

大學用書

鐵路選線及計劃學

(第二冊)

(鐵路動力與列車運動)

王竹亭 編著

正中書局印行

大學用書
鐵路選線及計劃學

(第二冊)

(鐵路動力與列車運動)

王竹亭編著

正中書局印行

緒 論

鐵路上列車之運動，需要原動力，此原動力謂之挽力 (tractive effort)。挽力發生於列車最前之一車中，此車謂為機車 (locomotive)；如只有一節車輛，挽力即發生於其中，是謂自動車 (motor-car)。挽力普通為蒸汽機、電動機或內燃機等所發生者。此外，如狄塞爾電力機 (Diesel electric)、汽油柴油機等等，亦有用者。本書所論，以蒸汽機車 (steam locomotive) 為主。

在鐵路設計及鐵路營業中，有若干關於列車運動之問題，須應用動力學定理以求解決；如列車載重、列車速度（更有所謂經濟速度及經濟載重）、列車軔機、挽力速度在各種坡度及彎道上之變化、列車行駛所需之時間、挽力經濟等等問題皆是。解決是等問題所為之計算，謂之挽力計算。挽力計算，在鐵路設計及營業費用上最為重要；計算正確與否，影響鐵路營業之成功或失敗。在計算中所需要之精確性，視計算之目的而定。概言之，已成鐵路，因已有機車運用之各種統計，且於必要時可作挽力實驗，其計算可較精確；若係新築鐵路，其挽力一切性能（及尺寸大小）皆在假定之列，其計算自不若已成鐵路之容易；惟有一事，在計算時當加注意，即須留有相當伸脹之餘地，決不可使實際需要，反超過計算結果也。

挽力計算，普通採用公制（英美則仍舊制）；重量以公噸 (m. t)

或公斤(kg)計, 力以公斤(kg)計, 距離以公里(km) 或公尺(m)計, 列車速度以每小時公里(km/hr)計. 在挽力計算中, 各項數值之計量, 不得超出下列之精確性:

距離	{ 站間距離	10 公尺
	{ 路線剖面	1 公尺
列車載重	.....	5 公噸
列車速度	.....	0.1 公里/小時
挽力、阻力、輟力	.....	10 公斤
每公噸載重之平均挽力、阻力、輟力	.....	0.1 公斤
列車行駛站間所需水量	.....	10 公斤或 0.01 立方公尺
列車行駛每公里所需水量	.....	1 公斤或 0.001 立方公尺
列車行駛站間所需燃料	.....	10 公斤
列車行駛每公里所需燃料	.....	1 公斤
列車行駛站間所需時間	.....	1 分
列車行駛短小站間所需時間	.....	0.1 分
列車行駛每公里所需時間	.....	0.01 分
機車工作效能馬力(power)	.....	1 馬力
坡度	.....	0.0001

此乃就普通計算而言, 在特別分析某一部分或某一問題時, 所需要之精確性隨之而變, 須分別在各個情形之下規定之.

所謂挽力問題, 包括兩種目的: (1) 列車所受外力之分析; (2) 列車運動之研究. 茲分別論之如次.

目 次

第四編 列車所受外力之分析	...	...	...	...	...	...	...	1
第十八章 列車行駛阻力	...	...	...	...	...	...	...	1
列車行駛時之基本阻力	...	...	...	...	...	...	...	6
列車開駛時之基本阻力	...	...	...	...	...	...	...	45
列車行駛時之輔助阻力	...	...	...	...	...	...	...	47
第十九章 機車挽力	...	...	...	...	...	...	...	64
第二十章 列車輓力	...	...	...	...	...	...	...	124
第二十一章 機車機構特性之概示	...	...	...	...	...	...	...	136
第五編 列車運動之研究	...	...	...	...	...	...	...	146
第二十二章 列車運動公式	...	...	...	...	...	...	...	146
第二十三章 機車動力之分布	...	...	...	...	...	...	...	152
第二十四章 列車最大載重	...	...	...	...	...	...	...	164
第二十五章 用動能以克服坡度	...	...	...	...	...	...	...	172
第二十六章 列車使軔計算	...	...	...	...	...	...	...	181
第二十七章 列車行駛速度	...	...	...	...	...	...	...	221
第二十八章 列車行駛時間	...	...	...	...	...	...	...	224
第二十九章 機車煤水消耗	...	...	...	...	...	...	...	236
第三十章 誤換軔列車行駛時間及煤量消耗圖解法	...	...	...	...	...	...	...	249

