

大學叢書

鐵路選綫及計劃學

(第三冊)

(鐵路計劃原理)

王竹亭編著

人民出版社出版

目 錄

第六編 路線計劃之基本原則	1
第三十五章 坡度	2
限制坡度之折減.....	37
限制坡度之超越.....	45
坡度之設計	54
坡度之連接	61
第三十六章 彎道	68
第三十七章 車站之設置	125
第三十八章 既成鐵路之改善	130
第三十九章 路線之比較	157
第四十章 鐵路與其他路線及水道之交叉	174
鐵路與道路相交.....	176
第七編 鐵路運輸能力	192
第四十一章 行車能力	192
平行行車	196
商務行車	204
段速	209
車站行車能力	215
第四十二章 機車車輛之能力	224

第四十三章	車站之分布	233
第四十四章	機車車輛保養點之分布	251
第四十五章	車站設計概要	256
第四十六章	軌道路基及橋梁之承重能力	309
第八編	鐵路計劃之其他雜項	315
第四十七章	工務行政機構及辦公房屋	315
第四十八章	路線佔用地畝	316
第四十九章	鐵路施工方案之編具	320
	工程總計劃之編製	322
附：	中華人民共和國鐵路建築規程（草案）	340

第六編 路綫計劃之基本原則

路綫之形成，由平面及立面兩種狀態以定。平面示路綫之彎直，及方向；立面示路綫之起伏。理想路綫，應為無起伏無彎曲之平直路綫；此對於鐵路業務，最為適宜，最為經濟；蓋彎道與坡度皆為增加行車阻力之因素，挽力需要因之增加或列車載重（或行駛速度）因之減小，營業費用亦即因此而提高。但自然地形，本有伏起，欲求路綫之盡為水平，除非耗糜鉅款，乃不可能。故必須依隨地勢高低，使路綫時起時伏，以求工程之節省；路綫與水平綫所成之傾斜，謂之坡度（grade）。向上仰起謂之上坡（ascent）。向下低俯，謂之下坡（descent）。又以自然界中（地面之上）有山有水，更有其他障礙，故在甚長之路綫中，不能必為直綫。為避免鉅大資財之消耗，故在直綫之間，須雜以折曲，以圖繞避障礙。路綫折曲之處，須為彎道（Curve）。故坡度與彎道，乃路綫不可避免者；不過其大小緩急之程度，不宜超出兩種限度，即：（a）行車安全之保證，及（b）將來營業經濟效率之掌握。兩者之絕對數值，則全視地勢情形與夫鐵路性質而定，不可一概而論。

彎道部份與直綫部份長度之比，以及坡度與水平部份之比，亦隨地勢而各國不同。如瑞士為多山之地，1914年全國鐵路統計，坡度長度佔全長78%；彎道總長佔全長37%，此兩種比數，足以表示

地勢之大概。

茲就路綫之各部性態，與路綫改進及比較之原則，分論於下列各章。

第三十五章 坡 度

§151. 坡度之標誌 坡度之大小，乃以路綫與水平綫所成傾斜角之正切表之；即坡段兩端標高之差除以路段水平投影之長度。坡度標誌方法，各國習慣不同，有以比數者（如德國，英國等）；有用簡單分數者（如德國一部）；有用小數者（如蘇聯，法國）；有用百分數者（如美國）；有用千分數者（如德國，意國，蘇聯）；或以每公尺升高之公厘數表示者（如法國，比國）；或以每英里升高之英尺數表示者（如美國）。例如千分之五的坡度，標誌之法，有下列幾種：

1:200

（德國，英國）

$\frac{1}{200}$

（德國一部）

0.005

（蘇聯，法國）

0.5%

（美國）

5‰

（德國，意大利，蘇聯）

5 公厘/公尺

（法國，比國）

26.4 英尺/英里

（美國）

又如萬分之二十五的坡度，標誌方法則為：

1:400

$\frac{1}{400}$

0.0025

0.25%

2.5 ‰

2.5 公厘/公尺

13.2 英尺/英里

此中最適用者，為以千分數表示之坡度，如 $S\%$ 。此坡度 $S\%$ 中， S 之數值，即等於坡度阻力，以公斤/公噸計。在路線縱剖面圖上，坡度之大小，只寫出其千分數表示之，如圖151所示。橫線之起伏，分別坡度之上下；（水平綫表示水平路線。）橫線上方，標出坡度之千分數，下方記其長度，以公尺計，例如：

