

# 潮致垂直涡动粘性系数的参数化

李明愷<sup>1</sup> 侯一筠<sup>1</sup> 乔方利<sup>2</sup>

1. 中国科学院海洋研究所, 青岛 266071; 2. 国家海洋局第一海洋研究所, 青岛 266061

**摘要** 在理想地形条件下利用 POM 设计一套理想数值试验, 由 Mellor-Yamada 湍流闭合方案对潮流所导致的海洋近底层垂向混合作用进行模拟计算, 统计分析了不同水深和潮流振幅情况下潮致底混合层厚度和垂直涡动粘性系数的分布, 进而对潮流引起的垂直混合作用进行参数化, 得到了一个潮致垂直混合涡动粘性系数的拟合公式. 将该公式应用于原理想试验中以取代在模式开边界加潮流边界条件的做法, 得到了与加潮流边界条件较为一致的计算结果, 验证了参数化方案的可行性. 将该参数化方案应用于渤海、黄海和东海环流数值模式中, 模拟的海洋温度三维结构与实际观测基本吻合.

**关键词** 潮流 近底混合层 垂直涡动粘性系数 参数化

海洋潮流在底边界层特别是陆架海区存在着显著的流速垂向剪切分布, 由此导致的湍流会在海底附近引起较强的混合, 而这种混合在形成近海热盐结构中起着非常重要的作用. 环流数值模式中考虑潮流混合作用通常有两种方法<sup>[1]</sup>: 一种是在数值模拟中直接加入潮流分量, 其优点是将潮流混合直接包含在湍流闭合模式中, 缺点是要得到环流场, 还需要将潮流滤去, 而且包含潮流时模拟往往需要较小的时间步长; 另一种方法就是将潮流的混合作用参数化<sup>[2]</sup>, 但从现有的文献资料来看, 这方面的工作并不多见. 本文将在 POM 模式(Princeton ocean model)的基础上设计理想试验, 对潮流引起的垂直混合作用进行参数化.

POM 模式中垂直涡动粘性系数是由 Mellor-Yamada 湍流闭合模型<sup>[3]</sup>来计算确定的. 本文试图在此基础上, 首先计算出在单纯潮流情况下垂直涡动粘性系数的分布形式, 进而再对其进行分析, 得出一个潮致垂直混合涡动粘性系数的半经验公式.

## 1 潮致垂直混合的理想试验

James 曾给出过一个潮混合系数表达式<sup>[4]</sup>

$$K_T = \frac{1.59 \times 10^{-4} V h}{\left(1 + 2bg\alpha \frac{\partial T}{\partial z_0} \cdot \frac{(z_0 + h)^2}{A^2}\right)^p}, \quad (1)$$

其中  $b$ ,  $p$  为经验常数,  $V$  为潮流振幅,  $h$  为水深,  $A = W^*/k$ ,  $W^* = c^{1/2}V$ ,  $c = 2 \times 10^{-3}$ ,  $k$  为 Karman 常数,  $\alpha$  为海水热膨胀系数、 $T$  为海水温度、 $z_0$  为海底粗糙度参数、 $g$  为重力加速度. 该表达式较为复杂, 但可以从中看出, James 提出的潮混合系数的主要相关参数是潮流振幅和水深, 基于这个思想, 本文的试验将主要针对不同潮流振幅和水深情况下的垂直涡动粘性系数的分布形式进行研究.

设计一个平底方形海区, 其中西、北和南边界都是闭合的, 东边界设为开边界; 以不同水深情况进行试验, 分别取 30, 50, 80, 100 和 150 m. 水平计算网格为  $51 \times 51$ , 垂直方向的分层方法是: 当水深为 30 和 50 m 时, 每 0.5 m 分为 1 层; 水深为 80 和 100 m 时, 每 1 m 分为 1 层; 水深为 150 m 时, 每 1.5 m 分为 1 层. 为了使理想试验与实际情况更接近, 设置计算区域的西南角坐标为  $(120^\circ \text{E}, 26^\circ \text{N})$ , 水平网格分辨率为  $1/6^\circ$ , 并对不同纬度分别计算科氏参数.

