

專刊暨經驗交流

船、機、螺槳在運航操控性能運用之探討（一）

田文國¹ 苗林華² 簡光輝³

[提要]操縱船舶應以正確操縱主機為前提，不論是輪機員操俾亦或駕駛員遙控主機，而操縱主機則是以主機不超負荷為原則。本文通過對主機超負荷的基本觀念和限制主機負荷的理念為依據，闡述了船舶在各種航行條件下應如何正確操控主機的方法，也是航海員操控船舶必須掌握的基本基礎。

關鍵詞：熱負荷、機械負荷、主機工況、船舶操控

一、序言

在多年來的輪機實務與教學經驗之後，深深體會到訓練有素的航海員有必要掌握主機工作特性與船舶操縱的相互關係的知識，因為實現輪機自動化進而向船舶全面自動化發展的當今，船舶的操縱者會遇到這樣一個新問題：操船者對直接操縱被操控對象的原動力—主機的性能認識的深淺，即便是自動化程度不高的船舶，也很難安全而有效地操縱船舶，特別是航行條件和運行狀態發生變化時以及在緊急情況的避讓操船，應給予船長及航海員提供切實有用的有關機器及螺槳配合工作方面的知識。

船長是船舶操縱者，正確操縱船舶應與以正確操縱主機為前提，傳

統式俾鐘發出俾令由機艙輪機員操縱主機，亦或以遙控俾鐘由駕駛員在駕駛室直接操縱主機，都涉及到主機運行狀況(簡稱工況)變化的問題，正確操縱主機則要求工況的變化在合理的範圍內。所謂合理的範圍表現為：由輪機員操俾，則要求在回俾鐘後，操縱主機以主機不超負荷為原則，儘快達到俾令要求的轉速；而由駕駛員操縱主機，由於駕駛員並不熟悉主機性能，為了防主機超負荷，在主機遙控系統中設有相應的邏輯程序環節，以保證主機按預先設定的操作程序進行操控。

與主機工況變化有關的船舶狀況包括船舶運動狀態改變和阻力變化兩方面，實務工作證實有以下幾種情況：

- (1)船舶進、出港和靠離碼頭時改變速度；
- (2)船舶出港後定速航行，要求船舶從港內全速漸變為海上全速；
- (3)在緊急情況下，為了避碰而要求緊急煞俾(Crash astern)，強迫主機迅速停俾和倒俾；
- (4)遇到大風浪和惡劣天候時，船舶在劇烈的搖擺顛簸中航行；
- (5)船舶在逆風、頂浪、頂流、窄水

道和淺水區域或在輕載、順風、順流等船舶阻力發生變化的情況下航行等等。

二、主機超負荷

柴油機的負荷有功率負荷、熱負荷及機械負荷三方面。主機在各種運轉條件下，要求以上三方面都在最大允許極限範圍之內，只要有一方面超過允許極限，均可稱為主機超負荷。

1、標(額)定船舶主柴油機功率

(1) 標定功率—按船舶建造『規範』標定的額定功率。即在『規範』規定的基準環境條件下，柴油機長期連續運轉所能發出的最大持續功率 (Maximun Continue Rating ; MCR)[註1]，是柴油機在機械強度、熱負荷允許範圍內，能長期連續運轉的最大軸功率，也是柴油機製造廠標稱的名義功率，常用 P_{eH} 表示，相應的轉速稱為標定轉速，常用 n_H 表示。

(2) 運轉功率—又稱常用功率，這是船舶為達到所需要的航速經常持久使用的功率。柴油機裝船後與螺槳配合工作，需考慮實際運轉中存在著偏離基準環境條件、航行條件和船體污穢的變化，以及主機逐漸變舊、技術狀態逐漸下降等因素，為了保證主機在各種運轉條件下均能長期可靠地運轉，新造船舶的主機須留有適當

的功率儲備(Sea Margin)，持續運轉功率(Continue Service Output ; CSO)一般為標定功率的85%~90%。

(3) 過載功率—又稱超負荷功率。是柴油機在超過標定功率下作短時期使用的功率。根據驗船協會船用柴油機標準規定，船用柴油機的超負荷功率為標定功率的110%，並在12小時運轉期內允許超負荷運轉1小時(不冒黑煙)。

2、機械負荷

柴油機在運轉中的機械負荷以力的形式呈現，主要包括燃氣壓力、曲柄連桿機構的慣性力、安裝預緊力以及由振動、變形等引起的加負荷，其中以燃氣壓力和慣性力為主，機械負荷的特點，一是周期交變，二是具有沖擊性。