$\frac{+5}{800}$ (即 $\frac{+5}{800}$) 表示 $S=5\%$ 之上坡，長 800公尺

$\frac{-5}{800}$ (即 $\frac{-5}{800}$) 表示 $S=5\%$ 之下坡，長 800公尺

$\frac{0}{800}$ 表示水平路線 ($S=0\%$)，長 800公尺

§152. 坡度之區分 列車作等速運動時，機車挽力 (Z) 與列車重量 (Q) 有下列關係：

$$Z = \omega_1 \cdot Q$$

式中 ω_1 稱為限制比阻（德語為 *Massgebendes Widerstandverhältnis*）。設有列車，其挽力為 $Z=10,000$ 公斤時，能牽引列車重量 $Q=500$ 公噸；則此限制比阻為 $\omega_1 = \frac{10000}{500} = 20$ 公斤/公噸。

計算坡度 (S_f) 列車在有彎道有坡度之路段行駛，且作等速度運動時，其綜合行駛比阻，按前述之理論，應為基本比阻 (ω_0) 及

坡度比阻 (ω_s) 與彎道比阻 (ω_r) 之和:

$$\omega = \omega_0 \pm \omega_s + \omega_r \text{ 公斤/公噸}$$

爲計算簡便起見，彎道比阻，亦折合爲當量坡度比阻；如前所述美國鐵路習慣，將彎道彎度每度折合爲坡度若干，即所謂彎度折減率 (Curve Compensation)；德法諸國，則按照公式，由半徑之大小，計算出其當量坡度比阻；例如

$$\omega_r = \frac{750}{R} \text{ 公斤/公噸}$$

設 $R = 500$ 公尺，則彎道比阻爲 $\omega_r = \frac{750}{500} = 1.5$ 公斤/公噸。其當量坡度則爲 $+ \text{Sec} = 1.5 \%$ ；此只有正數，而無負數。在路綫中，如坡度彎道同時存在，則計算時所用坡度，應爲實際坡度 (S) 與彎道折合坡度 (Sec) 之代數和，即

$$S_f = \pm S + \text{Sec};$$

此謂之計算坡度 (S_f)，其值可爲正號，可爲負號。蓋因：

下坡時， $(-S)$ 絕對數值小於 Sec ，則 $\text{Sec} - S = +S_f \%$ ；

下坡時， $(-S)$ 絕對數值大於 Sec ，則 $\text{Sec} - S = -S_f \%$ 。

最大坡度 (或限制坡度) S_0 與機車極限坡度 S_1 鐵路路綫之縱剖面及平面圖爲許多坡度與許多彎道直綫配合而成。坡度與彎道或同有一段，或互相分離；綜括而言，路綫乃由許多之“計算坡度”聯接而成，此各種坡度，大小自不必相同。在鐵路或鐵路之一段中，此種計算坡度中之最大者，於鐵路運用最有關係 (用運動能力克服之超強坡度及輔助機車推送之超強坡度自不在此列)。因爲在全路或其一段中，列車載重之大小，惟按此最大計算坡度之數值而定；而列

車載重之大小，又為鐵路整個經濟之基礎。此種最大計算坡度，在美國、德國、英國稱為限制坡度(ruling grade, massgebende Steigung)；在法國、比國、意國、蘇聯稱為“極限”或“最大坡度”(rampe maxima admissible)。蘇聯稱 Руководящий подъем。路線之中，時有用運動能力或輔助機車以克服之超強坡度存在，其數值較“限制坡度”為大，故“限制坡度”不必為實際上之最大坡度。德奧兩國，更有所謂“機車極限坡度”者，在此坡度上駛，機車只能牽動本身及煤水車，欲掛以車輛則不可能。在平直線段上，此種極限坡度可用下式推求（設機車限制坡度為 S_1 ）：

$$(L+T)(\omega_0^{LT} + S_1) = \psi \cdot I_a$$

$$\text{即} \quad S_1 = \psi \frac{I_a}{L+T} - \omega_0^{LT}$$

式中 ψ 為黏着係數， I_a 為機車黏着重量（前已述及）。

此外尚有所謂“限制下坡”者；列車在坡度向下行駛，按照軔機能力及安全速度，以規定最大的“計算下坡”。此稱為“限制下坡”。在強大下坡行駛，列車須保持一種安全等速度，此為列車運用之必要條件。

例：設路線之限制坡度為 $S_0 = 20\%$ ，列車行駛速度應為 30 公里/小時。今有 3 公里長之隧道，適在 $R = 500$ 公尺之彎道中，其坡度應為若干？

$$\text{設} \quad \omega_0 = 2.4 + \frac{V^2}{1300} = 3.09; \quad \omega_r = \frac{650}{R - 55} = 1.46;$$