2005-04-20 收稿, 2005-07-19 收修改稿

\* 国家自然科学基金重点资助项目(批准号: 90411013)

E-mail: limingkuai@ms.qdio.ac.cn

为了使计算更接近实际,在开边界处,潮流边界条件参考东中国海  $M_2$  分潮的情况来设置,从南至北,各开边界点潮流的位相是变化的.另外,在试验中潮流边界条件是以流速形式给出的,并且对于每个水深情况的试验,都匹配几种不同的边界流速来进行计算.

试验海区的初始温度在水平方向上设置为均一的,而在垂直方向,温度从表层至底层由  $25^\circ\text{C}$  线性变化到  $5^\circ\text{C}$ .为使试验简单化,结果更易于分析,全场盐度设为  $34 \text{ psu}^{1)}$ .模式积分  $30 \text{ d}$ ,取第  $30$  天的计算结果进行分析.

## 2 试验结果

参照 James 的做法,本文也假定潮致垂直向涡动粘性系数主要依赖于潮流振幅和水深,因此对计算结果所进行的分析都是取受边界影响较小的中间位置点的数据列进行的,这样可以把潮流振幅和水深以外的诸如侧边界摩擦等因素带来的影响减小到最低.

### 2.1 潮混合导致的温度垂直结构和垂直涡动粘性系数分布

通过对不同水深情况进行潮流模拟试验,可以看到,潮流的作用使底层一定厚度范围内的海水进行了充分的混合,在这一范围内,海水温度比较一致,形成了一个底混合层,而且此混合层的厚度与局地潮流振幅(除特别说明,本文所指均为深度平均的潮流振幅)有直接的关系.这里以水深为  $100 \text{ m}$  的试验为例,对计算结果进行描述.

图1为不同潮流振幅下温度的垂直结构分布,

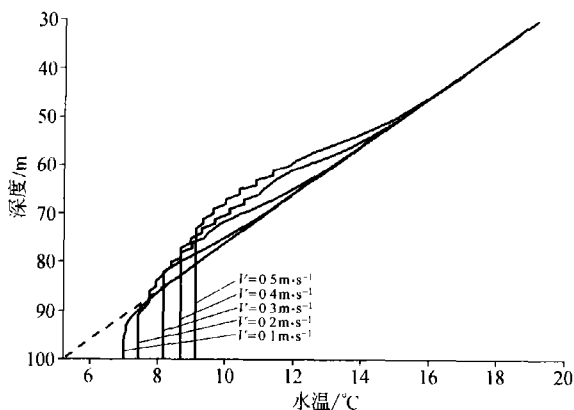


图1 不同潮流振幅下水温的垂直结构分布

1)  $1 \text{ psu} = 1 \text{ kg}$  海水中含盐  $1 \text{ g}$

其中虚线为初始温度分布;图2为不同潮流振幅下垂直涡动粘性系数的垂向分布.对比图1和2可以看出,与温度分布相对应的底混合层内垂直涡动粘性系数的分布大体呈抛物线的形式,而在混合层之上的部分呈锯齿状分布,这部分的垂直涡动粘性系数几乎对温度的分布没有影响,锯齿状部分的垂直涡动粘性系数分布应该这是由于数值模式中迭代法解方程时所得到的假值.

