

ICS 27.140
P 55
备案号: J2501—2018

DL

中华人民共和国电力行业标准

P

DL / T 5748 — 2017

水电水利工程航道水力学模拟技术规程

Code for hydraulics modeling of waterway for
hydropower and water resources

2017-11-15 发布

2018-03-01 实施

国家能源局 发布

中华人民共和国电力行业标准

水电水利工程航道水力学模拟技术规程

Code for hydraulics modeling of waterway for
hydropower and water resources

DL/T 5748 — 2017

主编机构：中国电力企业联合会

批准部门：国家能源局

施行日期：2018年3月1日

中国电力出版社

2018 北 京

中华人民共和国电力行业标准
水电水利工程航道水力学模拟技术规程
Code for hydraulics modeling of waterway for hydropower and water resources

DL / T 5748 — 2017

*

中国电力出版社出版、发行
(北京市东城区北京站西街 19 号 100005 <http://www.cepp.sgcc.com.cn>)
北京传奇佳彩数码印刷有限公司印刷

*

2018 年 11 月第一版 2018 年 11 月北京第一次印刷
850 毫米×1168 毫米 32 开本 1.5 印张 33 千字
印数 001—200 册

*

统一书号 155198 • 950

版 权 专 有 侵 权 必 究
本书如有印装质量问题，我社发行部负责退换

DL / T 5748 — 2017

国家能源局

公 告

2017 年 第 10 号

依据《国家能源局关于印发〈能源领域行业标准化管理办法（试行）〉及实施细则的通知》（国能局科技〔2009〕52 号）有关规定，经审查，国家能源局批准《煤层气生产站场安全管理规范》等 204 项行业标准，其中能源标准（NB）62 项、电力标准（DL）86 项、石油标准（SY）56 项，现予以发布。

上述标准中电力管理、电工装备标准、煤层气及生物液体燃料标准由中国电力出版社出版发行，电力（火电）规划设计标准由中国计划出版社出版发行，《定制电力技术导则》由中国标准出版社出版发行，石油天然气标准由石油工业出版社出版发行，煤炭标准由煤炭工业出版社出版发行，锅炉压力容器标准由新华出版社出版发行。

附件：行业标准目录

国家能源局

2017 年 11 月 15 日

DL / T 5748 — 2017

附件:

行 业 标 准 目 录

序号	标准编号	标准名称	代替标准	采标号	批准日期	实施日期
...						
122	DL/T 5748— 2017	水电水利工程 航道水力学 模拟技术规程			2017-11-15	2018-03-01
...						

前 言

根据《国家能源局关于下达 2010 年第一批能源领域行业标准制（修）订计划的通知》（国能科技〔2010〕320 号）要求，规程编制组经广泛深入地调查研究、资料收集、技术咨询和综合整理分析工作，认真总结了水电水利工程航道水力学模拟研究成果和应用技术水平现状，并在广泛征求了国内有关项目业主、设计单位、科研院所和高等院校等单位的意见和建议的基础上，制定了本规程。

本规程共有 7 章和 1 个附录，主要内容包括：总则、术语、研究大纲、基本资料、航道水力学模型试验、航道水力学数值模拟、报告编写。

本规程由中国电力企业联合会提出，由电力行业水电施工标准化技术委员会（DL/TC 29）归口并负责解释。执行过程中如有意见或建议，请反馈至中国电力企业联合会标准化管理中心（地址：北京市白广路二条一号，邮编：100761）。

本规程主编单位：长江水利委员会长江科学院。

本规程主要起草人员：黄国兵 江耀祖 吴英卓 陈 辉
姜伯乐 王智娟 刘志雄 范 敏
李 静 黄明海 严 伟 王业红

本规程主要审查人员：宗敦峰 李志谦 汪 毅 吴新琪
陈 宏 孙来成 王鹏禹 吴高见
吴 旭 王 军 钟彦祥 温建明
何小雄 张建华 林 鹏 朱明星
吕芝林 刘亚辉 廖仁强 肖平西

目 次

1 总则 1

2 术语 2

3 研究大纲 3

4 基本资料 4

5 航道水力学模型试验 6

 5.1 相似准则 6

 5.2 模型设计 6

 5.3 模型制作及安装 7

 5.4 试验设备与测量仪器 8

 5.5 模型率定与验证 9

 5.6 试验与观测 9

 5.7 试验资料整理与分析 10

6 航道水力学数值模拟 12

 6.1 控制方程及数值求解方法 12

 6.2 初始条件及边界处理 12

 6.3 计算区域确定及网格划分 13

 6.4 数值模拟验证 13

 6.5 计算及成果分析 14

7 报告编写 15

附录 A 航道水力学试验测量的准确度要求 16

本规程用词说明 18

引用标准名录 19

附：条文说明 21

Contents

1	General provisions	1
2	Terms	2
3	Research outline	3
4	Basic information	4
5	Navigation hydraulics model test	6
5.1	Similarity criteria	6
5.2	Model design	6
5.3	Model making and installation	7
5.4	Test equipment and measurement instruments	8
5.5	Model calibration and validation	9
5.6	Experiment and observation	9
5.7	Test data compilation and analysis	10
6	Navigation hydraulics numerical simulation	12
6.1	Governing equations and numerical scheme	12
6.2	Initial conditions and boundary treatment	12
6.3	Determination and mesh generation	13
6.4	Mathematical model validation	13
6.5	Calculation and result analysis	14
7	Reports writing	15
Appendix A	Accuracy requirements and precautions of navigation hydraulics model test measurements	16
	Explanations of wording in this code	18
	Normative standards	19
	Addition: Explanation of Provisions	21

