

国外航空母舰主尺度与航速关系的回归分析

宗智^{1,2} 毕俊颖¹ 吴启锐³

1 大连理工大学 船舶工程学院, 辽宁 大连 116024;

2 船舶与海洋工程辽宁省高校重点实验室, 辽宁 大连 116024;

3 中国舰船研究设计中心, 湖北 武汉 430064

摘要: 采用回归方法研究国外航空母舰航速和主尺度的关系。根据傅汝德数、排水量和动力的分类, 分别给出国外各种类型航空母舰的航速预报经验公式, 并进行方差和测量熵的分析, 提出在各种情况下最佳使用公式的建议。

关键词: 方差; 测量熵; 航速; 回归; 航空母舰

中图分类号: U661.32⁺3

文献标识码: A

文章编号: 1673-3185(2007)04-14-05

Regression Analysis on the Relationship Between Main Dimension and Speed for Aircraft Carriers

Zong Zhi^{1,2} Bi Jun-ying¹ Wu Qi-rui³

(1 School of Naval Architecture, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China;

2 Liaoning Provincial University Key Lab for Naval Architecture and Ocean Engineering, Dalian 116024, China;

3 China Ship Development and Design Center, Wuhan 430064, China)

Abstract: The relationship between the speed and main dimension of aircraft carriers were studied with the regression analysis method. The empirical formulas for predicting speed of several foreign carriers were given respectively based on the category of Froude number, displacement and power. And the variance and measured entropy were analyzed, which revealed the most suitable regression formulas for each kind of aircraft carrier.

Key words: variance; measured entropy; speed; regression; aircraft carrier

1 引言

在舰船的初步设计阶段, 需要根据舰船的主尺度估算航速, 或者根据航速要求, 估算舰船的主尺度^[1,2]。其中, 使用的方法之一就是经验公式。在过去的研究中, 根据实船的统计资料, 建立了一些经验回归公式, 比如巴士久宁公式、艾亚公式、杰克公式、诺吉德公式等可供使用。然而这些公式对于预报航空母舰(以下简称“航母”)航速或者主尺度是不适宜的。

根据国外已有的航母的相关数据, 本文研究了预报航母航速的经验公式。数据分析表明, 目前的航母都是中、高速舰船。针对航速、排水量和动力, 分别给出国外航母航速和主尺度的艾亚回归公式、多项式统计回归公式和三维统计回归公式, 并给出各公式的

回归方差。

2 方法

分析国外航母的数据, 发现其分布不规则, 所以通过分类对航母数据进行回归拟合。在船舶工程研究中, 一般应用航速的无量纲参数, 这里使用傅汝德数, 即

$$Fr = \frac{v_s}{\sqrt{gL}}$$

式中, v_s 为航速, m/s; g 为重力加速度, m/s²; L 为船长, m。

2.1 根据傅汝德数进行分类

一般水面排水型的舰船根据傅汝德数可以分为低速船($Fr < 0.18$)、中速船($0.18 < Fr < 0.30$)和高速船($Fr > 0.30$)三种。

收稿日期: 2007-06-15

作者简介: 宗智(1964-), 男, 博导, 教授。研究方向: 船舶与海洋工程。E-mail: zongzhi@dlut.edu.cn

根据数据分析,发现航母的傅汝德数基本在0.18以上,所以航母属于中、高速舰船。在本文中,以 $Fr=0.30$ 作为分界点,将航母分类为中速航母、高速航母,对其快速性分别进行回归分析。

2.1.1 中速航空母舰

1) 艾亚公式回归

通常,艾亚公式适用于一般民船以及 $L_{bp}=120\sim140\text{ m}$ 的商船,表示长度、排水量与航速之间的关系。其形式为:

$$\frac{L}{\Delta^{1/3}} = 3.344 + 10.225Fr$$

式中, L 为垂线间长, m; Δ 为排水量, t; Fr 为傅汝德数。根据已有航母的相关数据,希望找到类似艾亚公式形式的航母“艾亚”公式。

根据数据分析,得到中速航空母舰的“艾亚”公式为:

$$\frac{L}{\Delta^{1/3}} = 13.323Fr + 4.070$$

式中, L 为舰的全长, m; Δ 为排水量, t; Fr 为傅汝德数(以下回归公式中相应的变量及单位以此处为准)。将实际数据和回归公式所得线段比较,如图1所示。

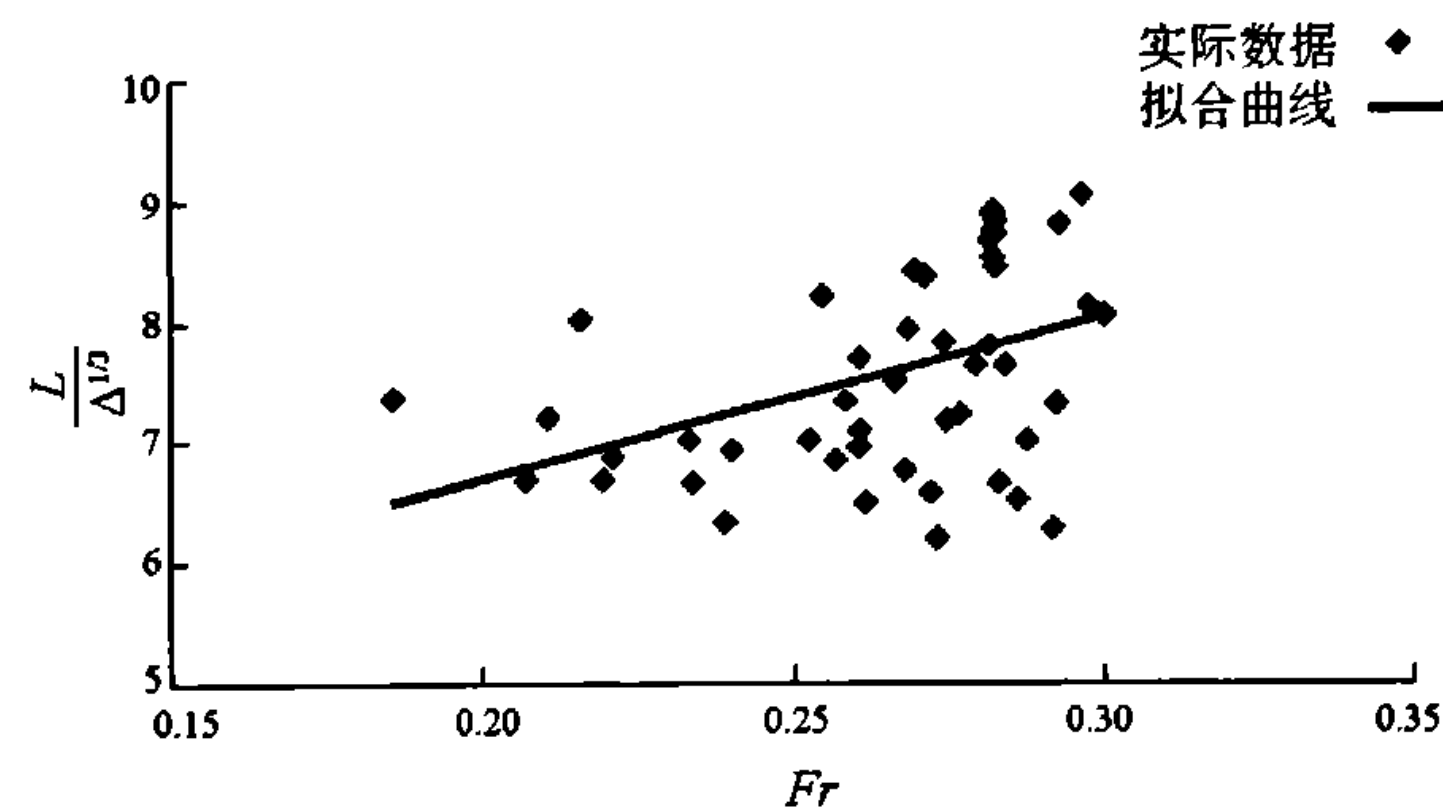


图1 中速航母的艾亚公式回归比较

为了精确地分析回归公式与实际数据之间的拟合程度,对其进行方差分析,即求实际数据点与回归公式对应点的平方的平均数,得到的数值为0.569。

2) 多项式回归

同样,对中速航母的全长、排水量与航速进行多项式拟合,即对 $\frac{L}{\Delta^{1/3}}$ 和 Fr 进行多项式分析,得到的多项式为:

$$\frac{L}{\Delta^{1/3}} = 222.06Fr^2 - 97.72Fr + 17.747$$

回归公式所得估计值与实际数据之间的方差为0.539,如图2所示。

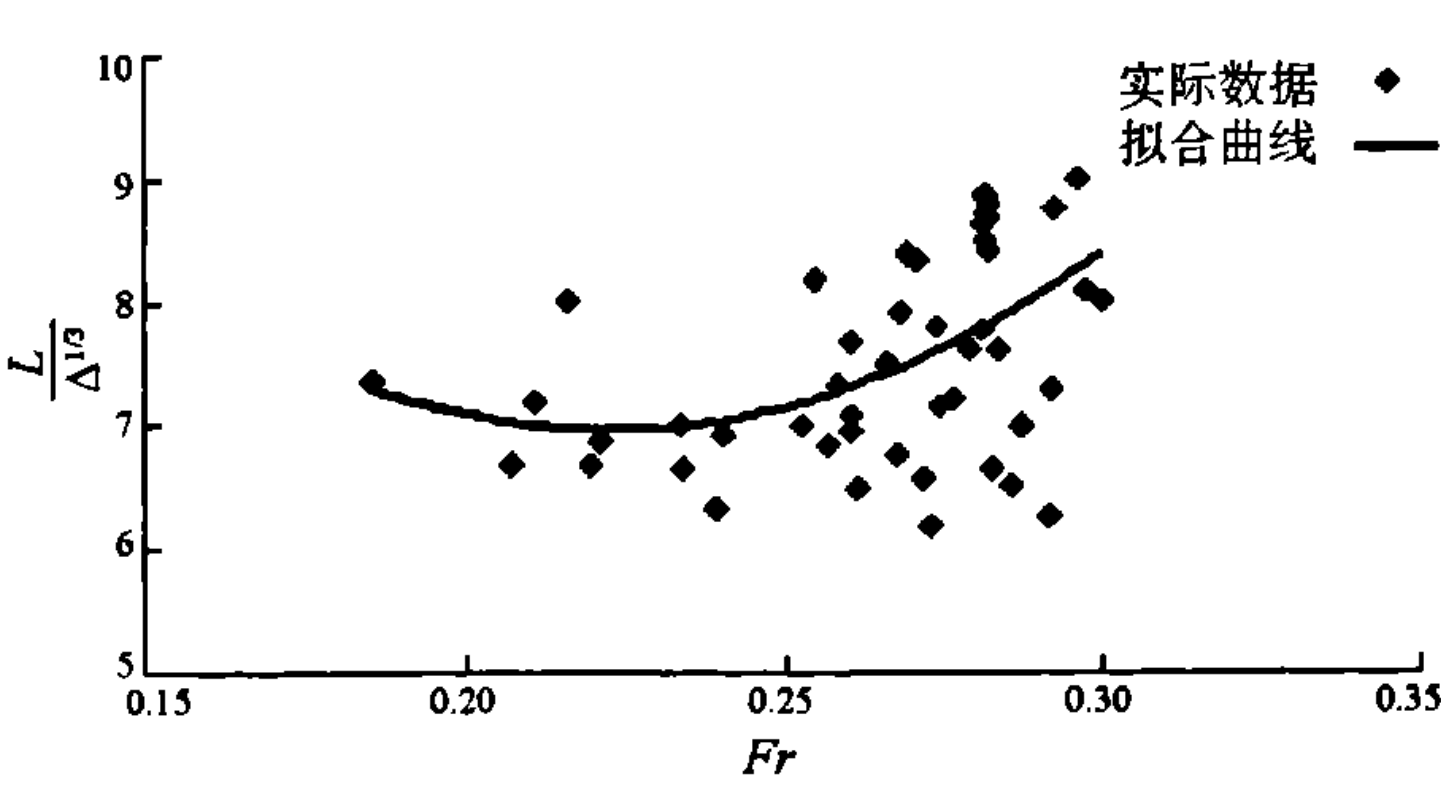


图2 中速航母的多项式回归比较

2.1.2 高速航空母舰

1) 艾亚公式回归

对高速航空母舰,即 $Fr\geq0.30$ 的航空母舰数据进行艾亚分析,得到公式为:

