

引文格式: 徐启恒, 张新长, 黄滢冰, 等. 单波束无人船一体化水下地形建模及辅助分析, 2016, 23(2):62-66.

# 单波束无人船一体化水下地形建模及辅助分析

徐启恒<sup>1</sup>, 张新长<sup>2</sup>, 黄滢冰<sup>3</sup>, 陈炽荣<sup>1</sup>

(1. 东莞市测绘院, 广东 东莞 523129; 2. 中山大学 地理科学与规划学院, 广东 广州 510275; 3. 东莞市地理信息与规划编制研究中心, 广东 东莞 523129)

## 基金项目:

国家自然科学基金重点项目(41431178); 高等学校博士点专项科研基金(20120171110030)资助

## 作者简介:

徐启恒(1986-), 男, 河南新乡人, 工程师, 硕士, 主要从事土地利用规划、三维城市及地理信息数据库等方面的研究工作。

## E-mail:

xuqiheng@163.com

## 通讯作者:

张新长(1957-), 男, 湖南长沙人, 博士, 博士生导师, 主要从事城市地理信息系统、地理信息数据库、空间数据自适应动态更新、地图制图等。

## E-mail:

acyrt@163.com

**【摘要】**通过搭载单波束测深仪的无人测量船, 辅助CORS系统和姿态仪, 对长安新区滩涂区进行无验潮模式水下地形测量, 建立了滩涂区水下地形DTM模型和水下3D模型。同时, 依据测区设计标高, 计算填挖土方量, 为长安新区滩涂区造陆工程和城镇建设发展提供科学的测量成果并辅助决策。

**【关键词】**单波束无人船; 水下地形测量; 土方计算

**【中图分类号】**P229.1

**【文献标识码】**A

**【文章编号】**1672-1586(2016)02-0062-05

## Underwater Terrain Modeling and Assistant Analysis Based on Single-Beam Unmanned Ship

XU Qiheng<sup>1</sup>, ZHANG Xinchang<sup>2</sup>, HUANG Yingbing<sup>3</sup>, CHEN Chirong<sup>1</sup>

(1. Dongguan Institute of Surveying and Mapping, Dongguan 523129, China; 2. School of Geography and Planning, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China; 3. Dongguan Geographic Information & Urban Planning Research Center, Dongguan 523129, China)

**Abstract:** Through unmanned ship with the instruments of single beam echo sounder, CORS system, attitude indicator, the underwater terrain was surveyed by hydrographic surveying model without traditional tide observation in Chang'an new district. In the meanwhile, the DTM and 3D model were built up and calculated the excavation and filled volume, which provided a decision support for city construction and development.

**Key words:** Single-Beam Unmanned Ship; underwater terrain survey; excavation and filled volume calculation

## 0 引言

随着人地矛盾的日益突出和海洋开发程度的加深, 用于水下勘探的测量技术也越来越受到人们的重视。测深技术作为用于水下探测的一种重要技术, 用来测量水中物体的存在、位置及形态和水下地形描绘等。声纳测深技术是最常用的测深技术之一, 主要利用超声波回波时间与超声波在介质中传播的速度来计算深度。

在内河测深中, 尤其是浅水区地形测量, 单波束仍是最为普及的测深装置<sup>[1]</sup>。无人船载单波束探测仪在水下地形地貌测量、水质采样与监测等方面有着广泛应用。本文利用该探测系统对长安新区约2.57 km<sup>2</sup>区域进行水下地形测量, 结合GNSS、GPS-RTK技术和姿态传感器等, 实现了高精度无验潮模式水下地形测量<sup>[2]</sup>, 并建立测区水下DTM、3D模型。在测量的整个过程中, 通过控制点精度控制、航行定位质量控制、船体纵倾横滚控

制及不符值误差控制等控制手段保证测量成果的准确度。在此基础上, 综合已有1:500地形图测量成果, 精确计算了设计标高所需填方量及实际需求土方量, 满足工程建设和规划设计的需求。

