

新一代潛艦配備之魚雷管發射系統考量建議

著者／王亞民

葉釋國際有限公司
海軍官校電機工程學系

現代化潛艦多配備多種武器系統，例如：魚雷、水雷、自衛型防空飛彈、潛射攻船飛彈、巡弋飛彈、彈道飛彈及各式水下載具等，並利用魚雷管發射系統發射武器攻擊敵艦。隨著各種聲納系統的不斷發展，使得潛艦具備深海作戰能力，這當然也對潛艦的武器裝備，尤其是魚雷管發射裝置產生了重要影響。早期的魚雷管發射裝置一般都是在潛望鏡深度，利用壓縮空氣來發射魚雷，發射同時會產生巨大的噪音，容易被敵方偵測；近代魚雷管發射系統雖可在數百公尺深潛時發射魚雷攻擊敵艦，然魚雷管發射系統發射魚雷時，仍會產生極大的噪音，由於噪音值極大，使潛艦容易被敵方偵測，因此魚雷管發射武器的方式和採用低噪音設計的發射裝置，是潛艦建造必須考慮和解決的主要問題。

壹、前言

新型柴電潛艦因為執行的任務多元化，因此艦上配置的武器系統種類也日益繁多，例如：魚雷、水雷、自衛型防空飛彈、潛射攻船飛彈、巡弋飛彈、彈道飛彈及各式有人／無人水下載具等。而隨著科技的發展，各種聲納系統的性能也不斷提升，使得潛艦具備深海作戰能力，這當然也對潛艦的武器裝備：尤其是潛射武器

的魚雷管發射裝置產生了重要影響，因而對其性能有了更新、更高的要求。

早期的魚雷管發射裝置一般都是在潛望鏡深度，利用壓縮空氣來發射魚雷，現役和發展中的魚雷管發射系統則可在幾百公尺潛深時進行魚雷發射。發射魚雷時所產生的發射噪音是潛艦主要的噪音源，噪音一般發生於武器發射瞬間，由於音量極大，使得潛艦容易被敵方偵測，因此魚雷管發射武器時使用低噪音設計的發射裝置，是魚雷發射管系統必須考慮和解決的主

要問題。

潛艦發射魚雷時的噪音，主要來自於壓縮空氣推送武器出管時的流體噪音和發射瞬間引起的機械振動等。為了降低艦內排氣噪音及改善艦上的工作環境，許多國家都致力於研製不使用壓縮空氣為動力源的發射裝置。主要發展國家有：德國，在 20 世紀 80 年代發展的蓄能式液壓魚雷管發射系統，美國則致力於研發彈性發射裝置和電磁式發射裝置¹。

現役潛艦魚雷管發射系統的種類包括：氣動式水壓不平衡魚雷管發射系統及液／水壓式、渦輪泵水壓平衡式魚雷管發射系統，它們的動力源大部分都利用高壓空氣，直接推送魚雷，或使用驅動液／水壓泵或渦輪泵，以提供魚雷出管時的動力。

一、魚雷發射管原理^{2,3}

魚雷管後端伸入潛艦壓力殼內，在潛艦魚雷艙內部裝填備射的魚雷，其餘的魚雷、武器則儲於魚雷管後方的儲運系統上，以便於再次裝填。魚雷管整體具備抗壓結構，包含前、後膛門，前膛門係向外開啟，以橡皮材料防漏，使用人工或液壓操作的軸和連桿，由艦內操作控制。因前膛門的固定形狀無法配合潛艦外殼形狀改變，因此在其前端另有一可滑動且輕便之外殼門，二門之間成同步連動。

後膛門係以人工方式操作，由艦內開啟，具有一滑環閉鎖裝置，採用適當抗壓防漏措施。

前、後膛門間有安全連鎖裝置，任何時間皆僅有一門可開啟。

魚雷幾乎都由後膛門裝填至魚雷管中，維持未浸水狀態。發射前，魚雷管下方補償水櫃內的儲水經由管路注入魚雷管中，故潛艦重量不會因管內引入艇外海水而變化。但若魚雷補償水櫃之重心非位於魚雷管內水之重心下方，則水之移動會造成艇身俯仰之變化。當管內壓力與艦外海水壓力相等時，前膛門與潛艦外殼門同步打開，此時魚雷備便發射。

發射後，艦外海水進入管內取代魚雷之位置，艦身所受魚雷之負浮力消失，魚雷補償水櫃內必須立刻進／排水補償，以維持潛艦平衡和潛水深度。再裝填魚雷時，前膛門必須關閉，管內之水排入魚雷補償櫃並清潔管內異物後，再開後膛門裝填備用魚雷。

魚雷管具有遠端和本機操作用以設定魚雷潛航深度、方向等資料的設定裝置，在發射魚雷前先行設定所需的參數。為滿足魚雷管能在全深度內發射魚雷的要求，發射系統須具備充足地發射能量，並且能將發射時所產生的空氣回收，以免暴露潛艦位置。此外，現代化的魚雷在行攻擊初期採用線控導引，可在距離敵艦較遠之處攻擊。

魚雷發射後，若目標航行而離開原計算位置，可經由魚雷尾端的導引線，將修正後的控制訊號傳至魚雷。導引線施放裝置之設計，能同時

方)。因為魚雷管內、外海水壓力平衡，因此發射系統所消耗能量與潛艦潛水深度無關，可在全深度範圍內發射魚雷及各式飛彈。

往復泵水壓平衡式魚雷發射系統，利用同軸的雙頭活塞作為發射原動力，將汽缸活塞與舷外海水注入發射管內的水缸活塞同軸連接，形成一個往復運動，高壓空氣注入汽缸推動活塞後退，汽缸活塞帶動同軸連結的水缸活塞（不同於高壓氣體直接施力於魚雷），把海水家壓住入發射管後端，推送魚雷出管。本裝置的特點：

將發射深度的海水壓力引至水缸內、作用在水缸活塞上，平衡了魚雷前後所受到的艙外海水壓力。且由於發射能量無須克服魚雷管內外的海水壓力，大幅減少了能量的損耗。

高壓氣體直接注入艙內的汽缸以活塞帶動高壓水流推送魚雷出管，而不再直接注入發射管內，如此將不會讓氣泡外洩至海面，減少潛艦暴露蹤跡的危險。

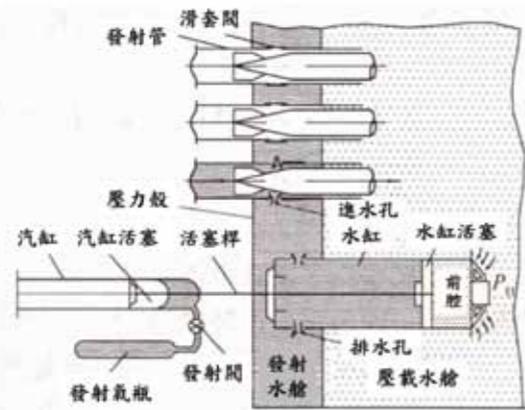


圖3 往復泵水壓平衡式魚雷發射系統

(三) 液壓活塞水壓平衡式發射系統

以活塞汽缸取代了魚雷管下方的導軌。衝壓推桿固定在活塞上用以推送魚雷武器出管，衝壓活塞於汽缸中運動時，其後方被密封條密封。活塞推送系統（圖4）所需動力由壓縮空氣供應給水/空氣汽缸所產生的，推力活塞控制單元（Thruster Piston Control Unit, TPCU）監控推送程序，可在全深度範圍內發射各型式魚雷、飛彈。

