

船舶四階段回轉分析

1. 李文愚

摘要

當海員在不同情況下操縱船舶時，應仔細研究船舶的轉向特性，以瞭解其運轉所受的限制。如果將船舶回轉分為三個階段以避免碰撞，避免船舶因進出不同交通密度，和接近沿岸區因回轉不當而引起的碰撞。船長應適當考慮船舶船頭和船尾在回轉運動時的不同來操縱船舶，並能將這些研究依不同的碰撞風險區分，以供不同經驗和技能等級的海員應用。

當某船公司在進出臺灣最佳港口時，其船隊中遭遇兩起事故，這三個階段的轉向理論，在擁塞水域的操船應用中，似乎還不夠。故在本文中，建議將船舶的轉向主要影響因素，設定為四個階段，並分別考慮它們在船舶回轉控制中的重要性。

以個人對人為因素的理解，知道這項研究的分析和自願推廣，並不足以避免類似事件，將來再次發生，因為這只是知識基礎。在緊急情況下，只有正確的直覺才能解決問題，而不是無用的努力。直覺來自於對知識基礎的扎實理解和熟練的技能。瞭解轉彎中的要素是知識基礎，正確應用轉彎中的不同要素，來影響船舶回轉是技術等級。立即知道如果單一要素的短缺，會如何影響船舶最終的回轉，就是我們需要的直覺。

關鍵字：船隻回轉；舵效；前進距；橫移距離

1. 前言

每天都有數以千計的船舶在世界各地建造，數以千計的當值船副在海上航行。對船廠提供並掛在駕駛台的船舶回轉曲線圖，卻沒有提出任何異議，這是一件非常不可思議的事。在我個人的研究中，這就是所謂的人為因素：年輕人的學習習慣，是不加思索地吸收知識；經驗豐富的海員，是習慣交給權威，即使在衛星船位和先進的電羅經的幫助下，他們也會忽略眼前明顯的事實。船廠船圖提供的傳統回轉曲線是以船舶幾何中心為迴旋支點，來決定其戰術直徑與其他參數。我們知道迴旋支點並不是位於船舶的幾何中心，而是位於船首後面三分之一或四分之一船長的船中線上。這是第一個誤差源，但是誤差量不大，可以忽略不計。

影響船舶前進距離的第二個誤差源是她的漂移角所造成的：是船隻的對地航向與船艏向無法同步改變，所產生的漂移角而引起的。當船艏向改變到需要的航向時，轉向不會停止，船位可能繼續向前移動，進距繼續增加，這是進距需要的第一個修正量，如同船隻在圖四的紫線位置。

當對地航向改變到需要的航向時，漂移角也可能繼續變大，船尾會繼續向前擺動，船尾向前掃過的垂線距離，就是進距需要的第二個修正量，如同船隻在圖四的紅線位置。船隻的回轉運動，需要一個因不同作用力產生的回轉加速過程來轉向，與一個因作用力變化後產生的回轉減速過程，以穩定在新航向上，加速與減速的作用力的消長，造成船隻回轉時之漂移角變化？其中任何一個作用力的欠缺，都會使回轉曲線變化與進距增加，造成回轉空間不足，增加碰撞碼頭與岸壁的可能性。

