



如何選擇輸油管線的直徑

丁明星

管線直徑的選擇是管線設計中的主要步驟之一。管線直徑的大小是影響輸油設備的投資與操作費的最主要因素。倘直徑過大，不但浪費材料，且浪費建造費用。倘直徑過小，即因摩阻損失太大，必須用大量動力始能輸油。因此，為經濟問題着想，務須慎重考慮以選擇最適宜的直徑，亦則最合乎經濟條件的直徑，以下簡稱經濟直徑。影響管線經濟直徑選擇的因素甚多，例如管子價格，建造費用，輸油所需動力，保養及操作費等等，其間關係複雜，因而過去多數設計者認為直接計算經濟直徑殆不可能，而多用比價法得之。

比價法

其法係假定種種不同直徑的管線，個別估計其投資及操作費後，列表比較，而視其中最經濟者為最適宜的直徑。茲將此種比價法之一例示於表(一)，由表上之數字觀之，即知採用十六吋管最經濟。但此法至少須假定三種以上的直徑，分別估計其各

費用，既煩複又遲緩，費時費工，不甚理想。依此例而言，倘屬僚倖簡單，倘使十二吋管或二十四吋管之費用較低，即必須追加鄰近之十吋管或二十四吋管之估計，再與其比價始可。

(表1) 原油管線，輸油量50,000 BBL/H，
管線總長 500 哩油之比重 API 37。
油之粘度 SUS 75

管線直徑	12"	16"	20"
所需總壓力	6,000 psi	2,000 psi	700 psi
泵房數目	5	2	1
管線投資	\$12,000,000	\$16,000,000	\$22,400,000
泵房投資	5,550,000	2,100,000	1,000,000
總投資	\$17,550,000	\$18,100,000	\$23,400,000
薪水、工資	\$ 247,000	\$ 127,000	\$ 87,000
燃料及滑油	240,000	80,000	28,000
保養費	199,000	146,000	129,000

管線拆舊3%	360,000	480,000	672,000
泵房拆舊4%	220,000	84,000	40,000
相 稅1%	175,000	181,000	234,000
總操作費	\$ 1,441,000	\$ 1,098,000	\$ 1,190,000
每種操作費	\$ 0.079	\$ 0.060	\$ 0.065

新簡捷計算法

為求設計方法之簡化，現有多數學者研究用圖表或用計算法來求經濟直徑。最近美國菲立普石油公司的兩位工程師發表一種相當有趣的簡捷計算法，只須用一個簡單的公式，便可直接算出欲輸送任何所需油量時，投資最低的管線直徑。茲將該公式介紹於後。

有關輸油管線之投資可分為管線的投資和泵房設備的投資兩大部分，即如下列一般性公式所示。

$$I = [C_1(D) + C_2(HP)]L \dots (1)$$

式中 I 為總投資額，\$

C_1 為單位管線建造費，\$/吋內徑/哩長

D 為管子內徑，吋

C_2 為單位泵房設備費，\$/馬力

HP 為所需馬力容量，馬力/哩

L 為管線總長，哩

但這裡應附帶說明，可能有某種與管子直徑及管子長度無關之固定費用，未列入公式，因其與管線直徑及管線長度之大小無關，則對公式所求結果並無影響，故無須列入於公式。式中 C_1 之值，或得自過去之經驗資料，或就各種不同直徑之管線個別估計其建造費而取其平均值。