库七七 www.kq9w.com 提供下载

1 总 则

1.0.1 本规程制定的目的是为了统一本行业航道水力学模拟研究的方法和技术要求，提高试验研究成果的质量与水平。

1.0.2 本规程适用于水电水利工程航道物理模型试验及数值模拟研究。

1.0.3 航道水力学模拟研究除应符合本规程外，尚应符合国家有关标准的规定。

2 术 语

2.0.1 模型试验 model experiment

将建筑物和水流运动特征按相似性准则模拟，研究水流运动和建筑物相互影响的试验工作。

2.0.2 水力学数值模拟 hydraulic mathematic model

根据水流运动规律，通过建立基本的数学方程式及其数值计算，分析和预测水流运动的方法。

2.0.3 模型比尺 model scale

在满足模型和原型相似的条件下，模型与原型各对应几何量间的比例关系。

2.0.4 自航船模 self-propelled ship model

无线电遥控船模的运动特性，按照相似理论预报实船的操作纵性。

2.0.5 艏向角 heading angle

船舶纵轴轴向在水平面内的投影方向与基准线之间的夹角。

3 研究大纲

3.0.1 水电水利工程航道物理模型试验及数值模拟研究前应根据研究任务和要求,编制研究大纲,在研究过程中根据实际情况进行修正。

3.0.2 模型试验研究大纲宜包括下列内容:

- 1 工程概况;
- 2 研究目的与内容;
- 3 工程设计方案和基本资料;
- 4 技术要求和依据的技术标准;
- 5 模型设计和试验研究方法;
- 6 试验设备和测量仪器;
- 7 试验研究进度计划;
- 8 预期成果目标;
- 9 项目负责人和参加人员;
- 10 其他。

3.0.3 数值模拟研究大纲宜包括下列内容:

- 1 工程概况;
- 2 研究目的与内容;
- 3 工程设计方案和基本资料;
- 4 技术要求和依据的技术标准;
- 5 数学模型;
- 6 模型率定和验证;
- 7 试验研究进度计划;
- 8 预期成果目标;
- 9 项目负责人和参加人员;
- 10 其他。

4 基本资料

4.0.1 地形地质资料应包括以下内容：

- 1 地形范围应包括工程研究河段和模型进出口调节段的近期枯水河道，地形高程应至最高通航水位以上；
- 2 地形图比例宜为 1:1000~1:2000，地形变化不大的河床可为 1:5000，局部复杂地形宜为 1:200~1:500；
- 3 地形图上应标明水尺和测流断面的位置；
- 4 相关地质资料。

4.0.2 水文资料应包括以下内容：

- 1 研究河段同一水文年洪、中、枯水期的水面线资料，枯水期水面线应与地形资料同期观测；
- 2 研究河段进、出口附近断面的流速、流向分布资料；
- 3 研究河段出口断面处的水位与流量关系资料。

4.0.3 建筑物资料应包括以下内容：

- 1 工程总体布置；
- 2 泄水建筑物结构；
- 3 通航建筑物结构；
- 4 中间渠道取排水方案布置。

4.0.4 通航期工程运行调度方式应包括以下内容：

- 1 工程上下游水位组合；
- 2 泄水建筑物泄水方式与下泄流量；
- 3 电站机组运行调度方式；
- 4 通航调度方式。

4.0.5 船舶资料应包括以下内容：

- 1 设计推船或拖船与驳船的吨位、型线图、方形系数、满载

和空载的排水量、吃水和重心位置；

- 2 设计船队的排列方式、平面尺寸、载重量和吃水；
- 3 推船或拖船功率、螺旋桨桨叶及安装图、舵叶图和舵系布置图；
- 4 船舶、船队的静水航速和操纵性能。

库七七 www.k99w.com 提供下载

5 航道水力学模型试验

5.1 相似准则

5.1.1 模型与原型应保持几何相似、水流运动相似和动力相似，遵循重力相似准则。

5.1.2 模型水流宜处于阻力平方区，如达不到阻力平方区，则应保证水流成紊流状态。

5.1.3 船模总操纵衡准参数或船模回转性参数和航向稳定性参数应保持相似。

5.2 模型设计

5.2.1 模型范围、模型比尺符合下列要求：

1 模型试验范围应根据试验目的和要求，并结合水流、河道情况和工程建筑物对上下游河道影响范围确定，应保证试验河段进出口具有一定长度的调节段；

2 模型应采用正态模型，模型几何比尺宜大于 1:125。

5.2.2 模型试验的最小水深应不小于 0.03m。

5.2.3 模型地形糙率宜为 0.012~0.030。

5.2.4 船模总操纵衡准参数或船模回转性参数和航向稳定性参数应基本保持相似。并符合下列要求：

1 无因次的船模应舵性指数 T' 值宜大于实船的 T 值，允许偏差为 5%。 T' 应按下式计算：

$$T' = T(V_s / L_s) \quad (5.2.4-1)$$

式中： T ——船模（实船）应舵性指数，s；

V_s ——船模（实船）静水航速，m/s；

L_s ——船模（实船）几何长度，m。

2 无因次的船模回转性指数 K' 值与实船 K 值的允许偏差为 20%。 K' 应按照下式计算：

$$K' = K(L_s / V_s) \quad (5.2.4-2)$$

式中： K ——船模（实船）回转性指数， s^{-1} ；

V_s ——船模（实船）静水航速，m/s；

L_s ——船模（实船）几何长度，m。

3 船模（实船）的操纵性指数 K 、 T 值应根据标准 Z 形试验的结果确定。当缺少标准 Z 形试验资料时，可按“航行复演法”或“动水 Z 形试验法”的要求进行操纵性相似分析。仅在方案定性比较时可采用回转半径相似进行自航船模试验。

5.2.5 应绘制模型总体布置图、结构图和船模制模详图、测试断面及测点布置，并提出制模加工及安装要求。

5.2.6 船模制作应绘制船模或简化方案总体设计图，并提出相应的技术要求。

5.2.7 船模设计应符合下列要求：

1 设计代表船型及代表船队应根据航道等级、通航工程的设计要求及发展规划确定；

2 船模比尺应与航道模型的比尺相同，船体按几何相似要求设计，达到线型、排水量和重心位置相似；

3 船模制造范围可为船舶甲板以下部位，自航船模尚应包括船舵及船机和螺旋桨；

4 船舵和螺旋桨的几何尺度、安装位置应和实船保持基本相似。

5.3 模型制作及安装

5.3.1 按照设计要求进行模型制作及安装。

5.3.2 模型地形制作可采用断面法、等高线法。地形变化较缓的区域：断面间距原型 50m~80m，等高线间距原型 3m~5m；地

形变化复杂的区域：断面间距原型 30m~50m，等高线间距原型 1m~3m，并根据实际地形情况对深坑或突出地形进行局部加密处理。

5.3.3 河道及建筑物模型制作和精度应按《水电水利工程常规水工模型试验规程》DL/T 5244 控制。

5.3.4 船模船体表面应光滑，成型后不易变形。船模螺旋桨及舵的尺寸与位置应满足 5.2.4 条的要求。

5.3.5 船模制作精度应符合下列要求：

- 1 船模单船长度允许偏差为 $\pm 2\text{mm}$ ，宽度允许偏差为 $\pm 1\text{mm}$ ，水线刻度允许偏差为 $\pm 0.5\text{mm}$ ；
- 2 船模重心位置允许偏差为 $\pm 2\text{mm}$ ；
- 3 船队编队后的尺度允许偏差为 $\pm 1\%$ ，编队船舶间的联结方式宜为硬联结。