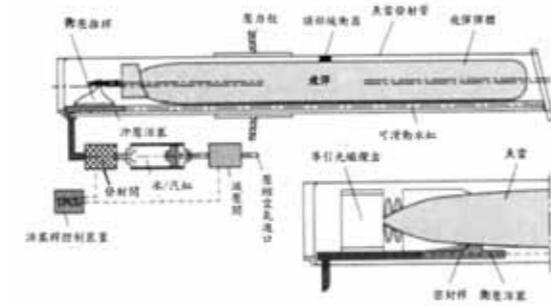


圖4 液壓活塞魚雷管發射系統

(四) 自航式水壓平衡式魚雷發射系統

自航式魚雷管發射系統，依靠魚雷自身動力發射出管，與其它類型的發射裝置相比較，自航式發射裝置因為不依賴外界提供發射能量，具有體積小、重量輕、發射噪音低的特點，更適合於在中、小型潛艦上應用。

目前，現役潛艦使用的自航式魚雷發射管概略區分為兩種類型：一種是等截面積魚雷發射管，利用標準的533毫米口徑的發射管發射較小口徑的魚雷，如早期美國的SSN578 鱈魚級核

動力攻擊潛艦使用的MK57型533毫米發射管和日本早期夕潮級潛艦使用的HU603B型533毫米魚雷發射管發射直徑482毫米（19吋）的MK37型或80式魚雷；另一種是變截面積魚雷發射管，採用較大口徑的魚雷發射管發射標準的533毫米魚雷。

近年來德國MAK公司研製的自航式魚雷發射管和義大利研製的B512.1(2, 3)型發射管，即採用變截面積發射管，此二型魚雷管能發射電力推進線制導魚雷，還增加了輔助裝置用以緊急拋射魚雷，並採用高壓空氣為動力，提供魚雷管佈放水雷、發射攻船和自衛防空飛彈能力。

1. 德國MAK自航式魚雷發射裝置

德國214級潛艦裝備8具自航式魚雷發射管（圖5），可發射制導或新型線導魚雷，魚雷發射管內安裝了拋射裝置用以緊急拋棄故障魚雷，並外加了高壓空氣發射系統，可用於佈放水雷和發射攻船飛彈。所有魚雷、飛彈的發射和水雷的佈放，均由指揮控制系統集中控制。

用自航方式發射魚雷時，魚雷葉轉動產生推力使魚雷向前運動。此時，需要有足夠的海水來填補魚雷前進後在尾端形成的低壓區，以保證葉能正常工作，因此魚雷發射管內徑大於

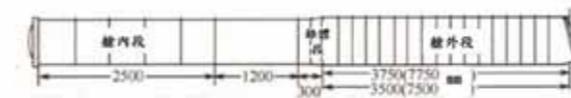


圖5 德國MAK自航式魚雷發射管

其他形式的發射管。為使海水能從發射管的前端經發射管於魚雷之間的環形空隙流入發射管後方。通常環形空隙截面積與魚雷截面積比值約0.4-0.5，即發射管內徑約為魚雷直徑1.18-1.22倍。

例如，MK.57型533毫米魚雷發射管（533毫米為膛孔直徑，發射管內徑約為570毫米），可發射直徑為482毫米的MK37魚雷，發射管內徑與魚雷直徑之比約為1.18，魚雷出管速度約為5公尺/秒（圖6）。

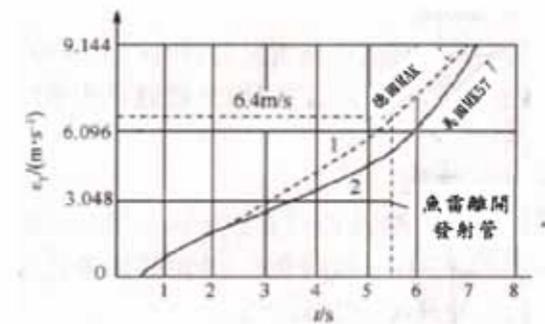


圖6 魚雷在等、變截面積管內的運動圖

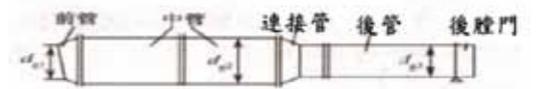


圖7 變截面積魚雷管示意圖

變截面積的魚雷發射管通常有三種不同的內徑，如圖7所示。圖中後管內徑 d_{g3} 的大小需可容下魚雷的葉。當魚雷行經發射管的中管處時，需擴大魚雷管管徑為 d_{g2} 以增加補水速度，維持魚雷葉效率並提升魚雷速度。一般中管段

環形間隙面積與魚雷橫截面積之比約為 0.9， d_{g1} 是前管管口內徑，前管為收縮體形狀的目的是便於設計發射管的前膛門蓋和潛艦外殼門，以減少開啟前膛門和外殼門的操作力。變截面積發射管的各段，通常以連接管結合。

德國 MAK 自航式魚雷發射管為變截面積魚雷發射管，後段內徑為 580 毫米，中段為魚雷直徑 1.38 ~ 1.40 倍約 740 毫米。採用大口徑發射管主要是保證魚雷發射時能從發射管前端補充足夠的海水，除了平衡管內、外壓力外，也為了能充分發揮魚雷葉效能。

2. 義大利 B512 型自航式魚雷發射裝置⁵

義大利海軍 SAURO 級潛艦在艦艙安裝 6 具義大利 Whitehead 公司研製的 B512 型自航式魚雷發射裝置，並加裝汽 / 液壓式拖曳裝置（圖 8）。主要功能：發射 A184 魚雷，當魚雷故障時則搭配輔助拖曳設備可緊急拋射魚雷，採用

