

中國
工程師手冊
機械類
上

第二十二篇

運輸機械

目 錄

頁

第一章 鐵路運輸機械工程

1·1 總論.....	22— 1
1·2 蒸汽機車.....	22— 55
1·3 柴油機車.....	22— 66
1·4 電力機車.....	22— 76
1·5 其他機車.....	22— 80
1·6 客車.....	22— 84
1·7 貨車.....	22— 94
1·8 機車.....	22— 98

第二章 汽車

2·1 緒言概說.....	22—103
2·2 汽車用原動機.....	22—109
2·3 傳動裝置.....	22—122
2·4 傳動軸.....	22—142
2·5 萬向接頭.....	22—143
2·6 差速器.....	22—145
2·7 潤滑裝置.....	22—146
2·8 轉向裝置.....	22—148
2·9 車架.....	22—152
2·10 剎車.....	22—154
2·11 輪胎.....	22—156

第三章 輪機工程

3.1 概說.....	22—158
3.2 船舶一般性能.....	22—158
3.3 船體推進.....	22—163
3.4 船用蒸汽設備.....	22—182
3.5 船用柴油機.....	22—191
3.6 燃氣渦輪機.....	22—195
3.7 核能動力.....	22—197
3.8 船用輔機及船舶自動化	22—198

第二十二篇

運輸機械

第一章 鐵路運輸機械工程

劉近義 莊海根

1.1 總論

自公元 1825 年英人史特芬遜 (George Stephenson 1781~1848) 創製蒸汽機車 locomotion No. 1 號成功，行駛英國 Stockton 城至 Darlington 城間鐵路，首度公開營業，牽引列車載運客貨，迄今已有一百五十年歷史。史氏不僅為鐵路蒸汽機車最成功之發明人，且為今日廣被世界一百卅萬公里鐵路運輸事業之創始人。由其富有系統工程之創意設計，將鐵路、列車、動力及營運四大成因，密切結合構成此一世界最早利用機械動力之內陸交通工具，形成一獨立的整體動態運輸系統。即使至今廿世紀末期，雖有各型現代陸海空運機具輩出競爭激烈。但以極少量之動力能源，能作高速重載，經濟廉價，舒適安全之大眾運輸服務者，仍非此項鋼輪在鋼軌上有導向線型行駛，且能自動化之鐵路運輸機械莫屬。尤以最近能源危機問題，交通擁塞安全問題，運輸成本高漲，都市蔓延，環境污染，土地資源利用諸問題叢生。亦唯鐵路動力可以節約能源多元供應，有效解決各項問題，世界無論短程市郊捷運系統，長中程都市間高速鐵路，悉以電化鐵路動力機械為再發展再革新之公共運輸必然趨勢，此後鐵路運輸機械工程設計之演變，更將日新月异。

1.1.1 鐵路動力車輛名詞解釋

鐵路運輸機械主要為行駛於鐵路上專用之動力車 (motive power) 及組成列車 (train) 之客貨車輛。

motive power 一辭原指(1)任何蒸汽電氣動力用以推進運動之意，(2)任何機械能源，(3)一種推進的力量。

在鐵路動力方面 motive power 通常在美國係指動力車而言。其意義與歐

洲常用 traction 字義相似。traction 意指牽引動力型式，train 一辭意指列車係被動力車牽引之成列車輛與 motive power 相對。

至於 rolling stocks 則常指在鐵路上凡可滾動的機車車輛而言。因其包含動力車在內，故不與 motive power 相對。

鐵路動力車，大體可分兩種型式：

①機車 (locomotive) 即一鐵路上可移動之動力廠，係專用於牽引列車，本身並不載運付費荷重 (payload) 之車輛。

按 loco 源出拉丁文 locus 即地方之意。locomotion 為從一地移動至另一地。locomotive 原為 locomotion 之形容詞，有從一地移動至另一地之能力而非靜止狀態，其後漸被指為靠自身力量能移動之引擎 (engine)，專門設計用來牽引鐵路列車之意。

②軌道車 (rail car) 係一有傳動機構 (power transmitting unit) 之可移動動力廠，並具備直接載運付費荷重以及牽引拖車 (trailer) 之動力車 (power car)。