5.3.6 船模舵机应运转自如，操舵角允许偏差为 $\pm 0.5^\circ$ ，满舵舵角允许偏差为 $\pm 1.0^\circ$ ，转舵速度应与实船相似。

5.4 试验设备与测量仪器

5.4.1 航道水力学模型试验常用的设备及测量仪器仪表应满足《水电水利工程常规水工模型试验规程》DL/T 5244 的要求。

5.4.2 主要测量仪器包括以下两类：

- 1 通航水流条件测量仪器：水位计、流量计、波高仪、流速仪。
- 2 船模航行参数测量仪器：高空广角摄影机或船模激光轨迹仪。

5.4.3 在进行有船闸充（泄）水、电站日调节等航道水力学模型试验时，应根据试验要求配置非恒定流试验的控制设备及测量仪器。

5.4.4 试验使用的通用测量仪器，经过检定或校准合格并在有效期内，且其技术指标符合试验要求。航道水力学试验测量的准确度要求见附录 A。

5.4.5 船模航行状态的模拟和测量应采用遥控自航船模系统，实时测量船模运动坐标和航行动态参数。船模航行状态的模拟和测量应符合下列规定：

- 1 在试验范围内应具有良好的稳定性和抗干扰性能；
- 2 船模的遥控设备应准确执行驾驶操纵指令、控制舵角和主机工作；
- 3 船模运动的定位允许偏差应小于 $\pm 20\text{mm}$ 。

5.5 模型率定与验证

5.5.1 模型应进行水位验证和糙率校正，并符合下列要求：

- 1 山区河流洪、中、枯水期流量的水位允许偏差应分别为原型 $\pm 0.20\text{m}$ 、 $\pm 0.15\text{m}$ 和 $\pm 0.10\text{m}$ ；
- 2 平原河流洪、中、枯水期流量的水位允许偏差应分别为原型 $\pm 0.15\text{m}$ 、 $\pm 0.10\text{m}$ 和 $\pm 0.05\text{m}$ 。

5.5.2 模型应进行断面流速验证，断面流速分布规律应与原型基本一致，流量允许偏差为 $\pm 5\%$ 。

5.5.3 自航船模应在水池中进行船模吃水深度、配重及静水航速相似验证率定，船模在零舵角的条件下应保持直线航行。

5.5.4 船模应进行标准 Z 形试验，由试验求出衡准船模操纵性的主要参数 K' 、 T' 值。比较船模与实船的操纵性衡准，要求船模的总操纵参数低于实船的 10% 左右为宜，否则，应进行比尺效应修正。

5.6 试验与观测

5.6.1 根据不同工程布置方案 and 不同水位流量组合条件进行试验。设计有要求时，应进行船闸充泄水、水库日调节等非恒定流对船舶航行影响的试验。

5.6.2 航道水力学参数的观测应包括下列内容：

- 1 航道沿程流态：回流、斜流、往复流、泡水、漩涡、绕流、

跌水等水流流态；

2 航道水流流向、流速分布；

3 水面坡降：沿航线方向每隔一船长应设测点观测纵向坡降，横向坡降的测点可视需要而定；

4 航道内水深；

5 航道上、下游口门冲淤情况；

6 口门区、引航道内及船舶停泊区的水面波浪；

7 非恒定流参数：流速随时间变化过程，往复流的周期和强度变化，航道内水位日变幅及小时升降率等。

5.6.3 自航船模航行参数的观测应包括下列内容：

1 船模对岸航速；

2 航迹线和船位线；

3 舵角、艏向角、航向角和漂角；

4 漂移距离、航行水域宽、会船间距、岸距。

5.7 试验资料整理与分析

5.7.1 模型验证试验应整理模型的水面线、断面流速分布和流量资料，并与原型实测资料对比、分析验证结果。

5.7.2 航道模型试验资料整理应包括下列内容：

1 航道范围内的回流、泡水和漩涡等流场流态图；

2 航道的流速分布、水面线、水面坡降、水面波动和水深；

3 航道、船闸进出口口门等冲淤情况；

4 航道内船模的航态图和航行参数变化过程线，包括：用舵过程线、对岸航速过程线、航迹线、漂角过程线；

5 对于船闸充泄水、水库日调节等非恒定流，应整理航道停泊区水位和流速随时间变化过程线。

5.7.3 航道模型试验成果分析应包括下列内容：

1 列出不同工程布置方案 and 不同水位流量组合条件下通航水流条件和船舶航行参数，论证通航水流条件，提出推荐的工程

布置方案和航线；

2 描述流态、流速、水面比降、水位波动及往复流特性对航道运行、通航建筑物运行、船舶停泊和航行的影响；

3 列出航道、口门区等冲淤情况，提出航道口门区防沙清淤和改善水流条件的意见和建议。

库七七 www.k99w.com 提供下载

6 航道水力学数值模拟

6.1 控制方程及数值求解方法

6.1.1 航道水力学数值模拟宜包含水流运动数值模拟与泥沙输移数值模拟，研究工程修建前后航道冲淤变化不大的水力因素变化时，宜采用水流数值模拟；研究工程修建前后航道冲淤变化较大及由此引起的水力因素变化时，宜采用水沙数值模拟，并根据研究河段的泥沙特性可选用推移质模拟或悬移质模拟。