## 1 研究区、数据

### 1.1 测区概况

长安新区地理位置优越, 地处珠三角东部经济走廊、交椅湾的几何中心, 南与深圳相邻, 北靠虎门(全国第一大镇、东莞市建制镇)和长安镇(全国人口经济大镇、东莞市建制镇), 西隔珠江与广州南沙相望, 是环珠江口“国际湾区”的重要空间节点。长安新区规划面积20.36 km<sup>2</sup>, 其中, 海域面积12.01 km<sup>2</sup>, 滩涂面积8.35 km<sup>2</sup>, 稀缺而优越的滨海条件是展示东莞滨海城市特色的首选要地。按照《东莞市长安新区城市总体规划(2014-2030)》, 将通过“填海造地”形成“一内

海、二半岛、三板块”的总体空间结构,打造珠三角国际湾区海洋文化名城、东莞滨海商务新城。

测区位于长安新区珠江入海口海岸线东侧,面积2.57 km<sup>2</sup>,东临广深沿江高速,是城区与水域交界地(如图1所示)。测区主要为滩涂区,主要由鱼塘、池塘及岸堤组成,水位受海潮影响呈现周期性涨退。测区水下地形相对较平坦,整体深度较浅,水体海拔在-2~5 m之间。测区具备连江临空靠海的优势,对测区的建设开发是加强新区与海上业务的紧密度、助力海洋经济开发、打造“深蓝新区”新型海滨城市的重要环节。

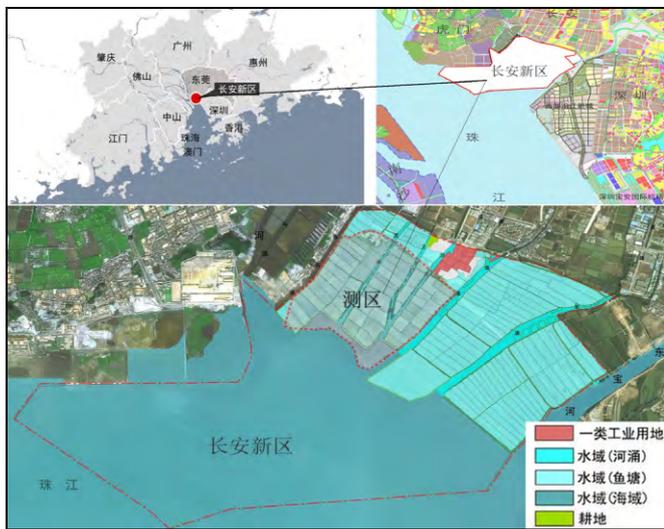


图1 测区地理位置示意图  
Fig.1 Sketch map of Chang'an survey area

### 1.2 数据情况

本文选用数据有2009年测区1:500地形图测量成果,2011年测区1:500航拍影像图成果,以及东莞市连续运行卫星定位服务系统(DG CORS系统)。测区由DGCORS-RTK控制系统起算直接布设一、二级控制点、图根控制点。控制点采用网络RTK方法施测,合理地进行控制点的埋设与测量。最终成图的水下地形测图比例尺为1:1000,布设主测线测量点间距约10 m。

## 2 研究方法及数据处理

### 2.1 研究方法

#### 2.1.1 GPS-RTK无验潮测量

传统验潮测量模式使得验潮工作量大,水位改正

精度低。由于验潮模式缺乏必要的验潮手段,采用的是从附近验潮站搜集精度较低的潮汐表数据进行插值计算,由此获得较低精度的高程值。当潮时差过大时,精确校正又比较困难,导致数据不准确,直接影响水深测量的成果精度<sup>[3]</sup>。

利用GNSS、RTK实时差分定位测量技术并结合船载姿态传感器等手段,可在水深测量的同时记录船体的姿态变量。在测量过程中直接测得水位改正值,并实时进行平面位置和高程信息的修正,实现了无验潮模式的水下地形测量,大大提高了成果精度。

#### 2.1.2 无人船载单波束测深

无人船载单波束测深系统以无人船为载体,集成GNSS、水深测深仪、姿态传感器,以及CCD相机等多种高精度传感设备,通过岸基系统接收并处理所采集的数据。单波束测深仪的工作原理是:由换能器向水中垂直发射具有一定空间指向性的短脉冲声波(波束),声波遇到海底/河底后,发生散射、透射和折射。反射的回波被换能器接收,同时会保存在模拟记录仪器和数字记录介质中。通过换能器发射和接收到回波的时间间隔 $T$ 与声波在水体中的传播平均速度 $V$ ,即可计算出声波的单程距离 $Hc$ 。根据GPS-RTK测量值,考虑船体姿态修改参数 $\Delta Hz$ ,GPS顶端到换能器的高差 $\Delta H$ ,即可得到水面的高程(如图2所示)。

