

船舶「逼近情勢」的計算方法

A method to compute the close-quarters situation of ships

羅逢源*

Low, Fong-Yuan

摘要

逼近情勢為船舶碰撞的前置狀態，船舶避碰，首先就要避免形成逼近情勢。本文在船舶操縱性的基礎上，以迴轉圈為架構，提出所謂「逼近距離 CQA」及「逼近距離時間 TCQA」的概念及其數學處理方法。CQA 及 TCQA 可以明確的指出一船的逼近情勢時空點，依本文之 CQA 計算方法及模擬結果顯示，本法可量化處理及研判「逼近情勢」。

關鍵詞：船舶碰撞、逼近情勢、逼近距離、迴轉圈

www.safetysea.org

Abstract

The close-quarters situation is the presage of ships collision. To prevent the collision is to preclude the close-quarters situation. A concept of CQA (Close-Quarters Approaching) and TCPA (Time of CQA) with a mathematics processing method on the basis of ship manoeuvrability and turning circle are introduced in this paper. It can explicit point out own ship's position of the close-quarters situation by the CQA and TCQA. With some calculating and simulation examples, the CQA method is examined and helpful for the navigator to quantify and evaluate the situation of close-quarters.

Keywords: Ship collision, Close-quarters situation, Close-quarters approaching, Turning circle

一、逼近情勢的意義

* 羅逢源 Low, Fong-Yuan，退休航海教師(曾任教台北海洋技術學院)，e-mail: low_fongyuan@yahoo.com.tw。

「Close-Quarters」一詞最早約起源於 17 世紀的海戰，當兩船接近到可以搭上跳板跳到對方的船上捉對廝殺之情況，稱 Close-Quarters。以後在軍事上引伸為雙方近身到能進行「肉搏戰」時，即名為「Close-Quarters Combat」¹。因此在航海上，當兩船之距離接近到不可避免的會進行「肉搏戰」(碰撞)時，就叫「Close-Quarters Situation」，中文稱為「逼近情勢」或「緊迫局面」。

國際海上避碰規則 第 19 條 第 4 款：「一船僅在雷達上發現他船時，應即研判是否可能發展成逼近情勢及(或)有碰撞危機之存在，如有此可能，應及早採取避碰措施。……」

亦即「逼近情勢」為船舶碰撞的前置條件。「逼近情勢」與船舶碰撞的關係如圖一：有碰撞危機(CPA=0)的兩船，在形成「逼近情勢」後再採取任何避碰措施，也躲開不了碰撞的結果；而對無碰撞危機的兩船，若形成「逼近情勢」，則有可能因任一船的疏失或機器故障發生碰撞。

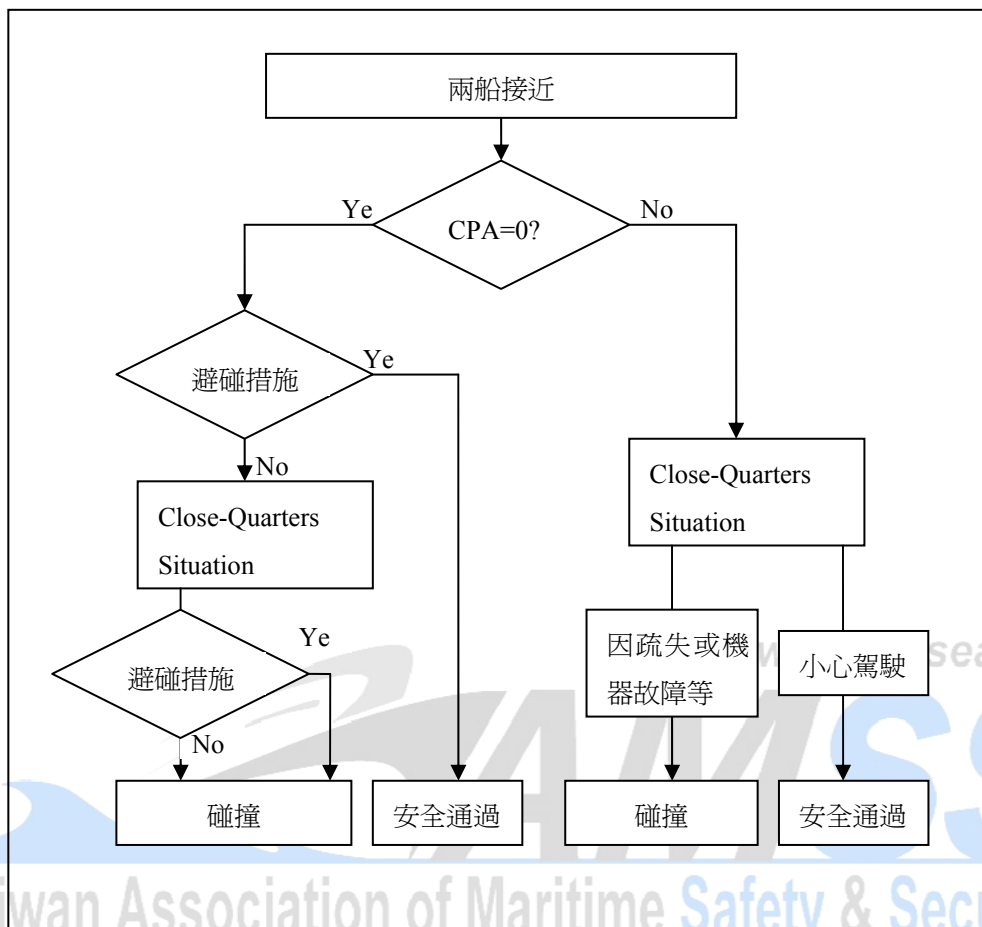
在澳洲大堡礁的內航道(The inner route of the Great Barrier Reef)，航道寬約 1.5~2 浬，兩艘皆有引水人領航的散裝船，以 14.32kts 及 14.06kts 船速進行追越，兩船最接近時約為 150m，雖然沒有發生事故(Accident)，但事後提出的調查報告，認為這是一起「Close-quarters situations」事件(Incident)，追越船實在沒有必要在進行超越時接近到如此近的距離，而在狹窄航道的追越情形下，被追越船應減低船速，讓追越船儘快追過，雙方都應意識到有可能因舵機或主機故障，而形成碰撞事故的危機²。

在英法間的多佛海峽(Dover Strait)，A 船(ro-ro ferry/21kts/35923GT)與右舷來向的 B(container/21kts/17189GT)、C(VLCC/16kts/160934GT)兩船(B、C 兩船為追越形勢)交叉相遇，在當班二副的疏忽下未及早採取讓路船(give-way vessel)應進行的避讓措施，最後 A 船驚險的在兩船的中間穿過，最近距離分別為 0.3 及 0.1 浬，顯然這是在無碰撞危機的情況下 A 船才有可能這麼幸運；當時在 Close-quarters 的緊迫局面下，二副已經緊張的沒有發出正常的操舵舵令或航向命令給舵工，舵工是依自己的判斷及經驗操舵避船的³。

¹ The Phrase Finder, <http://www.phrases.org.uk/meanings/close-quarters.html> ; Wikipedia the free encyclopedia, Close Quarters Battle, <http://en.wikipedia.org/>, 2009.

² The Australian Transport Safety Bureau, Maritime Safety Investigation Report - Final Close quarters between Blossom Forever & Pearl Prosperity (Occurrence No.59)1994, http://atsb.gov.au/publications/investigation_reports/, 2009.

³ MAIB Report No.9/2007, Report on the investigation of the close-quarters situation between the ro-ro passenger ferry Maersk Dover the tanker Apollonia and the container vessel Maersk Vancouver in the Dover Strait on 17 October 2006, Marine Accident Investigation Branch, Southampton,U.K., 2007.



