

# 成山头海域潮流能资源可开发量评估\*

武 贺 王 鑫 韩林生

(国家海洋技术中心 天津 300111)

**提要** 针对潮流能资源较丰富的成山头外海域, 利用 FVCOM 数值模式, 在良好模拟该海域潮流场的基础上, 运用能量耗散原理, 对该海域的潮流能资源可开发量进行了评估。结果表明, 在转换装置的拖拽系数为 0.07 时, 面积为 27km<sup>2</sup> 的成山头近岸海域的可开发潮流能资源约为 17.9MW, 其中大潮期间的可开发量高达 37.7MW, 而小潮期间则为 7.3MW。在此条件下, 该海域大潮期间涨急和落急时刻的流速分别减小了 40% 和 38%, 但发电装置对潮汐的影响较小, 在成山头顶端的高潮潮位仅下降了 4cm。

**关键词** 成山头; 潮流能; 可开发量评估

**中图分类号** P743.1

成山头位于山东半岛的最东端, 三面环海, 角外水深变化剧烈, 离岸 1km 的海域水深即可达 50m, 其特殊的地理位置和地形结构使得该海域的潮流流速很大, 实测流速高达 2m/s(武贺等, 2010)。该海域属于不正规半日潮区, 距离黄海的 M<sub>2</sub>、S<sub>2</sub> 无潮点很近, 潮差较小, 年平均潮差约为 0.8m, 但该海域的潮流性质为正规半日潮, 以往复流为主, 流向为东北—西南。显然, 该海域的潮流资源较为丰富, 而且海域开阔, 水深适中, 离岸距离较近, 开发利用前景广阔, 匡国瑞等(1987)、武贺等(2010)曾利用实测数据对该区的潮流能资源进行简单估算。但应指出的是, 成山头海域潮流能资源的可开发量究竟有多少, 是否具有实际开发价值, 这一问题迄今尚未见到相关报道。因此开展成山头海域潮流能资源可开发量评估研究具有重要的实践意义。

目前, 随着潮流能转换技术的不断进步, 潮流能发电已逐步进入工程示范阶段(林勇刚等, 2008; 刘美琴等, 2009; 李波等, 2010), 然而, 有关潮流能资源的估算方法适用范围并不全面, 评估结果各异(Blunden *et al*, 2007b; 王智峰等, 2010)。吕新刚等

(2008)对国内外潮流能评估方法进行综述时指出, 潮流能资源评估方法多是基于能通量的理论基础, 以水平尺度较小的某水道断面为研究对象, 估算自然状态下通过该断面的潮流能资源。但是, 他们并未区分潮流能资源评估过程中的两个重要概念, 即潮流能理论蕴藏量和可开发量, 因为这涉及到是否具有实际开发价值的问题。显然, 在实际开发过程中, 在自然状态下估算的潮流能资源量不可能完全被开发。因此, 国外的 FLUX 方法、FARM (Black & Veatch Consulting Ltd, 2005)方法和国内的郑志南(1987)评估法都是在上述估值基础上, 通过乘以一个有效影响因素(Black & Veatch Consulting Ltd, 2004)或功率转换系数得到实际可开发量, 即潮流能资源的技术可开发量(吕新刚等, 2010; 武贺等, 2011)。但应指出的是, FLUX 方法确定的技术可开发量并非潮流资源可开发的最大量, 其有效影响因素的确定主要基于尽可能减小对环境的影响。而且, 上述方法主要适用于水道、小海湾等小区域的潮流能资源评估, 但对于潮流资源量丰富却无明显集流边界的海岬区却无能为力, 特别是上述方法均未充分考虑大量的潮流能开

\* 中国科学院海洋环流与波动重点实验室开放基金课题“潮流能资源评估方法研究”, KLOCAW1105 号; 海洋能资金专项“潮汐能和潮流能重点开发利用区资源勘查与选划”, GHME2010ZC11 号; 海洋能资金专项“海洋能资源勘查与选划成果整合与集成”, GHME2012ZC05 号; 国家海洋局青年基金“波浪能电站建设可行性分析中资源条件评估方法研究”。武 贺, 硕士, 助理研究员, E-mail: wh-crane@sohu.com