6.1.2 研究长时期内长河段的水流、河床变化，宜采用一维数值模拟进行研究。研究坝区航道（含中间渠道及通航建筑物上下游引航道）、施工期航道、受跨河建筑物影响的航道等短河段的通航水流条件等，宜采用二维数值模拟进行研究。如水流泥沙因子三维特性明显时，可采用三维数值模拟进行研究。

6.1.3 航道、港口工程及过河建筑物工程方案模拟应符合下列规定。

1 浅滩、汊道及港口疏浚或整治的工程方案模拟宜用平面二维数值模拟。

2 对水流模拟或泥沙模拟的选择应依据河床变形强度和需要确定；对推移质模拟、悬移质模拟或全沙模拟的选择应依据研究河段的泥沙特性确定。

6.1.4 数值计算格式应该满足相容性、收敛性和稳定性要求。

6.1.5 数值求解方法可采用控制体积法和有限差分方法等。

6.2 初始条件及边界处理

6.2.1 水流模拟的初始条件应包括计算区域内的初始水位和流

速。泥沙模拟的初始条件还应包括计算区域内的初始床沙级配分布。

6.2.2 水流模拟的边界条件应包括上游入流边界给定流量、下游出流边界给定水位，干湿边界宜采用动边界技术模拟。泥沙模拟还应给出入流边界上来沙过程及其颗粒级配。

6.2.3 当计算区域内出现汇流、堰闸过流、湖泊集水、侧向入流等河道几何形状不连续或水力特性不连续时，应根据水力特性作必要处理。

6.3 计算区域确定及网格划分

6.3.1 计算区域进出口应选在顺直河段上，并要求进出口边界上的水力、泥沙要素不受区域内工程方案的影响。

6.3.2 一维模拟断面布置应符合下列规定：

- 1 断面间距应根据河道形态、河床组成及糙率特性以及研究问题的需要确定；
- 2 重点研究河段和河道几何形态变化较大的部位应适当加密断面；
- 3 断面应与主流方向垂直。

6.3.3 二维、三维模拟的网格形式应根据边界的特点和计算模式的需要确定，并应符合下列规定：

- 1 网格密度应能反映水下实际地形和工程修建后地形的变化；
- 2 网格密度应能概化出岸边界和不同工程方案的边界；
- 3 对于重点研究部位，网格应适当加密。

6.4 数值模拟验证

6.4.1 数值模拟验证应满足下列要求：

- 1 水位允许偏差为计算区域内水位落差的 $\pm 10\%$ ；
- 2 各河段冲淤与原型基本一致，冲淤量允许偏差为 $\pm 30\%$ ；

3 含沙量沿程变化趋势与原型基本一致,含沙量允许偏差为 $\pm 30\%$;

4 河床级配中值粒径允许偏差为 $\pm 20\%$ 。

6.4.2 二维及三维模拟验证应增加下列内容:

1 流速沿断面分布趋势与原型一致;分汊河道的干流及重点研究的汊流,其流量允许偏差为 $\pm 5\%$ 。

2 含沙量沿断面分布趋势与原型一致。

3 平面流态、流向及回流范围与原型一致。

4 地形冲淤性质及其分布与原型基本一致,重点研究部位的冲淤厚度及研究河段的冲淤总量允许偏差为 $\pm 30\%$ 。

6.4.3 通过验证计算确认模拟计算的有关参数,必要时应对模拟计算进行复核。

6.5 计算及成果分析

6.5.1 应按验证确认的模拟计算模式进行工程方案模拟,其边界条件应根据方案要求确定,对验证确定的模拟参数不得修改。

6.5.2 模拟计算成果应包含如下内容:

1 航道内流场、水位;

2 航道内的冲淤;

3 分析流态、流速、水面比降、水位波动及往复流特性对船闸运行、船舶停泊和航行的影响,航道及口门的冲淤情况,论证航道尺度变化对通航水流条件的影响。

7 报 告 编 写

7.0.1 应根据试验研究情况提出试验最终成果，包括文字报告、附图、附表、照片和录像等资料。

7.0.2 试验研究报告内容应包括工程概况、试验目的与任务、模型设计与制作、测量仪器、模型率定和验证、试验成果与分析、结论与建议等内容。

7.0.3 数值模拟研究报告应包括工程概况、计算研究目的与内容、数学模型、模型率定和验证、计算成果与分析、结论与建议等内容。

附 录 A

航道水力学试验测量的准确度要求

A.0.1 航道水力学试验测量的准确度要求见表 A.0.1。

表 A.0.1 测量的准确度要求

施测对象	测试仪器	准确度控制	备 注
模型	水准仪 经纬仪 钢尺	1. 控制局部模型高程和宽度误差应小于 0.3mm, 长度误差应小于 5mm, 整体模型地形高程误差应小于 2mm, 平面距离误差应小于 10mm。 2. 试验中模型变形应不超过 1%, 漏水量应不超过试验最小过流量的 1%	确定相似准则及模型范围和比尺; 试验模型应满足有关规定的限制条件, 注意减小缩尺影响
水面水位	量水测针	测针零点高程的误差应小于 0.2mm, 每一测次, 应重复测读 2~3 次, 取其稳定值或平均值, 测读精度应达 0.3mm	测杆应安装牢固, 并保证铅垂方向。试验前应检查测针及连接管, 不应有堵塞、气泡及漏水现象
	自动跟踪水位仪	率定曲线的偏差系数 $C_v = \sigma / \mu$ 应控制在 $\pm 5\%$ 以内	测杆应安装牢固, 并保证铅垂方向; 测试前应按规定进行自检率定, 试验测量区间应在率定曲线的直线部分
	波高仪	精度 0.2mm	测杆应安装牢固, 并保证铅垂方向
流量	量水堰板	应遵照量水测针精度控制要求, 流量误差应小于 $\pm 1\%$	应按有关规定的技术要求进行量水堰板的安装; 待流量稳定后, 方可测读上游测针读数; 按不同堰型的率定曲线或有关计算公式推算模型流量

