

DOI :10.3880/j.issn.1006-7647.2008.05.006

基于光滑区的水泵原型与模型水力效率换算方法

李 龙,岑 美,陈仲省,杨雪林

(河海大学水利水电工程学院,江苏 南京 210098)

摘要 :分析模型试验雷诺数范围及布拉修斯公式的适用性,研究莫迪系列公式中原型与模型尺寸比指数、摩擦损失和旋涡损失比例,对采用增加旋涡损失的同时减小摩擦损失的处理方法进行了探讨。提出了基于雷诺数适应范围大、与尼古拉兹实验符合性好的 Prandtl-Colebrook 摩擦因数公式进行原型与模型水力效率换算的新方法,并与新发展的莫迪公式、IEC 60995—1991《考虑比尺效应的水力机械模型验收试验确定其原型性能》方法、JIS B 8327—2002《利用模型泵测试泵性能的试验方法》进行了计算比较,表明所提出的新方法具有理论性强、计算方法简单、计算精度高的优点,可以作为水力机械原型与模型水力效率换算的新方法。

关键词 水泵 水轮机 原型装置 模型试验 水力光滑区 水力效率换算

中图分类号 :TH31 ;TV136 **文献标识码** :A **文章编号** :1006-7647(2008)05-0021-04

Hydraulic efficiency conversion methods for prototype-model water pumps in a hydraulically smooth region//LI Long, CEN Mei, CHEN Zhong-sheng, YANG Xue-lin (College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract :The range of Reynolds numbers in model tests and the applicability of the Blasius formula are analyzed. The exponent of the prototype-model scale and the proportion of the friction loss and vortex loss in Moody's formula are studied. The method of increasing vortex loss while decreasing friction loss is discussed, and a new hydraulic efficiency conversion method for prototype-model water pumps based on the Prandtl-Colebrook formula, which has a wide range of Reynolds numbers and good accordance with Nikuradse's tests, is proposed. The conversion results of this new method are compared with results of the modified Moody's formula, the IEC 60995—1991 method and the JIS B 8327—2002 method. The comparison indicates that this new method based on the Prandtl-Colebrook formula has a strong theoretical basis, a simple calculation procedure and high precision.

Key words :water pump ;hydraulic turbine ;prototype apparatus ;model test ;hydraulically smooth region ;hydraulic efficiency conversion

为了获得大型水力机械的性能参数,需要进行模型试验,以估计所建原型泵装置的性能。根据相似理论所进行的模型与原型的流量、扬程换算,基本上得到人们的认同。但由于原型与模型的几何尺寸不同、雷诺数 Re 不同、表面相对粗糙度不同、相对间隙不同等原因,使原型与模型的效率不相等,形成了“比尺效应”。

莫迪公式以布拉修斯(Blasius)摩擦因数公式为基础,受到应用雷诺数、仅考虑摩擦损失、原型试验条件及精度的限制,影响了换算精度和可靠性。为寻求更为准确的换算方法,人们进行了大量的理论和实践探索,得到许多基于莫迪公式的换算方

法^[1-2]。笔者就原型与模型效率换算过程中布拉修斯公式的适用性及摩擦损失和旋涡损失问题进行探讨,并基于适用雷诺数范围更大、更符合尼古拉兹(Nikuradse)实验结果的普朗特(Prandtl)摩擦因数公式,提出新的原型与模型水力效率换算的方法。

1 光滑圆管水力阻力系数

对于光滑圆管的摩擦阻力因数,布拉修斯公式为^[3]

$$\lambda = \frac{0.3164}{\sqrt[4]{Re}} \quad (3\,000 \leq Re \leq 10^5) \quad (1)$$

普朗特提出光滑圆管的摩擦因数计算公式为^[3]

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = 2.0 \lg(Re \sqrt{\lambda}) - 0.8 \quad (2)$$

但式(2)为隐式,计算不方便。Colebrook 建议采用以下近似式^[3]:

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = 1.8 \lg\left(\frac{Re}{6.9}\right) \quad (3)$$

$$\text{或} \quad \frac{1}{\sqrt{\lambda}} = 1.8 (\lg Re - 0.839) \quad (4)$$

式(3)和式(4)的雷诺数范围为 $4000 \leq Re \leq 10^8$, 计算精度小于 $\pm 1.5\%$ 。

尼古拉兹根据大量实验,提出了阻力系数与雷诺数及相对粗糙度的关系曲线图^[3-4]。

2 莫迪系列公式分析

2.1 莫迪系列公式的发展

基于布拉修斯公式,美国工程师莫迪(Moody)提出了著名的水轮机原型与模型水力效率换算公式^[1-2]:

$$\frac{1 - \eta_p}{1 - \eta_m} = \sqrt[4]{\frac{D_{1m}}{D_{1p}}} \sqrt[8]{\frac{H_m}{H_p}} \quad (5)$$

式中: η 为水力效率; D_1 为转轮标称直径; H 为水头,下标 p 和 m 分别表示原型和模型。

式(5)具有计算简单、含义直观的特点,很好地体现了‘比尺效应’的意义,长期获得广泛应用。

有研究认为,泵装置内的水力损失不仅与黏性摩擦损失有关,还包括了旋涡损失、进出口损失、冲击损失等局部水力损失。

在考虑黏性摩擦损失和旋涡损失等局部水力损失的基础上,瑞士阿柯瑞(Ackeret)认为原型与模型的旋涡损失比例相同,提出了轴流式水轮机原型与模型的效率换算公式:

$$\eta_p = 1 - (1 - \eta_m) \left(0.5 + 0.5 \sqrt[5]{\frac{Re_m}{Re_p}} \right) \quad (6)$$

英国胡顿(Hutton)建议摩擦损失占总水力损失的70%,其余30%不随尺寸及水头变化,对这部分不予修正,原型与模型效率换算公式为

$$\eta_p = 1 - (1 - \eta_m) \left(0.3 + 0.7 \sqrt[5]{\frac{Re_m}{Re_p}} \right) \quad (7)$$

经过不断研究,20 世纪 70 年代广泛应用于混流式和轴流式水轮机的原型与模型效率换算公式为

$$1 - \eta_p = (1 - \eta_m) \left[(1 - \epsilon) + \epsilon \sqrt[5]{\frac{Re_m}{Re_p}} \right] \quad (8)$$

式中: γ 为指数常数; ϵ 为摩擦损失占全部水力损失的比例。

对于不同机型的水轮机以及同一机型在不同工况点, ϵ 值是变动的。对于莫迪公式的研究,主要集

中在如何确定 γ 和 ϵ 方面。对于常规水泵,日本学者提出 $\epsilon = 0.6 \sim 0.75$ 。国际电工委员会(IEC)《水轮机模型试验的验收规程》推荐的轴流式水轮机原型与模型效率换算公式为

$$\eta_p = 1 - (1 - \eta_m) \left(0.3 + 0.7 \sqrt[5]{\frac{D_{1m}}{D_{1p}}} \sqrt[10]{\frac{H_m}{H_p}} \right) \quad (9)$$

2.2 莫迪系列公式分析

根据水力效率与水力损失的关系,把所有水力损失归类为与雷诺数强相关和弱相关两部分。强相关主要为摩擦损失(λ_f);弱相关主要包括了涡、冲击、扩散、脱流等局部水力损失(λ_v),这部分损失主要与工况有关,在最佳工况时最小,为讨论方便简称为涡损失。

对于水泵模型试验,试验扬程一般与原型扬程相等,有

$$\frac{1 - \eta_{hp}}{1 - \eta_{hm}} = \frac{\Delta h_p}{\Delta h_m} = \frac{\lambda_p}{\lambda_m} = \frac{\lambda_{vp} + \lambda_{fp}}{\lambda_{vm} + \lambda_{fm}} \quad (10)$$

式(10)与式(8)比较,有

$$\frac{\lambda_{vp}}{\lambda_{vm} + \lambda_{fm}} = 1 - \epsilon \quad (11)$$

$$\frac{\lambda_{vp}}{\lambda_{vm} + \lambda_{fm}} = \epsilon \sqrt[5]{\frac{Re_m}{Re_p}} \quad (12)$$

式(11)表示原型中与雷诺数弱相关的旋涡阻力系数与模型全部阻力系数之和的比例,式(12)表示原型中与雷诺数强相关的摩擦阻力系数与模型全部阻力系数之和的比例。 ϵ 的变化,一方面改变了两种类型的损失占总损失的比例,另一方面改变了原型与模型总损失的比例。

在莫迪系列公式中,试图通过改变式(8)中的参变量 ϵ 和 γ ,减小换算误差,从而提高精度。即通过采用较大的 γ 值,增大布拉修斯公式计算的原型摩擦损失占模型总水力损失的比例,减小了大雷诺数