收稿日期: 2012-08-10, 收修改稿日期: 2012-11-09

发装置的布放对潮流场时空变化的影响。由此可见, 以往的评估方法并不适用于成山头海域。为此, 本文拟利用 FVCOM(Chen *et al.*, 2006a, b) 海洋数值模式, 在良好模拟该海域潮波特征基础上, 运用能量耗散原理, 研究潮流能开发过程中转换装置(涡轮机)(戴军等, 2010)的运行效果及其对潮流场的影响, 从而对成山头海域潮流能资源可开发量进行评估, 为我国潮流能资源的开发利用提供科学依据。

## 1 研究方法

FVCOM(Finite Volume Coast and Ocean Model) 海洋数值模式是由美国麻州大学海洋科技学院陈长胜教授研究组建立的基于三角形网格, 采用有限体积法、三维原始方程组的近岸海洋模式。该模式较好地结合了动力学基础明确、计算速度快的有限差分法和可较好拟合岸线的有限体积法两者的优点, 保证了在单一网格和整个计算域上都能满足动量、能量和质量的守恒, 尤其适合于潮流能资源丰富, 但岸线变化复杂的近岸海域。本文采用了垂向平均的二维正压模型, 开展成山头外海域的潮流能资源评估。

### 1.1 模式设置

本文的主要计算区域(图 1)为南北黄海分界线附近的成山头外海域, 位于  $121.20^{\circ}$ — $124.33^{\circ}$ E,  $35.68^{\circ}$ — $38.71^{\circ}$ N 之间, 东西向距离约 278km, 南北向距离约 333km, 水平计算网格由 SMS(Surface Water Model System) 软件生成, 网格节点数为 8951, 网格单元数为 16930, 在作者关注的成山头外海域的最小网格水平分辨率为 200m; 模型的开边界条件取自 OSU 俄勒冈大学潮汐同化数据, 由其软件(TMD)预报得出, 加载  $M_2$ 、 $S_2$ 、 $N_2$ 、 $K_2$ 、 $K_1$ 、 $O_1$ 、 $P_1$ 、 $Q_1$  八个分潮; 模型假设初始条件下的所有计算节点上的水位值和三角单元上的流速均为零。

如图 1 所示, 计算域的平均水深为 24m, 最深处位于东开边界处, 深度约 80m, 另外成山头外约 1—2km 处水深也较深, 水深超过 70m。

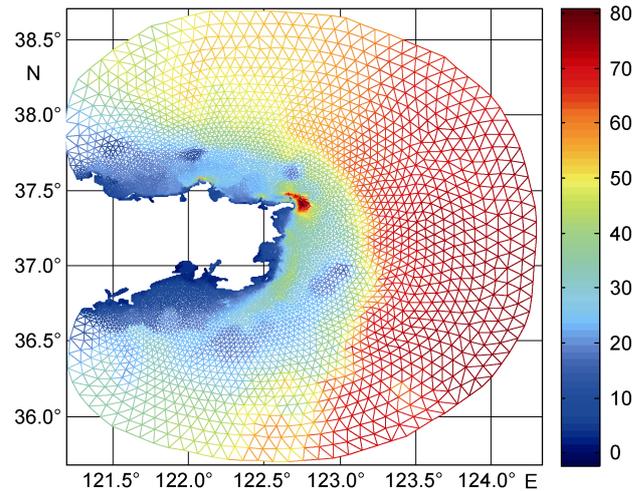


图 1 成山头外海域网格设置和水深分布图(m)

Fig.1 Depth distribution (m) and the grid settings of the simulation area

### 1.2 模型验证

本文选用成山头验潮站的潮位数据进行调和分析, 并与本文的数值模拟结果进行比较。由表 1 可以看到,  $M_2$ 、 $S_2$ 、 $K_1$  和  $O_1$  四个分潮的调和常数平均振幅误差为 1.5cm, 平均位相误差为  $5^{\circ}$ 。

此外, 本文采用 2009 年 3 月 1 个 ADCP 定点站位( $121^{\circ}05.8'E$ ,  $38^{\circ}41.8'N$ ) 半个月的实测流资料对研究海域的模拟结果进行验证(表 1)。表 1 显示, 该站潮流东、北分量调和常数的模拟结果与实测值的偏差均较小。