续表 A.0.1

施测对象	测试仪器	准确度控制	备 注
流量	文德里量水计	测量误差应小于 $\pm 2\%$	应按有关规定的技术要求进行文德里量水计的安装；应定期进行自检率定，画出流量率定曲线
	电磁流量计	流量误差应小于 $\pm 1\%$	应按有关规定的技术要求进行电磁流量计的安装；控制阀一般安装在电磁流量计的后面，流量计前后的直管长度应满足要求
流 速	毕托管	1. 自检率定，当雷诺数 $Re=3300\sim 360000$ 范围内时，流速系数 $\varphi=1$ ，误差控制在 $1\%\sim 2\%$ ； 2. 每一测次，应重复测读 $2\sim 3$ 次，取其稳定值或平均值；比压计水头差测读精度应控制在 3mm 以内	试验前应检查毕托管和连接管，是否堵塞或漏气；在静水中进行充水排气，使比压计两端水柱同高；在不进气条件下，将毕托管放入施测位置的水体中，对准流向，以比压计的压头差值最大读数记录
	旋桨流速仪	1. 自检率定，率定测点应不少于 15 个，应满足 75% 以上测点，偏差不超过 $2\%\sim 3\%$ ； 2. 每一测点记录值应不少于 $4\sim 5$ 次，每次采集时间应不少于 $5\sim 10\text{s}$ ； 3. 断面流速迭加计算，与实测流量比较，两者误差应不超过 $\pm 5\%$	每个测流断面测读应不少于 3 条垂线；每条垂线测点应不少于 3 点
水下地形	水下地形测量仪	地形分辨率不应大于 0.1mm ，测量精度不应大于 0.3mm ，起点距离误差应小于 10mm	

本规程用词说明

1 为便于在执行本规程条文时区别对待,对于要求严格程度不同的用词说明如下:

- 1) 表示很严格,非这样做不可的:
正面词采用“必须”,反面词采用“严禁”。
- 2) 表示严格,在正常情况下均应这样做的:
正面词采用“应”,反面词采用“不应”或“不得”。
- 3) 表示允许稍有选择,在条件许可时首先应这样做的:
正面词采用“宜”,反面词采用“不宜”。
- 4) 表示有选择,在一定条件下可以这样做的用词,采用“可”。

2 条文中指明应按其他有关标准执行的写法为:“应符合……的规定”或“应按……执行”。

DL / T 5748 — 2017

引用标准名录

《水电水利工程常规水工模型试验规程》DL/T 5244

中华人民共和国电力行业标准

水电水利工程航道水力学模拟
技术规程

DL/T 5748—2017

条 文 说 明

制 定 说 明

本规程制定过程中,编制组力求全面衔接国内有关国家标准、电力行业标准、水利行业标准关于本规程制定范围内的条款规定,并保持与现行法律、法规和有关标准协调一致。

为便于广大设计、施工、科研、学校等单位有关人员在使用本规程时能正确理解和执行条文规定,《水电水利工程航道水力学模拟技术规程》编制组按章、节、条顺序编制了本规程的条文说明,对条文规定的目的、依据以及执行中需要注意的有关事项进行了说明。但是,本条文说明不具备与标准正文同等的法律效力,仅供使用者作为理解和把握标准规定的参考。

目 次

1 总则	24
4 基本资料	25
5 航道水力学模型试验	26
5.1 相似准则	26
5.2 模型设计	26
5.3 模型制作及安装	26
5.4 试验设备与测量仪器	26
5.5 模型率定与验证	27
5.6 试验与观测	27
5.7 试验资料整理与分析	28
6 航道水力学数值模拟	29
6.1 控制方程及数值求解方法	29
6.2 初始条件及边界处理	37
6.3 计算区域确定及网格划分	37
7 报告编写	38

1 总 则

1.0.1 我国水电建设正处于高速发展时期，在工程规划、设计及施工过程中不可避免地会遇到一些复杂和特殊的通航水力学问题。解决这类问题的主要手段通常是采用物理模型试验及数值模拟计算分析。鉴于各研究机构在试验测试手段、研究方法等方面存在较大差异，研究成果水平参差不齐，不能完全满足水电水利工程建设的现实需要。因此，制定与电力行业现实相适应的航道水力学模拟技术规程，统一本行业航道水力学模拟研究的方法和技术要求，提高试验研究成果的质量和水平，促进我国航道工程的技术进步。

1.0.2 航道水力学模拟主要方法包括物理模型试验和数值模拟两种。两种模型具有各自的优势，应结合实际工程要求进行选择。

4 基 本 资 料

4.0.1、4.0.3 地形资料和建筑物资料是开展航道水力学模拟工作的前提，其精度和代表性影响到模型成果的精度和可靠性。使用资料时要对资料进行认真分析和校核，发现问题要仔细考证，及时与提供资料的部门进行商酌并加以修改。

4.0.2 水文资料用于验证模型水流条件是否相似，根据模拟河道内的不同流量级下相应的水面线和断面流速分布、率定和验证模型糙率。

4.0.4 根据工程运行调度方式，确定需进行模型试验的各种运行条件及组次，如水位流量条件等。

4.0.5 船舶资料应包括的内容规定是为了进行船模制作和船模相似性率定所需的基本资料。

5 航道水力学模型试验

5.1 相似准则

5.1.1、5.1.2 说明航道模型应满足的相似准则和要求，各水力要素的比尺与模型几何比尺 L_r 关系为：

$$\left. \begin{array}{l} \text{流速比尺: } V_r = L_r^{1/2} \\ \text{流量比尺: } Q_r = L_r^{2.5} \\ \text{时间比尺: } T_r = L_r^{1/2} \\ \text{糙率比尺: } n_r = L_r^{1/6} \\ \text{力的比尺: } F_r = L_r^3 \\ \text{压强比尺: } P_r = L_r \end{array} \right\}$$