鐵路選線及計畫學

第三十一章	車站技術業務之分析…	…	…	…	…	…	…	…261
第三十二章	站間技術業務之分析…	…	…	…	…	…	…	…297
第三十三章	電力行車	…	…	…	…	…	…	…319
第三十四章	列車行駛之經濟速度…	…	…	…	…	…	…	…327

第四編 列車所受外力之分析

列車行駛時所受之外力，約有三種：(1)運動所遭遇之自然阻力；(2)機車挽力；(3)列車將停止時所施之人工阻力，即輟力是也。

第十八章 列車行駛阻力

§ 53. 列車阻力概說 鐵路列車，普通由機車、煤水車、車輛等三者配合而成(有時機車、煤水車合併爲一，甚至於機車與車輛亦合併爲一)。其中發動推進者，只有機車；其餘煤水車與車輛等，皆有一種阻力，反抗前進，且時有反拖機車後退之傾向(當上坡時即有此傾向)，即機車本身，亦具有一種阻止推進之惰性。由於此種惰性所得之結果，謂爲列車阻力(train resistance)。

機車、煤水車與車輛之阻力，因路基、路線及行駛之情況而有不同。列車各部之阻力，可分爲二種：

(1)列車在平直線段上依等速行駛時，所有基本阻力， W_0 。

(2)列車在坡度與彎道上，加速或減速行駛時，所發生之輔助阻力，計有：

(a)坡度阻力， W_s ；

(b)彎道阻力， W_r ；

(c)加速減速阻力, W_p .

列車各部總括阻力(total resistance)當爲:

$$\text{機車總括阻力} \quad W^L = W_0^L + W_S^L + W_r^L + W_p^L.$$

$$\text{煤水車總括阻力} \quad W^T = W_0^T + W_S^T + W_r^T + W_p^T.$$

$$\text{車輛總括阻力} \quad W^G = W_0^G + W_S^G + W_r^G + W_p^G.$$

列車全部之總括阻力則爲上列三式之總和,可寫作

$$W = W^L + W^T + W^G.$$

次列文字各代表一事:

L = 機車重量(煤水車不在內),以公噸計.

T = 煤水車重量(如機車、煤水車合一,則用 L 代表),以公噸計.

G = 列車所有車輛總重(機車、煤水車不在內),以公噸計.

$Q = L + T + G$ = 列車總重,以公噸計.

W_0^L = 機車在平直線段上行駛之基本阻力,以公斤計.

W_0^G = 車輛在平直線段上行駛之基本阻力,以公斤計.

W_0^T = 煤水車在平直線段上行駛之基本阻力,以公斤計.

W_0 = 列車全部在平直線段上行駛之基本阻力,以公斤計.

W_r^L = 機車在彎道上行駛之輔助阻力,以公斤計.

W_r^G = 車輛在彎道上行駛之輔助阻力,以公斤計.

W_r^T = 煤水車在彎道上行駛之輔助阻力,以公斤計.

W_r = 列車全部在彎道上行駛之輔助阻力,以公斤計.

W_S^L = 機車在坡度上行駛之輔助阻力,以公斤計(如下坡,其值爲負號).

W_S^G = 車輛在坡度上行駛之輔助阻力, 以公斤計(如下坡, 其值爲負號).

W_S^T = 煤水車在坡度上行駛之輔助阻力, 以公斤計(如下坡, 其值爲負號).

W_S = 列車全部在坡度上行駛之輔助阻力, 以公斤計(如下坡, 其值爲負號).

W_p^L = 機車加速行駛發生之輔助阻力, 以公斤計.

W_p^G = 車輛加速行駛發生之輔助阻力, 以公斤計.

W_p^T = 煤水車加速行駛發生之輔助阻力, 以公斤計.

W_p = 列車全部加速行駛發生之輔助阻力, 以公斤計.

W^L = 機車總括阻力, 以公斤計.

W^G = 車輛總括阻力, 以公斤計.

W^T = 煤水車總括阻力, 以公斤計.

W = 列車總括阻力, 以公斤計 $= W^L + W^T + W^G$.

w = 比阻, 以公斤/公噸計(右上下角, 若綴以不同之文字, 卽代表各種不同之比阻, 與 W 所示者相同).

S = 坡度, 以 ‰ 計, 上坡爲正號, 下坡爲負號.