综上所述可知, 本文较好地模拟了成山头附近海域的潮波运动状况, 为开展潮流资源评估奠定了可靠的基础。

## 2 涡轮机参数化方案

潮流能开发过程, 即是潮流推动潮流能转换装置(涡轮机)做功从而转化为电能的过程。由于海水通过涡轮机后, 流速会减小, 因此可将其视为一种摩擦力或拖拽力, 该力越大, 开发出的潮流能资源则越大,

表 1 成山头潮汐、潮流实测值与模拟值调和常数误差

Tab.1 Errors of harmonic constituents between measurements and calculations of tide and tidal current at Chengshantou cape

要素	计算与实测差值							
	$M_2$		$S_2$		$K_1$		$O_1$	
	$H(\text{cm})$	$G(^{\circ})$	$H(\text{cm})$	$G(^{\circ})$	$H(\text{cm})$	$G(^{\circ})$	$H(\text{cm})$	$G(^{\circ})$
潮位	0.6	7	0.5	2	1.0	8	4	5
潮流东分量	2.7	8	1.8	7	4.1	10	3.8	6
潮流北分量	4.5	10	3.2	9	2.8	8	6.2	12

但流速则随着其增大而减小。显然,在摩擦系数达到某一特定值时,涡轮机转换的潮流能资源最多。随着潮流数值模拟技术的不断发展和成熟,人们可以在充分了解潮流场时空变化特征基础上,通过构建涡轮机的摩擦拖拽公式,不断调整摩擦系数来获取潮流能资源最大可开发量。

潮流发电装置的能量转换可理解为在涡轮机阵列所在区域底摩擦力的一种增量(Sutherland *et al.*, 2007),利用经典的底边界层摩擦理论,其底摩擦系数可记为  $C_d = k_0 + k_t$ 。其中,  $k_0$  为水体和地球固体界面间产生的自然摩擦力,  $k_t$  为涡轮机运行中产生的摩擦力。采用 Foreman 等(1995)和 Walters(1992)等提出的关于能量耗散的计算方法,某海域的潮流能资源耗散(包含自然底摩擦和涡轮机产生的潮流能资源)即为该海域能通量的积分,具体计算公式为:

$$P = \iint_A \rho C_d |u|^3 dA$$

涡轮机产生的潮流能资源为

$$P_t = k_t / (k_0 + k_t) \cdot P$$

上述公式显示,无论潮流发电装置在海中如何布放,其潮流能资源总是随着  $k_t$  的增大而增多,而随着流速的减小而减少。但流速又随着  $k_t$  的增大而减小。由此可以推断,存在一个  $k_t$  使得  $P$  达最大,即潮流能资源和耗散总量比值最大。然而,由于潮流能可开发量  $P_t$  是  $k_t/(k_0+k_t)$  的函数(图 2),因此即便当  $P$  为最大时,也无法保证  $P_t$  为最大,但仍可以通过数值试验的方式来确定一个  $k_t$  获得  $P_t$  最大值的数值解。需要指出的是,在水深地形、底质条件和动力条件均不同的海域,  $k_t$  有所不同。当然,在给定涡轮机数目、直