(1) 柴油機氣缸內燃氣壓力的最大值取決於燃油燃燒時的最高爆發壓力 P_{max} 。爆發壓力過低，使柴油機功率降低；爆發壓力過大，將引起氣缸蓋、氣缸套、活塞、活塞環、機架、曲柄以及所有軸承的負荷增高，使柴油機產生爆震。

(2) 曲柄連桿機構往復變速運動產生的慣性力，其最大值與轉速的平方成正比。轉速超過規定值的20%，慣性力將增加44%。過高的轉速產生更大的慣性力，可能導致連桿螺栓斷裂，並使機器產生較大的振動。

(3)曲軸的扭矩(轉矩)。曲軸在各缸交變燃氣壓力、往復慣性力及離心力作用下產生扭矩和彎矩，使曲軸產生扭轉和彎曲變形、橫向和扭轉振動，並產生交變的機械應力，致使曲轉產生疲勞裂紋，甚至斷裂。

主機的機械負荷主要決定於曲軸所承受的扭轉應力。活塞在燃氣總壓力作用產生的往復運動，經十字頭、連桿、曲柄轉變為曲軸的回轉運動，從而輸出轉矩 M_e ， M_e 使曲軸工作時產生扭轉應力。因為燃氣總壓力的大小是由燃燒最高爆發壓力決定的，所以柴油機所承受的機械負荷的大小可以用燃燒最高爆發壓力和轉速來衡量，而用在各種轉速下長期運轉時產生的轉矩 M_e 必須小於標定功率和標定轉速下的標定轉矩 M_{eH} 來限制。

3、熱負荷

柴油機的熱負荷是燃燒室受熱部件接觸高溫燃氣所引起的，一般用單位面積的熱流量、熱應力或溫度場來表示。

柴油機燃油燃燒所放出的熱量約有20~25%要經氣缸、氣缸蓋、活塞等部件散出，由冷卻水帶走^[註2]。單位時間的傳熱量稱為熱流量。受熱部件的工作面與高溫燃氣接觸而溫度升高，背面被冷卻水冷卻而溫度低，由於兩側表面存在溫度差，材料內部互相制約而不能充份自由變形，使部件內部產生不同程度的應力，這種由溫差作用形成的應力稱為熱應力。

熱負荷過高會使材料的機械性能降低，承載能力下降；使受熱部件膨脹，局部在高溫下產生『潛變』(Creep)，繼而產生塑性變形；改變原來的工作間隙、破壞潤滑效果；受熱部件單位面積熱流量過大會引起過熱而損壞，諸如活塞冠和氣缸蓋底面被燒蝕、排氣閥被燒蝕、氣缸和活塞過熱刮缸或甚致熱裂；燃燒室部件在交變的熱應力作用下產生熱疲勞破壞等等。

在正常情況下，柴油機的循環噴油量增加時，熱負荷也相應提高，表現在燃燒室部件的溫度和排氣溫度都升高。因此，柴油機通常採用排氣溫度來判斷負荷的高低，用排氣溫度最高值作為限制熱負荷大小的標準。

4、防止主機超過負荷的概念

主機在運轉中，因超過負荷使熱部件特別是包括氣缸套、活塞、活塞環及排氣閥等發生故障而停俾，必然會危及船舶航行安全，因而要對使用中的主機負荷加以必要的限制，既要防止超轉速，也要防止超熱溫。既要防止超功率，也要防止超扭矩。

三、限制主機超負荷的概念

限制主機超負荷的依據涉及到柴油機的運轉特性，相關的有以下幾種：

1、推進特性

柴油主機與螺槳直接相連，如果

不考慮軸系的功率損失，那麼在全轉速範圍內，主機發出的功率應與螺槳所吸收的功率相等。由於螺槳所吸收的功率 P_b 與其轉速 n_b 的三次方成正比($P_b=Cn_b^3$)，螺槳的特性曲線是一條近似的三次方拋物線，如圖1中曲線5所示，所以主機帶動螺槳工作，其功率隨轉速變化的規律也就按螺槳特性的規律變化，即 $P_e=P_b=Cn_b^3$ ，主機的這種特性稱為柴油機的推進特性曲線。圖1中曲線5也是主機的推進特性曲線。按推進特性，主機在各種轉速下對應的功率百分數如下表1所示。