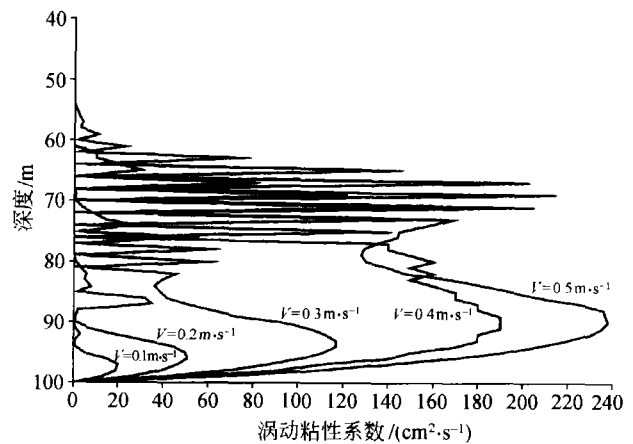


图2 不同潮流振幅下垂直涡动粘性系数的垂向分布

### 2.2 不同水深情况下潮致底混合层的厚度

计算结果还表明,底混合层的厚度除了受潮流振幅的影响,还受局地水深的制约,图3显示了当潮流流速的振幅为  $0.2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  时不同水深情况下的

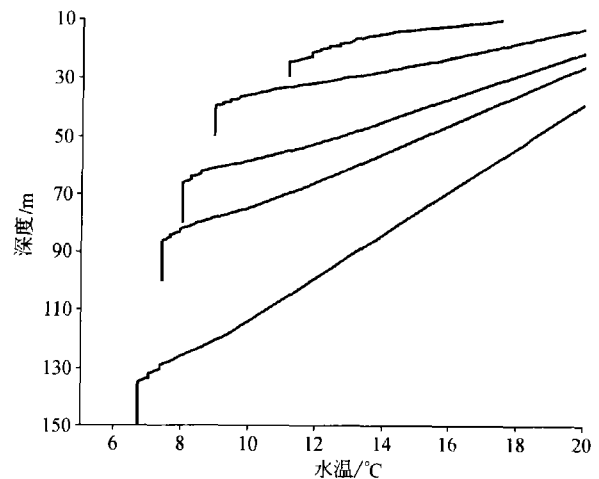


图3 潮致水温垂直结构在不同水深情况下的分布

温度的垂直结构分布. 对于水深较浅的情况, 当潮流振幅比较大时, 经过长时间的潮混合作用后, 整个水层都会充分混合.

### 3 潮致垂直混合涡动粘性系数的参数化

#### 3.1 底混合层厚度

潮混合主要在底层起控制作用, 确定底混合层的厚度是将潮混合进行参数化的必要条件. 首先对底混合层下个定义, 即确定具有什么特征的水层属于底混合层, 由于本文主要对温度结构进行模拟, 因此以温度为特征来定义. 本文假定, 凡混合后水

层温度  $T_z$  符合下面的条件, 则属于底混合层:

$$T_z - T_b < 0.5\Delta T_1, \quad (2)$$

其中  $T_b$  为最底层水温,  $\Delta T_1$  为模式初始时刻所设的相邻两水层的温度差.

以(2)式为判据, 对不同水深和不同潮流振幅的计算结果进行统计, 得到表1所示的相应底混合层厚度值. 由表中数据可以看出, 底混合层厚度随潮流振幅和水深都有非线性的增长关系, 这种关系可以从图4中看得更直观一些. 根据表1和图4, 可以设底混合层厚度表达式为