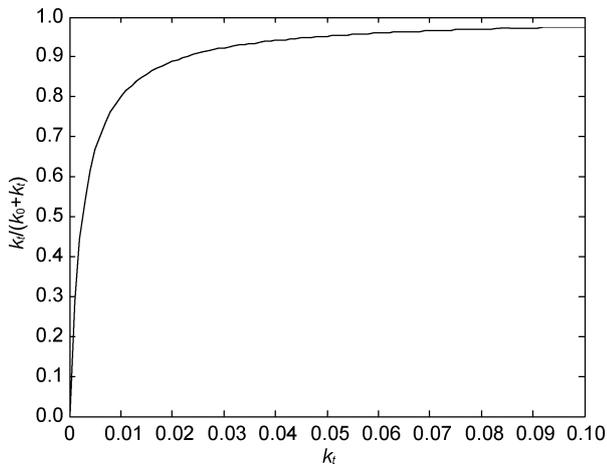


图 2 潮流能可开发量与能通量总耗散中的比值曲线

Fig.2 The ratio of extractable energy of tidal current with all dissipation

径尺寸和覆盖面积等参数的条件下,可直接构建拖拽力计算公式(Blunden *et al.*, 2007a)。

### 3 结果分析

#### 3.1 潮汐潮流特征分析

成山头外海域属于不正规半日潮区,年平均潮差为 0.82m,平均涨潮历时为 7h 5min,平均落潮历时为 6h 35min,主要涨潮流向为东南,落潮流向为西北。2008 年 7—8 月间的实测流速和潮位的变化曲线图(图 3)显示,该海域潮流涨急和落急时刻位于平潮和停潮附近,滞后约 1h。显然,该海域的潮波传播方式以典型的前进波为主。

从大潮期间涨急时刻和落急时刻的流速水平分布(图 4)可以看到,涨潮流最大流速位于成山头东北角海域,流速值达 2.26m/s,其主要流向为东南,流速超过 1.8m/s 的海域面积约为 3.4km<sup>2</sup>,落潮流最大流速为 2.02m/s,其主要流向为西北,位置较涨急时刻偏东南约 1km,流速超过 1.8m/s 的海域面积约为 2.9km<sup>2</sup>。很显然,该海域的潮流能资源较为丰富。此外,在成山角以南约 20km 处的近岸海域还有一小片强流区,最大流速约为 1.6m/s。

#### 3.2 潮流能理论资源分布

为了使潮流能资源的特征量具有较好的代表性,本文参照英国商业、企业和管理改革部(以下简称商业部——Department for Business, Enterprise & Regulatory Reform, BERR)(The European Marine Energy Centre, Ltd, 2009)支持下完成的英国海洋能网络地理信息系统电子图集中有关潮流能资源的特征量定义,选用大潮平均最大功率密度、小潮平均最大功率密度和年平均功率密度来表征成山头海域不同时期的潮流能资源状况。其中,大、小潮平均最大功率密度分别为估算点一年中所有的大、小潮期(连续三日)流速峰值对应功率密度的平均值,而年平均功率密度则为估算点一年中逐时流速值对应的功率密度的平均值。

图 5、图 6 分别为成山头海域大、小潮平均最大功率密度的水平分布和年平均功率密度的水平分布。由图 5a 可见,该海域大部分区域大潮平均最大功率密度均超过了 0.2kW/m<sup>2</sup>,而在成山头以东约 2km<sup>2</sup> 的海域资源较为丰富,大潮平均最大功率密度都在 0.6kW/m<sup>2</sup> 以上,其中尤以成山头以东水深最深的海域为最大,约为 3.08kW/m<sup>2</sup>。此外,在成山头南部一处上百平方千米的近岸海域,大潮平均最大功率密度约为 0.4—0.5kW/m<sup>2</sup>。

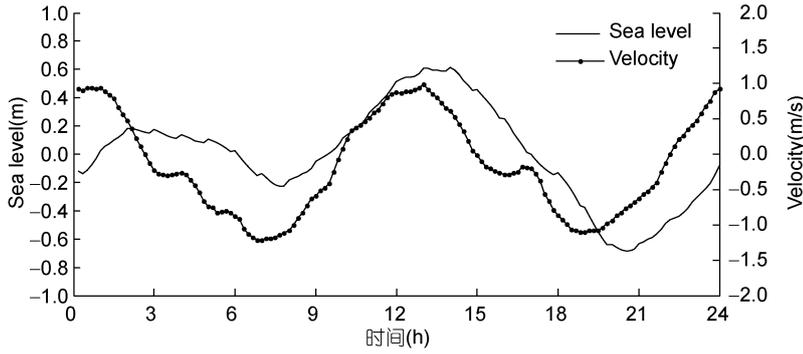


图 3 潮位和潮流时间变化曲线

Fig.3 Temporal distribution curve of tide and tidal current

值得指出的是,小潮平均最大功率密度分布总体上与大潮平均最大功率密度基本相似,但量值偏小,最大值为  $0.93\text{kW/m}^2$  (图 5b)。而年平均功率密度分布趋势与大、小潮平均最大功率密度的分布趋势相似,其最大值为  $0.98\text{kW/m}^2$  (图 6)。很显然,成山头海域的潮流能资源较为丰富。

