left| \frac{a}{m/s^2} \right| \left| \frac{t}{s} \right| \quad (3-48)$$

$$\text{速度: } V' = 3.6 \bar{a} t, \quad \left| \frac{V}{\text{km/h}} \right| \left| \frac{a}{\text{m/s}^2} \right| \left| \frac{t}{\text{s}} \right| \quad (3-49)$$

常數 3.6 乃為將 v (m/s) 轉換為 V (km/h) 的因素值 ($\frac{3600}{1000}$)。

(二) 等速方式 (Constant-Speed Regime)

大眾運輸車輛的等速行駛時間之長短，隨兩站間距離而變。假如站間距離較短，則車子可能在未達到等速行駛時即需剎車；若其站間距很長，則大部分的車輛便可等速行駛。典型的市內運輸即屬於前者，而大眾捷運系統及區域鐵路系統在郊區部分之路線即屬於後者。

在等速 V_{\max} 的時段內，變數間的關係很簡單。假若其等速行駛時間為 t_v ，則在此時段內的行駛距離 (s_v) 為：

$$s_v = \frac{V_{\max} t_v}{3.6} \quad \left| \frac{S}{\text{m}} \right| \left| \frac{V}{\text{km/h}} \right| \left| \frac{t}{\text{s}} \right| \quad (3-50)$$

(三) 滑行方式 (Coasting Regime)

因為鐵路具有極低的滾動阻力，所以鐵路車輛常採用滑行的行駛方式，即當車輛達到最大速度 V_{\max} 時，馬達即停止運轉，於是車輛開始滑行直到接近下一車站必須停車時才使用剎車。

因為滑行時的減速度很低，所以由滑行所增加的旅行時間很小，但是其所節省的能量却相當大。

滑行的減加速度（如圖 3-23 所示為 c ），幾乎為一常數。至於車輛在滑行後的速度 (V_c) 的計算方法，在下一段再行討論。

(四) 剎車方式 (Braking Regime)

第四種站間車輛的行駛方式是剎車。在大多數的情況下，大部分均採用正常的剎車，此時在剎車期間內的減速度可視為常數（等減速度）。

假設剎車距離為 s_b ，剎車時間為 t_b ，平均減速度為 \bar{b} ，剛剎車時的速度為 V_i ，且假設車子完全停止，則其有關的計算公式，一如加速時的公式 (3-48) 和 (3

—49)，列之於下：

$$\text{剎車距離： } s_b = \frac{\bar{b} t_b^2}{2} \quad \left| \frac{S}{m} \right| \left| \frac{b}{m/s^2} \right| \left| \frac{t}{S} \right| \quad (3-51)$$

$$\text{剎車速度： } V_i = 3.6 \bar{b} t_b \quad \left| \frac{V}{km/h} \right| \left| \frac{b}{m/s^2} \right| \left| \frac{t}{S} \right| \quad (3-52)$$

V_i 可為任何速度，但在一般的情況下，通常為 V_c 或 V_{max} 。

(五) 車站停留時間 (Standing Time)

因為平均營運時間及大眾運輸路線容量，受到車輛停留於站牌或車站的時間 (t_s) 很大的影響，所以使車站停留時間儘可能的減少是很重要的。車站停留時間隨着都市之運量及運具不同，而有很大的變異。

三、站間車輛行駛時間的方程式及圖形

站間距離 (s) 與站間的行駛時間 (T_s) 之關係，往往視大眾運輸車輛能否達到其最大速度而定。假設 S_c 是使車子加速到 V_{max} ，然後立即踩剎車以至於停車的距離。故對於站距 S ，若 $S < S_c$ 則車輛行駛時只包括加速、減速、靜止等三種行駛方式，且 S 與 T_s 間的關係是非線性的；若 $S > S_c$ ，則其 S 與 T_s 的關係是線性的，但是方程式却隨車輛所使用的行駛方式而變異，其中共有三種行駛方式的組合，若包括 $S < S_c$ 則共有四種站間車輛行駛的基本情況，這些組合如圖 3—24 所示，即

1. $S = S' < S_c$
2. $S \geq S_c$ ，無滑行 (No Coasting)，但有等速行駛。
3. $S \geq S_c$ ，無等速行駛，但有滑行。
4. $S \geq S_c$ ，有滑行及等速行駛。

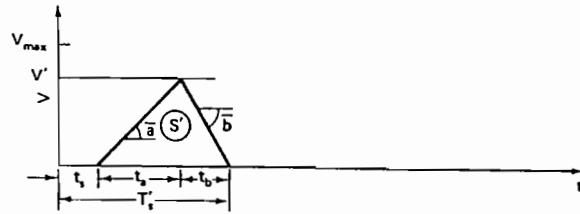
此四種組合的距離及旅行時間之計算，如下面所述。

(一) 第一種情形： $S = S' < S_c$

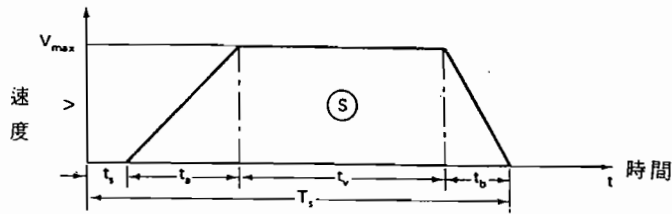
為與另外的三種情況加以區分，此處的站距 S 和站間旅行時間 T_s ，均加上一個“'”號，變為 S' 與 T_s' 。而其所達到的最大速度則為 V' ，此時 $V' < V_{max}$ 。

在此種情況下，站間距 S 乃是車子經過加速及剎車這兩種方式所行經的距離。以方程式 (3—48) 為基礎，則 S' 可表為：

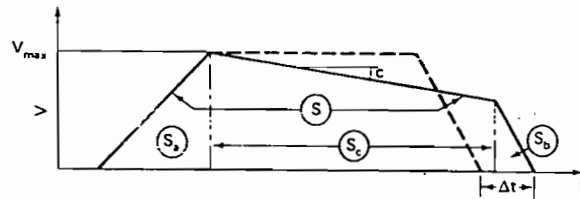
$$S' = \frac{1}{2} (\bar{a} t_a^2 + \bar{b} t_b^2) \quad \left| \frac{S}{m} \left| \frac{a}{m/s^2} \right| \left| \frac{t}{s} \right| \left| \frac{b}{m/s^2} \right| \right. \quad (3-53)$$



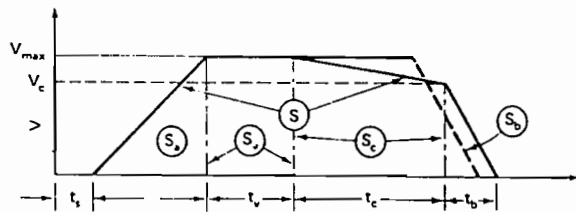
(a)第一種情形



(b)第二種情形



(c)第三種情形



(d)第四種情形

圖3-24 站間行駛方式的四種情況

其個別的加速方式及減速方式所經過之時間 t_a 及 t_b 無法得知；但是利用加速期間的最末速度應等於減速時間之最初速度，即可求得一關係式：

$$v' = \bar{a} t_a = \bar{b} t_b \quad \left| \frac{v}{m/s} \right| \left| \frac{a}{m/s^2} \right| \left| \frac{t}{s} \right| \left| \frac{b}{m/s^2} \right| \quad (3-54)$$

