

参赛队员姓名: 林骋翔、李鑫尧

中学: 福州市第三中学

省份: 福建省

国家/地区: 中国 (大陆)

指导教师姓名: 魏丽真

论文题目: 基于边界层理论的非光滑减阻
表面结构的研究

本参赛团队声明所提交的论文是在指导老师指导下进行的研究工作和取得的研究成果。尽本团队所知,除了文中特别加以标注和致谢中所罗列的内容以外,论文中不包含其他人已经发表或撰写过的研究成果。若有不实之处,本人愿意承担一切相关责任。

参赛队员: 林骋翔、李鑫尧

指导老师: 魏丽真

2017 年 8 月 30 日

论文题目:

基于边界层理论的非光滑减阻表面结构的研究

作者: 林骋翔、李鑫尧

1.Abstract

In order to improve the widely existed conflict between the cost to reduce resistance and the effect of reducing resistance , we have built a reasonable , cheap and efficient surface texture used to reduce resistance , which can be universally used on vehicles . It can save considerable quantity of energy and its mechanism will be discussed in the paper .

We have abstracted out a kind of surface texture from pits . The internal reverse vortex occurs on its own inside this kind of texture , thus acts on the boundary layer, playing a resistance reduction function.

The action principle of the internal reverse vortex is that by increasing the thickness of the boundary layer, friction resistance between the boundary layer and the surface of an object is mostly converted into that between the upper airflow and the boundary layer. So it largely reduces the friction resistance. Besides, it leads the boundary layer to advanced

transition, enhancing anti separation ability and decreasing negative pressure zone.

We are going to verify the existence of the internal reverse vortex in two perspectives . One of them is to design experiment plans and make 3D models using computer technology , and analyze the data using the CFD software . Another way is using water flow and water tunnel device to simulate airflow equivalently . We overcame a series of problems caused by doing real object experiments and reduced systematic errors . Eventually we observed the existence of internal reverse vortex and analyzed the fitting curve about resistance and relevant variable quantificationally .

The following innovative achievements have been obtained through our research. We:

1. Obtained several kinds of rough surface texture to reduce resistance by the sand table in wind tunnel experiment.
2. Established a set of theory to explain the resistance reduce effect on rough surface based on the Boundary Layer Theory----the Reverse Vortex Inside the Pit Theory , and qualitatively built a physical model. Analyzed it from a

perspective of gas parcels and presented the calculation method of relative parameters.

3. Designed a set of device to stimulate airflow equivalently using water tunnel and used dye to describe flow pattern.

Overcame a series of difficulties caused by substantial experiments and reduced systematic errors . The structure of the device is reliable and rational . The device can be used to analyze flow pattern universally and obtain relevant data .

4. Used computer numerical stimulating technology to analyze the cause and application law of the the resistance reduction on non-smooth surface, which is that the main acting area of the surface texture is on the side or top of its maximum cross section . Laid a good foundation for its future use on specific examples.

Key Words

the Boundary Layer Theory, the resistance reduction on non-smooth surface , the golf effect , CFD value stimulate , application of resistance reduction

目 录

1 摘要.....3

2 研究背景.....7

3 问题分析与研究目的7

4 研究思路与表面结构的选取设计8

5 作用机理和理论解释10

6 实验目的与方案设计17

 6.1 风洞沙盘实验19

 6.2 计算机 CFD 软件模拟.....19

 6.2.1 CAD 模型中的简单渲染演示.....20

 6.2.2 CFD（计算流体动力学）及前处理软件模拟22

 6.2.3 计算模型的选择及边界条件的设置 错误!未定义书签。

 6.2.4 数值模拟成果展示与分析25

 6.3 水洞验证实验39

 6.3.1 水洞实验装置的介绍40

 6.3.2 水洞试验成果展示与分析42

7 研究结论.....43

8 致谢.....44

9 参考文献.....45

2. 研究背景

F1方程式赛车耗尽数千万美元只为获得更好的气动效果（如图1）。世界职业公路车厂商们在精密风洞中寻求1%的气动增益（如图2）。在高端应用领域，用人类的智慧克服空气的屏障，不断用更加符合流体力学的外形结构达到更快速度。

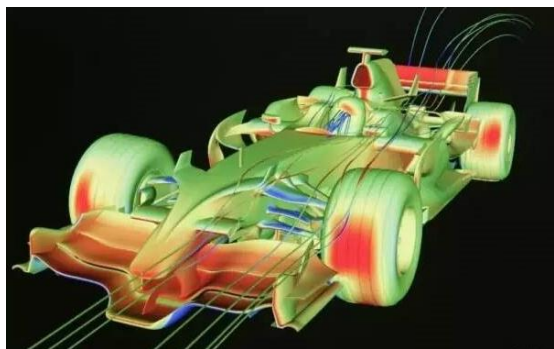


图1 F1方程式赛车利用风洞优化设计



图2 专业自行车利用风洞优化设计

在日常生活当中，空气阻力随处可见，从公路上行驶的汽车，到火车与飞行器。如今，全球汽车保有量已突破十亿大关，即平均七人一辆。如此庞大的数量足以累计出天文级别的数字。可能你很难感受不到空气阻力的存在，但是据美国《The Physics of Fluids (527B0002)》刊物介绍，每年损耗在空气阻力上的能源占到了总能源损耗的近10%。

3. 问题分析与研究目的

目前交通工具常见的减阻方法主要是做成流线型造型。但一方面非常规造型会导致结构应力不均，难以承受较大的外力，需要大量地分析结构力学。并且复杂外形需要极高的制造水平和大量的劳动密集工作。另一方面复杂曲面无法安装许多大尺寸设备，所以非常规造型的空间利用率非常低。因其技术限制与成本过高，只见诸高端制造业，如飞机和高速列车。其实不仅是在汽车，也包括普通列车、轮机叶片、风电机组等均存在上述问题。这便是本文研究的主要问题之一——在中低速条件下（0km/h ~ 300km/h）的可近似看做钝体的各类交通工具及其运行的气体环境条件。最重要的减阻成本与减阻效果之间的主要矛盾。

为了改善减阻成本与减阻效果之间广泛存在的矛盾。本文旨在构建出一种合理的、廉价有效的、普适性应用于交通工具的减阻表面结构，可以节约相当可观的能源，并解释其减阻机理。

4. 研究思路与表面结构的选取设计

本研究的主要灵感来自于高尔夫球、沙漠、和生物表面的微观不光滑表面。最早的高尔夫球是光滑的球体，后来人们发现不光滑的高尔夫球能够飞的更远。在同样的击打条件下，光滑的高尔夫球只能飞行约65米，而布满坑洞的高尔夫球却能飞行275米之远！众所周知，许多运动员凭借鲨鱼皮泳衣不断打破世界纪录。正是泳衣表面的不光滑仿生结构，能够减小阻力。这些例子都强有力地证明了不光滑表面具有一定减阻能力的事实。此外，在对沙漠表面的观察中，我们发现沙漠地区昼夜温差较大，使得气压变化幅度与风速极大。但这种长期大风力的环境下，沙漠表面在宏观上显著地表现出不光滑的特征。通过对沙漠表面的测绘与研究，发现沙丘的形状表现出惊人的统一性，以新月形沙丘为主。

在此后的风洞沙盘模拟实验中，我们正是利用了这样的一个原理。即细沙堆积出的表面结构，由于细小颗粒之间的摩擦力很小。气流作用下极易造成原有形态的改变。能够稳定存在的表面结构，必定存在较平均的表面压力和较低的粘滞阻力。

因此，本文的研究思路是对现有以及实验中出现的稳定存在的表面形态进行收集，和建立计算机三维模型，在通过水洞实验和计算机CFD软件模拟的方式分析减阻率和周围气流的规律与特征，最终筛选出符合研究目的的非光滑减阻表面结构。

我国最新的歼20战机上采用了一种“智能蒙皮”的技术，能够根据环境，自适应地改变蒙皮表面形态。中国船舶科学研究中心的柔性表面减阻实验中最大达到了约15%的减阻率。这些例子都说明了不稳定表面在表现出稳定的具体表面结构时，具有一定的减阻特性。

关于风洞沙盘实验的具体实验原理在之后的篇幅中会有详细的说明。具体的流程图（图3）如下。

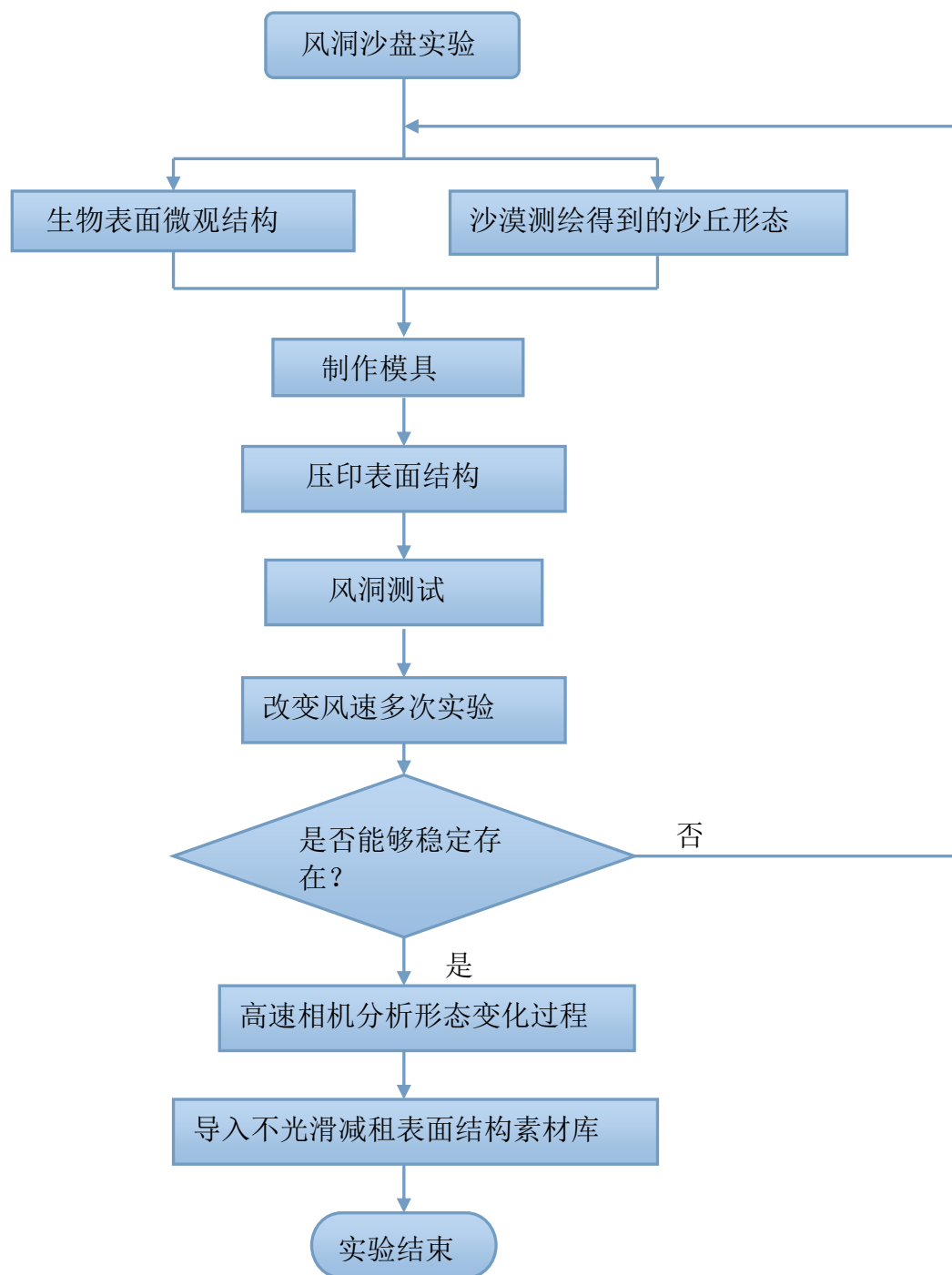


图 3 风洞沙盘实验流程图

5. 作用机理和理论解释

空气对于所有在空气场中运动的物体, 都会施加作用力。因为根据分子动理论, 气体分子在做无规则的热运动, 故微粒从浓度较大的区域向较小的区域迁移, 最终充斥整个空间。

根据空气阻力:

$$F = \frac{1}{2} C \rho S V^2$$

(式中: C 为空气阻力系数; ρ 为空气密度; S 物体迎风面积;

V 为物体与空气的相对运动速度。)

可知, 正常情况下空气阻力的大小与空气阻力系数及迎风面积成正比, 与速度平方成正比。雷诺数是流体惯性力与黏性力比值的量度:

$$Re = \frac{\rho \cdot V \cdot d}{\mu}$$

对于大气来说, 粘性系数为定值, 那么影响雷诺数的因素就是速度、特征长度以及气流密度。根据边界层理论, 雷诺数低, 边界层分离表现为较为稳定的层流分离, 高则是存在气流扰动的湍流分离。所以在相对物体尾部流动的过程中, 特征长度的增大占主导地位, 就渐渐地从层流转换成湍流。湍流流动是一种大雷诺数、非线性、三维非定常流动。它具有随机性、扩散性、耗散性、有旋性、间歇现象, 运动极其不规则。湍流的随机性, 决定了统计方法是湍流运动的基本方法。流场中某一点流速 u 是随时间变化的函数。但是湍流运动的这种非定常性并不等同于一般概念的非定常流动。它可能是非定常的湍流, 也可能是因为湍流的随机性所表现出的非定常性。湍流中的各物理量: 流速、压强等都是随机函数, 具有随机函数的特点: 此量的个别测量数值具有不确定性, 但大量实际测量结果的算术平均值具有确定性。

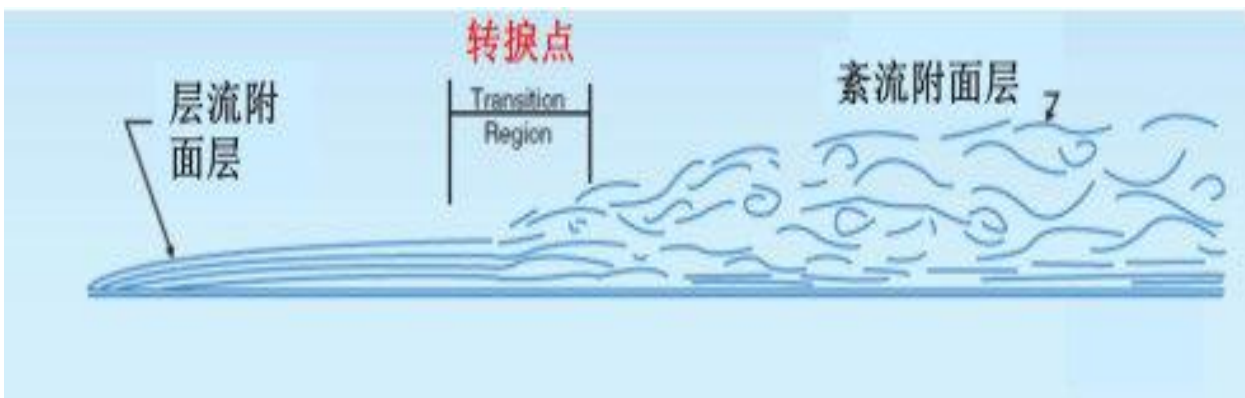


图4 边界层示意图 (紊流即湍流)