### 3.3 潮流能评估区域的确定

通常,根据评估海域的潮流能资源条件、离岸距离、水深条件(不影响通航)等影响因素来确定潮流能

资源评估区。其具体要求为,潮流能资源大潮平均最大功率密度大于  $1\text{kW/m}^2$ (大潮平均最大流速大于  $1.25\text{m/s}$ ); 离岸距离基本小于  $5\text{km}$ ; 水深(理论低潮面)大于  $25\text{m}$ 。

根据上述要求,本文确定了成山头外西南处的一片海域作为潮流能资源评估区(见图 5)。该区域位于  $122.70\text{—}122.74^\circ\text{E}$ ,  $37.38\text{—}37.45^\circ\text{N}$  之间,其东—西长约  $4.5\text{km}$ ,南—北长约  $6\text{km}$ ,总面积约为  $27\text{km}^2$ 。

### 3.4 潮流能资源可开发量

按照上述计算方法和所选定的潮流能资源评估区,本文计算了研究海域的潮流能可开发资源量,结果如图 7 所示。由图 7 可见,成山头外评估区的潮流能可开发量  $P_f$  随着  $k_f$  的增长而不断增多,当  $k_f$  为  $0.07$  时,年平均潮流能可开发量达到  $17.9\text{MW}$ 。其中,大潮(连续 3 天)期间可开发量高达  $37.7\text{MW}$ ,而小潮(连续 3 天)期间则为  $7.3\text{MW}$ 。事实上,由于涡轮机的启动速度都大于  $0$ ,其额定功率在流速达到一定数值后便不再随流速的增大而改变,再加上各种转

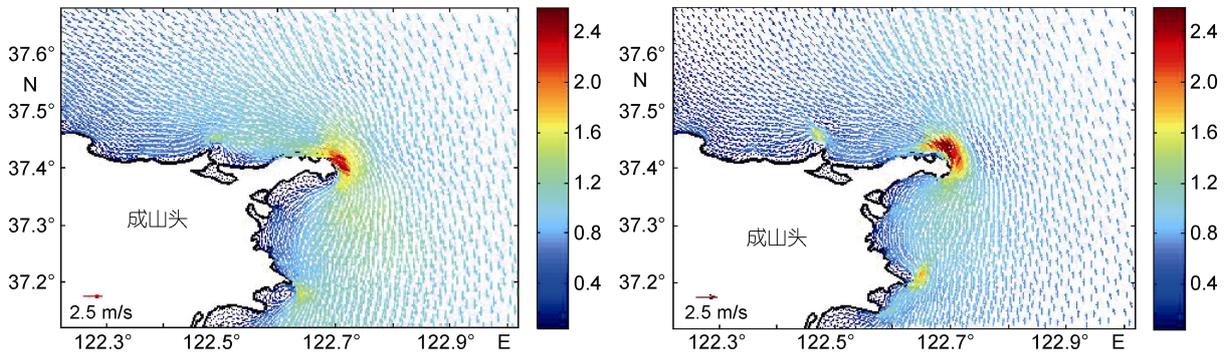


图 4 成山头外潮流涨急(左)、落急(右)时刻流速分布图

Fig.4 The maximum velocity distribution of tidal current of flood tide (left) and ebb tide (right) at Chengshantou cape

