中国水产学会
学术年会论文

船舶推进计算机辅助设计的数值计算

林瑞锵　　陈文生

厦门水产学院

1987·3·

Mathematical Calculation Method of Propeller In Microcomputer CAD Technic

Xiamen Fishery College
Lin Ruiyong & Chen Wenshong

ABSTRACT

This article puts the stress on the mathematical models which express the two kinds of characteristic curve atlas, one of which is for AU-type propeller characteristic curve and an other is for shipping effective horsepower calculation which is known as simple and easy method. These mathematical models are extremely needed in shipping propeller design calculation by CAD technic.

This article also gives a brief introduction for calculating proceed which is realized by means of microcomputer CAD. These calculation inclusive many terms such as shipping effective horsepower, design speed, checking of propeller cavitation, elemental parameters coordination, and so on.

The mathematical calculation programme is exploited by microcomputer IBM PC and TRS-80 with chinese printed

operation system. That the precision and speed are satisfied have be proved running programme practice. It may be recommended for propeller calculating software for chinese small and medium shipyard CAD.

摘　　要

本文着重介绍著者为AU型螺旋桨设计图谱及中小型船舶常用的《渔船有效马力快速计算图谱》〔1〕所建立的数学模型，並简述应用微型计算机进行船舶推进辅助设计。数值的应用软件在IBM PC/XT 微型计算机汉字系统上进行了开发。实践证明，其数值计算的精度是比较满意的。它可提供国内造船厂作为中小型船舶AU型螺旋桨推进设计数值计算的应用软件。

一、概述：

在船舶推进设计中，需要进行相当数量的计算，诸如有效马力的估算，航速的确定，螺旋桨直径及盘面比的计算，空泡校核，以及螺旋桨外型尺寸计算等等。应用计算机进行船舶的辅助设计，简称船舶工程CAD（Computer Aided Design for Ship Engineering)中，上述船舶推进的计算机数值计算，是船舶工程CAD的组成部分之一〔2〕。

船舶推进数值计算的任务是充分地应用计算机数值计算的功能，在计算机CAD工作站上，应用推进数值计算的软件，实现从原始数据输入后，进行整套设计计算，以至最后输出设计结果等全自动化的过程。船舶推进计算机数值计算的运用，彻底改变了传统的查图谱曲线，手工计算等原始设计的手段和方法，使设计人员从人工繁烦的劳动中解放出来，使整体设计计算仅在计算机辅助工作下快速且精确地完成，这样就可以充分地发挥设计人员在应该把关

的决策性方案上的主动作用，保证设计任务优质地完成。本文研究的实践证明了这点。为了便于在中小型造船厂推广和应用船舶推进设计数值计算的软件，拟在用户易于装备的微型计算机汉字系统上进行软件开发。

要实现上述数值计算的任务，首先要建立推进设计中所采用的有关图谱及特性曲线的数学模型，即以相应的数学模型替代图谱曲线。然后，依据图谱曲线的数学模型编制数值计算的源程序。推进设计中，所应用的图谱曲线甚多，如有效马力估算图谱，螺旋桨敞水性征曲线图谱，空泡限界限图谱等。经验证明，应用回归分析技术可以相当满意地完成上述图谱曲线的拟合任务。本文所建立的数学模型亦应用此拟合方法，为了保证图谱曲线数学模型的精确性及简洁的型式，选用了多元非线性逐步回归分析的技术〔3〕。

以下将分别阐述本文所推荐的数学模型，并扼要地分绍软件编制的一些技术细节。

二、船舶推进工况数值计算的数学模型

众所周知，船舶螺旋桨推进器发出的有效推马力 $P_{T\ E}$ 等于船舶有效马力 P_E 时，船舶即以某一航速 V_S 作等速航行。船舶 P_{TE}—V_S 曲线与 P_E—V_S 曲线的交点，即为船舶推进工况（或称航行工况）的工作点。推进工况数值计算的任务是依据推进设计所采用图谱曲线的数学模型，编制数值计算的源程序，通过计算机数值计算，求解此推进工况的工作点。