V = 速度, 以公里/小時計.

v = 速度, 以公尺/秒計.

列車各部(如機車、車輛、煤水車)之重量, 每公噸平均所有阻力, 謂之比阻 (specific resistance). 有時稱爲阻力係數 (coefficient of resistance), 其單位以公斤/公噸計, 如:

機車重量每噸阻力, 卽爲

$$w^L = \frac{W^L}{L} \text{ 公斤/公噸.}$$

煤水車重量每噸阻力, 即為

$$w^T = \frac{W^T}{T} \text{ 公斤/公噸.}$$

車輛重量每噸阻力, 即為

$$w^G = \frac{W^G}{G} \text{ 公斤/公噸.}$$

列車全部重量每噸阻力, 即為

$$w = \frac{W}{Q} \text{ 公斤/公噸.}$$

路基、路線及行駛情況, 亦是使列車各部之比阻不同; 在坡度上、彎道上以及加速運動中, 比阻之變化, 亦與前述阻力相似, 可分為二種:

(1) 列車在平直線段上依等速行駛時, 所有基本比阻, w_0 公斤/公噸.

(2) 列車在坡度與彎道上或加速行駛時, 所發生之輔助比阻, 計有:

(a) 坡度比阻, w_s 公斤/公噸;

(b) 彎道比阻, w_r 公斤/公噸;

(c) 加速比阻, w_p 公斤/公噸.

列車各部總括比阻則為:

機車總括比阻

$$w^L = w_0^L + w_s^L + w_r^L + w_p^L \text{ 公斤/公噸.}$$

煤水車總括比阻

$$w^T = w_0^T + w_S^T + w_r^T + w_p^T \text{ 公斤/公噸.}$$

車輛總括比阻

$$w^G = w_0^G + w_S^G + w_r^G + w_p^G \text{ 公斤/公噸.}$$

列車全部之總括比阻

$$w = w_0 + w_S + w_r + w_p \text{ 公斤/公噸.}$$

列車全部之總括阻力

$$W = wQ = W^L + W^T + W^G = w^L L + w^T T + w^G G \text{ 公斤.}$$

此處機車重量 L 為工作重量 (weight in working order), 此與機車熄火空載時之重量不同。

普通計算列車阻力時, 常將煤水車重量與機車重量合併為一。若假定機車連煤水車重量為 $(L+T)$, 其比阻為 w^{LT} , 則列車阻力為

$$W = w^{LT}(L+T) + w^G \cdot G \text{ 公斤.}$$

比阻 w^{LT} 不但適用於‘坦克機車’ (tank-locomotive), 即在普通機車 (tender-engine), 亦可如此計算, 以求簡捷。

有時挽力計算, 不需要精確, 而可簡捷約計, 則用整個列車之比阻乘其全部重量 (機車、煤水車、車輛合計), 有如下式:

$$W = wQ.$$

計算機車挽力及列車載重速度等項時, 煤水車重量不必用其全部, 因為煤水車自開出車房後, 即漸漸消耗, 故宜取其平均數, 或用水容量及煤容量之 $\frac{2}{3}$, 以作計算標準亦可。故煤水車本身之死重, 加上 $\frac{2}{3}$ 煤水之重量, 即為煤水車之計算重量, 如前用 T 代表之。

以上所稱阻力，概指自然阻力而言，行駛列車所需要軛機發生之阻力，不在此內。

對於列車運動時各種阻力，各國已有詳盡之研究〔如美國伊利那 (Illinois) 大學、包爾德文 (Baldwin) 及其他機車廠、賓夕法尼亞 (Pennsylvania) 等大鐵路、美國鐵路工程協會 (A. R. E. A.)，德國之國家鐵路公司，俄國之羅謨諾薩夫 (Lomonosoff) 教授等等〕，茲於以後各節中擇要討論之。

列車行駛時之基本阻力

§ 54. 各種列車基本阻力之探討 列車各部(機車、煤水車、車輛)因循鋼軌在平直線段上轉動而發生之阻力，稱為基本阻力(pure resistance)，其形成也，約有下列六種主要原因：