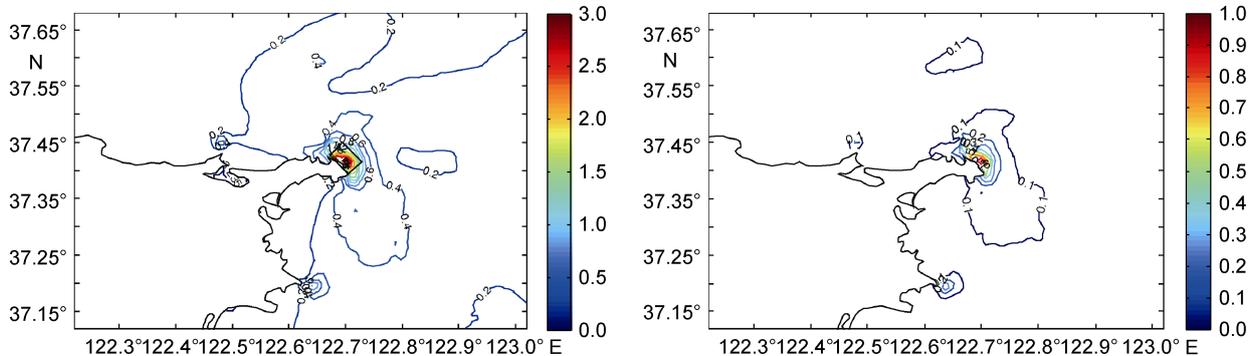


图 5 大潮(左)、小潮(右)平均最大功率密度分布

Fig.5 The maximum power distribution for mean spring tide (left) and mean ebb tide (right)

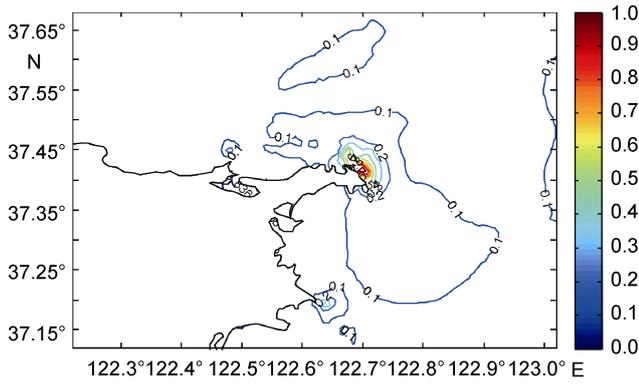


图6 年平均功率密度分布

Fig.6 The distribution of the annual mean power

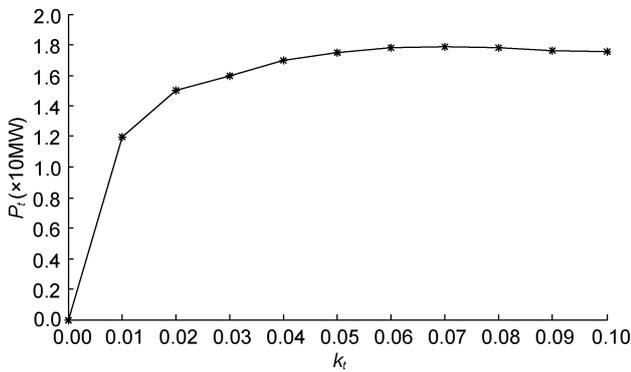


图7 成山头外潮流能可开发量耗散曲线

Fig.7 Extractable energy dissipation curve of tidal current at Chengshantou cape

化效率的影响,因而潮流能可开发量可能还会有一定比例的减小。由于成山头海域的潮流为正规半日潮,因此该海域的装机容量应为 42.6MW。也就是说,在该海域可布放 42—43 台 1MW 的潮流能转换装置。

前已述及, FLUX 方法仅适用于水道、小海湾等

小区域的潮流能资源评估。而该方法是否也适用于成山头海域呢?为此,本文基于能通量的 FLUX 方法估算了成山头海域的潮流能资源可开发量。在计算时,取理论蕴藏量为 43.3MW,评估截面为评估区域的南、北边界的平均值,有效影响因子取 0.15,得到的评估值为 6.4MW。由此可见,FLUX 方法的评估值比本文的评估结果要小很多。但应指出的是,由于我国目前尚无真正的潮流发电场,因此尚无法验证这两种方法的准确性。

### 3.5 潮流能开发对周围流场的影响

潮流能开发装置的布放必然对周围海域的水动力环境产生影响,但其影响究竟有多大?为此,本文将简要探讨这个问题。

图 8 为最大潮流能开发状态下大潮期涨急、落急流场的变化(较原始状态下)等值线分布。可以清楚地看到,在潮流能开发海域,流速明显减弱,而且涨急时刻的流速极值出现在成山头北部海域,最大减小了 0.47m/s,该点较原始流速值减小了 40%,但在成山头东北部海域则有 0.1m/s 左右的增幅;落急时刻最大减小了 0.64m/s,减幅达 38%,极值出现在成山角顶端附近,同样,其北部海域则有 0.1—0.2m/s 的涨幅。