且隧道中之 $\psi_t = 0.8 \psi$;

則隧道中實際坡度應為：

$$S_t = \frac{\psi_t}{\psi} \left[\omega_0 + (\omega_r + S_{ec})_{\max} \right] - \left[\omega_0 + \omega_r \right]$$

$$\text{即 } S_t = 0.8(3.09 + 20) - (3.09 + 1.46) = 13.92\%$$

道列察列克 (Dolezalek) 認為列車在隧道中行駛，阻力之增加，與 3—6% 坡度相當；視隧道長度，隧道淨空，風吹方向，而定其比阻之確實數值。

無害坡度與有害坡度 列車在等速運動中，下列公式可以成立：

$$Z = W = (\omega_0 + \omega_r \pm S) Q.$$

列車在下坡行駛時，有三種可能現象：

$$(a) \text{ 如 } S < \omega_0 + \omega_r$$

$$\text{則 } Z = \alpha Q; \alpha = (\omega_0 + \omega_r) - S.$$

$$(b) \text{ 如 } S > \omega_0 + \omega_r;$$

$$\text{則 } Z = -\beta Q; \beta = S - (\omega_0 + \omega_r).$$

$$(c) \text{ 如 } S = \omega_0 + \omega_r$$

$$\text{則 } Z = 0$$

由此得知：

(1) 當 $S < \omega_0 + \omega_r$ 時，列車沿坡度向下行駛，尚須使用蒸汽，而不使用軋機。故列車已蓄之運動能力，並不消失；且鋼軌，輪箍，軋掌，等等，均無特別摩擦消失，有如使軋行駛者然。故在德國、奧國、蘇聯等，在 $S < \omega_0 + \omega_r$ 條件下，稱其坡度為“無害坡度”。

(2) 當 $S > \omega_0 + \omega_r$ 時，挽力為負號，即謂不需要蒸汽挽力；且須使用軋機，以支持固定速度而策安全；如此則列車將貯蓄之運動能力消失，軌輪軋掌亦均受損害；故在此情形中，坡度稱為“有害

坡度”。

(3) 當 $S = \omega_0 + \omega_r$ 時，挽力 $Z = 0$ 。即謂列車在下坡行駛，既不用汽，又不使軔，藉重力向下轉，作等速運動。在奧德各國，稱此種坡度為“軔機坡度”(Bremsneigung)，或“使軔極限坡度”(bremsgrenzneigung)。美國有時稱之為“休息坡度”(grade of repose)。至於有害無害坡度，在美國則無相當專名；而通稱為“用軔坡度”或“不用軔坡度”。

茲以 S_s 代表有害坡度，以 S_u 代表無害坡度，以 S_b 代表使軔坡度；以比較各種坡度對於機車費用之影響。列車在同一路段行駛，去時為上坡，返時為下坡；且兩個方向中列車重量 Q 相同，速度相等。

來去(一上一下)方向中，平均挽力 Z_m 可寫為：

$$Z_m = \frac{1}{2} \left[(\omega_0 + \omega_r + s) Q + (\omega_0 + \omega_r - s) Q \right] \dots\dots\dots (A)$$

設 $s < \omega_0 + \omega_r$ ，即謂坡度為無害坡度時($s = s_u$)，則

$$Z_m = (\omega_0 + \omega_r) Q \dots\dots\dots (B)$$

設 $s = \omega_0 + \omega_r$ ，即為使軔坡度時($s = s_b$)，則

$$Z_m = \frac{1}{2} \times 2(\omega_0 + \omega_r) Q = (\omega_0 + \omega_r) Q \dots\dots\dots (C)$$

由此知 $Z_m = (\omega_0 + \omega_r) Q$ 一公式，適合於列車往返路線各一次，且路線全部為平直之情形；故知以挽力費用為研究對象時，無害坡度與使軔坡度均與平直路段相同。法人稱之為 Quasipalier，即此故也。