1.1.2 鐵路動力車推進動力 (propulsion power) 型式

計有：

- ①往復式蒸汽機 (reciprocating steam engine)，用搖連桿推動。
 - ②高速蒸汽機 (high speed steam engine)。
 - ③蒸汽渦輪機 (steam turbine)。
 - ④內燃機 (internal combustion engine) 包括，柴油機 (diesel engine)、汽油機 (gasoline engine) 等。
- 此三種機動車傳動裝置有用機械、水力、電氣不等。
- ⑤電動馬達 (electric motor) 亦稱純接電動 (straight electric)
 - ⑥燃氣渦輪 (gas turbine) 及燃氣發生器 (gas generator)
 - ⑦壓縮空氣機 (compressed air motor)
 - ⑧線型馬達 (linear induction motor)
 - ⑨噴射機式 (jet type engine) 或火箭推動 (rocket propulsion)
 - ⑩壓力差異式 (pressure differential propulsion) 亦稱縫管式。

以上十種動力型式。往復式蒸汽機車獨霸世界內陸運輸機械動力足有百年之久。現以熱效率最低漸被淘汰。1975 年日本蘇俄德法，將繼美加英瑞荷比等國之後淘汰淨盡。但全世界蒸汽機車仍有三萬輛左右。且自 1974 年能源危機，印度泰國等鐵路又以動力柴油化受阻。又有復用蒸汽機車之勢。內燃柴油機車軌道

車無論電動液動式均在蓬勃發展中。電動機車軌道車現以電化鐵路日增最為流行。自備電池機車亦在英國試驗中。目前鐵路動力仍以電化柴油化為主。

燃氣渦輪機車最早為瑞士在 1941 年首製之 2,200 匹馬力機車，戰後美國 G.E. 亦代賓州，聯合太平洋鐵路製成 4,500 匹及 8,500 匹馬力大型機車。終以燃氣高溫設計複雜煤粉損害輪葉，保養運用困難，耗油過鉅，且噪音干擾問題無形中止。但自 1969 年以來美德加英各國相繼將中型噴氣渦輪飛機引擎型式用於軌道車，使用甚佳，尤以法國發展最具成效。時速可高達 300 公里以上，足與電化高速鐵路抗衡。惜最近因油價問題，法國亦漸放棄使用於本國路線，改用電化動力。至燃氣發生器機車，初創於法國瑞典。係利用柴油機或自由活塞式引擎將廢氣導入氣渦輪機，亦以構造複雜，少有進展。

線型馬達超高速機車及軌道車離型正在美德日英試驗中，多與磁性懸浮系統 (Maglev) 併用，自與普通鐵路不同。最後火箭推進式及隧管式雖均尚在構想階段，美國近在 1974 年 8 月利用其線型馬達試驗機車聯合噴射引擎推進空氣曾達最高時速 410 公里，創世界最高鐵路速度紀錄。至於隧管式構想雖起源于美國葛魯門及 TRW 太空公司，但蘇俄已在其喬治亞聯邦作一兩公里試驗場，以一公尺直徑鋼管，利用壓縮空氣推動運石貨車、客運試驗稱為「Lilo」系統，為完全密封 3×2.4 公尺長方形隧管亦在研究設計中。至於以前構想之核能動力車則以行車安全關係已改用核能發電廠供電動機車之用。

1.1.3 鐵路動力車輛設計與建造因素

鐵路運輸機車車輛，由於整體系統工程關係，其設計與建造主要係受下列因素決定，亦視各鐵路需要而互異。

- ①軌距 (rail gauge)
- ②可容許軸重 (permissible axle load)
- ③最大活動建築界限 (maximum moving structural gauge)：運用狀況 (operating condition) 亦即所需績效及牽引力 (視列車負荷及速度而定)
- ④路線特徵 (characteristics of the line) 如坡度，曲線，路線上構造物之載運量等。
- ⑤燃料給水特質 (characteristics of water and fuel)
- ⑥需要之速度及可容許最高速度 (required speed & max. permissible speed)
- ⑦建設及運轉規章 (regulations governing construction and operation)。

由上可知鐵路動力車輛，影響其設計建造要素，不僅有關其動力本身，即路線條件，列車牽引性能，營運狀況乃致車輛本身懸承行駛制動系統亦息息相關。此項運輸機械工程範圍，不僅設計特殊與一般機械產品構造迥異，且係成批訂製，配合鐵路不同營運需要變化萬端。尤其使用壽年較長，中間保養修理改造更新工作特多。涉及材料種類，加工技術，知識領域繁而且廣。茲分別將各影響要素概述之。