相对而言,潮流能开发对潮汐的影响较小。从大潮期最高潮位变化分布(图 9)可以看到,开发海域的潮位有约 4cm 的下降,而在其余海域则无明显变化。

## 4 结论

本文利用 FVCOM 数值模式,在良好模拟成山头外海域潮波特征基础上,结合理论潮流能资源分布、水深地形条件等因素,确定了具有一定开发利用前

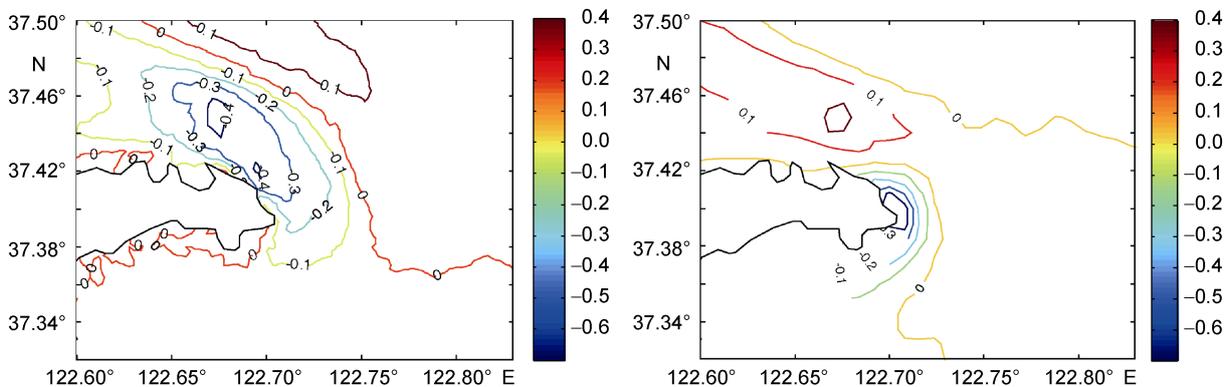


图8 原始状态与开发状态的流速变化水平分布

Fig.8 Horizontal distribution of tidal current change between original status and developing status

左图: 涨急时刻; 右图: 落急时刻

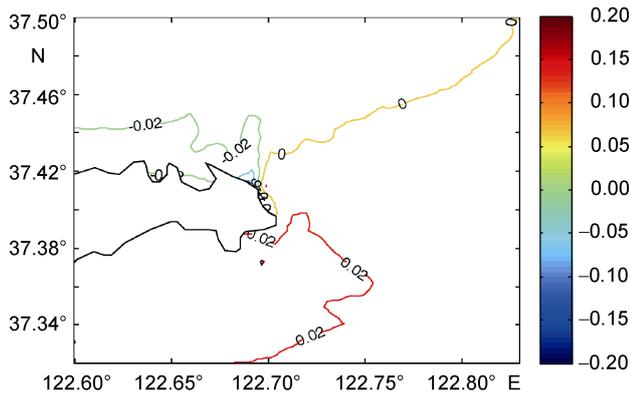


图 9 大潮期间原始状态与开发状态的潮汐变化分布

Fig.9 Distribution of tide change between original status and developing status

景的潮流能开发区,并运用能量耗散原理,评估了成山头海域的潮流能资源可开发量。值得一提的是,这种评估方法与基于能通量的经典潮流能评估公式有所不同。该方法不仅考虑了转换装置对流场的影响,而且还摆脱了需有固体边界的水道或海湾截面积的束缚。显然,本文所用的方法适用于海岬等开阔海域。

综上所述,在成山头面积为  $27\text{km}^2$  的海域内,当转换装置的拖拽系数为 0.07 时,其可开发的潮流能资源约为 17.9MW。其中,大潮期间可开发量高达 37.7MW,而小潮期间则为 7.3MW。在此条件下,该海域大潮期间涨急和落急时刻的流速分别减小了 40%和 38%。但潮流发电装置对潮汐的影响并不大,在成山头顶端的高潮潮位仅下降 4cm 左右。这些结果可为成山头海域潮流能资源的开发利用提供参考依据。