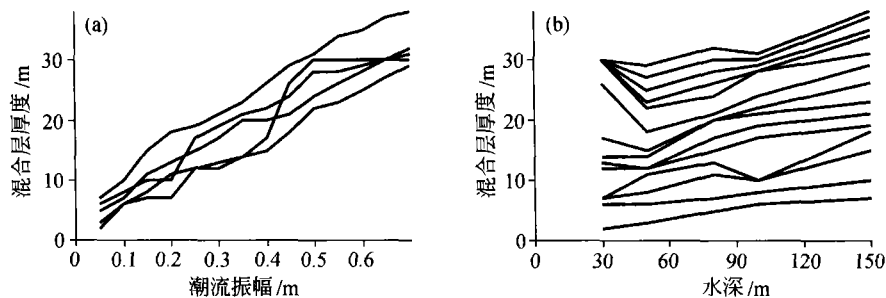


图4 底混合层厚度随潮流振幅和水深的变化

(a) 底混合层厚度随潮流振幅的变化; (b) 底混合层厚度随水深的变化

$$h_m = \min\{\alpha_1 U^{\beta_1} \ln H, H\} \quad (3)$$

其中  $h_m$  为底混合层厚度,  $U$  为潮流振幅,  $H$  为水深;  $\alpha_1$  和  $\beta_1$  为大于0的经验常数, 可以用曲线拟合的方法由表1中的数据来确定, 本文拟合出的  $\alpha_1$  和  $\beta_1$  的值约为9.54和0.68.

表1 不同水深和潮流振幅情况下的底混合层厚度(单位: m)

潮流振幅/(m·s <sup>-1</sup> )	水深/m				
	30	50	80	100	150
0.05	2	3	5	6	7
0.10	6	6	7	8	10
0.15	7	8	11	10	15
0.20	7	11	13	11	18
0.25	12	12	15	17	19
0.30	13	12	17	19	21
0.35	14	14	20	21	23
0.40	17	15	20	22	26
0.45	26	18	21	24	29
0.50	30	22	24	28	31
0.55	30	23	26	28	34
0.60	30	25	28	29	35
0.65	30	27	30	30	37
0.70	30	29	32	31	38

#### 3.2 参数化的表达式

参考方国洪等<sup>[5]</sup>和朱耀华等<sup>[6]</sup>关于用混合长度理论计算垂直涡动粘性系数的方法, 设

$$\nu_T \propto l^2 \frac{\partial U}{\partial z}, \quad (4)$$

其中  $\nu_T$  为潮致垂直涡动粘性系数,  $U$  与前面定义相同,  $l$  为混合长度.  $\frac{\partial U}{\partial z}$  的值可以用  $\frac{U}{h_m}$  来近似, 下面讨论一下如何确定混合长度  $l$ .

朱耀华等<sup>[6]</sup>在文献中对  $l$  的计算方法是

$$l = \kappa_0(z' - z_0) \left[ 1 - \frac{z'}{(1+s)H} \right], \quad (5)$$

式中  $\kappa_0 = 0.4$  为 Karman 常数;  $z_0$  为海底处的粗糙度,  $s$  为反映海面粗糙度的参数;  $z' \equiv h + z$ , 是离海底的距离,  $h$  为未受扰动的水深,  $H$  为受扰动的水深, 在海面  $z=0$ , 在海底  $z=-h$ .

对于潮致底混合层垂直涡动粘性系数的确定,

$s$  可以不考虑,  $z_0$  为  $10^{-2}$  m 量级, 可以略去, 而且  $h=H=h_m$ ; 再令  $z$  向下为正, 在底混合层上界面处  $z=0$ , 而在海底  $z=h$ , 于是(5)式变为

$$l = \kappa_0 (h_m - z) \left(1 - \frac{h_m - z}{h_m}\right) = \kappa_0 h_m \left(1 - \frac{z}{h_m}\right) \frac{z}{h_m}, \quad (6)$$

令  $z^* = \frac{z}{h_m}$ , 代入(6)式并去掉星号, 则有

$$l = \kappa_0 h_m (1 - z^*) z^*, \quad 0 \leq z^* \leq 1, \quad (7)$$

于是, 联合(4)式和(7)式可以得到潮致底混合层垂直涡动粘性系数的表达式

$$\nu_T = \alpha_2 U h_m (1 - z^*)^2 z^{*2}, \quad 0 \leq z^* \leq 1, \quad (8)$$