1-1.4 路線條件 (conditions imposed by the permanent way)

①軌距 (gauge) 係指鐵路兩條鋼軌軌頭 (rail heads) 部內側面間之距離，對軌道 (track) 中心線成直角衡量之尺寸而言。

世界鐵路軌距自最狹之 381 公厘至最寬 1,616 公厘不等。以史氏在 1825 年所訂之標準軌距 (standard gauge) 1,435 公厘 (4 呎 8 吋半) 共有 120 萬公里軌道里程 (track mileage) 為最多。佔全部鐵路 64 %。其次為五呎寬軌軌距 (1,524 公厘) 有 20 萬公里，佔 11 %，第三位則為三呎六吋狹軌軌距 (1,067 公厘) 佔 7.65 %。亦即臺灣、日本、南非、澳洲部份通用之軌距。至於臺糖鐵道及臺鐵東線之二呎六吋狹軌軌距 (760 公厘) 有 12,000 公里。

②曲線 (curves) 鐵路軌道曲線通常以其彎度之半徑距離 (R) 或以 100 公尺弦長之夾角度 (D) 衡量之。臺鐵正線規定最彎曲線不得小於三百公尺半徑距離。其角度關係 $D = \frac{1,746.5}{R}$ 度。

③超高度 (cant or superelevation) 為防止鐵路車輛行駛曲線上離心力向外傾覆關係，通常在曲線外軌條部份墊高 (h)，視軌距及曲線速度而異。其關係公式：

$$h = \frac{SV^2}{127R} \text{ 公厘。}$$

S=軌距中心距離，V=行車速度，R=曲線半徑 (m)

臺鐵規定曲線除道岔外，超高度最大不得過 105 公厘。

④放寬度 (gauge widening) 為便車輛行經曲線較便其固定軸距通過，兩軌軌距加寬度如下式：

$$W = \frac{24,500}{R} \text{ 公厘}$$

⑤可容許軸重 (permissible axle load) 為限制車輛總重不超過路軌負荷力之主要條件，視軌條特徵及枕木間隔而異。根據德國國家標準 DIN 5,901/

02 設每一車輪負荷重為 $Q(\text{kg})$

$$Q = \frac{4 \times \sigma_s W_s}{L(\text{cm})} (\text{kg})$$

$\sigma_s = 1,250 \text{ kg/cm}^2$ · L = 枕木中心線間隔 (cm) , W_s = 軌條抵抗力矩 (cm^3)

軌條重 kg/m	軌條高 (m/m)	W_s (cm^3)	可容許軸重 $a=2Q$ (噸)			
			$L=50 \text{ cm}$	$L=70 \text{ cm}$	$L=80 \text{ cm}$	$L=90 \text{ cm}$
20.0	100	66.8	13.36	9.54	8.36	7.42
24.43	115	97.3	19.45	13.90	12.15	10.80
33.47	134	155.0	90.90	22.15	19.40	17.20
40.95	138	196.0	99.10	28.20	24.50	21.80
49.07	148	239.0	—	34.20	29.70	26.60
64.92	172	358.0	—	—	—	39.60

根據臺灣鐵路建設規程第七十三條，機車之一對車輪對於鋼軌之壓力，在停止時應在十五公噸以下。但自加強軌道由每公尺 37 公斤改用 50 公斤鋼軌並調整路基枕木間隔後，機車可容許軸重已提高至十八公噸。

軌道結構實為一負擔行駛機車車輛活重之連續樑 (continuous beam) 敷軌道橋樑之負重力必須考慮以決定每根車軸之負荷以及負荷之分佈狀況。臺灣鐵路建設規程第七十二條規定車輛重量以重聯二輛 2-8-0 型蒸汽機車 (運煤水車) 牽引每長度一公尺五公噸之列車均佈活載重時，對於軌道及橋樑所生之影響，不得超過下列標準活載重之等級：軌道 K-15 級，橋樑 ES-15 級。