圖一、「逼近情勢」與船舶碰撞關係圖

一樁在中國東海洋面上發生的碰撞，當時大海上視界良好，四周也無其他船隻。A(container/22kts/74373GT)、B(container/15.3kts/6899GT)兩船以約 55°的航向交角交叉相遇，依事後的雷達測繪顯示 CPA 為 0.05 浬。兩船約接近至距離 0.2 浬時才互以滿舵緊急避讓，但還是發生擦撞。原因是因為避讓船的當值船副將兩船的相遇情況誤判，認為是追越情勢；更特殊的是：兩船使用 VHF 討論避碰行動，使用 AIS(Automatic Identification System)的自由信文功能要求他船避讓，而延誤了實際的避碰時機，最後在形成了逼近情勢後，不可避免的發生了碰撞⁴。

那什麼是「逼近情勢」？航員又如何研判是否形成了「逼近情勢」？在什麼距離與時間會形成「逼近情勢」？上述諸案中皆沒有說明。

⁴ MAIB Report No.17/2005, Report on the investigation of the collision between Hyundai Dominion and Sky Hope in the East China sea 21 June 2004, Marine Accident Investigation Branch, Southampton,U.K., 2005.

「逼近情勢」一直是個模糊籠統的概念，1960 年國際海上避碰規則中首度使用了這個名詞但沒有定義。1961 年在 Grepa-Verena ([1961] 2 Lloyds Rep. 127)一案中 Willmer 法官表達了對「逼近情勢」的看法：「逼近情勢之定義，目前並無定論。我的看法是：這(逼近情勢)是與當事船的大小(Size)、操縱特性(Characteristics)、船速(speed)有關的議題。」當時的學者認為：兩船 2~4 浬的距離就算是「逼近情勢」了⁵。

一種比較接近「逼近情勢」的說法為 1975 年提出的「船舶領域(Ship Domain)」概念⁶。船舶領域是該船周圍 360°方位內的有效水域。船舶駕駛員應將他船保持在該區域之外，是船舶保持航行安全所需水域。船舶領域可看作在避讓時，保證兩船安全駛過的最小距離，船舶領域邊界的尺度約為船長的數倍。參考文獻[5]即為以船舶領域為基礎的「緊迫局面數學模型」。

目前學者對「逼近情勢」的一般定義為：「是指當兩船接近到單憑一船的行動已不能導致在安全距離上駛過的局面⁷。」

對航海者而言，重要的是如何研判「逼近情勢」？行進中有碰撞危機的兩船有沒有一個研判「逼近情勢」的「時空點」及其處理方法？本文依照上述之定義，以本船為單一避讓船的觀點，所採取的行動不能導致在安全距離上駛過的局面下，在船舶操縱性的基礎上，以迴轉圈為架構，提出所謂「逼近距離」(CQA—Close Quarters of Approaching)及「逼近距離時間」(TCQA—Time of CQA)之概念，及數學處理方法如下。

二、逼近情勢的計算方法

首先定義所謂「逼近距離 CQA」為：本船開始施舵以右滿舵迴轉避讓他船，而在迴轉圈上與他船發生碰撞，此施舵點 O 與目標船 A 間之最大距離稱「逼近距離」，簡稱 CQA。「逼近距離時間」TCQA 即為 CQA 點的時間。

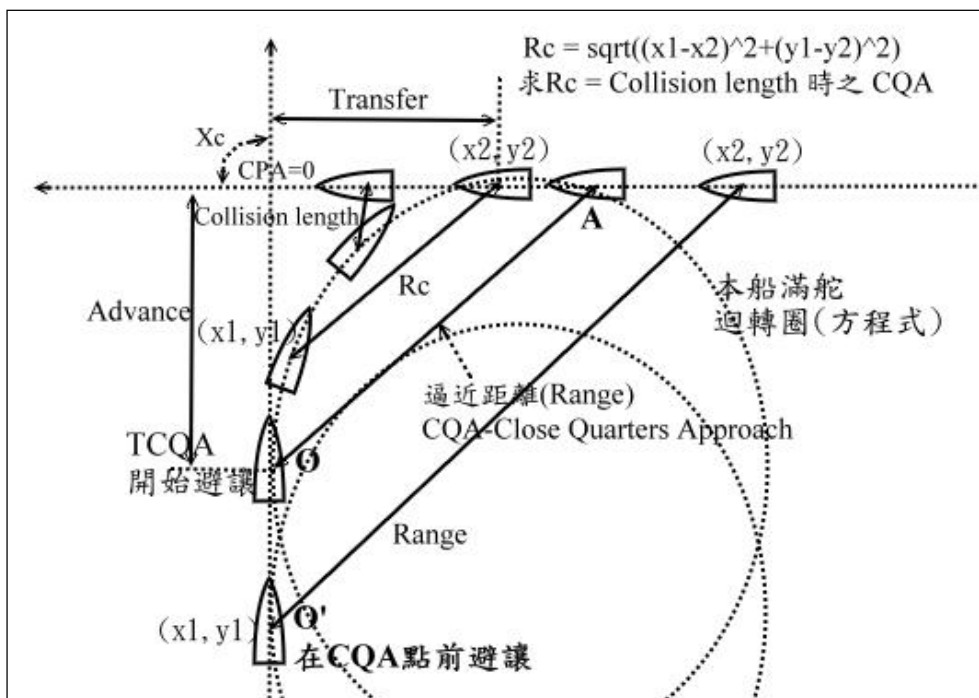
如圖二交叉相會之兩船有碰撞危機(CPA= 0)，本船為避讓船。本船於 O'點以右滿舵迴轉則可避開目標船，若遲至 O 點時再行迴轉避讓，則本船與目標船在迴轉圈上發生碰撞。此時 O 點與目標船 A 間之距離就稱為 CQA。

⁵ A.N. Cockcroft & J.N.F. Lameijer, A Guide to The Collision Avoidance Rules-- 5th ed., Butterworth-Heinemann Publishing Ltd., Oxford, 2001, pp114-143.

⁶ Goodwin, E. M. , "A Statistical Study of Ship Domain," Journal of Navigation, Vol. 28, 1975, pp. 328-344.

⁷ 吳兆麟，船舶避碰與值班，大連海事大學出版社，大連，1998，p43.

基本上這個定義是取自避碰規則第 17 條(直航船之措施)2 款：「不論任何原因，應保持航向及航速之船舶，發現本船已逼近(so close)至僅賴讓路船舶之單獨措施，不能避免碰撞時，應採取最有助於避免碰撞之措施。」



圖二、逼近距離(CQA)概念圖

求解 CQA 的方法：即為建立本船由 O 點開始施舵，在迴轉期間之本船與目標船間的距離(R_c)變化方程式，求解($R_c =$ 碰撞長度)時本船施舵點 O 之位置，則 O 點與目標船 A 之距離，即為 CQA 之解。依此求解 CQA 點的方法與步驟說明如下：

1. 建立本船的迴轉圈位置方程
2. 碰撞長度的處理
3. 求解逼近距離 CQA 方程
4. 求解逼近距離時間 TCQA 方程

以上求解 CQA 的方法又基於以下的假設：

1. 本船為避讓船，與目標船有碰撞危機($CPA=0$)，避碰行動為全速滿舵之右迴轉。直航船保持航向、航速。
2. 不考慮其他環境因素，如水流、風向、水深、航道、其他船舶等因素。

3. 不考慮安全距離，採取「碰撞長度」之觀念，即兩船堪由船尾擦過時的「臨界」碰撞狀態。
4. 由於縱距為船舶迴轉時的最大前進距離，因此迴轉 90° 為避碰行動有效果的範圍，所使用的迴轉時間也以 90° 的迴轉時間為止。