- (1) 軸頸與軸承間之滑動摩阻力(第一種摩阻)。
- (2) 輪箍與軌面間之轉動摩阻力(第二種摩阻)。
- (3) 軌頭接縫、軌面凹凸及其他軌面不平之處，當車輪經行其上時，發生之動能(kinetic energy)之損失。
- (4) 車輛行駛時，由於擺動、搖盪、顫動等所發生之動能損失。
- (5) 輪箍邊緣與軌頭側面之滑動摩阻力(第一種摩阻)。
- (6) 機車前面所受空氣阻力(風力暫不計)，及列車後面因真空作用而發生之阻力。

機車阻力，除上列六種原因以外，尚有其他轉動部分與蒸汽傳導機關內部之摩阻力。

上列阻力生成之六種原因中，可作下列之假定：(1)第一項中之滑動摩阻力，在速度變化微小時，可視作常數；(2)第二至第五各項，

隨速度而增減，且與軌道狀態極有關係。所謂軌道狀態，即鋼軌之抗彎能力，軌頭接縫之抗力，枕木之擠墊與鋼軌之調順等情形；(3)第六項與行駛速度之平方成正比。茲將各種阻力之要素，分別論之如次：

(a)軸頸與軸承間之滑動摩阻力 設軸頸所受重量為 $P_0/2$ 公噸，軸頸轉動時，與軸承發生一種摩擦，其力為 $\frac{\delta \cdot P_0}{2}$ 。此式中之 δ ，表

示軸頸與軸承間之摩阻係數。如車輪轉動 γ 角度，則兩輪所完成之功為 $\delta \cdot P_0 \cdot r_0 \cdot \gamma$ (圖 28)。試求在軸之中心必須施以何力，始能與摩阻力相消？設此力為 q_r ，轉動輪軸成 γ 角度時所成之功為 $q_r \cdot R_0 \cdot \gamma$ 。上列兩種功相等，故有

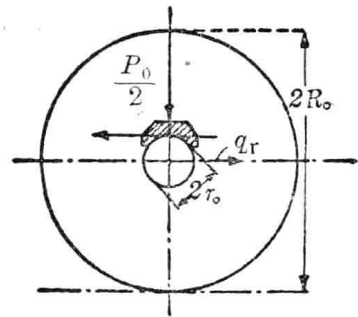


圖 28.

$$\delta \cdot P_0 \cdot r_0 \cdot \gamma = q_r \cdot R_0 \cdot \gamma,$$

即

$$q_r = \frac{r_0}{R_0} \cdot P_0 \cdot \delta.$$

此處之摩阻係數，不能精確計算，乃因溫度及速度相應變更故也。溫度影響，在冬季寒冷時期尤為顯著；如列車在冷天氣中停留稍久，則開動頗難，因為滑油之凝結，有時尚須加注煤油，使其鬆滑。俟車輛開動，軸頸軸承互相摩擦而生熱，使滑油融化後，上述阻力方能減低。但若速度愈高，雖可使溫度增加，然同時軸箱所受風力亦愈大，反使溫度降低，此兩者一長一消，往往使溫度得其平衡而止。今假定冷熱適可相消，則行駛速度與此阻力當無多大影響。普通鋼質

線，其直徑與 MN 者均不相同，此等處因速度關係，必有一種滑動摩阻發生(如圖 29, m 與 n 處之圓周，不與 m_0 處圓周相等)，既有此摩阻發生，在軸之中間必施以力 q_k 以抵消之。由理論及實驗所得結果，知此摩阻力等於

$$q_k = 0.0005 \varphi_0 (p_0 + p'_0),$$

式中 φ_0 = 輪軌間之滑動摩阻係數(第一種摩阻)。

p_0 = 軸頸所承重量，以公噸計(兩頸)。

p'_0 = 軸連兩輪之重量，以公噸計。

茲試證明上列公式如次：如圖 30，假設輪箍與軌頂接觸之表面，寬為 n 公厘，則有：

$$n = x + y.$$

接觸面全寬所受重量為 $\frac{p_0 + p'_0}{2}$ 公噸。

接觸面每 1 公厘寬所受重量為 $\frac{p_0 + p'_0}{2n}$ 公噸。

接觸面寬 dx 公厘所受重量為 $\frac{p_0 + p'_0}{2n} dx$

(在較 m_0 圓周大之範圍中轉動時)。

接觸面寬 dy 公厘所受重量為 $\frac{p_0 + p'_0}{2n} dy$

(在較 m_0 圓周小之範圍中轉動時)。

輪箍表面與軌頂，自 O 至 b 全部面積接觸；輪向前滑動，必有一種摩阻力阻止之，如滑動摩阻係數為 φ_0 ，則此摩阻力為

$$bb_1 = \int_0^y \frac{p_0 + p'_0}{2n} \varphi_0 dy = \frac{p_0 + p'_0}{2n} \varphi_0 y.$$