表 1-2 臺灣鐵路橋樑標準活載重表

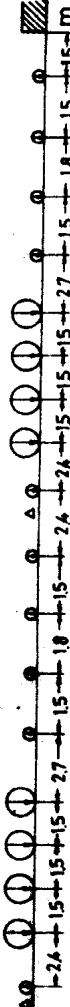
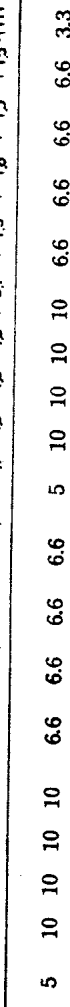
等級 符號	S-10	S-11	S-12	S-13	S-14	S-15	S-16	S-17	S-18	F R 
活載重 (公噸)	F12.2 R12.2	13.4 13.4	14.6 14.6	15.8 15.8	17.1 17.1	18.3 18.3	19.5 19.5	20.7 20.7	22 22	

(1) 活載重為車輛停止時，車輛所加於兩鋼軌上總壓力。

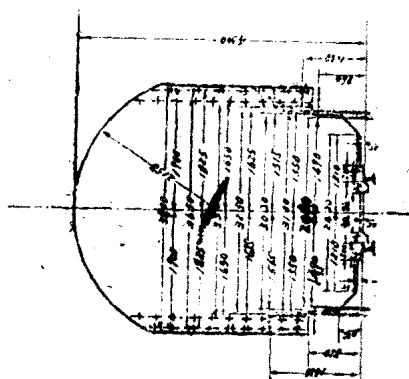
(2) 車輛之彈簧下重量為總重量百分之二十五。

(3) 如 K-18 與 S-18 同樣考慮可寫成 KS-18。

表 1·1 臺灣鐵路軌道標準載重等級表

等級	重聯二輛機車煤水車各軸活載重 (公噸)																		公噸/公尺				
符號																							
K-10	5	10	10	10	10	6.6	6.6	6.6	6.6	5	10	10	10	10	6.6	6.6	6.6	6.6	6.6	3.3	3.3		
K-11	5.5	11	11	11	11	7.3	7.3	7.3	7.3	5.5	11	11	11	11	7.3	7.3	7.3	7.3	7.3	3.6	3.6		
K-12	6	12	12	12	12	8	8	8	8	6	12	12	12	12	8	8	8	8	8	4	4		
K-13	6.5	13	13	13	13	8.6	8.6	8.6	8.6	6.5	13	13	13	13	8.6	8.6	8.6	8.6	8.6	4.3	4.3		
K-14	7	14	14	14	14	9.3	9.3	9.3	9.3	7	14	14	14	14	9.3	9.3	9.3	9.3	9.3	4.6	4.6		
K-15	7.5	15	15	15	15	10	10	10	10	7.5	15	15	15	15	10	10	10	10	10	5	5		
K-16	8	16	16	16	16	10.6	10.6	10.6	10.6	8	16	16	16	16	10.6	10.6	10.6	10.6	10.6	5.3	5.3		
K-17	8.5	17	17	17	17	11.3	11.3	11.3	11.3	8.5	17	17	17	17	11.3	11.3	11.3	11.3	11.3	5.6	5.6		
K-18	9	18	18	18	18	12	12	12	12	9	18	18	18	18	12	12	12	12	12	6	6		

非電氣運輸路線



比例尺
1:100
1:200
1:300
1:400
1:500
1:600
1:700
1:800
1:900
1:1000

■ 1:1 (a)

⑥建築界限 (structural gauge) 或淨空 (clearance)

建築界限係將軌道與其附近建築結構之空隙 (clearance) 保持之限界。標準建築界限適用於直線及曲線半徑 250 公尺以上路線。但在小於 250 公尺半徑者其橫向尺度必須適當增加，曲線半徑 500 公尺以上者必須縮小。鋼軌磨損時亦須保持全部空隙，至於軌道上車輛行駛之運動尺度界限 (the gauge of moving dimensions)，係由一垂直軌道中心線上之截面積決定，在此界限之外不能有車輛之結構部份存在。

茲將臺灣鐵路非電氣運轉路線 (圖 1.1 (a)) 及電氣運轉路線建築界限 (圖 1.1 (b)) 分別列出截面圖如上：

1.1.5 機車牽引性能

a. 牽引力與速度之關係 鐵路機動車輛之大小尺度悉以其動力與牽引力 (tractive effort) 之圖形視何者為適宜為決定基礎。其動力，牽引力與速度之關係如下式：

$$\text{馬力 (H.P.)} = \frac{TV}{270} \quad \text{或 瓩 (K.W.)} = \frac{TV}{367}$$

HP、KW 為機動車輛動力

1 KW. = 1.36 公制馬力

T = 牽引力 (kg)

V = 速度 (km/hr.)