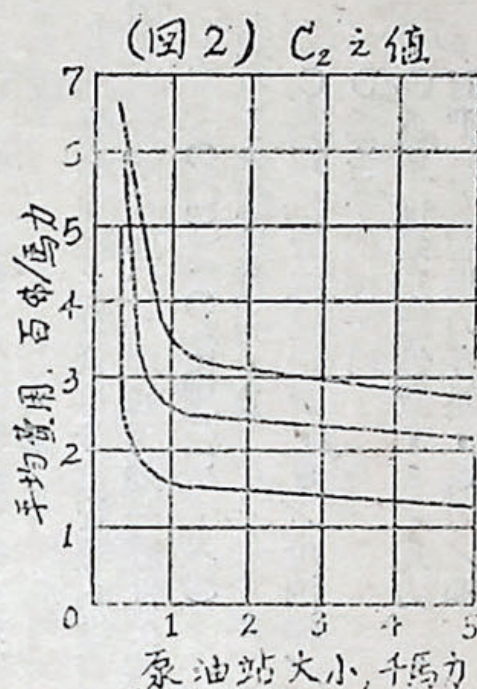
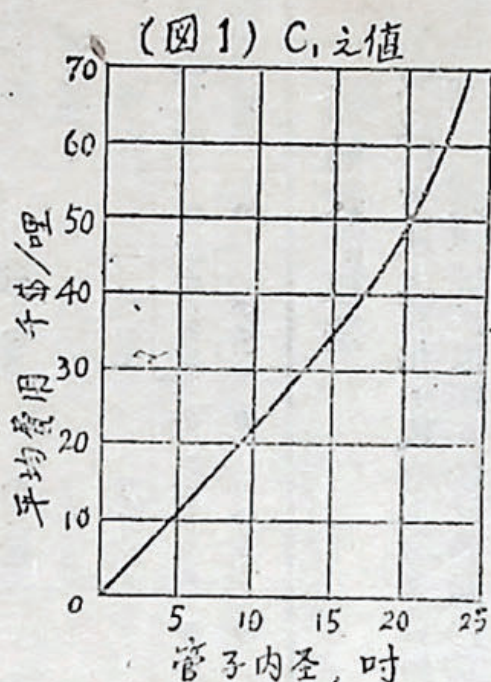
圖(一)示地下管線建造費估計表之一例，俾用於決定 C_1 之值，其估計包括管子，包裹及塗料，開路，搬運，挖溝，套管，過河，勘測，檢查等等各種費用。 C_2 之值與原動力之種類及泵站之馬力大小有關。茲將其較普遍之估計示於圖(二)。每哩管線所需輸油馬力可由下式示之。

$$HP = 0.0001701 PQ/n \dots (2)$$

式中：P 為管線每哩輸油所需壓力，PSI / 哩

Q 為流量，BBL / 日 n 為泵浦效率

管線輸油所需壓力，等於管線摩阻壓力降與由於地勢高低而生之靜壓力之和，地勢高低所生之靜壓力，或正或負，視輸油起點與終點孰高孰低而定。如兩地居於同一水平面時，無靜壓力存在，則輸油所需之壓力，等於管線之摩阻壓力降，下文所介紹求



管線經濟直徑的公式乃是基於此一假定而導誘者。
(2) 式中之 P 值須用流量公式求之。

各種流量公式

關於管線輸油所需壓力的問題，美國石油協會中專事研究水力學的小組委員會歷年努力探求的結果，曾發表過各種流量公式，由此等流量公式即可求出管線摩阻壓力降。茲將其中較著名者列舉如左。

公式名稱 油 別 公 式

笛阿西—威爾拔 (D'Arcy-Weisbach) 原 油 $Q = 4.064 \frac{D^{2.5} P^{0.5}}{S^{0.5} \mu^{0.5}}$

哈普—威廉士 (Hazen-Williams) 成 品 油 $Q = 0.148 \frac{D^{2.63} P^{0.51} C}{S^{0.51}}$

米拉士 (Miller's) 成 品 油 $Q = 4.06 \frac{D^{2.5} P^{0.5}}{S^{0.5}} I^{\frac{1}{2}}$

$$\left(\frac{D^{3.5} P}{\mu^2} + 4.35 \right)$$

梯兒，歐得 (T. R. Aude) 成 品 油 $Q = 20.9 \frac{D^{2.66} P^{0.552} K}{S^{0.418} \mu^{0.101}}$

服務管線 (Service Pipe Line) 原 油 $Q = \frac{18 P^{0.572} D^{2.716}}{V^{0.111} S^{0.572}}$