图4中的附面层即边界层。而气流流经物体一定距离后，雷诺数增大，表面的层流就会发生转捩，形成紊流。

球杆和高尔夫球接触时间只有1/2000秒，击球后只受重力和空气阻力。对于钝体，在飞行中受到的主要是压差阻力。根据流动分离理论，飞行过程中边界层会在球体尾部分离，球体的背风面形成了低压区。而高尔夫球前方，也就是它的迎风面的气压高于后方。一前一后此时就形成了阻碍物体前进的气压差。而只要减小了低压区体积（如图5），就能把这个球体的压差阻力减小。因此我们猜想，是由于这种表面结构延迟了边界层的分离，减小了负压区，造成了压差阻力的减小。

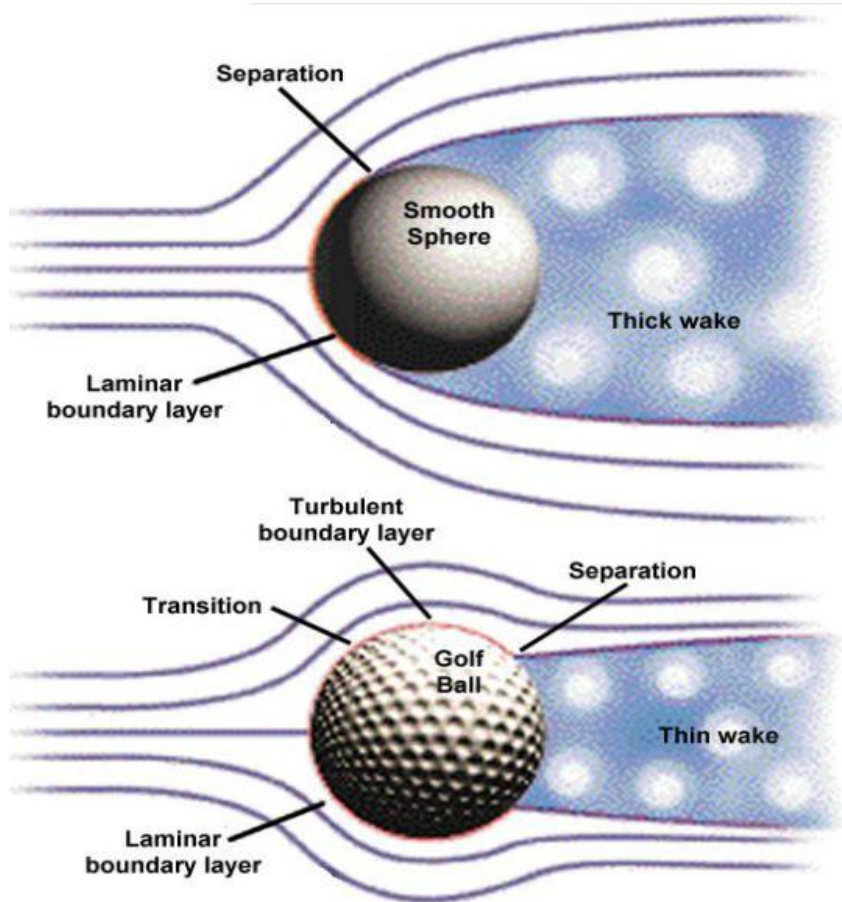


图5 高尔夫球和光滑球的流线谱图

就流体力学而言，这些圆坑突然增加的空间会引起边界层气压的短暂且间歇变化（高尔夫球圆坑在单方向上是间隔排列的，故是间歇变化），在此过程中我有着这样的观点，既然气压可以看做气体分子与表面概率性碰撞，那么气体的压缩和膨胀也可以看做气体分子之间的碰撞。这些圆坑使得流经的气体按照一

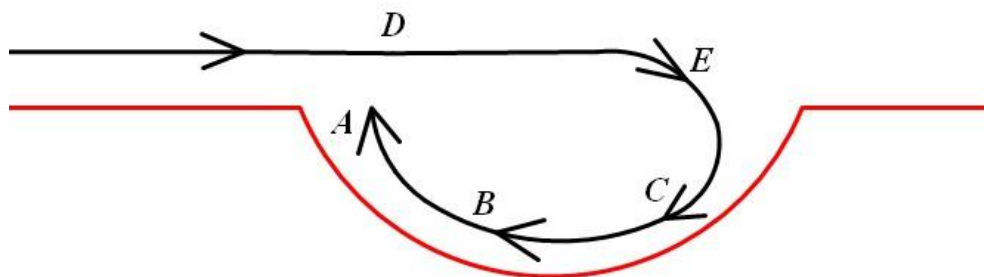


图6 内部逆向涡流的示意图

定的流动轨迹运动，增加不同高度气流之间的粒子碰撞，这种粒子之间的碰撞宏观表现为气流波浪状振动，根据圆坑内部气流的特征，把这种固定流动轨迹命名为内部逆向涡流。最贴近壁面的气流在流经凹坑上方时进入凹坑内部形成与上层气流方向相反的涡流；从动力学角度来说，这种涡流产生且循环往复的原因有两个：一是微观角度气体微团的扩散作用，必然要充斥在突然出现的凹坑空间中。二是宏观来说把气体看作无粘度系数的流体，那么根据伯努利原理即流体的机械能守恒方程，在低速（马赫数在0~0.5）条件下气体在上表面的压缩程度较小，在本研究中表面结构单元尺度下，可忽略高度的影响，则有

$$p_1 + \frac{\rho \cdot v_1^2}{2} = p_2 + \frac{\rho \cdot v_2^2}{2}$$

得出推论：由于凹坑内部B\C的流速较慢，（由于要改变气流方向，在与凹坑内壁的撞击中损失了动量）表层流速快。从E处，气流被气压差所主导流入凹坑。A处涡流的溢出再次减小了凹坑内气压，最终涡流并入表面边界层。这样就产生了连续循环的内部涡流。

当涡流前进到凹坑前壁时，大部分分子具有的宏观表现为气流速度的分子速度使得前壁面受到的撞击概率大，气压也就高。这是计算机数值模拟结果判断理论正确的重要标志。同时在前壁的阻挡下涡流上升，托高了上层的气流，不但会扰乱层流，迅速增大层流雷诺数，进而转捩成湍流、增大边界层的高度、还会造成涡流区域湍流动能减小。湍流具有更强的抗流动分离能力，这是由于湍流大雷诺数背后的高动量和旺盛的分子能量交换（宏观表现为更少热传导损失）。这种逆分离能力就使得边界层沿着物体表面延伸得更远，从而减小了负压区。

此外，其还有减小摩擦阻力的作用，由摩擦系数

$$C_f = k (Re_x)^{-1/5} = k \left(\frac{\rho \cdot v \cdot d}{\mu} \right)^{-1/5}$$

（式中k为经验常数）可知凹坑相当于增加了相对长度d，故减小了摩擦系数。由以上解释理论，同时我们可以推导出一些特征：凹坑前部由于气流被托高会有沿图案轮廓的低压带，而凹坑前壁也会产生类似形状由于涡流撞击产生的高压带；表面瞬间气流会表现为波浪状形态。如果在计算机数值模拟中能够观察到类似现象，就可以有限地证明以上解释理论。

简而言之，这种表面结构的作用有：扰乱边界层，提前转换、增大边界层的高度（厚度）、减小区域湍流动能、延缓湍流耗散、减小竖直截面负压区面积。减小摩擦系数。

需要指出的是这种表面结构的减阻效果和面积大小并没有直接的关系，并非面积越大、减阻效果越好，也与表面粗糙度无关系。深度和表面轮廓半径的细微变化都可能会产生极大地改变内部涡流的速率和方向。这种效应并非随意的凹坑都可以产生。必须要规则排列并且按一定的比例大小制作。

我们把流体细分成一个个由大量分子（原子）组成的微团，通过微团的运动来解构整个流场的运动。流体微团基本运动形式有平移运动、旋转运动、线变形和角变形运动等。实际运动可能遇到情况都是由其中的某一种或某几种形式所组成。即使当流体微团无限小而变成质点时，其运动也是由平动、线变形、角变形及旋转四种基本形式所组成。

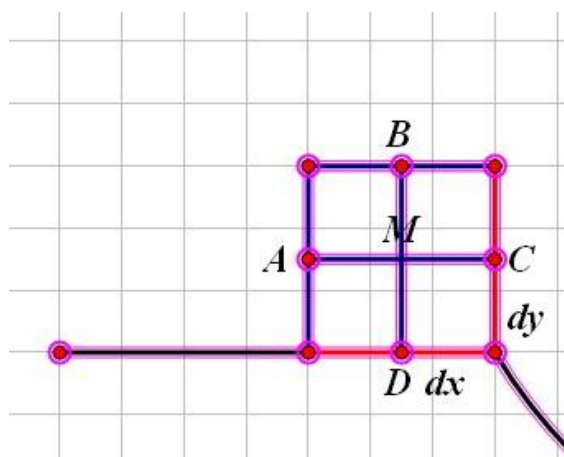


图 7 气体微团在表面结构边缘示意图

某时刻t在二维流场中所取的一个正方形流体微团（如图7），微团中微粒均匀分布。各分子（原子）的运动速度不一致，经过 Δt 后，该流体微团的形状和大小会发生变化，变成了不规则四边形。这样就产生了气体的体积变化和流动。

如图7微团的运动形式，我们对微团各位点各方向上的速度进行分析设中心M

的速度分量为 u_x 和 u_y ，则对 midpoint A来说，x方向上的速度分量 $u_{xA} = u_x - \frac{\partial u_x}{\partial x} \cdot \frac{dx}{2}$ ，

y方向上速度分量 $u_{yA} = u_y - \frac{\partial u_y}{\partial x} \cdot \frac{dx}{2}$ 。对于 midpoint B来说 x方向上的速度分量是

$u_{xB} = u_x + \frac{\partial u_x}{\partial y} \cdot \frac{dy}{2}$ ，y方向上速度分量是 $u_{yB} = u_y + \frac{\partial u_y}{\partial y} \cdot \frac{dy}{2}$ 。对于 midpoint C来说x

方向上的速度分量是 $u_{xC} = u_x + \frac{\partial u_x}{\partial x} \cdot \frac{dx}{2}$ ，y方向上速度分量是

$u_{yC} = u_y + \frac{\partial u_y}{\partial x} \cdot \frac{dx}{2}$ 。对于 midpoint D来说x方向上的速度分量 $u_{xD} = u_x - \frac{\partial u_x}{\partial y} \cdot \frac{dy}{2}$ ，y2

方向上速度分量是 $u_{yD} = u_y - \frac{\partial u_y}{\partial y} \cdot \frac{dy}{2}$ 。微团左、右两侧的A点和C点沿y方向的速度

差为 $\frac{\partial u_y}{\partial y} \cdot dy$ 。在微团进入凹坑前半段下降过程AC速度差为正值，微团沿y方向

发生伸长变形，整个微团在y方向上的线变形速度为 $\frac{\partial u_y}{\partial y}$ 。

微团在xyz方向上的旋转角速度分别为

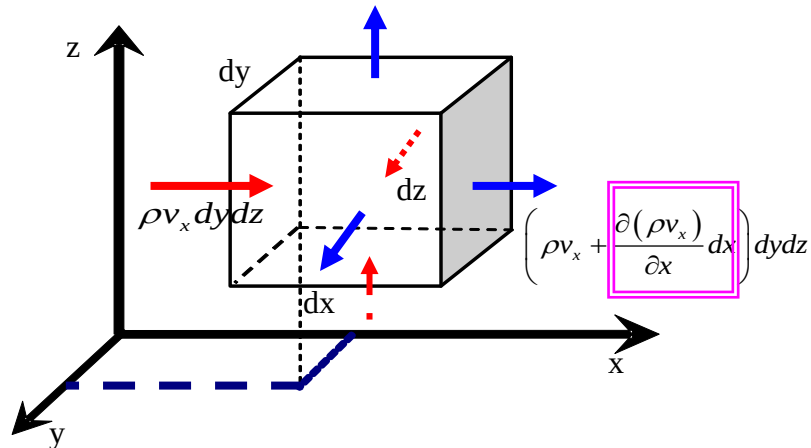
$$\omega_x = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_z}{\partial y} - \frac{\partial u_y}{\partial z} \right) \quad \omega_y = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_x}{\partial z} - \frac{\partial u_z}{\partial x} \right) \quad \omega_z = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_y}{\partial x} - \frac{\partial u_x}{\partial y} \right)$$

微团xyz方向上的角变形速度分别为

$$\theta_x = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_z}{\partial y} + \frac{\partial u_y}{\partial z} \right) \quad \theta_y = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_x}{\partial z} + \frac{\partial u_z}{\partial x} \right) \quad \theta_z = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_y}{\partial x} + \frac{\partial u_x}{\partial y} \right)$$

相关参数及方程的推导与简化

连续性方程



根据质量守恒得:

(1) x 方向: dt 时间内沿从六面体 x 处与 x+dx 处输入与输出的质量差:

$$(\rho v_x) dy dz dt - \left[\rho v_x + \frac{\partial(\rho v_x)}{\partial x} dx \right] dy dz dt = - \frac{\partial(\rho v_x)}{\partial x} dx dy dz dt$$

(2) dt 时间内, 微团内输入与输出的质量差:

$$- \frac{\partial(\rho v_x)}{\partial x} dx dy dz dt - \frac{\partial(\rho v_y)}{\partial y} dx dy dz dt - \frac{\partial(\rho v_z)}{\partial z} dx dy dz dt$$

$$= - \left[\frac{\partial(\rho v_x)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v_y)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho v_z)}{\partial z} \right] dx dy dz dt$$

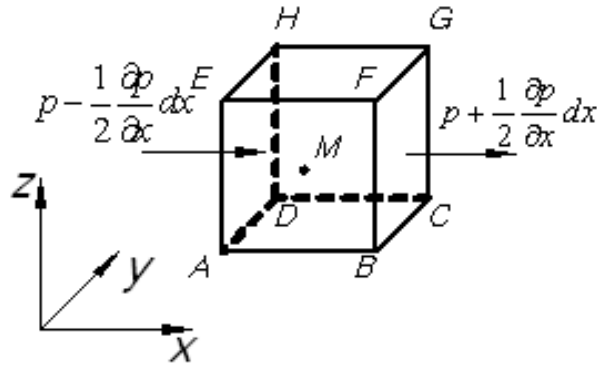
$$Y \text{ 方向: } - \frac{\partial(\rho v_y)}{\partial y} dx dy dz dt \quad Z \text{ 方向: } - \frac{\partial(\rho v_z)}{\partial z} dx dy dz dt$$

(3) 微元体内的质量变化:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} dx dy dz dt$$

从而得:

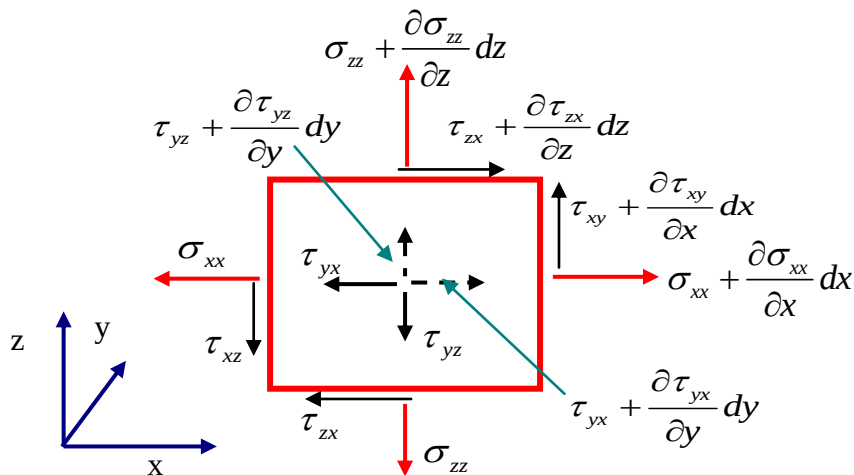
$$- \left[\frac{\partial(\rho v_x)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v_y)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho v_z)}{\partial z} \right] dx dy dz dt = \frac{\partial \rho}{\partial t} dx dy dz dt$$



对微团进行受力分析，根据牛顿第二定律得：

$$f_x \rho dx dy dz + (p - \frac{\partial p}{\partial x} \cdot \frac{dx}{2}) dy dz - (p + \frac{\partial p}{\partial x} \cdot \frac{dx}{2}) dy dz = \rho dx dy dz \frac{du_x}{dt}$$

微团所受应力分量：



X 方向表面力：

$$\begin{aligned} & \frac{\partial \sigma_x}{\partial x} dx dy dz + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} dy dx dz + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} dz dx dy \\ & = \left(\frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} \right) dx dy dz \end{aligned}$$

Y 方向表面力：

$$\left(\frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} \right) dx dy dz$$

Z 方向表面力：

$$\left(\frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z} \right) dx dy dz$$

根据 Stokes 的三个假设:

1. 应力与变形速率成线性关系;
 2. 应力与变形速率之间的关系各向同性;
 3. 静止流场中, 切应力为零, 各正应力均等于静压力
- 则有:

$$\sigma_{xx} = \sigma_{yy} = \sigma_{zz} = -p$$

在之后的 CFD 软件模拟中我们主要使用的是 Navier-Stokes 方程

$$\rho \frac{Dv_x}{Dt} = \rho f_x - \frac{\partial p}{\partial x} - \frac{2}{3} \frac{\partial}{\partial x} (\mu \nabla \cdot \vec{v}) + 2 \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu \frac{\partial v_x}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left[\mu \left(\frac{\partial v_x}{\partial y} + \frac{\partial v_y}{\partial x} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\mu \left(\frac{\partial v_x}{\partial z} + \frac{\partial v_z}{\partial x} \right) \right]$$

三维展开得:

$$\begin{aligned} \frac{Dv_x}{Dt} &= f_x - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \left(\frac{\partial^2 v_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v_x}{\partial z^2} \right) + \frac{1}{3} \nu \frac{\partial \nabla \cdot \vec{v}}{\partial x} \\ \frac{Dv_z}{Dt} &= f_z - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + \nu \left(\frac{\partial^2 v_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_z}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v_z}{\partial z^2} \right) + \frac{1}{3} \nu \frac{\partial \nabla \cdot \vec{v}}{\partial z} \\ \frac{Dv_y}{Dt} &= f_y - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \nu \left(\frac{\partial^2 v_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_y}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v_y}{\partial z^2} \right) + \frac{1}{3} \nu \frac{\partial \nabla \cdot \vec{v}}{\partial y} \end{aligned}$$

$$\mu = \text{const}$$

到目前为止, 未能找到普遍适用的两个联系热力学状态参数的状态方程。方程并不封闭。必须根据边界条件对方程进行简化。在本文研究的固体壁面与粘性气体的边界条件下, 流体具有粘性, 在与壁面接触处流体速度为零。由偏微分方程理论知, 任何一个方程或封闭方程组具有无数组可能的解。因此, 若要得到完全确定的解, 必须给出完全确定的定解条件, 即所谓边界条件和起始条件。为了

给定粘性流动在边界上的物理量, 必须首先从物理的角度研究边界两侧物质的物理量的相互关系

1. 流体在物面上的运动学条件

$$(\mathbf{V})_b = \mathbf{V}_b$$

2. 流体在物面上的热力学条件

$$\left(\lambda \frac{\partial T}{\partial n} \right)_b = \lambda_b \left(\frac{\partial T}{\partial n} \right)_b = q_b$$

3. 表面张力合力和表面力的平衡

$$p_{nB} = -p_{nA} - n_A J \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right)$$

4. 流体在自由面上的运动学条件

$$\frac{\partial F}{\partial t} + (\mathbf{V})_f \cdot \nabla F = 0$$

此外, 二阶对称张量 $\mathbf{E}$ 可以表述变形速率

$$\mathbf{E} = e_i e_j \varepsilon_{ij} \quad \text{式中} \quad \varepsilon_{ij} = \varepsilon_{ji} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial V_i}{\partial x_j} + \frac{\partial V_j}{\partial x_i} \right)$$

以上就是研究中使用的物理公式推导和相关参数的求解方法。

6. 实验目的与方案设计

流体力学中, 纳维斯托克斯方程是描述粘性不可压缩流体动量守恒的运动方程。这一方程常见的解决方法主要是两种, 一是通过计算流体力学 (CFD) 商业软件构建网格后, 进行大计算量的近似分析。二是用风洞设备传感器获得数据。由于客观条件限制, 向相关科研机构租借科研风洞设备很困难, 但是可以利用现有的条件和器材, 运用等效替代的思想找寻新的方法。

实验目的, 一是验证对这种表面结构减阻的理论分析是否正确, 二是探究表面结构应用的规律, 优化设计方案, 观察减阻效果。

实验方案分为三个部分: 一是风洞沙盘实验, 二是计算机CFD软件模拟, 三是水洞装置模拟

6.1 风洞沙盘实验

根据不稳定表面在表现出稳定的具体表面结构时，具有一定的减阻特性，并存在较平均的表面压力和较低的粘滞阻力的原理。我们设计了风洞沙盘实验，实验装置外形上是一个透明的亚克力长方体管道，实验段20cm。整流稳流设备是由多重铝合金网构成，风力来源是两个电脑cpu散热风扇（功率3w）。通过window系统的控制程序来定量调节风扇转速。经过测试风力稳定，在风力计的误差范围之内。实验段沙盘两端有防溢槽。用螺旋测微器测量得所用细沙的平均直径为0.05mm，符合细沙的标准。

对测试的表面结构，先制作石膏模具，在沙盘上压印成型，保证了多次实验无关变量相同。

表面结构的种类主要有鲨鱼表皮微观结构、月牙形沙丘、高尔夫球坑、蝴蝶翅膀表面微观结构等。除以上结构的稳定性测试以外，还进行了沙漠表面模拟实验，增大沙量，增大风扇转速。模拟大风力条件下沙丘沙谷的形成和演变，为之后的表面结构改进提供参考。

6.2 计算机CFD软件模拟

CFD计算流体力学模拟使用的软件是ANSYS fluent以及ANSA。Fluent主要是通过有限元的核心方法来求解，其控制方程主要是纳维斯托克斯方程（下述中简称“N-S方程”）和连续方程。N-S方程是从气体分子组成的微团的角度，进行描述粘性可压缩流体的运动方程。不过由于N-S方程是二阶偏微分方程，只有几种特殊条件下才能求得特值解，普遍情况求准确解的方法一直悬而未决，是世界七大数学难题之一。本研究的并不是平行流动等等的特殊问题，实际上无法求得准确解。故fluent实际上是用有限元方法求出近似解。使用CFD以及前处理软件实验过程流程图，如图8。

给出N-S方程的矢量形式：

$$\rho \frac{dv}{dt} = -\nabla p + \rho F + \mu \Delta v$$

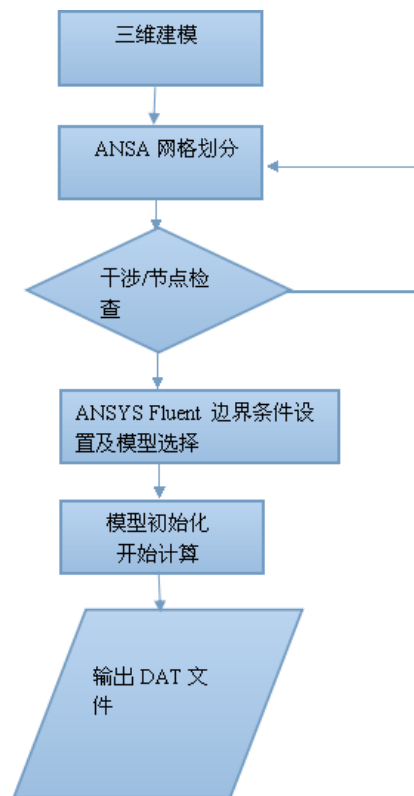


图8 数值模拟流程图

实际分析中需要在三维方向上的展开，以及一些具体的补充方程和边界条件才能近似的计算。N-S方程的本质其实就是牛顿第二定律在气体微团上的运用。对于本

研究来说, 选择单向流封闭双出口管道进行模拟, 首先使用3DMAX等软件对实验模型组进行建模, 由于要避免激波等等干扰的因素, 所以对前端一条边进行圆角处理。这样正向气流就可以平稳的吹上平台。球冠状凹坑矩阵是从生物、陨石、沙漠抽象出的具有类似效能的图形。

6.2.1 CAD模型中的简单渲染演示

为了方便观察单一图形的流场情况, 两两凹坑之间均有间隔, 不完全与高尔夫球表面相同。制作出的模型渲染图如下。此外还有其它改变形状半径以及深度的方案, 是根据不同的研究目的设置的模型组合, 在此只展示部分渲染图(如图9)。将所有改变形状半径以及深度的方案命名为实验组1。