動力定義有下列數種：

- ① 鍋爐或引擎動力
- ② 汽缸動力或引擎出力軸動力
- ③ 動輪 (driving wheel) 邊緣動力
- ④ 牽引桿 (drawbar) 上動力

牽引力定義有下列數種：

- ① 由鍋爐引擎之牽引力
- ② 指示牽引力 (indicated T.E.)
- ③ 動輪周牽引力
- ④ 牽引桿上牽引力 (draw bar pull)

在牽引列車起動時機車牽引力必須足以克服列車阻力 (train resistance)。在低速行駛範圍，可獲致之牽引力係受限於動輪與軌條間之黏着力 (adhesion)。此項「黏着牽引力」 (adhesion tractive effort) 亦即相當於黏着限度之牽引力一直到「黏着速度」為止，均為決定因素。過此速度，則機車動力始為牽引力曲線之唯一決定因素。但增加動力亦可使「牽着速度」更為提高因而在相當速度之牽引力亦有可能提高。(圖 1.2, 圖 1.3, 圖 1.4, 圖 1.5)。

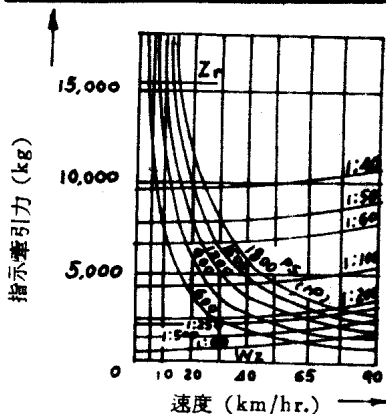


圖 1.2 列車牽引定數與引擎馬力

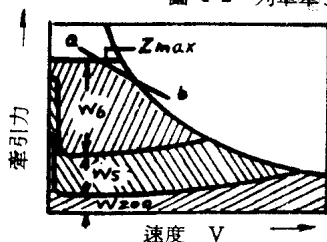


圖 1.3 牽引力之利用

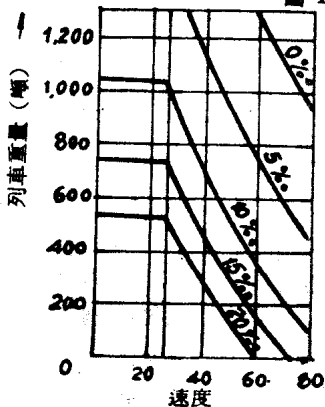
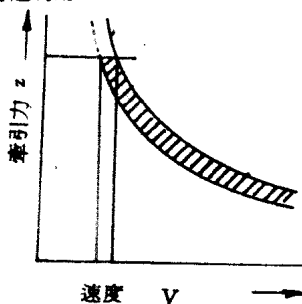


圖 1.4 列車重量曲線圖

列車重量=400 噸
 W_z =列車在平坦線之行駛阻力 kg
 Z_r =「黏著」牽引力

W_{z00} =平坦線上之阻力
 W_s =上坡道之阻力
 W_b =為正常加速之有效牽引力



在牽引力方面為增加
 動力之利益

圖 1.5 粘著牽引力

b. 牽引力之產生 —— 黏着力與黏着係數 機動車輛牽引力之產生係靠動輪與軌道間之黏着摩擦力 (adhesive friction) 而起動。動輪與軌頭表面可以看成是一種摩擦推動 (friction drive)。在起動時除非車輪打滑 (slip) 或滑行 (slide) 則必須使靜態摩擦超出牽引力，否則即無法滾動。故在動輪輪周之牽引力悉視黏着摩擦力之動輪上重量及輪軌表面間之摩擦係數而定。三者關係可如下式：

$$(TE)_d = \mu W_D$$

μ = 黏着係數 (亦即輪軌間之摩擦指數) (adhesive coefficient)

W_D = 黏着重量 (adhesive weight) 以公斤表示，亦即車輛經由動輪加諸軌道之上之重量

黏着係數最大值 (μ_{max})，鋼軌與鋼輪間摩擦係數值因地因時而異。即以清潔鋼鐵表面接觸，機車黏着係數試驗值就自 0.1 至 0.67 不等。如表面污染或濕沾可能低至 0.1 以下，且隨速度增加而減低，對於起動牽引力，上坡、制軔均極不利。因而影響機車績效，增加運轉時分，縮減牽引負荷，故欲增強機車運轉績效，必須對此係數最大值，加以試驗決定及用統計方法計算析求。機車所能發出最大牽引力在動輪輪周者 $(T.E.)_{D,max}$ 亦必須在此黏着係數最大值限制條件之下，稱為黏著牽引力 (adhesion tractive effort)。