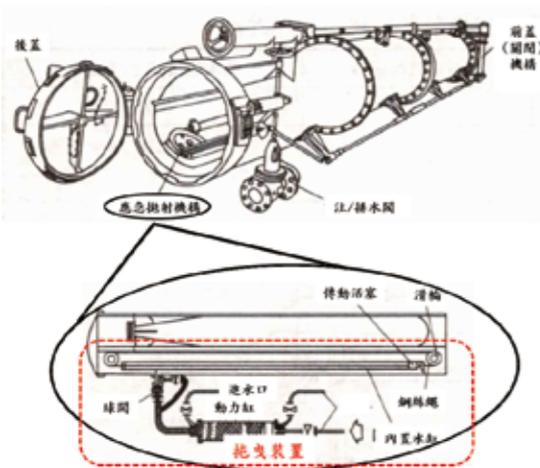


圖 8 義大利 B512 型魚雷發射管及輔助拖曳裝置

內置高壓氣瓶為水雷及潛射攻船飛彈之動力，其工作最大深度 300 公尺。潛艦發射魚雷時最大航速 5 節，魚雷出管速度為 7.5-9 公尺 / 秒。

拖曳裝置是 B512 魚雷發射管特點；在拋射魚雷時，來自潛艦管路中的高壓空氣進入動力缸推動活塞壓縮缸內海水，當球閥開啟時，高壓水流進入內置水缸拉動鋼絲繩，將魚雷、武器以 2.5-4 公尺 / 秒速度拋射出管。

發射系統重要組成：發射裝置由六具發射管（每管重量 5780kg）、兩個控制箱和兩個應急拋射動力缸（左右舷各一組，可互相支援）組成。

(1) 魚雷發射管：每具發射管由管口段、前段、中段和後段組成，各段間採用螺栓連接（參考圖 9）並採用適當的水密措施。發射管長度為 7685 毫米容納魚雷和導線裝置，後段和中、前段內徑分別為 690 毫米和 740 毫米，管口段擴增至 840 毫米形成喇叭口，以確保魚雷出管初始運動的安全性。

(2) 控制箱：潛艦的左右艙各裝一個控制箱，以完成電、汽 / 液壓的控制。

(3) 拖曳裝置：拖曳裝置是 B512 型發射管，主要功能為緊急拋射。工作時，以艦上高壓空氣推動動力缸活塞往內置水缸注水，推動內置水缸傳動活塞拉動鋼索，拋射管中魚雷武器。

(4) 魚雷出管安全結構：為了保證自航出管時的安全性，魚雷管口在艦艙空艙區的四週有延伸導軌。

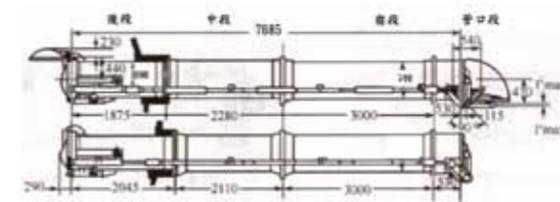


圖 9 B512.3 型 1、3 號發射管尺寸

潛射式攻船飛彈發射程序：B512 魚雷管發射裝置可以發射潛射式魚叉飛彈，發射飛彈時將直徑為 533 毫米，長 1076 毫米，重量約 150kg 的高壓空氣瓶安裝在發射管裡，氣瓶容量 200 公升，壓力為 $(120 \sim 150) * 10^5$ Pa，以釋放高壓空氣作為飛彈發射的動力。為了防止大量氣體隨飛彈運載器排出管外，使運載器在艦艙空艙區運動時的外彈道無法控制和暴露潛艦位置，因此在發射管裏加裝一道直徑 542 毫米的密封環，防止空氣外洩。密封環是可拆卸式的，發射飛彈時才需要裝上。

飛彈裝在直徑 533 毫米、長 6120 毫米的運載器裡，運載器發射出管後以 1962 牛頓的正浮力上升、出水姿態角 45° ，飛彈發射深度 3.5-60 公尺。綜合上述說明可知 B512 自航式魚雷發射裝置，其功能完整，但其操作大部份需依靠人力完成。

3. 自航式魚雷發射管設計限制

自航式魚雷管設計時考量因素

自航式魚雷管發射魚雷時，是依靠魚雷本身動力推進出管，魚雷使用電力推進，以避免因為回收空氣時，吸入引擎排放的廢氣，而危害

到艙間內人員的安全。

魚雷動力裝置需具有良好的啟動特性，能在短時間達到預定轉速推送魚雷出管。因為魚雷出管速度較低，需特別注意艦體結構設計及魚雷發射時潛艦航速，以確保魚雷出管和離艦時的安全。

自航式魚雷管發射方式無須潛艦提供額外能量，魚雷發射時無氣泡外洩和引擎廢氣排放，亦沒有發射結構振動和高壓空氣流動噪音。無論從匿蹤性、簡化發射裝置而言，均具有極大的應用價值。

(五) 渦輪泵水壓平衡式魚雷發射系統

利用渦輪泵代替往復泵提升海水壓力以推送魚雷、武器，目前多使用於英、美等國核動力潛艦，如英國機敏級潛艦及美海軍海狼級潛艦 MK.69 式魚雷發射管系統。

渦輪泵發射系統採用壓縮空氣為動力源，發射裝置的工作流程：發射閥依程式控制開啟發射器瓶，讓高壓空氣通過發射閥進入渦輪機，推動渦輪轉動帶動海水泵，將艦外海水壓入發射水艙後進入魚雷管，魚雷受高壓水流推動出管（圖 10）。渦輪泵魚雷發射系統可按各類型武器（魚雷、攻船飛彈和水雷等）內彈道的需求，控制海水壓力並將武器發射出管，並能達到內彈道精度要求。

渦輪泵魚雷發射系統工作特性：

1. 可提供高壓和大流量海水供魚雷發射使

點，是現今世界上已裝備潛艦的性能最好的魚雷管發射系統之一。但是該型發射裝置硬體設備複雜、製造工藝要求較高、且製造成本較大。

（三）MK69 型魚雷管發射系統技術特點

“海狼”級和先期服役的“維吉尼亞”級核動力潛艦，裝備 MK69 型魚雷管發射系統和改進後的 MK69 型魚雷管發射系統。MK69 型魚雷管發射系統採用渦輪泵水平平衡式發射原理，相對於 MK68 型魚雷管發射系統而言，MK69 型魚雷管發射系統的基本功能保持不變，但技術性能已進一步提升。當魚雷管填入魚雷武器後，透過壓縮空氣驅動的渦輪泵，將艦外海水由一個開口吸入魚雷管內，發射時渦輪則推動管內海水形成高壓水柱，將管內的魚雷武器發射出管。