图9 实验组1三维模型渲染图

制作设置有这种表面结构球三维模型, 制作过程不在此赘述。模型2高尔夫球三维模型, 如图10

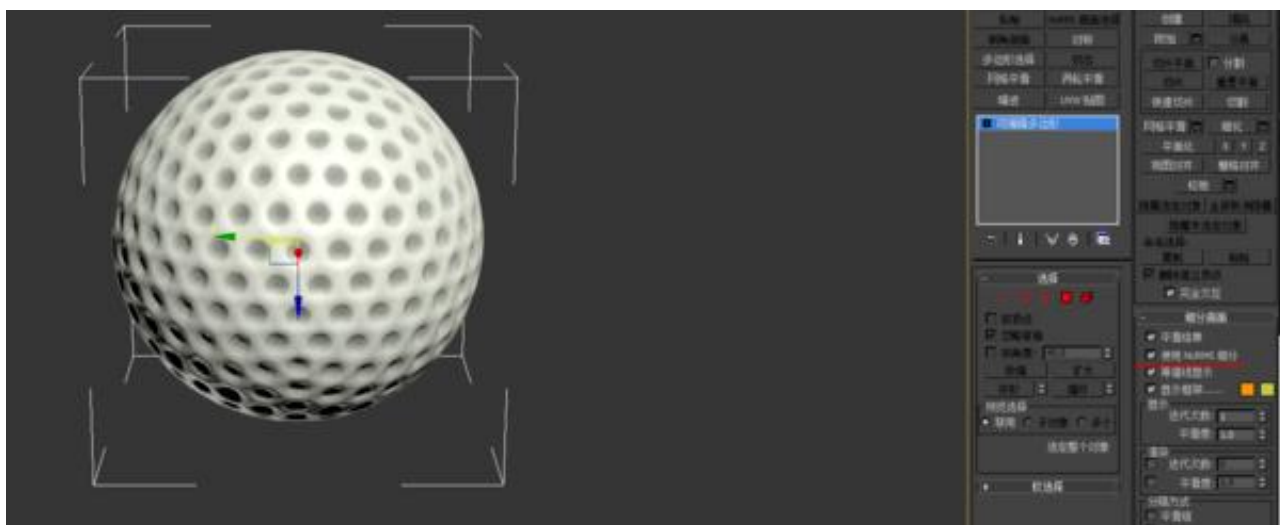


图10 3DMAX制作界面图

同时我们将测试高尔夫球面在流线体上的减阻效果是否会受到影响。设置了凹坑矩阵和空白对照两个模型。将其命名为实验组3。

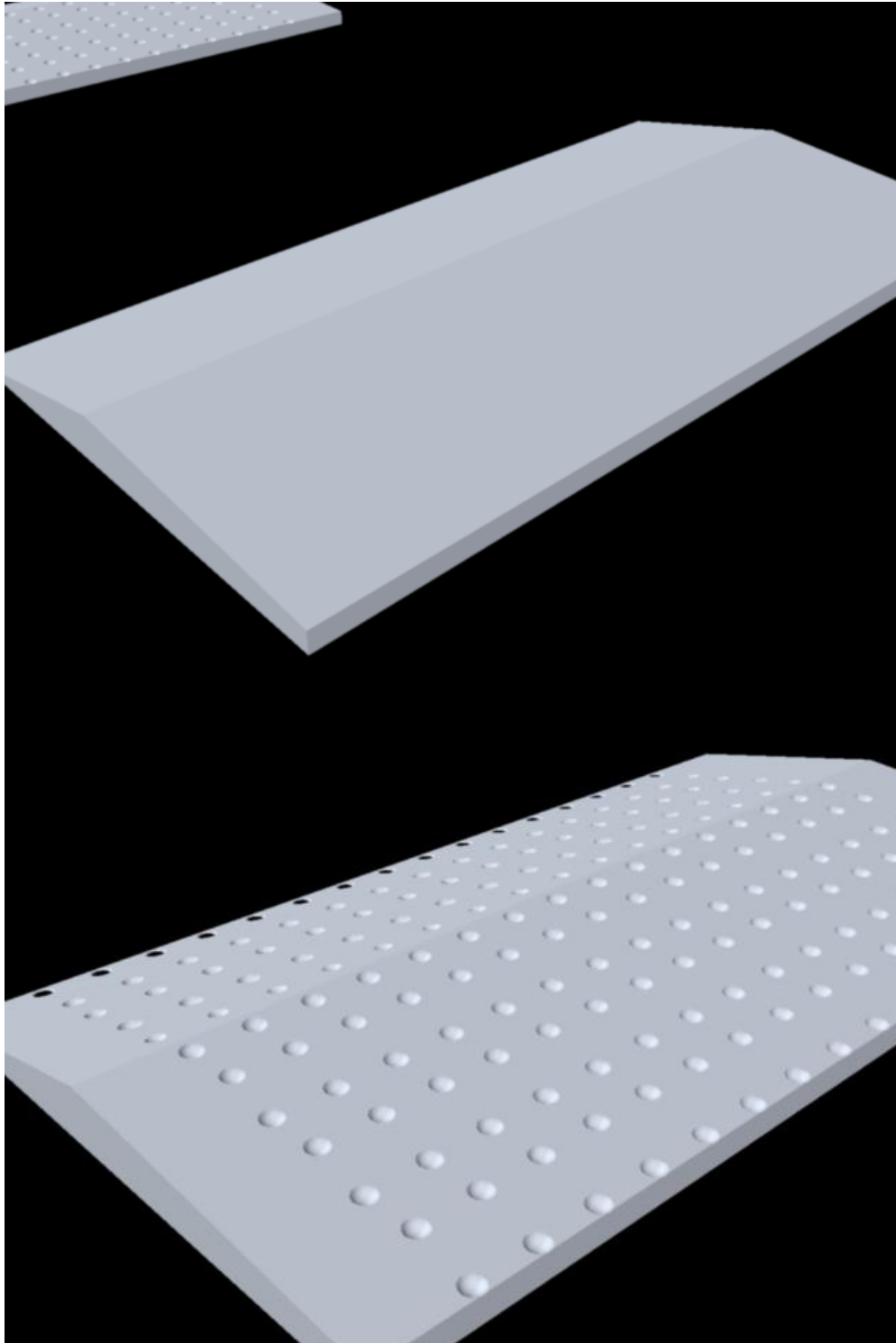


图11 实验组3三维模型渲染图

6.2.2 CFD（计算流体动力学）软件前处理

将以上三维模型经ANSA划分网格，使用四面体（三角形）网格。

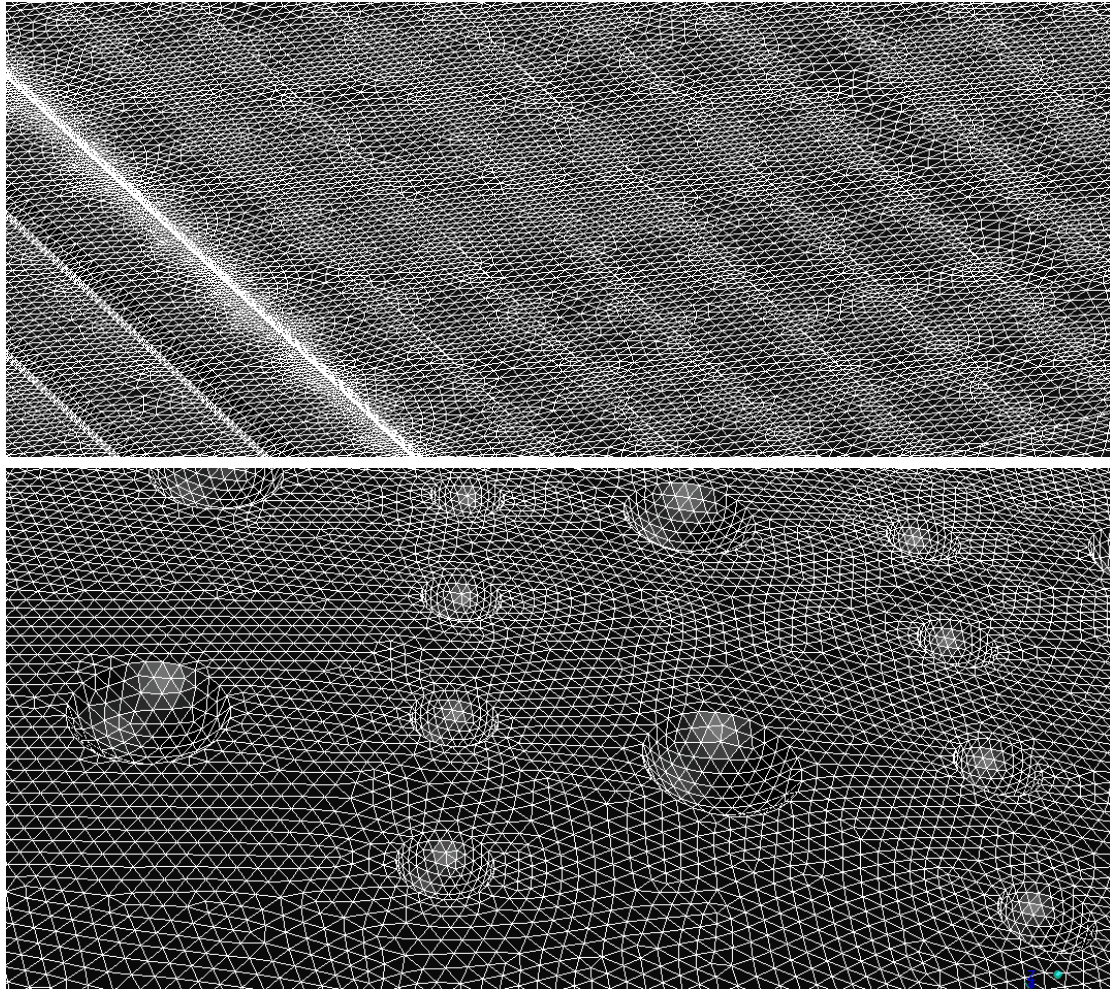
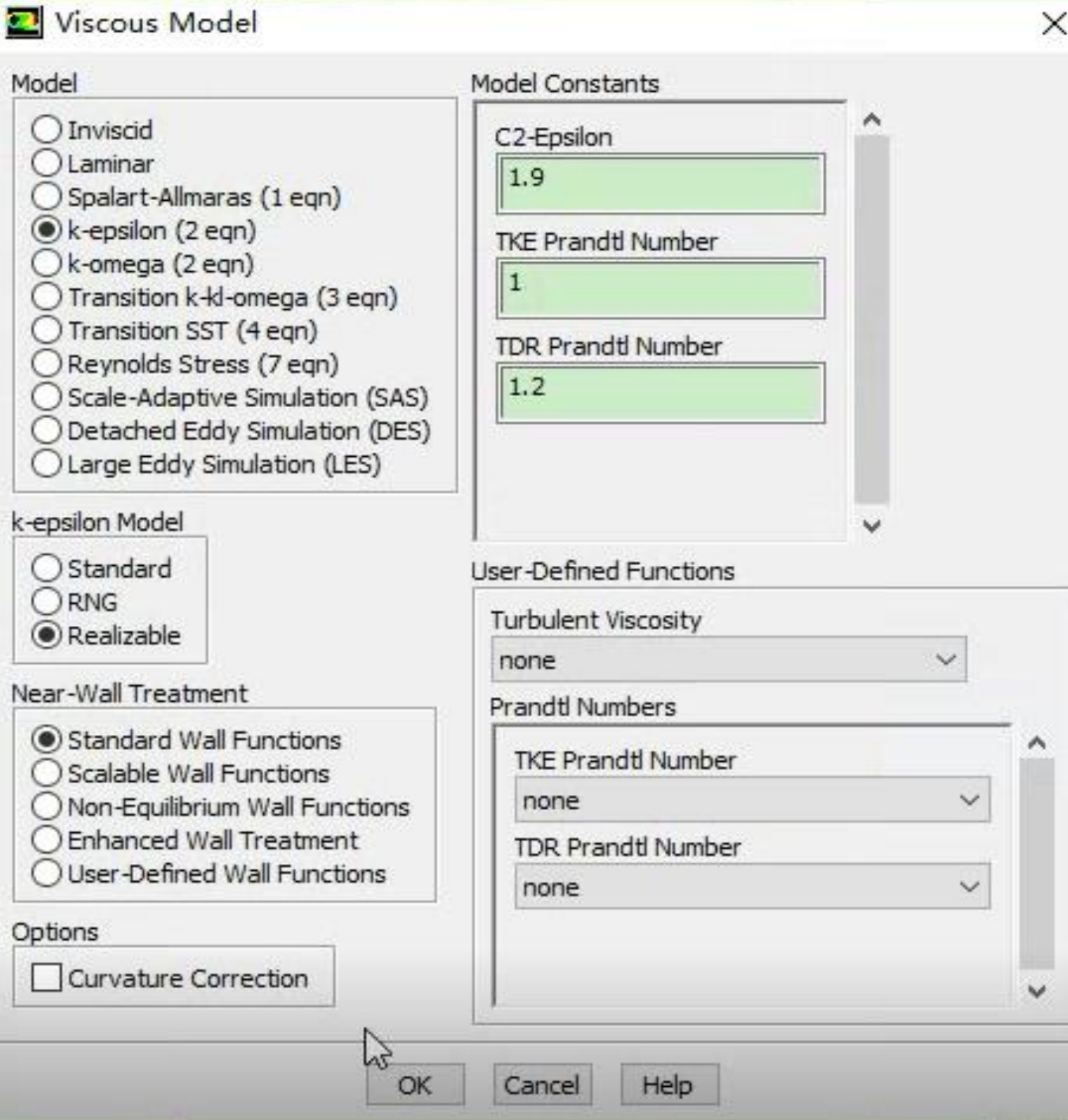


图12、 图13 完成网格划分后的模型表面示意图

经过ANSA网格预处理过后，就可以开始用fluent进行模拟，首先读取模型文件。

6.2.3 计算模型的选择及边界条件的设置



The image shows a 'Viscous Model' dialog box with the following sections:

- Model:** A list of turbulence models with radio buttons. 'k-epsilon (2 eqn)' is selected.
- Model Constants:** Three input fields for 'C2-Epsilon' (1.9), 'TKE Prandtl Number' (1), and 'TDR Prandtl Number' (1.2).
- k-epsilon Model:** A sub-section with radio buttons for 'Standard', 'RNG', and 'Realizable'. 'Realizable' is selected.
- Near-Wall Treatment:** A sub-section with radio buttons for 'Standard Wall Functions', 'Scalable Wall Functions', 'Non-Equilibrium Wall Functions', 'Enhanced Wall Treatment', and 'User-Defined Wall Functions'. 'Standard Wall Functions' is selected.
- Options:** A checkbox for 'Curvature Correction' which is unchecked.
- User-Defined Functions:** A section with a 'Turbulent Viscosity' dropdown (set to 'none') and a 'Prandtl Numbers' section containing 'TKE Prandtl Number' and 'TDR Prandtl Number' dropdowns (both set to 'none').
- Buttons:** 'OK', 'Cancel', and 'Help' buttons at the bottom.

Calculation Activities

Autosave Every (Iterations)

200

Run Calculation

Check Case... Preview Mesh Motion...

Number of Iterations: 1000

Reporting Interval: 1

Profile Update Interval: 1

Velocity Inlet

Zone Name: Inlet

Momentum | Thermal | Radiation | Species | DPM | Multiphase | UDS

Velocity Specification Method: Magnitude, Normal to Boundary

Reference Frame: Absolute

Velocity Magnitude (m/s): 20 constant

Supersonic/Initial Gauge Pressure (pascal): 0 constant

Turbulence

Specification Method: Intensity and Viscosity Ratio

Turbulent Intensity (%): 5 p

Turbulent Viscosity Ratio: 10 p

OK Cancel Help

图14 边界设置

6.2.4 数值模拟成果展示与分析

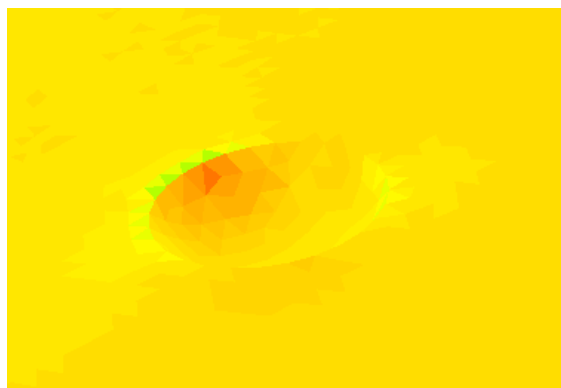


图 15 (a)



图15 (b)

图15 单个表面结构的计算机CFD压力图

(附参考压力值图示。特别说明，右图在比例上有放大。)

由图15中看出圆坑表面受到的压力主要集中在正流向的前缘至圆坑前半部分的底部，并呈现扇形的压力梯度分布。差别鲜明的压力分布带（浅黄色-橙红色带）符合之前的理论推导出的特征，有力地证实了圆坑内部逆向涡流的存在。因为内部逆向涡流在前部抬升正向气流，所以前缘为分界线的两个区域的压力才会表现出如此大的差异。

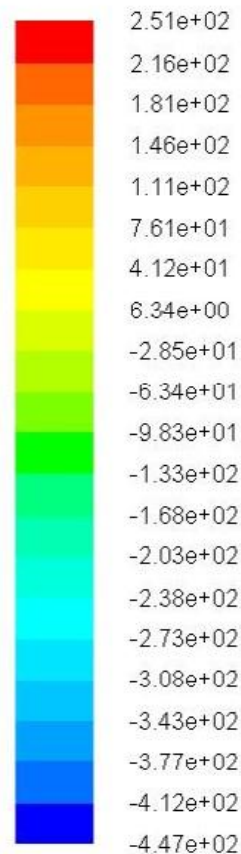


图 15 (c)

在下面的气流速度模拟中气流的流向特征会有更加直观的结果，图16中的曲线只是简易地将高低压带成因与气流方向呈现出来，实际情况中可能在表面结构内部会出现不止一个的独立涡流，但是其抬升边界层的效果并没有本质上的区别。

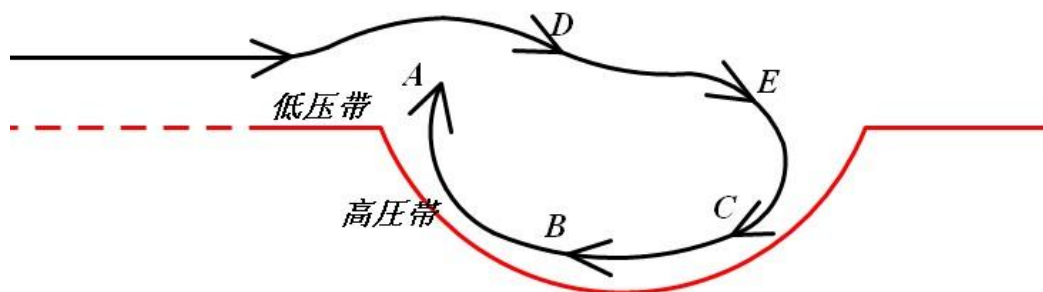


图 16 内部逆向涡流造成差异化气压带示意图

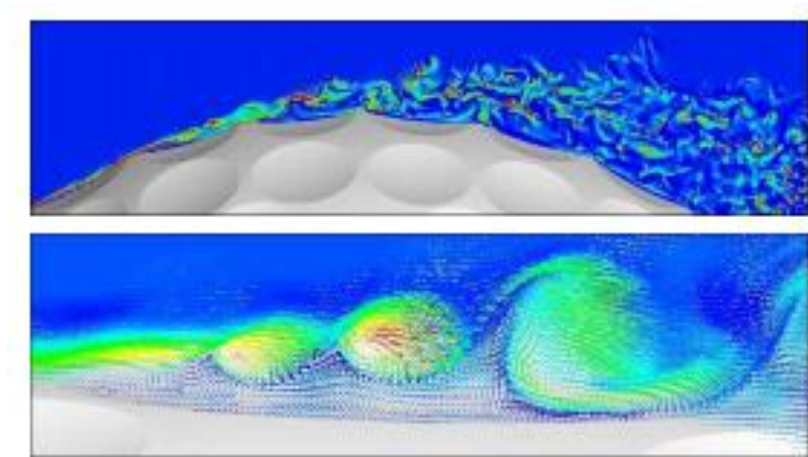


图17 Realfow模拟设置表面结构的球体表面气流示意图

在Realfow中模拟的表面结构瞬间气流（如图17）表明了表面气流是成波浪状的。从而证明了之前的观点中关于边界层扰动呈波浪状的观点是正确的。

圆坑内部逆向涡流→气体波浪状振动→层流雷诺数迅速增大→边界层增厚→提前转捩→抗分离能力强→负压区减小→前后压差减小→空气阻力减小，这样的一个过程是不光滑表面减阻效应的原因所在。

