



# 动边界流动控制中的涡动力学

1. 鱼类游动的涡动力学与控制
2. 采用动波浪壁消除尾涡
3. 湍流数值模拟建模理论基础再探究
4. 科学与艺术创新方法的比较研究初探

## 吴锤结

吴介之、吴建民、马晖扬、罗惕乾、C. Bates、程贯一、朱广圣、苏臣、王务林、卢泽民、张志新、史汉生、周本谋、王安、赵红亮、刘长空、连樱、翟俊霞、张淑君、王亮、解妍琼、关晖、周菊光、郑晓静、江召兵、满杰、王明、李霞、陈剑、陈十一、信志强、许东洋、邹丽、朱霖霖、马永亮、李涛、沙洁、张文娟、郭爽、熊英、伊丽莎白、鹏乃夫、卫志军、薛亦菲、暮色、龚升、刘玄鹤、李卓越、齐进、王金城

电子邮件: [cjwudut@dlut.edu.cn](mailto:cjwudut@dlut.edu.cn)

大连理工大学航空航天学院

## 提 纲

1. 鱼类游动的涡动力学与控制
2. 尾涡的作用
3. 动波浪壁流动控制
4. 消除三维波动鳐鱼的尾涡
5. 阿拉伯飞毯的初步研究
6. 小结
7. 启示
8. 湍流数值模拟建模理论基础再探究
10. 科学与艺术创新方法的比较研究初探

# 1. 鱼类游动的涡动力学与控制

## 一、研究目的

- 了解鱼群作机动游动时进行

速度控制;

方向控制;

节能原理

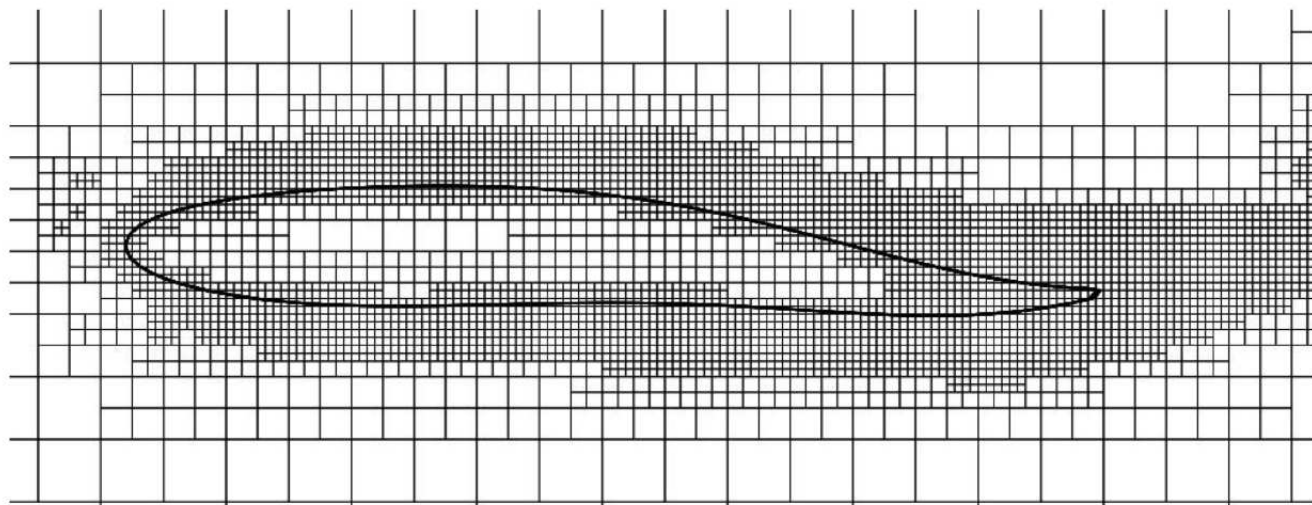
的控制机理和涡动力学原理。

## 二、自主游动

- 由于鱼游的非定常特点, **伽利略变换不成立**。必须将鱼和鱼群自主游动的运动方程与 Navier-Stokes 方程耦合求解。

### 三、数值方法：自适应有限体积法

- 控制方程: 二维/三维不可压连续性方程和 Navier-Stokes 方程;
- 数值格式: 并行二维/三维自适应多重网格有限体积法;
- 时间离散: 分数步投影法;
- 空间离散: 二维四叉树/三维八叉树半结构网格; 多重网格投影 Poisson 求解器; 二阶精度 Godunov 型对流格式; 半隐式多重网格扩散求解器。



自适应加密分层网格

## 四、摆动规律、反馈控制与控制策略

- 鱼身体中心线的摆动规律随时间的变化规律为

$$y(x, t) = a(x) \sin(k_w x - \omega t)$$

此处,  $a(x)$  是摆幅, 它从头部到尾部逐步减小,

$$a(x) = c_1 x + c_2 x^2$$

- 自主游动的仿生鱼的运动方程为:

$$\begin{cases} m \frac{d\vec{u}}{dt} = \vec{F} \\ \frac{d\vec{L}}{dt} = \vec{M} \end{cases}$$

- $\vec{L}$  是鱼的动量, 注意: 对柔性体, 没有转动惯量!

$$\vec{L} = \int_{f_b} \vec{r}_i \times \vec{\omega}_i dv \approx \sum_i m_i \vec{r}_i \times \vec{v}_{fi} + \sum_i m_i r_i^2 \vec{\omega}_i$$

- **【没有控制的自主游动】**
- **反馈控制方法**: 采用“试错法”根据预期的轨道, 在每个时间步对鱼的运动进行控制。
- **【采用尾部进行方向控制】**
- **头部控制策略**: 通过鱼头部的摆动来控制游动的方向。设仿生鱼的头部摆幅为:

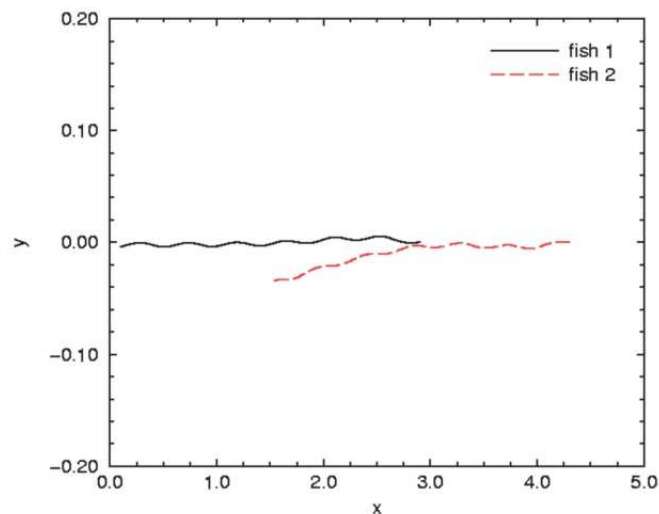
$$A_h(t) = \frac{1}{2} \{C_\theta L_c \tan(\theta(t)) + C_y [y(t) - y_0]\}$$

- 考虑到头部方向控制后的鱼的摆动规律变为:

$$y(x, t) = \begin{cases} A_h(t)x^2, & -0.4 \leq x \leq 0.0 \\ a(x) \sin(k_w x - \omega t), & 0.0 < x \leq 0.6 \end{cases}$$

## 五、鱼群的自主游动和控制

- 六条鱼排列成三排: 【无控游动】
- 六条鱼的速度和方向控制: 【头部控制游动】
- 【两条鱼绕两个同心圆游动】
- 【两条三维鱼作串行游动 —  $\lambda_2$ 】



鱼游轨迹在  $x \sim y$  平面上的投影



## 六、生物学证据和结论

### (1) 生物学证据: 【黄颡鱼】 【海豚】

- 在转弯初期, 保持尾部不动, 先将头部对准游动方向。

### (2) 结论:

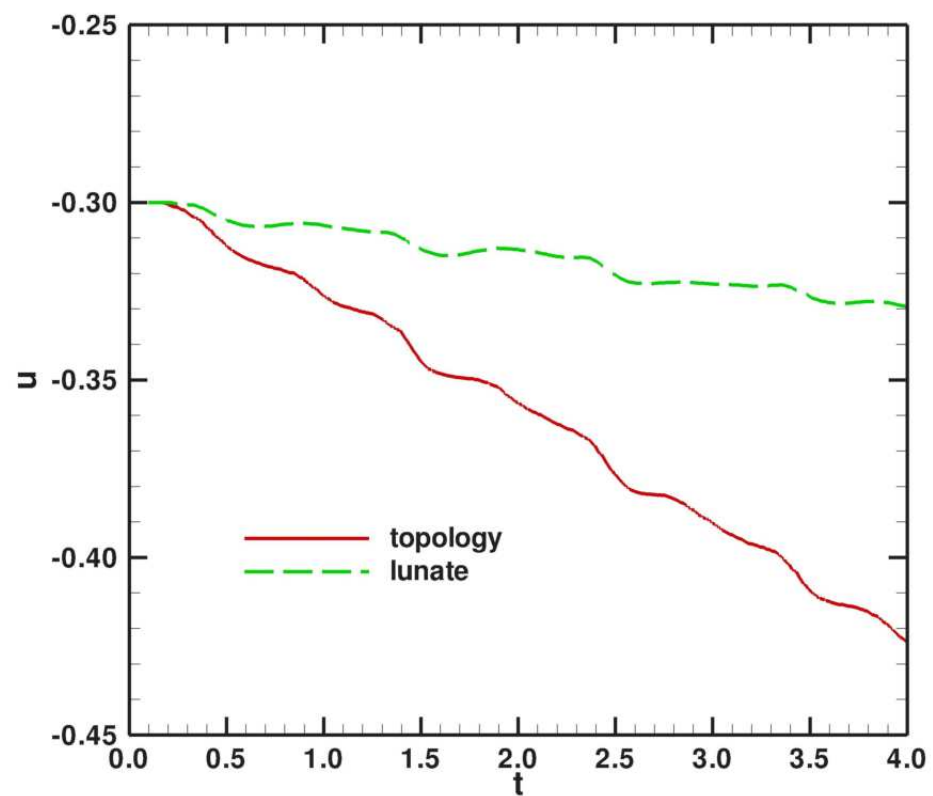
- 鱼的舵在头部!

### • 涡动力学原理:

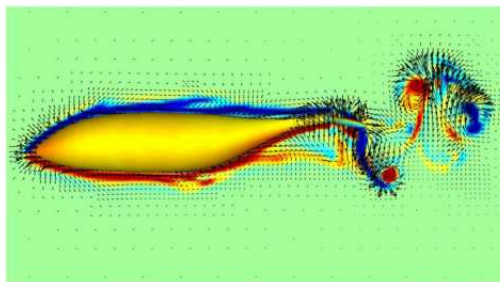
- ★ 方向控制: 产生对转弯有利的涡, 并防止在头部产生有害的流动分离;
- ★ 鱼群的速度控制: 合并同向旋涡有利于鱼游速度的提高;
- ★ 鱼群的节能原理: 在鱼群中处在前面或侧面有好涡的鱼的摆动速度可以降低, 且仍能跟随鱼群一道前进。