（四）EES 彈性蓄能式發射裝置技術特點

後期內服役的“維吉尼亞”級核動力潛艦將裝備彈性蓄能式發射裝置（Elastomede Ejection System：EES，圖 15）。EES 可保障快速隱蔽發射魚雷，其採用全新的橡膠彈性圓盤硬體結構，透過拉伸釋放橡膠圓盤產生的力量來驅動水流，進而發射魚雷。EES 的主要技術特點，是裝置硬體結構更簡單、發射噪音低、設備製造成本更低、且不受發射深度限制。另外，橡膠隔膜產生的力量大小可以遙控，便於控制武器發射出管的速度。

參、潛艦魚雷發射管型式選擇的

考量因素

潛艦設計時，首要考慮的是：

- 一、潛艦要執行的戰略、戰術任務；
- 二、現有和未來可擁有的水中武器型式、種類。
- 三、依使用的武器種類，選擇適當的魚雷管型式。
- 四、配合魚雷管型式，設計潛艦艦艙艙間配置。

因此，魚雷管的型式決定了潛艦艦艙艙間的配置，如美軍核動力攻擊潛艦採用 MK. 48 魚雷，則其魚雷管型式必須採用外力推送方式發射魚雷（渦輪泵水壓平衡式發射裝置）。多數歐洲國家使用電力推進動力的魚雷，則可採用自航式或外力推送方式的魚雷發射管發射魚雷。

潛艦選用魚雷管發射系統時，需參考的技術指標主要包括：發射武器種類、魚雷發射深度、發射時的航速、魚雷出管速度、發射管膛壓、發射時間、重量、通用性以及隱蔽性等。以上指標並不是獨立的，而是彼此間存在相互關係，因此衡量發射管裝置的優劣時，一般是整體考量其綜合性能，其中潛艦能夠發射魚雷的發射深度與魚雷出管速度是其中最重要的兩項技術指標。

一、魚雷發射深度

潛艦作戰時都期望魚雷發射的深度能與潛艦

的最大下潛深度相近，即潛艦可以在任意的航行深度上發射魚雷。但潛艦魚雷管發射系統能發射武器的發射深度一般都小於潛艦最大下潛深度，探討其主要原因如後：

（一）魚雷武器承受的水壓

部分武器外殼無法承受過深的海水壓力。例如早期某型魚雷殼體可承受的海水壓力為 2.16 MPa，裝備在最大下潛深度為 300 公尺的潛艦上，如發射裝置的最大膛壓為 0.64 MPa，則發射時魚雷可承受最大海水靜壓力 1.52 MPa（ $2.16 - 0.64 = 1.52$ ），最大發射深度為 150 公尺左右，因此潛艦無法在最大潛深下發射魚雷。

隨著科技的進展，現代化魚雷其潛航深度雖然已大於發射深度，但是部分魚雷受限於動力源因素而必須於較淺海域發射。例如，MK. 48 魚雷採用內燃機為動力源，雖然魚雷最大潛航深度可達到 800 公尺，但是因為需要考慮深海時廢氣排放的背壓問題，因此最大發射深度僅約為 90 公尺。

（二）魚雷發射系統發射深度限制

高壓空氣發射系統雖然構造簡單，因而廣泛應用於 20 世紀早期，因為發射管內與海水壓力不平衡，發射深度愈深，所需能量愈大。如果以發射深度 45 公尺與 300 公尺比較，潛艦在 300 公尺深度發射魚雷，所需的能量為為深度 45 公尺發射魚雷的 5 倍，因此發射氣瓶容積必須增加為 5 倍。因此，考慮發射裝置（含高壓

氣瓶）體積，高壓空氣水壓不平衡式發射系統的發射深度通常不超過 150 公尺。

現代化的魚雷發射管多採用水壓平衡式的發射原理，發射時採用高壓水流推送魚雷武器出管。所以發射時所需要的能量與海水深度無關。此時潛艦魚雷發射的深度僅受限於發射裝置結構承受海水壓力的能力，在魚雷管材料、性能不變的狀況下可增加體積及重量以承受較深處的海水壓力，使得潛艦可實施全深度魚雷發射，此種魚雷發射管的設計概念可供我國設計和自製潛艦時的參考。

二、魚雷出管速度

潛艦通常在靜止或低航速時發射魚雷，魚雷的出管速度對魚雷初始階段的運動安全性和離艦安全性有巨大的的影響，因此對魚雷出管速度必須加以分析考量。

（一）魚雷初始階段運動方程式

魚雷初始階段運動時，雷體的受力情況如圖 16 所示。運動方程式的計算，可參考動力學六自由度運動方程式⁶。

1. 流體運動阻力 R_x

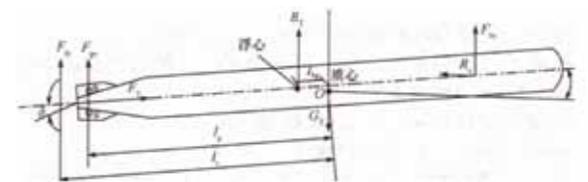


圖 16 魚雷受力情況

$$R_x = C_x \frac{\rho_h v_T^2}{2} \Omega_T = A_x v_T^2 \quad (3.2.1)$$

其中 $A_x = \frac{C_x \rho_h \Omega_T}{2}$ ， C_x 為魚雷流體運動阻力係數、 ρ_h 為海水密度、 v_T 為魚雷速度、 Ω_T 為魚雷浸水面積等常數。

2. 升力 F_y

參考圖 16 魚雷航行時所受到力量分佈，可知作用在魚雷上的升力有三部分：第一部分是對水平舵角 $\delta=0$ 時的魚雷升力 F_{by} ；第二部分為水平舵角 $\delta \neq 0$ 時，所產生的升力 F_{iy} ；第三部分是魚雷以一定的攻角運動時，在俾葉上所產生的升力 F_{py} 。述三個升力可按下式計算：

$$F_{by} = C_y^{\alpha} \frac{\rho_h v_T^2}{2} \Omega_T \alpha = A_y v_T^2 \alpha \quad (3.2.2)$$

$$F_{iy} = C_y^{\delta} \frac{\rho_h v_T^2}{2} \Omega_T \delta = A_r v_T^2 \delta \quad (3.2.3)$$

$$F_{py} = K_p v_T^2 \alpha \quad (3.2.4)$$

式中： $A_y = \frac{C_y^{\alpha} \rho_h \Omega_T}{2}$ ； $A_r = \frac{C_y^{\delta} \rho_h \Omega_T}{2}$ ；

C_y^{α} 為魚雷升力係數對攻角的導數；

C_y^{δ} 為魚雷升力係數對水平舵角的導數；

K_p 為俾葉係數； α 為魚雷運動的攻角；

ρ_h 為海水密度； Ω_T 為魚雷沾濕面積

3. 俯仰力矩 M_z

由圖 3.1 可知作用在魚雷上的俯仰力矩由三部分組成：一部分是由攻角引起的俯仰力矩，這部分力矩又可分為由雷體產生的力矩 M_{zb} 、葉產生的力矩 M_{zp} ，另外一部分是由水準舵角引起的俯仰力矩 M_{zr} 。因此力矩和：

$$M_z = M_{zb} + M_{zp} + M_{zr} \quad (3.2.5)$$

由雷體產生的力矩 M_{zb} 可按下式計算：

$$M_{zb} = m_z^{\alpha} \frac{\rho_h v_T^2}{2} \Omega_T l_T \alpha = A_{mz} v_T^2 \alpha \quad (3.2.6)$$