$$\frac{L}{\Delta^{1/3}} = 1.148Fr + 7.913$$

回归公式所得的估计值与实际数据之间的方差为0.355。图3为高速航空母舰艾亚公式回归形式的拟合图。

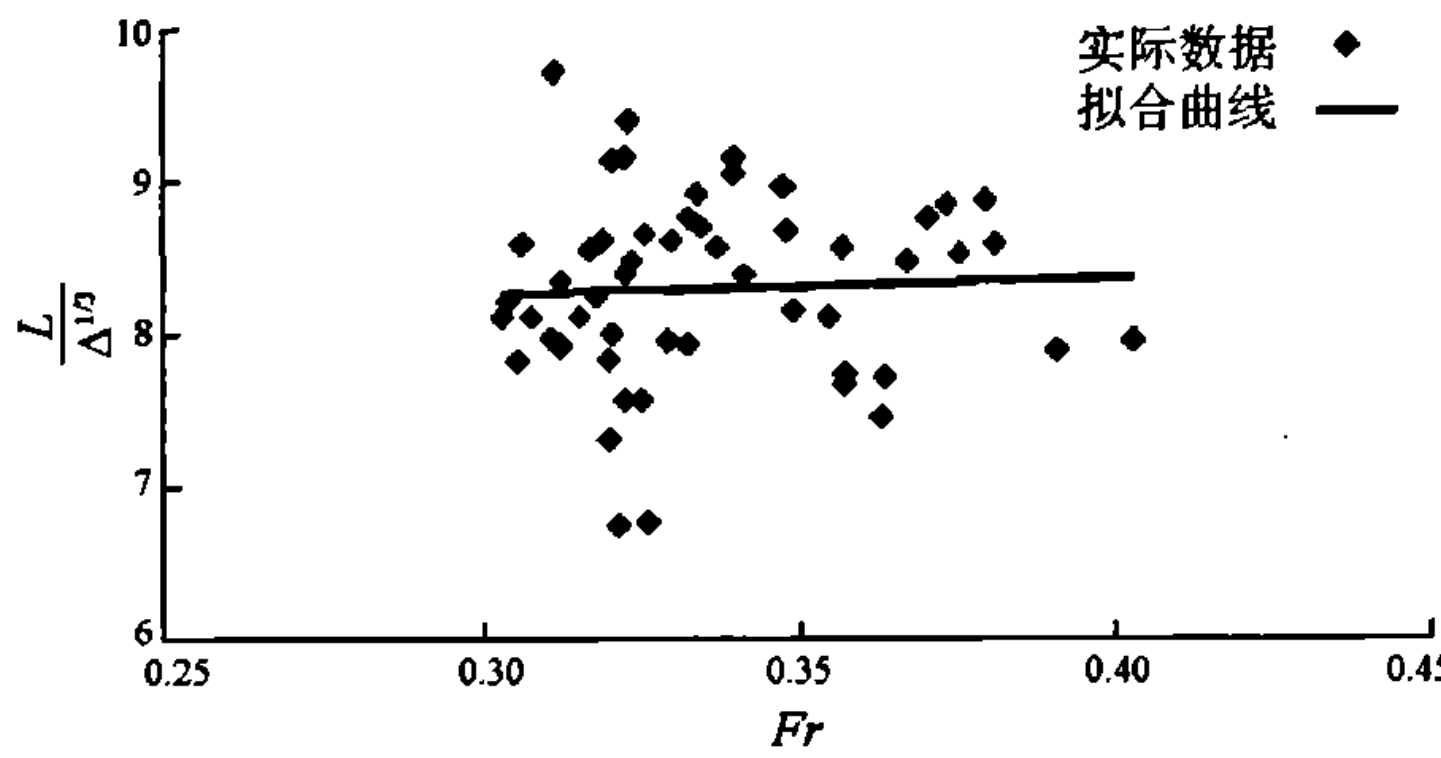


图3 高速航母的艾亚公式回归比较

2) 多项式回归

高速航母的多项式回归公式为:

$$\frac{L}{\Delta^{1/3}} = -101.58Fr^2 + 71.466Fr - 4.186$$

计算得到其方差值为0.350。图4为高速航母的多项式回归比较图。

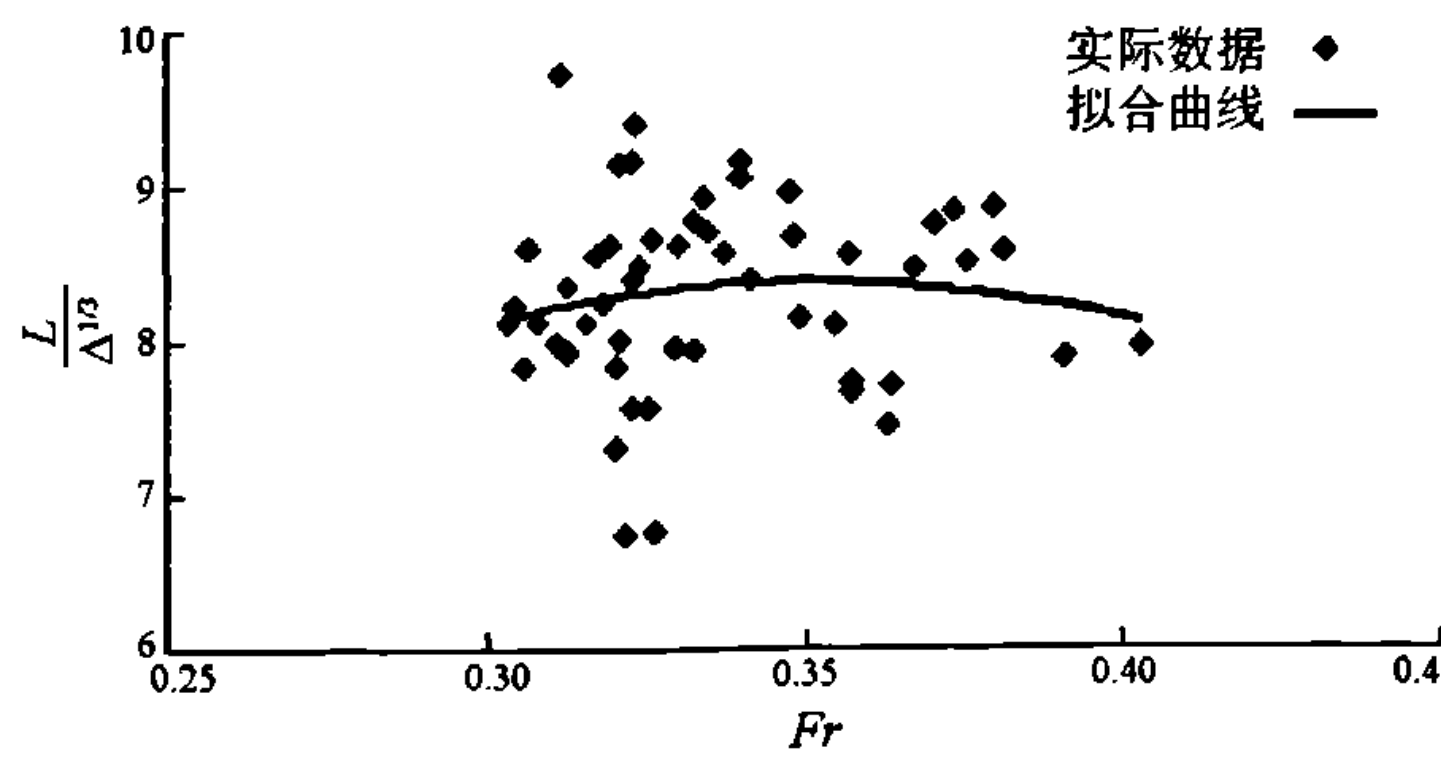


图4 高速航母的多项式回归比较

2.2 根据排水量进行分类

除了航速,航母也可以使用排水量进行分类。根据排水量的不同航母可分为大型、中型和轻型

三种。其中,排水量 60 000 t 以上的属大型航母, 30 000 ~ 60 000 t 的属中型航母, 30 000 t 以下的属轻型航母。

2.2.1 轻型航空母舰

1) 艾亚公式回归

同样,先从艾亚公式入手分析,得到轻型航母的艾亚公式回归形式为:

$$\frac{L}{\Delta^{1/3}} = 10.272Fr + 4.875$$

计算得到实际数据点与回归公式对应点的方差值为 0.545。回归拟合的结果如图 5 所示。

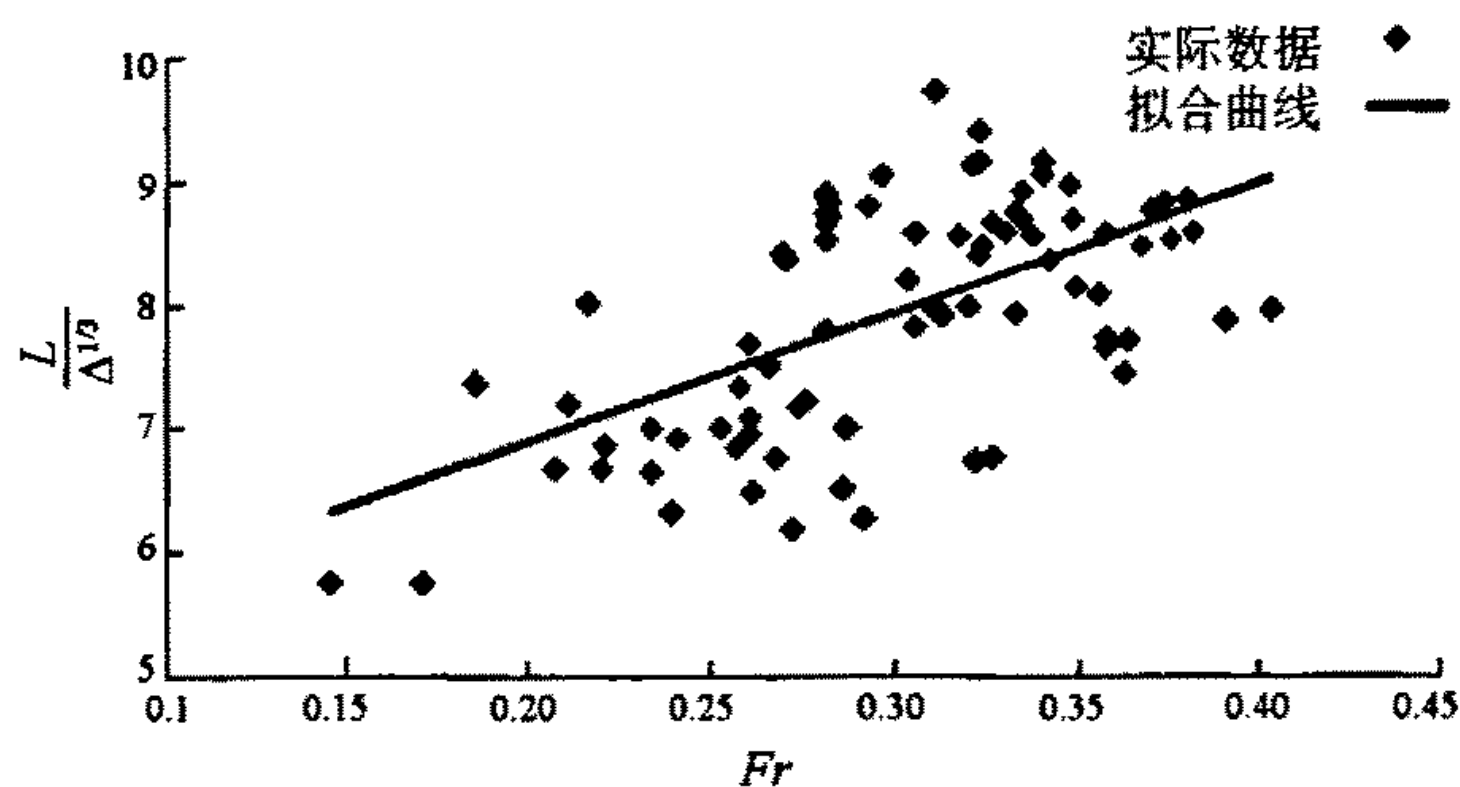


图 5 轻型航母的艾亚公式回归比较

2) 多项式回归

轻型航母的多项式回归公式为:

$$\frac{L}{\Delta^{1/3}} = -56.281Fr^2 + 42.653Fr + 0.377$$

计算得到回归方程与实际数据间的方差值为 0.502。轻型航母的多项式回归拟合结果,如图 6 所示。

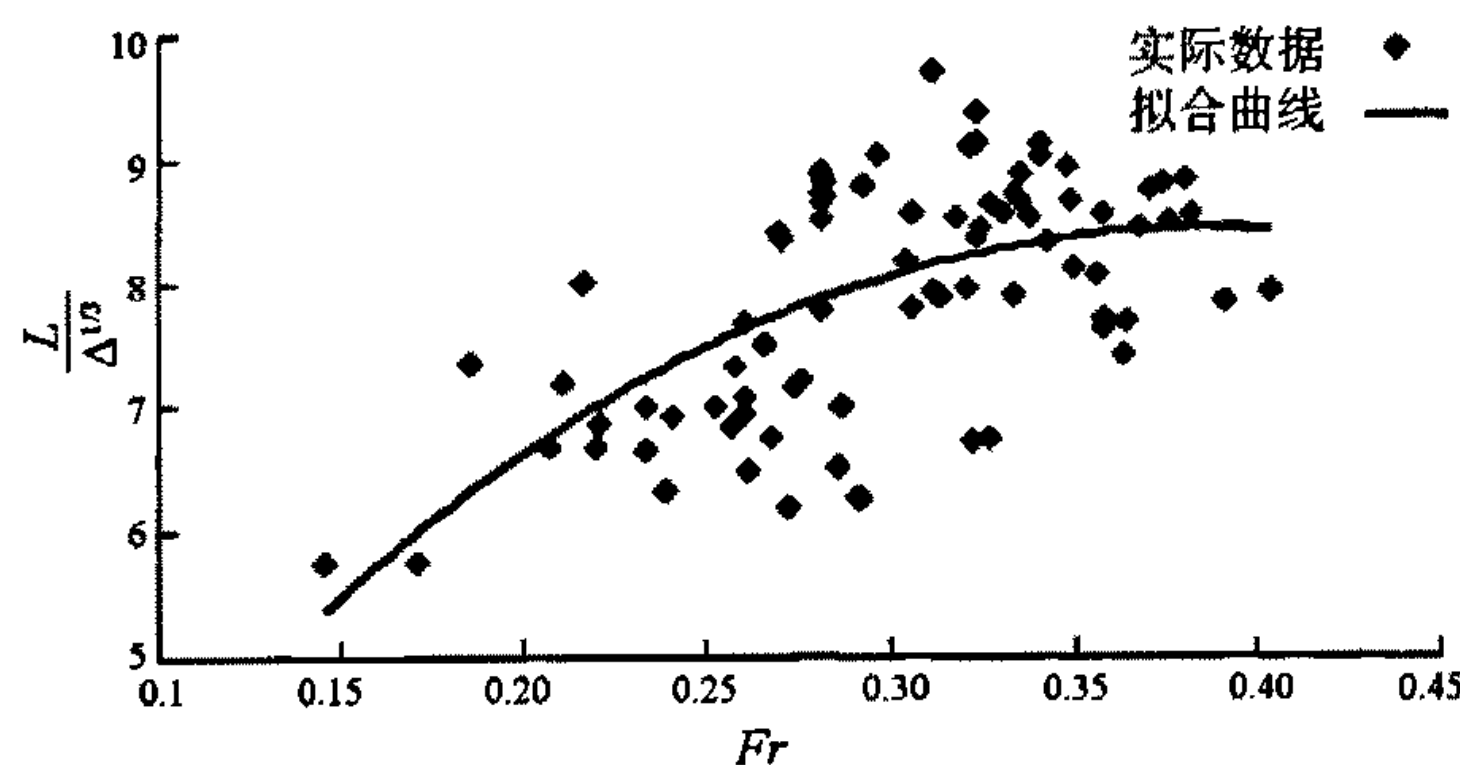


图 6 轻型航母的多项式回归比较

2.2.2 中型航空母舰

1) 艾亚公式回归

对中型航母,即排水量介于 30 000 ~ 60 000 t 之间的航母,进行艾亚公式回归分析,得到如下公式:

$$\frac{L}{\Delta^{1/3}} = 0.662Fr + 7.659$$

计算得到回归公式估计值与实际数据之间的方差值为 0.249。图 7 所示即为中型航母的艾亚公式回归比较。

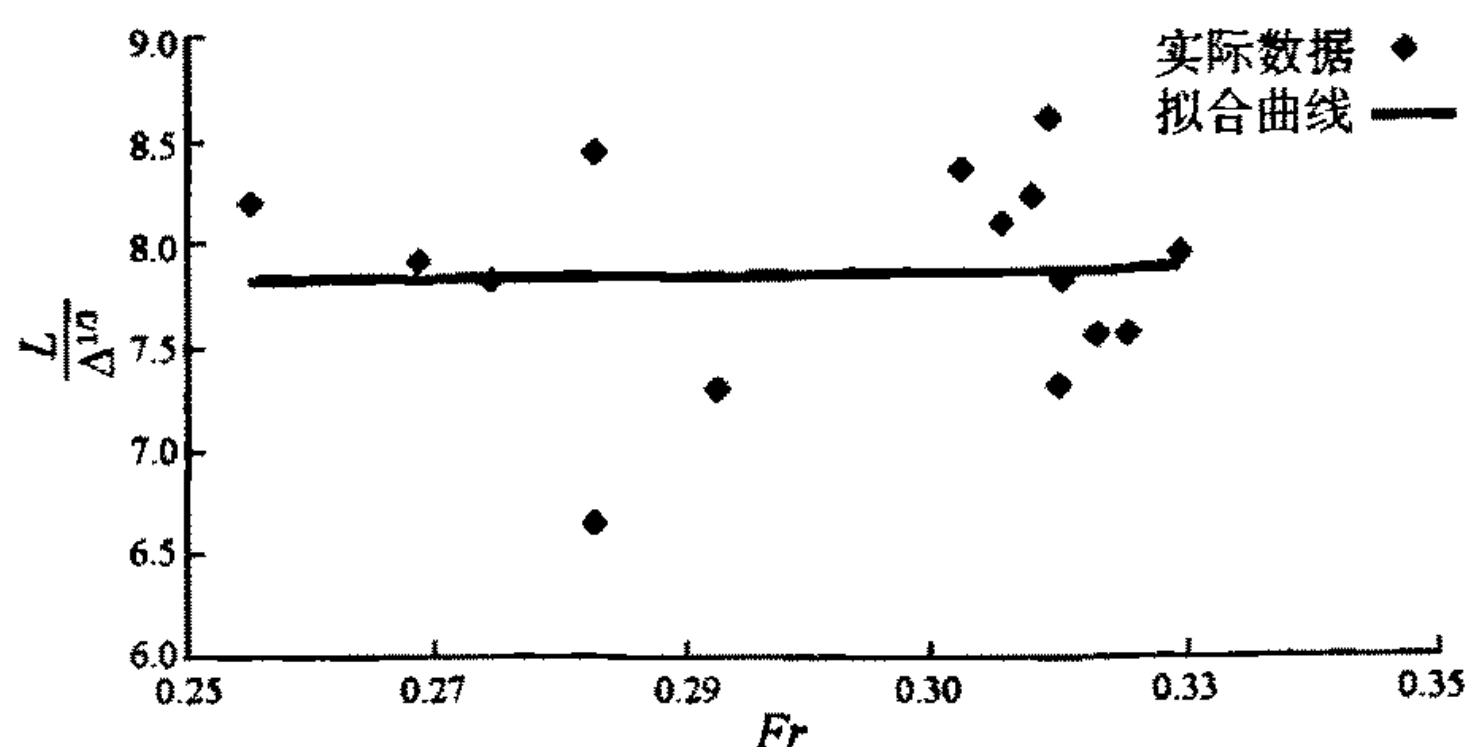


图 7 中型航母的艾亚公式回归比较

2) 多项式回归

中型航母的多项式回归公式为:

$$\frac{L}{\Delta^{1/3}} = 256.08Fr^2 - 150.42Fr + 29.789$$

计算得到的方差值为 0.239。图 8 所示即为中型航母的多项式回归比较。

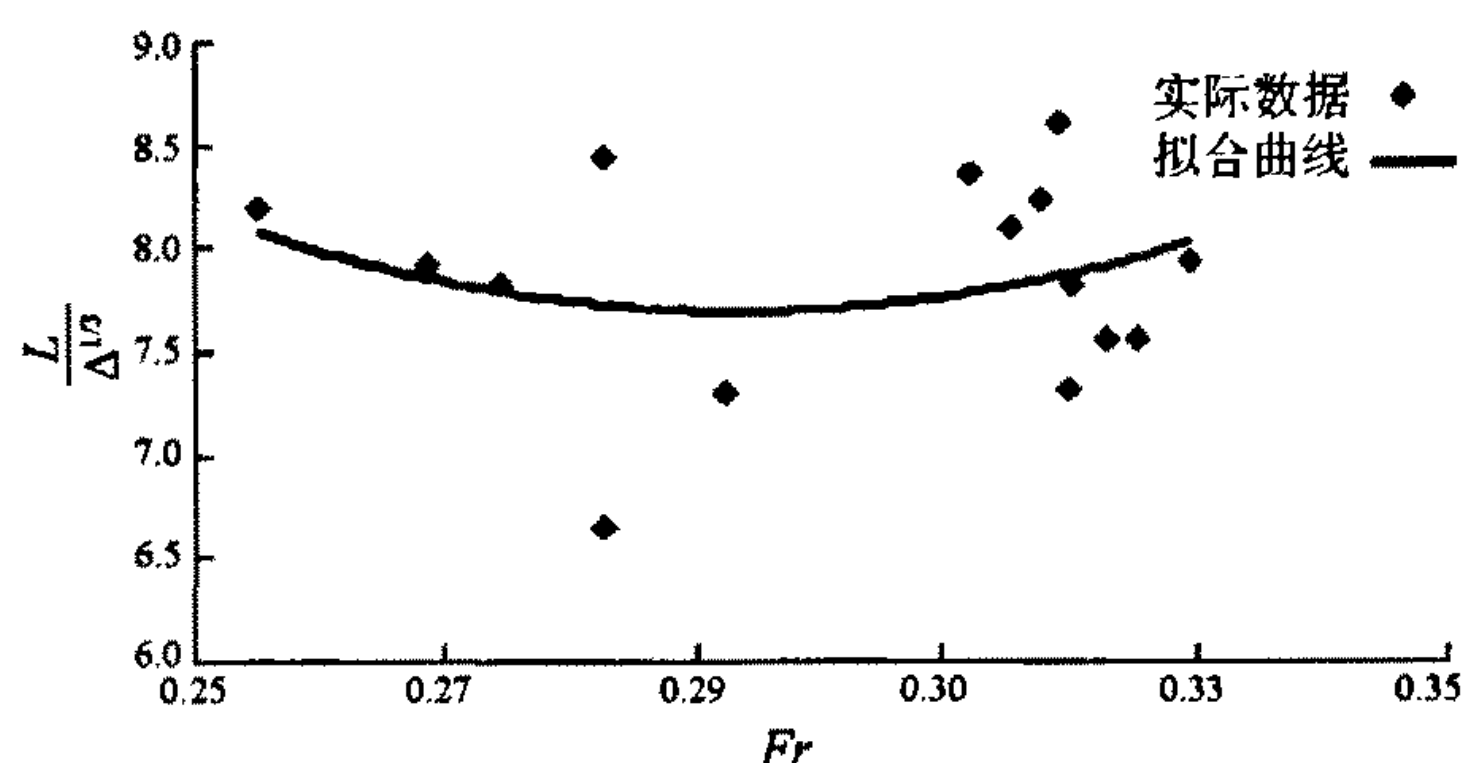


图 8 中型航母的多项式回归比较

2.2.3 大型航空母舰

1) 艾亚公式回归

对大型航母,即排水量在 60 000 t 以上的航母进行艾亚公式回归分析,得到如下公式:

$$\frac{L}{\Delta^{1/3}} = 36.416Fr - 2.881$$

计算其方差值为 5.995×10^{-2} 。大型航母的艾亚公式回归比较如图 9 所示。

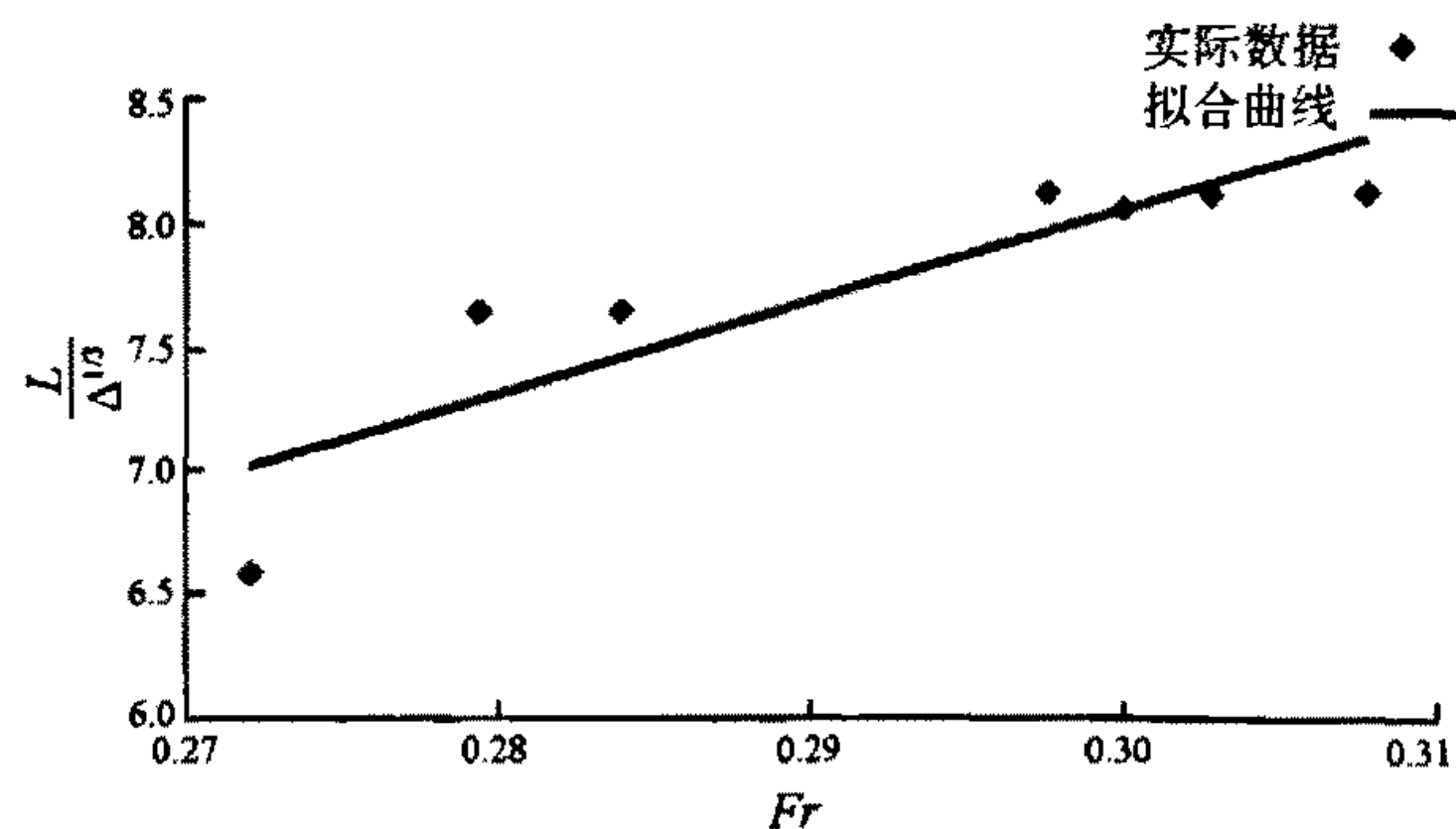


图 9 大型航母的艾亚公式回归比较

2) 多项式回归

大型航母的多项式回归公式为:

$$\frac{L}{\Delta^{1/3}} = -1934.4Fr^2 + 1158.1Fr - 165.17$$

计算大型航母的多项式回归拟合的方差值为 1.508×10^{-2} , 比较前面分析的所有方差数据, 该方差值最小。大型航母的多项式回归比较如图 10 所示。

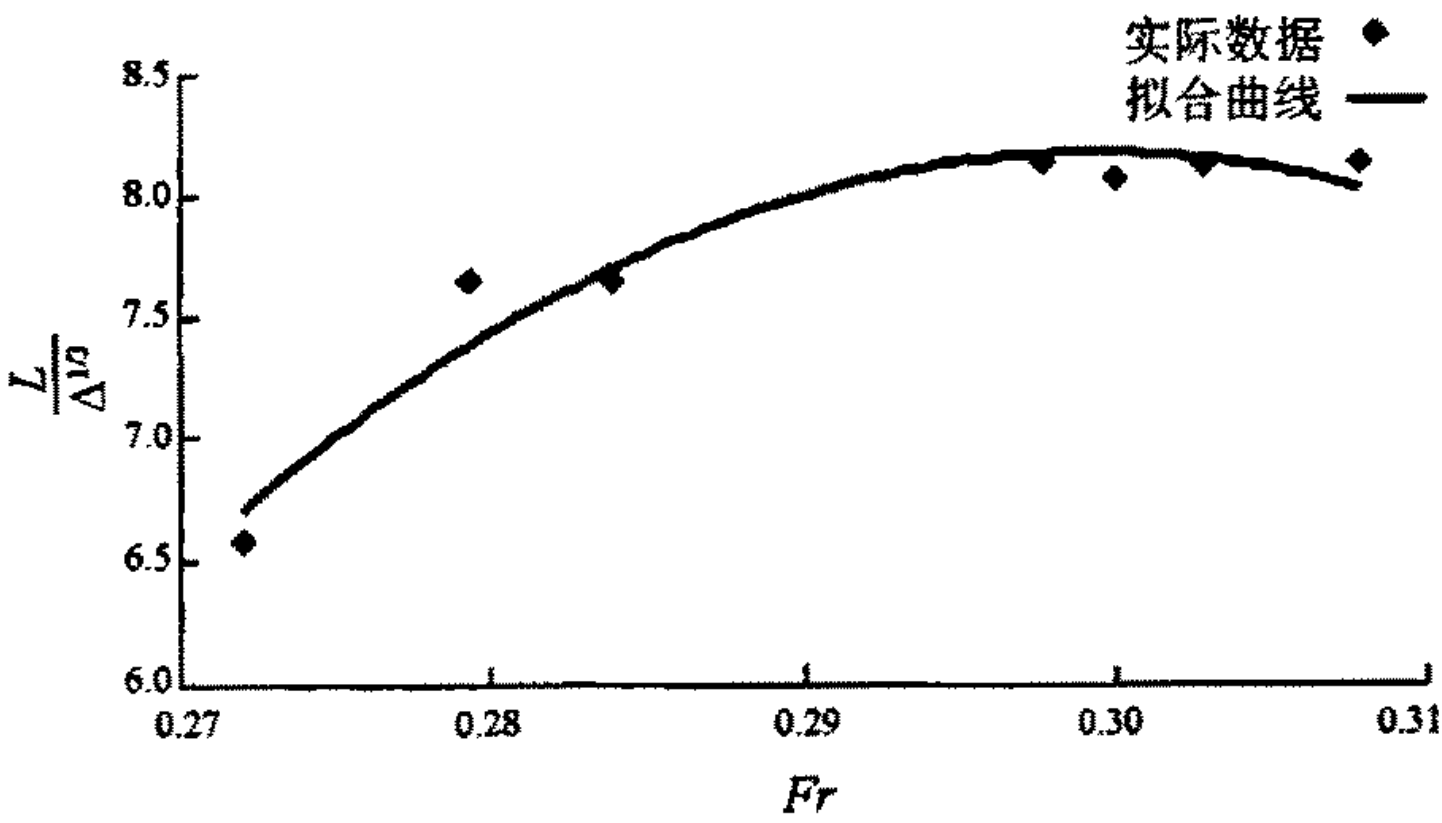


图 10 大型航母的多项式回归比较

2.3 根据动力进行分类

航母根据动力装置的不同可以分为常规动力航母和核动力航母。目前, 国外仅出现了大约 12 艘核动力装置的航母, 它们是美国的“企业”号、“尼米兹”级航母以及法国的“戴高乐”号航母。按照动力装置的不同对航母数据进行分类以及回归拟合, 并分析其方差。

2.3.1 常规动力航空母舰

1) 艾亚公式回归

对常规动力的航母进行艾亚公式回归分析, 得到公式为:

$$\frac{L}{\Delta^{1/3}} = 10.064Fr + 4.912$$

分析回归公式与实际数据之间的拟合程度, 即得到方差值为 0.501。常规动力航母的艾亚公式回归比较如图 11 所示。

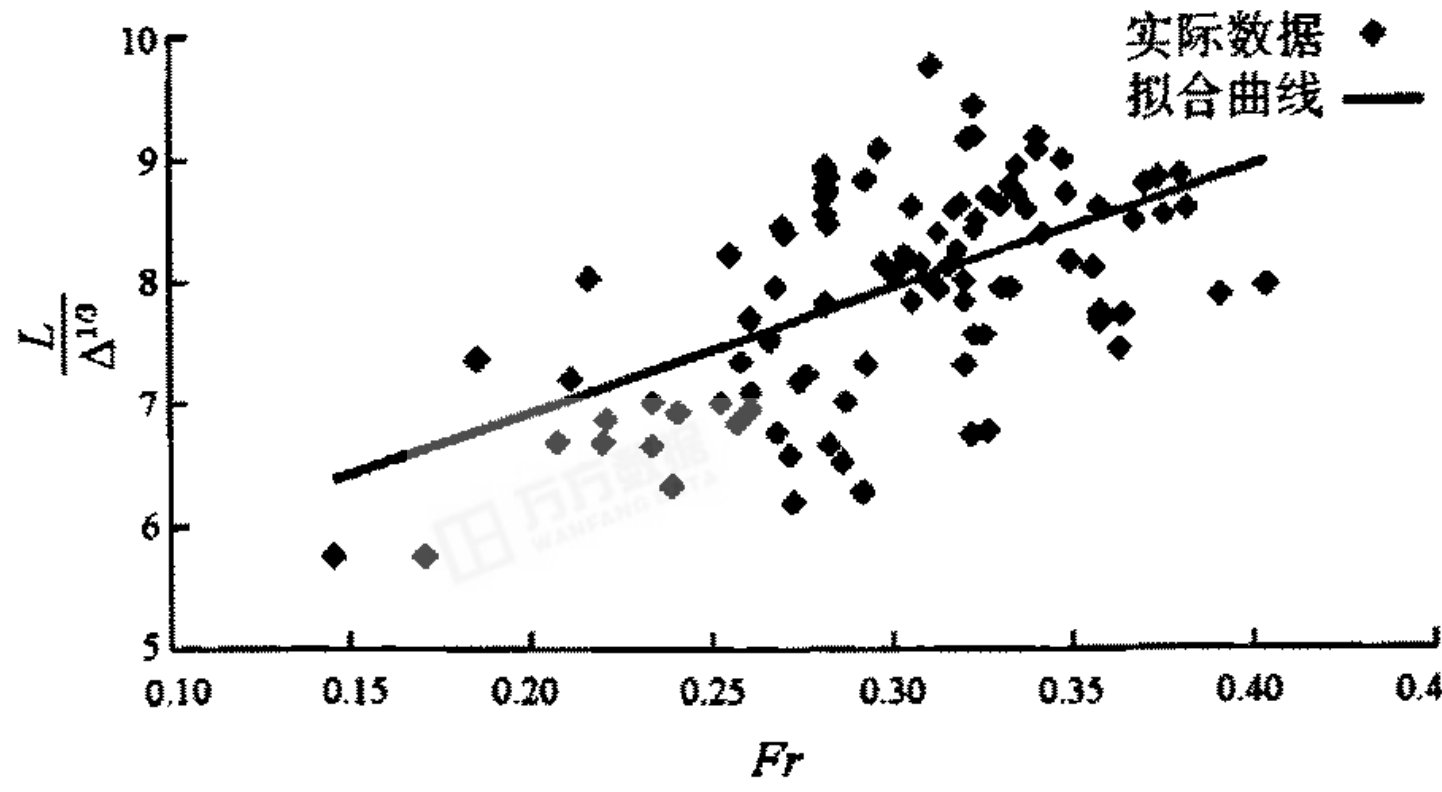


图 11 常规动力航母的艾亚公式回归比较

2) 多项式回归

对常规动力航母的全长、排水量和航速进行多项式拟合, 得到的多项式为:

$$\frac{L}{\Delta^{1/3}} = -49.199Fr^2 + 38.376Fr + 0.958$$

求得实际数据点与回归公式对应点的方差值

为 0.473。常规动力航母的多项式回归比较如图 12 所示。

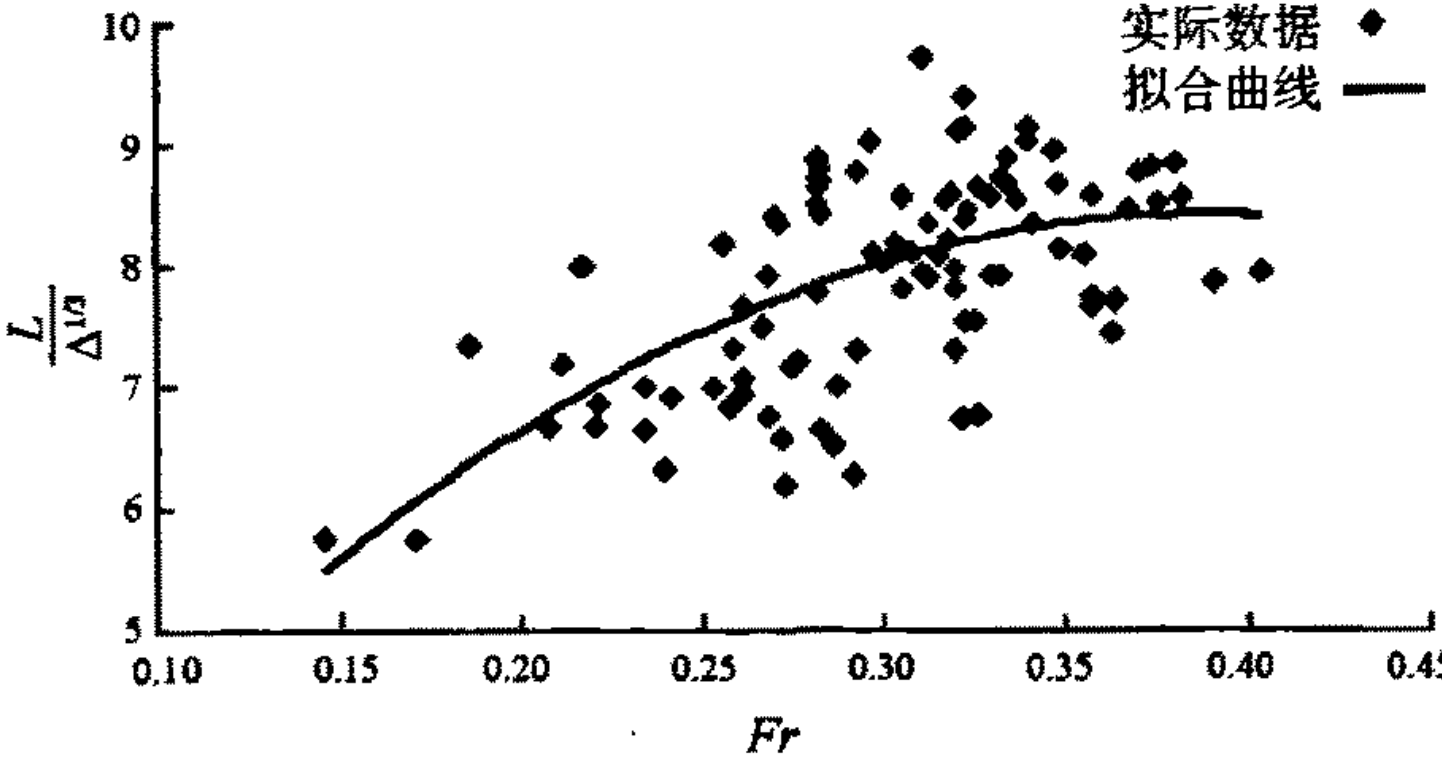


图 12 常规动力航母的多项式回归比较

2.3.2 核动力航空母舰

1) 艾亚公式回归

对核动力航母进行艾亚回归分析, 得到的艾亚公式回归形式为:

$$\frac{L}{\Delta^{1/3}} = 28.769Fr - 0.277$$

计算得到回归公式与实际数据之间的方差值为 3.049×10^{-2} 。核动力航母的艾亚公式回归拟合结果如图 13 所示。

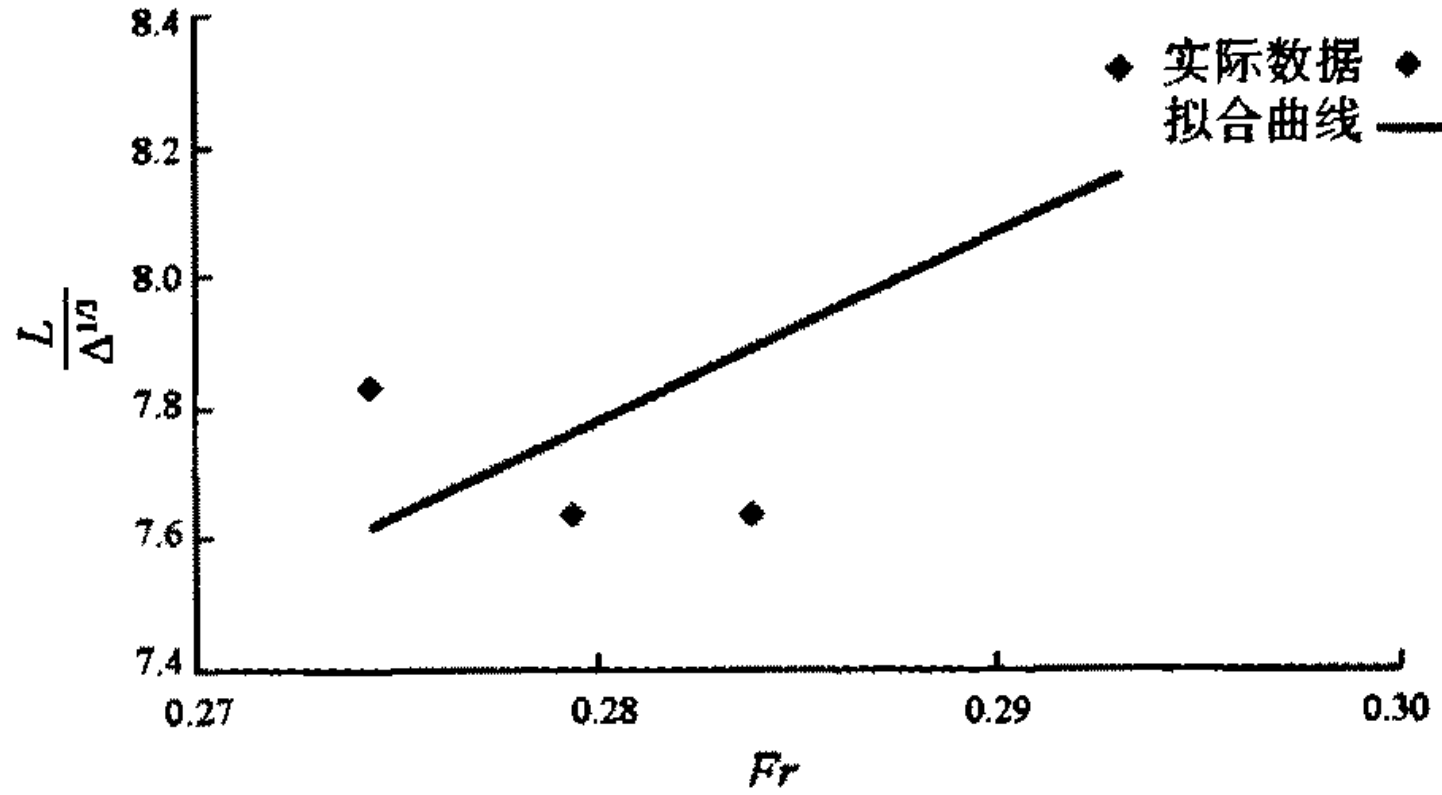


图 13 核动力航母的艾亚公式回归比较

2) 多项式回归

核动力航母的多项式回归公式为:

$$\frac{L}{\Delta^{1/3}} = 4904.8Fr^2 - 2757.6Fr + 395.21$$

计算得到回归公式与实际数据之间的方差值为 9.943×10^{-5} 。核动力航母的多项式回归比较如图 14 所示。

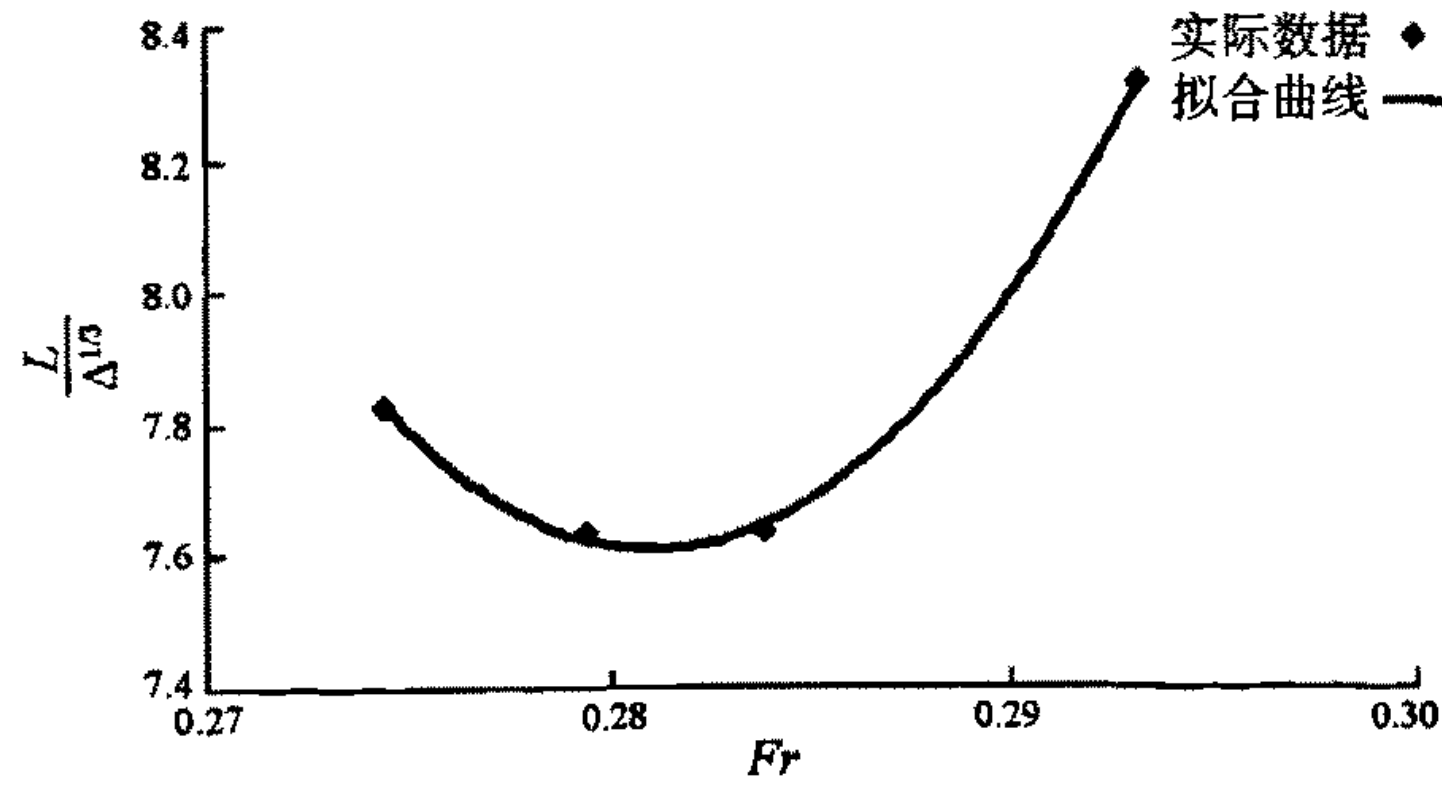


图 14 核动力航母的多项式回归比较

2.4 三维回归分析

引入船宽,从三维的角度分析航母,分析舰的全长 $L(\text{m})$ 、航速 $v(\text{m/s})$ 、船宽 $B(\text{m})$ 和排水量 $\Delta(\text{t})$ 之间的关系,即讨论 $\frac{L}{\Delta^{1/3}}$, Fr 和 $\frac{B}{\Delta^{1/3}}$ 的回归拟合。同样按照上面的分类,依次分析中速航母、高速航母和轻型航母,中型航母、大型航母、常规动力航母、核动力航母,得到各自的回归公式,计算各自的方差并画出各自的三维回归比较图,如图 15 ~ 图 21 所示。