式中 Q 為流量， B/H N_R 為雷諾數

D 為管內徑，吋 μ 為絕對粘度， $C \cdot P$

f 為笛氏摩阻係數 K 為梯氏摩阻係數

e 爲管壁節瘤高，吋 P 爲壓力降，PSI
／哩。(Tuberculation)

V 爲動力粘度，CS S 爲流體的比重

C 爲哈氏摩阻係數

上列公式之中，笛氏公式之適用範圍最廣，富於變通性，故在水力學上多採用之。其摩阻係數 f，可得自考普律克—壞特之方程式：

(Colebrook-white)

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = \frac{1}{-2 \log_{10} \left(\frac{e}{3.7D} + \frac{2.51}{N_R \sqrt{f}} \right)}$$

$$\text{但 } N_R = \frac{92.24 Q}{D V}$$

用考普律克式求 f 之值，計算相當煩複，不能直捷求出。爲免計算之煩，另備圖表，即可簡易得知 f 之值。

茲因篇幅所限僅將圖表上之若干數字摘錄如下

管線	N _R					
	3,000	10 ⁴	15,000	10 ⁵	10 ⁶	10 ⁷
6"	0.045	0.032	0.0213	0.0195	0.0160	0.0152
8"	0.045	0.032	0.0212	0.0194	0.0155	0.0143

12"	0.045	0.032	0.0211	0.0192	0.0144	0.0132
24"	0.045	0.032	0.0210	0.0190	0.0136	0.0122

(圖表根據考普律克方程式而 e=0.0018")

考普律克式中之 e 值，據專家之意見，普通商場上的管子應視爲略等於 0.0018 吋。

哈善氏公式原爲水公式，被修改而用於成品油管線之計算，且被多數公司採用，但因其不包含粘度因數之故，應用範圍多少有限。米拉士公式亦有至少一個以上的大公司採用之，並謂可得相當滿意的結果，但計算需借助於圖表。梯氏公式至少有三個以上的公司採用之，據梯氏稱，該公式資料得之於 6" 及 8" 成品油管之實驗，如應用於其他管線須稍審慎。服務管線公式相當普遍，此式爲笛氏公式之變形者，笛氏之 f 在雷諾數三千至十萬之間約等於 0.3305/N_R^{0.252}，而 N_R = 92.24 Q/DV，將此值代入笛氏公式乃成爲服務管線公式。上述諸式之外，尚有各公司自訂之特殊經驗公式多種，恕不贅述。

公式的導誘

依笛氏公式，壓力降 $P = 0.06054 Q^2 S / D^5 - (3)$ 而壓力降對泵浦所需馬力之關係即如前述之 (2) 式，將 (2) 式代入原公式 (1) 成爲 $I = [C_1(D) + C_2(0.00001701$

$PQ/\eta)L$.

復將(3)式代入上式，即成爲。

$$I = [C_1(D) + C_2(0.000001030 \frac{Q^3 Sf}{D_p})]L \dots (4)$$

欲求最低投資的直徑 D ，即按最大值與最小值之原理，(4)式之第一次微分須等於零，則如下式，

$$\frac{dI}{dD} = [C_1 + C_2(-0.000005150 \frac{Q^3 Sf}{D^6 \eta})]L = 0 \dots (5)$$

$$\text{由(5)式求 } D, D = [0.000005150 \frac{Q^3 Sf}{C_1 \eta}]^{\frac{1}{5}}$$

設 $C = C_2/C_1$ 則 $D = 0.131 Q^{0.2} (Sf/\eta)^{0.167} \dots (6)$

(4)式之第二次微分結果爲正(+)的解答，則證明，由(6)式所得之 D 值乃是使 1 之值成爲最小的 D 值，換言之，即用(6)式可直接地算出投資額最低的管線的直徑。