## 2. 尾涡的作用

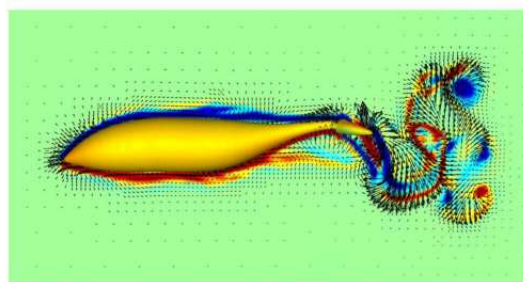
- 有利的一面：【采用拓扑优化尾鳍增大推力。】



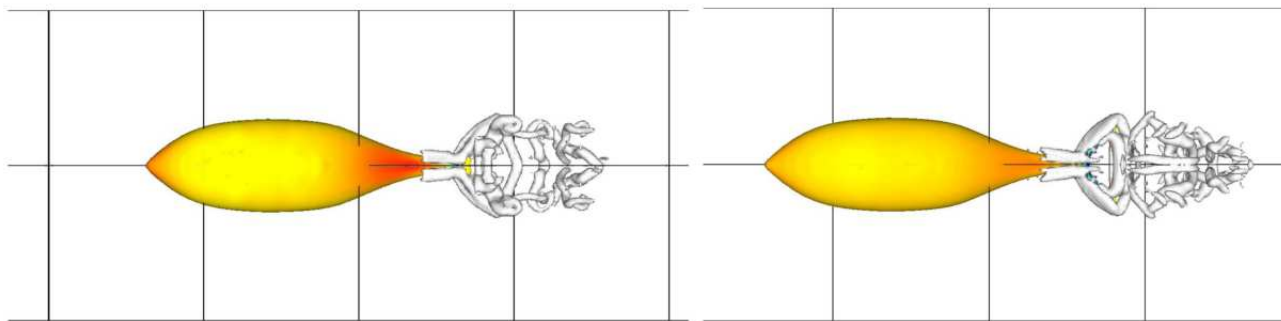
游速: 月牙尾 ~ 拓扑优化尾鳍



月牙尾



拓扑优化尾鳍



月牙尾

拓扑优化尾鳍

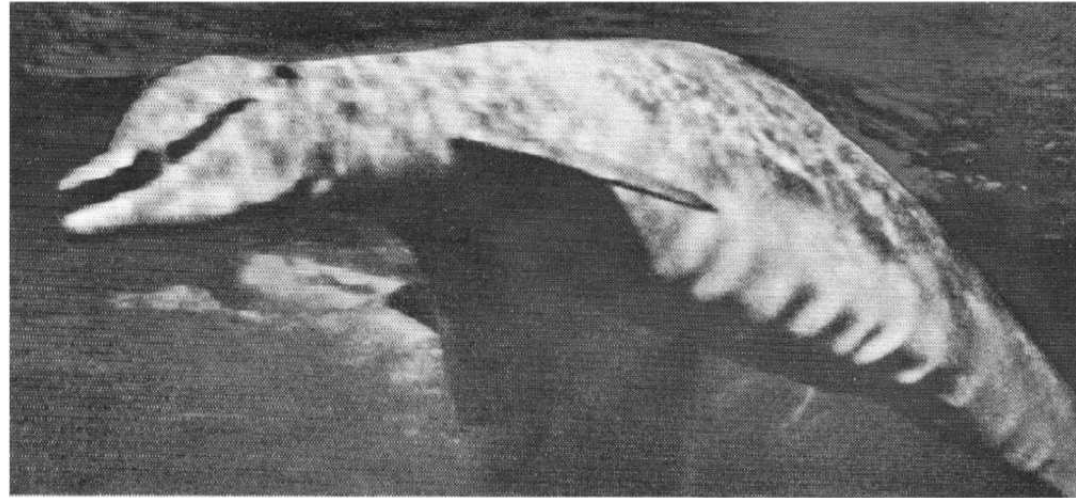
**涡好，鱼游就好，速度特快，转弯特活。**

- 不利的一面：由于【塔科玛大桥】的涡脱落频率与大桥的固有频率共振导致大桥的倒塌。

### 3. 动波浪壁流动控制



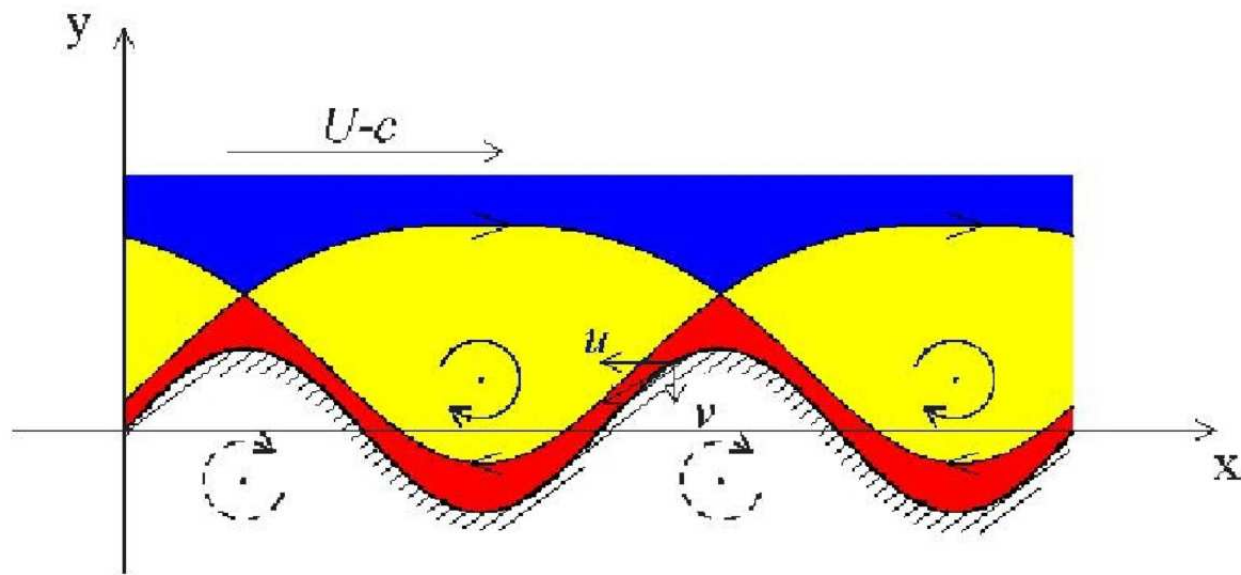
(a) 跃出水面之前



(b) 高速游动时

### 海豚高速游动时体表的波动

- Taneda(1978) 与 Savchenko(1980) 的实验研究: 当动波浪壁的振幅足够大且相速度合适时, 会在其波谷处俘获稳定的涡列。
- 动波浪壁流动控制的物理机理: 用一组可控的离散的小尺度涡 – “流动滚柱轴承” – 取代传统的边界层。



“流动滚柱轴承”示意图

- 理论模型 (Wu, Wu & Wu(1990)): 对二维无限长动波浪壁, 在临界波速 ( $c/U = 0.414$ ) 时, 流动进入自然周期状态, 且其总阻力趋于零。
- 有限长动波浪壁 (Wu, Xie, Wu(2003)): 在【有限长动波浪壁】下游, 部分动边界处边界涡量流的值为负, 成为涡量汇导致旋涡被壁面吸收而不脱落到尾迹中;

- **动波浪壁翼型 (Wu, Xie, Wu(2003)):**  
【NACA0012 翼型绕流】与【动波浪壁翼型绕流】。

*J. Fluid Mech.* (2007), vol. 574, pp. 365–391. © 2007 Cambridge University Press  
doi:10.1017/S0022112006004150 Printed in the United Kingdom

365

## Suppression of the von Kármán vortex street behind a circular cylinder by a travelling wave generated by a flexible surface

CHUI-JIE WU<sup>1,2†</sup>, LIANG WANG<sup>1,2</sup> AND JIE-ZHI WU<sup>3,4</sup>

- 【初始启动的动波浪圆柱流动控制。】  
【延迟启动的动波浪圆柱流动控制。】
- 胡晖教授 (Depart. of Aerospace Engineering, Iowa State University) **通过实验验证了动波浪壁流动控制效应** (Wen-Li CHEN, Yang LIU, Feng XU, Shujin LAMA, Hui LI & Hui HU, Suppression of Vortex Shedding from a Circular Cylinder by Using Traveling Transverse Waves, 2nd International Retreat on Vortex and Vorticity Aerodynamics, Shanghai, CHINA, Aug. 15-17, 2013.)

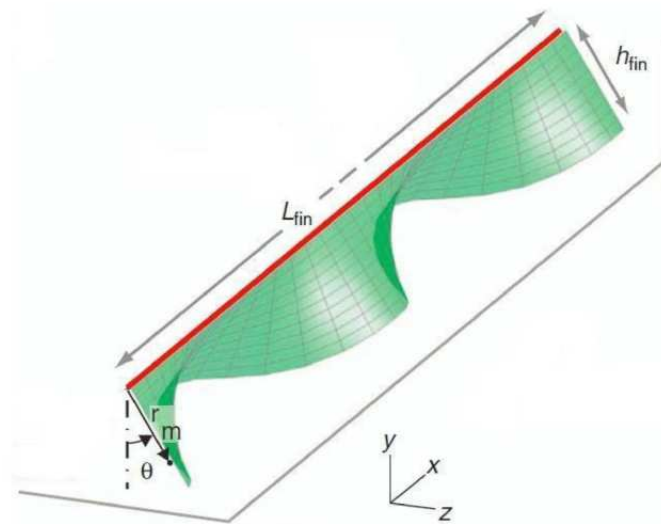


## 4. 消除三维波动鳐鱼的尾涡

## • 波动鳐鱼的游动



(a) 波动鳐鱼



(b) 波动胸鳍的三维行波

- 数值模拟水槽中自主游动的鳐鱼; 鳐鱼身体两侧作正弦波动。

【三角形波动鳐鱼自主游动 -  $\lambda_2 = -0.000394$ 】

【椭圆波动鳐鱼自主游动 -  $\lambda_2 = -0.000394$ 】

- 如何消除发卡涡?

- ▶ 边界涡量流公式 (Wu, Wu & Wu, 1986):

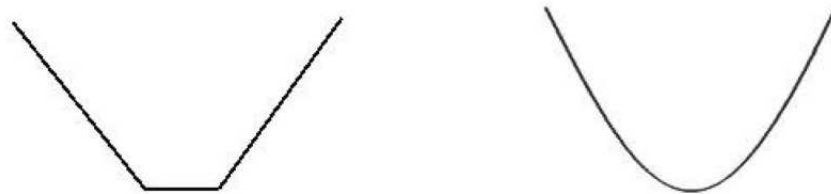
$$\vec{\sigma} = \nu \vec{n} \cdot \nabla \vec{\omega} = \vec{\sigma}_a + \vec{\sigma}_\mu + \vec{\sigma}_\Pi + \vec{\sigma}_\tau$$

$\vec{n}$ 是物面法向。

- ▶ 边界涡量流的三维效应:

$$\vec{\sigma}_\tau = \nu (\vec{n} \times \nabla) \cdot (\vec{\omega} \times \vec{n} \vec{n}) = -(\vec{n} \times \nabla) \cdot (\vec{\tau} \vec{n})$$

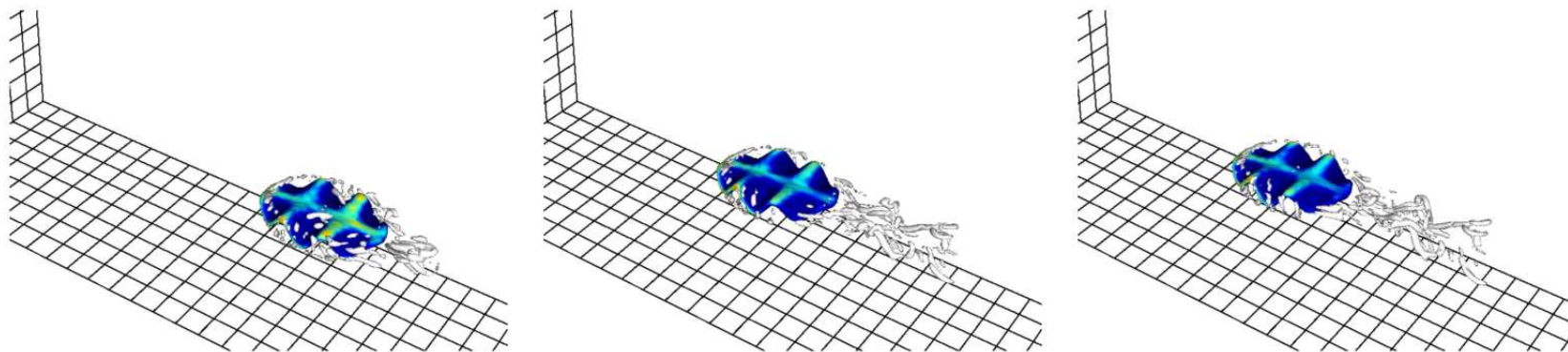
$\vec{\tau} = \nu \vec{\omega} \times \vec{n}$ 是切向剪应力。



展向行波振幅变化规律

- 【展向振幅余弦变化椭圆波动鳐鱼自主游动  $-\lambda_2 = -0.000394$ 】

- 身长 = 0.6, 波长  $\lambda = 0.2$ , 最大倾角  $\theta = 0.25$ , 平均游速 = 0.07,  
 $\nu = 1.0 \times 10^{-5}$ ,  $Re = 4200$ 。