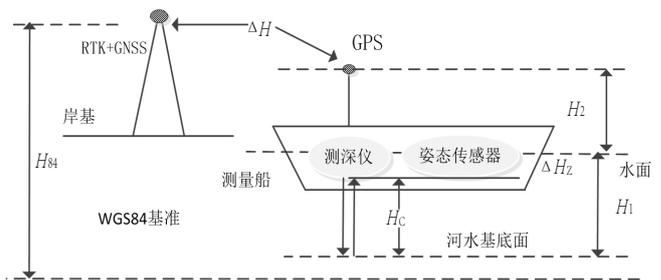


图2 无人船载单波束测深仪测深原理图  
Fig.2 Schematic diagram of Single-Beam unmanned ship

#### 2.1.3 声速传播分析

实际声速在水中的传播速度与特定条件下的水温、盐度、河水浑浊度等呈正比相关。根据陈长安<sup>[4]</sup>等人通过对不同声速公式的定量分析,对于河流、湖泊、河口海岸及大陆架海域等使用Chen&Millero&Li公式,

能更精确地反映声速传播特征 [5]，其数学表达如下：

$$(U^P - U_{H_2O}^P) - (U_0 - H_{H_2O}^0) = A \times S + B \times S^2 + C \times S^3$$

$$U_{H_2O}^P \equiv U_{H_2O}(P) =$$

$$1402.388 + 5.03711T - 5.80852 \times 10^{-2}T^2 + 3.3420 \times 10^{-4}T^3 - 1.47800 \times 10^{-6}T^4$$

$$+ 3.1464 \times 10^{-9}T^5 + (0.153563 + 6.8982 \times 10^{-4}T - 8.1788 \times 10^{-6}T^2$$

$$+ 1.3621 \times 10^{-7}T^3 - 6.1185 \times 10^{-10}T^4)P + (3.1620 \times 10^{-5} - 1.7107 \times 10^{-6}T$$

$$+ 2.5974 \times 10^{-8}T^2 - 2.5335 \times 10^{-10}T^3 + 1.0405 \times 10^{-12}T^4)P^2$$

$$+ (-9.7729 \times 10^{-9} + 3.8504 \times 10^{-10}T - 2.3643 \times 10^{-12}T^2)P^3$$

$$U_0 - U_{H_2O}^0 =$$

$$(1.389 - 1.262 \times 10^{-2}T + 7.164 \times 10^{-5}T^2 + 2.006 \times 10^{-6}T^3 - 3.21 \times 10^{-8}T^4)S$$

$$+ (-1.922 \times 10^{-2} - 4.42 \times 10^{-5}T)S^2 + 1.727 \times 10^{-3}S^3$$

式中，通过多项式拟合获得，从参数和表达上面可以看出，公式对温度、盐度的精确性已达到 $10^{-12}$ 数量级精度，公式温度最佳适用范围在 $0^{\circ}\text{C} \sim 40^{\circ}\text{C}$ 以内，盐度适用范围在40 ppt以内，压力范围在 $0 \sim 10\,000\text{ M}$ 之内，标准误差可达0.19。式中， $UP$ 即是压力为 $P$ 时的声速， $P$ 为压强， $A$ 、 $B$ 、 $C$ 与压强正相关，与温度呈多次拟合：

$$A = (9.4742 \times 10^{-5} - 1.2580 \times 10^{-8}T - 6.4885 \times 10^{-8}T^2$$

$$+ 1.0507 \times 10^{-8}T^3 - 2.0122 \times 10^{-10}T^4)P$$

$$B = (7.3637 \times 10^{-5} + 1.7945 \times 10^{-7}T)P$$

$$C = -7.9836 \times 10_{-6}P$$

### 2.1.4 船体纵倾和横滚角度分析

由于受风浪、潮汐、涌浪、水流等作用影响，船体运动是动态且无序的，一定程度上会降低探测精度，如图3所示。为了精确获取水面高程信息，必须进行船体姿态处理与数据校正 [6]。通过姿态角传感器实时传回测量点位对应的船体姿态修正参数，极大提高了成果数据精度。