本節數學式中所用的符號請參閱文末之符號表。

1. 迴轉圈位置近似方程

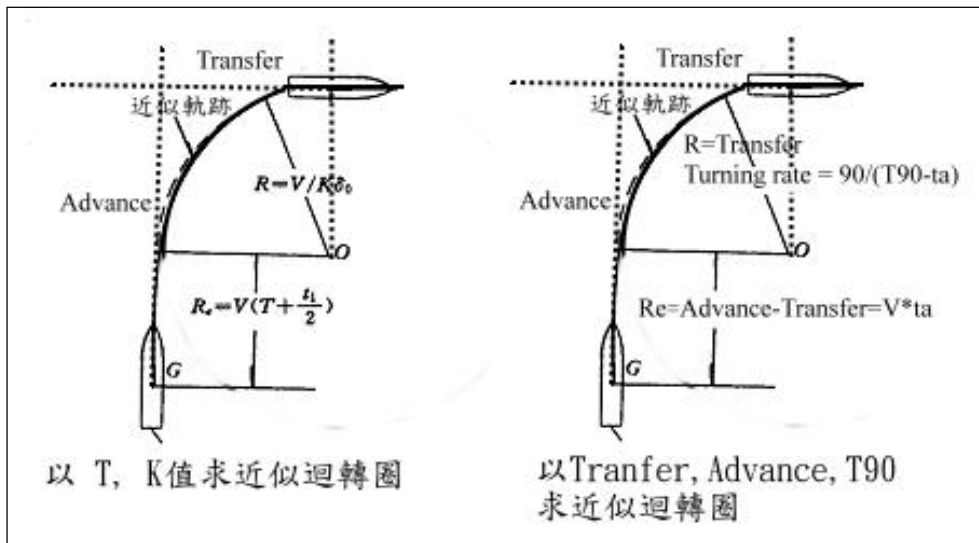
定速直航(一般為全速)的船舶操一定舵角(一般為滿舵)後，船舶將作迴轉運動，其重心所描繪的軌跡叫做迴轉圈。依 IMO(MSC.137(76)) 的規定，對船舶操縱性 (Maneuverability) 要求的標準如下：

適用船舶：傳統舵及軸推進系統 (shaft driven ships with conventional rudders) 船長 100m 以上之船舶，化學油品船及液化氣船則不限長度。

迴轉圈標準：於滿舵 (35°) 全速 (船舶全速之 90% 以上或主機最大輸出之 85% 以上)，其縱距 Advance 應小於 4.5 倍船長 (垂柱間長 L_{pp})，迴旋初徑 (tactical diameter) 應小於 5 倍船長。

停船性能：倒俚衝程 (track reach) 應小於 15 倍船長。

而每艘船的駕駛台上一定有該船的迴轉圈資料-- 駕駛台操縱性圖 (Wheelhouse Poster)-- 置於駕駛台顯著位置。其內容包括深水和淺水，滿載和壓載情況下船舶的迴轉圈軌跡圖及停船性能的試驗資料。迴轉圈資料即列有縱距、橫距及 90° 迴轉時間 (T90)。本文乃利用迴轉圈資料的 (縱距、橫距及 T90) 以建立迴轉圈位置的近似方程式。



圖三、迴轉圈軌跡近似法

理論上的迴轉圈軌跡，是以船舶的追隨性指數 T 及旋迴性指數 K 模擬及建立，如下式(本式的出處可參考文獻[3][4])：

$$Re + R = V(T + t_1 / 2) + V / K\delta_0 \quad (1)$$

式中：K 旋迴性指數(1/s)

T 追隨性指數(s)

V 迴轉時初速(m/s)

δ_0 所操舵角，單位為弧度

t_1 操舵時舵角由正舵至 δ_0 所需的時間(s)。

R 定常迴轉半徑

Re 心距(操舵點至產生舵效點之距離)

計算出 Re、R 後，即可近似地畫出該船之迴轉圈近似軌跡，如圖三之左圖。

上式中

$$Re + R = Advance$$

$$R = V / K\delta_0 = Transfer$$

$$Re = Ad - Tf$$

而 Re 心距仍是因操舵至舵角並產生舵效，需要有一段時間 $(T + t_1 / 2)$ ，可以 ta 近似之

$$ta = (T + t_1 / 2) = (Ad - Tf) / S1$$

$K\delta_0$ 為旋轉角速度，可以 $T90$ 及 t_a 近似之

$$K\delta_0 = H_t = 90^\circ / (T90 - t_a)$$

如此在迴轉時間 t 之本船位置 $(x1, y1)$ 可以下式的迴轉圈位置方程式，可以縱距 Ad 、橫距 Tf 及迴轉時間 $T90$ 近似之，如圖三之右圖。

$$x1(t) = Tf - Tf \times \cos(H_t \times (t - t_a))$$

$$y1(t) = S1 \times t_a + Tf \times \sin(H_t \times (t - t_a)) \quad \text{-----} \quad (2)$$

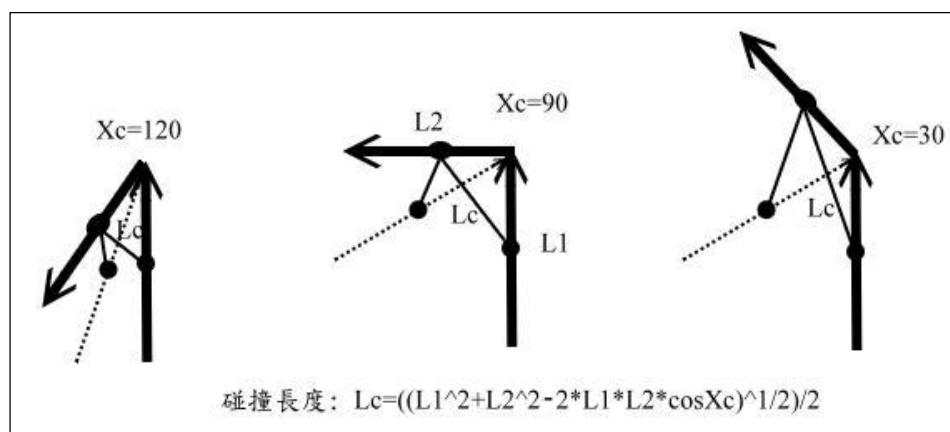
式中 $0 \leq t \leq T90$, If $t < t_a$ then $(t_a = t)$

If 敘述之意義為：在 $t < t_a$ 的情形下，船仍無舵效，船舶為直線前進。

2. 碰撞長度(Lc--Collision Length)

迴轉圈的軌跡為點座標，理論上為該船的重心位置，可視為船的中點，他船軌跡亦同。但在實體的船舶碰撞中，不可忽視碰撞兩船的實體空間，本文以較精細的觀點考慮兩船的長度(不考慮寬度)、交角及碰撞點，定義「碰撞長度」：

碰撞長度(Lc)：為碰撞時兩船中點的連線長，即 $Rc \leq Lc$ 時兩船碰撞。



圖四、不同交叉航向(Xc)上的碰撞長度 Lc

由於所求的 CQA 為最大 CQA，因此臨界的碰撞點必在目標船的尾部，於本船 $0^\circ \sim 90^\circ$ 的迴轉中，與目標船間的最大的「碰撞長度」，即為兩船碰撞交角為 Xc 之情況如圖四之實線，虛線為在迴轉圈上其他交角的碰撞。解如圖的 Lc 三角形，由餘弦定理可得：

$$L_c = (L_1^2 + L_2^2 - 2 \times L_1 \times L_2 \times \cos X_c)^{1/2} / 2 \quad 0 \leq X_c \leq 180 \quad (3)$$

表一、碰撞長度 L_c 表($L_1=200m, L_2=100m$)

X_c	0	20	40	60	80	90	100	120	140	160	180
L_c/m	150	148	142	132	119	112	104	87	70	56	50

依上式可得： $(L_1-L_2)/2 \leq L_c \leq (L_1+L_2)/2$ ，表一為取 $L_1=200m$ 、 $L_2=100m$ ，兩船在各 X_c 交角上的碰撞長度。

如目標船船長不明，實務上可依本船船長定一碰撞長度，再加一安全長度令：

$$L_c = \text{碰撞長度} + \text{安全長度}$$

以計算避碰時之 CQA。

3. 求解 CQA 方程

如圖二設本船在 O 點時，目標船：速率 S_2 ，航向交角 X_c ，距離為 CQA、相對方位為 B。則以本船開始施舵迴轉之位置點 O 為座標原點的目標船位置 $(x_2(0), y_2(0))$ 為：

$$\begin{aligned} x_2(0) &= CQA \times \sin(B) \\ y_2(0) &= CQA \times \cos(B) \end{aligned} \quad (4)$$