时布拉修斯公式值偏小的误差(见表1, $\frac{\lambda_p}{\lambda_m} = \sqrt[5]{\frac{D_p}{D_m}}$);

通过 ϵ 和附加 $1 - \epsilon$,调整不同类型水力损失的比例,但 ϵ 缩小了模型和原型的雷诺数之比,减小了布拉修斯公式计算的原型摩擦损失占模型总水力损失的比例。

表 1 原型与模型摩擦因数比值与布拉修斯公式指数的关系

γ	λ_p/λ_m		
	$D_p/D_m = 10$	$D_p/D_m = 15$	$D_p/D_m = 20$
4	0.562	0.508	0.473
5	0.631	0.582	0.549
6	0.681	0.637	0.607
7	0.719	0.679	0.651

注 模型 $Re = 3.00 \times 10^6$ 。 $D_p/D_m = 10, 15, 20$ 对应的原型和模型的普朗特摩擦因数比 λ_p/λ_m 分别为 0.722, 0.685, 0.661。

由水力摩擦和非水力摩擦引起的水力损失是客

观存在的,摩擦水力损失并不会因为计入了旋涡损失而减小。对于考虑两种损失形式的莫迪公式(如胡顿公式),如果把公式中的 $\epsilon = 0.7$ 和 $1 - \epsilon = 0.3$ 理解为摩擦损失占总水力损失的 70%、旋涡损失占总水力损失的 30%,则是把布拉修斯阻力系数作为全部阻力系数进行比例分配,把摩擦损失减少的部分作为旋涡损失计算。另外, ϵ 的意义如式(11)、式(12)所示, $1 - \epsilon$ 不是与雷诺数无关的水力损失的比例, ϵ 也不是与雷诺数有关的水力损失的比例,以这样的 ϵ 系数方式进行修正后的摩擦损失、旋涡损失与总水力损失的比例也不是 ϵ 或 $1 - \epsilon$ 所表示的百分比值。

所以 ϵ 只是调整摩擦损失及旋涡损失大小的修正因子,且不存在 $\epsilon + (1 - \epsilon) = 1$ 的关系。为此,当 $H_p = H_m$ 或叶轮圆周速度 u 相同时,令

$$\alpha = \frac{\lambda_{vp}}{\lambda_{vm} + \lambda_{fm}}$$
$$\frac{\lambda_{fp}}{\lambda_{vm} + \lambda_{fm}} = \beta \sqrt[\gamma]{\frac{Re_m}{Re_p}}$$

则水泵原型效率为

$$\eta_p = \frac{\eta_m}{\left(\alpha + \beta \sqrt[\gamma]{\frac{D_m}{D_p}}\right)(1 - \eta_m) + \eta_m} \tag{13}$$

表 2 列出了按式(13)计算的摩擦损失比例和原型效率。

当 $\alpha = 0.3, \beta = 0.7, \gamma = 5$ 时,式(13)成为水泵形式的胡顿公式,原型摩擦损失占模型总水力损失的 57.6% ~ 59.6% (原型与模型尺寸比为 10 ~ 20)。

$\alpha = 0, \beta = 1/0.7, \gamma = 5$ 表示原型摩擦损失占模型总水力损失的 70%,原型旋涡损失占模型总水力损失的 30%。小尺寸比时,原型水力效率小于 SL 140—2006《水泵模型及装置模型验收试验规程》^[2] 及 JIS B 8327—2002《利用模型泵测试泵性能的试验方法》的换算值;大尺寸比时,原型水力效率介于 SL 140—2006 和 JIS B 8327—2002 的换算值之间。

$\alpha = 0.18$ 及 $\alpha = 0.27$ 时原型与模型的换算效率分别与 SL 140—2006 和 JIS B 8327—2002 的相当,摩

擦因数比例分别约为 76% 及 68% ($D_p/D_m = 15$)。

考虑到摩擦损失和旋涡损失的相互无关性,以及雷诺数 $Re = 3 \times 10^6$ 时布拉修斯比普朗特公式值小 21.7% 的情况,当 $\gamma = 4$ 时,令 $\beta = 1.2$,使摩擦因数比值增大 20%,则 $\alpha = 0.15$ 和 $\alpha = 0.24$ 时原型与模型的换算效率分别与 SL 140—2006 以及 JIS B 8327—2002 的相当,摩擦因数比例分别约为 80% 及 72% ($D_p/D_m = 15$)。