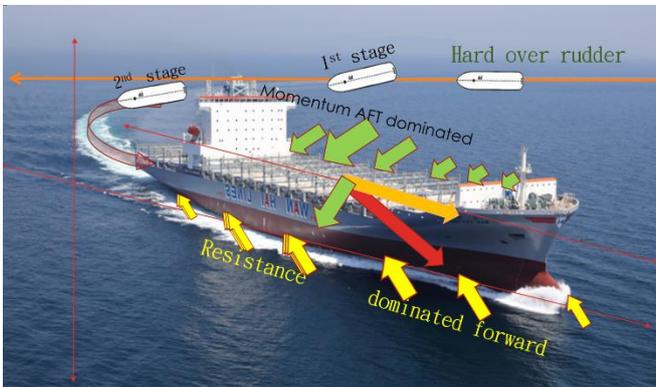


圖 1: 船隻回轉的作用力

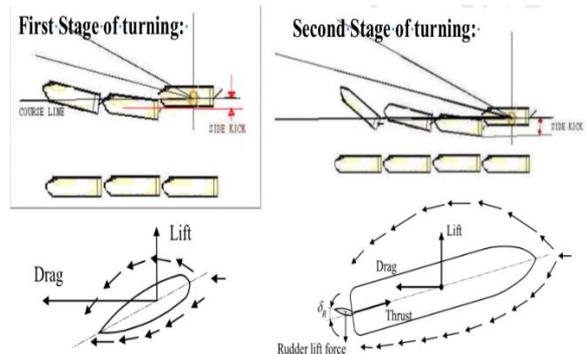


圖 2: 第一階段與第二階段的回轉作用力

2. 船隻回轉的四個階段

船舶在進出不同交通密度/沿岸近接區域，常因回轉不當而引起船隻間/與碼頭的碰撞，作者將船舶回轉分為四個階段，分別說明舵力/水流阻力/離心力/橫向推力，在這四個階段對船體的影響，以求進行有效的回轉控制，回轉前三階段是傳統的操船概念，用以在開闊水域避免船隻間碰撞，回轉第四階段是指在狹窄水域時，船舶穩定在新航向上的過程，用以避免船隻碰撞碼頭。

2.1. 回轉第一階段，只有舵力作用於船尾，此時應注意用舵的大小與時機，如圖 2左邊所示

- ⇒ 在第一階段只有舵板的側推力，能產生船尾的外移。
- ⇒ 舵板上的側推力，是從轉舵開始的位置慢慢累積起來的，會一點一點的將船尾向外推開。
- ⇒ 船尾需要一定的時間和距離，才能累積足夠的橫向位移，通常為船隻前進約1.0至1.5倍船長的進距與時間。
- ⇒ 在第一階段時，舵角作用只在船尾，船首是不受任何側向力的影響。因此，船頭仍保持在原來的航線上。
- ⇒ 在緊急情況下，滿舵是首選，因為它將產生最大最快的船尾外移，並減少本船回轉的前進距離，用以提前啟動第二階段的回轉。

在第一階段，船首部分不會離開原來的航向線，只有船尾會產生大約1到1.5倍船寬的橫向位移，船艏向會發生 10° - 15° 度的回轉。請參閱圖1。

2.2. 在回轉的第二階段，船舶將同時受到三種力：①從第一階段延續來船尾舵的側推力，②船體前方產生的水流阻力，③以及從原始航向前運動所產生的離心力。

- ⇒ 在第一階段船艏向回轉 10° - 15° 度後，產生了迴旋支點，實務上，作用於船體上的各種力太多太複雜，包括岸吸力/岸推力/淺水效應等等，迴旋支點的位置難以計算求出，只能以事實上認定其為，“船舶前後中心線上的一點，該點沒有受到任何側向力，將其推向左舷或右舷”。
- ⇒ 在第一階段用舵之後，船艏向發生 10° - 15° 度的回轉，流經船體兩側的水流，將變得不平衡。船頭向前一側與前方水流形成更大的橫斷面，因此所產生的水流阻力快速增加，將船頭往後推，協助船體的回轉。
- ⇒ 船隻回轉 10° - 15° 度後，船頭向後的一側沒有水流阻力，因水流的流線加速，甚至產生低壓區，協助船體的回轉。
- ⇒ 船尾的水流阻力(指迴旋支點後的水流阻力)雖然面積與阻力較船頭更大，但被船舶回轉時，產生更大的離心力所抵消。
- ⇒ 迴旋支點之前的力，是水流阻力大於離心力，船舶迴旋支點之前的船頭被推向回轉曲線之內，產生了船艏向與對地航向不同的漂流角。
- ⇒ 迴旋支點之後的力，是離心力大於水流阻力，船舶迴旋支點之後的船體位於回轉曲線之外，因此產生了進距的船尾修正量(AFT Corr)，參見圖 4。
- ⇒ 第二階段的船身相當於一巨大的擋水板，迴旋支點前的水流阻力提供強大的煞車能力，減少了船舶的前進距離，並進一步與船尾的離心力形成力偶，加速船舶的回轉速度。
- ⇒ 當船舶處於輕吃水狀態，(因船上沒有貨物時，在幹船塢之後或之前)，
 - 其船頭水流阻力會因吃水少而降低，離心力也會因船上沒有貨物而降低。

- 輕載船舶因缺少水流阻力與離心力，其回轉速率比預期的大幅降低，無法如預期般及時轉向。
- 第二階段的進距，如果因回轉作用力不足(舵力/水流阻力/離心力)，大約會增加一到兩倍船長的進距，會造成船長的恐慌。
- ⇒ 第二階段回轉剛開始時，船舶的離心力大於水流阻力，回轉速率是一個加速的過程，比第一階段僅靠舵力回轉要快。
- ⇒ 由於船體在水下的長度和寬度較大（可能長 400 米，寬 60 米），所以在回轉的第二階段，船體和船尾仍處於原來的航線上。