航行 t 時間後的目標船位置為：

$$\begin{aligned} x_2(t) &= x_2(0) - S_2 \times t \times \sin(X_c) = CQA \times \sin(B) - S_2 \times t \times \sin(X_c) \\ y_2(t) &= y_2(0) + S_2 \times t \times \cos(X_c) = CQA \times \cos(B) + S_2 \times t \times \cos(X_c) \end{aligned} \quad (5)$$

$$0 \leq t \leq T_{90}$$

本船的迴轉圈位置方程式如式(2)，由座標距離公式，可求在迴轉 t 時後的兩船距離 R_c 為：

$$R_c^2 = (x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2 \quad (6)$$

若 $R_c \leq L_c$ 則兩船發生碰撞，亦即「臨界」碰撞時兩船的距離為：

$$Lc^2 = (x1-x2)^2 + (y1-y2)^2 \quad (7)$$

將式(2)及式(5)代入上式展開整理之，以 CQA 為未知數，得如下之一元二次方程式：

$$A \times CQA^2 + B \times CQA + C = 0 \quad (8)$$

上式之系數 A, B, C 為：

$$A = 1 \quad (8-1)$$

$$B = 2 (Tf \times \sin(B) \times (\cos(H_t \times (t - t_a)) - 1) - S2 \times t \times \sin(B) \times \sin(X_c) - \cos(B) \times (S1 \times t_a + Tf \times \sin(H_t \times (t - t_a)) - S2 \times t \times \cos(X_c))) \quad (8-2)$$

$$C = 2Tf^2 \times (1 - \cos(H_t \times (t - t_a)) \times (Tf + S2 \times t \times \sin(X_c)) + (S2 \times t)^2 + S1 \times t_a \times (S1 \times t_a + 2Tf \times \sin(H_t \times (t - t_a))) - 2S2 \times t \times \cos(X_c) \times (S1 \times t_a + Tf \times \sin(H_t \times (t - t_a))) - Lc^2 \quad (8-3)$$

解式(8)一元二次方程式得

$$CQA = \frac{-B \pm \sqrt{B^2 - 4AC}}{2A} \quad (9)$$

上式之 $\frac{-B - \sqrt{B^2 - 4AC}}{2A}$ 不合，應取

$$CQA = \frac{-B + \sqrt{B^2 - 4AC}}{2A} \quad (9-1)$$

式中有一自變數 t，上式實應寫成 t 的函數

$$CQA(t) = \frac{-B + \sqrt{B^2 - 4AC}}{2A} \quad (10)$$

$$0 \leq t \leq T90, \quad \text{If } t < t_a \text{ then } (t_a = t)$$

(10)式的意義為在本船 90°迴轉圈中，與目標船距離等於 Lc 之所有 CQA，應取最大者，亦即(10)式應寫為下式：

$$CQA = \text{Max}[CQA(t)] \quad (11)$$

$$0 \leq t \leq T90, \quad \text{If } t < t_a \text{ then } (t_a = t)$$

求解(11)式，可採試算法以適當的時間間隔代入求解。以 VLCC 型的油輪而言，其 T90 的時間也約在 3min 左右，採 0.1min(6sec)的間隔已足夠求解。(若 $T90 \leq 1\text{min}$ 則時間間隔可採 0.05min)

式(11)求解 CQA 所需要的參數如下，計算時注意單位的配合::

本船：(真航速 S1、碰撞長度 Lc、縱距 Ad、橫距 Tf、90°迴轉時間 T90)

他船：(真航速 S2、航向交角 Xc、相對方位 B)

4.求 CQA 之時間 TCQA

已知 CQA，則可求 CQA 之時間 TCQA，解法如下：

設 A 為本船：真航向 C1，航速 S1。目標船 B 的相對於 A 船位為：(距離, 相對方位)、真航向 C2、真航速 S2，則兩船的資料表以下式表示：

A (r1,b1)、C1、S1

B (r2,b2)、C2、S2

(12)

若 A 為本船，則取 (r1,b1) = (0,0)

以式(12)為參數，代入式(13)可得以測量基點為起點之任何時間 t，A、B 兩船間的距離 Rs，(13)式可由距離公式導出之或參考文獻[6]

$$R_s(t) = (D_x^2 + 2D_x(S_1 \times \sin C_1 - S_2 \times \sin C_2) \times t + (S_1 \times \sin C_1 - S_2 \times \sin C_2)^2 \times t^2 + D_y^2 + 2D_y(S_1 \times \cos C_1 - S_2 \times \cos C_2) \times t + (S_1 \times \cos C_1 - S_2 \times \cos C_2)^2 \times t^2)^{1/2} \quad (13)$$

式中：

$$D_x = r_1 \times \sin b_1 - r_2 \times \sin b_2$$

$$D_y = r_1 \times \cos b_1 - r_2 \times \cos b_2 \quad (13-1)$$

已知兩船之距離為 CQA，則式(13)可寫為

$$CQA = R_s(t) = (Dx^2 + 2Dx(S1 \times \sin C1 - S2 \times \sin C2) \times t + (S1 \times \sin C1 - S2 \times \sin C2)^2 \times t^2 + Dy^2 + 2Dy(S1 \times \cos C1 - S2 \times \cos C2) \times t + (S1 \times \cos C1 - S2 \times \cos C2)^2 \times t^2)^{1/2} \quad (14)$$

以 t 為未知數，將上式展成如下之一元二次方程式：

$$At^2 + Bt + C = 0 \quad (15)$$

$$\text{得 } t = (-B \pm \sqrt{B^2 - 4AC}) / 2A \quad (16)$$

t 即為 TCQA， $(-B + \sqrt{B^2 - 4AC}) / 2A$ 不合，取

$$TCQA = t = (-B - \sqrt{B^2 - 4AC}) / 2A \quad (17)$$

式中

$$A = (S1 \times \sin C1 - S2 \times \sin C2)^2 + (S1 \times \cos C1 - S2 \times \cos C2)^2 \quad (17-1)$$

$$B = 2(Dx(S1 \times \sin C1 - S2 \times \sin C2) + Dy(S1 \times \cos C1 - S2 \times \cos C2)) \quad (17-2)$$

$$C = Dx^2 + Dy^2 - CQA^2 \quad (17-3)$$

三、計算例及討論

上節有關 CQA 及 TCQA 的數學方法，以電腦程式處理模擬，整理其結果，以下列五例說明並討論其結果：

1. 逼近距離 CQA 的解算
2. 兩船航速相同，不同航向交角的 CQA
3. 目標船航速不同的 CQA
4. 左轉之 CQA
5. 逼近距離時間 TCQA 的解算

表二、船舶迴轉圈資料表

船型	Speed/kt	LOA/m	Advance/m	Transfer/m	T90/min	DWT
Container	25	195	561	287	1.12	32,360
Bulk carrier	15.8	200	610	280	1.92	37,000
VLCC	16	339	1010	500	2.9	270,665

註：本表資料分別取自實船及參考文獻[15]

表二為使用的三艘本船迴轉圈資料，分別取自實船及參考文獻[15]，目標船船長定為 100m。

1. 逼近距離 CQA 的解算

下例說明並解釋式(11)解算逼近距離 CQA 的過程及意義。

設本船為表二之 Bulk carrier 航向 000°T、航速 15.8kts，某時測得目標船航向 270°T、航速 15.8kts、相對方位 45°，且兩船有碰撞危機，求本船對目標船之逼近距離 CQA？

表三 CQA 解算表($X_c = 90$, $S_1 = S_2$ /Bulk)

Time/分	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0	1.1	1.2	>1.2
CQA/浬	0.08	0.106	0.124	0.137	0.129	xx	0.32	0.353	0.385	0.413	0.446	0.464	xx

xx：無正好 $R_c = L_c$ 之解

表四、不同 CQA 下迴轉時之兩船距離變化/m

迴轉時間 /min	不同 CQA 下之兩船距離(R_c)變化/m			
	0.3 浬	0.4 浬	0.464 浬	0.5 浬
0.0	555.6	740.8	859.3	926.0
0.2	417.7	602.9	721.4	788.1
0.4	279.7	464.9	583.4	650.1
0.6	*92.9	278.1	396.6	463.3
0.8	*19.4	199.0	317.3	383.9
0.9	*59.1	137.4	254.4	320.7
1.0	127.4	*83.6	192.6	257.6
1.1	199.4	*72.7	138.7	198.6
1.2	274.0	122.4	*111.9	153.2
1.4	429.4	269.4	192.4	171.4
1.6	590.3	431.1	343.1	303.0
1.8	753.7	597.5	507.9	463.3
2.0	916.5	764.5	676.0	630.6