这里  $\alpha_2$  是合并了  $\kappa_0^2$  的正的经验常数。

Bowden<sup>[7]</sup>曾从量纲分析出发, 认为垂直涡动粘性系数的最大值  $\nu_{\max}$  正比于  $Uh$  ( $h$  为水深), 据其观测结果有

$$\nu_{\max} = 2.5 \times 10^{-3} U h, \quad (9)$$

方国洪等<sup>[8]</sup>通过计算指出垂直涡动粘性系数的平均值为

$$\bar{\nu} = 2.7 \times 10^{-3} h |\bar{w}|, \quad (10)$$

其中  $|\bar{w}|$  为深度平均的潮流振幅。此式与(9)式是等价的, 只是比例系数有所不同。

李身铎等<sup>[8]</sup>在对杭州湾潮流涡动粘性的估算中

得出垂直方向上的最大涡动粘性系数和潮流垂直平均值的振幅  $U$  之间的关系为

$$\nu_{\max} = 0.64 \times 10^{-3} U h. \quad (11)$$

通过对比(8)与(9)-(11)式可以看出, (8)式中的  $(1-z)^2 z^2$  部分是垂直涡动粘性系数  $\nu$  在底混合层中的分布形式, 而  $\frac{1}{16} \alpha_2 U h_m$  其实就是底混合层垂直涡动粘性系数的最大值  $\nu_{T, \max}$ , 这个结果与前面 2.1 小节中的叙述相吻合。表 2 列出了在不同水深和潮流振幅情况下  $\nu_{T, \max}$  的值。图 5 给出了  $\nu_{T, \max}$  分别随水深和潮流振幅的变化。

表 2 不同水深和潮流振幅情况下的垂直涡动粘性系数最大值(单位:  $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ )

潮流振幅 /( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )	$\nu_{T, \max}$ 水深/m				
	30	50	80	100	150
0.05	0.0003	0.0004	0.0006	0.0007	0.0010
0.10	0.0022	0.0010	0.0022	0.0026	0.0022
0.15	0.0040	0.0038	0.0050	0.0044	0.0067
0.20	0.0040	0.0080	0.0080	0.0059	0.0110
0.25	0.0100	0.0100	0.0140	0.0130	0.0160
0.30	0.0150	0.0100	0.0190	0.0160	0.0180
0.35	0.0180	0.0130	0.0240	0.0230	0.0270
0.40	0.0190	0.0170	0.0290	0.0300	0.0310
0.45	0.0250	0.0200	0.0330	0.0340	0.0470
0.50	0.0290	0.0300	0.0390	0.0380	0.0570
0.55	0.0310	0.0300	0.0460	0.0450	0.0680
0.60	0.0350	0.0330	0.0520	0.0500	0.0700
0.65	0.0380	0.0380	0.0600	0.0530	0.0860
0.70	0.0400	0.0420	0.0650	0.0550	0.0880

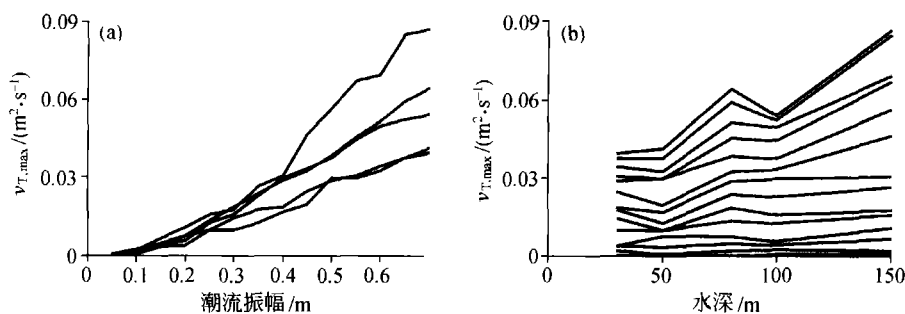


图 5 垂直涡动粘性系数最大值  $\nu_{T, \max}$  随潮流振幅和水深的变化

(a) 垂直涡动粘性系数最大值随潮流振幅的变化; (b) 垂直涡动粘性系数最大值随水深的变化

通过表2和图5,与 $h_m$ 的拟合方法类似,可以得到 $\nu_{T,max}$ 与水深和潮流振幅的关系式,

$$\nu_{T,max} = 0.026U^{1.68} \ln H. \quad (12)$$

将(12)式与(3)式比较,可以看出

$$\nu_{T,max} = 2.73 \times 10^{-3} U h_m. \quad (13)$$

(13)式与Bowden和方国洪的结果(9)和(10)式形式是一致的.