显然，推进工况数值计算中，建立有关图谱的数学模型是数值计算的基础工作。

此为试读，需要完整PDF请访问：www.ertongbook.com

1。有效马力估算的数学模型

有效马力P_E系指船舶主机为克服船舶阻力所消耗的功率，也是主机功率的有效利用部分。影响船舶有效马力P_E的因素很多，可以扼要地以下述函数关系式来表述：

$$P_E = f(\text{船型，航速})$$

目前可供计算的船舶有效马力估算图谱资料已有多种〔4〕。并且有些已经建立了其数学模型。例如，日本水产厅水产研究所渔船工学部船舶工学院博士土屋孟建立了新的有效马力估算法——土屋孟公式（M·Tuchiya 公式）〔5〕。该模型建立了采用换算排水量为300吨船舶总阻力系数γ_{300}，然后利用γ_{300}和体积傅汝德数$F_{n\nabla}$计算任意排水量下实船的有效马力P_E，据介绍说明，该模型估算结果比较满意，但速度范围受限制在$F_{n\nabla}$=0·45~0·80区间。此外，苏联的兹万科夫法数学模型〔6〕。此模型对内海船舶及B/T大的船舶均可适用。我国对长江钢质货驳船的阻力，依此模型进行了修正。还有其他的有效马力估算的数学模型等。目前，中小型船舶常用的有效马力估算图谱之中，有日本伊藤的渔船有效马力快速计算图谱，该图谱的适用范围为：L＝20－50米，但尚未建立该图谱的数学模型。

为使推进设计数值计算软件具有较大的适应性，本研究考虑在有数马力估算数值计算时可选用三种有效马力估算数学模型的可能性，即可据设计者意向，选用土屋孟法或兹万科夫法，或且伊藤法。即数值计算软件中提供了三种计算方式的选择开关。

以下介绍作者为伊藤图谱建立的数学模型。

应用该图谱时，有效马力的计算式为：

$$P_E=(E_0+e)\triangle\sqrt{L}$$

式中，$\triangle$为排水量，L为垂线间长，E_0为有效马力系数，以及e为马力修正系数。

且 $E_0=f(F_n, \nabla/(L/10)^3, C_p, B/T)$

$$e=K_L K_V\sqrt{\triangle}$$

其中，∇——排水体积，称 $\nabla/(L/10)^3$ 为排水体积长度比；B/T 为型宽吃水比；以及 C_p 为棱形系数。

此外，$F_n=V_S/\sqrt{gL}$　　傅汝德数

$K_L=f(L)$　　船长修正系数

$K_V=f(F_n)$　　速度修正系数

作者曾试图作出上述 $E_0=f(F_n, \nabla/(L/10)^3, C_p, B/T)$ 函数关系的综合回归表达式，但由于有效马力系数图谱曲线的函数关系较为复杂，可能得到的综合回归表达式的拟合误差较大，所以在数学模型建立时，采用了B/T=const及Fn=const时有效马力系数$E_0=f(\nabla/(L/10)^3, C_p)$的模型。为此，当要求得到某一确定的B/T及$F_n$的$E_0$时，要辅以二元插值。从而保证了数值计算精度。

有效马力系数E_0的数学模型，当B/T=const以及F_n=const时，可采用以下的回归表达式来表征。

$$E_0=a_0+a_1X+a_2Y+a_3XY+a_4X^2+a_5Y^2 \qquad (1)$$

式中，$X=\ln\left[\nabla/(L/10)^3\right]$　　$Y=\ln(C_P)$

不同的型宽吃水比B/T及傅汝德数F_n的（1）式的回归系数、相关系数列于表1所示。

对船长修正系数$K_L=f(L)$的回归表达式，可写为：

$$K_L=0\cdot 264037+9\cdot 96411\times 10^{-3}L+63720\times 10^{-4}L^2 \quad (2)$$