(6)式係基於笛氏公式，如基於哈普氏公式即如下式。

$$D = 0.368 Q^{0.186} (Sf/\eta)^{0.170} C^{0.316} \dots (7)$$

如基於梯，兒氏公式即如下式

$$D = 0.0177 Q^{0.183} S^{0.110} (C/\eta)^{0.172} p^{0.0323} [K^{0.311} \dots (8)$$

如基於服務管線公式即

$$D = 0.0806 Q^{0.173} (Sf/\eta)^{0.171} V^{0.0133} \eta \dots (9)$$

上列(6)，(7)，(8)，(9)各公式均爲求最低投資直

徑之公式，但各基於各種不同之流量公式。

最適宜的直徑

最合乎經濟原則的直徑，乃是最適宜的直徑，而管線之經濟意義包括其最初投資，壽命，及其養護費與操作費等等。但上述之公式祇考慮最初投資(建造費)而未顧及其他各項有關之經濟因素。這一問題，祇要將 C_1 及 C_2 之值，加以適當之調節即可補救。其調節法乃是將該管線在預期壽命內之每年操作費，拆成現值之總和(以 $\$/\text{吋}$ 內徑/哩長爲單位)計入 C_1 之內，復將同一期間內泵站之每年操作費的現值之總和(以 $\$/\text{HP}$ 爲單位)計入 C_2 之內。其意即將未來的操作費換算成現時的價值(扣除未來的利息)而視同投資之一部份。將 C_1 及 C_2 之值，如此加以修正後代入公式，即可求出所謂最適宜的直徑。然後由管子規範內擇其內徑最接近於公式計算所得之直徑而較大者，譬如計算結果爲十四吋八吋的直徑，則介於規範的十四吋管與十六吋管之間，應採用十六吋管。其理由甚明顯，因直徑較大者操作費較低，且將來如遇需要增加流量時更加有利。以上所討論的是關於長途輸油管的直徑選擇問題。至於其他各種短途管線，例如油槽區內或碼頭等管線，其直徑選擇法與前者稍有差別，茲略述於

後。

成品油分配管線與油輪裝卸油管線。

通常由煉油廠輸出的成品油經由一主管 (Trunk line)，中途分出多數支管，經各配油站 (Delivery station) 進入各收油油槽，這些支管，稱為成品油分配管線 (Product delivery line)。

最近數年來成品油管線之設計與操作，經過了相當的變化，其大致的趨勢是採用較大直徑的管線以增加輸油能量，同時亦考慮到事後遇有需要時，還可以增建中間泵房，以增加流量。在港口輸油站的油輪裝卸油管線也有相同之情形。近來油料的海運一直有採用大船的趨勢，因之，油輪的裝卸油速度也必須隨之增加，以免使大油輪的停泊時間拖延太久，同時大船的吃水深，不便靠淺水碼頭，因之，乃有離岸海底管線之創設，而解決了淺水碼頭輸油站的困難。從經濟觀點來說，設計這種可使大油輪進港卸油的海底管線，多半是有利的。鑑於上述的趨勢，設計成品油分配管線與油輪裝卸油管線時，必須考慮到將來或有需要增加流量的可能性，而留有提高輸油壓力的餘地。過去建造這種管線，似有直徑過小之弊，致使事後遇需要時往往無法增加流量，不得不將原有管線拆除而改裝直徑較大的

管線，其原因或許由於大直徑的凡面及其他配件之價昂，或許收油者對於卸油設備之能量不詳悉所致。

管線的形態

成品油分配管線可分為兩段，自配油站至油槽區分歧管 (Tank farm manifold) 為第一段，油槽區分歧管至各油槽為第二段。油輪卸油管線，與前者相似，亦可分為兩段，自油輪至油槽區分歧管為第一段，油槽區分歧管至各油槽為第二段。通常兩段管線的直徑不同，良好設計的關鍵在於兩段直徑的組合相宜與否。