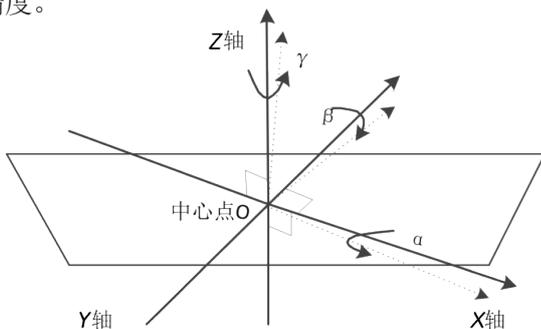


图3 船体姿态示意图  
Fig.3 Schematic diagram of ship movement

姿态传感器对船体姿态的计算，可表示为在平面直角坐标系分别沿 $X$ 、 $Y$ 、 $Z$ 轴的扭转量的坐标矩阵，假定船体分别横滚 $\alpha$ 角，纵倾 $\beta$ 角，俯仰 $\gamma$ 角，则船体单轴方向坐标变换矩阵可分别表示为：

$$A = \begin{Bmatrix} \cos \alpha & 0 & -\sin \alpha \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \alpha & 0 & \cos \alpha \end{Bmatrix}, B = \begin{Bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \beta & \sin \beta \\ 0 & -\sin \beta & \cos \beta \end{Bmatrix}, C = \begin{Bmatrix} \cos \gamma & -\sin \gamma & 0 \\ \sin \gamma & \cos \gamma & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{Bmatrix}$$

由于船体是3个角度的状态同时产生作用，需要将 $A$ 、 $B$ 、 $R$ 矩阵经过三次基本解算，即可计算出某一个时态对应的坐标转换参数，如下所示：

令 $P1=A \times B$ ； $P2=P1 \times R$ ，可得：

$$P1 = \begin{Bmatrix} \cos \alpha & \sin \beta \sin \alpha & -\cos \beta \sin \alpha \\ 0 & \cos \beta & \sin \beta \\ \sin \alpha & -\sin \beta \cos \alpha & \cos \alpha \sin \alpha \end{Bmatrix}$$

$$P2 = P1 \times R = \begin{Bmatrix} \cos \alpha \cos \gamma + \sin \alpha \sin \beta \sin \gamma & -\cos \alpha \sin \gamma + \sin \alpha \cos \beta \sin \gamma & -\sin \alpha \cos \beta \\ \sin \gamma \cos \beta & \cos \gamma \cos \beta & \sin \beta \\ \sin \alpha \cos \gamma - \cos \alpha \sin \gamma \sin \beta & -\sin \alpha \sin \gamma - \cos \alpha \cos \gamma \sin \beta & \cos \alpha \cos \beta \end{Bmatrix}$$

根据文献 [7] 描述的关于姿态角的定义，最终船体姿态角可表示为（其中， $q_0, q_1, q_2, q_3$ 为实数，是四元数计算方法的4个实参数）：

$$\begin{cases} \alpha = \tan^{-1} \left( \frac{2q_0q_2 - 2q_1q_3}{q_0^2 - q_1^2 - q_2^2 + q_3^2} \right) \\ \beta = \sin^{-1} (2q_2q_3 + 2q_0q_1) \\ \gamma = \tan^{-1} \left( \frac{2q_1q_2 - 2q_0q_3}{q_0^2 - q_1^2 + q_2^2 - q_3^2} \right) \end{cases}$$

### 2.2 数据质量控制及处理

测量过程质量控制：在船测量过程中，需要定时用计算机软件对水深数据进行回放，以消除噪声影响和假信号等。当出现回波信号中断或模糊不清、测深仪零信号不正常等情况时，需要补测或重测。

数据的处理过程主要包括：①参数纠正。根据无人船姿态传感器与测量数值进行纠正，矫正在测量过程汇总船体纵倾和横滚引起的高程误差和位置误差。②坐标转换，包括高斯投影与经纬度的互转、UTM投影的直角坐标与经纬度互转，以及七参数坐标转换。③数据滤波，即对采集过程中因仪器不稳定、浅水混响或水中障

碍物（鱼群、水草及漂浮物等）等因素影响而产生的水深异常值（水深的跳点、零值和极值等）进行检测和改正。④数据空间相关性检查。通过正态分布、频率分布等方法，检查并剔除那些空间相关性较小的异常值。⑤数据成果检查。实行两级检查、一级审核制度，保证数据生产精度和操作的规范性。