对速度修正系数　$K_V=f(F_n)$　可写为：

$$K_V=1\cdot 1467\times 10^{-3}+3\cdot 55967F_n^3-2\cdot 42138F_n^2 \quad (3)$$

或$K_V=2\cdot 73F_n^{2\cdot 825}$　[1]　(32)

2、有效推马力P_{TE}数值计算的数学模型

船舶的有效推马力来自主机发出的功率P_S，並且还取决于轴系传送效率η_S，齿轮箱减速装置的效率η_G，螺旋桨的敞水效率η_o，相对旋转效率η_R，及船身效率η_H，或可写成：

$$P_{TE}=P_S\eta_S\eta_G\eta_o\eta_R\eta_H$$

其中，η_S，η_G，η_R及η_H可由经验统计资料取得。而螺旋桨的敞水效率η_o系由螺旋桨敞水性征曲线决定。对于几何形状一定的螺旋桨而言，敞水性征曲线已由螺旋桨的敞水试验建立，并绘成了图谱[1]，[7]。

综上所述，在有效推马力P_{TE}数值计算中，关键的数值计算技术之一是为螺旋桨敞水性征曲线图谱建立其数学模型。敞水性征曲线图谱的数学模型不仅是数值计算有效推马力所必需的，而且在螺旋桨设计的空泡校核及螺旋桨要素的决定中所必备的。

应用多元非线性逐步回归法所建立的A U型螺旋桨敞水性征曲线谱[1]的数学模型介绍如下：

A、最佳工况（最佳敞水效率）的敞水性征。

（i） 最佳敞水效率$\eta_{o.oP}$与收到功率系数B_P之关系，即

$$\eta_{o.oP} = f(B_P)$$ 的数学模型

此模型可应用以下多项式来表征：

$$\eta_{o.oP}=a_0+a_1X+a_2X^2+a_3X^3+a_4X^4+a_5X^5 \qquad (4)$$

式中：$X=\sqrt{B_P}$

同理：

（ii） 螺旋桨螺距比$(H/D)_{oP}$与收到功率系数B_P的关系，即

$(H/D)_{oP}=f(B_P)$ 的数学模型

$$(H/D)_{oP}=a_0+a_1X_1+a_2X_2^2+a_3X_3^3+a_4X_4^4+a_5X^5+$$

$$a_6(1/X^2)+a_7[1/EXP(X)] \qquad (5)$$

（iii） 直径系数δ_{oP}与收到功率系数B_P的关系，即

$\delta_{oP}=f(B_P)$ 的数学模型

$$\delta_{oP}=a_0+a_1X+a_2X^2+a_3X_3^3+a_4X_4^4+a_5X_5^5 \qquad (6)$$

对于AU3及AU4型螺旋桨各系列盘面比的以上三个数学模型的回归系数及相关系数见表2所示。

B、一般工况（指非最佳敞水效率情形）的敞水性征

经逐步回归分析，得出以下诸数学模型：

（i） 敞水效率η_O与收到功率系数B_P及直径系数δ的关系，

$\eta_o = f(B_P, \delta)$ 的数学模型

令 $X = \ln(\sqrt{B_P})$ $\quad Y = \ln(\delta)$

$$\eta_o = EXP(a_0 + a_1 X + a_2 Y + a_3 X^2 + a_4 XY + a_5 Y^2) \quad (7)$$

(11) 螺距比(H/D)与收到功率系数B_P及直径系数δ的关系，$(H/D) = f(B_P, \delta)$的数学模型，亦有

$$(H/D) = EXP(a_0 + a_1 X + a_2 Y + a_3 X^2 + a_4 XY + a_5 Y^2 \quad (8)$$

对于AU3及AU4型螺旋桨各系列盘面比的以上二个数学模型的回归系数及相关系数列于表3。

三、螺旋桨空泡校核设计数值计算的数学模型

空泡校核乃是螺旋桨设计中所必需考虑的重要环节之一。空泡校核的方法很多，本文仅介绍常用的柏利尔限界线法进行空泡校核的数学模型。

众所周知，柏利尔根据各类船舶螺旋桨特性的统计资料，提出了校核空泡的限界线，即$\delta_o - \tau$ 柏利尔空泡校验图。

应用回归分析法建立的柏利尔空泡图$\tau = f(\delta_o)$关系的数学模型，可表述如下：

1、对一般商船

$$\tau = 0.0210812 + 0.565773\delta_o - 0.333061\delta_o^2 + 0.0592869\delta_o^3 \quad (9)$$