### 参 考 文 献

- 王智峰,周良明,张弓贲等,2010. 舟山海域特定水道潮流能估算. 中国海洋大学学报(自然科学版), 40(8): 27—33
- 匡国瑞,周德坚,1987. 成山角潮流能初步估算. 海洋技术, 6(2): 44—48
- 吕新刚,乔方利,2008. 海洋潮流能资源估算方法研究进展. 海洋科学进展, 26(1): 98—108
- 吕新刚,乔方利,赵 昌等,2010. 海洋潮流能资源的数值估算——以胶州湾口为例. 太阳能学报, 31(2): 137—143
- 刘美琴,仲 颖,郑 源等,2009. 海流能利用技术研究进展与展望. 可再生能源, 27(5): 78—81
- 李 波,李 龙,杨 丽等,2010. 潮流能的利用及研究状况. 太阳能, (9): 39—42
- 武 贺,赵世明,徐辉奋等,2010. 成山头外潮流能初步估算. 海洋技术, 29(3): 98—100
- 武 贺,赵世明,张 松等,2011. 老铁山水道潮流能初步估算. 海洋通报, 30(3): 310—314
- 林勇刚,李 伟,刘宏伟等,2008. 水下风车海流能发电技术. 浙江大学学报(工学版), 42(7): 1242—1246
- 郑志南,1987. 海洋潮流能的估算. 海洋通报, 6(4): 70—75
- 戴 军,单忠德,王西峰等,2010. 潮流水轮机的研究进展. 可再生能源, (4): 130—133
- Black & Veatch Consulting Ltd, 2004. UK, Europe, and tidal energy resource assessment. Marine Energy Challenge Report, No.107799/D/2100/05/1
- Black & Veatch Consulting Ltd, 2005. Phase II, UK tidal stream energy resource assessment. Marine Energy Challenge Report, No.107799/D/2200/03
- Blunden L S, Bahaj A S, 2007a. Effects of tidal energy extraction at Portland Bill, southern UK predicted from a numerical model. Proceeding of the 7<sup>th</sup> European Wave and Tidal Energy Conference, Porto, Portugal, 1—10
- Blunden L S, Bahaj A S, 2007b. Tidal energy resource assessment for tidal stream generators. Power and Energy, 221(Part A): 137—146
- Chen C, Beardsley R C, Cowles G, 2006a. An unstructured grid, finite-volume coastal ocean model (FVCOM) system. Oceanography, 19(1): 78—89
- Chen C, Beardsley R C, Cowles G, 2006b. An unstructured grid, finite-volume coastal ocean model. FVCOM User Manual, SMAST/UMSSD Technical Report-04-0601, 183
- Foreman M G G, Walters R A, Henry R F *et al*, 1995. A tidal model fore eastern Juan de Fuca Strait and the southern Strait of Georgia. J Geophys Res, 100: 721—740
- Sutherland G, Foreman M, Garrett C, 2007. Tidal current energy assessment for Johnstrone strait Vancouver Island. Power and Energy, 221: 147—157
- The European Marine Energy Centre, Ltd, 2009. Assessment of tidal energy resource. Marine Renewable Energy Guides. <http://www.emec-marine-equipment.org/>
- Walters R A, 1992. A three-dimensional finite element model for coastal and estuarine circulation. Cont Shelf Res, 12: 83—102

## ASSESSMENT OF EXTRACTABLE ENERGY OF TIDAL CURRENT AT CHENGSHANTOU CAPE

WU He, WANG Xin, HAN Lin-Sheng  
(*National Ocean Technology Center, Tianjin, 300111*)

**Abstract** In this study, the extractable energy resource of the tidal current is estimated using the FVCOM model in the open sea area of the Chengshantou Cape in the area of 27km<sup>2</sup>, which is known as an area of good potential in the exploitability of tidal current energy. Based on the energy dissipation principle, simulation of the tidal current in this area was performed to estimate the available energy quantity. Our results show that when the drag coefficient of turbines is 0.07, the available energy of the tidal current for the area is 17.9MW, and during the periods of spring tide and neap tide, the estimated energy quantity is 37.7MW and 7.3MW, respectively. The maximum decrease in the current velocity in the flood period and ebb period is 40% and 38%, respectively. However, the tidal level is slightly affected by turbines, which decreases by 4cm only in the spring tide period at the tip of the Chengshantou Cape.

**Key words** Chengshantou Cape; Tidal current energy; Assessment of exploitable energy