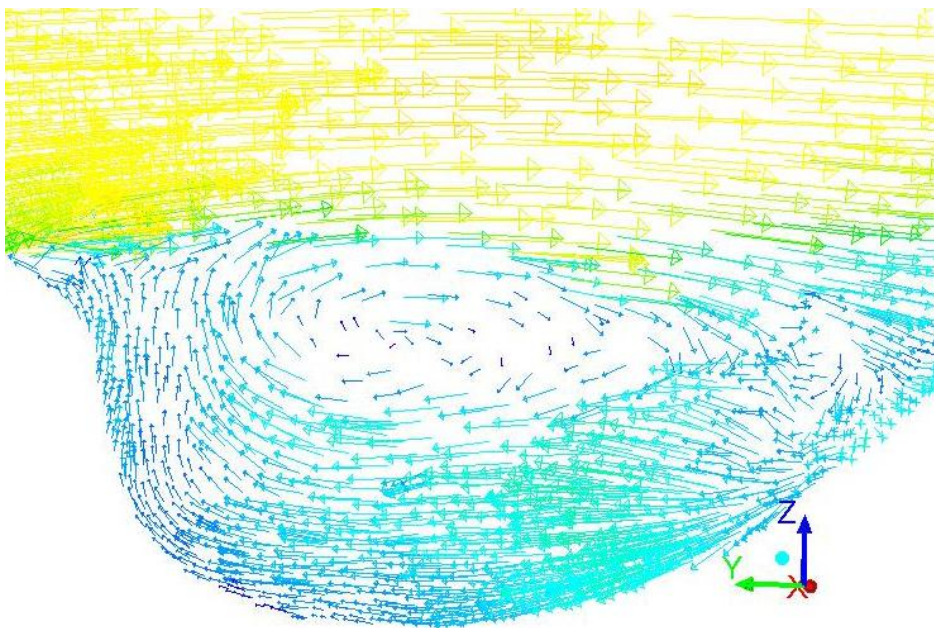


图18 单个表面结构的计算机CFD速度矢量图

如图18我们能够看得非常直观，凹坑的内部气流就是逆向涡流，从表面结构的后部进入，并且明显地托高了边界层的厚度。这样上层气流就像在“气垫”上流动，这是摩擦阻力主要是边界层气流和上层气流之间发生，边界层气流的流速慢，如图18边界层呈现蓝绿色，说明流动缓慢。这样边界层与物体表面的摩擦阻

力就极小, 总摩擦阻力也极小。

新月形沙丘是流动沙丘中最基本的形态, 沙丘的平面形如新月, 丘体两侧有顺风向延伸的两个翼, 两翼开展的程度取决于当地主导风的强弱, 主导风风速愈强, 交角角度愈小. 丘体两坡不对称, 迎风坡凸出而平缓, 坡度在5—20度, 背风坡凹入而较陡, 倾角在28—34度. 沙丘高度都不大, 一般为1—5米, 宽度可达100—300米. 新月形沙丘是在单一方向的风或两种相反方向的风的作用下形成的. 大部分出现在沙漠的边缘地带。风从迎风坡面上发生吹蚀, 在背风坡形成旋涡进

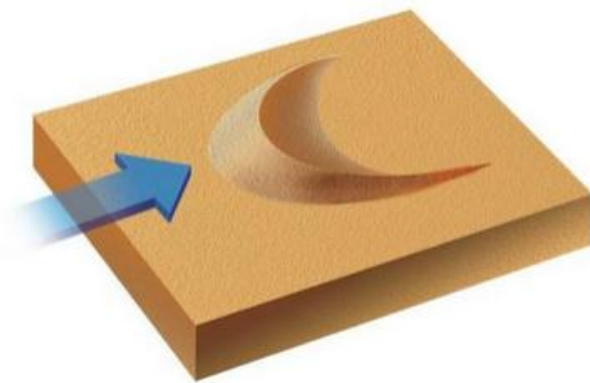


图19 沙漠中的新月形沙丘示意图

行堆积. 与此同时, 沙堆的左右两侧形成向内回转的气流, 使两翼不断扩展, 逐渐形成了新月形沙丘的弓形形态。新月形沙丘在沙子供应比较丰富的情况下, 由密集的新月形沙丘相互连接, 形成新月形沙丘链, 其高度一般在5—30米。月牙形沙丘是沙漠中最为常见的地貌, 这种表面结构的气动稳定性是毋庸置疑的。

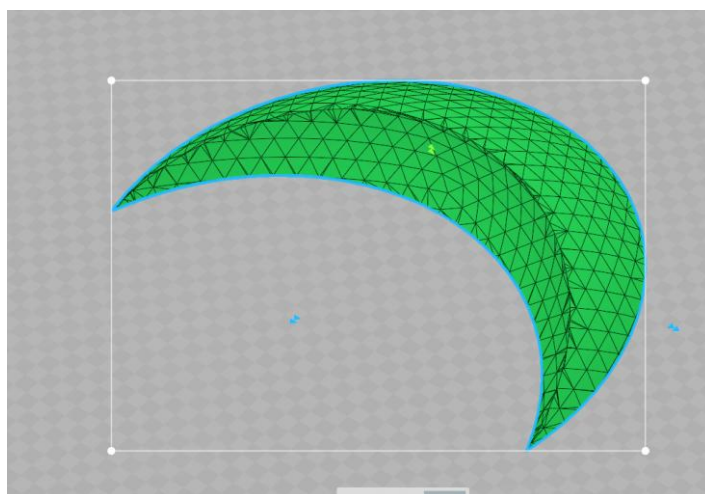


图20 月牙形表面结构三维模型

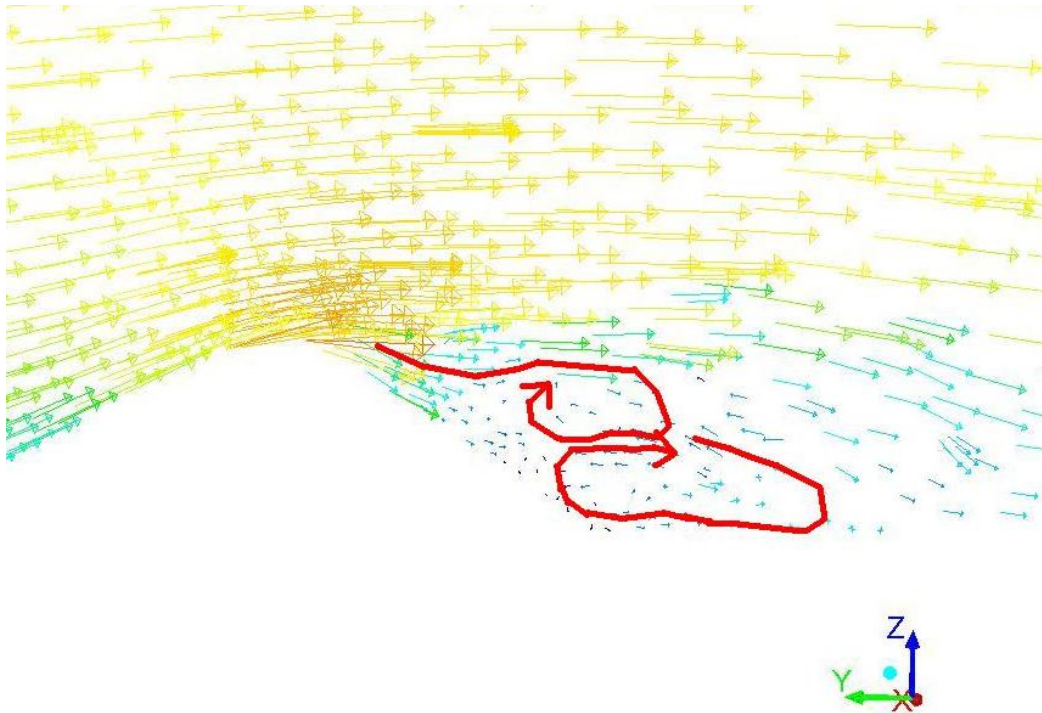


图21 月牙形表面结构的数值模拟速度矢量图

(图中连线是由气流的速度矢量顺次相连，箭头表示气流方向)

其CFD数值模拟速度矢量图后部的气流与凹坑的极其相似，同样形成了逆向的环状涡流。这样的逆向涡流的效果相对于凹坑来说同样增加的边界层的高度。

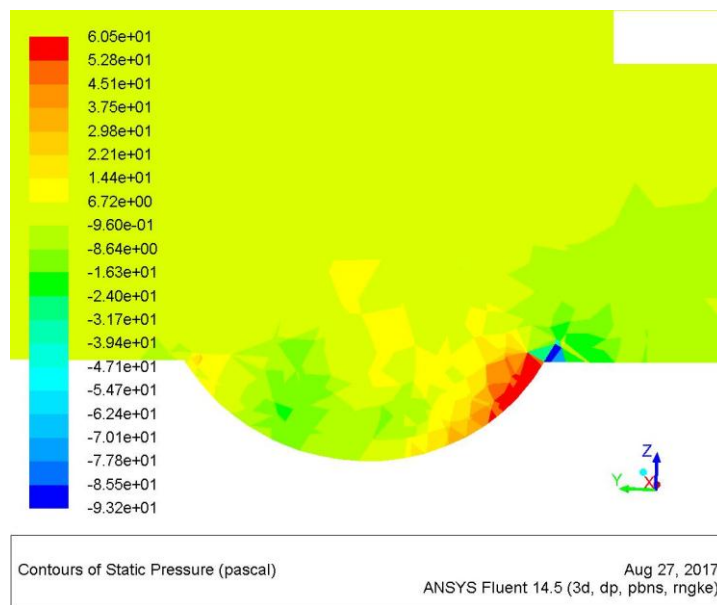


图22 球冠状CFD数值模拟压力矢量图

根据内部气流的趋势和特点，认为高压和低压交错的压力带分布，是边界层的增厚的气流特征。认为：为了增加前端气流的上升趋势，可以适当的将前壁坡度增大，凹坑尾部拉长。这样一来凹坑形状从球冠变成多焦点圆旋成体。这样尾部

能够纳入更多的气流，而前部则气流上升方向更加变向竖直，前端上升气流和边界层气流的碰撞更加剧烈。

再者，为了在不增加表面结构的尺寸和深度的情况下，最大程度地增大逆向涡流的直径和边界层的厚度。所以在多焦点圆前端增加了边缘契合的月牙状突起，CAD三维模型如下图23

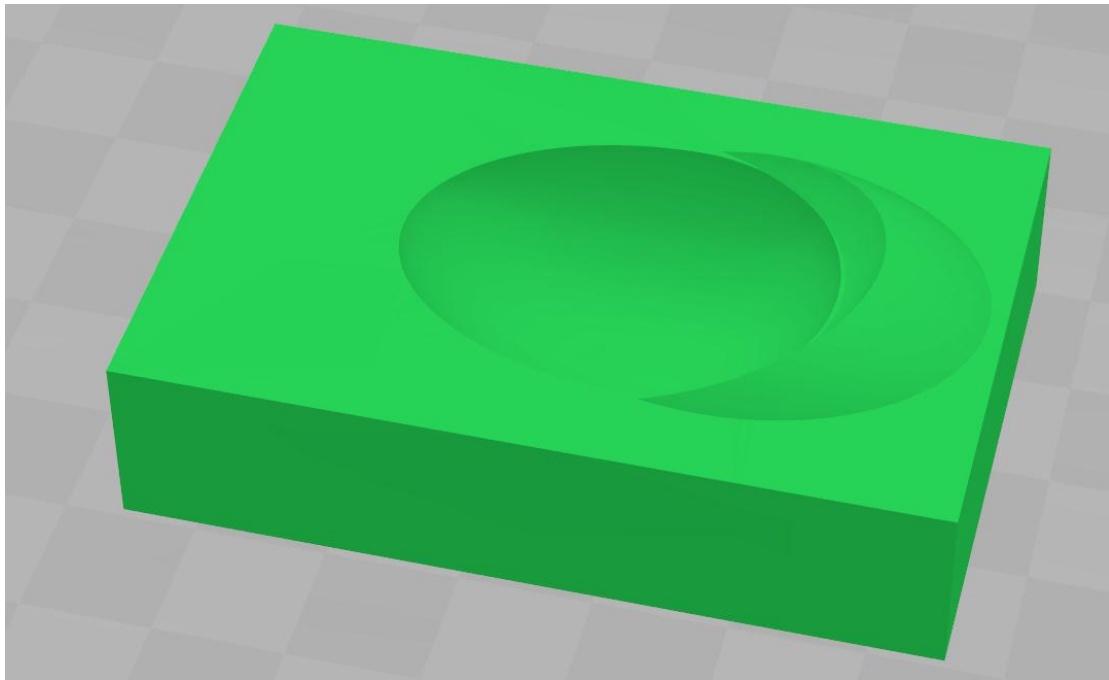


图23 复合型表面结构三维模型

在后续的CFD数值模拟过程中，这种复合型的表面结构经过高度、深度、焦点位置的一系列调整后，表现出显著的气动优越性。几何描述为只有一条对称轴的多焦点圆，焦点多边形为四边形，图形具有方向性，所以一头较为尖锐，一头较圆润。因为在不同的速度环境下，最大减阻率对应的图形不相同，所以暂时无法给出一个普适的数学表达式。但是图形主要由长轴短轴和长、宽这几个参数所控制。环线长和焦点环线长的比值M是多焦点圆的形状特征和属性重要参数。表达式

为：
$$M = \frac{L_0}{L}$$

环线长比值M在对称多焦点圆的图形与参数和特征参数分析中，起到重要作用。

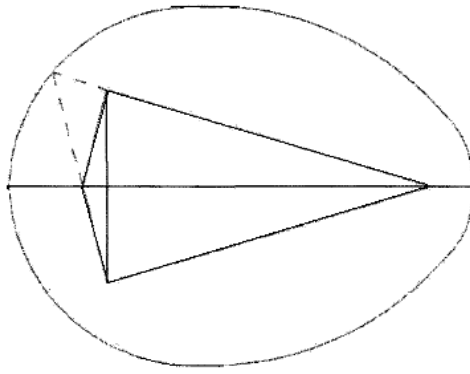


图24 四焦点圆示意图

除却沙漠中大量的月牙形沙丘链之外，沙漠中许许多多的沙谷的形状也与这种多焦点圆的形状极其相似，这种经过风洞沙盘实验挑选出来的表面结构与大自然的鬼斧神工契合，也印证了这种思路的正确。一定程度上，还与仿生学的许多方面的思想不谋而合。如下图