即 $t_a = \frac{v'}{\bar{a}} \quad \text{且} \quad t_b = \frac{v'}{\bar{b}}$ (3-55)

將方程式 (3-55) 的 t_a 與 t_b 代入方程式 (3-53)，則：

$$v' = \frac{2 \bar{a} \bar{b} S'}{\bar{a} + \bar{b}} \quad \left| \frac{v}{m/s} \right| \left| \frac{a}{m/s^2} \right| \left| \frac{b}{m/s^2} \right| \left| \frac{S}{m} \right| \quad (3-56)$$

由此可知車輛所能達到之最大速度為 v' ，乃是站間距離 S' 之函數，此時平均加速、減速度均為參數。

因之，在此一情況之站間行駛時間 (T_s') 是車輛加速時間 (t_a)、制車時間 (t_b) 及車站停留時間 (t_s) 三部分組合而成，即 T_s' 可由上面的方程式導得，並將其表示為 S' 的函數：

$$T_s' = t_a + t_b + t_s = \sqrt{\frac{2(\bar{a} + \bar{b})S'}{\bar{a}\bar{b}}} + t_s \quad (3-57)$$

此外，上述的臨界距離 S_c 可由方程式 (3-56) 計算而得，即將 v 代替 v' ， S_c 代替 S' ，然後解 S_c 即得：

$$S_c = \frac{v_{\max}^2}{2} \left(\frac{1}{\bar{a}} + \frac{1}{\bar{b}} \right) = \frac{V_{\max}^2}{25.92} \left(\frac{1}{\bar{a}} + \frac{1}{\bar{b}} \right) \quad (3-58)$$

$$\left| \frac{S}{m} \right| \left| \frac{v}{m/s} \right| \left| \frac{V}{km/h} \right| \left| \frac{a}{m/s^2} \right| \left| \frac{b}{m/s^2} \right|$$

而此旅行時間 (T_c) 即可由公式 (3-55) (3-57) 與方程式 (3-58) 導得，即：

$$T_c = v_{\max} \left(\frac{1}{\bar{a}} + \frac{1}{\bar{b}} \right) + t_s = \frac{V_{\max}}{3.6} \left(\frac{1}{\bar{a}} + \frac{1}{\bar{b}} \right) + t_s \quad (3-59)$$

$$\left| \frac{T}{s} \right| \left| \frac{v}{m/s} \right| \left| \frac{V}{km/h} \right| \left| \frac{a}{m/s^2} \right| \left| \frac{b}{m/s^2} \right| \left| \frac{t}{s} \right|$$

吾人必須注意的是，在所有計算中， \bar{a} 並非一常數值：即加速時段愈短，則 \bar{a} 值愈大。因此，若在較短站距 (S) 而欲求得精確值時，則須反覆計算，以導出適當的 v' 和 \bar{a} 值。

(二)第二種情形： $S \geq S_c$ ，無滑行，但有等速行駛

在此情況下，車輛加速達到 v_{max} 後，並保持此速度直到須踩剎車，而後停靠車站，此種情形最常被使用。依照最初對 S_c 的定義：車輛加速到 V_{max} ，然後立即使用剎車，以至於停車所行駛的距離。因之，

$$s_a + s_b = S_c \quad \left| \frac{s}{m} \right| \left| \frac{S}{m} \right| \quad (3-60)$$

以等速 (v_{max}) 所行駛的距離 s_v 可表為：

$$s_v = S - s_a - s_b = S - S_c \quad \left| \frac{s}{m} \right| \left| \frac{S}{m} \right| \quad (3-61)$$

而旅行時間 (T_s) 由四個時間所組成：即 t_a , t_b , t_s 組成 T_c ，又 $t_v \cdot v_{max} = s_v$ ，所以 T_s 可表示如下：

$$T_s = t_a + t_b + t_s + t_v = T_c + \frac{S - S_c}{v_{max}} \quad (3-62)$$

t_v 是等速行駛的時間，將方程式 (3-59) (3-58) 的 T_c 與 S_c 分別代入方程式 (3-62)，則可獲得：

$$T_s = \left[v_{max} \left(\frac{1}{a} + \frac{1}{b} \right) + t_s \right] + \frac{S}{v_{max}} - \underbrace{\frac{v_{max}}{2} \left(\frac{1}{a} + \frac{1}{b} \right)}_{S_c} \quad (3-63)$$

$$= \frac{S}{v_{max}} + \underbrace{\frac{v_{max}}{2} \left(\frac{1}{a} + \frac{1}{b} \right) + t_s}_{\text{時間損失}}$$

時間損失

$$\left| \frac{T}{s} \right| \left| \frac{v}{m/s} \right| \left| \frac{a}{m/s^2} \right| \left| \frac{b}{m/s^2} \right| \left| \frac{S}{m} \right| \left| \frac{t}{s} \right|$$

假若停靠於每一車站的時間損失 (Time Loss, T_t) 定義如下：

$$T_t = \frac{v_{max}}{2} \left(\frac{1}{a} + \frac{1}{b} \right) + t_s = \frac{V_{max}}{7.2} \left(\frac{1}{a} + \frac{1}{b} \right) + t_s \quad (3-64)$$

$$\left| \frac{T}{s} \right| \left| \frac{v}{m/s} \right| \left| \frac{V}{km/h} \right| \left| \frac{a}{m/s^2} \right| \left| \frac{b}{m/s^2} \right| \left| \frac{t}{s} \right|$$

則方程式 (3-63) 可簡化如下：

$$T_s = \frac{S}{v_{max}} + T_l = \frac{3.6S}{V_{max}} + T_l \quad \left| \frac{T}{s} \left| \frac{S}{m} \right| \frac{v}{m/s} \left| \frac{V}{km/h} \right. \right| \quad (3-65)$$

T_l 代表真實的旅行時間與使用 v_{max} 的速度駛完全部站距所須時間之差。不論是那個路線或那種設備，此損失時間可容易地以下法計算之：

首先，任選兩點 (A, B)，而其中間設有一車站。其次記錄由 A 點到 B 點，並停靠於中間車站，且以等速 (v_{max}) 行駛的車輛旅行時間；最後，記錄由 A 至 B 但不停靠於中間車站，並以等速行駛的車輛旅行時間。此兩時間差即為停靠車站的時間損失 T_l ，如圖 3-25 所示。