### 2.3 土方量计算

土方量计算精度的高低直接影响建设工期和工程效益。罗德仁等2005年对多种土方计算方法的对比发现，通过建立DEM/TIN模型进行土方计算则具有较高的精度<sup>[8]</sup>，且适用于不同地形情况。实际工程中，自然土方经过人力或机械开挖松动后，土方体积会增大。经过回填和压实之后，土方体积会小于自然土方体积。在计算实际用方量和挖方量时，应考虑体积变化的影响，主要参考《水利建筑工程预算定额》<sup>[9]</sup>。

基于DEM/TIN计算土方量，其实质是运用栅格相减实现地块的土方量计算。其原理为二次积分求测区范围的立面体积，即利用测区标高栅格数据和测区3D水下地形模型之正负差，并以单位三角立柱体积为积分单元，累加测区范围所有TIN三角立柱体积。具体计算方法及流程如图4所示。

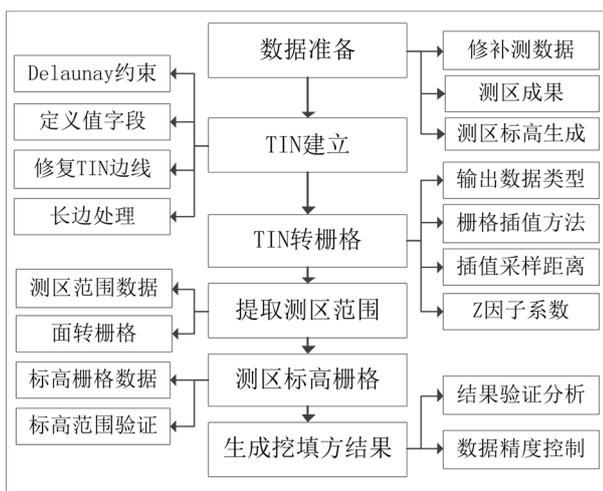


图4 挖填方计算流程图

Fig.4 Flow diagram of cut-fill volumes caculation

## 3 结果分析

### 3.1 水下地形建模及挖方量分析

DEM模型具有直观反映水下地形高低量值，水下地

形高低分布精确计算等特点；水下地形3D模型，能够更精确地观测水下目标物的大小、形状和高低变化规律，使水下地形状态一目了然，提升了水下地形直观可视化表达效果，实现了真实场景再现。这为后期的城市建设工作的顺利开展提供重要的参考，尤其是挖填方计算必不可少的基础工作，继而支撑土方调配、工程造价及工期预估等后续工作。

图5为基于内插的水下地形不规则三角网模型及三维立体展示（3D模型），测区地势平坦，平均高度在-2~5 m之间，水平跨度约1.2 km。为增强模型3D效果，将高程值进行“垂直拉伸”增强处理，拉伸后高程值在模型上呈现出“锯齿”状夸大，能更为直观地反映水下地形的起伏状态。

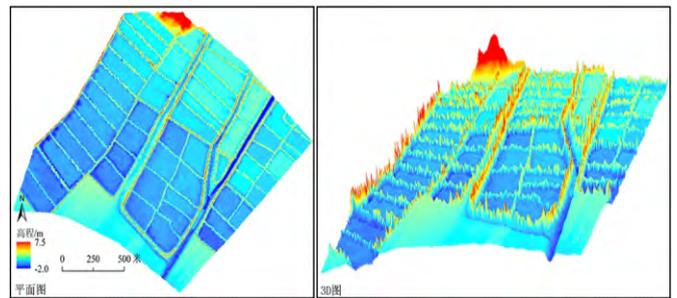


图5 基于内插的水下地形不规则三角网（左）及三维立体图（右）  
Fig.5 TIN and 3D model of underwater terrain

挖填方量估算主要依据测区高程数据、测量数据及测区范围，分别在南方CASS和ArcGIS平台上计算。其原理为基于DEM/TIN运用栅格相减、二次积分求测区范围的立面体积实现地块的土方量估算。两种平台的挖填方量估算结果分别为1 258.71万m<sup>3</sup>（挖方量0.46万m<sup>3</sup>，填方量1 259.17万m<sup>3</sup>）和1 287.27万m<sup>3</sup>（挖方量0.38万m<sup>3</sup>，挖方量1 287.65万m<sup>3</sup>），差异比例在3%（2.29%）以内，满足精度要求并起到相互验证作用。同时，根据土石方松实换算系数，以本测区填土料为例，至5 m标高所需运输的土方量约在1 969.51~2 014.20万m<sup>3</sup>之间。