图25 沙漠中的新月形（月牙形）沙丘链

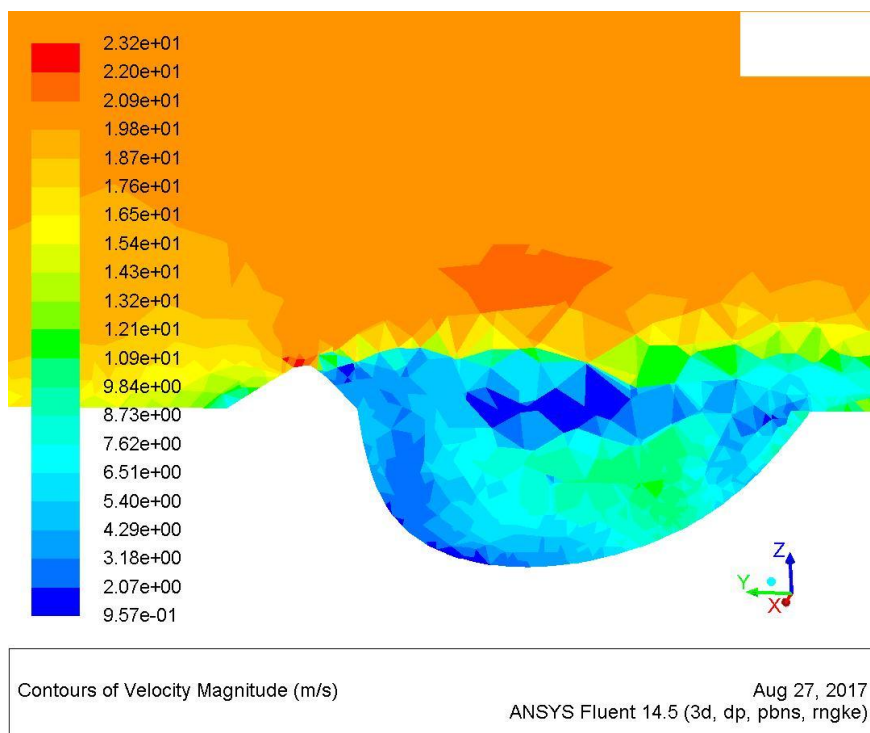


图26 复合型表面结构气流速度等值线图

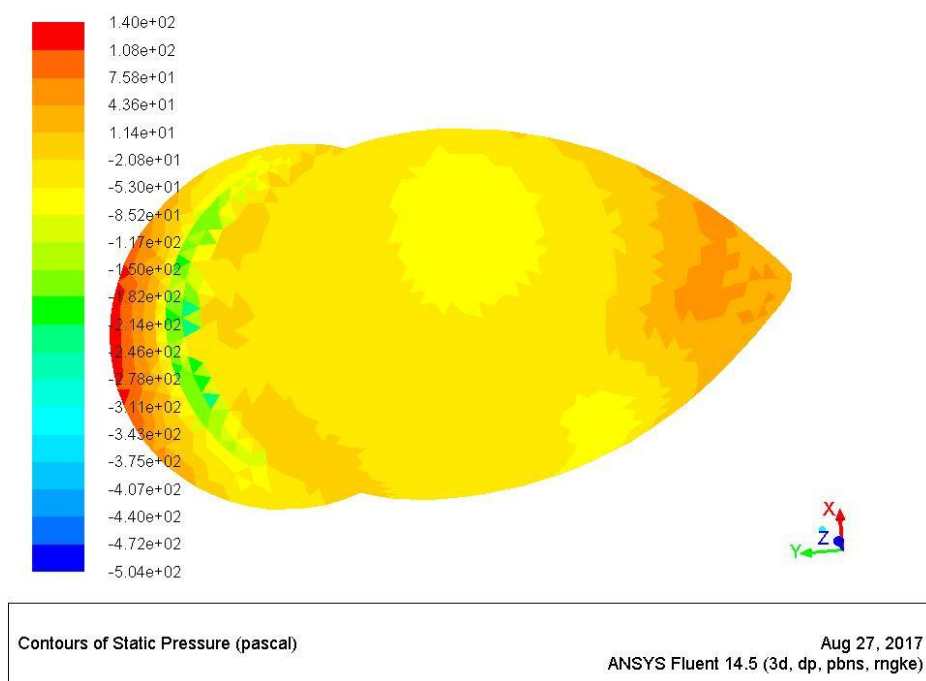


图27 复合型表面结构静压等值线图

由图26可看出,凹坑内补有一块蓝色低速区,这就是主动逆向涡流的中心所在。同时,能够看到边界层与外层气流的明晰边界,这对于减小摩擦阻力功能的证明也提供了有利的证据。

由图27可看出,内部前壁的高压带几乎消失,那么就说明内部逆向涡流的气流动能并没有浪费在与前壁的碰撞上,而是急剧上升后与边界层气流碰撞,从而增

强了增厚边界层的能力。在之后的减阻率比较中，复合型较单一月牙状和单一球冠凹坑甚至是多焦点圆旋成体，都表现出了相当的优越性。

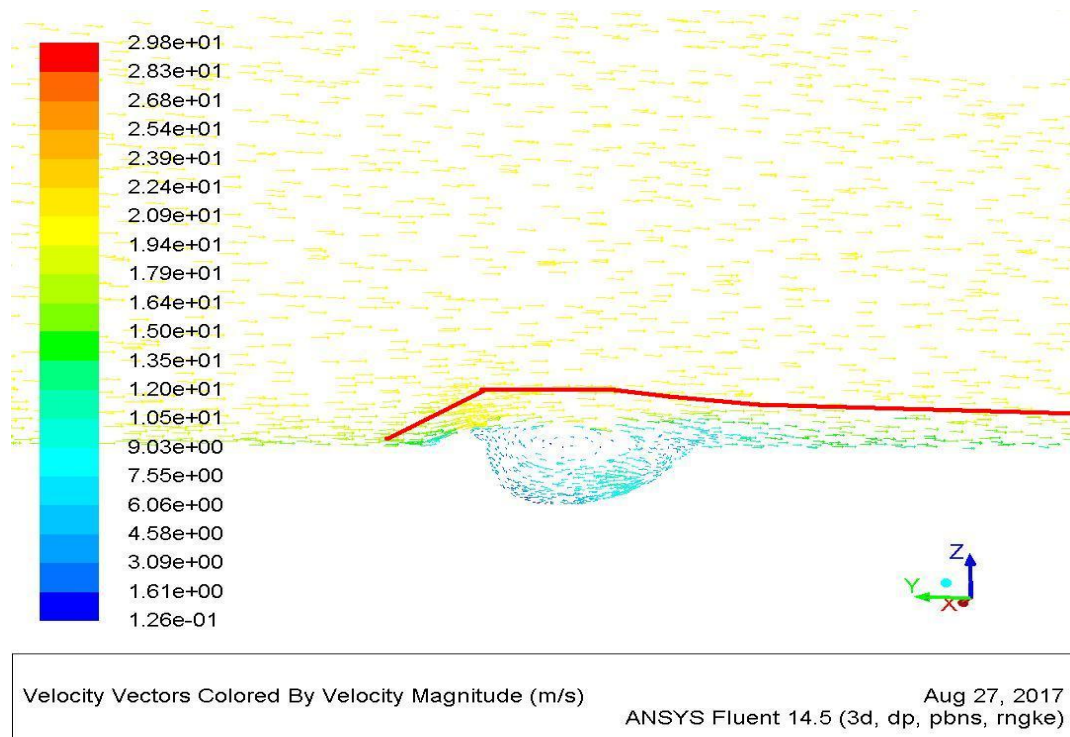


图27 复合型表面结构速度矢量场图

由图27可看出，边界层抬升的范围是表面结构长度的4~5倍，抬升的高度接近其深度，如果是连续的表面结构矩阵，可想而知整个矩阵范围的边界层都会增厚非常明显，而且大型矩阵主动形成的逆向涡流群，对边界层的增厚可以延伸到比单一表面结构更远的地方，可以直接延伸尾部。边界层的减速在向尾部的移动过程中更加粘附在物体表面，也间接导致了尾流低压区的减小。

如图所示，清楚地展现了气流方向上的边界层厚度趋势。所取平面为复合型表面结构对称轴所在二维平面，并且该平面垂直于表面（探讨范围为平直物体表面，暂不考虑曲面）。以月牙形凸起最高点为基点。以表面气流方向为正方向。向前取 10 个单位长度，向后取二十个单位长度的范围。严格而言，边界层区与主流区之间无明显界线，通常以速度达到主流区速度的 $0.99U$ 作为边界层的外缘。由边界层外缘到物面的垂直距离称为边界层名义厚度。

可以看出经过表面结构主动逆向涡流的介入,边界层厚度在月牙形前缘急剧增加并且在前20个单位长度内的衰减还是较缓慢的(表面结构的长度约为5个单位长度)。

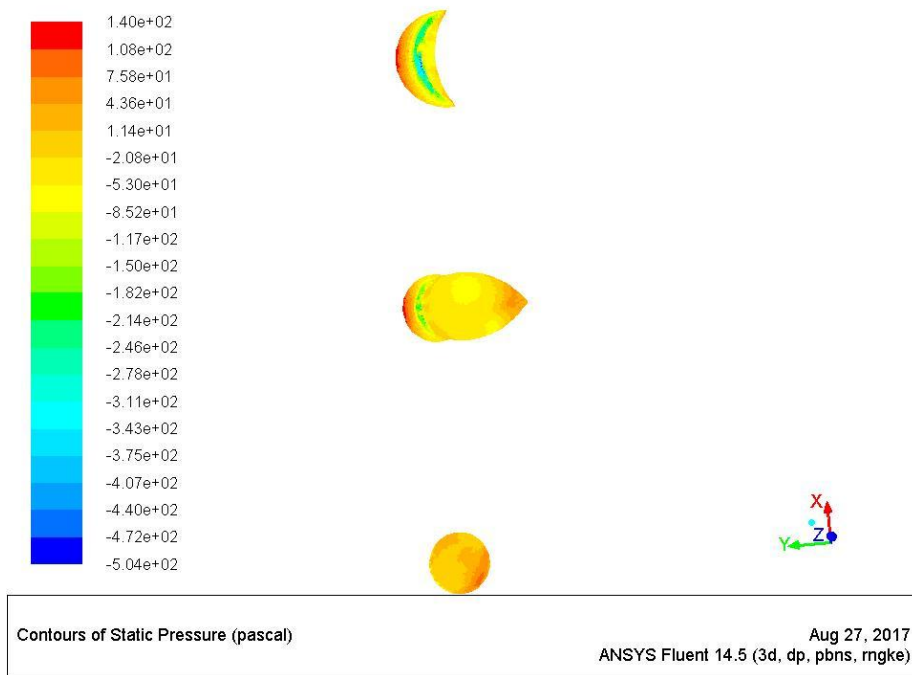


图29 三种表面结构静压数值模拟图

在接下来的减阻率分析当中，经过沙盘风洞实验我们筛选出三种表面结构，分别是复合型、新月形、球冠形三种表面结构。并且在深度（相对高度）上保持一致，各个形状上都是采用了之前数值模拟中在20米每秒条件下最优外形，尽可能保证之间减阻率比较的可参考性。