在原型与模型尺寸比为 10 及 20 时, $\beta = 1.0, \gamma = 5$ 时的换算比值 $\beta = 1.2, \gamma = 4$ 时的更为接近 SL 140—2006 及 JIS B 8327—2002 的换算结果。

3 基于普朗特公式方法

3.1 普朗特公式方法

根据式(10)及普朗特摩擦因数显式(即 Colebrook 近似式),有

$$\frac{\lambda_p}{\lambda_m} = \frac{(\lg Re_m - 0.839)^2}{(\lg Re_p - 0.839)^2} = A_f \tag{14}$$

其中 $Re = \frac{Du}{\nu}$

考虑到不同性质的摩擦及旋涡水力损失,参考莫迪系列公式的处理方法,设原型旋涡损失占模型总损失的比例为 A_v ,则

对于水轮机

$$\eta_p = 1 - (1 - \eta_m)(A_v + A_f) \tag{15}$$

对于水泵

$$\eta_p = \frac{\eta_m}{(A_v + A_f)(1 - \eta_m) + \eta_m} \tag{16}$$

表 3 为按式(16)计算的摩擦损失比例和原型效率。由于 Prandtl-Colebrook 摩擦因数公式适用的雷

表 3 式(16)计算的摩擦损失占总损失的比例和原型效率 ($\eta_m = 85\%$) %

A_v	摩擦损失占总损失的比例			原型效率		
	$D_p/D_m = 10$	$D_p/D_m = 15$	$D_p/D_m = 20$	$D_p/D_m = 10$	$D_p/D_m = 15$	$D_p/D_m = 20$
0.06	92.4	92.1	91.8	87.7	88.2	88.5
0.10	88.0	87.5	87.1	87.2	87.6	88.0
0.15	83.0	82.3	81.8	86.5	87.0	87.3
0.20	78.6	77.8	77.1	85.8	86.3	86.6

表 2 式(13)计算的摩擦损失占总损失的比例和原型效率 ($\eta_m = 85\%$) %

α	β	γ	摩擦损失占总损失的比例			原型效率		
			$D_p/D_m = 10$	$D_p/D_m = 15$	$D_p/D_m = 20$	$D_p/D_m = 10$	$D_p/D_m = 15$	$D_p/D_m = 20$
0.30	0.7	5	59.6	57.6	56.2	88.43	88.90	89.22
0	1.43	5	70.0	70.0	70.0	86.28	87.21	87.84
0.18	1	5	77.8	76.4	75.3	87.48	88.15	88.60
0.27	1	5	70.0	68.3	67.0	86.28	86.93	87.37
0.15	1.2	4	81.8	80.3	79.1	87.29	88.18	88.76
0.24	1.2	4	73.8	71.8	70.3	86.10	86.96	87.53

注 SL 140—2006^[2] 中,原型效率分别为 87.78% ($D_p/D_m = 10$), 88.17% ($D_p/D_m = 15$), 88.43% ($D_p/D_m = 20$) ;JIS B 8327—2002^[5] 中,原型效率分别为 86.68% ($D_p/D_m = 10$), 86.91% ($D_p/D_m = 15$), 87.06% ($D_p/D_m = 20$)。

表 4 原型与模型效率换算值比较

%

公式名称及系数		与 SL140—2006 之差			与 JIS B8327—2002 之差		
		$D_p/D_m = 10$	$D_p/D_m = 15$	$D_p/D_m = 20$	$D_p/D_m = 10$	$D_p/D_m = 15$	$D_p/D_m = 20$
莫迪公式	$\alpha = 0.18$	- 0.30	- 0.02	0.17			
	$\alpha = 0.27$				- 0.40	0.02	0.31
普朗特公式	$A_v = 0.06$	- 0.08	0.02	0.09			
	$A_v = 0.15$				- 0.18	0.06	0.23

诺数可达 1×10^8 , 换算时对摩擦因数没有进行修正, 只改变了原型旋涡损失占模型总损失的比例(A_v)。

由表 3 可见, 当原型旋涡损失与模型总损失的比为 0.15 时, 摩擦损失占模型总水力损失的比例约为 82%, 其换算效率与 JIS B 8327—2002 的最为接近 当 $A_v = 0.06$ 时, 摩擦损失占模型总水力损失的比例约为 92%, 效率换算值与 SL140—2006 的相当。