式中； α ：魚雷運動時的攻角， l_T ：魚雷的長度，

$$A_{mz} = \frac{m_z^{\alpha} \rho_h \Omega_T l_T}{2}$$

m_z^{α} ：魚雷雷體俯仰力矩係數對攻角 α 的導數

當於雷攻角不大時，俾葉和水準舵產生的俯仰力矩等於俾葉和水準舵升力對魚雷質心的力矩，因此：

$$M_{zr} = -F_{ry} l_r \quad (3.2.7)$$

$$M_{zp} = -F_{py} l_{rp} \quad (3.2.8)$$

4. 魚雷運動方程式

包括俾葉推力 F_T (沿魚雷的縱軸)、魚雷的重力 G_T 和浮力 B_T 。建立坐標系如圖 16 所示。假設魚雷無旋轉運動，採用各力對 O_x 、 O_y 軸上的合力，建立魚雷運動方程式：

$$\begin{aligned} -R_x + F_T \cos \alpha - F_{py} \sin \alpha &= 0 \quad (O_x \text{ 軸}) \\ F_{by} + B_T - G_T + F_T \sin \alpha + (F_{py} + F_{ry}) \cos \alpha &= 0 \quad (O_y \text{ 軸}) \\ M_{zx} - B_T(l_{bg} \cos \alpha + h_{bg} \sin \alpha) - F_T h_{bg} &= 0 \quad (\text{對重心求矩}) \end{aligned}$$

式中： h_{bg} 為魚雷質心到魚雷軸線的垂直距離；

l_{bg} 為魚雷雷質心在魚雷軸線上的投影點到浮心的距離。

假設魚雷航行時其攻角為 $5^\circ \sim 7^\circ$ 小角度，因此正、餘弦值可假設為： $\cos \alpha \approx 1$ ， $\sin \alpha \approx \alpha$ ，並忽略 $F_{py} \sin \alpha$ 和 $h_{bg} \sin \alpha$ 值，整合上述魚雷初始運動時的受力其運動方程式可修正為：

$$A_x v_T^2 = F_T \quad (3.2.9)$$

$$(A_x + A_y + K_p) v_T^2 \alpha + A_r v_T^2 \delta = G_T - B_T \quad (3.2.10)$$

$$(A_{mz} - K_p l_p) v_T^2 \alpha - A_r l_r v_T^2 \delta = B_T l_{bg} + F_T h_{bg} \quad (3.2.11)$$

(二) 魚雷出管速度對航行的安全性分析

魚雷作穩定直線運動的狀態與魚雷初始的航行速度有關，還與魚雷發射前所設定的魚雷水準舵角有關。本節主要探討魚雷作穩定直線運動所需的最小速度。

求解魚雷初始運動方程式可得魚雷穩定運動的平衡攻角 α_0 和平衡水準舵角 δ_0 ：

$$\alpha = \frac{l_r(G_T - B_T) + B_T l_{bg} + F_T h_{bg}}{[(A_x + A_y + K_p) l_r + A_{mz} - K_p l_p] v_T^2} \quad (3.2.12)$$

$$\delta = \frac{(A_{mz} - K_p l_p)(G_T - B_T) - (A_x + A_y + K_p)(B_T l_{bg} + F_T h_{bg})}{[(A_x + A_y + K_p) l_r + A_{mz} - K_p l_p] A_r v_T^2} \quad (3.2.13)$$

由式 (3.2.12) 和式 (3.2.13) 中可看出，平衡攻角 α_0 、平衡舵角 δ_0 與魚雷的負浮力 ($G_T - B_T$)、魚雷航速 v_T 、魚雷的流體動力和總體結構有關。對於一定外形尺寸的魚雷， α_0 、 δ_0 是隨著魚雷負浮力的增大和魚雷速度的減小而增大。 α 加大會使阻力係數增大， δ 增大會使水準舵的效率降低，這些對於雷的穩定航行不利。

以某型魚雷為例，用魚雷初始航行階段的最大舵角 (在魚雷發射前已設定的水平舵角)，代替平衡舵角 δ ，按式 (3.2.13) 計算最小的允許魚雷速度，然後按所得的最小允許的魚雷速度求平衡攻角 α 。

已知某型魚雷水平舵的最大舵角 $\delta_m = 0.447 \text{ rad} = 25.6 \text{ deg}$ 。根據該型雷的基本參數： $G_T = 17150 \text{ N}$ 、 $B_T = 13818 \text{ N}$ 、魚雷負浮力 340 公斤， $l_{bg} = 0.02 \text{ m}$ 、 $h_{bg} = 0.008 \text{ m}$ 、 $l_r = 7.48 \text{ m}$ 、 $l_p = 4.12 \text{ m}$ 、 $l_p = 3.94 \text{ m}$ 、 $\Omega_T = 11.96 \text{ m}^2$ 、 $C_x = 0.00258$ 、 $K_p = 3.85$ 、 $F_T = 10270 \text{ N}$ 、 $C_y^{\alpha} = 0.0246$ 、 $C_y^{\delta} = 0.0076$ 、 $m_z^{\alpha} = 0.0155$ 。

並令 $\delta = \delta_m$ 將以上數據代入式 (3.2.13) 計算後得 $v_T = 8.80 \text{ m/s}$ ，即為魚雷發射出管後保持穩定直線運動所需的最小速度。將該速度值代入式 (3.2.12) 求得平衡攻角 $\alpha = 7.45^\circ$ 。

經過計算為了符合魚雷操控性能要求，魚雷初始運動時最小的初始速度值 8.80 公尺 / 秒，當魚雷發射出管後初始速度值如果小於計算值時，會造成魚雷出管後較大的下沉深度。

魚雷出管後航行的速度和操控性與魚雷出管速度有關，根據前蘇聯資料顯示：“魚雷進行深海發射時，在確保魚雷在潛艦出口上運動的安全，魚雷的出管速度需大於魚雷額定航速（魚雷高速航行的速度）的 1/2，經實驗證明：魚雷初始運動時，魚雷的航行深度與預訂深度值偏差 3 ~ 7 公尺以內，可確保魚雷初始運動的安全性和射控系統的可操控性。對艦艇發射管魚雷出管速度則需大於潛艦航速與魚雷額定航速 1/2 之和”。