(相关系数 $R = 0.997939$)

2、拖网渔船

$$\tau = 0.0523036 + 0.25756\delta - 0.0744048\delta_o^2 \quad (10)$$

（相关系数　R＝0·999764）

3、拖船

$$\tau=0\cdot066562+0\cdot1769536_0^2-0\cdot0413687\sigma_0^3 \quad (11)$$

（相关系数　R＝0·999363）

並且，通过空泡校核的不发生空泡的最小桨叶投射面积A_P，与实际伸张面积A_0，螺距比（H/D）的关系，所以由统计分析面得出经验关系式：[7]

$$A_0 = A_P/[1\cdot067-0\cdot229(H/D)] \quad (12)$$

或者，实际盘面比a_0与投射盘面比a_P，螺旋比（H/D）的关系式，$a_0 = f(a_P, H/D)$所用以下回归式来表述：

$$a_0=0\cdot0118366+0\cdot939242a_P-0\cdot0627344(H/D)+$$
$$+0\cdot243878a_P(H/D)+0\cdot0577735(H/D)^2 \quad (13)$$

（相关系数　R＝0·999112）

四、推进数值计算的程序流程及编程技术

船舶拖进数值计算的任务是在船舶主尺度，船型系数，以及动力装置已知条件下，运用计算机数值计算，确定船舶的有效马力，船舶航行特性，及进行螺旋桨的设计数值计算。

上述船舶有效马力系数，螺旋桨敞水性征以及空泡校核的数学模型的建立，为船舶推进计算机辅助设计的数值计算提供了编程的基础。

推进计算机数值计算的进程整体大致分为五个部分。

首先是原始已知设计数据的输入，它的任务是将原始数据输入

此为试读，需要完整PDF请访问：www.ertongbook.com

微型机内存，作为数值计算的原始数据。数据的输入采取人机对话的方式，以方便数据的输入並减少数据输入的错误。同时，为了提供修改数据的方便，将输入原始数据记入磁盘，使之可以在必要时将它调至内存，方便地抽查或修改输入的任意项。

第二部分为在已知船型，螺旋桨类型（可分为三叶AU3型或四叶AU4型）的条件下，确定船舶航行的有效马力、航速、各系列螺旋桨盘面比、最佳直径等螺旋桨设计要素。程序中提供了多功能的数值计算类型选择的开关。诸如：可采用三种船舶有效马力估算法（土屋盃法，伊藤法及兹万科夫法）；二种螺旋桨叶型（AU3 型及AU4型）；单螺旋桨或多螺旋桨（数目不限）；按最佳螺旋桨直径或据尾部线型限制而选用合适的螺旋桨直径；选用不同的螺旋桨制造材料（铸铁或黄铜等）。通过这部分数值计算得出的各系列盘面比下的螺旋桨的直径（按最佳工况设计时），直径系数，螺距比及敞水效率等，为空泡校核数值计算做好准备。数值计算中应用了二元插值、两分法等数值计算方法。[8]

第三部分是进行空泡核校，目的是确定满足不发生空泡条件下的最小盘面比a_0及相应的螺距比H／D，直径系数δ（当螺旋桨直径为待定时），敞水效率η_0，航速V_S，以及有效推马力等。程序中提供了可应用于一般商船，拖网渔船或拖船等空泡校核的数值计算的选择开关。