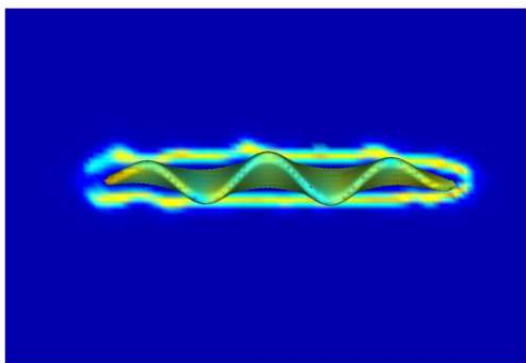


(a)  $t = 5.00$

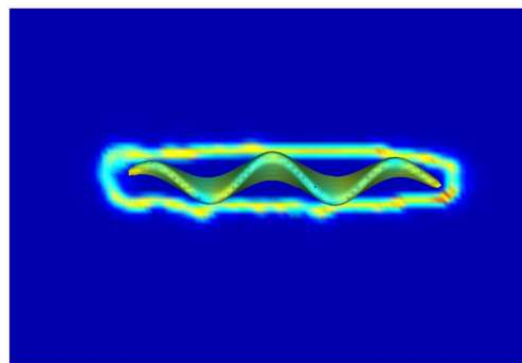
(b)  $t = 8.90$

(c)  $t = 10.00$

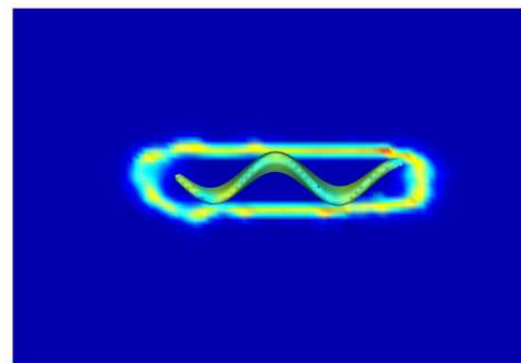
波动鲹鱼的旋涡尾迹,  $\lambda_2 = -0.000394/5.0 = -7.88 \times 10^{-5}$



(a)  $y = 0.05$

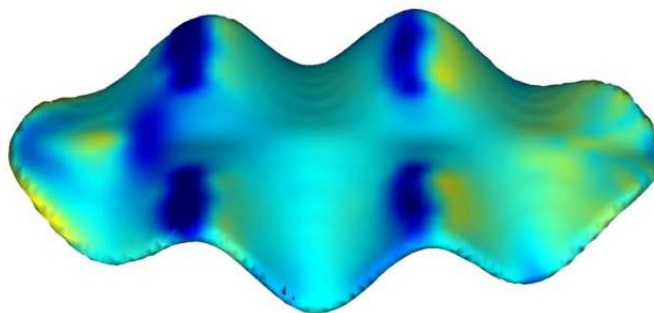


(b)  $y = 0.10$   
 $x - z$  平面上的总涡量



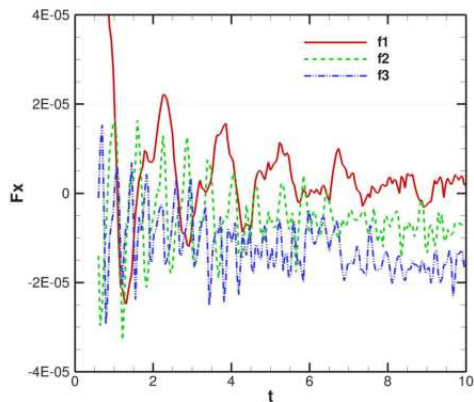
(c)  $y = 0.15$

- 【高涡量鞘环绕鱼体，且随波动鳐鱼运动。】
- 物面压力差产生推力。

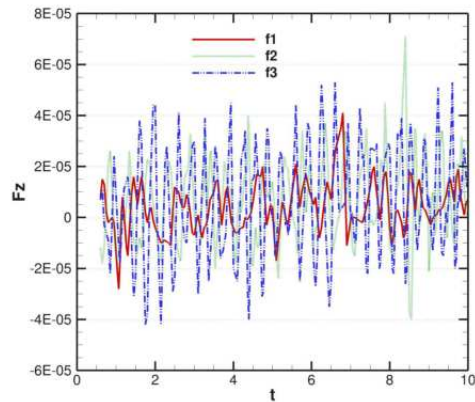


波动鳐鱼体表压力分布

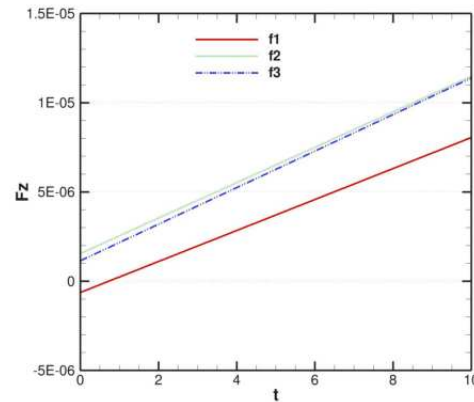
## 受力随波动频率的变化 ( $\lambda = 0.2, f = 1, 2, 3$ )



(a) 推力



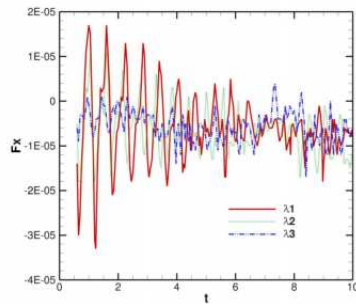
(b) 升力



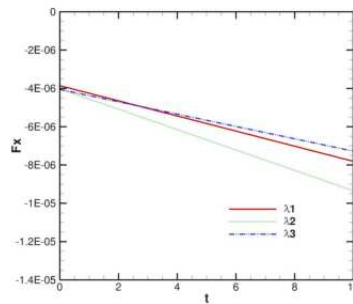
(c) 平均升力

- 图 (a): 推力随频率增加. 在  $f = 1$  时, 阻力大于推力;
- 图 (b): 瞬时升力随效率增加;
- 图 (c): 波动周期平均升力不随效率单调增加。因此, 存在最优升力。

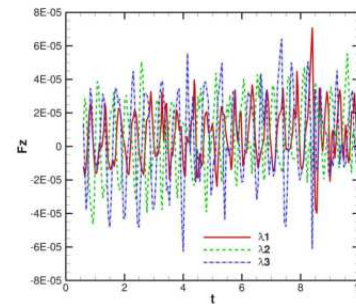
## 受力随波长的变化 ( $f = 2, \lambda = 0.2, 0.3, 0.6$ )



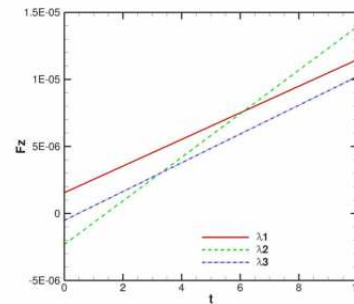
(a) 瞬时推力



(b) 平均推力



(c) 瞬时升力



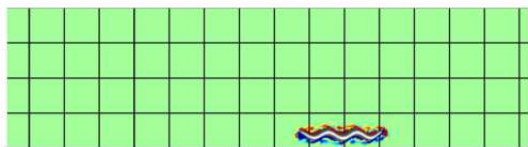
(d) 平均升力

- 图 (a): 推力随波长而变, 但不像其随频率变化那样明显;
- 图 (b): 当  $\lambda = 0.3$  时, 平均推力最大;
- 图 (c) 和 (d): 升力随波长的变化不明显, 当  $\lambda = 0.3$  时, 升力较大。
- **结论: 为了得到最优推力和升力, 必须采用最优参数组合如波动频率、波长和振幅等)。**

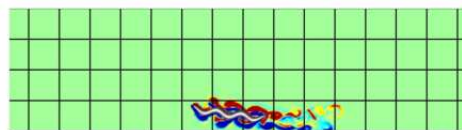
## 5. 阿拉伯飞毯的初步研究



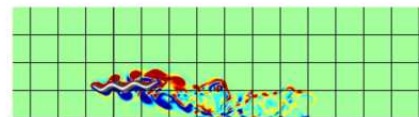
- 存在地面效应时,【阿拉伯飞毯】的升力更大;



(a)  $x-z$  平面,  $t = 0.5$



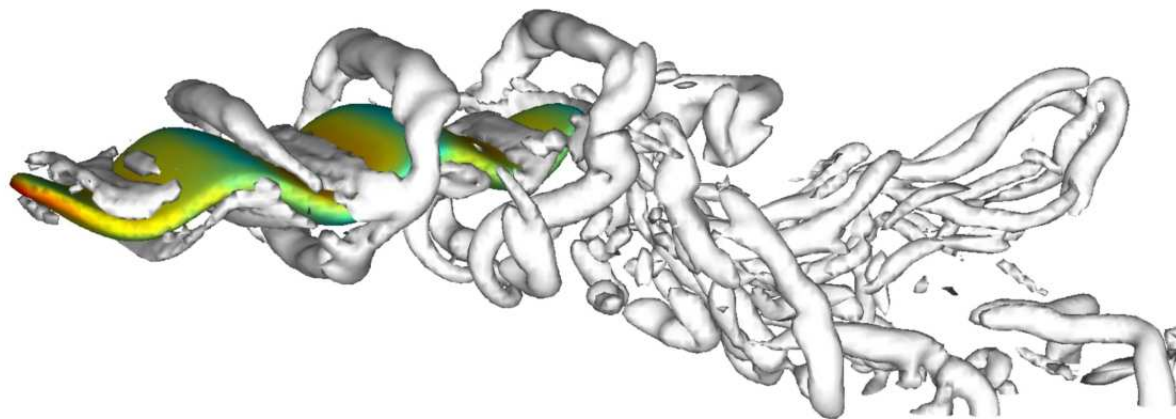
(b)  $x-z$  平面,  $t = 2.5$



(c)  $x-z$  平面,  $t = 4.0$

- $c/u > 1.0$ :

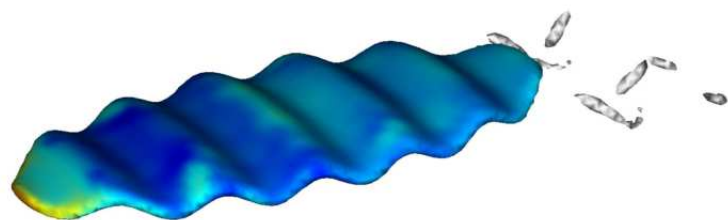
波速与流速比值  $1.0 < c/u < 4$ , 频率  $f = 2$ , 波长  $\lambda = 0.2$ ,  
振幅  $\alpha = 0.02$ 。



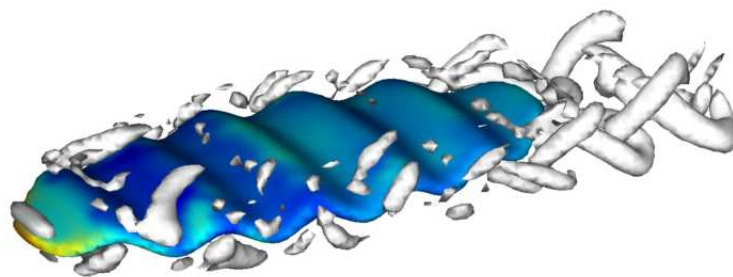
阿拉伯飞毯的三维涡结构 ( $\lambda_2 = -0.001$ )

- $c/u < 1.0$ :

$c/u = 0.2$ , 频率  $f = 0.2$ , 波长  $\lambda = 0.1$ , 振幅  $\alpha = 0.01$  时阿拉伯飞毯自主运动尾涡最小。



(a)  $\lambda_2 = -0.000394$



(b)  $\lambda_2 = -0.00007$

- 波动鳐鱼的运动效率约为 80%，而未消除尾涡的阿拉伯飞毯的效率约为 40%。

## 6. 小结

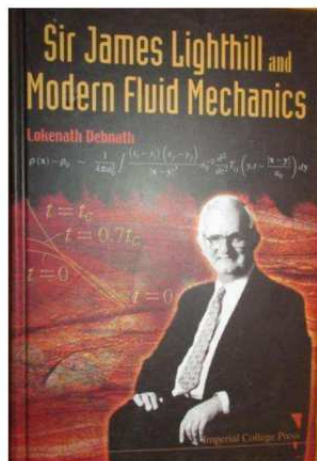
- 尾涡强 → 推力大 → 鱼游快 → 效率低;
- 无尾涡 → 推力小 → 流速低 → 效率高。
- 经过二十四年的探索，动波浪壁流动控制研究得到完美结果 — **完全消除二维和三维尾涡。**
- 消除尾涡机理:



+



- 将流动分为两个部分：【动力学部分 (涡量集中区)】 + 运动学部分 (粘性势流区)。



- Sir James Lighthill 教授的断言：
  - If there is no vortical wake, then there will be no thrust.
  - 不成立!