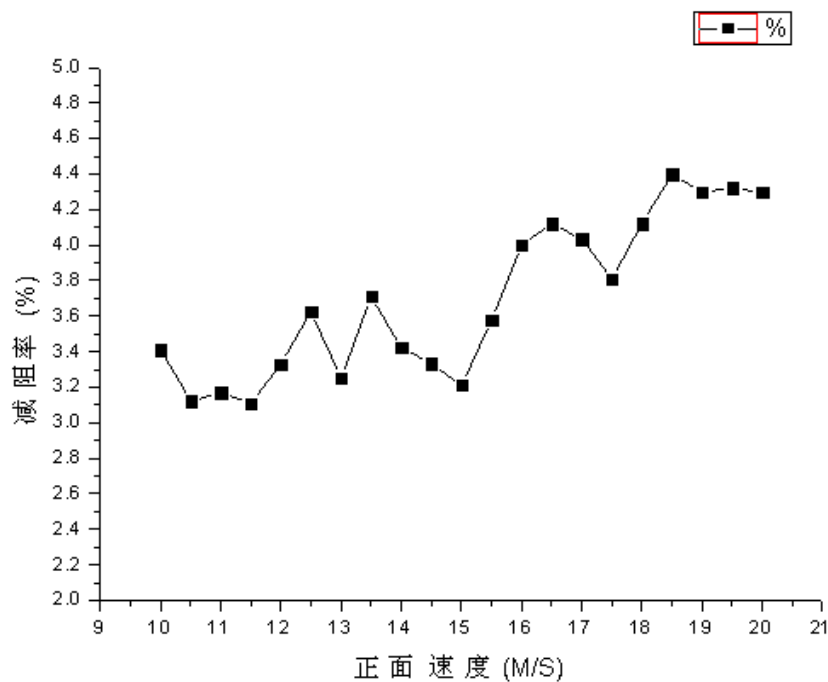


图30 球冠凹坑表面结构的减阻率-速度折线图像

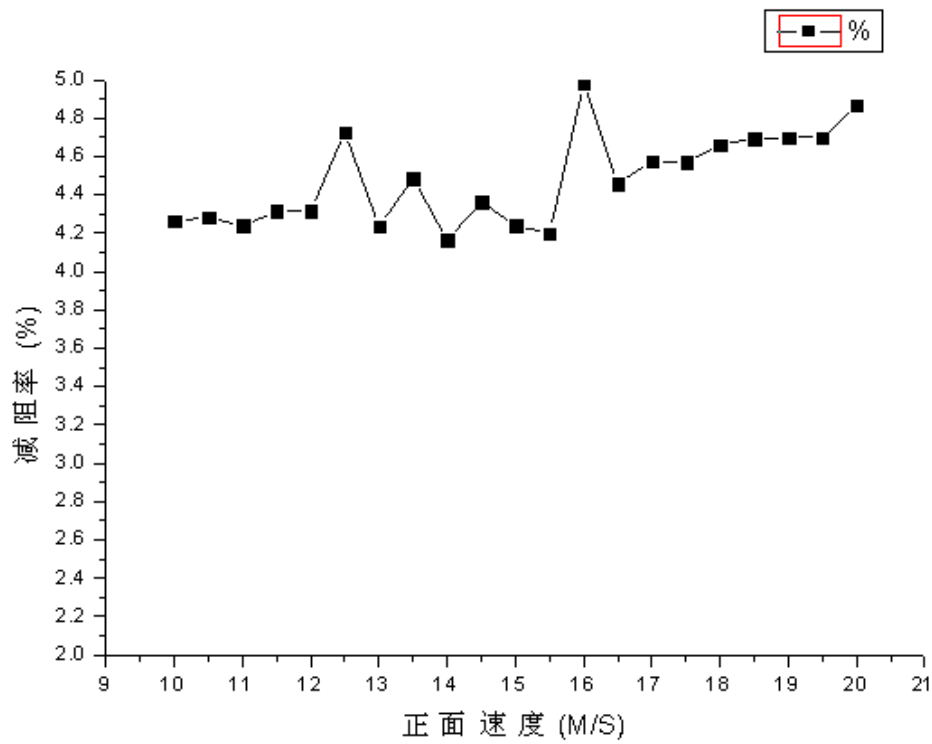


图31 月牙形凸起表面结构的减阻率-速度折线图像

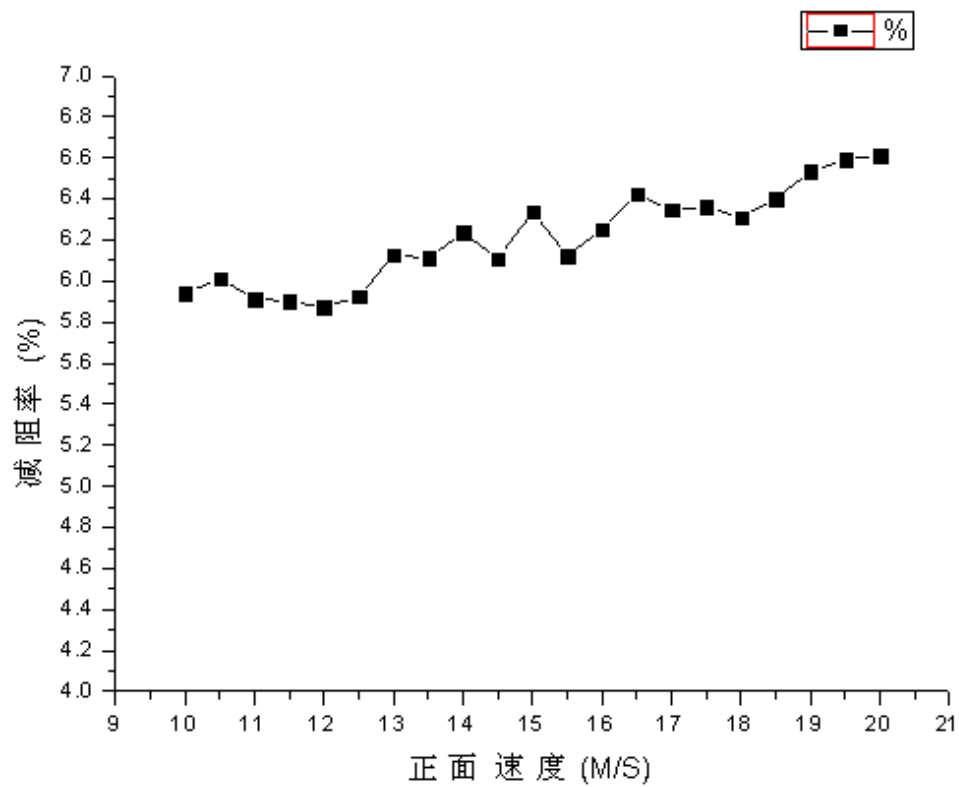


图32 复合型表面结构的减阻率-速度折线图像

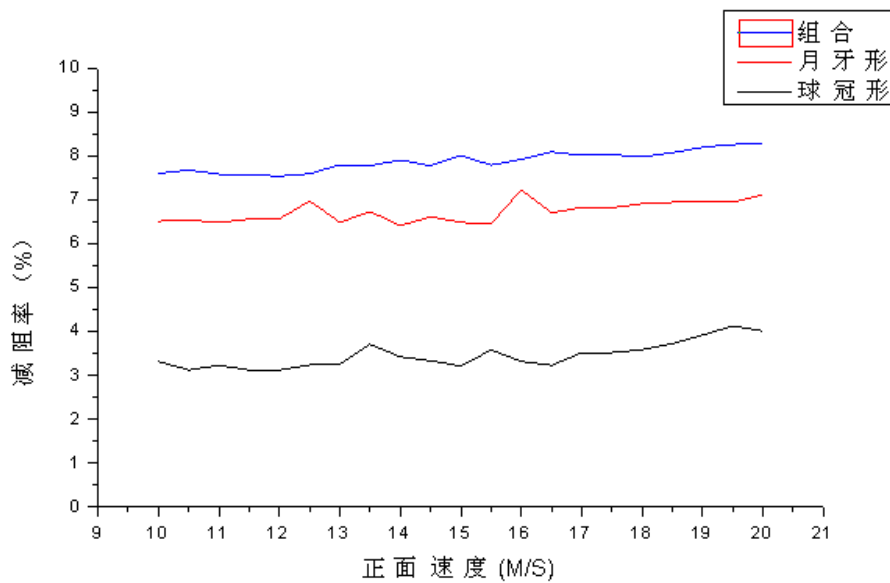


图33 三种表面结构的减阻率-速度折线对比图

减阻率是相对于无表面结构的对照组而言的，物体形状为圆角处理的长方体，相对长度为表面结构的二十倍，每一实验组只放置一个表面结构。

在上述几图中通过比较和单独列出的折线当中，我们可以看出三种表面结构的减阻率区间分布在3%~7%，单一折线在速度增加的情况下月牙形和球冠状数据波动明显，但三者都有些许上升趋势。说明在了日常生活中能够接触到的气流速度范围内这类表面结构都能较好的发挥减阻作用，复合型表面结构的减阻率效果非常突出，最大减阻率可达8.31%。在多次实验的数据处理上已经去除了部分偏差较大的数据，并对总体数据进行修正，一定程度上减小了不确定度。但是仍然无法避免大波动数据出现，特别是月牙形折线出现的两个波峰。据此，猜测减阻率与正面速度可能成正相关，但是只放置一个表面结构很难模拟出大量涡流群的减阻率函数，此外表面气流的参数随机性太强，故认为减阻率与正面速度的关系在大量观测数据和涡流群的情况下会确定的关系，同样的减阻率也会稳定在一个确定值附近。但是上述实验对于不同表面结构减阻率对比是有着很大的参考价值的。

需要指出的是上述减阻率实验都只采取了单行的表面结构，尚未形成逆向涡流矩阵，减阻率还有很大的提升空间，再结合对矩阵布局的分析和优化。减阻率可以达到15%左右。在这里，我们一定程度上简化了研究对象。忽略了偏航角和逆向气流的影响。在实际中，由于物体运行速度环境的确定，这些因素对减阻率的影响都很微弱，故加以忽略。

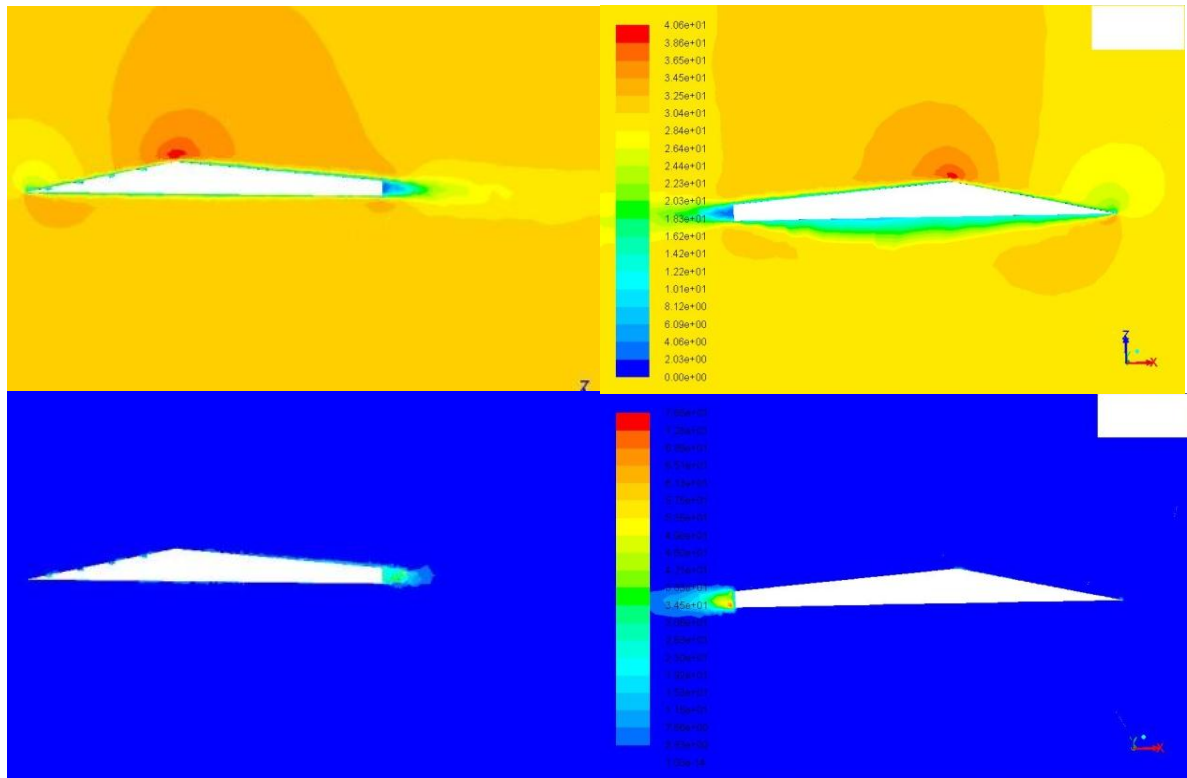


图34 测试实验组3的模拟结果。

从左往右第一行起分别为有表面结构的模型的截面速度图像、无表面结构的模型的截面速度图像、有表面结构的模型的截面湍流动能图像、无表面结构的模型的截面湍流动能图像。

湍流强度:

$$I = 0.16Re^{-\frac{1}{8}}$$

雷诺数:

$$Re = \frac{v \cdot d \cdot \rho}{\mu}$$

湍流强度估算湍流动能:

$$\overline{E_k} = \frac{3(u \cdot I)^2}{2} = 0.0384u^2 \left(\frac{v \cdot d \cdot \rho}{\mu} \right)^{-\frac{1}{6}}$$

式中u为平均速度。可以换算成湍流强度的分布图像。

由于这两个大小完全相等的模型形状阻力系数都很低,故这个对比试验可以探究在流线体(上表面钝角角度非常大,约为165°)抑或是非钝体的不光滑表面减阻效应的变化情况。由图34我们可以看出,由于这种表面结构的介入,尾流低压

区有一定程度的减小，但影响较小。通过后处理软件的等比例面积截取计算，负压区面积减少了9.73%，高尔夫球表面对于流线体的负压区抑制作用有限。但是可以非常明显的看出下表面的低压流扰动几乎完全消失，第三第四幅图可以非常明显的看出因为这种表面结构的介入，尾流的湍流动能减小，区域面积也明显减小。

根据上述分析，我们可以得出结论：表面结构对于流线体的负压区抑制作用有限，但是可以很大程度上减小其尾流的高端流动能的区域面积。

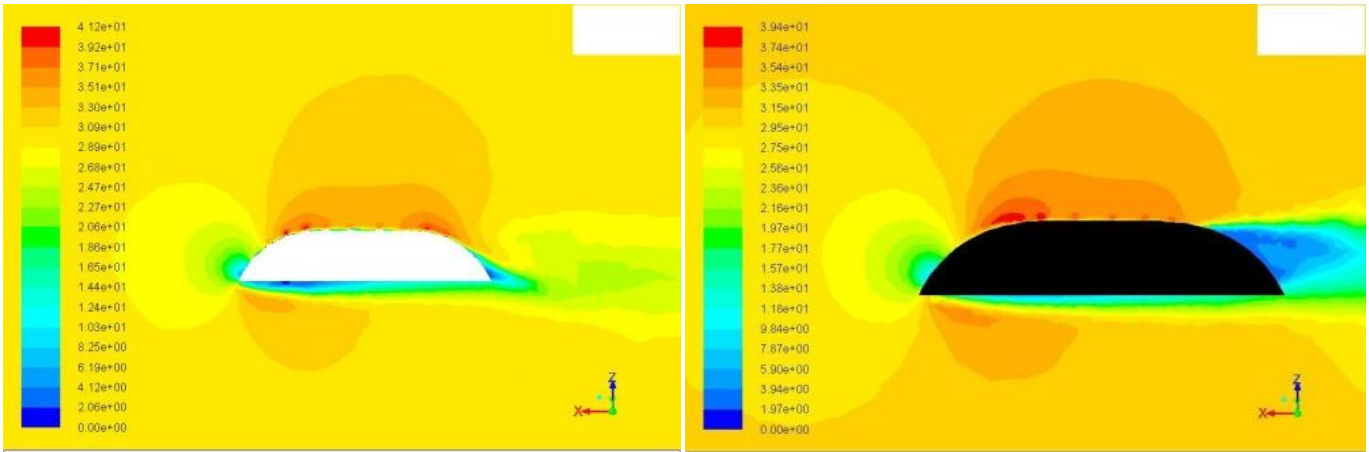


图35 实验组4两个双边圆角的长方体

前者上表面分布有这种表面结构，后者上表面则为光滑曲面。（图片中两物体截面大小不同是因为截取时缩放的比例不同，实际上两者的大小完全相同。）这是经过多次更改球冠状凹坑的几何大小和分布得出的、14个不同表面方案中最优的一种与等大空白对照方案的对比。这两张图片是气流速度分布图像，可以非常明显的看出，由于这种表面结构的介入，前者气流低速区（负压区）面积极大地减小了，通过后处理软件的等比例面积截取计算（根据色号与参考表比对，程序能够自动选定范围值的区域），负压区面积减少了83.6%。（如图36）减阻率达到了21.3%。

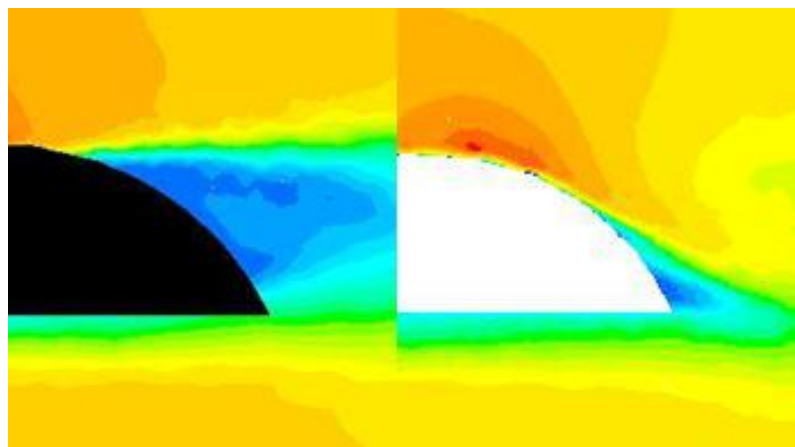


图36 实验组4的低压区1:1对比

根据多次改变分布位置的模拟，我们找到以下规律（以下从钝体的角度，主

要空气阻力是压差阻力)：

从一组（一个只有顶面有这种表面结构，另一个在迎风面和顶面都有这种表面结构）模拟结果来看这种表面结构在钝体迎风面的影响效果很小，反而会一定程度上增大摩擦阻力。主要在侧/顶面（类似测试模型的水平侧面）起到减阻的效果。从另外一组（一个只有顶面有这种表面结构，另一个在背风面和顶面都有这种表面结构）的模拟结果来看，背风面转折点以后的部分也是没有起到减阻效果的。