1) 中速航母

中速航母的三维回归公式为:

$$\frac{L}{\Delta^{1/3}} = 266.591 Fr^2 - 9.167 \left(\frac{B}{\Delta^{1/3}} \right)^2 + 77.077 Fr \left(\frac{B}{\Delta^{1/3}} \right) - 51.715 Fr + 40.491 \left(\frac{B}{\Delta^{1/3}} \right) - 8.829$$

计算其实际数据点与回归公式对应点的平方的平均值,即方差值为 0.482。

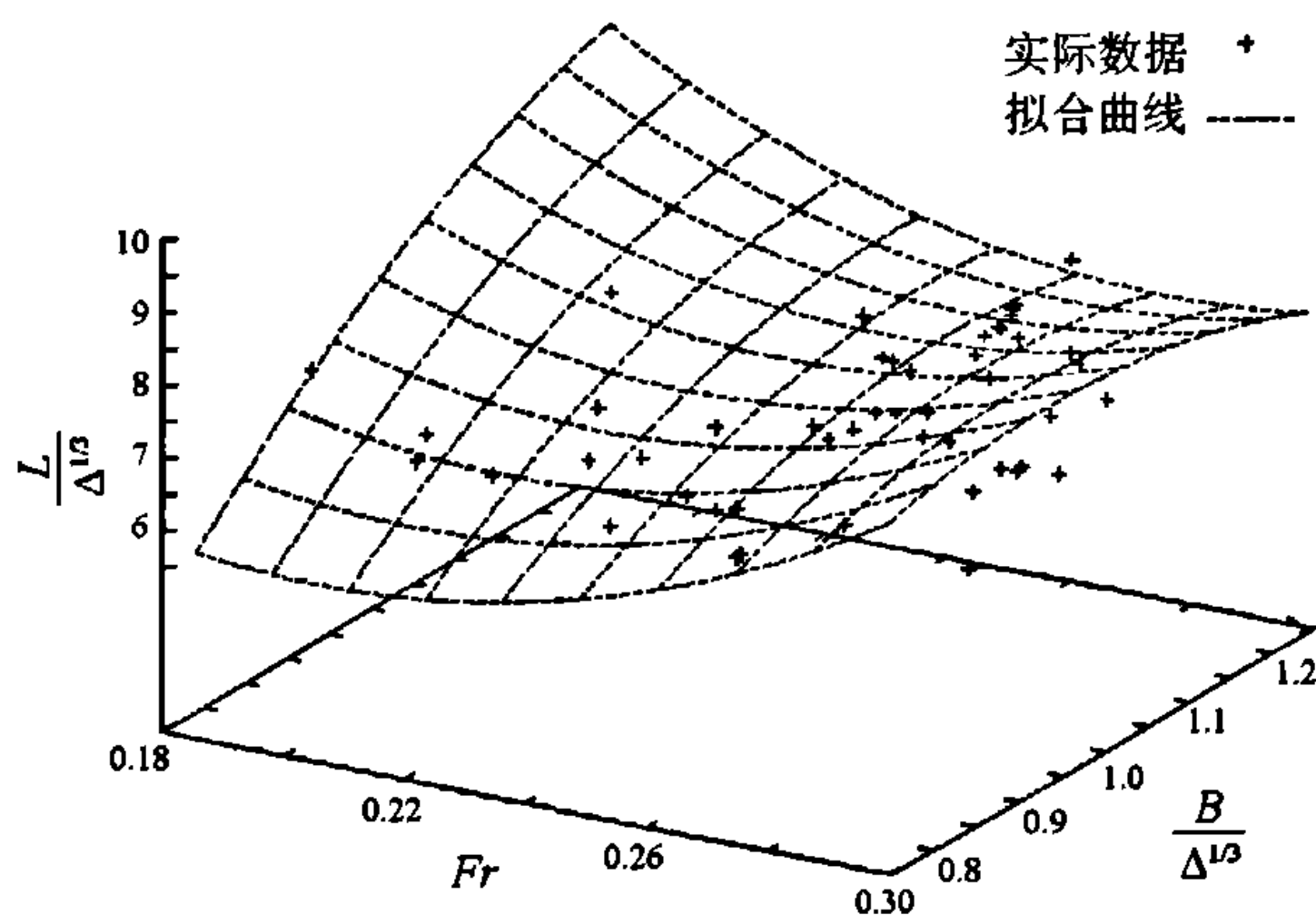


图 15 中速航母的三维回归比较

2) 高速航母

高速航母的三维回归公式为:

$$\frac{L}{\Delta^{1/3}} = -98.788 Fr^2 + 15.538 \left(\frac{B}{\Delta^{1/3}} \right)^2 - 17.314 Fr \left(\frac{B}{\Delta^{1/3}} \right) + 86.640 Fr - 23.222 \left(\frac{B}{\Delta^{1/3}} \right) + 3.864$$

计算得到其方差为 0.330。

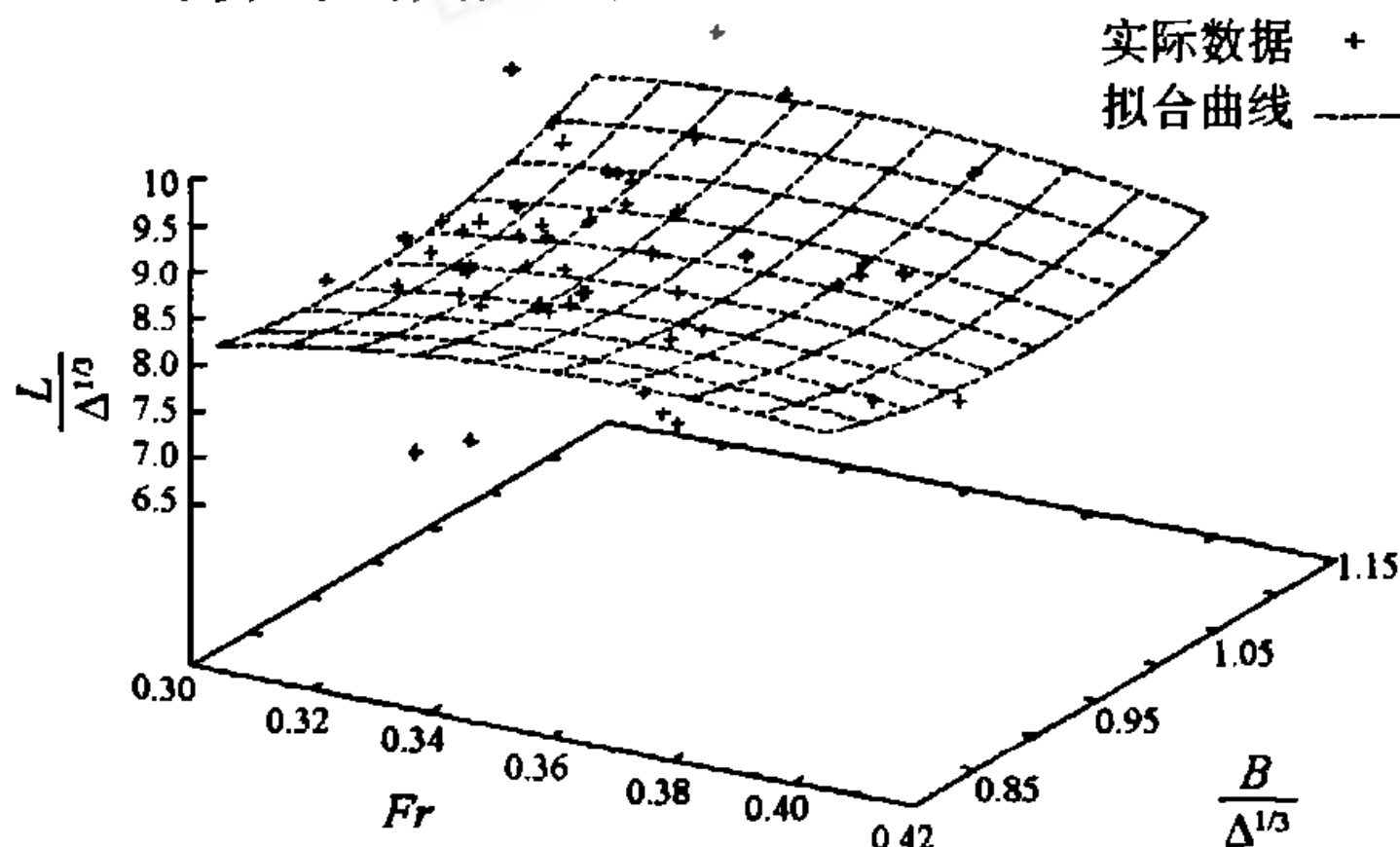


图 16 高速航母的三维回归比较

3) 轻型航母

轻型航母的三维回归公式为:

$$\frac{L}{\Delta^{1/3}} = -39.848 Fr^2 - 6.983 \left(\frac{B}{\Delta^{1/3}} \right)^2 + 4.686 Fr \left(\frac{B}{\Delta^{1/3}} \right) + 27.959 Fr + 13.921 \left(\frac{B}{\Delta^{1/3}} \right) - 4.942$$

方差值为 0.476。

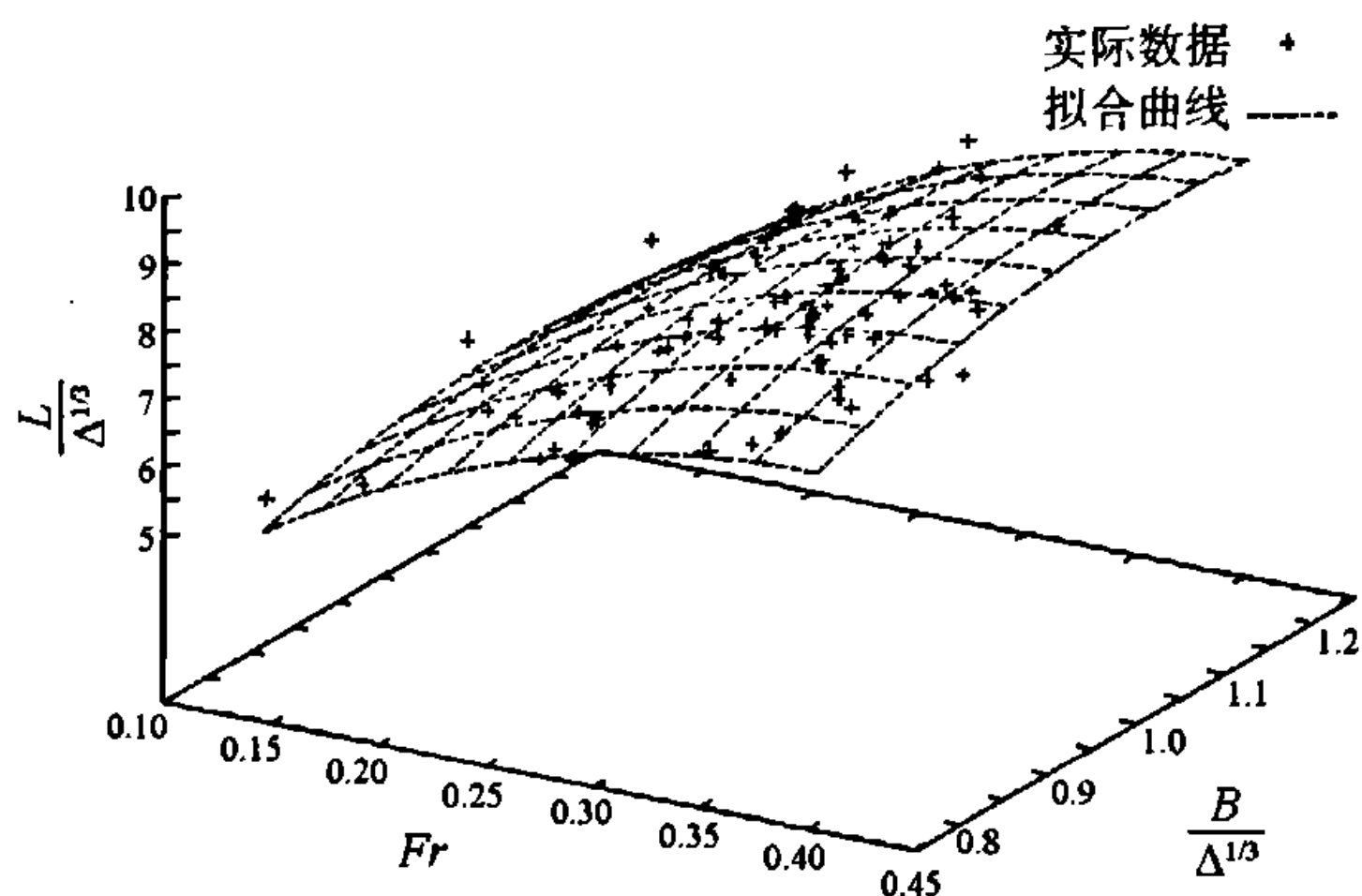


图 17 轻型航母的三维回归比较

4) 中型航母

中型航空母舰的三维回归公式为:

$$\frac{L}{\Delta^{1/3}} = 209.623 Fr^2 - 164.361 \left(\frac{B}{\Delta^{1/3}} \right)^2 - 209.951 Fr \left(\frac{B}{\Delta^{1/3}} \right) + 81.066 Fr + 383.134 \left(\frac{B}{\Delta^{1/3}} \right) - 191.213$$