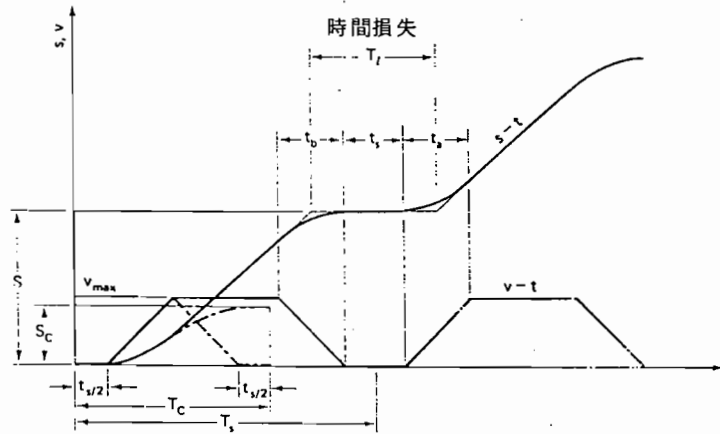


圖3-25 鐵路車輛移動的速度和距離-時間圖

(三) 第三種情形： $S \geq S_c$ ，無等速行駛，但有滑行

從能源消耗的觀點而言，車輛在站間距離不太長的路線，其最經濟的行駛方式是先加速到 v_{max} ，然後以 c 的減加速度滑行，直到必須刹車為止。對此一情況而言，車輛在站間的旅行時間由四個時段所組成：加速時段 (t_a)、滑行時段 (t_c)、刹車時段 (t_b) 及停靠車站的時段 (t_s)。 t_a 、 t_b 可以方程式 (3-55) 表之， t_c 的定義如下：

$$t_c = \frac{v_{max} - v_c}{c} \quad \left| \frac{t}{s} \left| \frac{v}{m/s} \left| \frac{c}{m/s^2} \right. \right. \right| \quad (3-66)$$

v_c 是滑行結束時的速度，所以總旅行時間為：

$$T_s = \frac{v_{\max}}{a} + \frac{v_{\max} - v_c}{c} + \frac{v_c}{b} + t_s$$

$$= v_{\max} \left(\frac{1}{a} + \frac{1}{c} \right) + v_c \left(\frac{1}{b} - \frac{1}{c} \right) + t_s \quad (3-67)$$

$$\left| \frac{T}{s} \right| \left| \frac{v}{m/s} \right| \left| \frac{c}{m/s^2} \right| \left| \frac{b}{m/s^2} \right| \left| \frac{t}{s} \right|$$

為了導出 v_c ，令站間距 S 等於車輛在 t_a ， t_c ， t_b 三時段所經過的距離，並利用方程式 (3-48)，(3-50)，(3-51) 即可獲得：

$$S = \frac{1}{2} (\bar{a} t_a^2 + (v_{\max} + v_c) t_c + \bar{b} t_b^2) \quad \left| \frac{S}{m} \right| \left| \frac{a}{m/s^2} \right| \left| \frac{t}{s} \right| \quad (3-68)$$

若將時間 (t) 表成速度和加速度的函數 (v/a) [方程式 (3-55) 和 (3-66)] 則方程式 (3-68) 成為：

$$S = \frac{1}{2} \left(\frac{v_{\max}^2}{\bar{a}} + \frac{v_{\max}^2 - v_c^2}{c} + \frac{v_c^2}{\bar{b}} \right) \quad (3-69)$$

$$\left| \frac{S}{m} \right| \left| \frac{v}{m/s} \right| \left| \frac{a}{m/s^2} \right| \left| \frac{c}{m/s^2} \right| \left| \frac{b}{m/s^2} \right|$$

對 v_c 解此方程式，並轉換成 V_c ，則

$$V_c = \sqrt{\frac{25.92 \bar{a} \bar{b} c S - \bar{b} (\bar{a} + c) V_{\max}^2}{\bar{a} (c - \bar{b})}} \quad (3-70)$$

$$\left| \frac{V}{km/h} \right| \left| \frac{a}{m/s^2} \right| \left| \frac{b}{m/s^2} \right| \left| \frac{c}{m/s^2} \right| \left| \frac{S}{m} \right|$$

在實際的應用上，當要考慮此種旅行方式時，必須以公式 (3-70) 首先計算 V_c 。若 V_c 值非常低，則這種車輛行駛方式，將不會令人滿意，此時必須考慮等速行駛方式；若 V_c 值令人滿意的話，則將其值代入方程式 (3-67)，然後計算每一站距 S 的 T_s 值。附帶一提的是，通常此種行駛方式，在歐洲的鐵路系統經常被採用。

(四) 第四種情形： $S \geq S_c$ ，有滑行及等速行駛

對於長站距的路線而言，車輛最常用的行駛方式是：先加速到經濟速度（即最省燃料的速度，通常為 v_{\max} ），並以此速度等速行駛，然後滑行到某一速度 V_c ，最

後才使用刹車，直到車停為止。在相同站距下，此種情形的總旅行時間很明顯地大於第二種情形，但却較第二種情形為短。利用如方程式(3-67)同理可求得此一情況的站間總行駛時間：

$$T_s = t_a + t_v + t_c + t_b + t_s \quad (3-71)$$

$$= v_{\max} \left(\frac{1}{a} + \frac{1}{c} \right) + v_c \left(\frac{1}{b} - \frac{1}{c} \right) + t_v + t_s$$

此方程式有兩個未知數 t_v 和 v_c ，但此兩未知數卻有如下的關係：

$$t_v = \frac{S}{v_{\max}} - \frac{v_{\max}}{2} \left(\frac{1}{a} + \frac{1}{c} \right) - \frac{v_c^2}{2v_{\max}} \left(\frac{1}{b} - \frac{1}{c} \right) \quad (3-72)$$

$$\left| \frac{t}{s} \right| \left| \frac{S}{m} \right| \left| \frac{v}{m/s} \right| \left| \frac{a}{m/s^2} \right| \left| \frac{b}{m/s^2} \right| \left| \frac{c}{m/s^2} \right|$$

上式係利用 $s_v = t_v \cdot v_{\max} = S - s_a - s_b - s_c$

$$= S - \frac{1}{2} \left(\frac{v_{\max}^2}{a} + \frac{v_{\max}^2 - v_c^2}{c} + \frac{v_c^2}{b} \right) \quad \text{之關係而求得。}$$

因此，當 $t_v = 0$ (即為第三種情形) 則公式(3-72)即成為方程式(3-69)。

吾人在對某一特定的大眾運輸路線進行車輛行駛方式之規劃時，通常須先選擇一 v_c 值，然後代入方程式(3-72) 求出 t_v ，再將 t_v 值代入方程式(3-71) 以便求得 T_s 值，如此便可進行評估：如果吾人得到一無法令人接受的平均行駛速度時，則須再選擇一較高的 v_c 值，然後再評估之。如此反覆進行，一直得到令人滿意的平均速度為止，於此吾人可發現 t_v 之長短與能源消耗間有一交互損益的關係存在。

(五) 站間行駛時間與站距關係圖

由上面的分析，可導出一很重要的關係：即車輛站間行駛時間 T_s 與站距 S 的關係。圖3-26即為這種關係圖，包括上面所述的四種情況。

圖中實線所示之 $T_s - S$ 曲線並不是車輛行駛的真正時間——距離圖形，而是在各種不同行駛方式下，對所有站距 S ，站間旅行時間 (T_s) 的包絡線 (Envelops)；而圖中虛線所示 (即 $t - s$ 線) 方是一般列車實際在站間行駛之時間—距離的圖