設 $s > \omega_0 + \omega_r$ ，即為有害下坡時($s = s_s$)，則上坡時，

$$Z = (\omega_0 + \omega_r + s) Q,$$

而下坡時

$$Z = 0$$

平均挽力則爲 $Z_m = \frac{1}{2}(\omega_0 + \omega_r + s) Q \dots\dots\dots (D)$

由此可知，兩個方向中列車載重相等時，只有害下坡對於機車平均挽力發生影響，亦即對於挽力費用發生影響。

又自公式(B)及(D)之比較而知，在有害下坡中，彎道對於挽力之影響，較無害坡度及使軌坡度者小一倍；即有害下坡中之彎道，有利於列車運用。

今再就上下方向中，列車載重不相同時，分析機車所作之功。設上坡方向列車重量爲 Q_B ，下坡方向爲 Q_T ；則一上一下之間，列車挽力與阻力之關係如下：

$$Z_m = \frac{1}{2} [(\omega_0 + \omega_r + s) Q_B + (\omega_0 + \omega_r - s) Q_T] \dots\dots\dots (A')$$

如 $s = \omega_0 + \omega_r$ ，即爲使軌極限坡度時($s = s_h$)，則

$$Z_m = \frac{1}{2} \times 2(\omega_0 + \omega_r) Q_B = (\omega_0 + \omega_r) Q_B \dots\dots\dots (C')$$

由此可知，坡度大小與下坡列車重量，對於平均機車不發生影響；此亦顯然之事，蓋下坡行駛，既不用汽，又不使軌攸耳。

設 $s < \omega_0 + \omega_r$ 或 $s > \omega_0 + \omega_r$ ，則一來一去平均挽力爲：

$$\begin{aligned} Z_m &= \frac{1}{2} [(\omega_0 + \omega_r + s) Q_B + (\omega_0 + \omega_r - s) Q_T] \\ &= (\omega_0 + \omega_r) \frac{Q_B + Q_T}{2} + s \frac{Q_B - Q_T}{2}. \end{aligned}$$

惟式中 $(\omega_0 + \omega_r) \frac{Q_B + Q_T}{2}$ 表列車在上坡方向重量爲 Q_B ，

與下坡方向爲 Q_T 時，往返一次所用之平均挽力，即 $(Z_m^0 + Z_m^r)$ 。
故可寫出下列公式：

$$Z_m = Z_m^0 + Z_m^r + s \frac{Q_B - Q_T}{2} \dots\dots\dots (B', D')$$

可知上下方向列車載重不同時，在 $s < \omega_0 + \omega_r$ 及 $s > \omega_0 + \omega_r$ 情形之下，則坡度之大小及 Q_B 與 Q_T 之差數，均足以影響平均挽力。又知在 $Q_B > Q_T$ 時，無論 $s < s_b$ 或 $s > s_b$ ，而 Z_m 恒大於 $(Z_m^0 + Z_m^r)$ ，因而爲有害下坡；反之亦然。倘 $Q_B < Q_T$ ，無論 $s < s_b$ 或 $s > s_b$ ，則 Z_m 恒小於 $(Z_m^0 + Z_m^r)$ ；是爲無害下坡。

倘若下坡不超過使軔極限時（即 $s \leq s_b$ 時），所有重載方向中之上坡，皆足使挽力費用增高；所有重載方向之下坡，皆足使其減低。支綫或次要鐵路，或工業鐵路，恒有重載與空車方向之分，可知對於坡度之配置，極宜注意。

至於使軔極限下坡（ s_b ）之大小，可隨時變更；吾人既知 $b = \omega_0 + \omega_r$ ，故坡度路段之有無彎道，及行駛速度之大小，均與 s_b 有關係。且客列車之 s_b 較貨列車者爲高。在一條路綫上，如貨列車與客列車速度相差甚遠，宜以貨列車爲標準。設貨列車速度在30—40公里/小時左右，則平直路段上無害下坡極限，以包爾得文（Baldwin）阻力公式計算，應爲：

$$s_b = \omega_0 = (1.5 + \frac{30}{20}) - (1.5 + \frac{40}{20}) = 3 - 3.5\%。$$

往昔貨車比阻約爲 2.5—3.0 公斤/公噸時，平直路段上之無害下坡極限則定爲 5%。如韋靈吞（Wellington），韋伯（Webb）等均如此計算。又如郎哈特（Launhardt，1888年）定爲 3.6%，瓦辛廷司基

(Wasintinsky 1905年)定為3.3‰。晚近，貨車比阻降低至1.5—2.0公斤/公噸。此無害下坡極限則恒作為3‰以至2‰。此種極限，在路線設計時，宜按機車性質，列車運用等規定之。平坦區域宜竭力避免使用有害下坡。