*：表碰撞點($R_c \leq L_c$)

兩船的航向交角 $X_c = 000^\circ - 270^\circ = 90^\circ$ ，航速相等，由式(3)得碰撞長度 $L_c = 112\text{m}$ ，以下列參數：

本船：(S1=15.8、 $L_c=112$ 、 $A_d=610$ 、 $T_f=280$ 、 $T_{90}=1.92$)

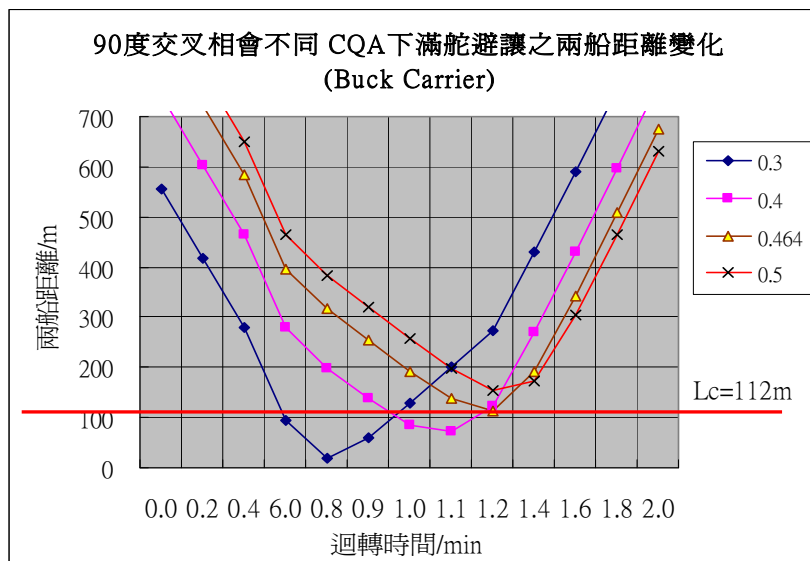
他船：(S2=15.8、 $X_c=90$ 、 $B=45$)

代入式(11)，每 0.1min 為間隔，求得逼近距離 CQA 之值如表三。表三之意義為：在 $CQA = 0.08$ 浬時，由施舵起的第 0.1min 兩船就發生碰撞($R_c=L_c=112\text{m}$)；在 $CQA = 0.106$ 浬時，於第 0.2min 發生碰撞.....；最大之 CQA 為 1.2 min 時之 0.464 浬，此 CQA 即為所求之解。

“xx”為無解，無解之意義為無正好 $R_c=L_c$ 之解，但可能有 $R_c < L_c$ 或 $R_c > L_c$ 之解，可由其相臨的時間點可知。如 0.6min 時應有 $< 112\text{m}$ 之解，1.2min 以上則為有 $> 112\text{m}$ 之解。亦即當 $CQA > 0.464$ 時兩船間的最近距離 R_c 一定大於 L_c 。

表四為以不同之 CQA 計算在 90° 迴轉期間(1.92min)的兩船距離(R_c)，表上有“*”者為 $R_c \leq L_c$ 兩船發生碰撞之點；於 $CQA=0.464$ 浬時，兩船的最小距離為 111.9m，兩船發生「擦撞」； $CQA=0.5$ 浬時，則無碰撞點。

圖五為表四之圖形表示，可看出在 $CQA=0.464$ 浬以內之迴轉，兩船距離會有小於 L_c (碰撞)的部分； CQA 愈小碰撞時間愈早，碰撞區也愈大； $CQA=0.5$ 浬時，曲線的最底部高於碰撞線 L_c ，表示這是一個可以安全通過的 CQA。

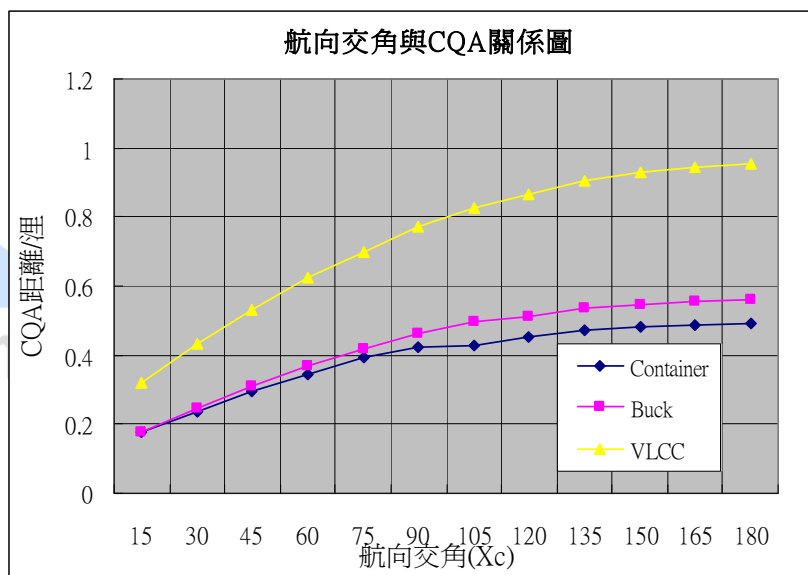


圖五、不同 CQA 下迴轉時之兩船距離變化圖

2. 兩船航速相同，不同航向交角的 CQA

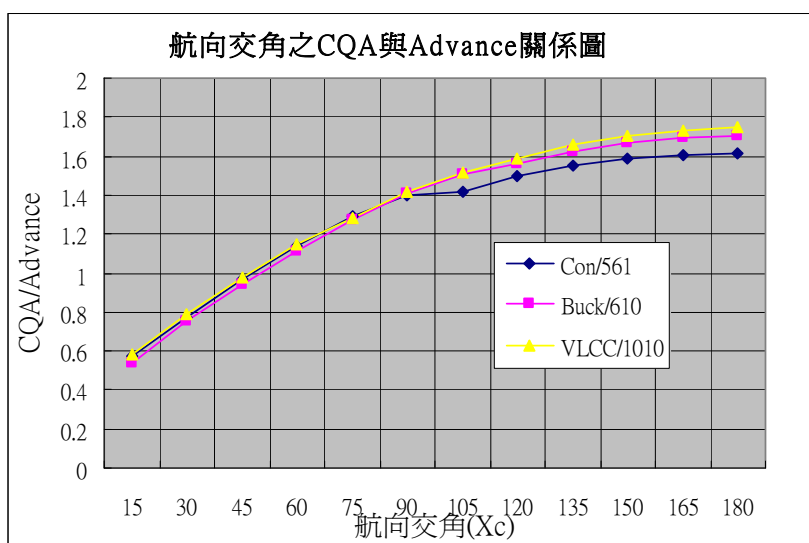
表五、不同航向交角的 CQA(S1=S2)

Xc	CQA/浬			CQA/Advance 因數		
	Container	Buck	VLCC	Con/561m	Buck/610m	VLCC/1010m
15	0.175	0.177	0.32	0.578	0.537	0.587
30	0.234	0.247	0.432	0.773	0.750	0.792
45	0.293	0.31	0.531	0.967	0.941	0.974
60	0.345	0.367	0.625	1.139	1.114	1.146
75	0.391	0.42	0.7	1.291	1.275	1.284
90	0.425	0.464	0.772	1.403	1.409	1.416
105	0.429	0.496	0.827	1.416	1.506	1.516
120	0.453	0.513	0.867	1.496	1.558	1.59
135	0.47	0.534	0.904	1.552	1.621	1.658
150	0.481	0.548	0.929	1.588	1.664	1.704
165	0.487	0.557	0.946	1.608	1.691	1.735
180	0.49	0.562	0.953	1.618	1.706	1.748