當主機與螺槳配合後，主機速度特性曲線與螺槳特性曲線的相交點就是機、槳配合的工況點。如圖1所示，將主機油門調節桿固定在標定供油量位置時，主機按全負荷速度特性工況與螺槳特性曲線相交點a為標定工況點。同理，將油量調節桿固定在小於標定供油量位置時，相應工況點為b、c；a、b、c各點實際上是表示油量調節桿設在不同位置時主機帶動螺槳所發出的功率和轉速。

2、速度特性

柴油機的速度特性是在柴油機製造廠試俾台上測定的。根據噴油泵的油量調節固定位置不同，即機器每循環供油量不同，柴油機的速度特性可

分為全負荷速度特性、超負荷速度特性和部分負荷速度特性三種。

測定時，柴油機先開空俾，並逐漸增速至額定轉速，然後通過測功器逐漸加大外負荷，同時相應地加大油門，使柴油機在標定轉速下發生標定功率和標定轉矩(此時的工況稱為標定工況)。然後將油門調節桿固定，逐漸增加柴油機的外負荷以降低轉速，使柴油機在標定轉速和最低穩定轉速之間的各種不同轉速下穩定運轉。把測得柴油機在各轉速下所發生的功率、轉矩等性能參數，繪製成以性能出力參數為縱作標，轉速為橫作標的性能參數隨轉速變化的關係曲線，即為全負荷速度特性曲線，如(圖1)中曲線2所示，點a為標定工況點。採用上述相同的方法，將噴油泵油量調節桿固定在超負荷功率($110\%P_{eH}$)和相應轉速($103\%n_H$)的位置上，測得性能參數隨轉速變化的關係，稱為超負荷速度特性，如(圖1)中曲線1所示。如果在標定轉速下將油門調節桿分別固定在小於標定供油量的各種位置上，依次測得性能參數隨轉速變化的關係，即為部分負荷速度特性，如(圖1)中曲線3、4所示。

表1 主機轉速對應的功率百分數比

轉速n%	100	103	90	80	70	60	50	40	30	20
功率 P_e %	100	110	72.9	51.2	34.3	21.6	12.5	6.4	2.7	0.8

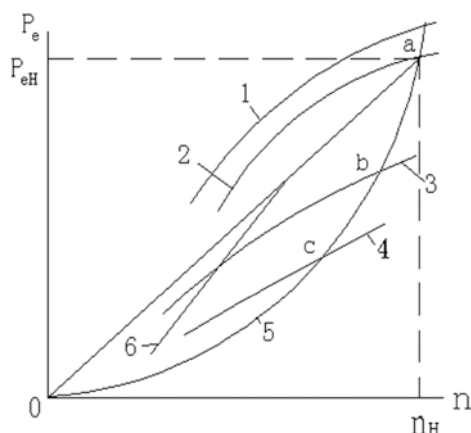


圖1 柴油機特性曲線：1-超負荷速度特性曲線；2-全負荷速度特性曲線；3、4-部分負荷速度特性曲線；5-推進特性曲線；6-等排氣溫度限制線；0a-等轉矩限制特性線

3. 柴油機的限制特性

柴油機的限制特性是指柴油機在運轉中的功率負荷、機械負荷和熱負荷的最大允許極限，亦即限制柴油機在各種轉速下運轉最大有效功率 P_e ，使柴油機的機械負荷和熱負荷不超出規定的允許範圍。上述柴油機的全負荷特性實際上是對柴油機在各種轉速下功率一種限制特性。當柴油機在全負荷特性曲線2以上持續工作時則肯定超負荷，但按全負荷速度特性曲線2工作時，卻並不能保證不超機械負荷和熱負荷。

(1) 機械負荷的限制：如前所述，只要柴油機在各種轉速下運轉時曲軸所傳遞的扭矩 M_e 不超過標定轉矩 M_{eH} 就認為柴油機曲軸不超機械負荷。根據 $M_{eH} = \frac{P}{2\pi n / 60} = 9550 \frac{P}{n_{eH}}$ 可知，在 M_{eH} 不變的情況

下，功率與轉速呈直線關係，所以轉矩限制特性在 P_e-n 圖中是一條原點與標定工況點相連的直線，如圖1中oa所示。柴油機運轉工況點處在oa以下都不會超機械負荷。

(2) 熱負荷的限制：對於增壓柴油機，一般當轉速降低至標定轉速的85%左右以下時，如果噴油量仍然很大，也就是柴油機處在低轉速大負荷的條件下工作，此時，由於增壓機的廢氣渦輪得到的總的廢氣能量減少，增壓機轉速下降，掃氣壓力降低，供氣量不足，會引起嚴重燃燒不良和排氣溫度升高，造成氣缸過熱以及廢氣渦輪葉片損壞等現象，因為廢氣渦輪的葉片不能承受過高的溫度，因此在討論增壓柴油機熱負荷時，常以排氣溫度作為限制條件。等排氣溫度限制線如(圖1)中線6所示。