第二階段回轉時發生的碰撞，由於船尾仍位於原來的航線上，可能造成船尾與其他船隻相撞。瞭解這兩個階段的船體運動的重要性，在於知道船隻在回轉的前兩個階段內，起始回轉的這兩分鐘時間和3到4倍本船長度的進距內，碰撞是無法有效避免的。如果一艘船在公海上遇到有碰撞風險的交叉相遇情況，只有兩個階段的回轉是不夠的，大角度航向的改變需要足夠的時間和距離來完成 3 個階段的回轉。對於高級船副或船長來說，在河流中遇到正面相遇且有碰撞危險的情況下，前兩個階段的回轉，卻是他們避免碰撞的唯一手段。在河道中，船隻沒有辦法轉向超過 20° 度。這個簡單的道理，就是長賜輪的關鍵事實。長賜輪擱淺事件發生時，她的航向與蘇伊士運河一般交通流方向，就是相差 20° 度。

- 2.3. 在回轉的第三階段，三種力共同作用達到平衡，形成穩定的回轉速率，或可能從第二階段繼續加速回轉。
- ⇒ 前兩個階段的回轉，是船舶正在進行轉向的加速過程。在第三階段，船舶將需要一個回轉減速的過程，才能穩定在新的航向上。
 - ⇒ 在第三階段會發生的一些碰撞，往往是由於對碰撞位置的錯誤判斷，或在避免碰撞時，失去了對船艏向的控制。
 - ⇒ 通常在第二階段加速轉彎後，與船舶最終穩定之前，船員會透過正舵或使用反舵來降低轉向速率。
 - ⇒ 第三階段的減速過程需要維持船艏向穩定，適用於避碰操縱。

這些轉向知識對於海員來說，似乎是容易掌握。如果想像一下「Costa Concordia」號的全損案例，我們就會明白，業界並沒有進行足夠的研究，來建立必要的船舶回轉意識，是需要幾個階段與多少的時間與距離？尤其是回轉的第一個階段，需要的時間與進距是不可壓縮的，一定要船艏向回轉 10° - 15° 度後，才會有後續加速與減速回轉的操縱。

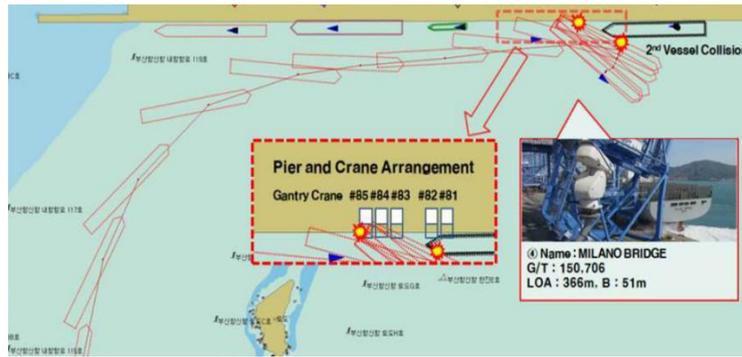


圖 3: 靠碼頭前的 90 度回轉

2.4. 回轉失敗的主因

在操縱距離和空間有限的引航水域中，僅對轉向進行三階段分析是不夠的。例如，當船隻在圖 3 中的泊位之前進行 90° 度回轉時，很難說準確的說，船舶是在哪個位置完成了轉向。圖中的這艘船在其距離泊位前兩倍船長進距的位置，已完成了船艙向 90° 度的回轉，後續卻與泊位發生碰撞，除了上述減速回轉的三個階段，回轉操船還需要完成第四個階段，控制回轉後船隻對地航向與船位的穩定，並建立必要的操船意識，以防止未來類似事件的發生與失控。

如果我們將前三階段的回轉，定義為傳統上的“船艙向已轉至她所需的航向上”，如同傳統的進距定義，其進距就會如同下圖 4 中的橘色線段。第四階段是指船舶穩定在新航向上所需要的過程。在圖 3 中，儘管船舶回轉完成並可能已達到傳統的最大進距，但是船尚未穩定在新航向上，在對地航向轉到 90 度之前(紫色線位置)，回轉曲線仍然有前進的向量，這是進距修正需要的第一個“偏移角修正量”或“對地航向修正量”。船尾因對地航向的作用繼續往前方甩出(紅色線位置)，這是進距修正需要的第二個“船尾修正量”。碰撞碼頭發生在回轉第四階段的失控，無法控制船位的位移與甩尾，可以說是回轉失敗的主因。