設計所需資料

為使問題易於明瞭起見，茲於介紹公式之前，先舉出設計上有關的幾項因素略加說明如左。

1. 最大背壓……由船上泵浦泵出之油，或由成品油主管線分出之油，以最大能量流經管線，進入油槽時，為克服管線中的摩擦阻礙及油槽液面高所需壓力，謂之最大背壓，此時船上泵浦出口壓力應等於或稍高於最大背壓，成品油分配管線的起點壓力亦應如此。因船上卸油泵浦通常多係低壓泵浦，蛇管之耐受壓力有限，成品油主管線之輸油

壓力在管線中各處高低不同，不能使管線中壓力一路維持高壓，尤其接近中間泵浦之進口側部份或接近管線終點部份壓力特低，因之，設計成品油分配管線與油輪裝卸油管線時，最大背壓通常均定為四十五 PSI (包括油槽液面高度在內)。

2，管線最大輸油能量，則管線能容許之最大輸油速度之意，以 BBL/hr 為單位。

3，油輪最大卸油能量，亦即船上泵浦的最高泵油速度。每艘油輪的卸油能量不同，應以其中最大者為根據。

4，船上泵浦或配油站與收油油槽間之距離及雙方之液面差。距離遠即壓力降大，液面差成為靜壓力，均與最大背壓有關。

5，所泵油料之物理性質，如比重，粘度等。
6，建造管線與建築分歧管或配油站等之經濟。

上列六項資料齊備後，便可着手設計。收油公司於設計油槽管線與配油管線時，應擬定該管線的最大配油速度，並如認為必要時，為將來保留一些能添加中間泵房以增加配油速度的餘地。在港口輸油站設計油輪裝卸油管線時，應使該管線適合於最大油輪於最短時間內卸油時的最大流量，在這種高

泵油速度之上，油槽區分歧管與油槽間如有一小段小直徑管，便足以嚴重地阻滯卸油速度，故選擇管線的直徑，非常審慎不可。

求適當直徑的公式

成品油分配管線與油輪卸油管線，如前述可分為第一段與第二段，兩者情形酷似，故其設計方法亦相似，可用同一公式，同一方法求其各段之適當的直徑。唯一不同之點為前者通常基於最輕的汽油之最大流量設計，而後者即基於最重的油設計。第一段與第二段之直徑，可用下列公式衡量而斟酌經濟情形決定之。

$$P = (L_1 K_1 + L_2 K_2) (Q/C)^{1/0.54} \dots (1)$$

$$K = S(162.04/D^{2.63})^{1/0.54} \dots (2)$$

$$P = P_1 + P_2 \dots (3)$$

式中 P 為管線摩阻壓力降；PSI

Q 為流量； BBL/hr

L_1, L_2 各為第一段管，第二段管之長度；哩

K_1, K_2 各為第一段管，第二段管之 K 因數

S 為油的比重， D 為管線內徑；吋

C 為哈普氏摩阻係數，普通以新管線輸送汽油時，約為一四〇，輸送柴油時約為一二

五。

P_E 為配油站或船上泵浦出口之最大背壓； P

SI

P_s 為雙方液面差之靜壓力； PSI

成品油分配管線與油輪卸油管線的最大背壓 P_b 均以最高四十五 PSI 計。經過配油站的過濾器流量計時有相當大的摩阻損失，為免配油速度的遲滯，此項壓力降，普通須預計為三十 PSI 上下。第二段管線長度 L_2 應根據最遠的油槽計。如管線較長而彎管及凡而等附件甚少者，附件的摩阻損失多可忽略。但如油槽區分歧管包含多數九十度彎頭及其他附件者，其摩阻壓力降亦相當可觀，尤以高速輸油時為甚，故必須加算其摩阻損失。

各種附件之摩阻損失可概算如下，每一個彎頭的摩阻損失約相當於該管直徑之十二倍長直管的摩阻損失，例如五吋彎頭的摩阻損失約等於五呎長之五吋管的摩阻損失。每一個凡而約相當於該管直徑之六倍長直管，例如八吋凡而約相當於四呎長之八吋管。