第四部分是计算螺旋桨桨叶剖面厚度，提径及桨叶外型尺寸，以提供螺旋桨计算机辅助绘图的技术数据。这部分还包括了螺旋桨的强度及重量计算等。

第五部分是输出数值计算的结果。为适用于在国内船厂推广使用，提供具有汉字注译的数值输出。

整体船舶推进计算机辅助数值计算的简要流程示于图1及图2

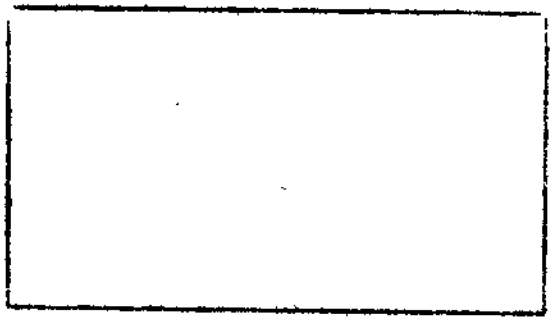

图1　船舶推进数值计算总流程图

(1) 原始数据输入记盘　　(2) 原始数据修改记盘

(3) 推进数值计算　　(4) 结果输出

(5) 结束

R_1 ——从磁盘读出原始数据　W_1 ——原始数据写入磁盘

R_2 ——从磁盘读出计算数据　W_2 ——计算数据写入磁盘

图2　推进数值部分的程序流程简图

注：计算方式选择包括以下选择项目

(1)船舶类型　　(4)螺旋桨数目

(2)有效马力估算法　(5)螺旋桨直径（按最佳或选定）

(3)螺旋桨类型　　(6)螺旋桨材料

五、结论

AU型螺旋桨由于它的敞水效力较高，近年来已被广泛地采用，应用计算机辅助设计技术进行推进设计数值计算具有实用价值。推进数值计算技术的应用，完全改变了传统的推进设计手工作业法，使设计仅在计算机数值计算软件的控制下自动化且快速地完成。本研究的数值计算软件应用的实践证明，其数值计算的速度是相当满意的。以AU3型单螺旋桨为例，数值计算总机时仅约需 8 分钟时间（其中，原始数据输入占用2分钟，数值计算占用1·5分钟，结果打印输出占4·5分钟）；对双螺旋桨情况，亦约只需16分钟时间即可以完成。也就是说，用传统手工设计计算法进行需花费20—30工时的工作量，而应用计算机数值计算技术，可以使之在十几分钟内完成。如此，就可以让推进设计技术人员腾出主要的精力发挥在应该把关的关键性决策方案上的主动作用，保证整体设计优质地完成。

数值计算的关键技术之一是建立有关图谱曲线的数学模型，以供编制程序之用。桨径图谱曲线的数学模型不是唯一的，但必须且有一定的计算精度及尽可能地采用简洁的模式〔9〕。本文应用多元非线性逐步回归分析法所建立的诸数学模型，它们分别为多项式或二次型的型式。由于其拟合的回归相关系数均相当高，实践证明，

其推进数值计算的精度是可以保证的，一般情况下数值计算误差不超过2%。並且，数值计算技术的应用完全避免了由于手工计算过程的任何不慎而招致的计算错误，尤其适应于设计经验不足的人员使用。

应用IBM PC/XT 微型计算机汉字系统开发出的船舶推进数值计算程序，为用户提供了微机汉化软件，便于推广使用。它可提供国内造船厂作为中小型船舶推进设计数值计算的应用软件。

本文不妥之处，欢迎指正。

参考文献

1.山东省水产局：中小型船舶螺旋桨设计及有效马力估算图谱。

2.杨栖等编著：计算机辅助船舶设计，上海交通大学出版社，1985

3.中国科学院数学研究室数理统计组：回归分析方法，科学出版社，1975.

4.伊绍林：船舶阻力，国防出版社，1985.12

5.章可昊：新的有效马力估算法——土屋孟公式（M.Tsuohiya公式），渔业机械仪器，1986.1.

6.长江船舶设计院：内河船舶设计手册（船体分册），人民交通出版社，1977.

7.王国强、盛振邦：船舶推进，国防出版社，1985.2.

8. Brice carnahan and James O.wiles : Digital Computing and Numerical Methods , John Wiley and Son , Inc, NewYork , 1976.

9.近藤次郎著：数学モデル现象の数式化，丸善株式社会，1977.3