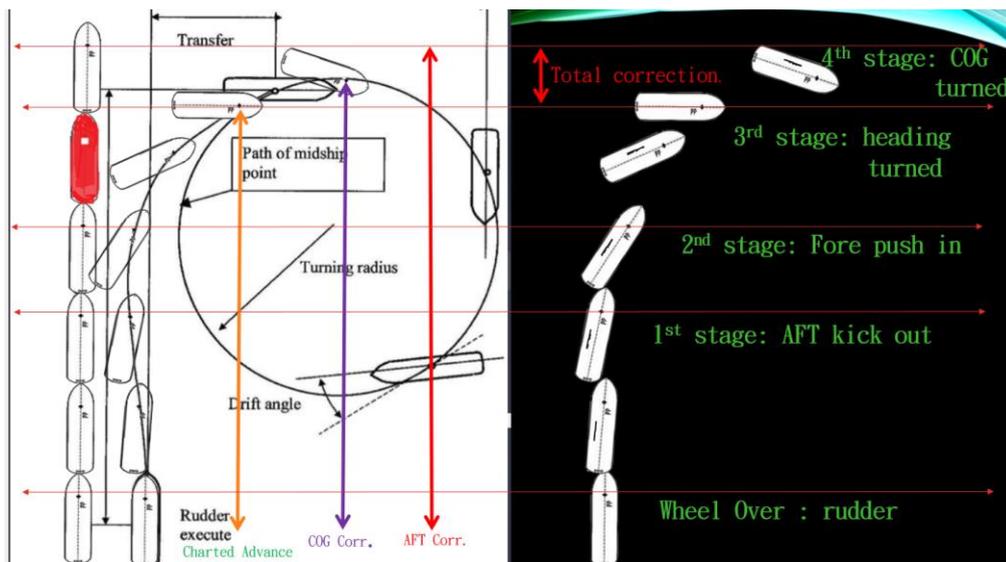


圖 4：進距修正圖

2.5. 回轉時的最大進距

從圖 4 的左圖可以看出，船首向改變 90° 度的位置並不在回轉曲線的頂端，傳統將當船首向改變 90 度時，沿著原始航向前行的距離定義為進距(橘色線段)。我們應該將這個位置視為右圖轉向的第三階段。然而，在這條橘色線段的位置，船舶的對地航向尚未完成 90 度轉彎。船體將沿著初始航向進一步位移前進。在第三階段，船舶通常具有漂移角，並且會將她進一步推到紫色線段的頂點，對地航向才會改變到 90 度。船舶進距從船艏向轉向 90° 度到對地航向轉向 90° 度，需要修正的進距是“漂移角校正量”。

在左圖中，在起始航向上量測 90 度轉向的進距（橙色距離），並未考慮產生的漂移角並進行校正。如果我們修正了漂移角校正量後，來量測她的最大進距（採用漂移角校正後的是紫色距離）。船尾因漂移角的擺動，轉到回轉曲線之外，船尾外擺的距離是進距的第二個“船尾校正量”，就是船尾擺動到回轉曲線之外的進距（紅色距離）。前進距離研究的重要性，在於瞭解漂移角對船隻真實進距所造成的差異，當船舶對地航向沒有穩定在想要駕駛的航向時，真實進距將不會穩定。當本船船艏向轉到預定航向時，船尾仍會繼續移動到外舷，導致在擁擠水域發生無預期的碰撞。

2.6. 範例

對於一艘長 300 公尺、寬 60 公尺的船隻，加上 30 度的漂移角和位於船頭四分之一船長的 PP 迴旋支點，進距的校正量是多少？由這個範例可知

$$300 \text{ 公尺船長} \times 3/4 \text{ (船尾擺動出回轉曲線外的縱向距離, 進距方向)} \sin 30^\circ \text{ (漂移角)} + 60 \text{ 公尺船隻寬度} \times 1/2 \text{ (距船尾中心的橫向距離)} \cos 30^\circ \text{ (漂移角)}$$

$$= 112.5 \text{ (是船尾校正量)} + 25.98 \text{ (是漂移角校正量)} = 138.5 \text{ 米}$$

同樣的規則適用於 170 公尺 x 30 公尺的船隻，進距修正量會是

$$= 63.75 + 13.0 = 76.75$$

2.6.1. 考慮某港防波堤入口寬度 250 公尺時，其一半寬度僅 125 公尺。對於漂移角 30 度的大型船舶（300 長 x 60 公尺寬），她的船尾將向防波堤擺動 138.5 公尺以上，即使其船艏向已經轉到新航向，還是會導致船隻船尾在那裡發生碰撞擱淺。