计算得到方差为 0.204。

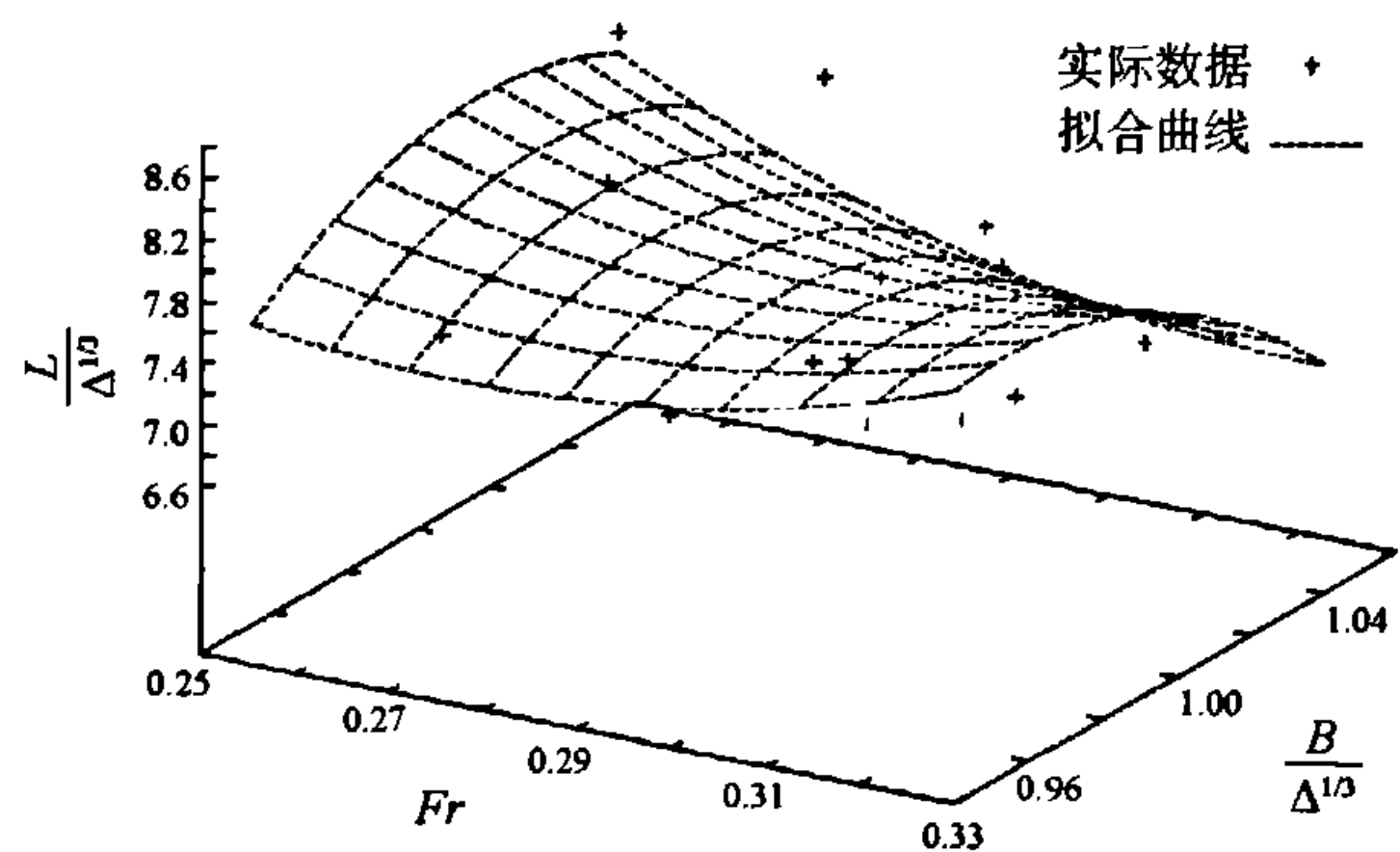


图 18 中型航母的三维回归比较

5) 大型航母

大型航母的三维回归公式为:

$$\frac{L}{\Delta^{1/3}} = 1848.83 Fr^2 + 10.308 \left(\frac{B}{\Delta^{1/3}} \right)^2 - 1207.71 Fr \left(\frac{B}{\Delta^{1/3}} \right) + 95.248 Fr + 338.47 \left(\frac{B}{\Delta^{1/3}} \right) - 173.441$$

计算得到的方差为 4.561×10^{-3} 。

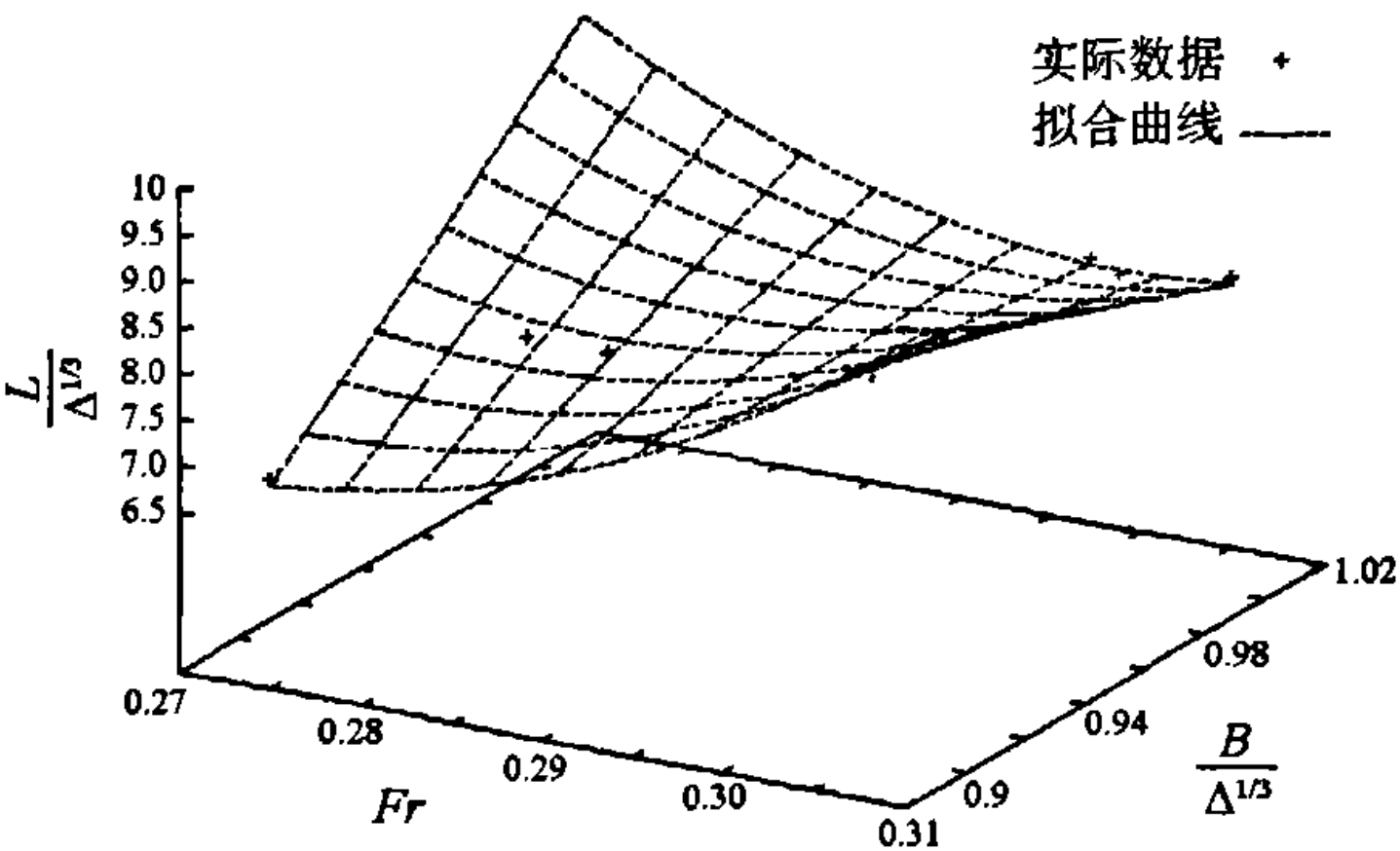


图 19 大型航母的三维回归比较

6) 常规动力航母

常规动力航母的三维回归公式为:

$$\begin{aligned} \frac{L}{\Delta^{1/3}} = & -27.294Fr^2 - 5.041\left(\frac{B}{\Delta^{1/3}}\right)^2 - 3.007Fr\left(\frac{B}{\Delta^{1/3}}\right) \\ & + 27.615Fr + 12.461\left(\frac{B}{\Delta^{1/3}}\right) - 4.246 \end{aligned}$$

计算得到的方差值为 0.452。

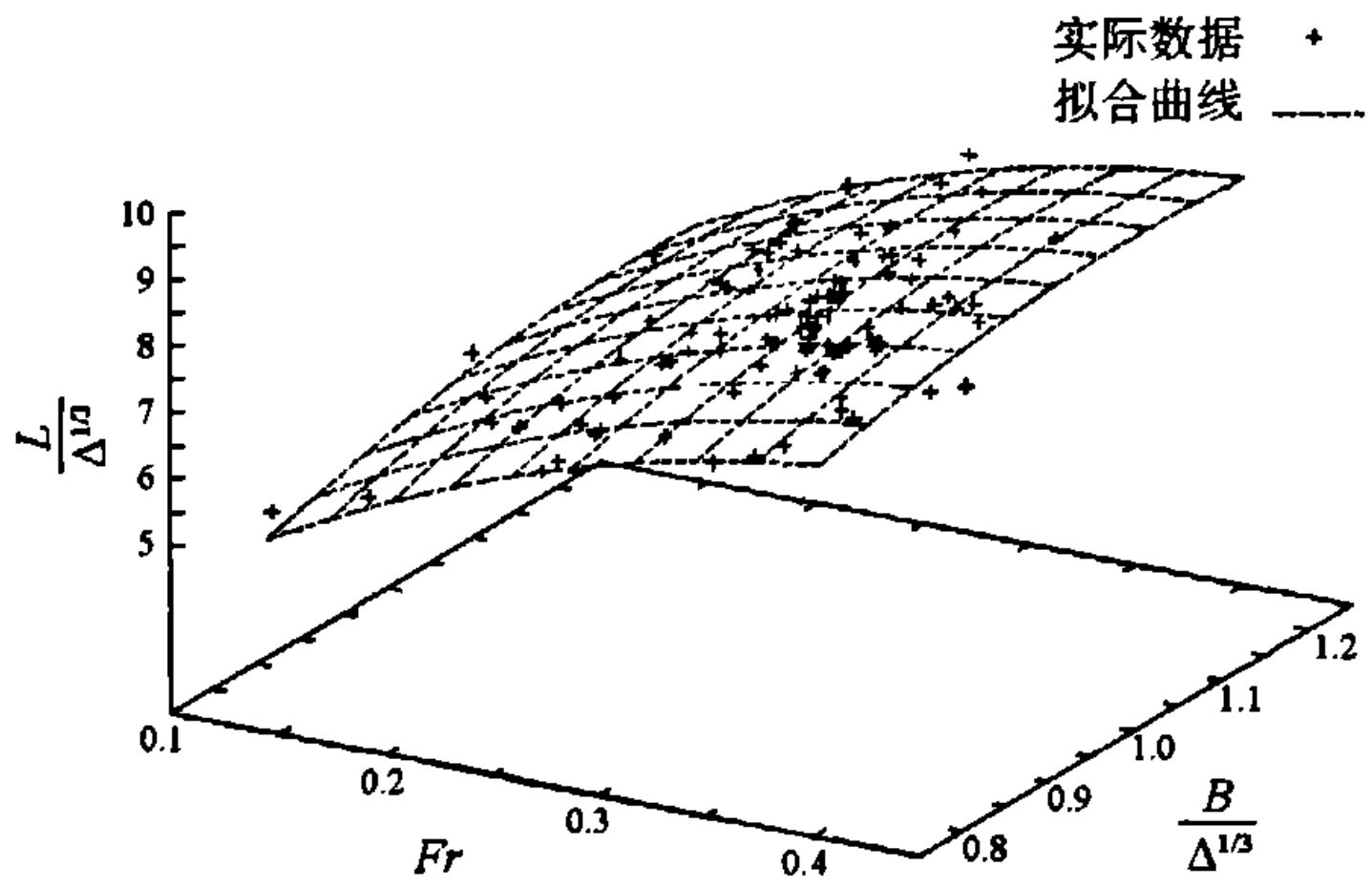


图 20 常规动力航母的三维回归比较

7) 核动力航母

核动力航母的三维回归公式为:

$$\begin{aligned} \frac{L}{\Delta^{1/3}} = & 789.71Fr^2 - 411.993\left(\frac{B}{\Delta^{1/3}}\right)^2 - \\ & 637.36Fr\left(\frac{B}{\Delta^{1/3}}\right) + 154.037Fr + \\ & 992.573\left(\frac{B}{\Delta^{1/3}}\right) - 498.617 \end{aligned}$$