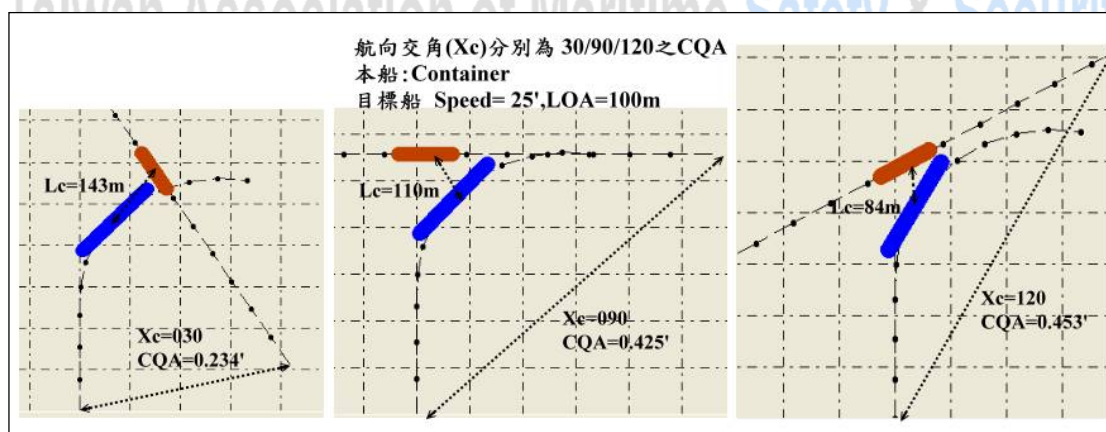
圖六、不同航向交角的 CQA 圖(S1=S2)

本例以表二之三艘船在與目標船航速相同(S1=S2)，航向交角(Xc：15°~ 180°)不同之交會情勢下，計算得 CQA 之解如表五。表之左半部為以「浬」計之 CQA，要注意的是：Xc 大的交叉相會，則 CQA 亦大，此乃因 Xc 大兩船接近的相對速度快。例如兩船迎艙對遇(Xc = 180°)，直覺上這是最好避讓的相會狀況，但其逼近距離 CQA 則為最大，CQA 大，則避碰時機要早，錯過了 CQA，就陷入了「Close-Quarters」之無解局面(這時就要靠目標船的避讓行動了)！



圖七、CQA 與 Advance 關係圖(S1=S2)

若以三艘船來比較其 CQA 值之大小如圖六，依次為：VLCC > Buck > Container，亦即縱距及橫距大之船 CQA 大，特別是縱距為主要因素。若將 CQA 化為與縱距的關係，得如表五之右半部之結果，三艘船 CQA 的縱距因數皆幾乎相等，如圖七所示。Xc = 15°~ 60° 之間時，逼近距離 CQA 約為縱距的 0.6~1.2 倍；Xc = 60°~120° 之間時，逼近距離 CQA 約為縱距的 1.2~1.6 倍；Xc = 120°~ 180° 之間時，逼近距離 CQA 約為縱距的 1.6~1.8 倍。



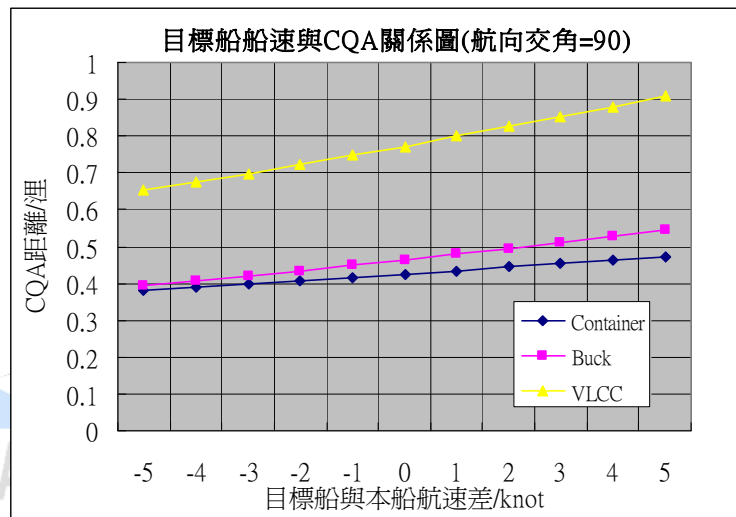
圖八、CQA 距離下之滿舵避讓圖

圖八為 Container ship 分別在航向交角為 30°、90°、120°，於 CQA 距離下之滿舵避讓圖，圖上為兩船「擦撞」之情勢。

3. 目標船航速不同的 CQA

表六、目標船航速變化的 CQA($X_c = 90^\circ$)

船速差/kts (S2-S1)	CQA/浬			CQA/Advance factor		
	Container	Buck	VLCC	Con/561	Buck/610	VLCC/1010
-5	0.383	0.395	0.653	1.264	1.199	1.197
-4	0.391	0.407	0.675	1.291	1.236	1.238
-3	0.399	0.421	0.698	1.317	1.278	1.280
-2	0.408	0.434	0.722	1.347	1.318	1.324
-1	0.416	0.449	0.747	1.373	1.363	1.370
0	0.425	0.464	0.772	1.403	1.409	1.416
1	0.435	0.479	0.799	1.436	1.454	1.465
2	0.444	0.495	0.825	1.466	1.503	1.513
3	0.454	0.512	0.852	1.499	1.554	1.562
4	0.463	0.528	0.878	1.528	1.603	1.610
5	0.473	0.545	0.908	1.561	1.655	1.665

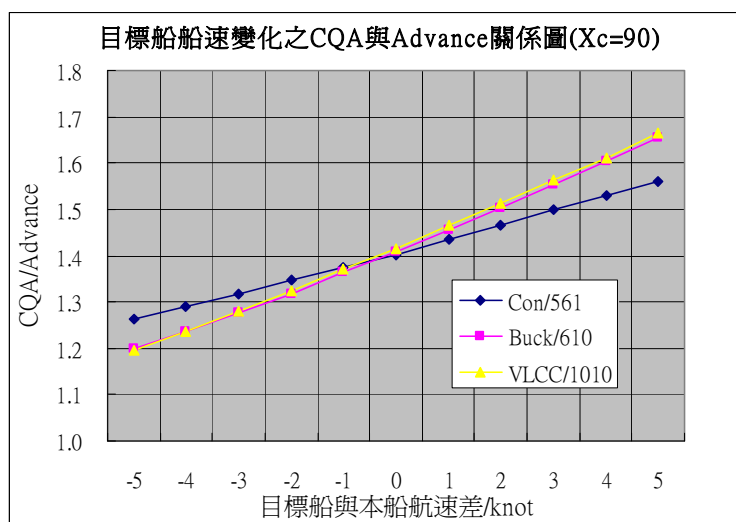


圖九、目標船航速變化的 CQA 圖

若目標船的航速不同，CQA 的變化為何？本例以航向交角 $X_c = 90^\circ$ 為例，目標船與本船航速差(S2-S1)由 -5 至 +5 kts 情形下三艘船之 CQA 解如表六。

依表六左半部及圖九所示，目標船船速增快時，CQA 增大。表六右半部及圖十為 CQA 與縱距之關係圖，Buck 與 VLCC 的曲線幾乎重疊，這是因為兩船的船速幾乎相等(16kts)，而 Container 的船速(25kts)則比前者快了許多。

當航向交角 $X_c = 90^\circ$ 時，目標船的船速變化(-5 至 +5 kts)所導致的 CQA 變化，以縱距因數來看約為：1.2~1.7。



圖十、目標船航速變化的 CQA 與 Advance 關係圖

4. 左轉之 CQA

表七、不同航向交角的左轉與右轉的 CQA/湮 比較表(S1=S2)

Xc	Container		Buck		VLCC	
	R-turn	L-turn	R-turn	L-turn	R-turn	L-turn
15	0.175	0.124	0.177	0.133	0.32	0.2
30	0.234	0.178	0.247	0.194	0.432	0.299
45	0.293	0.242	0.31	0.266	0.531	0.416
60	0.345	0.318	0.367	0.348	0.625	0.548
75	0.391	0.403	0.42	0.441	0.7	0.691
90	0.425	0.496	0.464	0.543	0.772	0.832
105	0.429	0.574	0.496	0.63	0.827	0.928
120	0.453	0.578	0.513	0.67	0.867	0.946
135	0.47	0.557	0.534	0.639	0.904	0.964
150	0.481	0.513	0.548	0.613	0.929	0.971
165	0.487	0.489	0.557	0.591	0.946	0.968
180	0.49	0.49	0.562	0.562	0.953	0.953