遺失坡度 與“有害坡度”及“無害坡度”相提並論者，尚有所謂“遺失坡度”——遺失上坡及遺失下坡，美國無此名稱，此種遺失坡度之情形，觀圖 152 自明。

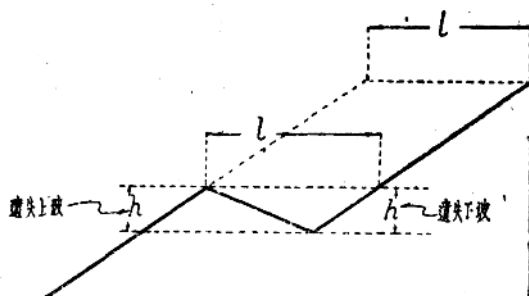


圖 152

設兩點 A, B 間標高之差為 H ，距離為 L 。(圖 153)，則此兩點可以一種坡度連接之，設此坡度為 S ，則 $S = \frac{H}{L}$ ，稱為“單純坡度”，此種坡度可為有害坡度或無害坡度。但實際上、在較大距離中，此種單純坡度不易成立，多半為數種坡度以成折綫，而連接 A, B 兩點。假使實際折綫坡度上列車通行所作之功，較用單純坡度時為大，則有遺失坡度發生；如較小，則即使有反向下坡，亦無遺失坡度。

茲假設 AB 為直綫，試就其單純坡度為有害坡度及無害坡度兩

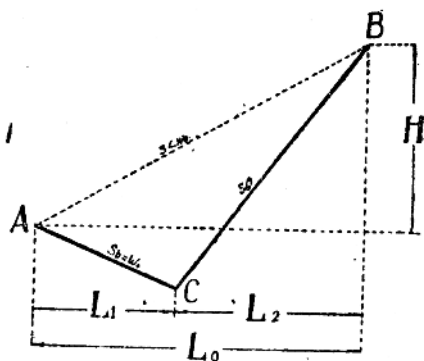


圖 153

種情形，作理論之分析。

先假定 AB 間單純坡度 S 為無害坡度 ($s \leq \omega_0$)；又 AB 間 s 坡度綫，代以折綫 ACB，且為充分利用挽力計，在最大坡度（即限制坡度）CB 之下，配以反向使軔極

限坡度 $S_b = \omega_0$ ，列車循 AB 上駛時，機車所完成之功為：

$$A_0 = (\omega_0 + S) Q L_0 = \omega_0 Q L_0 + QH = (\omega_0 L_0 + H) Q.$$

列車沿 ACB 上駛，機車所完成之功則為：

$$A = (\omega_0 + S_0) L_2 Q.$$

因為列車在 AC 段下駛，機車所作之功為零。但按圖可知：

$$H = S_0 L_2 - S_b L_1 = S_0 L_2 - \omega_0 L_1,$$

$$\begin{aligned} \text{則得 } A_0 &= (\omega_0 L_0 + H) Q = (\omega_0 L_0 + S_0 L_2 - \omega_0 L_1) Q \\ &= [\omega_0 (L_0 - L_1) + S_0 L_2] Q = (\omega_0 L_2 + S_0 L_2) Q \\ &= (\omega_0 + S_0) L_2 Q, \end{aligned}$$

故知 $A_0 = A$ 。

即謂列車沿 AB 直綫或 ACB 折綫上駛，機車完成之功不變，而 AC 下坡（即無害極限下坡），不使遺失坡度發生也。

列車沿 BA 直綫向下駛時，機車所作之功為：

$$A_0 = (\omega_0 - S) Q L_0$$

列車沿 BCA 折綫下駛時，機車所作之功則爲：

$$A = [(\omega_0 - S_0) L_2 + (\omega_0 + S_b) L_1] Q.$$

因 $S_0 > S$ ，且 $S_0 \leq \omega_0$ ；故 $(\omega_0 - S_0) L_2$ 不等於零即等於負數；意即在 BC 下坡，機車所作之功爲零。自 B 經 C 至 A，機車完成之功則爲（因 $S_b = \omega_0$ ）：