流体经不起搓，一搓就搓出了涡。

物面经不起动，动对就动没了涡。

## 7. 启示

- **启示一：长期坚持，慢功细活**

研究目的：好玩、与众不同、违背常识、学本事；

长期坚持、不懈追求、才下眉头又上心头、慢工出细活，最终攻克难题。

- **启示二：触类旁通，开拓创新**

通过触类旁通、举一反三，在长期坚持研究一个难题的同时，可以派生出一系列相关的研究方向，最终形成自己独特的研究风格；



1. 非定常最优智能物面流动控制 (NSFC);

- ★ **【不可压流场中的 NACA0012 翼型绕流】**

- 【对固定攻角翼型绕流的非定常最优智能物面流动控制】**

- 【对俯仰振荡翼型绕流的非定常最优智能物面流动控制】**

- ★ **【初始摆动规律与尾涡】**

- 【最优控制摆动规律与尾涡 – 推力增大 57%】**

2. 鱼群自主游动的方向控制、速度控制和节能机理 (NSFC);

- 【无控制的鱼群自主游动】**



【头部方向控制和尾部速度控制的鱼群自主游动】

【鱼群绕同心圆的自主游动】

【三维鱼群串行自主游动 —  $\lambda_2$ 】

3. 【自主运动仿生鱼尾鳍的最优拓扑优化和形状优化研究】;

4. 【波动鳐鱼自主游动】及阿拉伯飞毯研究 (NSFC);

5. 微重力状态下精子群体自主游动及其控制的生化和流体力学研究;

6. 昆虫和【鸟类自主飞行】及其控制机理研究;

=====

7. 激波与超声速降落伞呼吸过程相互作用和降落伞 - 返回仓系统自主运动及其控制的研究 (NSFC);

【Ma=1.8】; 【Ma=1.8 顶视图】;

【返回舱靠近降落伞】; 【返回舱远离降落伞】;

【降落伞 - 返回舱系统的自主运动】。

8. 变体双三角翼飞行器超声速自主运动时激波与多物理过程相互作用及其控制机理研究 (NSFC);

9. 《航天飞行器跨流域空气动力学与飞行控制关键基础问题研究》第四课题“跨流域多物理场复杂流动机理与气动力、热模拟研究”空间站返回解体坠落过程研究 (973 项目): 绳系运动控制 -【长绳系】;【短绳系】;

10. 潜射导弹在受内波、洋流作用的自主运动潜艇发射和出水过程的数值模拟研究【潜艇在内波作用下的运动与动网格】;

11. 航母舰载机在风、浪、流综合作用下的航母平台上的起、降过程自主运动及其控制的研究;

=====

12. 叶片泵叶轮环列叶栅内部流动的水电比拟研究;

13. 气泡动力学、气泡和旋涡与自由表面相互作用的数值模拟研究;

14. 湍流射流及射流混合机理研究;

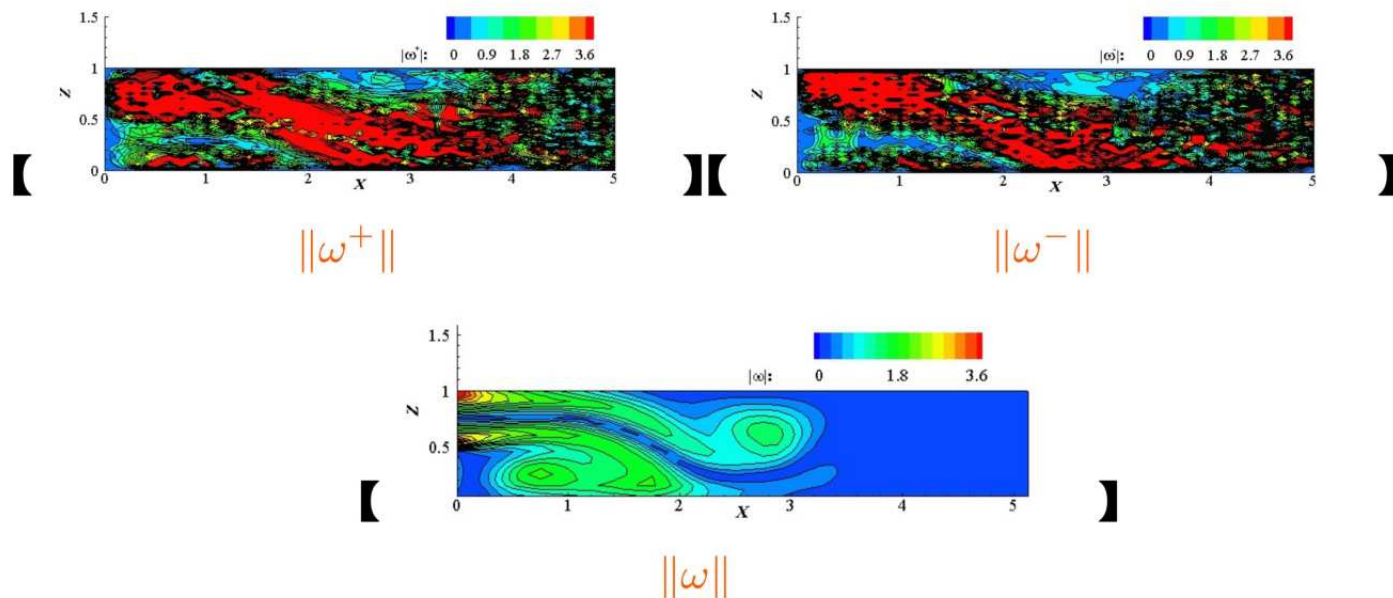
15. 隔板减晃过程中拓扑优化技术的应用研究;

16. 化学反应流中悬浮颗粒流的运动及生长、三维湍流风沙运动及沙漠地貌的数值模拟研究以及【粉尘肺的格子波尔兹曼数值模拟研究】;

17. 化工微滤系统颗粒运动及滤饼形成与清除方法及管内增混研究;

**共同特点: 一个中心 (【动边界】)、两个基本点 (自主运动、控制).**

18. 非线性动力学、分叉、混沌、质点混合和流体力学最优低维动力系统建模与湍流基元研究 (NSFC): 物理本质、空间集聚性、时间缓变性.



19. 可压缩湍流的时空耦合最优低维动力系统建模理论:

(1) LES~ODS: 【速度场 ( $u$ )】，【速度场 ( $v$ )】，【速度场 ( $w$ )】，【密度场】，【温度场】

(2) 时空耦合内禀基: 【速度  $u$ 】，【速度  $v$ 】，【速度  $w$ 】，【密度】，【温度】

20. 大小尺度时空耦合湍流数值模拟方法研究

- 启示三：无论你多么相信你的理论，也别成为它的信徒！无论你多么喜欢你的理论，也别在工程应用中过份强调它的作用！

如：用最优化方法做工程问题时，不能将增强或削弱某种涡作为目标泛函，而应该将工程目标作为目标泛函。

- 启示四：简单即复杂，复杂即简单

进行基础研究时，当你做不动时，可以考虑在你的研究问题或模型中添加一、两个因素。

## 8. 湍流数值模拟建模理论基础再探究

## 传统的湍流数值模拟建模理论基础及其错误

传统的湍流数值模拟建模理论包含湍流模式理论和湍流大涡模拟方法. 其基本思想如下.

$$\text{湍流模式理论: } \begin{cases} \overline{NS} = \text{RANS} \\ NS - \text{RANS} = \text{FLUC} \end{cases}$$

$$\text{湍流大涡模拟方法: } \begin{cases} \overline{NS} = \text{LES} \\ NS - \text{LES} = \text{SGS} \end{cases}$$

$$\text{湍流模式理论耦合求解: } \begin{cases} \text{RANS} = 0; \text{在 RANS 网格下} \\ + \\ \text{FLUC} = 0; \text{在 RANS 网格下} \end{cases} \implies NS = 0; \text{在 RANS 网格下}$$

$$\text{湍流大涡模拟耦合求解: } \begin{cases} \text{LES} = 0; \text{在 LES 网格下} \\ + \\ \text{SGS} = 0; \text{在 LES 网格下} \end{cases} \implies NS = 0; \text{在 LES 网格下}$$

- 由于在 RANS 网格或 LES 网格中的 Navier-Stokes 方程中没有湍流, 因此对在 RANS 网格或 LES 网格下的脉动方程或亚网格方程中的各项进行建模得不到正确的湍流模式.  $\implies$  **建立在 RANS 网格或 LES 网格基础上的湍流数值模拟建模理论基础是错误的.**
- 这就解释了为什么针对脉动方程各项建模的最为复杂的雷诺应力模式的计算效果反而不理想的原因.
- 在实际湍流建模中, 采用湍流实验数据或 DNS 结果对各种湍流模式进行标定以确定湍流模式参数值, 所以在实际使用的**单尺度湍流模式**通过模式参数中包含了脉动量或小尺度湍流的部分作用.
- 由于在各种湍流模式中采用了一些假设, 如各向同性等等, 因此它们在数值模拟复杂湍流时必然会在某些情形下表现不佳甚至失效.

## 正确的湍流数值模拟建模理论基础

- 正确的湍流数值模拟建模理论的基础是**方程 + 网格**.
- 为了算出湍流, 在 NS 方程中必须采用 DNS 网格.
- 在 LES 方程中必须采用进入惯性子区的 LES 网格.

$$\text{湍流模式理论耦合求解: } \left\{ \begin{array}{l} \text{RANS} = 0; \text{ 在 RANS 网格下} \\ + \\ \text{FLUC} = 0; \text{ 在小尺度网格下} \end{array} \right. \implies \text{NS} = 0; \text{ 在 DNS 网格下}$$

$$\text{湍流大涡模拟方法耦合求解: } \left\{ \begin{array}{l} \text{LES} = 0; \text{ 在 LES 网格下} \\ + \\ \text{SGS} = 0; \text{ 在小尺度网格下} \end{array} \right. \implies \text{NS} = 0; \text{ 在 DNS 网格下}$$

- 对脉动方程 (FLUC) 或亚网格方程 (SGS) 建模均须在小尺度网格下进行;
- 通过多尺度方法求得在 RANS 网格或 LES 网格中的**多尺度湍流模型**;
- 大小尺度时空耦合湍流数值模拟方法就是一种多尺度湍流模型方法.



## 大小尺度时空耦合湍流数值模拟方法 (LSC)

- 在 DNS 中对大尺度场和小尺度场采用相同的高精度计算流体力学方法求解, 相当于用同样的大炮打飞机和蚊子;
- 基于时空耦合小尺度最优低维动力系统的大小尺度时空耦合湍流数值模拟方法 (LSC):
  - ★ **基本思想: 根据大小尺度流场特点采用不同的数值方法进行耦合求解;**
  - ★ 大尺度流场是湍流的主体部分, 采用高精度计算流体力学方法 (PDEs, 高精度有限体积法、差分法、谱方法等) 在大尺度网格上求解;
  - ★ 小尺度流场是湍流的次要和必不可少的部分, 采用时空耦合最优低维动力系统方法 (ODEs, ODS) 在小尺度网格上求解;
  - ★ 该算法已于 2000 年和 2009 年用于不可压湍流数值模拟, 见:
    - 吴锤结、关晖、赵红亮, 基于小尺度亚网格模式的大涡模拟方法, 《湍流理论新进展及其应用》, 上海大学出版社, 2000, 77-82.;
    - WU, C-J, GUAN, H, Lattice Boltzmann Dynamics and Dynamical System Sub-Grid Models, Mod. Phys. Lett. B, 2009, 23(3):349-352.