魚雷出管後，由於出管速度低於魚雷額定速度，再加上魚雷負浮力和縱軸上轉動力矩，可能造成的航行深度偏差。圖 17(a) 中顯示當出管速度過大，魚雷動力系統作動後產生的推力

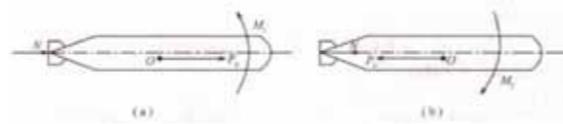


圖 17 魚雷出管後的受合力矩

FT 延滯，通過魚雷質心 O 作用在魚雷的慣性力 F_0 ，形成力矩 M_1 影響魚雷頭上抬；圖 17(b) 則顯示魚雷出管速度過小，魚雷動力系統的推力 FT 作用後，慣性力 F_0 向後，形成了使魚雷頭向下的力矩 M_2 。目前大多數熱動力魚雷或是電動力魚雷，在發射過中魚雷動力系統在管內就啟動了，因此致使魚雷下沉力矩 M_2 最易產生。

依據實際經驗顯示，表 2 為某型魚雷在不同出管速度下魚雷下沉深度的紀錄。當魚雷額定速度 50 節（25 公尺 / 秒），取魚雷額定速度的

表 2 某型魚雷不同出管速度下的魚雷深度誤差（下沉深度）

魚雷出管速度（公尺 / 秒）	12.6	11.9	11.5	11.4	10.4	10.3	10.1	9.8	8.35	7.9	7.88	5.8
魚雷深度誤差（公尺）	2	2.7	4.5	3.5	4.6	6.7	5.4	4	6.6	5.1	4.7	8.2

表 3 各國發射系統魚雷出管速度值

國別	發射系統	魚雷型式	出管速度	備註
美國	汽動不平衡式 WWII 時期潛艦採用	MK14、16 魚雷	16.5 m/s	魚雷為負浮力 350 公斤
美國	MK. 55, 57 自航式 紅魚級 SSN578 潛艦	MK. 37 魚雷	3.05 ~ 5 m/s	
美國	往復泵水壓平衡式 早期洛杉磯級潛艦	各型式魚雷 魚叉、戰斧巡弋飛彈	12 m/s 9 m/s	魚雷為負浮力 武器為正浮力
美國	MK. 68, 69 渦輪泵式 維吉尼亞級、海狼級	MK. 48 魚雷、 水雷及戰術飛彈	13 m/s	MK. 48 魚雷最大發射深度 91 公尺
德國	MAK 自航式	SUT、DM. 2A4 魚雷	6 ~ 6.5 m/s	
德國	液壓蓄能式	魚雷、水雷及戰術飛彈	10 ~ 12 m/s	全作戰深度
義大利	B512 自遊式	A184	7.5 ~ 9 m/s	最大發射深度 300 公尺
中華民國	自航式 + 液壓活塞	SUT、MK. 48 魚雷魚叉攻船飛彈		全作戰深度

1/2 約 12.5 公尺 / 秒，定義魚雷出管速度，此時魚雷下沉深度約為 2 公尺。表 3 列為目前西方國家使用的魚雷管發射系統其魚雷出管速度。

為避免魚雷發射時在初始階段影響到潛艦航行、魚雷和射控系統的操控性⁷，因此魚雷出管時的速度成為魚雷管設計選擇和魚雷選用的考慮重要因素，此因素應包括當潛艦坐底時，魚雷管口距海底深度應大於魚雷離艦後下沉的深度。表 3.1 的資料為某型採用電動力的魚雷，魚雷負浮力約 200 ~ 300 公斤，在不同出口速度下魚雷初管後的下沉深度。當魚雷出管速度 5.8 公尺 / 秒時，出發射管後將下沉 8.2 公尺會影響到射控系統對魚雷的操控，因此一般的重型魚雷出口速度為 12 ~ 14 節（約為 7 公尺 / 秒），以保證魚雷出管後深度變化不超過 7 公尺而引響射控系統對魚雷的操控性⁹。

MK. 48 MOD6 AT 魚雷採用熱動力引擎，負浮力超過 500 公斤，遠大於電力推進魚雷平均 160 公斤的負浮力，因此在出管速度 7 公尺 / 秒時，其深度變化約為 25 公尺，影響到潛艦魚雷最小發射深度需水深超過 50 公尺，也無法在座底時發射魚雷。

（三）魚雷出管後離艦安全性

由圖 19 所示，魚雷離開魚雷發射管口後，尚須在艦艙空艙區內航行一段距離，在這段距離內武器（魚雷或飛彈）因浮力關係開始下沉或上浮，同時魚雷受到水流的沖擊（潛艦艦艙外

殼門已開啟），在水平面上產生左右偏離航向的運動，因此潛艦發射管前端的魚雷通道必須為一錐狀體以避免魚雷在出管時的運動中碰撞艙壁。



圖 18 加拿大 Victoria 級潛艦艦艙間示意圖

假設發射管前圓錐體斜度比 1:18（圖 19）、發射管口至潛艦出口處距離 l_{os} 為 3 公尺， d_g 為發射管口內徑。在圓錐體內潛艦無任何零、組件。

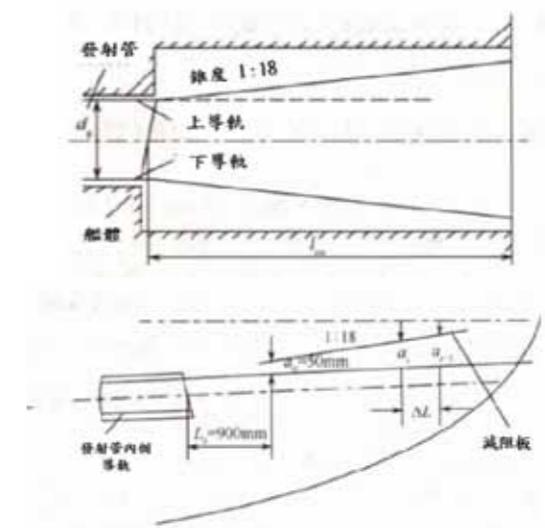


圖 19 發射管前錐狀體錐度

由於魚雷出管後需要穿過艦艙空艙區，因此仍需於此段航行中分析其潛航的安全性¹⁰，假設：

1. 魚雷後端離開魚雷發射管時，魚雷和魚雷發射管縱軸線重合（圖 20），魚雷尾端離管後在負浮力（或正浮力）作用下，開始下沉（或上升），此時魚雷與魚雷發射管軸線保持平衡。
2. 魚雷動力系統推力忽略不計，魚雷沿著發射管軸線方向做慣性運動。
3. 不考慮潛艦航行引起艦艙空艙區流體動力的影響。