輪箍表面與軌頂，自 O 至 a 全部面積接觸；輪向前滑動，亦必有一種摩阻力，與前者方向相反，此摩阻力大小亦如上式，而為

$$aa_1 = \int_0^x \frac{p_0 + p'_0}{2n} \varphi_0 dx = \frac{p_0 + p'_0}{2n} \varphi_0 x.$$

根據動力學定理，如將三種力， q_k （所求之阻力）， aa_1 及 bb_1 ，在一平面上作投影，則有

$$\frac{p_0 + p'_0}{2n} \varphi_0 (y - x) + q'_k = 0,$$

即
$$q'_k = \frac{p_0 + p'_0}{2n} \varphi_0 (x - y).$$

此外更可根據動力學定理，而作下列力矩(moment)公式(以 O 為重心):

$$\int_0^x \frac{p_0 + p'_0}{n} \varphi_0 (r + x\alpha) dx - \int_0^y \frac{p_0 + p'_0}{n} \varphi_0 (r - y\alpha) dy = 0,$$

故
$$rx + \frac{\alpha x^2}{2} - ry + \frac{\alpha y^2}{2} = 0,$$

即
$$x^2 + \frac{2rx}{\alpha} + \left[y^2 - \frac{2ry}{\alpha} \right] = 0.$$

代入 $y = n - x$ ，而得

$$x^2 + x \frac{2r - \alpha n}{\alpha} - \left[\frac{rn - \frac{\alpha n^2}{2}}{\alpha} \right] = 0,$$

即
$$x = \frac{n}{2} - \frac{r}{\alpha} \pm \sqrt{\frac{r^2}{\alpha^2} \left(1 - \frac{n^2 \alpha^2}{4r^2} \right)}.$$

此式中之 $\frac{n^2 \alpha^2}{4r^2}$ 一項數值微小，可以略去。用牛頓二項定理分解此式，

得

$$x = \frac{n}{2} - \frac{\alpha n^2}{8r}.$$

由此得

$$y = (n - x) = \frac{n}{2} + \frac{\alpha n^2}{8r}.$$

代入前式,得

$$q'_k = \frac{p_0 + p'_0}{2n} \varphi_0 \cdot \frac{\alpha n^2}{4r} = (p_0 + p'_0) \varphi_0 \frac{n\alpha}{8r}.$$

兩輪阻力

$$q_k = (p_0 + p'_0) \varphi_0 \frac{n\alpha}{4r},$$

式中 $\alpha = \frac{1}{20}$ 為輻輳斜度,

r = 輪半徑 (如圖) = 500 公厘,

$n = 20$ 公厘.

故

$$\frac{\alpha n}{4r} = \frac{0.05 \times 20}{4 \times 500} = 0.0005.$$

則

$$q_k = 0.0005(p_0 + p'_0) \varphi_0.$$

(c) 軌頭接縫衝擊阻力 如

圖31所示,設有一車輪自左向右旋轉,因輪上承有重量,與輪接觸處之鋼軌,常傾向兩旁而分開,此種材料分裂之趨勢,尤在鋼軌斷隙之處為甚,因其間抗裂之力最低故也.因此,軌頭接縫處之軌端,乃磨蝕而成如圖31所示之狀態.輪如自左向右轉動,左邊軌頭低下而成 abc 之曲線,此時輪中所受之力為:

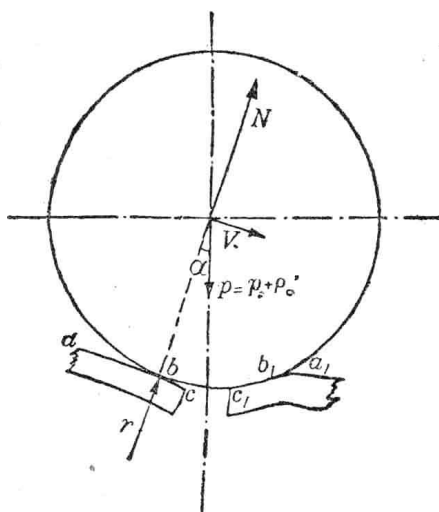


圖 31.