## 1. 可压缩湍流大尺度方程 (LSC):

$$\left\{ \begin{aligned} & (\bar{\rho})_{,t} + (\bar{\rho} \bar{u}_j)_{,j} = -(\bar{\rho}' u'_j)_{,j} \\ & (\bar{\rho} \bar{u}_i)_{,t} + \left[ \bar{\rho} \bar{u}_i \bar{u}_j + \frac{1}{\gamma M^2} \delta_{ij} \bar{\rho} \bar{T} - \frac{\mu}{Re} (\bar{u}_{i,j} + \bar{u}_{j,i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \bar{u}_{h,h}) \right]_{,j} \\ & \quad = -(\bar{\rho}' u'_i)_{,t} + (\bar{\rho} \overline{u'_i u'_j} + \bar{u}_i \overline{\rho' u'_j} + \bar{u}_j \overline{\rho' u'_i} + \overline{\rho' u'_i u'_j} + \frac{1}{\gamma M^2} \delta_{ij} \overline{\rho' T'})_{,j} \\ & \left[ \frac{1}{(\gamma-1)\gamma M^2} \bar{\rho} \bar{T} + \frac{1}{2} \bar{\rho} \bar{u}_h \bar{u}_h \right]_{,t} + \left[ \frac{1}{(\gamma-1)\gamma M^2} \bar{\rho} \bar{T} \bar{u}_j + \frac{1}{2} \bar{\rho} \bar{u}_h \bar{u}_h \bar{u}_j + \frac{1}{\gamma M^2} \bar{\rho} \bar{T} \bar{u}_j \right. \\ & \quad \left. - \frac{\kappa}{Pr Re (\gamma-1) M^2} \bar{T}_{,j} - \frac{\mu}{Re} (\bar{u}_{i,j} \bar{u}_i + \bar{u}_{j,i} \bar{u}_i - \frac{2}{3} \delta_{ij} \bar{u}_{h,h} \bar{u}_i) \right]_{,j} \\ & \quad = -\left\{ \left[ \frac{1}{(\gamma-1)\gamma M^2} \overline{\rho' T'} + \frac{1}{2} (\bar{\rho} \overline{u'_h u'_h} + \bar{u}_h \overline{\rho' u'_h} + \bar{u}_h \overline{\rho' u'_h} + \overline{\rho' u'_h u'_h}) \right]_{,t} \right. \\ & \quad + \left[ \frac{1}{(\gamma-1)\gamma M^2} (\bar{\rho} \overline{T' u'_j} + \bar{T} \overline{\rho' u'_j} + \bar{u}_j \overline{\rho' T'} + \overline{\rho' T' u'_j}) \right. \\ & \quad + \frac{1}{2} (\bar{\rho} \overline{u'_j u'_k} + 2\bar{\rho} \overline{u'_k u'_j} + 2\bar{u}_j \overline{u'_k} \overline{\rho' u'_k} + \bar{u}_k \overline{u'_k} \overline{\rho' u'_j}) \\ & \quad + \bar{\rho} \overline{u'_j u'_k} + \bar{u}_j \overline{\rho' u'_k} + 2\bar{u}_k \overline{\rho' u'_j} + \overline{\rho' u'_j u'_k} \\ & \quad \left. \left. + \frac{1}{\gamma M^2} (\bar{\rho} \overline{T' u'_j} + \bar{T} \overline{\rho' u'_j} + \bar{u}_j \overline{\rho' T'} + \overline{\rho' T' u'_j}) - \frac{\mu}{Re} (2\overline{u'_{j,i} u'_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \overline{u'_{i,j} u'_j}) \right]_{,j} \right\} \end{aligned} \right.$$

## 2. 可压缩湍流小尺度时空耦合最优低维动力系统方程 (SODS):

$$\begin{cases} b_{r,t} = A_r^I \\ a_{k,t} B_{kr}^I + b_{l,t} B_{lr}^{II} = B_r^{III} \\ c_{m,t} C_{mr}^I + b_{l,t} C_{lr}^{II} + a_{k,t} C_{kr}^{III} = C_r^{IV} \end{cases}$$

其中  $A_r^I, B_{kr}^I, B_{lr}^{II}, B_r^{III}, C_{mr}^I, C_{lr}^{II}, C_{kr}^{III}, C_r^{IV}$  为与  $\zeta_r, \xi_{ki}, \zeta_l$  等相关的系数。

$$\text{湍流大小尺度耦合数值模拟方法: } \begin{cases} \overline{NS} = \text{LSC} \\ NS - \text{LSC} = \text{SODS} \end{cases}$$

$$\text{湍流大小尺度耦合数值模拟求解: } \begin{cases} \text{LSC} = 0; \text{在 LSC 网格下} \\ + \\ \text{SODS} = 0; \text{在小尺度网格下} \end{cases} \implies NS = 0; \text{在 DNS 网格下}$$

- LSC 的实质是将 RANS、LES 和 DNS 统一的湍流数值模拟方法.
- 小尺度网格可取为从  $\frac{1}{2}$ LSC 网格到 DNS 网格之间的各种网格.
- 由于没有人为设定各向同性等假设, LSC 可以适应各种复杂湍流;
- 当 LSC 大尺度网格等于 DNS 网格时, 小尺度网格消失, LSC 退化为 DNS;
- LSC 的计算量介于 LES 和 DNS 之间.
- 大小尺度时空耦合湍流数值模拟方法 (LSC) 的理论研究已经完成, 程序研制正在进行中.
- 在大小尺度时空耦合湍流数值模拟过程中必然会遇到湍流封闭性问题.

## 湍流封闭性问题及其数值解法

- 湍流封闭性问题的本质:

- ★ 在求解小尺度动力系统方程时, 必须给出小尺度高阶滤波关联项的方程, 因此产生湍流数值模拟中无法解决的封闭问题.
- ★ 湍流封闭性问题的本质是小尺度量与小尺度高阶滤波关联项的**同时性**.

- 湍流封闭性问题的数值解法:

- ★ 可采用大尺度方程与小尺度动力系统方程交替耦合求解的方法, 采用上一时刻得到的小尺度量求出小尺度高阶滤波关联项, 即小尺度量与小尺度高阶滤波关联项**不具同时性**, 这样即可通过数值方法解决湍流封闭性问题.

- 该数值解法已于 **2000 年**和 **2009 年**用于不可压湍流数值模拟, 见:

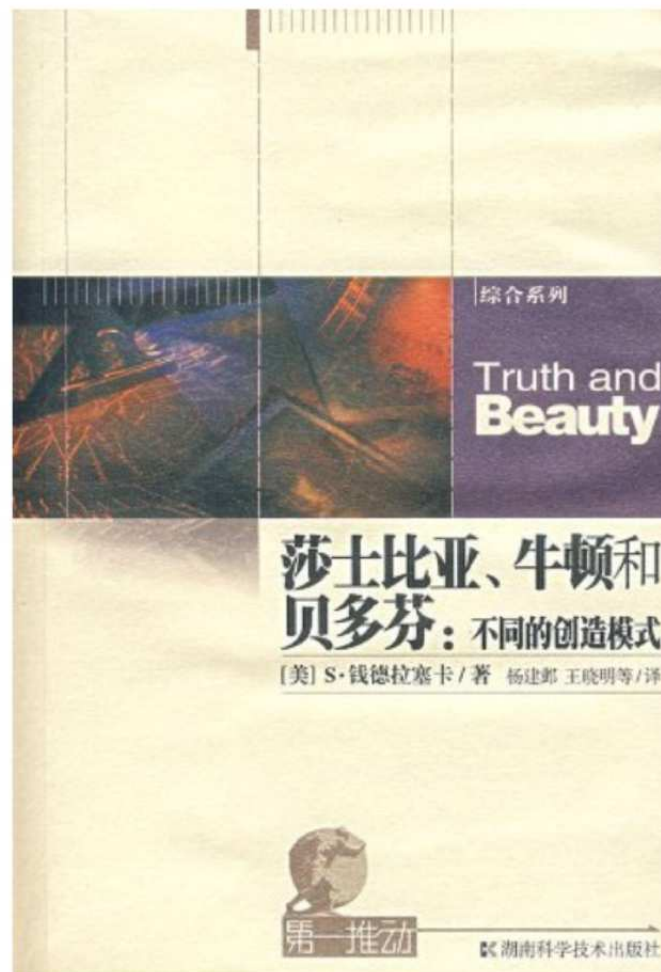
- ★ 吴锤结、关晖、赵红亮, 基于小尺度亚网格模式的大涡模拟方法, 《湍流理论新进展及其应用》, 上海大学出版社, 2000, 77-82.;
- ★ WU, C-J, GUAN, H, Lattice Boltzmann Dynamics and Dynamical System Sub-Grid Models, Mod. Phys. Lett. B, 2009, 23(3):349-352.

## 10. 科学与艺术创新方法的比较研究初探

## • 科学与艺术

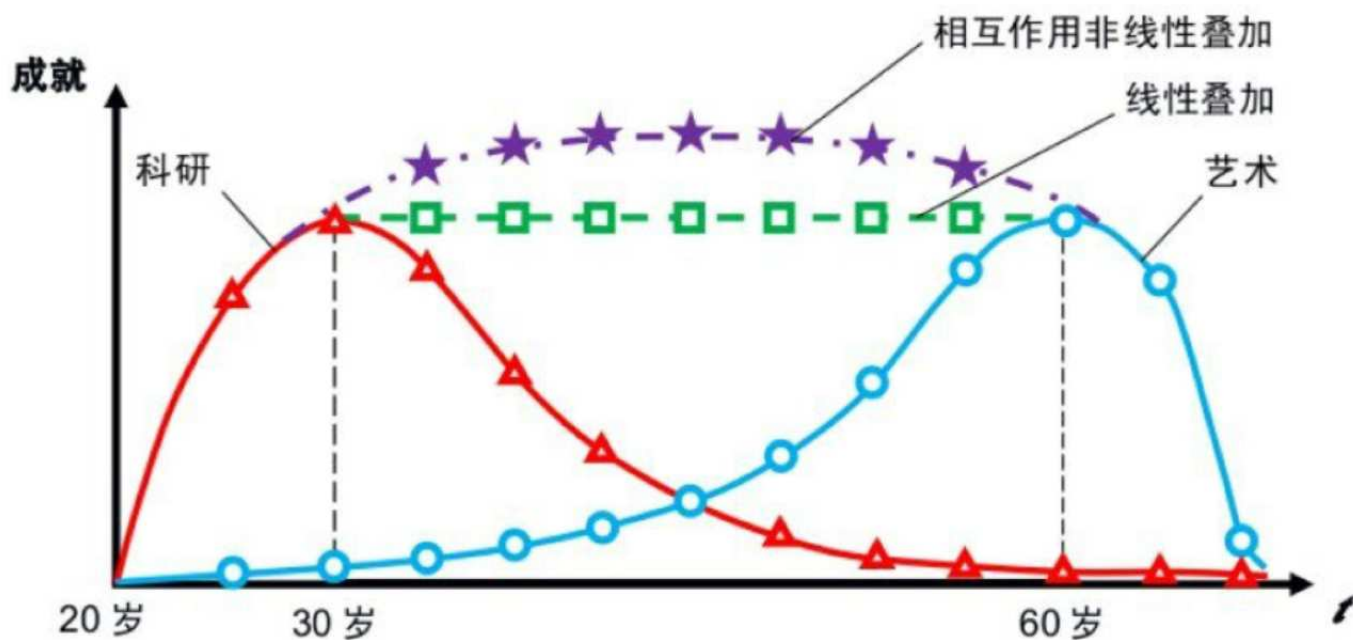


Subrahmanyan Chandrasekhar, 1910.10.19-1995.8.15

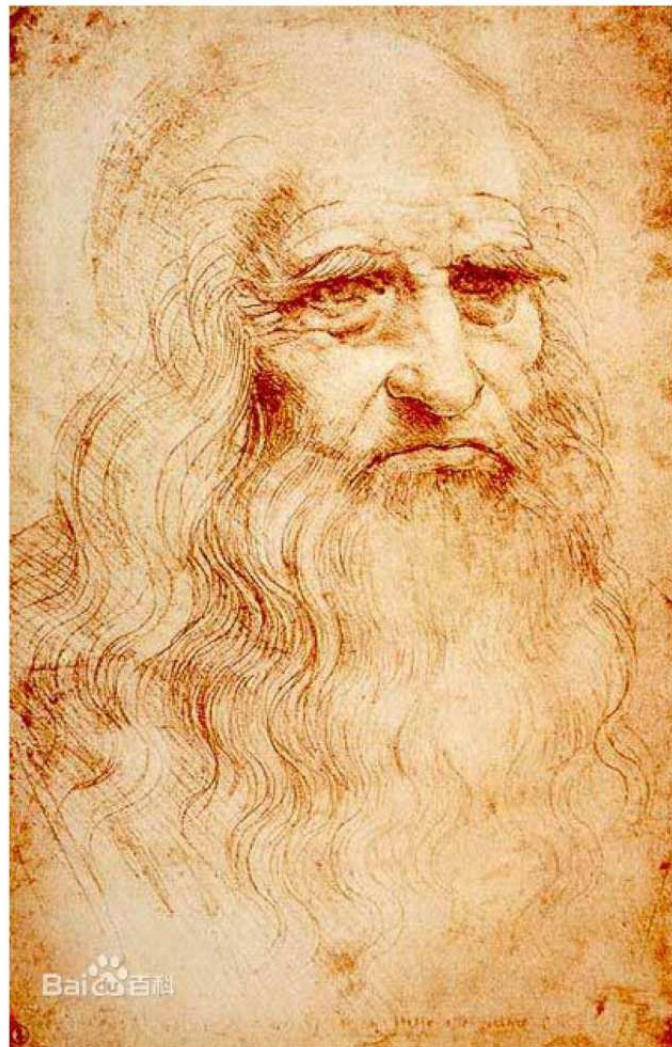


莎士比亚、牛顿和贝多芬：不同的创造模式

## • 科学家与艺术家的创造模式与互动



Leonardo di ser Piero da Vinci(April 15, 1452~May 2, 1519)