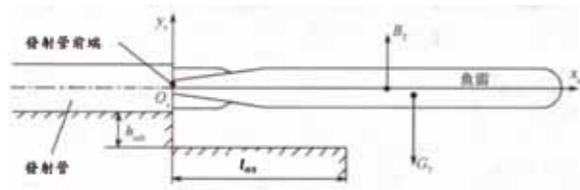


圖 20 魚雷初管穿越艦艙空艙區示意圖

依圖 20 和假設條件，建立魚雷質心運動方程式：

$$\begin{cases} m_T \frac{dv_{Tx}}{dt} = A_x (v_{Tx} + v_{sub})^2 \\ m_T \frac{dv_{Ty}}{dt} = \Delta G - C_y \frac{\rho_h v_{Ty}^2}{2} S_{Ty} \end{cases} \quad (3.2.14)$$

其中： m_T 為魚雷重量； v_{Tx} 為魚雷在縱軸上的運動速度； v_{Ty} 為魚雷下沉速度； v_{sub} 潛艦速度； $\Delta G = G_T - B_T$ ，魚雷負浮力； C_y 魚雷下沉的阻力係數； S_{Ty} 為魚雷縱剖面面積。

若 $t=0$ 時， $v_{Tx}=v_{Tc}$ 、 $v_{Ty}=0$ 、 $x_s=0$ 、 $y_s=0$ ，解式 (3.2.14) 可得

$$\begin{cases} x_s = \frac{m_T}{A_x} \ln \left[1 + \frac{(v_{sub} + v_{Tc}) A_x}{m_T} t \right] - v_{sub} t \\ y_s = \frac{2m_T}{C_y \rho_h S_{Ty}} \ln \left(\frac{1 + e^{\frac{\sqrt{2\Delta G} C_y \rho_h S_{Ty}}{m_T}}}{2} \right) - t \sqrt{\frac{2\Delta G}{C_y \rho_h S_{Ty}}} \end{cases} \quad (3.2.15)$$

範例：假設 $C_y=0.85$ 、 $l_{os}=3$ 公尺、 $v_{Tc}=8.5$ 公尺 / 秒或 12.5 公尺 / 秒時，試計算潛艦速度為零時發射魚雷，魚雷在空艙區的下沉量。

依據式 (3.2.15) 式，試計算當潛艦航速 0 公尺 / 秒時魚雷的下沉量，其結果如圖 3.6 所示。潛艦航速 v_{sub} 對魚雷出管後的下沉量影響不大，魚雷出管速度 v_{Tc} 與潛艦艦艙空艙區長度 l_{os} 應響較大。依範例，設定 $l_{os}=3$ 公尺、 $v_{Tc}=8.5$ 公尺 / 秒，魚雷離艦時最大下沉量為 0.1178 公尺。 $v_{Tc}=12.5$ 公尺 / 秒時，最大下沉量 0.0557 公尺。

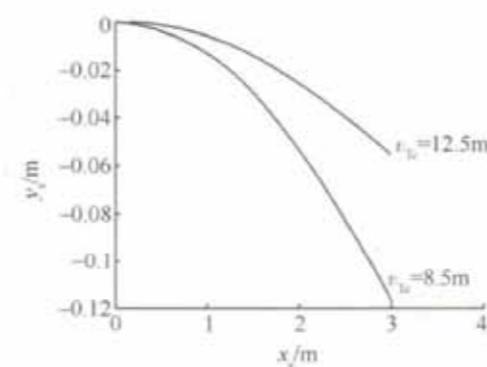


圖 21 潛艦航速 0 公尺 / 秒發射魚雷時，魚雷通過空艙區的下沉量

一般潛艦艦艙空艙區長度小於 3 公尺，依據圖 21 魚雷管前錐度採用 $1:18$ 推算，在長度 3 公尺時期高度變化最大為 0.117 公尺（參考圖 3.6）。因此，魚雷出管速度若大於 8.5 公尺 / 秒則可確保魚雷尾部不會撞擊艙壁。

範例中於雷管出口的空艙區無障礙空間採用椎度 $1:18$ 設計，需考量武器的正 / 負浮力大小、魚雷出管速度等因素。當採用負浮力大、出口速度低的武器時，空艙區無障礙空間的椎度必須放大，以免魚雷因碰撞到艙壁而損壞。

(四) 魚雷發射管形式的選擇

在 2.3 及 2.4 節中述及目前潛艦使用的魚雷發射管型式，當我國設計新一代防衛型潛艦時，必須先行定義潛艦未來將執行的戰術任務、具備符合任務需求的魚雷和各式武器種類，才能依據武器類別、戰術需求，並參考魚雷管發射系統的性能指標，來選定何種形式的魚雷發射管，最後決定潛艦艦艙的艙間配置。表 4 列出各型魚雷管特性、限制條件，以提供潛艦設計時的選擇參考。

表 4 各型魚雷發射管性能比較

水壓不平衡式				
型式	發射動力	優點	缺點	限制條件
高壓空氣魚雷管	高壓空氣	裝置簡單	氣泡隨魚雷出管暴露位置	考量發射魚雷時水深（ ≤ 150 公尺，俄製魚雷管可申智 240 公尺）。需將廢氣回收至艙室。
水壓平衡式				
型式	發射動力			
自航式魚雷管	魚雷本身動力		加裝拋射裝置緊急拋射魚雷	以高壓空氣發射飛彈，需將廢氣回收至艙室發射熱動力魚雷時須將有毒廢氣回收至艙室
往復泵魚雷管	高壓水流			
液壓活塞式魚雷管	高壓水流			
渦輪泵魚雷管	高壓水流			歐、美海軍傳統核動力潛艦魚雷發射裝置，主要發射熱動力魚雷。
液壓機械魚雷管	液壓動力	可依需求設計管徑大小		大管徑（ ≥ 533 毫米），可發射特種武器，供特戰人員進出潛艦
液壓蓄能式魚雷管	液壓動力	噪音低		新一代的魚雷發射管，可減低系統複雜度和運作時的噪音。
彈性蓄能式魚雷管	高壓水流	噪音低 結構簡單	彈性圓盤製作複雜	新一代的魚雷發射管，可減低系統複雜度和運作時的噪音。

目前我國海軍可使用的水下武器有：德製 SUT 魚雷、美製 48 mod 6AT (ADCAP) 型魚雷和潛射魚叉攻船飛彈，武器主要特性為：

1. 德製 SUT 魚雷採用電力推進，導引方式為線導+終端主/被動聲納尋標器。以 35 節最高速度航行時射程達 11km，航速 23 節時射程 26km，採用自航式方式發射。