綜上所述，在討論主機工況與船舶操縱的內在關係時，為了簡化論述，可以粗略地用轉矩 M_e 和循環噴射供油量(表示平均有效壓力)分別表示柴油機曲軸的機械負荷和氣缸熱負荷。例如當柴油機的負荷超過全負荷(標定供油量)速度特性曲線長期運轉時，將使燃燒過程惡化、排氣溫度升高，氣缸熱負荷超過允許值；而當柴油機負荷超過等轉矩限制線時，曲軸所承受的扭應力(機械負荷)可能超過許可值。只有當柴油機同時在這兩條

特性線以下工作，才能使熱負荷和機械負荷都不超過許用值。

4、進程比 λ_p 對機、槳配合的影響

進程比 $\lambda_p = h_p/D = V_p/nD$ 是表示

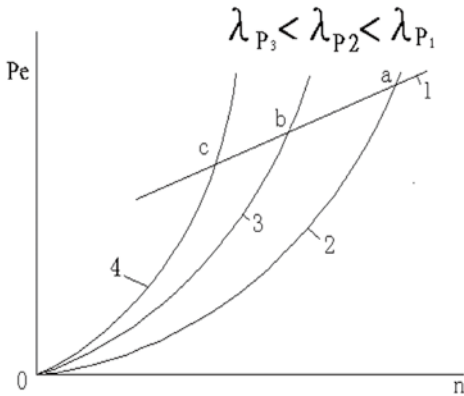


圖2 不同 λ_p 對機器與螺槳配合的影響：
1-某負荷速度特性曲線；2、3、4不同 λ_p 值的螺槳特性曲線

螺槳運動狀態的參數，它的大小直接反映螺槳的負荷變化。當船舶穩定航行時，只要航行條件不變， λ_p 就為定值，就可以得到一條螺槳特性曲線，而且不論船舶穩定在那一航速，機、槳配合點只能沿一條螺槳特性曲線變化。一旦船舶航行條件發生變化，那麼由於航速在變化， λ_p 必然也在改變，不同的 λ_p 值就有不同的螺槳特性曲線，而且 λ_p 越小，特性曲線就越陡。圖2示出不同 λ_p 值的螺槳特性曲線，以及對機、槳配合的影響。圖中點a、b、c是主機在同一負荷下 λ_p 值不同時的機器與螺槳配合點。

四、在各種航行條件下正確操縱主機

由於船舶所處運轉狀態和自然條件的改變，主機的運轉情況亦將發生相應的變化。在各種不同情況下，應如何正確操縱或遙控主機，對防止主機發生故障，延長主機使用壽命，以及掌握船舶控速性能具有實際的意義。

由於不同的主機與所選配的螺槳的工況點不盡一致，為了使分析問題方便和清楚起見，假設以船舶滿載靜水全速航行，即主機於額定工況下運行的的工作點作為正常航行時機、槳配合的工作點。

1、船舶阻力變化時轉速的控制

根據船舶推進理論可知，船舶阻力增大時，如果主機負荷不變(即油門開度不變)，則船速將下降，進程比 λ_p 也將減小，螺槳特性曲線向左移動；反之，阻力減小時， λ_p 增大，螺槳特性曲線向右移動。如圖3所示。

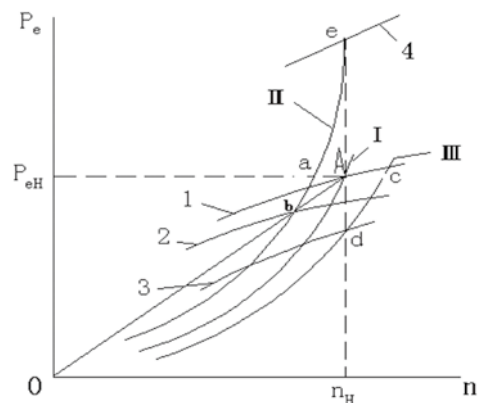


圖3 阻力變化時的配合特性：I、II、III不同 λ_p 時的螺槳特性曲線

《未完待續》