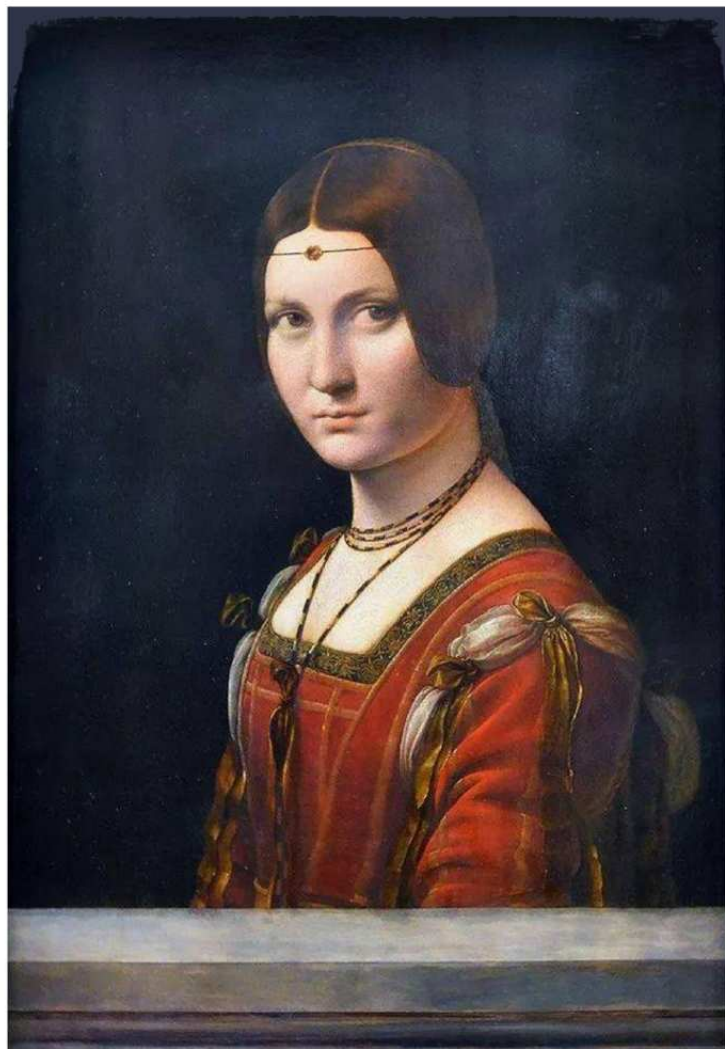
## Ginevera Deben(1474)



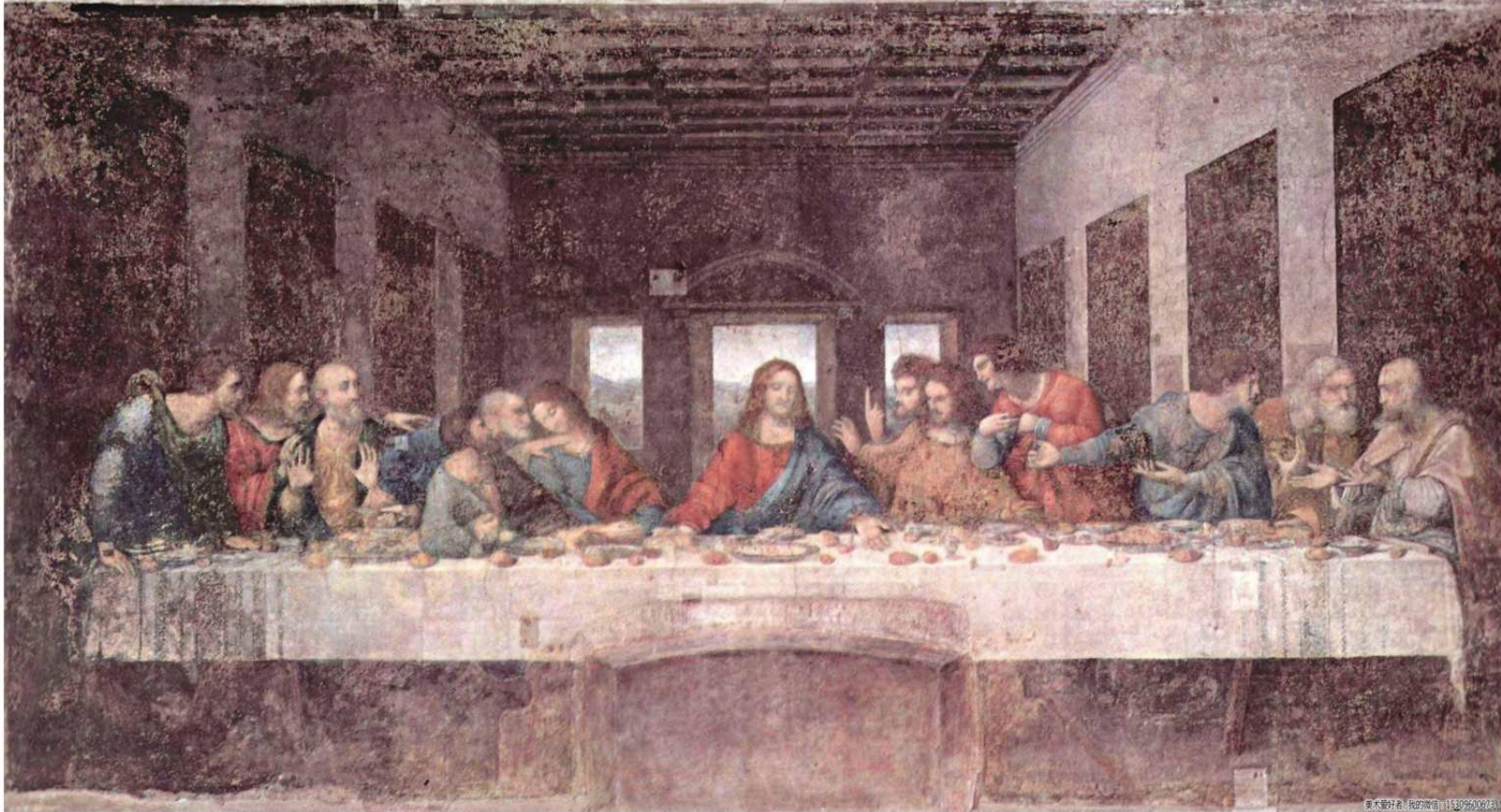
Lady with an Ermine (Zatoriski Museum in Prague, Hungary, 1489~1490)



Rabel Ferronier(1490~1496)



The Last supper(St. Mary's Gratitude Church in Milan, 1494~1498)



## Isabella de Ester(1500)



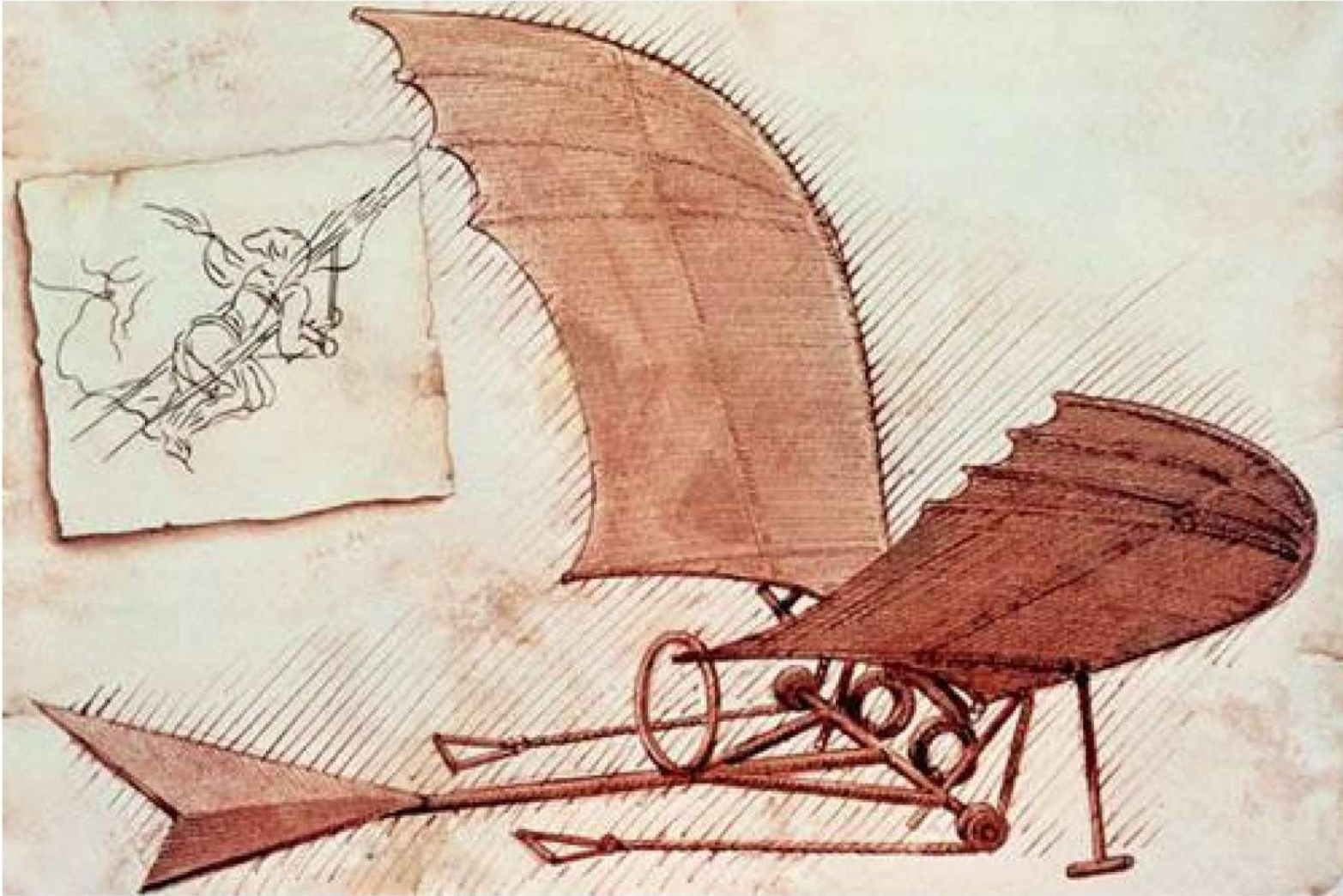
Salvator Mundi(Nov.15,2017,\$0.450312 billion, Private collection, 1500)



Turbulent flow, Leonardo da Vinci, 1502.

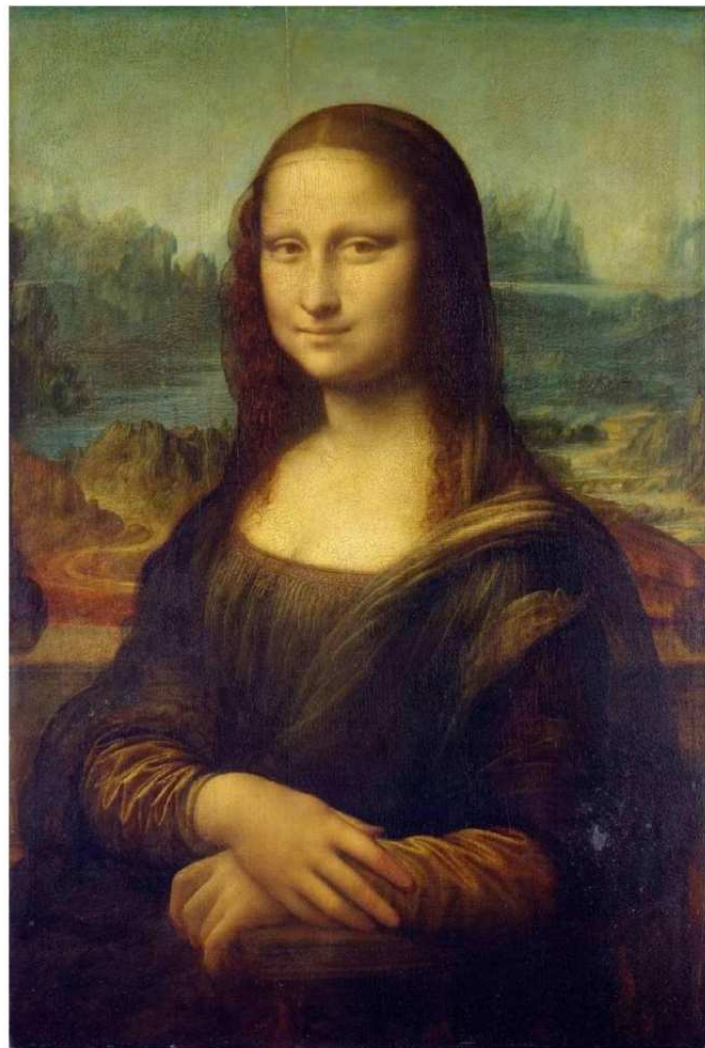


Flying machine, Leonardo da Vinci, 1505.