形。

在起點與 S_c 間的曲線部分代表第一種情形 (即 Case a) 的方程式 (3-57) , 第二種情形 (Case b) 由公式 (3-65) 代表, S 和 T_s 間為一線性關係; 第三種情形 (Case c) , 即應用公式 (3-67) 和 (3-70) , 由一條漸趨近於 S 值的曲線表示, 此 S 值 (圖上未顯示) 即是當車輛僅用滑行直到停車 (不踩剎車) 的站間距離, 對於此點的 T_s 值可由方程式 (3-67) 求得, 只是令 $V_c = 0$ 。當 $V_c = 0$ 代入方程式 (3-70) 時, 即可求得 S 的相關值:

$$S = \frac{(\bar{a} + c) v_{\max}^2}{2 \bar{a} c} = \frac{(\bar{a} + c) V_{\max}^2}{25.92 \bar{a} c} \quad (3-73)$$

$\frac{S}{m}$	$\frac{a}{m/s^2}$	$\frac{c}{m/s^2}$	$\frac{v}{m/s}$	$\frac{V}{km/h}$
---------------	-------------------	-------------------	-----------------	------------------

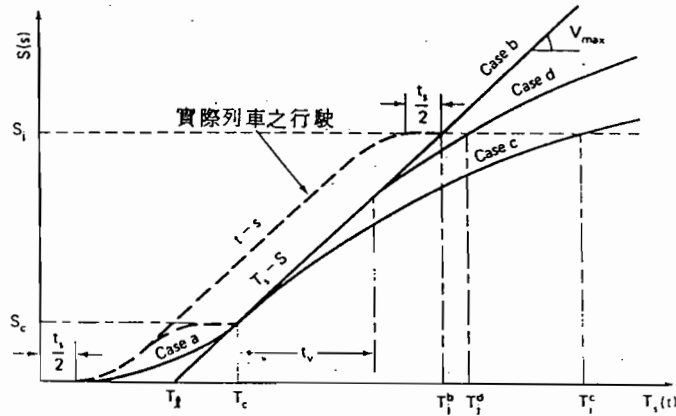


圖3-26 不同行駛方式的 $T_s - S$ 圖 (站距為 S_j)

第四種情形 (Case d) 即方程式 (3-71) 、 (3-72) , 由介於第二種情形 (Case b) 和第三種情形 (Case c) 兩曲線間的曲線代表之, 由使用等速行駛的 t_v 值 (如圖所示) 來決定。

假如我們決定了車輛的行駛特性 (即固定 \bar{a} , \bar{b} , c 和 V_{\max} 等) , 則可利用此圖很簡單的計算出沿線的任何站距的旅行時間。此圖對於個別站距車輛的旅行方式之選擇亦很有用, 因為由此圖能很清楚的比較各行駛情況 (b, c, d) 的旅行時間。

當此圖與累積能源消耗圖結合於一圖時, 則由 $T_s - S$ 圖的圖示, 即可很容易的顯示出能源消耗與旅行時間的交互損益關係。最後, 由這些方程式與圖形可很容易的計算出, 在站距 S 下, 兩種不同車輛動能特性可有相同的旅行時間 T_s , 茲簡示一

例於下：

假若有A種車具有高的 \bar{a}_A 與 \bar{b}_A 值，但却沒有很高的 V_{maxA} 與 t_{sA} 值，而B種車行駛在較長的站距 S ，而有較低的 \bar{a}_B 和 \bar{b}_B 及較高的 V_{maxB} 與 t_{sB} 。若站距 S_e 可使兩種車型的旅行時間相等，且假設其採用第二種情形（即有等速行駛而無滑行）的行駛方式，則可由方程式（3—65），利用 $T_{sA} = T_{sB}$ 的關係，可解得 S_e ：

$$S_e = (T_{tB} - T_{tA}) \frac{V_{maxA} V_{maxB}}{3.6 (V_{maxB} - V_{maxA})} \quad (3-74)$$

$$\left| \frac{S}{m} \right| \left| \frac{T}{s} \right| \left| \frac{V}{km/h} \right|$$

在此例中，所有站距若小於上述計算所得之 S_e ，則A種車會較快；反之當所有站距若大於 S_e 時，則B種車會較A種車為快。

（六）全線的行駛時間

全線的總行駛時間（或稱為營運時間）， T_0 ，可很簡單地將各別站距的旅行時間總加而得。假若每個站距為 $S \geq S_c$ 且採用第二種方式（Case b），則依方程式（3—65）其總旅行時間如下：

$$T_0 = \sum_{j=1}^k T_{s_j} = \frac{3.6}{V_{max}} \sum_{j=1}^k S_j + k T_t = \frac{3.6L}{V_{max}} + k T_t \quad (3-75)$$

$$\left| \frac{T}{s} \right| \left| \frac{V}{km/h} \right| \left| \frac{S}{m} \right| \left| \frac{k}{-} \right| \left| \frac{L}{m} \right|$$

此處的 L 為路線長度（單程）， k 為站間數。假如各站間車輛行駛方式不同，則 T_t 值必須各列的予以計算，然後總加。對於具有較短站距 S' 的路線，則其使用的 \bar{a} 值必須較大。

四、車輛行駛時間與速度的敏感度分析

在規劃新路線和決定現有路線的車隊特性時，必須對於個別參數的變化，進行敏感度分析，特別是加速或減速度、停站時間及最大速度等參數。進行此項分析所需之圖形，可以上述一些方程式為基礎。茲將最常使用的車輛行駛特性圖說明於下。

（一）車輛行駛時間與站距的關係

依表 3—1 的數值與方程式 (3—57) 及 (3—65) 可導出對於捷運系統及地面大眾運輸的敏感度分析。

表 3—1 車輛行駛時間敏感度分析之參數值

參數	單位	捷運系統		地面大眾運輸系統	
		基本值	改進值	基本值	改進值
V_{max}	km/h	80.0	120.0	25.0	35.0
$\bar{a} = \bar{b}$	m/s ²	0.9	1.2	0.7	0.9
t_s	s	22.0	12.0	25.0	15.0

其第一圖形 (圖 3—27) 乃依下述方法繪出：

1. 依表 3—1 第一欄的數值 (此欄之值乃是較老舊或較慢的大眾捷運系統的典型值)，繪出 $T_s - S$ 的基本關係曲線 (Basic Curve)。

2. 其次，為了分析各個別參數改進的效果，必須繪出一曲線 (如圖 3—27 的 V' 、 t_s' 、 \bar{a}' 曲線)，此曲線乃假設僅改進一個參數而得。即將原表 3—1 第一欄的值變為第二欄之值 (此值即為現代化設備和和營運的參數值) 而繪得的 $T_s - S$ 關係曲線。例如，初值為 $\bar{a} = \bar{b} = 0.9$ 公尺/秒²， $t_s = 22$ 秒和改進值 $V_{max} = 120$ 公里/小時，即可繪出 V' 曲線。相同地， \bar{a}' 和 t_s' 曲線分別代表改進 $\bar{a} = \bar{b}$ 之值及 t_s 之值而得的曲線。

3. 最後，依表 3—1 的第二欄數值繪出合成曲線 (Composite Curve)，此曲線即為合併上述參數的改進值而得。是以圖 3—27 的第一條曲線和最後一條曲線 (即基本曲線和合成曲線) 顯示最慢和最快旅運的極值，而介於此二曲線間的曲線即為改進個別參數的效益。