故 $(T.E.)_{D,max} \leq \mu_{max} \times W_D$ 時 動輪不致打滑

而
$$\mu = \frac{W_D}{T.E.D} \geq \mu_{max}$$

此項摩擦係數為設計機車軌道之基礎，其範圍釐定受車輛建造條件，輪軸配置，馬達扭力，軸重均衡負荷，轉向架形式，以及外界因素影響而異。扭力不均，軸重均衡不良，或使用單獨運轉動輪均可使摩擦係數降低，亦即黏着牽引力在同等黏着重量下更須減低，肇致機車運用不良績效。

根據德國資料 μ 之代表值如下：

$\mu = 1/20 \sim 1/10 = 50 \sim 100$	公斤/噸	潮濕天氣有雪、冰、油污軌道
$= 1/6 \sim 1/5 = 165 \sim 200$	公斤/噸	蒸汽機車 (往復式) 標準係數
$= 1/4 \sim 1/3.6 = 250 \sim 280$	公斤/噸	不均衡軸重及單獨運轉動軸之電動及柴油機車標準
$= 1/3.8 = 263$	公斤/噸	有四根以上動軸蒸汽機車
$= 1/3.5 \sim 1/3 = 300 \sim 330$	公斤/噸	電動及柴油機車上限標準
		蒸汽機車用撒砂裝置者
$= 1/2.5 = 400$	公斤/噸	電動及柴油機車試驗標準

在起動時牽引力對於 μ 之變值有下列三種影響：①爬行 (creep) 期、②打滑 (slip) 期、③滑行 (slide)，即車輛前進距離較輪周轉距為小現象其嚴重者即成打滑現象，至於滑行期則為動輪加速快空轉或被咬住之故，此時摩擦係數即急劇下降，損失牽引力，故需及時控制運轉以免打滑。

牽引力之產生另一黏着重量因素，祇有在低速時（亦即黏着速度 (adhesive speed)），可短時充份發揮貢獻。在已知 μ 值下，增加黏着重量亦可促使黏着牽引力之增加（圖 1.6）。不過黏着速度更比例減低，此項黏着重量或黏着牽引力

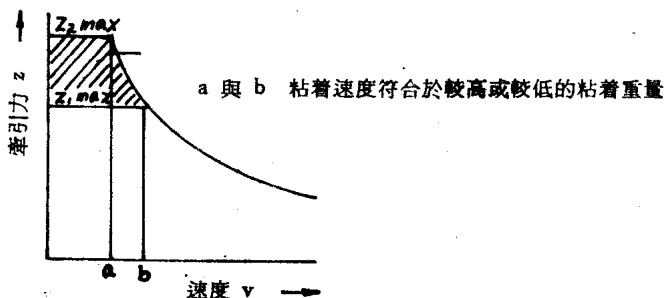


圖 1.6 在較高粘着重量中獲得粘着力之增加

係為解答下列問題決定因素：

- ①在已知條件下究能起動之列車負荷為何？
- ②能獲致之起動加速度為何？
- ③列車能僅靠輪軌間黏着力攀登之最高坡度為何？。

事實上黏着重量之絕對值尚不如其相關值，亦即其佔列車重量之比率更為重要。因此項「列車比重」(specific train weight) 實為欲求一迅速估計可能的牽引績效之公平約計值故也。

列車比重 = 列車總重：黏着重量

$$(S.W.)_r = W_r / W_D = \frac{W(L+t) + W_G}{W_D}$$

$W(L+t)$ = 機車加煤水車總重 (ton)

W_G = 車輛總重

每噸黏着重量 W_D ，其黏着牽引力 (TE)_w 為 1,000 μ 公斤

例如一列車總重一半為動輪黏着重量，其他一半則為非動輪之「牽引重量」(haulage weight)，亦即支持於非驅動輪之機車重量及車輛重量之和，則需

50% 牽引力以供移動全列車。

列車比重常用值：(德國資料)