Mona Lisa(Louvre Museum, France, 1503~1517)







Hitler's watercolor





Churchill's oil painting



# 左脑模式与右脑模式的特征对比

## 左脑（符号）模式

- 词汇性** 用词汇进行命名、描述和定义
- 分析性** 有步骤地解决问题
- 象征性** 用符号象征事物
- 抽象性** 用很少信息代表整体
- 时间性** 有时间概念
- 理性** 根据理由和事实得出结论
- 数字性** 用数字进行计算
- 逻辑性** 根据逻辑得出结论
- 线性** 进行连贯性思维

**理性分析、理解**

## 右脑（图像）模式

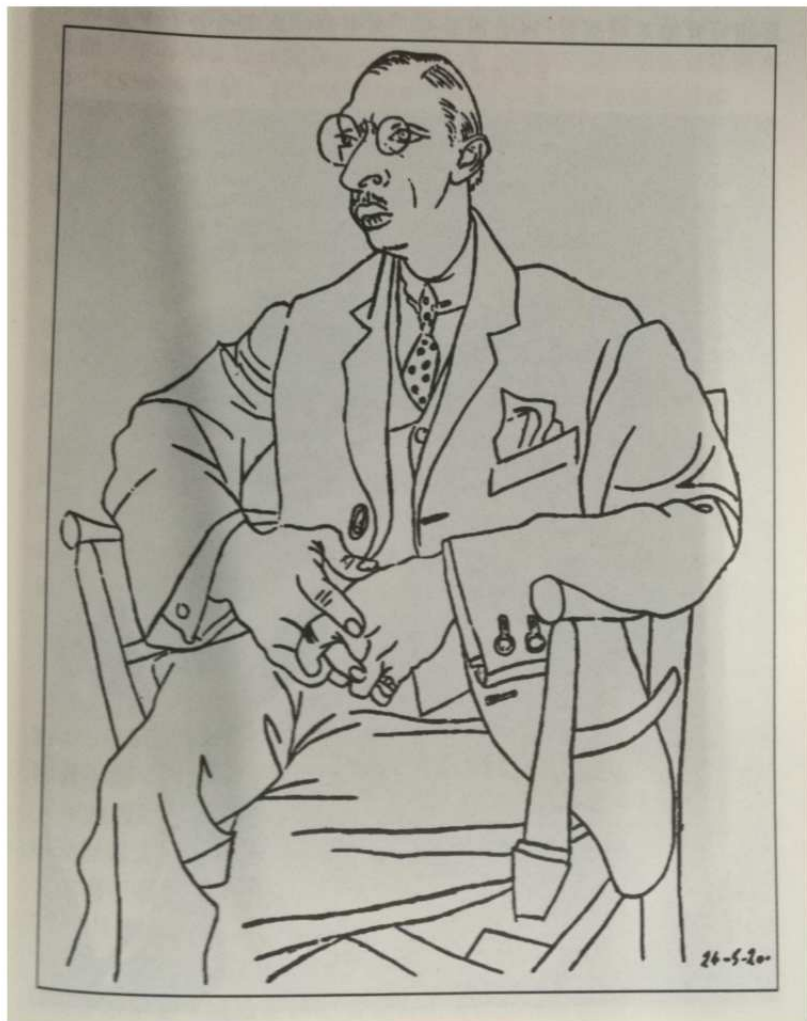
- 非词汇性** 用非词汇性处理感知
- 综合性** 把事物整合为整体
- 真实性** 涉及事物的原样
- 类似性** 看到事物相同之处
- 非时间性** 没时间概念
- 非理性** 无需理由和事实，不判断
- 空间性** 看联系及如何构成整体
- 直觉性** 由直觉洞察真相
- 整体性** 看到整体的规律和结构

**创造、顿悟**

# 流体力学研究 与 流体力学家

- 流体力学: 物理、数学、工程;
- 数学建模与求解, 流动显示与物理建模;
- 大多数流体力学家是**单脑 (左脑) 科学家**;
- 有意识培养右脑模式, 以成为**双脑科学家**。