2. 美製 MK. 48 mod 6 ADCAP 型魚雷採用活塞往復式 OTTO 11 燃油發動機推進，整體噪音比電力魚雷大 (≥ 23dB)。導引系統包含中途線導+主/被動聲納歸向，以 52 節最高速度航行時射程達 18 km，航速 18 節時射程 90 km。採用高壓空氣、水/液壓或渦輪泵方式發射。

3. 美製潛射魚叉攻船飛彈 UGM. 84：飛彈裝載

於直徑 533 毫米、長 6120 毫米的無動力運載器 (圖 22)，在魚雷管內時以高壓空氣或高壓水流提供推力以 9 公尺/秒的速度出管。

熱動力魚雷產生的噪音以低頻音響為主，頻譜十分明顯，噪音傳播距離長。電力魚雷的體積重量多半低於熱動力魚雷，其噪音以高頻音響為主，頻譜連續綿密，聲音傳播距離短、速度快、射程遠的熱動力魚雷適合在大洋中使用。

例如遠距離襲擊具有高速運動能力的敵方核動力潛艦；而電力推進魚雷則由於有較安靜的特性，適合在濱海操作。

目前海軍潛戰隊未來將使用的主要武器為美製 MK. 48 mod 6 AT 魚雷和潛射魚叉攻船飛彈，而現有的劍龍級潛艦海龍、海虎號因為承襲自

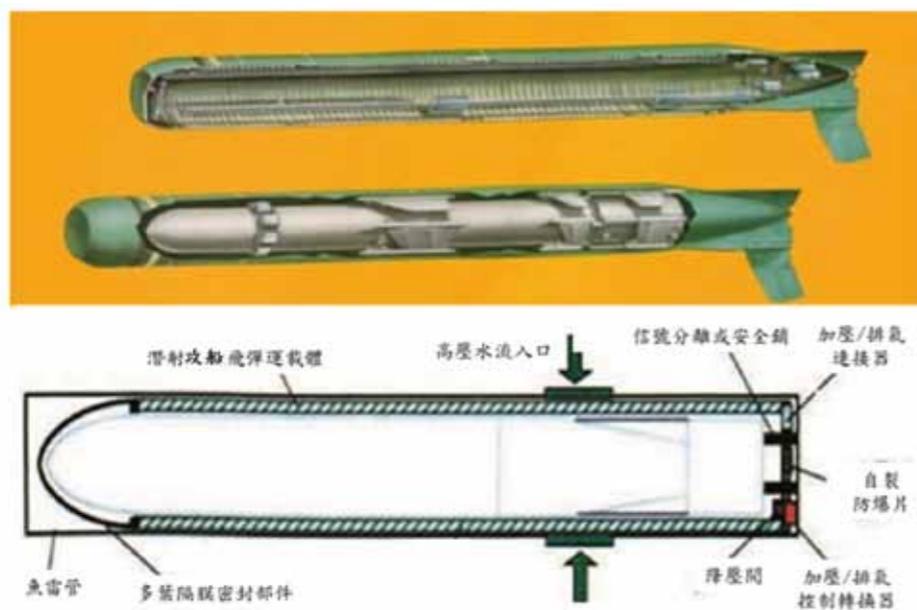


圖 22 UGM. 84 魚叉飛彈採用無動力運載器

荷蘭旗魚級潛艦，採用自航式魚雷發射管，為了發射美製 MK. 48 魚雷和攻船飛彈，因此魚雷管增加了活塞汽缸以推送飛彈、魚雷出管。

參考表 4 各型式魚雷管特性，其中美製彈性蓄能式魚雷發射系統，雖然是採用美式水下武器的最佳選擇，但是彈性蓄能式魚雷發射管仍是發展中的裝置，目前亦僅少量配置於新式核動力潛艦，獲得不易。

綜合前述魚雷、武器特性、魚雷管性能指標、現有魚雷武器型式及未來發展等限制條件考量下，新一代的潛艦設計，建議採用的魚雷管型式為液/水壓推送系統的魚雷管。主要原因為：液/水壓魚雷管發射魚雷時，無高壓空氣傳輸噪音和魚雷熱動力引擎在管內啟動時廢氣排放、回收的問題。而且液/水壓推送系統採用的液壓系統其製作技術應可由國內廠商完成，亦可依實際需求匹配不同的魚雷管管徑，用以發射海軍現有的魚雷、潛射式魚叉攻船飛彈和未來新發展的武器、水下有/無人載具等裝備，俾充分發揮此類型載台不對稱作戰之能力戰力¹¹。

肆、結論

魚雷發射管系統是潛艦設計時主要考量因素，必須依據所擁有的魚雷、水雷、巡航飛彈等武器裝備和戰術需求，先行決定採用的魚雷發射管的型式後，才能進行潛艦設計。在前述章節中就魚雷的性能、射控系統對魚雷的操控性和

魚雷發射管的技術特性等方面，探討新一代防衛型潛艦適用的魚雷發射管型式並提出建議。綜觀潛艦整體的設計，除了從技術觀點上選擇適用的魚雷發射管系統外，更須考量武器發射時所產生的噪音，因為噪音永遠是潛艦的天敵，因此採用先進、低噪音的魚雷管發射系統，是潛艦設計上必須優先考慮的關鍵要項。

參考資料

- 1 Helmut Rademann, Marcel Pantke, "New Developments in Weapon Tube sets and Stowage System", Naval Force Journal, 2011.
- 2 世界潛艦全解剖, 趙伊林、覃榮輝, 電子工業出版社, 2016
- 3 現代潛艦設計理論與技術, 馬運義、許建, 哈爾濱工程大學出版社, 2012
- 4 魚雷管發射系統設計原理, 練永慶、王樹宗等編著, 國防工業出版社, 2012
- 5 徐勤超、練永慶、王樹宗, 自行魚雷發射裝置管體結構參數對內彈道的影響, 彈箭與制導學報, Vol. 31 No. 4, Aug. 2011
- 6 自動飛行控制—原理與實務, 楊憲東, 全華圖書, 2002
- 7 郭關注、王雲, 試論水下魚雷管發射系統研究方向, 艦船科學技術, Vol. 25 No. 3, Jun. 2003
- 8 張振山, 程廣濤, 梁偉閣, 潛艦自航發射魚雷的若干問題, 海軍工程大學學報, Vol. 24, No. 4, Aug. 2012
- 9 (朱清浩、送汝剛, 美國潛艦魚雷管發射系統使用方式初探, 魚雷技術, Vol. 20 No. 3, Jun. 2012
- 10 潛艦設計, 張家成、呂學揚, 中華民國海軍, 1989
- 11 A. 26 傳統動力攻擊潛艦, www.mdc.idv.tw/mdc/navy/euronavy/a26.htm
- 12 GJB 38.17.86 中國潛艦常用標準: 常規動力潛艦系泊、航行試驗規程 魚雷發射裝置。