3.2 普朗特公式与莫迪公式比较

a. 从理论上分析, 普朗特公式的适用雷诺数达到 1×10^8 , 覆盖了模型试验及原型运行的雷诺数范围, 具有较高的计算精度 布拉修斯公式的适用雷诺数小于 1×10^5 , 不在模型试验及原型运行的雷诺数范围内, 计算误差较大。

b. 从实践上分析, 基于布拉修斯公式的莫迪公式得到长期广泛的应用, 积累了大量的经验并进行了许多改进 以普朗特公式为基础的换算方法还没有被广泛应用。

c. 莫迪系列公式需要进行叶轮直径比指数以及 ϵ 值的调整, 调整的目的是为了减小换算误差, 其根据是原型和模型制作水平及试验数据分析的结果 普朗特公式不需对摩擦损失进行修正, 只需考虑旋涡损失, 具有充分的理论依据。

d. 莫迪公式简单、直观, 但在试验过程高度自动化的情况下, 公式及计算过程的繁杂程度对试验及换算效率没有影响。

e. 普朗特公式、莫迪公式与 SL 140—2006 和 JIS B 8327—2002 相比, Prandtl-Colebrook 公式比莫迪公式更接近 SL 140—2006 和 JIS B 8327—2002 的换算值(见表 4), 具有更高的换算精度。

4 结 论

a. 布拉修斯摩擦阻力公式的雷诺数适用范围小于标准^[2,4] 规定及试验的实际雷诺数, 阻力系数计算误差大。

b. Prandtl-Colebrook 摩擦因数公式的雷诺数适用范围覆盖了原型与模型试验, 只需调整旋涡损失比例, 有较强的理论基础及逻辑性。

c. Prandtl-Colebrook 公式的换算结果具有较高的精度及较简单的计算过程。

参考文献：

[1] 刘大恺. 水轮机[M]. 北京 中国水利出版社, 2003.
[2] SL140—2006, 水泵模型及装置模型验收试验规程[S].
[3] FINNEMORE E J, FRANZINI J B. 流体力学及其工程应用 [M]. 影印版. 北京 清华大学出版社, 2003.
[4] FOX R W, McDONALD A T. Introduction to fluid mechanics [M]. India Replika Press Pvt Ltd, 2001.
[5] JIS B 8327—2002, 利用模型泵测试泵性能的试验方法 [S].

(收稿日期 2007-10-17 编辑 高建群)

《河海大学学报(自然科学版)》征订启事

(邮发代号 28-63, CN32-1117/TV, ISSN1000-1980, 双月刊)

《河海大学学报(自然科学版)》是以水资源开发、利用与保护为重点的综合性学术期刊, 主要刊登河海大学在水资源、水文、地质、测量、水利工程、水电工程、水运工程、海洋及海岸工程、水工结构、工程力学、水力学及河流动力学、岩土工程、计算机科学、电力工程、电子技术及自动化工程、工业与民用建筑、管理工程、水利经济、环境工程、机械工程等学科方面的科研成果、学术论文、学术讨论、研究动态等学术性文章, 可供上述有关专业的科技工作者及大专院校师生阅读和参考。

《河海大学学报(自然科学版)》创办于 1957 年, 是全国中文核心期刊、中国科技核心期刊, 在国内工程技术界和学术界有较大影响。刊载的文章中, 有不少国家科技攻关(重点)项目和各种科学基金资助项目的研究成果, 部分达到了国内领先和国际先进水平, 为我国水利、水电、水运工程及其他有关工程建设的规划、设计、施工和管理提供了科学理论、方法和具体建议, 发挥了较大的社会效益和经济效益, 深受工程界和科技界赞许, 并获得首届中国高校优秀科技期刊奖以及中国期刊方阵‘双效期刊’、江苏省优秀期刊、全国水利系统优秀期刊称号。

《河海大学学报(自然科学版)》每逢单月出版, 国内外公开发行, 每期定价 12.00 元, 全年 6 期共 72.00 元。欢迎广大读者通过全国各地邮政局订阅或直接与编辑部联系。编辑部地址 210098 南京市西康路 1 号《河海大学学报(自然科学版)》编辑部 联系电话 025-83786343 E-mail hxb@hhu.edu.cn