5.2 模型设计

5.2.1 航道宜采用整体正态模型，原因一是整体正态模型能更正确地反映较大范围的水流表面流场，其二是应用自航船模的理论和方法更成熟。

5.2.2 模型水流应避免表面张力的影响，根据经验应尽量保证模型的最小水深不小于 0.03m。

5.3 模型制作及安装

5.3.5 船模如果是船队模型，驳船之间的联结通常采用硬联结（螺栓板联），以保持固定的队形和稳定的操纵性。

5.4 试验设备与测量仪器

5.4.2～5.4.6 制定的目的是为了实验设备和测量仪器仪表规范

化、科学化，确保试验成果的准确性和可靠性。凡属市场购置的仪器仪表，均应有国家或行业技术监督部门颁发的合格证，规格性能应适合试验应用；正在使用的仪器仪表的率定或标定应在有效期内。各试验机构自行研制的仪器仪表，应经相应质量技术监督部门鉴定合格。对于一次测量仪器仪表的率定（校验）、二次仪器仪表和采集系统的检定（校验），应符合国家计量法的有关规定，其周期一般为 1 年~2 年。

5.5 模型率定与验证

5.5.4 关于 Z 形试验有 $z5^\circ/5^\circ$ 、 $z10^\circ/10^\circ$ 、 $z15^\circ/15^\circ$ 和 $z20^\circ/20^\circ$ 四种舵角。试验分析结果表明 $z10^\circ/10^\circ$ 、 $z15^\circ/15^\circ$ 作为 Z 形试验的典型代表较合适。

船模航行试验的相似条件主要以重力相似为依据，只能做到航速相似和操纵性能的基本相似。这类通航船模受尺度效应的影响，阻力系数偏大。为达到航速相似，需提高螺旋桨转速，继而又导致船模舵受力增大，航效明显优于实船。船模操纵性的变化易使航行试验的结果偏于不安全。为减小尺度效应对通航船模操纵性的影响，一般采用减小舵面积的方法予以修正。目前常用的内河通航船模的舵面积需减小为原舵面积的 0.6 倍~0.8 倍。

考虑目前我国内河航道船型多，编队队形复杂，这些船舶（队）往往缺乏实船 Z 形试验资料供船模率定。若为此组织实船进行标准的 Z 形试验，耗资巨大，一般的工程项目无力承受，从而也影响了船模航行试验技术的开拓应用。对此可因地制宜采用“航行复演法”“动水率定法”等对船模进行尺度效应修正和操纵性率定。这些方法中的实船试验可在船舶营运过程中进行，耗资少、便于操作，有较好的实用价值。

5.6 试验与观测

一般情况下，航道内流速观测仪测试表面流速，当涉及冲淤

DL / T 5748 — 2017

情况试验时，需测试垂向流速分布。

5.7 试验资料整理与分析

航道水流条件中各项水力学参数及船模航行参数对于不同等级航道均有确定的通航标准，根据具体的通航标准分析评价通航水流条件。

6 航道水力学数值模拟

6.1 控制方程及数值求解方法

6.1.1 航道水流模拟的基本方程包括连续方程和动量方程，考虑泥沙问题的控制方程为悬移质泥沙输移方程、河床变形方程以及水流挟沙力和推移质输沙率辅助公式。

6.1.2 航道水沙数值模拟基本方程

1. 一维水沙数值模拟

(1) 一维水沙数值模拟可按下列基本方程控制：

1) 连续方程：
$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = 0$$

2) 动量方程：
$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Q^2}{A} \right) + gA \left(\frac{\partial Z}{\partial x} + \frac{Q|Q|}{K^2} \right) = 0$$

其中：
$$K = AR^{2/3} / n$$

3) 悬移质泥沙输移方程：
$$\frac{\partial(AS)}{\partial t} + \frac{\partial(QS)}{\partial x} = -\alpha\omega B(S - S_*)$$

4) 若只考虑饱和输沙过程，含沙量浓度： $S(x, t) = S_*(x, t)$

5) 河床变形方程：
$$\gamma'_s \frac{\partial A_d}{\partial t} + \frac{\partial(AS)}{\partial t} + \frac{\partial(QS + Bg_b)}{\partial x} = 0$$

6) 辅助公式：

$$\left. \begin{array}{l} \text{水流挟沙力公式} \quad S_* = S_*(u, h, \omega) \\ \text{推移质输沙率公式} \quad g_b = g_b(u, h, d) \end{array} \right\}$$

式中： A ——过水断面面积；

t ——时间坐标；

DL / T 5748 — 2017

Q ——流量；
 x ——沿主流方向坐标；
 g ——重力加速度；
 Z ——水位；
 K ——流量模数；
 R ——断面水力半径；
 n ——糙率；
 S, S_* ——分别是水体断面平均含沙量和一维挟沙力；
 α ——系数；
 ω ——泥沙沉速；
 B ——河宽；
 γ'_s ——淤积物干容重；
 A_d ——计算冲淤面积；
 g_b ——推移质输沙率；
 u ——主流方向垂线平均流速；
 h ——水深；
 d ——泥沙粒径。

(2) 一维水沙数值模拟的定解条件可按下列公式确定：

1) 边界条件：

①水位过程线 $Z = Z(t)$

②流量过程线 $Q = Q(t)$

③流量水位关系曲线 $Q = Q(Z)$

④含沙量过程线 $S = S(t)$

对于缓流 $Fr < 1$ 可给出上述条件之一作为入流和出流断面边界条件。对于 $Fr > 1$ ，则需在入流断面提出上述①~③条件中的二种水力条件。

上游入流断面给出来水来沙过程的同时应给出泥沙级配，无推移质实测资料时，上游入流断面可用公式估算。

2) 内边界条件：当计算域内出现汇流点、堰闸过流、湖泊集水、侧向入流等河道几何形状不连续或水力特性不连续时，应根据水力特性作特殊处理。

3) 初始条件：

$$\left. \begin{aligned} Z(x)_{t=0} &= Z_0(x) \\ Q(x)_{t=0} &= Q_0(x) \end{aligned} \right\}$$

给出床沙初始级配的沿程变化、沿深度方向分层床沙级配和初始河床高程。

2. 二维水沙数值模拟

(1) 二维水沙数值模拟可按下列基本方程控制：

1) 连续性方程： $\frac{\partial z}{\partial t} + \frac{\partial(uh)}{\partial x} + \frac{\partial(vh)}{\partial y} = 0$

2) 动量方程：

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + g \frac{\partial z}{\partial x} + g \frac{u(u^2 + v^2)^{\frac{1}{2}}}{C^2 h} - f v &= v_e \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) \\ \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + g \frac{\partial z}{\partial y} + g \frac{v(u^2 + v^2)^{\frac{1}{2}}}{C^2 h} + f u &= v_e \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) \end{aligned} \right\}$$