于是,由(3),(8)和(12)式最终可得

$$\nu_T = 0.0436 U h_m (1-z)^2 z^2, \quad 0 \leq z \leq 1, \quad (14)$$

其中 $h_m = \min\{9.54U^{0.68} \ln H, H\}$ .

垂向涡动混合系数应该与密度层化相关联,但考虑到实际情况下潮流混合所导致的近底层混合较均匀,因此我们认为未包含密度层结作用的上式是通用的.

#### 4 参数化方案的验证

以水深 $H=100\text{ m}$ 、潮流振幅 $U=0.5\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的情况为验证对象,将(14)式应用于模式中,取开边界处潮流边界条件的流速为0进行计算.图6是该条件下参数化形式的垂直涡动粘性系数的垂向分布.计算过程中,将不同时刻温度垂直结构的计算结果输出,与第2节中理想试验的计算结果(潮流方案)进行比

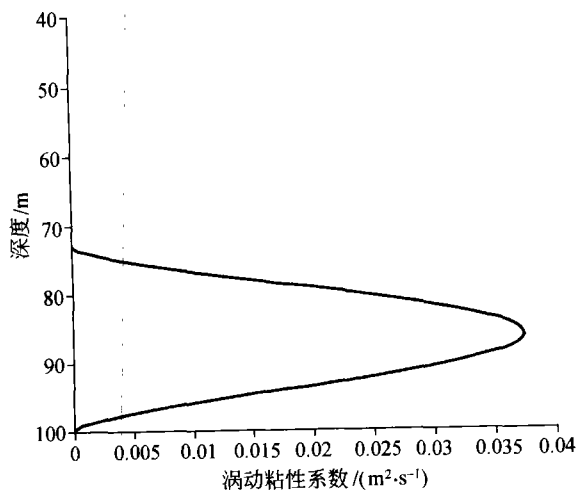


图6 参数化形式垂直涡动粘性系数的垂向分布

较,结果如图7所示.图中的虚线为潮流方案的计算结果,实线为参数化方案第1至15天的计算结果,可以看出,参数化方案可以很快地将底层水进行混合,而且与潮流方案的结果非常接近.

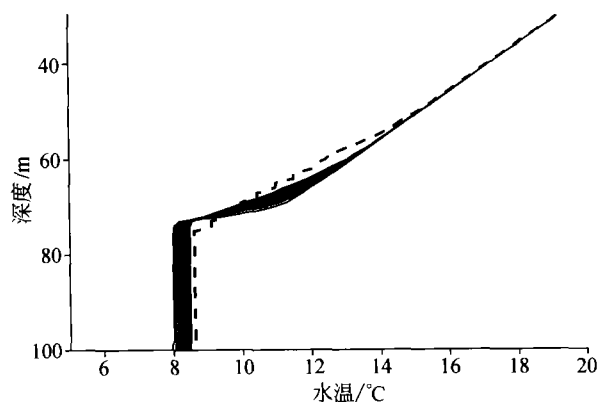


图7 参数化方案计算的水温垂直结构(实线)与潮流方案的比较(虚线)

我们将参数化方案式(14)应用于渤黄东海环流数值模式中,模拟结果显示,海洋温度三维结构与实际观测基本吻合,这部分将另文给出.