軌道車 1~3

多輛聯掛列車 1~5

機車在峻陡斜坡上牽引列車 2~5

西德一般客運快車 6~13

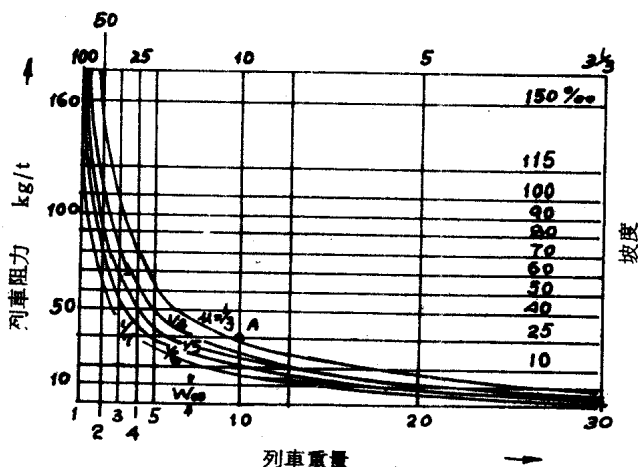
西德貨運列車 7~26

美國重貨運列車 57 左右

由上式可知列車重量 $W_o = W_D \times (S.W.)_r - W(L+C)$ 。即為在可供應之黏著重量 W_D 下，能被容許起動之列車重量 (permissible train weight)。設如在一平交道上，包括始動阻力，滾動阻力及曲線阻力之一總阻力 (與速度無關者) 為每公噸 10 公斤，則

每噸列車重量牽引力 = 列車阻力 (以 公斤/噸計)

圖 1.7 示出每一單位列車重量為不同摩擦係數，列車比重之牽引力，例如列車比重為 10 (圖中 A 點) 在 $\mu=1/3$ 最有利條件下，則牽引力限為每公噸列車重量 34 公斤左右，圖 1.8 亦示出可爬攀最陡坡度為 24‰ (千分之廿四)。



$W_o = 10 \text{ kg/t}$ = 假定開動時及列車行駛在反線的平坦線上

圖 1.7 列車重量及牽引力

至於可獲致之加速速度，則為不需克服列車阻力部份之牽引力中求出，由此「多餘之牽引力」(tractive effort surplus)所肇致之加速度，亦靠許多情形包含在設定之行駛阻力(每公噸十公斤)中之「加速度儲量」(acceleration reserve)增加。

c. 列車阻力 (train resistance)
列車在路線上以某一速度行駛時，必須機動車輛有足夠之牽引力克服妨碍列車進行之阻力，方能獲致相當之列車速度，此項阻力係由機車阻力及列車阻力組成，可分為：

①滾動阻力 (rolling resistance)
在平直道上以常速進行。

(1)輪與軌間摩擦阻力及在軸承間之阻力。

(2)引擎阻力包括推動機構及閥動裝置之摩擦阻力。

(3)彈簧鉸間摩擦阻力。

(4)空氣阻力。

(5)擾擾運動之影響。

②坡道阻力 (resistance on grades) 係在上坡時之阻力。

③曲線阻力 (resistance on curves)

此項阻力包括輪緣摩擦阻力及偏離原行方向阻力，

④加速阻力 (resistance to acceleration) 係在加速時由於質量慣性之阻力。

$$\text{故： } R_T = R_{t+t} + R_r + R_g + R_c + R_a = \text{T.E.}$$

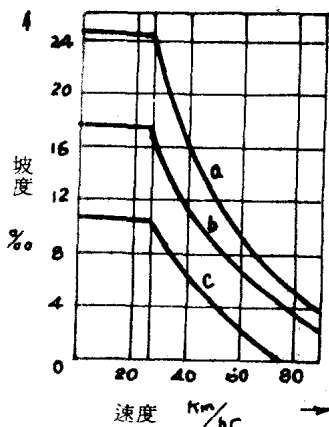
列車阻力 機車阻力 煤水車阻力 滾動阻力 坡道阻力 曲線阻力 加速阻力 牽引力

$R_a = 0$ 時列車以不變速度前進；

$R_a > 0$ 時列列車在加速； $R_a < 0$ 時列車在減速。

①滾動阻力：

(1)普通往復式蒸汽機車滾動阻力 德國司特拉爾 (Strahl) 公式



a = 旅客列車牽引 400t

b = 快速貨物列車牽引 600t

c = 貨物列車牽引 1,000t

圖 1.8 速度曲線圖