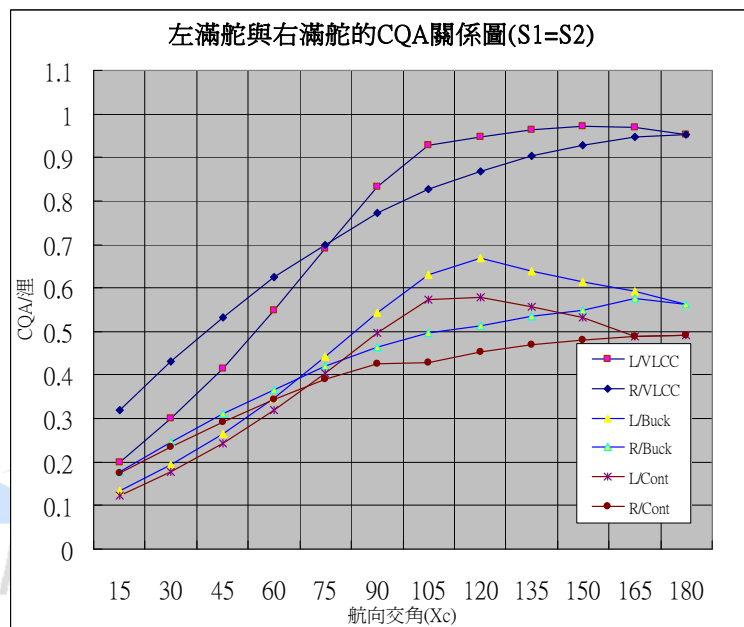
表五各航向交角之 CQA 為本船右轉「臨界碰撞」的 CQA，因此若於此 CQA 下採取左轉行動，是否能避開碰撞？今假設左右迴轉圈之特性皆相同，目標船與本船航速相等，計算三艘船各航向交角 Xc 下之左轉之 CQA 如表七，此表之意義為：

若 $CQA(L\text{-turn}) < CQA(R\text{-turn})$ 於右轉之 CQA 下進行避碰，則右轉擦撞，左轉可通過。

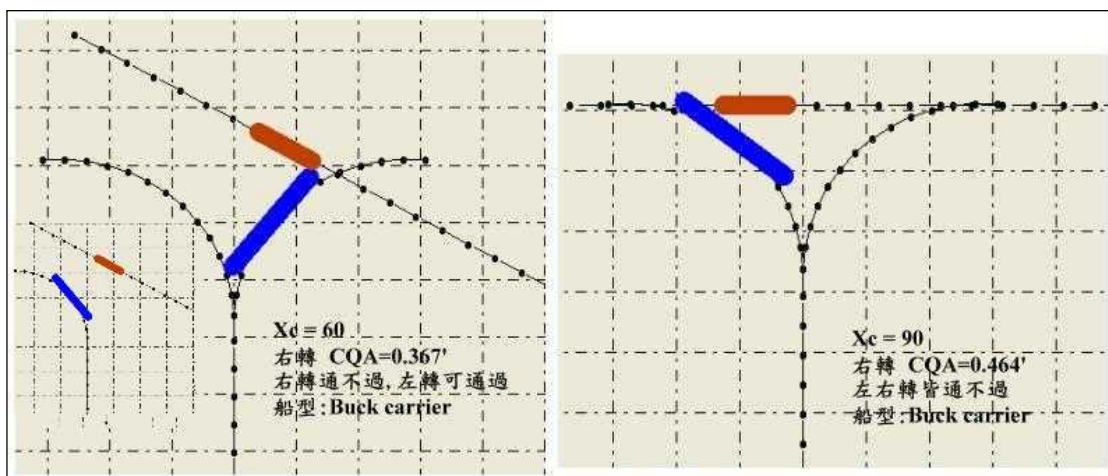
若 $CQA(L\text{-turn}) \geq CQA(R\text{-turn})$ 於右轉之 CQA 下進行避碰，則左右轉皆無法通過。

圖十一 為左右轉的 CQA 曲線圖，依圖上曲線所示：在約 $X_c > 70^\circ$ (VLCC 為 $> 75^\circ$) 時，三艘船左轉的 CQA 開始大於右轉 CQA，表示左右轉皆不可通過。因此對於交叉相會船特別是在 $X_c > 70^\circ$ 時的來船，確實較危險，不但 CQA 變大，且左轉也避開不了。

圖十二為 Buck carrier 的 $X_c = 60^\circ$ 與 90° 的左右轉模擬圖。在 $X_c = 60^\circ$ 時， $CQA = 0.367$ 湮右轉通不過，但若採左轉則可通過($CQA(L\text{-turn}) = 0.348 < CQA(R\text{-turn}) = 0.367$)；在 $X_c = 90^\circ$ 時， $CQA = 0.464$ 湮右轉通不過，左轉也無法通過($CQA(L\text{-turn}) = 0.543 > CQA(R\text{-turn}) = 0.464$)。



圖十一、不同航向交角的左轉與右轉的 CQA 圖



圖十二、CQA 下的左右轉模擬圖

5. 逼近距離時間 TCQA 的解算

下列說明 CQA、TCQA 的完整解算：

設本船為表二之 VLCC，航向 000° 航速 16kts，0900 ARPA 雷達測得一目標船方位 75° 、距離 6.2 浬，該船航向 $305^\circ T$ 、航速 20kts，且 $CPA=0$ ， $TCPA=22$ ，目標船長度不明。本船船長要求的碰撞長度為 $LOA+200m$ ，求本船對該船的逼近距離 CQA 及時間 TCQA？

航向交角 $Xc = 000^\circ - 305^\circ = 55^\circ$ ，碰撞長度 $Lc = 339m + 200m = 539m$ 。

以下列參數代入式(11)

本船：($S1=16kts$ 、 $Lc=539m$ 、縱距 $Ad=1010m$ 、橫距 $Tf=500m$ 、 $T90=2.9min$)

目標船：($S2=20kts$ 、 $Xc=55$ 、 $B=75$)

以每 0.1min 為間隔解算，得 $CQA = 1.11$ 浬

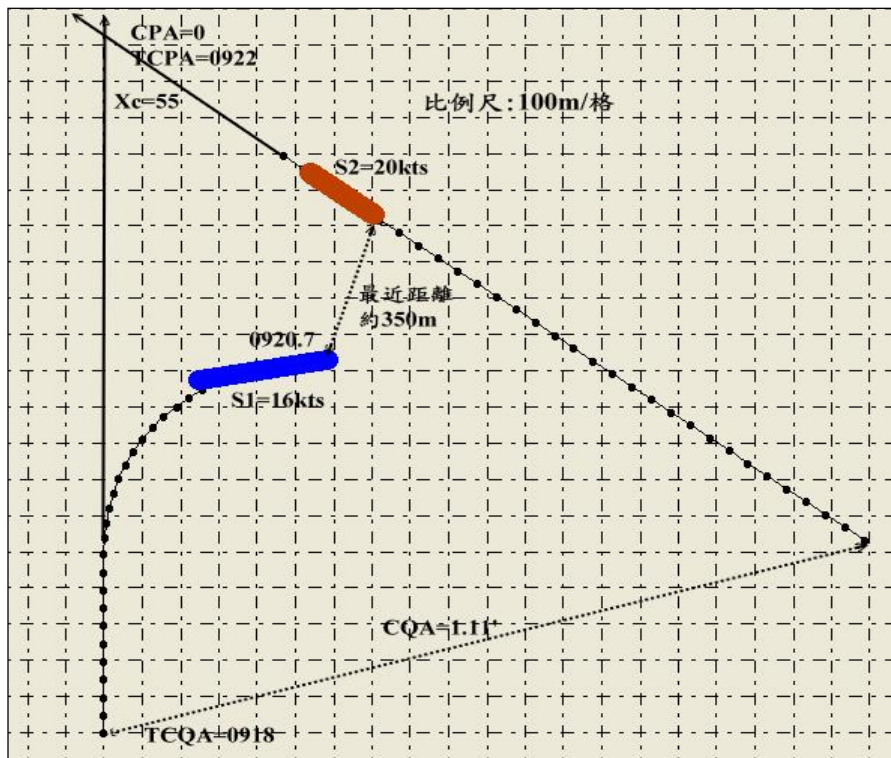
以下列參數代入式(17)求 TCQA

本船：($B=0$ 、 $Rs=0$ 、 $S1=16$ 、 $C1=0$ 、 $CQA=1.11'$)