计算得到的方差值为 4.896×10^{-10} 。

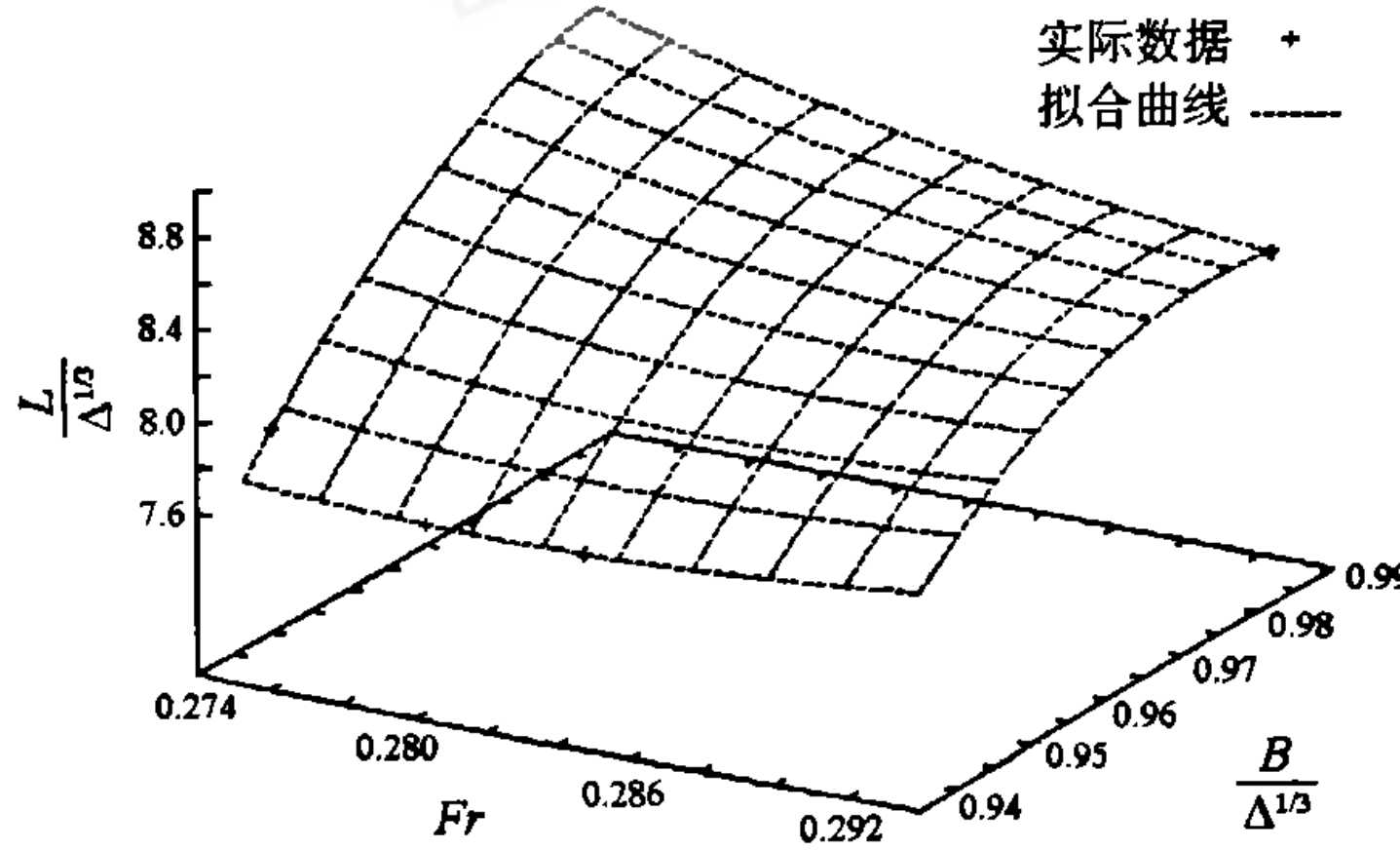


图 21 核动力航母的三维回归比较

3 结果分析

将各类航母的方差值列于表 1 中,并进行分析比较。

表 1 各类航空母舰的方差分析				
分类	航空母舰类型	艾亚公式回归	多项式回归	三维回归
航速	中速	0.569	0.539	0.482
	高速	0.355	0.350	0.330
排水量	轻型	0.545	0.502	0.476
	中型	0.249	0.239	0.204
	大型	5.995×10^{-2}	1.508×10^{-2}	4.561×10^{-3}
动力	常规动力	0.501	0.473	0.452
	核动力	3.049×10^{-2}	9.943×10^{-5}	4.896×10^{-10}

从方差的角度分析航母回归拟合的情况,对于方差而言,方差值越小,回归拟合的程度就越好。从回归拟合的方法分析看,三维回归拟合的程度好于多项式回归拟合的程度,多项式回归拟合的程度整体上又好于艾亚公式回归拟合的程度;从航母的分类情况分析,大型航母和核动力航母的三种回归拟合方法的方差值都一致偏小。因此可以得出,大型航母和核动力航母的三维回归拟合的程度最好。

由于方差分析中的各模型的样本大小不一样,甚至差别很大,并且方差分析只能分析拟合方程在现有数据下的拟合程度。所以,为了模型选择的合理性,对上述数据进行测量熵 (ME) 分析^[4,5],即求其熵的无偏估计值,其公式为:

$$ME = - \int f(x | \hat{\lambda}_i) \log f(x | \hat{\lambda}_i) dx + \frac{3}{2} \frac{n_f}{n_i}$$

式中, n_f 为自由变量个数; n_i 为样本大小; $-\int f(x | \hat{\lambda}_i) \log f(x | \hat{\lambda}_i) dx$ 为信息熵表达式; $\hat{\lambda}_i$ 为未知参数 λ_i 最大似然估计。在诸多回归模型中 (如艾亚公式、多项式、三维回归公式), ME 值越小,回归模型越好。

我们知道,正态分布信息熵的公式为 $\frac{1}{2} \log \sigma^2$, 其中 σ^2 为方差值。得到各类航母的 ME 值列于表 2 中。

表 2 各类航空母舰的 ME 分析				
分类	航空母舰类型	艾亚公式回归	多项式回归	三维回归
航速	中速	-0.222	-0.249	-0.275
	高速	-0.463	-0.469	-0.470
排水量	轻型	-0.268	-0.309	-0.318
	中型	-0.495	-0.517	-0.496
	大型	-0.979	-1.669	-2.052
动力	常规动力	-0.316	-0.345	-0.354
	核动力	-0.995	-3.858	-9.594

(下转第 25 页)

定性的作用。数字化作为 21 世纪技术创新的主要手段^[11],具有重要的研究意义和广泛的应用前景。可以预料,舰船数字化设计必将得到日益广泛的应用。

6 结 论

随着数字化技术的蓬勃发展,以数字化造船为核心的船舶工业数字化进程也不断加快。数字化造船作为船舶工业数字化的主要内容和重点发展方向,是我国船舶行业应对国际竞争,实现产业结构调整与优化升级的必然选择,是贯彻落实党的十六大报告提出的“以信息化带动工业化”的重要举措,也是我国船舶工业实现跨越式发展的必由之路。我们应该迎头赶上,缩短与世界造船发达国家的差距,提高装备研制水平。

参考文献

[1] 中国造船工程学会学术论文集[G]. 中国造船工程学会计算机应用学术委员会,2005.

[2] 应文焯. 舰船设计可视化技术[M]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学出版社,2003.

[3] 于海斌,朱云龙. 协同制造——e 时代的制造策略与解决方案[M]. 北京:清华大学出版社,2004.

[4] 童秉枢. 现代 CAD 技术[M]. 北京:清华大学出版社,2000.

[5] 李国强. 舰船现代集成制造与自动化装备创新工程研究报告汇编[G]. 中国船舶重工集团公司,中国船舶工业集团公司,清华大学,2003.

[6] 严隽薇. 现代集成制造系统概论——理念、方法、技术、设计与实施[M]. 北京:清华大学出版社,2004.

[7] 刘树森. 现代制造企业信息化[M]. 北京:科学出版社,2005.

[8] 崔洪斌. 计算机辅助设计基础及应用[M]. 北京:清华大学出版社,2002.

[9] 邵开文,马运义. 舰船技术与设计概论[M]. 北京:国防工业出版社,2005.

[10] 齐从谦. 制造业信息化导论[M]. 北京:中国宇航出版社,2003.

[11] 周祖德. 数字制造[M]. 北京:科学出版社,2004.



(上接第 19 页)根据 ME 分析,得到如下结论:

- 1) 对中速航母而言,三维回归公式的 ME 值最小,建议使用三维回归公式;
- 2) 对高速航母而言,多项式回归公式和三维回归公式没有显著区别,二者均可使用;
- 3) 对轻型航母,建议使用三维回归公式;
- 4) 对中型航母,因为多项式回归公式的 ME 值最小,建议使用多项式回归公式;
- 5) 对大型航母,建议使用三维回归公式;

- 6) 对常规动力航母,建议使用三维回归公式;
- 7) 对核动力航母,建议使用三维回归公式。

4 例 子

在本节中,根据上面的回归公式给出几个具体计算例子。根据给出的航母的排水量、全长和船宽,计算该航母的航速,并与给出的真实值进行比较,结果列于表 3 中。

表 3 航速计算值与真实值的比较

舰 名	分 类	排水量/t	全长/m	船宽/m	估算航速/m·s ⁻¹	真实航速/m·s ⁻¹
“罗斯福”号	核动力	82 500.0	332.5	40.9	31.0	31.0
“肯尼迪”号	常规动力	61 850.0	320.6	39.4	32.9	33.0
“列克星敦”号	常规动力	39 450.0	270.5	32.1	29.4	33.0
“罗斯福”号	大型	82 500.0	332.5	40.9	30.5	31.0
“肯尼迪”号	大型	61 850.0	320.6	39.4	33.5	33.0
“列克星敦”号	中型	39 450.0	270.5	32.1	31.9	33.0

5 结束语

在本文中,根据航速、排水量和动力的分类,分别给出了航母的航速与排水量、全长和船宽关系的估算回归公式,对其精度进行了分析,建议了最佳的使用公式。同时给出了例子,说明这些公式的可用性。

参考文献

[1] 盛振邦,刘应中. 船舶原理(上册)[M]. 上海:上海

交通大学出版社,2003.

[2] 邵世明,赵连恩,朱念昌. 船舶阻力[M]. 北京:国防工业出版社,1995.

[3] [http://usmilitary. about. com/od/navy/1/blcarriers. htm](http://usmilitary.about.com/od/navy/1/blcarriers.htm).

[4] ZONG Z, LAY K Y. Estimation of complicated distributions using B - spline functions[J]. Structural Safety,1998,20(4):332-32.

[5] ZONG Z. Information - theoretic methods for estimating complicated probability distributions[M]. Amsterdam:Elsevier,2006.