2.6.2. 在上圖 3 中，船艏向改變 90 度時，船位大約在小島的正北方，船舶到泊位的正橫距離約為船隻寬度的 4 倍。這艘船是否有可能將航向穩定在 090 度（正東）而不發生碰撞嗎？下面是穩定對地航向的操船方法分析。

3. 穩定對地航向的操船方法

在公海上，不受空間限制進行轉向時，不需要船舶主機的額外說明，來產生更大的舵效來穩定船舶航向。我們可以假設船隻的轉向，是分三個階段進行並完成。在擁擠的水域中，完成三個階段回轉後，到船位穩定的第四階段，還需要多少進距？，第四階段的進距修正量就至關重要，所以轉向過程，必須考慮一個額外的階段：對地航向穩定的第四階段。在圖 5 中，左圖是船艏向已經完成轉向，但她的對地航向仍然有一些漂移角未轉到設定的航向。如果船艏向已轉到新航向，她可以使用下列操作，來完成第四階段的對地航向穩

定。這可能是海員以前未曾考慮過的額外知識，“沒有這些知識，也就是人為錯誤的主因”，就會為他的操船帶來不確定性的風險，如：亂下結論、判斷錯誤、忽視事件的優先順序等等，就像圖 3 中該船引水人所做的那樣。

對地航向是由兩個分量組成：一是船舶中線前後向的縱向分量，無回轉的副作用；另一部分垂直於船中線，將船舶推向兩側的橫向分量，這一部分的分量，包括第一階段因舵角造成的橫向推力，第二階段阻擋船頭水流阻力的橫向推力，第三階段主導船尾外移離心力的橫向推力，第四階段時船艏向，雖然可以由船上的舵工控制，保持穩定在新航向上，然而船隻的橫向推力並未消失，船隻整體仍有橫向推力向外位移，這種將船隻外移之殘力，可以稱為其“船體橫向力”。要穩定船隻對地航向，消除其船體橫向力，就要利用不同分量的組合，來使對地航向儘快到達需要的航向，計有下列四種操縱。

3.1. 慢速修正：控制船艏向在新航向上，船速不變。

將船艏向穩定在新航向上，但她的船體在船體橫向力的作用下，仍會向外舷側慢慢橫向位移。這種橫向位移會因船舷側的水流阻力，而逐漸減少。如此操作的第四階段，效果較慢，需要一定的距離來修正，在前進兩倍船長的距離後，離心力造成的橫向位移才會消失。此時船位比轉向的第三階段時，向外舷漂移的距離，大約為本船的一倍船寬。因此船艏向轉到新航向後，對地航向仍須兩倍船長的進距，與一倍船寬的橫移，才能穩定在新航向，完成回轉。

3.2. 快速修正：控制船艏向在新航向上，同時提高船速。

如此操作，船舶會更快速穩定在新航向上，其對地航向會在主機加車後，增加新的縱向分量，合成的對地航向會修正至更接近所需要的航向，但在船體橫向力的作用下，仍有較小的橫向位移。新的引擎出力增加了船舶向前的對地速度，造成船舶進距較上述的慢速修正多半倍船長。船舶向左舷的橫移，少了半倍的船寬。對地航向仍需要超過兩倍船長的進距，與船寬一半的橫向位移，才能穩定在新航向上，完成第四階段的回轉。

3.3. 錯誤修正：控制船艏向在新航向上，同時減速？

船艏向轉到新航向後，立即減速。減速造成縱向的速度分量減小，這使得船隻對地航向向外轉向，回轉速率降低，船體橫向力加大，並進一步增加其正橫的漂移量。如果沒有拖船或側推進器來幫助減少這種正橫的漂移，這是一個非常危險的趨勢。這一操作，還有一個潛在的風險，就是船速太高時(超過 5 節)，貿然減速，拖船或側推進器還無法全力推頂。海員們熟悉的這種效應，並稱之為泰坦尼克效應，意指當轉向時，減少主機出力只會造成更多的橫向位移，這個效應還有一個更嚴重的後遺症，就是失去舵效，造成船隻無法應對後續船艏向的操縱需求。