#### 5 结论

本文在理想地形条件下利用POM模式中Mellor-Yamada湍流闭合模型直接计算潮流导致的垂向涡动混合系数,统计分析了不同水深和潮流振幅情况下潮流致底混合层厚度和垂直涡动粘性系数的分布,对潮流引起的垂直混合作用进行参数化,得到了一个潮流垂直混合涡动粘性系数的拟合公式:

$$\nu_T = 0.0436 U h_m (1-z)^2 z^2, \quad 0 \leq z \leq 1, \quad \text{其中 } h_m = \min\{9.54U^{0.68} \ln H, H\}.$$

将该公式应用于原理想试验中进行计算,取代在模式开边界加潮流边界条件的做法,得到了与加潮流边界条件较为一致的计算结果,从而验证了参数化方案的可行性.将该参数化方案应用于真实海域温盐结构的数值模拟中,以进行更进一步的检验,是十分必要的.

#### 参 考 文 献

- 1 乔方利,马建,夏长水,等.波浪和潮流混合对黄东海夏季

- 温度垂直结构的影响研究. 自然科学进展, 2004, 14(12): 1434—1441
- 2 袁业立, 李惠卿. 黄海冷水团环流结构及生成机制研究——I. 0 阶解及冷水团的环流结构. 中国科学, B 辑, 1993, 23(1): 93—103
- 3 Mellor G L, Yamada T. Development of a turbulence closure model for geophysical fluid problems. Rev Geophys Space Phys, 1982, 20: 851—875
- 4 James I D. A model of the annual cycle of temperature in a frontal region of the Celtic Sea. Estuarine and Coastal Marine Science, 1977, (5): 339—353
- 5 Fang G H, Ichiye T. On the vertical structure of tidal currents in a homogeneous sea. Geophys J R Astr Soc, 1983, 73: 65—82
- 6 朱耀华, 方国洪. 陆架和浅海环流的一个三维正压模式及其在渤、黄、东海的应用. 海洋学报, 1994, 16(6): 11—26
- 7 Bowden K F. Turbulence. The Sea, 1962, 1: 802—825
- 8 李身铎, 曹德明, 方国洪. 杭州湾潮流湍应力和涡动粘性的估算. 海洋学报, 1985, 7(4): 412—422

(上接第 20 页)

拟从领域 1—7 中选出 5—6 个重点项目予以资助.

### 5 工程科学三处

- (1) 多尺度传递现象和传递机理研究
- (2) 非平衡条件下的工质热物性研究
- (3) 内燃机燃烧理论与燃烧控制研究
- (4) 超声速燃烧与流动基础研究
- (5) 复杂热物理量场的测试新方法和技术研究
- (6) 在可再生能源利用中热物理问题研究领域的自由申请

拟从领域 1—6 选出 4—5 个重点项目予以资助.

### 6 工程科学四处

- (1) 地域性节能居住建筑体系
- (2) 城市水循环过程中水质转化和安全保障技术的基础研究
- (3) 输电塔-线结构体系防灾基础研究
- (4) 大型建筑抗爆安全性基础研究
- (5) 可在本科学处“新型空间结构体系”研究领域提出自由申请重点项目
- (6) 可在本科学处“城市道路交通系统规划”研究领域提出自由申请重点项目

拟从领域 1—6 中选出 4—5 个重点项目予以资助.

### 7 工程科学五处

- (1) 海洋土的工程特性及其地基的变形机理研究
- (2) 灌排条件下农业化学物质的转化迁移规律与控制方法
- (3) 深海系泊系统的基础理论与关键技术
- (4) 基于新型功能材料的高性能电工执行机构的应用基础研究
- (5) 肿瘤治疗的电工新技术及其作用机理的基础研究
- (6) 直接驱动负载的快放电脉冲功率源关键技术研究
- (7) 中大功率高速电动/发电系统关键技术研究

拟在领域 4—7 中选出 2—3 个重点项目予以资助.