圖 3—27 可用以分析在固定的站距 S 下，個別參數值的改變，所產生的車輛行駛時間減少的情形。例如：對於圖中短站距 S_1 而言，可繪一水平線，由此可知增加最大車速 V_{max} 值對於旅行時間未有任何影響，當 $S < S_1$ 時，亦同。對於很長的站距而言，加、減速度的參數對於旅行時間則有重大的影響，而其相對重要性隨站距的增加而減少。基於這種原因，具有較多停靠站的典型大眾捷運路線，均要求其車輛須有較高加、減速率及相對較低的最高速度；對長站距而言，則同時需要較高的最高速度與加、減速度。然若上面兩個參數，基於經濟理由 (如低車輛成本、能源節約等)，僅能就兩者之中，選擇一個數值最大的參數，則在站距大於 S_1 (圖 3—27 所示) 時，以選擇最大速度比選擇較大的加、減速率來得有利。

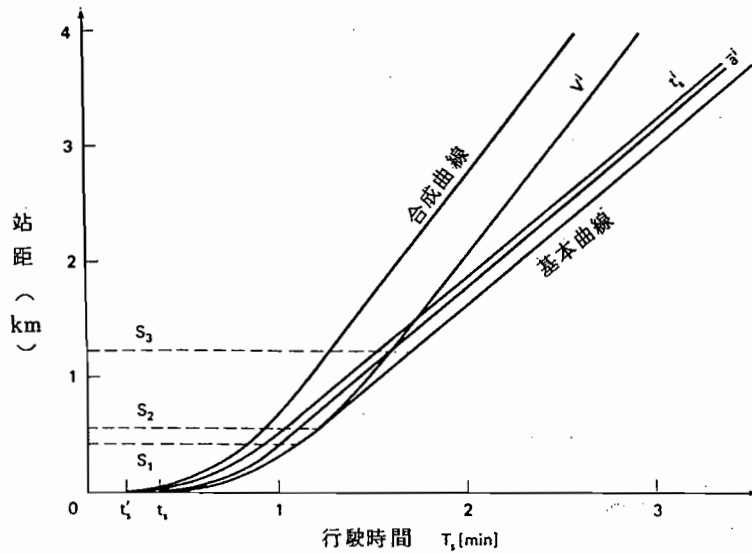


圖3-27 大眾捷運系統車輛行駛時間對個別參數的敏感度分析

通常不論站距大小，停站時間 (t_s) 對於旅行時間的影響均為常數。雖然依圖3-27，此時間的節省非常少，但是在其他許多例子中，其相對重要性可能很大。因為減少停站時間，並不需要較高車輛成本與較大能源消耗，通常可由車站營運的改進來減少停站時間，而後使旅行時間亦隨之減少。

因為典型的地面大眾運輸系統本質上不同於典型的大眾捷運系統，是以對於此系統的 $T_s - S$ 圖關係曲線亦依上法，並使用表3-1最後兩欄的數值繪於圖3-28。由此圖可以看出地面大眾運輸系統的參數關係和大眾捷運系統相同，雖然其絕對值兩者通常完全不同。

雖然圖3-27與圖3-28均是基於一組典型的數值（即表3-1）而得，但是亦可很簡單地使用其他組值來繪製圖3-27與圖3-28。若要分析一既定的運輸服務，則必須先依現有車輛特性繪出基本曲線，然後在考慮各個別參數的可能改進值後，再增繪曲線。

其他型式的車輛行駛圖，例如：距離—速度（Distance-speed）的函數圖，對於某些分析而言，較時間—速度圖來得方便。因為此圖可顯示車站間任一點的車輛速度，同時亦可用於規劃沿線之車輛行駛方式、分析制車距離和決定交通號誌區位等。圖3-29顯示大眾捷運系統的距離—速度與距離—能源消耗（橫座標之