目標船：($B=75$ 、 $Rs=6.2'$ 、 $S2=20$ 、 $C2=305$)

得 $TCQA = 18min$ 。

即本船最遲應在 $0900+18=0918$ 前，目標船的距離 1.11 浬時，以右滿舵轉向避碰。



圖十三、VLCC 於 CQA 點的避讓(迴轉)模擬圖

圖十三為本船於 0918 採取避讓行動的模擬圖。在施舵後 2.7min，即 0920.7 時兩船距離為最近，以約 350m/0.19 浬的距離避開目標船。CQA 點與 CPA 點的距離為 1.04 浬，時間差 4min。

四、結論

本文提出一處理與計算有碰撞危機間兩船的「逼近距離 CQA」及「逼近距離時間 TCQA」方法，能明確指出「逼近情勢」的時空點，就如「CPA」與「TCPA」為指示兩船碰撞時空點的資訊。對面臨碰撞危機的兩船，「CQA」與「TCQA」為指示採取避碰行動的「極限點」，錯過了 CQA 點本船就會陷入了難以挽救的碰撞困境。依本文之 CQA 計算方法及模擬計算結果，顯示本法可以量化的、明確的處理並研判「逼近情勢」，計算結果呈現出一些特性，也印證了 1961 年 Willmer 法官對「逼近情勢」的看法：

「.....我的看法是：這(逼近情勢)是與當事船的大小(即本文之碰撞長度)、操縱特性、船速有關的議題。」

總結本文要點如下：

1. 本法利用本船的滿舵 90°迴轉圈方程，建立於避碰迴轉時的兩船距離方程，求解逼

近距離 CQA 及逼近距離時間 TCQA，所需要的參數為：

本船：(航速 S_1 、碰撞長度 L_c 、縱距 A_d 、橫距 T_f 、 90° 迴轉時間 T_{90})

他船：(航速 S_2 、航向交角 X_c 、方位 B)

(縱距、橫距、 90° 迴轉時間)可由駕駛台的迴轉圈資料取得。他船資料可由 ARPA 雷達或 AIS 取得。

2. 本法適用於所有的交叉相會情勢，亦即對航向交角為 $0 < X_c \leq 180$ 的情形皆適用 (若 $X_c < 67.5^\circ$ 且一船在他船正橫之後 22.5° 右，則為追越情況)。
3. 碰撞長度為計算 CQA 的重要的參數，「避碰」時的碰撞長度，實務上應採：

$$\text{碰撞長度} = (\text{擦撞})\text{碰撞長度} + \text{安全長度}$$

安全長度為本船進行避碰時兩船最接近時的安全間距，也可容納一些未知的誤差(如迴轉圈的誤差、船速誤差等)及環境因素：如水流、風向、水深等之影響。

4. CQA 的大小與縱距成正比關係，因此減低船速可減少縱距，是減小 CQA 的一個有效措施。(如避碰規則第 6 條 安全速度)
5. 依表五的 CQA 與縱距關係，當兩船航速相近時，簡單快速的 CQA 估算，於 $X_c < 90^\circ$ 時可以取本船縱距的 1.5 倍，於 $X_c \geq 90^\circ$ 時取縱距的 2 倍，大約就可適應所有的交會情況。
6. 航向交角大，CQA 也大，CQA 大代表兩船碰撞的危險性大(兩船迎艏對遇時，CQA 最大，也最危險)，避碰行動的時間需愈早。
7. 對錯過 CQA 點陷入 CQA 困境的船舶(當然這時需本船確知自己的 CQA 點位置)，於 $X_c < 70^\circ$ 時，向左轉向是尚有機會避免碰撞的行動；在 $X_c > 70^\circ$ 時，於 CQA 距離時本船無論是採取右轉或左轉皆避開不了碰撞，這時只有靠目標船的幫忙「採取最有助於避免碰撞之措施」了。
8. 目標船船速快，CQA 逼近距離也增大，避碰行動的時間需及早。
9. 航海員熟悉與了解本船的迴轉圈性能，事先計算知道本船對目標船的「CQA 逼近距離」，對逼近情勢及避碰行動的處理是有極大幫助的(若有其他舵角的迴轉圈數據，

也可依此法計算於該舵角時的目標船逼近距離 CQA)。

符號表

符號	意義
CQA	Close Quarters of Approaching 逼近距離
TCQA	Time of CQA 逼近距離時間
Ad	Advance 縱距
Tf	Transfer 橫距
T90	Turning period from Initial to 90° 90°的迴轉時間
t_a	Rudder effect time = (Ad-Tf)/S1 舵效時間
Rc	Range of target ship and own ship during turning period 迴轉期間之本船與目標船距離
Lc	Collision length 碰撞長度
X_c	Cross course angle 兩船航向交角 = C1-C2
H_t	Turning angle per minute 迴轉角速度 = $90^\circ/(T90-t_a)$
(x1, y1)	Own ship position 本船位置
S1	Own ship speed 本船真航速
C1	Own ship course 本船真航向
L1	LOA of own ship 本船全長
(x2, y2)	Target ship position 目標船位置
S2	Target ship speed 目標船真航速
C2	Target ship course 目標船真航向
L2	LOA of target ship 目標船全長
Rs	Target ship range 目標船距離
B	Target ship Bearing 目標船相對方位
K	旋迴性指數(1/s)
T	追隨性指數(s)
V	迴轉時初速(m/s)
δ_0	所操舵角，單位為弧度
t_1	操舵時舵角由正舵至 δ_0 舵角所需的時間(s)
R	定常迴轉半徑
Re	心距(操舵點至產生舵效點之距離)

參考文獻

1. 一九七二年國際海上避碰規則(二〇〇一年修正)，中華民國船長公會，台北，2003。
2. 吳兆麟，船舶避碰與值班，大連海事大學出版社，大連，1998，p43。
3. 周東平，船舶操縱，人民交通出版社，北京，1996，pp.9-20。
4. 徐國裕，船舶操縱理論與實務，五南圖書公司，台北，2008，pp.11-71。
5. 蘇開文、趙月林，緊迫局面的數學模型，大連海事大學學報，第33卷第1期，2007，pp.17-33。
6. 羅逢源、吳東明、蘇東濤，多目標船舶碰撞資訊的演算解析法，臺灣科技大學技術學刊，第22卷第3期，2007，pp.243-252。
7. 譚箭，海船避碰專家系統領域知識的來源和決策流程初探，中國科學安全科學學報，

- 1999 年第 3 期，北京，pp.29-33。
8. A.N.Cockcroft & J.N.F.Lameijer, A Guide to The Collision Avoidance Rules-- 5th ed., Butterworth-Heinemann Publishing Ltd., 2001, Oxford, pp.114-143.
 9. Goodwin, E. M., "A Statistical Study of Ship Domain," *Journal of Navigation*, Vol. 28, 1975, pp.328-344.
 10. IMO Resolution MSC.137(76), Standards for ship Manoeuvrability, 4 December 2002.
 11. Marine Accident Investigation Branch, MAIB Report No.9/2007, Report on the investigation of the close-quarters situation between the ro-ro passenger ferry Maersk Dover the tanker Apollonia and the container vessel Maersk Vancouver in the Dover Strait on 17 October 2006, Southampton, U.K., 2007.
 12. Marine Accident Investigation Branch, MAIB Report No.17/2005, Report on the investigation of the collision between Hyundai Dominion and Sky Hope in the East China Sea 21 June 2004, Southampton, U.K., 2005.
 13. The Australian Transport Safety Bureau, Maritime Safety Investigation Report - Final Close quarters between *Blossom Forever & Pearl Prosperity* (Occurrence No.59) 1994, http://atsb.gov.au/publications/investigation_reports/, 2009.
 14. The Phrase Finder, <http://www.phrases.org.uk/meanings/close-quarters.html>; Wikipedia the free encyclopaedia, Close Quarters Battle, <http://en.wikipedia.org/>, 2009.
 15. U.S. Coast Guard Report No.CG-D-25-79, "Rules of the Road Training Investigation", National Maritime Research Centre, New York, 1978, pp.23-28.