### 3.2 辅助城市建设

通过水下地形的建模，可以精确表述地形特点，对城市建设过程合理进行土石方平衡规划设计，加快建设进度，合理调配资源，有重要意义。同时，根据地块

地形空间分布特征和城市建设、规划需求,对滩涂区合理划分,为城市建设和城市规划提供数据参考,为城市建设和工程施工提供必要的的数据支撑。

## 4 结束语

水下地形是不可见的,是城市建设中的重点关注对象之一。本文通过无人船载单波束测深仪进行无验潮模式的水下地形测量,同时综合实时定位、测深精度、吃水改正、姿态改正、传输等精度控制,建立了测区高精度水下地形二三维模型,真实重现测区水下地貌,为测区提供了准确的水下地形。并根据水下地形成果实现基于TIN的挖填方量估算。为长安新区工程建设、城市规划等工作提供了科学依据。

尽管本文成果达到测量精度要求,但还存在一些需要改进的地方:

1) 测量时延。由于GPS、测深仪、数据接收平台等仪器的计算和传输都是相对独立的,因此,获取的水深与测点位置不同步,即时间延迟问题。这需要依赖于仪器的进一步升级。通常,时延为固定值,可通过特征点对匹配法<sup>[10]</sup>等,计算时延并进行改进。

2) 计算参数优选。因测量仪器、测量点密度、测量时外界气候条件、原始高程数据对特征地区的反映、原始高程数据分布、测量点插值方法、测区地表特征、水下地形建模方法、挖填方计算技术流程、计算参数和算法等的不同,均会对水下地形建模和挖填方量的计算产生一定影响。通过制定多种方案,特征区域加密测量点及多种建模方法,并进行对比评价,

筛选出较优参数和最佳算法可有效提高测量精度。

3) 去噪。在发射波束传输过程中,由于水中杂质、鱼群、水草及河沙等均会导致测量结果产生“噪声”。一方面是通过内、外业检查,剔除明显的错误值。同时,建立测区坡度分析图,对相对平缓区域产生的坡度“异常”值,进行实地核查、技术对比分析等工作,也可达到良好的去噪效果。

## 参考文献

- [1] 刘力, 孙再刚, 简波, 等. 单波束测深仪水深粗差检测与修正新算法及其效果[J]. 水运工程, 2014(11):55-59.
- [2] 周丰年, 田淳. 利用GPS在无验潮模式下进行江河水下地形测量[J]. 测绘通报, 2001(5):28-30.
- [3] 张延同, 王洪强. GNSS验潮在海上石油物探测量中的应用探讨[J]. 测绘通报, 2012(S1):44-45, 48.
- [4] 陈长安, 吴碧, 王升. 水下声速计算公式的优化选择[J]. 舰船科学技术, 2014(6):77-80.
- [5] Chen C, F J Millero. Speed of sound in sea water at high pressures[C]. J. Acoust. Soc. Am., 1977, 62(5):1129-1135P.
- [6] 董江, 王胜平. GPS PPK远距离航潮位测量及其在航道的实现[J]. 测绘通报, 2008(5):51-53.
- [7] 刘俊, 石云, 李杰. 微惯性技术[M]. 北京:电子工业出版社, 2005.
- [8] 罗德仁, 邹自力, 汤江龙. 工程土方量计算比较分析[J]. 东华理工学院学报, 2005, 28(1):59-64.
- [9] 岳秀瑜. 浅谈南水北调工程中的土方平衡[J]. 中国高新技术企业, 2015(20):122-123.
- [10] 黄珍雄. 单波束水下地形测量精度的改进方法研究[D]. 南昌:东华理工大学, 2013.

本刊现入编“万方数据——数字化期刊群”和“中国核心期刊(遴选)数据库”,作者著作权使用费与本刊稿酬一次性给付,不再另行发放。作者如不同意将文章入编,投稿时敬请说明。