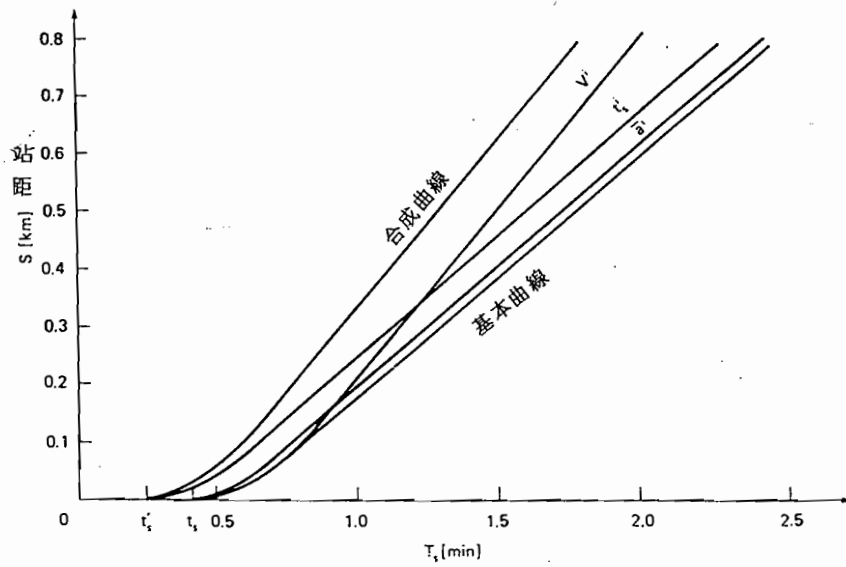


圖3-28 地面大眾運輸系統車輛行駛時間對個別參數的敏感度分析

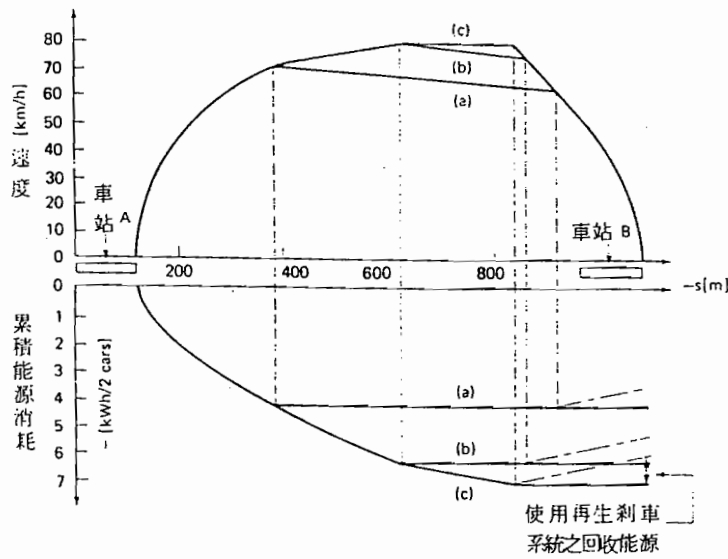


圖3-29 大眾捷運系統的距離-速度與距離-能源消耗

下) 組合圖。此組合圖用以檢視各種車輛行駛方式對於能源消耗的影響。由此圖可知有三種可行方式：

a. 加速到低於最大速度 V_{max} 而後滑行；

b. 加速到 V_{max} 而後再滑行；

c. 加速到 V_{max} 但不使用滑行。

在距離—能源消耗圖中的虛線乃表示車輛裝置有再生制車系統 (Regenerative Braking) 的例子。

(二) 營運速度與站距的關係

有時分析路線上車輛行駛速度較分析行駛時間來得方便，因為速度是運輸系統基本營運特性之一，而行駛時間是針對某一特定距離而言的。

參考前節車輛行駛時間的參數值，將車輛營運速度與站距及其他參數的關係，繪於圖 3-30 及圖 3-31。

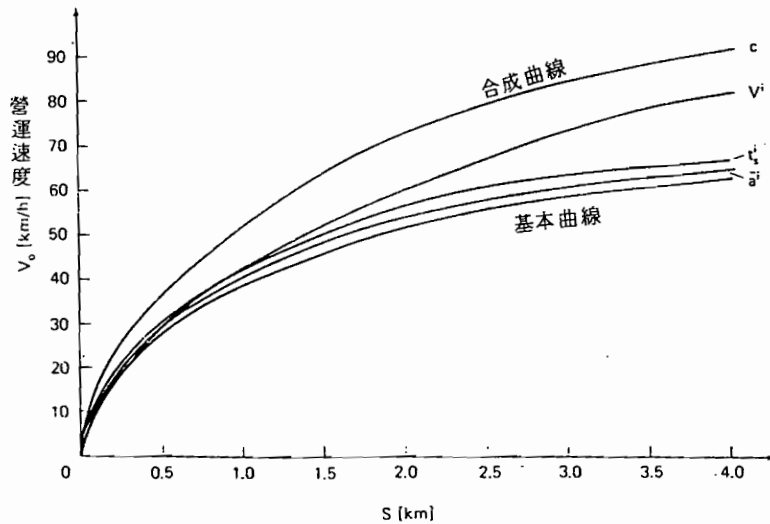


圖 3-30 大眾捷運系統營運速度對個別參數的敏感度分析

茲將車輛營運速度 (Operating Speed) 定義如下：

$$v_o = \frac{S}{T_s} \quad \left| \frac{v}{m/s} \right| \left| \frac{S}{m} \right| \left| \frac{T}{s} \right| \quad (3-76)$$

或使用較實用的單位，則

$$V_o = 3600 \frac{S}{T_s} \quad \left| \frac{V}{km/h} \right| \left| \frac{S}{km} \right| \left| \frac{T}{s} \right| \quad (3-77)$$

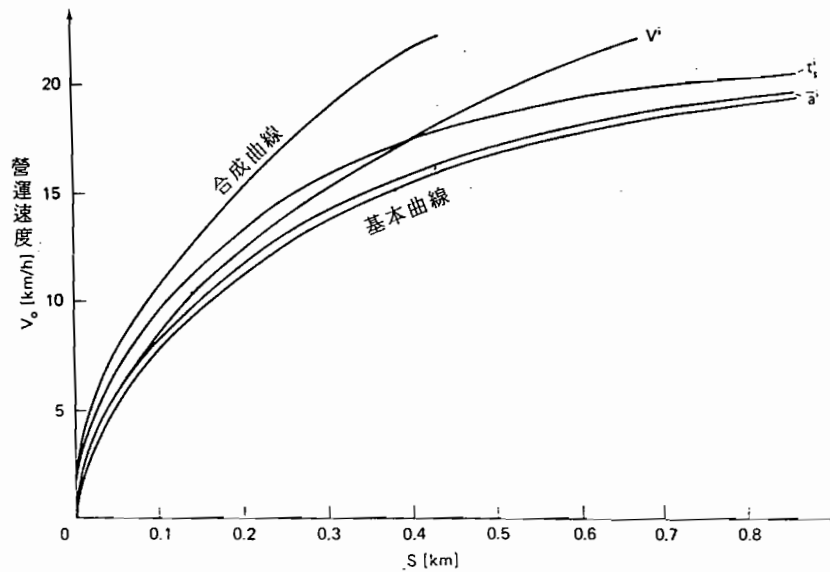


圖3-31 地面大眾運輸系統營運速度對個別參數的敏感度分析

站間旅行時間 T_s 由方程式 (3-57) 定義而得 (對 $S < S_c$ 而言) ; 對於 $S > S_c$ 則 T_s 由方程式 (3-65) 定義而得 ; S_c 乃為方程式 (3-58) 所定義者。

圖3-30和圖3-31對於全線運輸系統績效的影響參數之分析特別有用。例如，在此二圖中吾人可明白規定大眾運輸服務的營運速度最低應為 X (公里/小時)，則在上述圖中便可以指出能提供此一營運速度的各種參數值的組合；對已定的站間距離而言，在欲達到的 V_o 值上劃一水平線，即可得出所需的各參數值；然而對於其他個參數的改進組合，則須另行計算方可求得其數值。

(三) 個別參數的特殊圖形

雖然先前的幾個圖形顯示出兩組變數與參數間的基本關係，但是在一些例子中，則往往需要對於個別的運輸系統績效之參數進行分析。在此僅將一參數的關係繪成圖，如圖3-32所示。

假若需要評定因車輛最大技術速度的增加所得的效益，則可對於幾種站間距 S 值繪出營運速度 V_o 與最大速度 V_{max} 函數值 (假設 \bar{a} , \bar{b} , t_s 值均為常數值) 之關係圖。基於表3-1第二欄之值與站距為400、800、1200和1600公尺而繪得之圖形顯示於圖3-32。方程式(3-77)再度的被使用，同時式中以 V_{max} 代替 S 為獨立變數；此外， T_s 值則由方程式(3-57)與(3-65)再次計算而得。

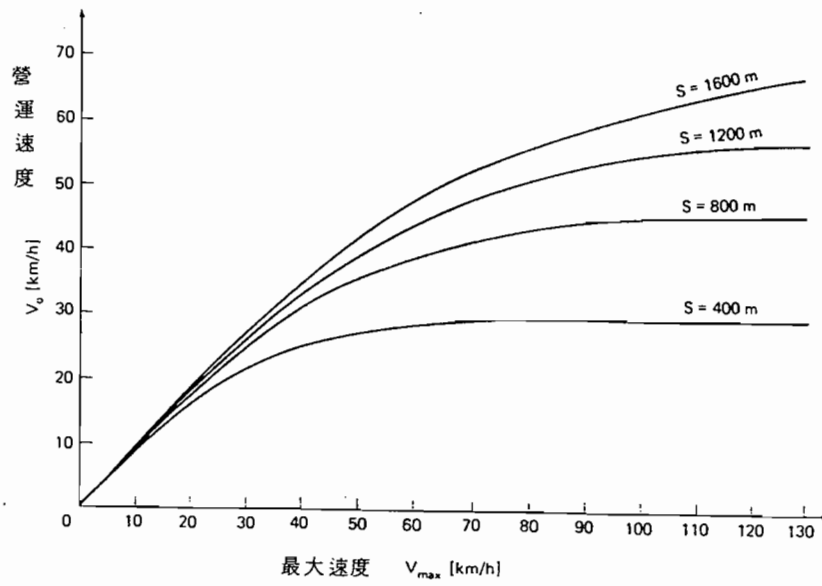


圖3-32 最大速度及站距對營運速度的影響

第二節 營運方式與運輸能源消耗 (資料來源：張有恆，「都市大眾運輸系統與技術」)