$$A = 2 \omega_0 Q L_1$$

如在此種情形下，不應有遺失坡度發生，則應爲

$$A_0 = A.$$

$$\text{即} \quad Q (\omega_0 - S) L_0 = 2 \omega_0 L_1 Q,$$

$$\text{或} \quad (\omega_0 - S) L_0 = 2 \omega_0 L_1,$$

$$\text{亦即} \quad \omega_0 L_0 - H = 2 \omega_0 L_1,$$

$$\text{但} \quad H = S_0 L_2 - \omega_0 L_1,$$

$$\text{故得} \quad \omega_0 L_0 - S_0 L_2 + \omega_0 L_1 = 2 \omega_0 L_1,$$

$$\text{或即} \quad S_0 = \omega_0.$$

可知在此種條件下，如欲不使遺失坡度存在，必須除去有害下坡。

再假定 AB 間單純坡度爲有害坡度，即 $S > \omega_0$ 。

列車向上行駛，機車所作之功與前述無害坡度中者相同；即謂列車自 A 沿單純坡度至 B，與沿折綫 ACB 至 B，機車所作之功相同。列車自 B 向下駛行至 A，沿 BA 直綫爲有害坡度時，機車所作之功爲零。經過 C 點，沿折綫 BCA 而行時，只在折綫中皆爲有害下坡之條件下，機車所作之功爲零（圖 154）。

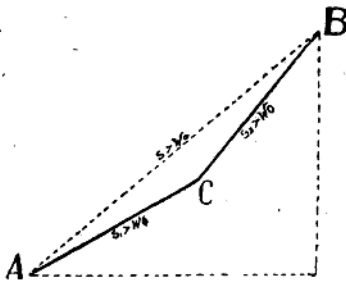


圖 154

由此可知，路線所有坡度皆為無害坡度時，不論其方向如何，皆無遺失坡度發生，以妨損鐵路挽力之運用。或有有害坡度，但其方向相同，挽力費用亦不因之加多，亦無遺失坡度存在。此在路線計劃中，為一重要原則。遠在1883年時，

郎哈特即曾發表此原則，惟所據理論稍異於此耳。尤應注意者，平原鐵路，不必用有害下坡；故遺失坡度，因之避免。山地鐵路，時須將路線展長，以克服巨大的高度差，且不超出限制坡度；遺失坡度絕對不可存在，以避免升高之損失；此在設計時甚為重要(Launhardt Theorie des Trassierens, 1888年版，論此問題)。實際上機車汽力，不能恰好按照時時變化之坡度（山地尤然）的需要而變化，僅避免遺失坡度尚嫌不足，故須盡量在一段路線中採用單純坡度（限制坡度 S_0 ）。

闢坡 前曾述及，在短距離間，可採用大於限制坡度之超強坡度，列車經行時，即利用所具高速度之動能以克服此超強坡度。此種坡度在德奧稱為“闢坡”(Anlaufsteigung)，在美國稱為“速度坡”(momentum grade)。英法無專用名辭，稱之為“用動能以克服之坡度”。

設路線機車挽力按照限制坡度 S_0 (圖155) 而設計，坡度 S_0 之間，加有 l_1 一段，其坡度為 $S_1 > S_0$ ，是為闢坡；須升高度為 h_1 。列車在闢坡腳底時速度為 v_1 公尺/秒；達到坡頂後尚須具有速度 v_0 。

公尺 / 秒。其間足以利用而協助機車挽力之動能爲：

$$K = \frac{m v_1^2}{2} - \frac{m v_0^2}{2}$$

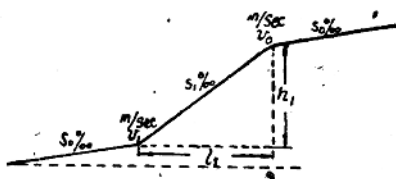


圖 155

$$= \frac{1000 \cdot Q}{2g} \left[(v_1 \text{ 公尺/秒})^2 - (v_0 \text{ 公尺/秒})^2 \right]$$

$$\text{或約計爲: } K = 4Q \left[(V_1 \text{ 公里/小時})^2 - (V_0 \text{ 公里/小時})^2 \right]$$

在超強坡度上，列車所需要之挽力，亦即機車所不能供應之挽力爲：

$$Z_1 = Q(\omega'_0 + S_1),$$

而列車在坡底之機車挽力則爲：

$$Z_0 = Q(\omega_0 + S_0);$$

超強坡度上之行駛速度雖稍減而 ω'_0 之數值較 ω_0 略低，但假定 $\omega'_0 = \omega_0$ 亦無不可，故列車越過此超強上坡時，所需超過挽力之力應爲：

$$Z_1 - Z_0 = Q(S_1 - S_0).$$

此力必須由動能補充，故應有下式：

$$L_1 Q(S_1 - S_0) = 4Q(V_1^2 - V_0^2).$$

由此可得闔坡長度爲：

$$L_1 = 4 \times \frac{V_1^2 - V_0^2}{S_1 - S_0} \text{ 公尺。}$$

闔坡坡度數值爲：