其中：

$$C = \frac{1}{n} h^{\frac{1}{6}}$$

$$v_e = v_t + \nu$$

3) 悬移质不平衡输运方程：

$$\frac{\partial(hS)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(huS) + \frac{\partial}{\partial y}(hvS) = \varepsilon_s \frac{\partial^2(hS)}{\partial x^2} + \varepsilon_s \frac{\partial^2(hS)}{\partial y^2} - \alpha \omega (S - S_*)$$

4) 河床变形方程：

$$\gamma'_s \frac{\partial z_0}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(g_{bx}) + \frac{\partial}{\partial y}(g_{by}) = \alpha \omega (S - S_*) g_b g_{bx}$$

5) 辅助公式：

$$\left. \begin{array}{l} \text{二维水流挟沙力公式} \quad S_* = S_*(u, v, h, \omega) \\ \text{推移质输沙率公式} \quad g_{bx} = \frac{u g_b}{\sqrt{u^2 + v^2}}; g_{by} = \frac{v g_b}{\sqrt{u^2 + v^2}} \end{array} \right\}$$

式中： z ——水位；

t ——时间；

u, v ——分别为 x, y 方向垂线平均流速；

h ——水深；

x, y ——分别代表质点在平面直角坐标系中顺水流方向和垂直方向的距离；

g ——重力加速度；

C ——谢才系数；

f ——柯氏系数；

ν_t, ν ——分别为紊动黏性系数和分子运动黏性系数；

ν_e ——有效黏性系数；

S, S_* ——垂线平均含沙量和垂线平均水流挟沙力；

ε_s ——泥沙紊动扩散系数；

α ——系数；

γ'_s ——淤积物干容重；

z_0 ——河床高程；

g_{bx}, g_{by} ——推移质单宽输沙率在 x, y 方向分量；

g_b ——推移质单宽输沙率。

(2) 二维水沙数值模拟的定解条件可按下列公式确定：

1) 开边界条件：

$$\left. \begin{array}{l} u(x, y, z)|_{\Gamma_1} = u(t) \\ v(x, y, z)|_{\Gamma_1} = v(t) \\ h(x, y, z)|_{\Gamma_1} = h(t) \end{array} \right\}$$

入流泥沙边界 $S(x, y, z)|_{\Gamma_1} = S(t)$ 及泥沙级配分布

出流泥沙边界 $\frac{\partial S}{\partial n}\bigg|_{\Gamma_2} = 0$ (n 为边界的法向)

2) 闭边界条件: $\frac{\partial h}{\partial n}\bigg|_{\Gamma_2} = 0$, $(u \cdot n)\big|_{\Gamma_2} = 0$

或无滑动边界条件: $u\big|_{\Gamma_2} = 0$, $v\big|_{\Gamma_2} = 0$

$$S(x, y, t)\big|_{t=t_0} = S_0(x, y)$$

3) 初始条件:

$$\left. \begin{aligned} u(x, y, t)\big|_{t=t_0} &= u_0(x, y) \\ v(x, y, t)\big|_{t=t_0} &= v_0(x, y) \\ z(x, y, t)\big|_{t=t_0} &= z_0(x, y) \\ S(x, y, t)\big|_{t=t_0} &= S_0(x, y) \end{aligned} \right\}$$

式中: t_0 ——初始时刻;

$u_0(x, y), v_0(x, y)$ ——分别代表 x 和 y 向流速的初始分布;

$z_0(x, y)$ ——代表水位的初始分布;

$S_0(x, y)$ ——悬沙浓度的初始分布。

初始床沙级配的平面分布及沿深度方向分层床沙级配。

3. 三维水沙数值模拟

(1) 三维水沙数值模拟可按下列基本方程控制:

1) 连续性方程: $\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0$

2) 动量方程:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} &= -\frac{1}{\rho} \times \frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\nu_e \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\nu_e \frac{\partial u}{\partial y} \right) \\ &\quad + \frac{\partial}{\partial z} \left(\nu_e \frac{\partial u}{\partial z} \right) \\ \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} &= -\frac{1}{\rho} \times \frac{\partial P}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\nu_e \frac{\partial v}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\nu_e \frac{\partial v}{\partial y} \right) \\ &\quad + \frac{\partial}{\partial z} \left(\nu_e \frac{\partial v}{\partial z} \right) \end{aligned} \right\}$$

$$\left. \begin{aligned} & + \frac{\partial}{\partial z} \left(\nu_e \frac{\partial v}{\partial z} \right) \\ \frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} = & - \frac{1}{\rho} \times \frac{\partial P}{\partial z} - g + \frac{\partial}{\partial x} \left(\nu_e \frac{\partial w}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\nu_e \frac{\partial w}{\partial y} \right) \\ & + \frac{\partial}{\partial z} \left(\nu_e \frac{\partial w}{\partial z} \right) \end{aligned} \right\}$$

其中:

$$P = p + \rho g(z_s - z)$$

$$\omega s + \varepsilon_s \frac{\partial s}{\partial z} = 0$$

$$\omega s + \varepsilon_s \frac{\partial s}{\partial z} = 0$$

$$\nu_e = \nu_t + \nu$$

$$\varepsilon_s = \frac{\nu_t}{\sigma_s} + \nu$$

如考虑到垂向作用力远小于重力, 可采用静水压力假定。

3) 泥沙输移方程:

$$\begin{aligned} \frac{\partial s}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} (us) + \frac{\partial}{\partial y} (vs) + \frac{\partial}{\partial z} (ws) - \frac{\partial}{\partial z} (\omega s) = & \frac{\partial}{\partial x} \left(\varepsilon_s \frac{\partial s}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\varepsilon_s \frac{\partial s}{\partial y} \right) \\ & + \frac{\partial}{\partial z} \left(\varepsilon_s \frac{\partial s}{\partial z} \right) \end{aligned}$$

$$4) \text{ 河床变形方程: } \gamma'_s \frac{\partial z_0}{\partial t} + \frac{\partial g_{bx}}{\partial x} + \frac{\partial g_{by}}{\partial x} = a_s \omega (s_b - \Pi s_{b*})$$

$$\text{其中: } \Pi = \begin{cases} 1 & (S_b > S_{b*}) \\ \frac{S_b}{S_{b*}} & (S_b < S_{b*}, \tau_b < \tau_{bcr}) \\ 1 & (S_b < S_{b*}, \tau_b > \tau_{bcr}) \end{cases}$$