對於某一固定運輸路線而言，決定每一旅客的單位運輸能源消耗（呔或焦耳／人—公里）的因素中最重要者，乃是車輛的載客率（人—公里／車—公里）。因為大眾運輸通常有較高的平均載客率，所以大眾運輸較其他運具，特別是自用小汽車，有較低的單位能源消耗。但大眾運輸系統所消耗之能源總數，則較其他運具為多，故大眾運輸業者必須經常關心其在營運中，如何達到最大可能的能源效率。對業者而言，能源效率的提高除了可達成國家的能源節約政策外，並可使營運成本減少。

在許多國家中（特別是美國），大眾運輸系統的能源使用效率，在1950到1960年間，被嚴重地忽略掉。所以，在目前仍有許多方法可將現有運輸系統的能源效率大幅度地改善：有些改進措施可於短期內完成（如經由營運計劃的改善），然有些措施則須較長的時間（例如車隊和基本設施設計的改變等等）。

一、運輸能源消耗分析之架構

影響大眾運輸系統之能源消耗的一些因素可歸為三類，茲分別說明如下：

1. 車輛特性 (Vehicle Characteristics) 包括：

- 技術：特別是推進方式、控制和導引。
- 設計上的特徵：諸如車輛的重量 (kg / m^2)、座位／站位比率和各種旅客舒適狀況（空氣調節設備是其主要項目）。
- 車輛容量和其使用率。
- 車輛的動態特性，包括加速度、最大速度和剎車方法。
- 馬達控制方式（使用斷續控制器或電阻器）和動力傳輸（變速齒輪）方式。

2. 路權特性 (Right-of-Way Characteristics) ，包括：

- 技術上的特徵（導引和支撐型式）。
- 路線配置，特別是路線的縱斷面（坡度）。

3. 營運狀況 (Operational Aspects) ，包括：

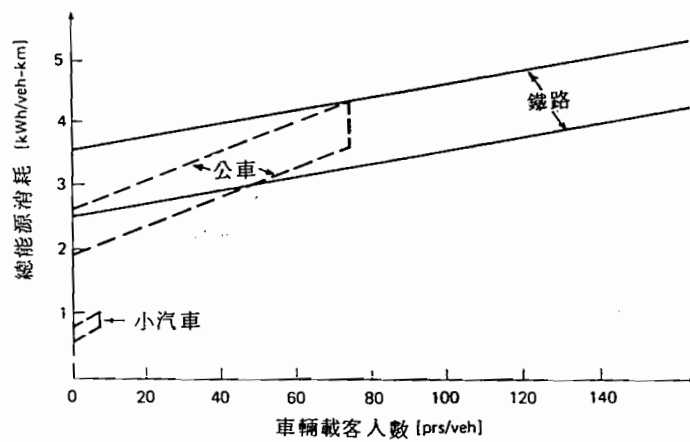
- 排班（非營運車輛行駛里程 (Deheading) 或車輛調度等）。
- 交通狀況（對具有C與B型路線之道具而言）。
- 站距與停車策略（全部車站均停靠，或採用越站停車）。
- 使用慢車、快車或直達車之服務方式。
- 車輛行駛方式（使用滑行或不同的剎車率等），此乃對於具有部份專用路權或有完全專用路權之運具而言。

車輛特性與路權特性通常無法於短期內有重改變，其中只有一項例外——即車輛容量之使用率，它對運輸能源消耗的影響，往往較其他因素更為重要。如圖3-33a所示，當乘客數增加時，所有車輛的總能源消耗即隨之增加（雖然此種關係並非總是線性的）。而單位運輸能源消耗為總能源消耗除以橫軸之值即得，如圖3-33b所示。由此圖可知當其載客人數增加時，其曲線如雙曲線般的向下傾斜。

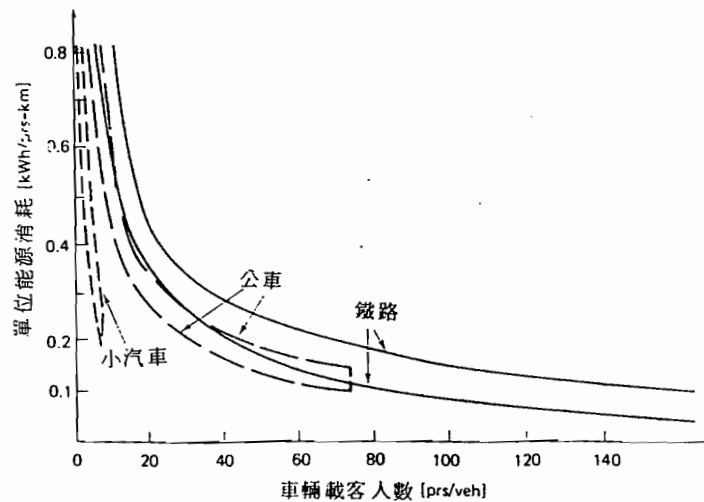
除了提高大眾運輸系統的載客人數，可減少單位能源的消耗外，經由運輸系統營運上的各種改變，亦可大幅減少運輸總能源和單位能源的消耗，然而此種改進往往被忽視且其結果常被低估。

、營運方式對運輸能源消耗之影響

所有可以增加大眾運輸車輛營運速度的改進方法，均可同時減少其能源消耗，諸如：隔離路權的提供、給予公車優先權或停靠較少車站等。然而，除了一般特別的情形以外，內燃機引擎很少能對於車輛的能源損耗有重大的改進。在都市街道上行駛之公車，其耗油率介於 1.3 ~ 2.1 公里 / 公升 (或 3 ~ 5 英哩 / 加侖)。



(a) 每車一公里的總能源損耗



(b) 每人一公里的能源損耗

圖 3-33 運輸能源消耗與車輛載客人數的關係

就電力導引的運具而言，特別是鐵路捷運系統 (RRT)，對其全程的行駛方式 (加速、等速、滑行等等)，均可有較佳的控制。此種較佳之控制可經由駕駛者的

訓練及行駛時的自動控制方式而達成。每一種車輛的站間行駛方式，在技術上和操作上所造成的變異，往往會因此影響運輸能源的消耗。這些變異如圖3-34所示。

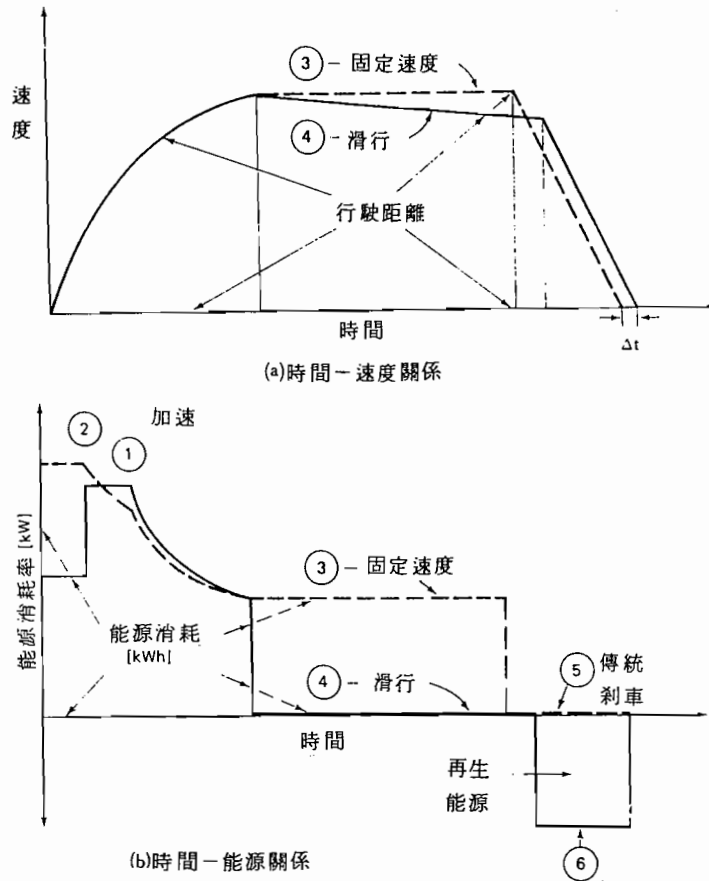


圖3-34 電力鐵路運輸工具在站間不同行駛方式對能源消耗率的影響

例如在車輛加速階段可產生不同的能源消耗曲線，完全依馬達類型和控制方式而定。圖3-34b之①及②曲線是兩種典型例子。對於任何型式的車輛設計而言，此曲線通常是固定的，而且常於加速期間自動地受到控制。