3.4. 過度修正：放棄對船舶船艏向的控制，利用對地航向完成回轉，如第4種所示。

持續的使用右滿舵，直到對地航向已經轉到接近新航向，然後再使用左滿舵壓回。然而，這使用迴圈的連續滿舵，是一項特殊技能，需要有一些對船舶滿舵操船的經驗。這是在擁擠水域中，一項大膽的操縱，雖然可以大大減少船隻的前進距離，然而船尾的過度外用，所掃過的區域與增加的進距，都需要事先考慮，本船是否有足夠的海域，進行此一操作。

所以這四種修正的選擇是一種權衡，主要以現場水域的限制為主要的考慮，臨場時，如果前方距離夠遠，可以使用第二種快速修正，如果車速已經太快，無車可加，使用第四種操船，過度修正可以減速兼立刻回正，最安全的還是第一種慢速，只要事先用最少的進距(第一第二階段滿舵大車加速回轉，第三階段提早把船艏向轉到需要的航向)，完成前三階段，就有餘裕進行第四階段的對地航向穩定的修正，這也就是我們常講的，早轉比晚轉好。由圖上所見，完成前三階段的船位，至少應該留下一倍船寬的正橫距離，以滿足船位向外偏移的需求，這是通則，足為操船者鑒。

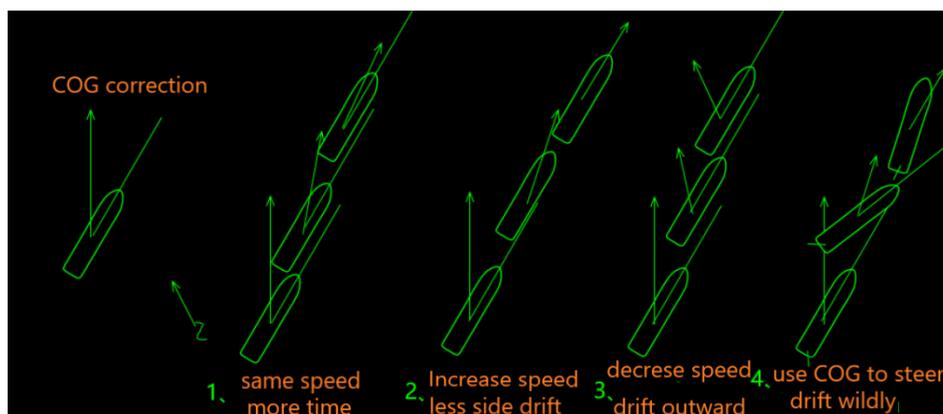


圖 5: 對地航向的修正方法

4 Conclusion

泰坦尼克號 1912 年沉沒已經過去一百年了，當年沒有任何航儀的幫助下，愛德華船長”可以穿過紐約錯縱複雜的航道，全速進港，有那麼一個特別難轉彎的角落...船長精確地判斷船岸的距離，船體隨著舵角傾斜，在船頭船尾的兩端離岸邊，都只有幾英尺距離安全通過”，當時靠的完全是人力與操船的感覺。今天，我們比以往任何時候都更面臨著一個不斷擴大、快節奏的世界的變化。現今發生事故船長的與以往不同之處，在於所擁有的資源更多，卻沒有足夠的知識去掌握，這就是人為因素。本文的目的地是，補足以前的操船意識對漂移角瞭解不足，所造成的事故。而漂移角的瞬間值，卻不是以往無北斗衛星定位時代，可以隨時確認的，以前的事務，只能以經驗與小心來處理，現在我們可以更好的理解與掌握其中的變數，從而減少事故的發生。其他如忘記回轉所需要的足夠前進距離，回轉的進距是船舶操縱的物理限制，任何設備或人力都無法克服。我們只能尊重並滿足這項物理要求，作為我們的最後底限（基礎知識），而不能以為使用任何技術手段，就能推翻它。本文著重於分析船隻回轉的基本作用力，與缺乏基礎知識所造成後續的態勢感知不佳，操船直覺的不足，這些最經常被歸類為人為因素的擱淺事故，其實都是基礎知識的分析不夠所造成的，足為海員與業界參考。

參考文獻

1. Bridge Human Resource Management by Captain Gilbert Lee 作者李文愚 .
2. MV MILANO BRIDGE Marine Safety Investigation Report (Korea Maritime Safety Tribunal)
3. ABS GUIDE FOR VESSEL MANEUVERABILITY Updates February 2017