上列公式有二個未知數 K_1 與 K_2 ，故應用上列公式尚不能直截了當地求出兩段管線的適當直徑，計算時須先假定一方，代入公式來求另一方，通常多

先假定第二段的直徑，用 2 式求 K_2 ，代入 1 式求 K_1 ，然後再用 2 式求第一段的直徑，如是可任意假定第二段的直徑以得出各種不同的組合，但這兩段直徑應如何組合為宜，還須由經濟條件來決定。故應就各種組合方式，估計其建造費而擇其中建造費最省者便是合乎理想的直徑了。

公式的導誘

在成品油管線，如所輸送之油類中最重而最粘的油為第二號柴油機燃料時，（依美國石油產品規範，第二號柴油機燃料之比重為 API 二十六，粘度在華氏一百度時，為 SUS 四十以下）普通多採用哈善，威廉士之公式。上列公式實係哈善氏公式之變形而已。其演變經過如左，依哈善氏公式：

$$C = \frac{162.04 Q S^{0.81}}{P_0^{0.81} D^{2.68}} \quad \text{或} \quad P_0^{0.81} = \frac{162.04 Q S^{0.81}}{C D^{2.68}}$$

$$\therefore P = S (162.04 / D^{2.68})^{1/0.81} \times (Q/C)^{1/0.81}$$

式中各字母所代表者，除 P 為單位壓力降； PSI 哩之外，餘均與上文之公式相同。於任何既定直徑的管子，和既定比重的油之下， $S (162.04 / D^{2.68})^{1/0.81}$ 之值成為定數，故以 K 代之，即 $P = K (Q/C^{0.81})^{1/0.81}$

式中之 P 為單位壓力降，如將 P 改為管線總壓

力降，即 $P = KL(Q/C)^{1/0.54}$
 如管線是由於直徑不相同之兩段管線組成者，
 即總壓力降 P 應為兩段管線壓力降之和，

$$\text{故 } P = L_1 K_1 (Q/C)^{1/0.54} + L_2 K_2 (Q/C)^{1/0.54}$$

結 論

輸油管線在一般人的心目中也許是極為簡單的裝置，無甚稀奇。其實不然，每一條管線都可謂工程師們耗費心血的結晶。一條新的管線，須經過慎重的考慮，周詳的計畫，嚴密的設計，徹底的現場勘查，浩大的工程之後，始能產生。良好的設計，能將該管線的建造費及事後的操作費與維護費，節省至最低限度，且能保證操作的順利，安全及久長的壽命。因之無數學者與工程師等，無日不在埋頭苦幹，研鑽如何改良管線，如何防止管線的腐蝕，如何簡捷而合理的方法設計理想的管線。故年年有新的發現，新的創意。世界上開始用油管輸油以來雖僅有短短數十年的歷史，但其間由絲口接頭而進為電焊連接，由搭焊管而無縫鋼管，由 6", 8" 小管而 24", 30" 大管，由人工敷設而機械敷設，各色各樣的管線用特殊機械不勝枚舉，其發展之迅速堪稱空前。管線設計方面也有顯著的進步。水力學專家不斷地在研究或實驗流體在油管内流動的現象而

陸續發表其研究的成果，並制訂各種流量公式，作為精確設計的依據，關於選擇管線的直徑一項，亦必定有人繼續研究而尋找更簡便，更完善的方法。本文資料，多半採自最近的刊物，倘能藉以引起諸位同仁對於油管的興趣而收拋磚引玉之效，即為譯者無上的榮耀。

參 考 文 獻

- Pipe Line Construction & Maintenance
 Oil & Gas Journal, Sep. 21, 1953
 Petroleum Engineer (Reference Annual,
 1954)

(文接第五十一頁)

計劃或預測油管系統操作性能時，係使用自公認的流量計算公式所得的結果，製作流量變化參考圖；但是，由於理論數據與實際間往往存在的差異，以及各處輸油管系各有不同的操作特性之關係；在實施調度操作的時候，對於各種油料流量變化的數據，應該就管系操作的實際結果，分別予以修正然後使用，冀能完全符合事實的要求。