等速和滑行階段的曲線則顯示於圖3-34(a)及(b)的曲線③與④，此兩曲線分別顯示由使用最高馬力以得到最大速度（曲線③），與經由滑行而得之能源節省（曲線④）的交互損益關係。大部份美國鐵路均採用如曲線③的行駛方式，此乃因能源價格相當低的緣故。反之，大部份歐洲鐵路系統則將曲線④的行駛方式視為標準的行駛方式，因其認為在頗長的站距下，使用曲線④的行駛方式，所節省的大量能

源，顯然較增加幾秒鐘的行駛時間划算。

制車的方法，不論是採用傳統方法或再生制車系統，如曲線⑤及⑥所示。傳統的制車方法（曲線⑤）如動態制車系統或氣壓制車系統，並未影響能源的消耗，然而動態制車系統所產生能量可用於車輛的暖氣使用，減少車輛輔助系統的能量消耗。再生制車系統（曲線⑥）配合斷續器控制系統，經常被用於現代車輛中，此種制車方式常產生“負的能源消耗”（因使部份能源返回供電線）。

當然上述的三種行駛方式，彼此間並不相關，然在加速階段的兩種能源曲線之一，可與後兩種行駛方式的任一種相配合，以完成車輛在站間行駛的一個循環。

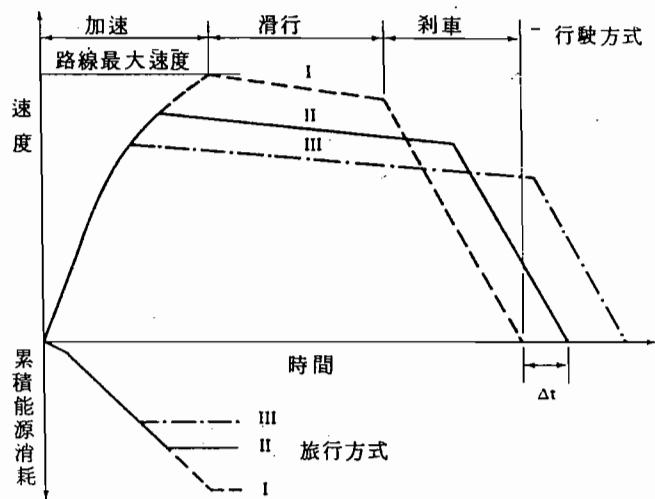
三、預先規劃的駕駛方式所能節省的能源

車輛採用不同行駛方式對於能源消耗的影響，可由西德漢堡的 Hochbahn AG 公司之有趣的電腦模擬研究而得。其研究設定的情況分別是：車輛採傳統制車方式；不同的加速時間產生不同的能源消耗；在時刻表允許下，儘量採用滑行；不使用等速行駛方式，因其認為此種行駛方式在任何狀況下均是不經濟的。

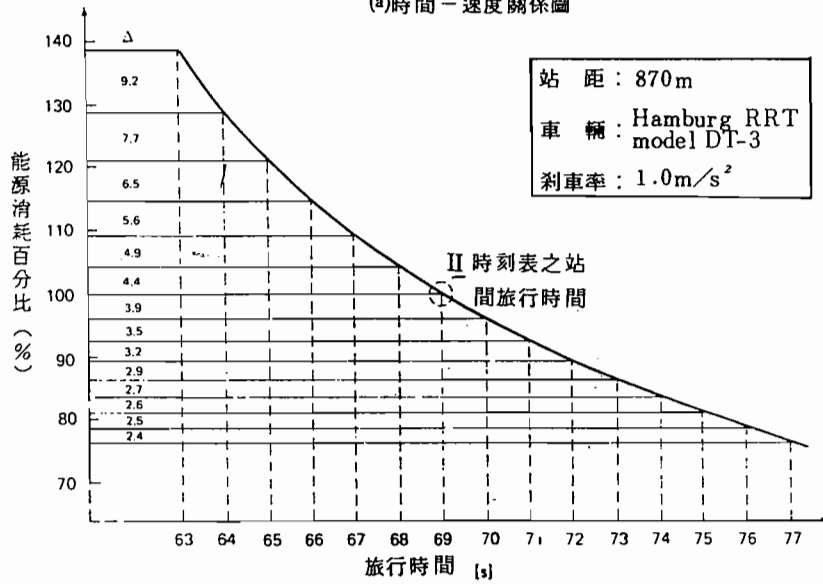
在圖3-35a所示的時間—速度—能源損耗圖中顯示，當車輛加速到 V_{max} ，然後滑行，踩制車到下一站停車（方式 I），其所得結果是：能源消耗最大而行車時間最短。若採用方式 II 與 III，則其能源消耗較少，但旅行時間則較長。旅行時間與能源消耗的交互損益關係，則如圖3-35b所示，其時刻表上採用的旅行時間（Scheduled travel time）不可能是最短的（即方式 I 之行駛時間），因為吾人必須預留或增加一些時間以維持時刻表之可靠性。因此，由圖可知，若選取69秒為其時刻表上站間之旅行時間，則其最短旅行時間（63秒）比選取的69秒要多出40%的能源消耗，若旅行時間由69秒變為77秒，則其能源之節省可達23%，而其行車時間僅多出8秒。

圖3-36(a)與(b)圖顯示行車方式對能源消耗的另一種影響。其中(a)圖顯示，當停站時間（ t_s ）變異時，可經由適當行車方式之選擇，使其在相同行車時間下，亦能達到最小的能源消耗；(b)圖亦顯示在同一行車時間下，可經由制車時減加速率的提高來減低加速的時間，藉以減少能源的消耗。

由上述分析顯示，選擇適當的行車方式可節省大量的能源消耗，因車輛牽引所使用的“淨”（net）能源，比為了牽引車輛而須產生的“總”（Gross）能源小得多（總能源與淨能源之差，乃由於各種動力傳輸時之損失或駕駛列車之損失等等而



(a)時間-速度關係圖



(b)旅行時間與能源消耗之交互損益關係

圖 3-35 由加速-滑行的時間變異與運輸能源消耗及行車時間的交互損益關係圖

來)，所以每一車輛牽引能源的節省，即顯示吾人可節省更多的總能源。