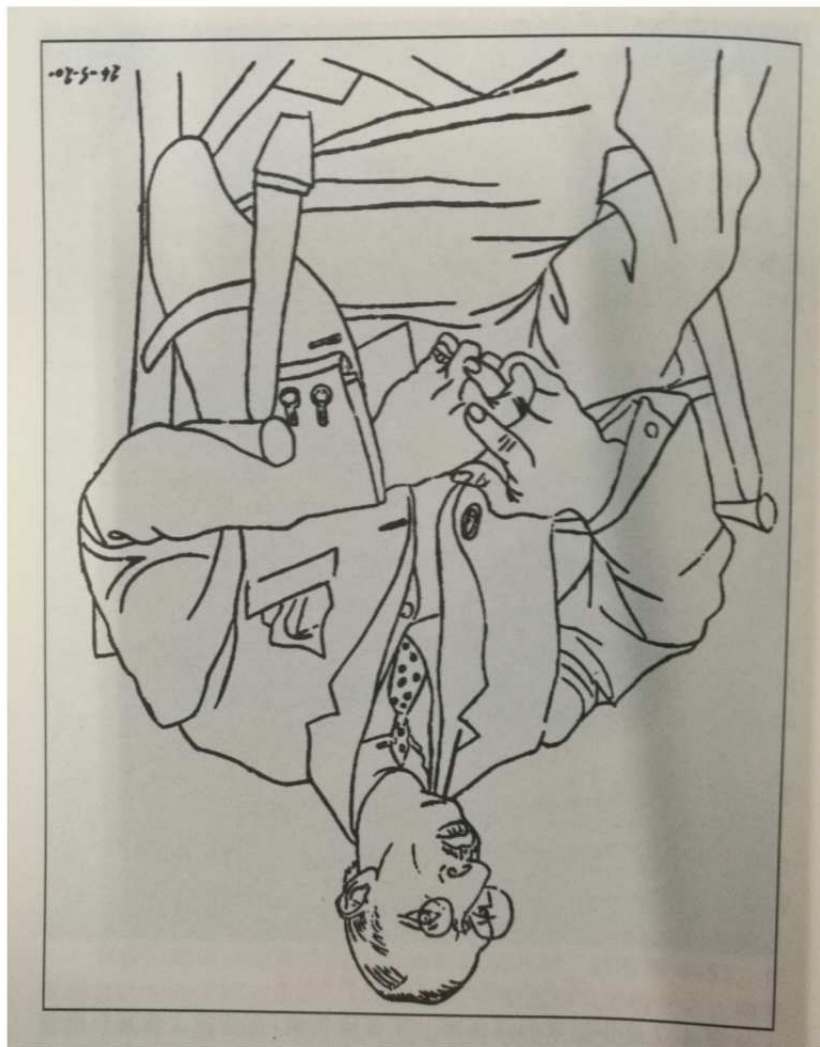
## 开发右脑的方法：通过绘画培养右脑模式



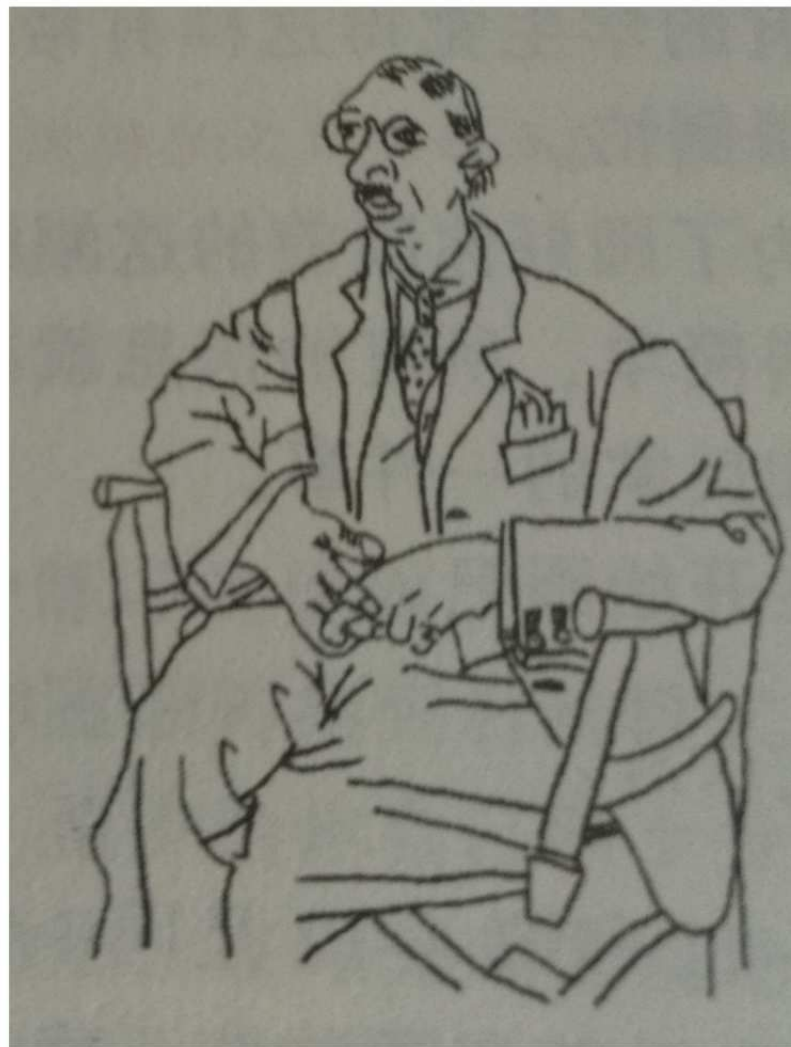
毕加索原作



零基础学员临摹



倒放毕加索原作



零基础学员临摹





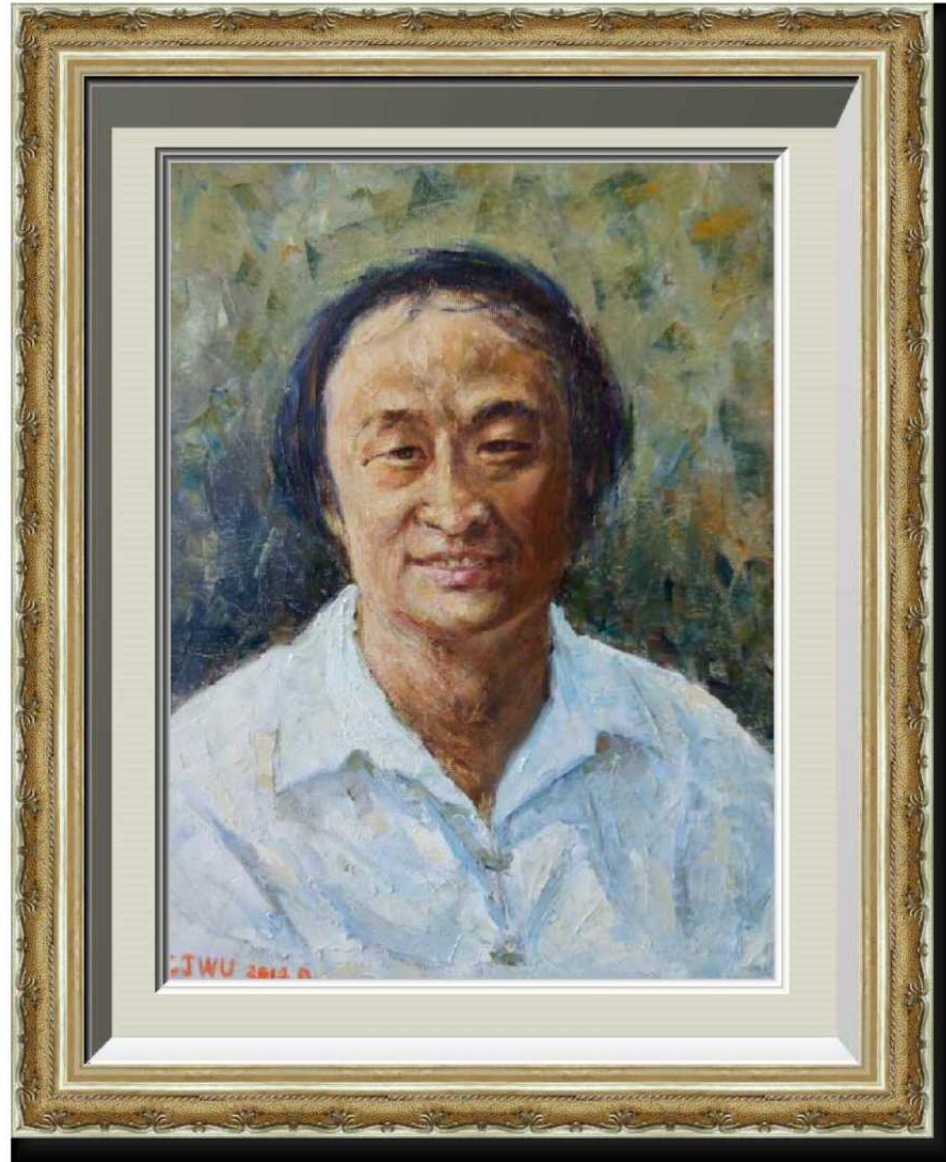












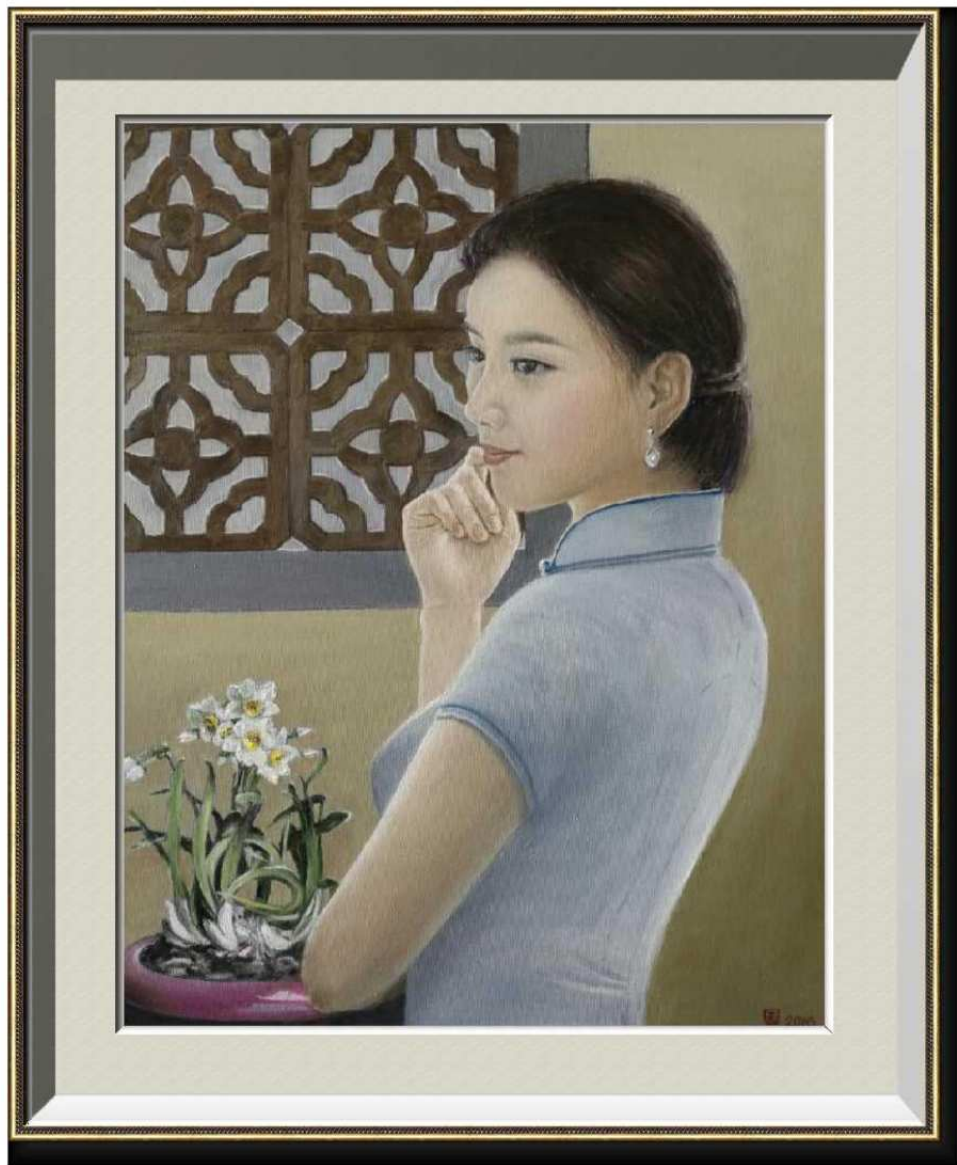




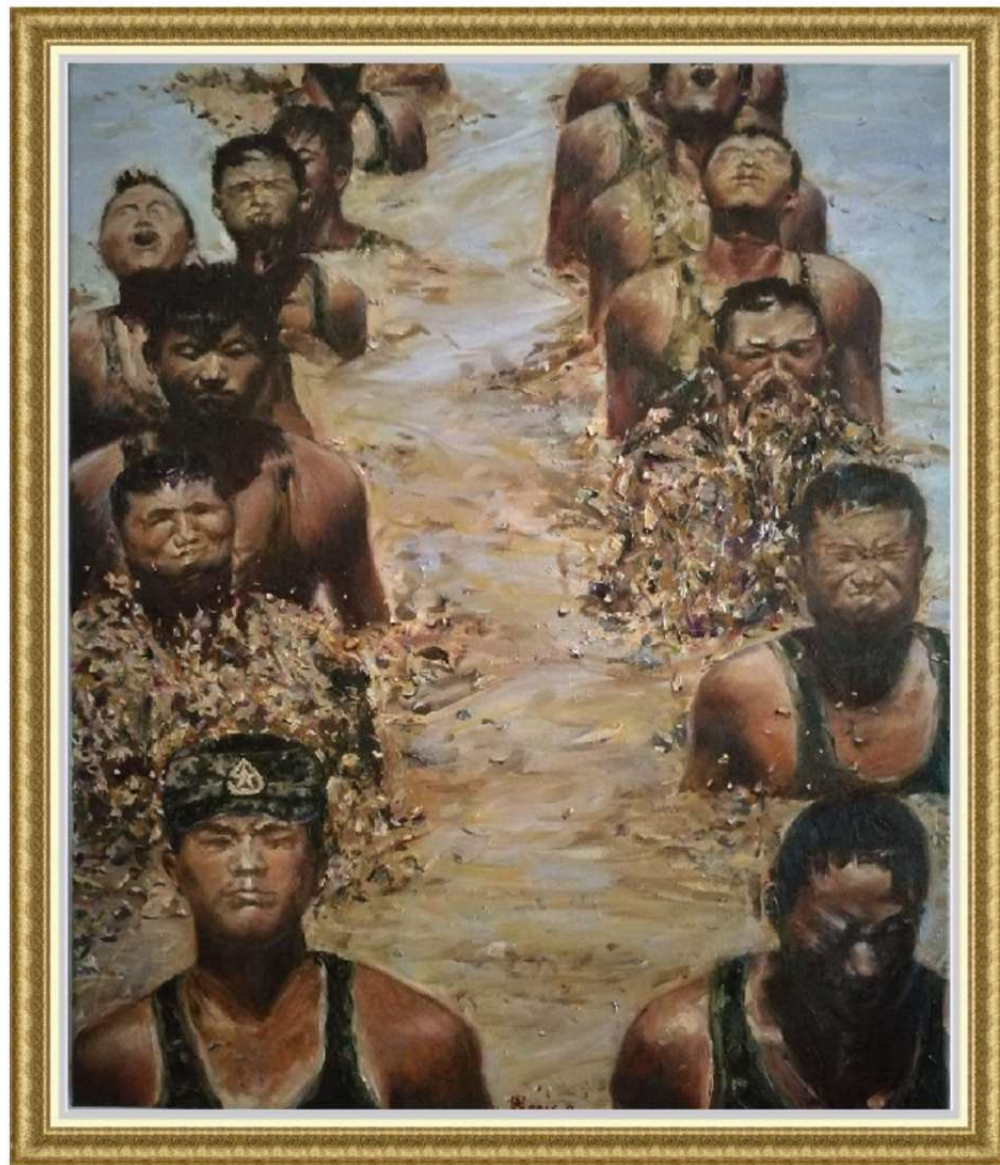




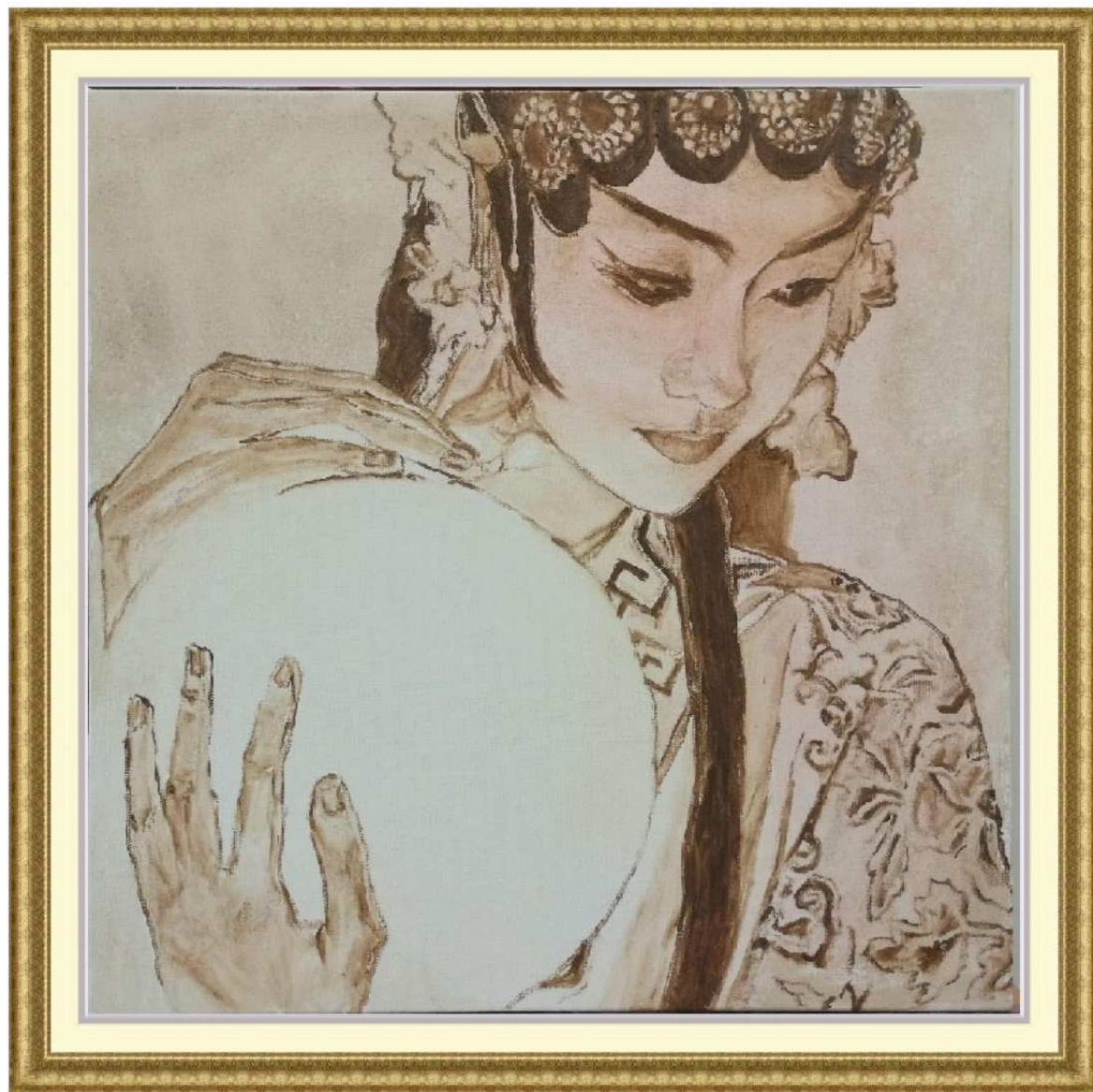


















*Thanks!*