式中: u, v, w —— x, y, z 方向上流速分量;

ν_t, ν —— 分别为紊动黏性系数和分子运动黏性系数;

- ρ ——流体密度;
 P ——水压力;
 ν_e ——有效黏性系数;
 p ——动水压力;
 z_s ——水位;
 ω ——悬沙沉速;
 S ——悬沙浓度;
 ε_s ——泥沙扩散系数;
 σ_s ——Schmidt 数, 数值计算中取值范围一般为 0.5~1.0;
 γ'_s ——床面泥沙干容重;
 z_0 ——河底高程;
 g_{bx}, g_{by} ——分别为 x 、 y 方向的推移质输沙率;
 S_b, S_{b*} ——分别为床面近底层含沙量和水体挟沙能力;
 a_s ——沉降概率;
 τ_b ——床面切应力;
 τ_{ber} ——床面临界切应力。

(2) 三维水沙数值模拟的定解条件可按下列公式确定:

1) 自由面(水面)条件:

流速及湍动能边界条件:

$$\frac{\partial u}{\partial n} = \frac{\partial v}{\partial n} = \frac{\partial k}{\partial n} = 0$$

自由水面垂向流速分量:

$$w_s = \frac{\partial z_s}{\partial t} + u_s \frac{\partial z_s}{\partial x} + v_s \frac{\partial z_s}{\partial y}$$

自由水面泥沙通量条件:

$$w_s + \varepsilon_s \frac{\partial s}{\partial z} = 0$$

式中: u, v, k ——分别为水流水平速度、垂向速度及湍动能;

u_s, v_s, w_s ——分别表示自由表面水平速度、垂向速度及水深方

向速度；

z_s ——自由面高程；

s ——含沙量。

2) 边界条件：

床面条件：

$$\left. \begin{aligned} \tau_{bx} &= \rho v_t \frac{\partial u}{\partial z} = \rho \frac{g u_b}{C_d^2} \sqrt{u_b^2 + v_b^2} \\ \tau_{by} &= \rho v_t \frac{\partial v}{\partial z} = \rho \frac{g v_b}{C_d^2} \sqrt{u_b^2 + v_b^2} \end{aligned} \right\}$$

其中：

$$C_d = \left[\frac{1}{\kappa} \ln \left(\frac{z_b}{z_0} \right) \right]^{-2}$$

式中： u_b, v_b ——近底层流速；

z_0 ——河床特性有关，对于天然河道有 $z_0 = k_s / 30$ ， z_b 为近底层距床面高度，一般可取距床面最近的网格点高度。

无滑动条件 $u = 0$ ，或垂直于边界流速 $u \cdot n = 0$ 。

进口边界条件：

$$\left. \begin{aligned} u(x, y, z, t) \Big|_{\Gamma_1} &= u_0(x, y, t) \\ v(x, y, z, t) \Big|_{\Gamma_1} &= v_0(x, y, t) \\ \text{或} \quad z_s(x, y, z, t) \Big|_{\Gamma_1} &= z_0(x, y, t) \end{aligned} \right\}$$

入流泥沙边界 $S(x, y, z, t) \Big|_{\Gamma_1} = S_0(x, y, z, t)$ 及泥沙级配分布

出流泥沙边界 $\frac{\partial S}{\partial n} \Big|_{\Gamma_2} = 0$ (n 为边界的法向)

出口边界条件：

$$\frac{\partial u}{\partial n} = 0, \quad u \cdot \tau = 0$$

3) 初始条件

$$\left. \begin{aligned} u(x, y, z, t) \Big|_{t=t_0} &= u_0(x, y, z) \\ v(x, y, z, t) \Big|_{t=t_0} &= v_0(x, y, z) \\ z(x, y, z, t) \Big|_{t=t_0} &= z_0(x, y, z) \\ S(x, y, z, t) \Big|_{t=t_0} &= S_0(x, y, z) \end{aligned} \right\}$$

给定初始床沙级配的平面分布，以及沿深度方向分层床沙级配。

6.2 初始条件及边界处理

6.2.3 计算区域内出现汇流、侧向入流按照点源或者线源处理；堰闸过流按照内边界处理；湖泊集水通过在相应的计算断面上增减水量的方法来处理。

6.3 计算区域确定及网格划分

6.3.3 二维模拟的网格形式一般采用三角形、四边形网格对计算区域进行划分。网格划分应保证网格的光滑性，保证网格尺度空间变化的连续性。

7 报 告 编 写

7.0.1 模型试验研究报告中，模型设计与制作部分包括模型比尺的选择、模型平面布置以及模型制作的方法和进度控制等；测量仪器部分包括主要测量仪器设备的性能及精度；试验成果与分析包括航道代表性流量时的流场流态特点，斜流效应以及对船舶航行的影响，航道不同流量时的水面比降、水深变化、水面波动情况以及对船舶航行的影响，并对水深小于 1.4 倍~1.5 倍最大吃水深度的河段提出改善措施，航道、船闸进出口河道的冲淤情况以及对船舶的影响，自航船模航态、航行参数变化，提出较优的航行范围或航线；结论和建议部分是指根据试验成果，分析评价航道通航水流条件，提出合理的优化建议以及航道适航的通航流量。

7.0.2 数值模拟研究报告的“数学模型”部分包括计算控制方程，数值计算格式，边界条件和有关计算参数的选取，计算河道范围确定与网格划分等。计算成果与分析以及结论和建议部分可参照物模部分。

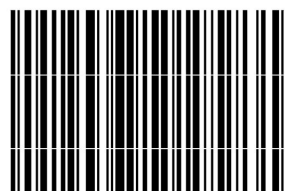


中国电力出版社官方微信



电力标准信息微信

为您提供 **最及时、最准确、最权威** 的电力标准信息



155198.950