启示性地，在具体的应用方面我们可以遵循上述规律，选择性设置这种减阻表面结构，以达到高效、美观的效果。

6.3 水洞验证实验

实物实验通过水洞装置进行模拟，利用染料替代蒸汽流来建立流谱。虽水不易压缩、密度大且粘滞系数大，但理论上水和空气都为流体。因此可以在一定条件上替代。

$$Re = \frac{v \cdot d \cdot \rho}{\mu}$$

由上式可知，因为水与空气的密度是常量，通过减小流速，我们可以得到同等雷诺数数量及流体环境，水的不易压缩也算一定程度上简化了实验模型。这样就可以较好的达到直观模拟空气环境的效果。而且不同于空气，水这种介质的流速和流量都可以很好的得到控制和测量。

水洞试验使用的模型是汽车按1：18比例缩小的石膏模型，其中第一组设置的替换变量有：迎风面有无非光滑面、背风面有无非光滑面、顶面有无非光滑面。侧面有无非光滑面。实验目的是探究非光滑面发挥作用的位置。

第一组实验是以表面结构最大截面（球冠底面）的半径大小为变量，对测量的数据进行曲线拟合，实验目的是找到图形大小对减阻效果影响的变化规律。

第二组实验是对是以表面结构（球冠的高）的深度为变量，对测量的数据进行曲线拟合，实验目的是找到图形深浅对减阻效果影响的变化规律。以上实验均为单一变量实验。

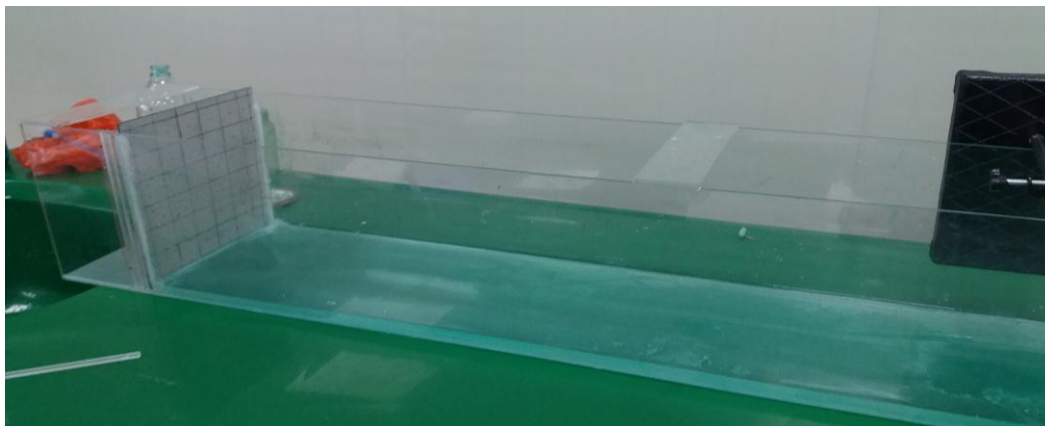


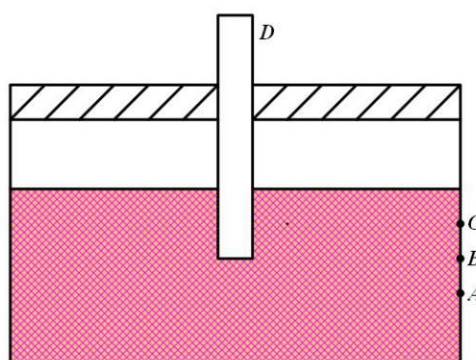
图37 水洞装置实物图（实验段）

6.3.1 水洞实验装置的介绍

装置由5mm厚高透明亚克力板粘接而成，易于观察、强度高且重量轻。主要分成三个部分——蓄水池、流水槽以及染料释放装置，辅以杠杆和力传感器组成的阻力测定装置，以及流量计。蓄水池装置不使用水泵（水泵功率输出并不稳定，且需要电力，环境适应性差），而是基于马略特容器原理设计的。

图38 马略特容器示意图

解释马略特容器原理，以图22为例，图中阴影处为完全气密中间开孔的塞子，B点与D管最低面等高，并将A点处打开一个小口。有压力平衡可得：



$$P_A = P_0 + \rho_{\text{水}} \cdot g \cdot h_{AB}$$

（ P_0 是标准大气压， g 为重力加速度）

故 $P_0 < P_A$ 时，水会流出，使瓶内封闭气体体积增大，压强变小，由于内外气体压强差，空气通过d管进入瓶中，维持封闭气体气压在 P_0 。孔口液体水的流速与液片受到的内外压强差有关，但对于 $P_A = P_0 + \rho_{\text{水}} \cdot g \cdot h_{AB}$ 来说，在液面降到b前压强差不

变, 故水在水面降到b点之前以恒定速度流出。简而言之就是从导管中进入瓶中的空气平衡了流出的水减小的压强。由以上可知这类容器可以在一定时间内得到匀速恒压的水流。这样很大程度保证了单一变量。减少了实验误差, 且结构简单。

流水槽虽然得到了进流量恒定的水流, 但是还是无法保证水流竖直梯度流量相等, 这是因为 $P = \rho \cdot g \cdot h$, 随着h的增加, 压强也在增加, 要求保证每一根流谱线所在平面液体压力保持恒定, 采取的解决措施是同时在出、入口加入了多重整流器挡板, 这是这个实验的关键所在, 不稳定的水流就会产生紊乱的流谱线, 并且多层整流器的孔洞是经过精确计算得出的, 其竖直方向上的间隔很小仅有2mm, 水平方向上孔洞是等距(但每行的间距不同), 总体来说上方的孔洞较多, 下方的孔洞较少是这样每一个水平高度之间的流量一致。更值得注意的是, 由于流水槽使用水平仪确定水平。

关于疏水剂处理: 在水介质中, 在水溶液中非极性基团(如碳氢链)相互靠拢、缔合的作用就是疏水作用。使接触角由 $0 \leq \theta \leq \frac{\pi}{2}$ 提高到 $\frac{\pi}{2} \leq \theta \leq \pi$, 呈现出类似荷叶的斥水效果。克服水相对于空气粘滞阻力大对实验等效模拟的阻碍。

染料释放装置由染料盒和软管组成。软管在水槽中使用最小横截面放置, 即多根软管均在与水平面平行的平面内。并将软管的直径尽量缩小, 这样也能减小对水流的干扰。染料选择水溶性不佳, 偏向油溶性的染料, 因为要防止染料在水流中的过度扩散。同时防止流谱线的上浮或者沉降, 染料还需要控制与水的比重问题。染料流的恒压问题使用现成无气泡恒压的可控制流速的吊瓶输液装置解决。水中加入定量氯化钠固体, 以保证染料液与水的比重一定。防止染料在水中的沉淀。

以上就是实验装置中具体的问题以及解决方法。装置干扰较小的实验段大约全长50cm, 水道全长200cm, 水流截面面积为 $4 \times 10^{-2} \text{ m}^2$ 。

实验设置三个模型, 一个是光滑的球体, 一个表面带有表面结构的球体, 两者大小形状完全相同, 形成对照实验。以及一个验证内部逆向涡流的平台。

由于以上圆坑的契合几何立体图形均为球冠, 改变底面半径大小以及深度都会影响到球冠半径。计算球冠状凹坑的半径及体积的方法: 使用游标卡尺测出圆坑深度h和底面直径c; 对于给截面弓形高h, 底面直径c, 球冠半径

$$R = \frac{c^2 + 4h^2}{8h}$$

若球冠半径是R, 球冠的高是h, 球冠的底面半径是r, 体积是V, 则

$$V = \pi \cdot h^2 \cdot \left(R - \frac{h}{3}\right) = \pi \cdot h \cdot \left(\frac{r^2}{2} + \frac{h^2}{6}\right)$$

6.3.2 水洞试验成果展示与分析

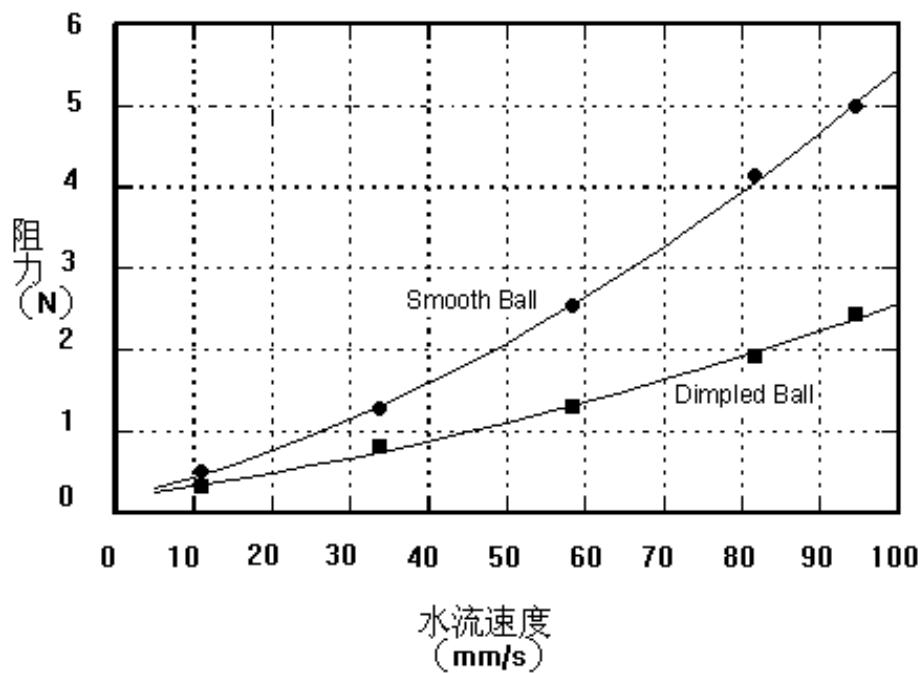


图39 水流速度-总阻力曲线图像

图23是经过传感器得到的光滑球体 (Smooth Ball) 和凹坑球 (Dimpled Ball) 阻力与速度的图像 (横轴为速度, 纵轴为阻力) 经过修正得到两条拟合曲线。设 $F(x) = g(x) - f(x)$, 则 $F'(x) > 0$ 。两函数差值单调递增, 即随速度增加, 这种效应对于具有这种表面结构的球更加明显。

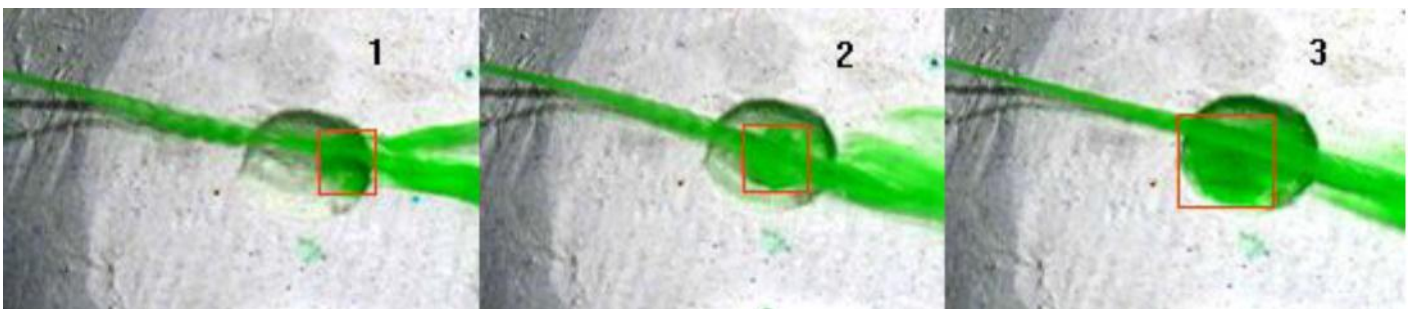


图40 连续的单谱线染料示踪过程图

(从左往右是随时间变化而变化的三帧截图, 时间间隔为0.5s。)

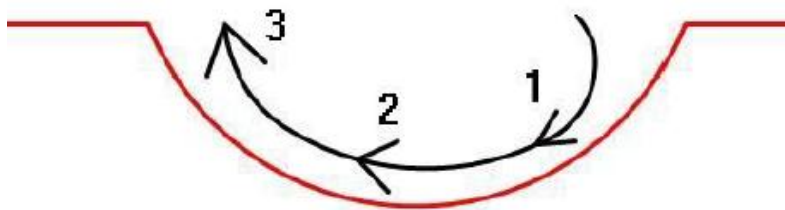


图41 内部逆向涡流染料示踪补充说明图

图40中可以看到凹坑内绿色染料从凹坑后缘进入并在内部向前端移动, 印证了之前的猜想, 至此, 从计算机数值模拟和实物实验两方面都印证了内部逆向涡流的存在, 证明了之前的理论解释是完全正确的。

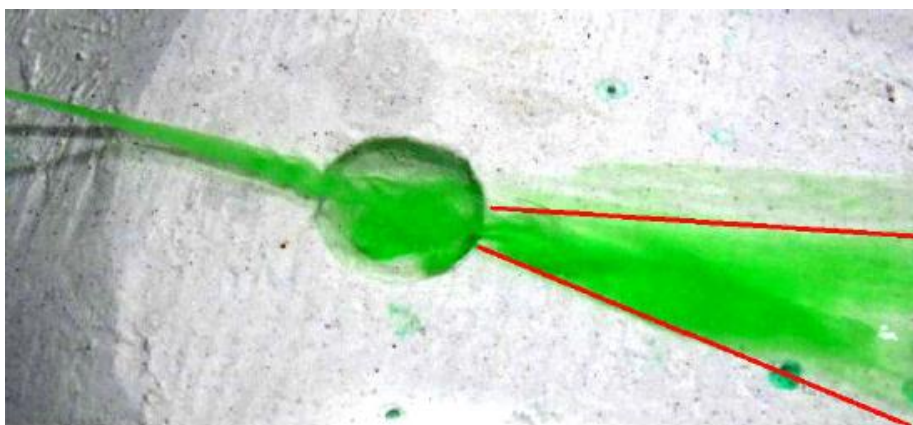


图42 表面结构单元部分边界层图

如图42, 平稳气流即边界层层流在流经该表面结构后得到的是紊乱的湍流也印证了之前的推导。

水洞实验结论: 球冠状凹坑内的确存在着内部逆向涡流, 并且有增厚边界层的作用。这与CFD数值模拟分析的结果完全相同

7 研究结论

在研究过程中, 经过理论分析和实验验证, 完成以下研究工作:

1. 建立了一套完整的不光滑表面结构减阻理论——基于边界层的内部逆向涡流理论, 完整阐述从表面结构特征到摩擦和压差阻力减小的过程。定性建立物理模型。从气体微团的角度分析相关参数的计算方法。
2. 设计制作了一套利用水洞用水等效模拟空气流场的装置, 使用染料描绘流谱。

并克服了一系列实物实验存在的问题，减小系统误差。并且装置具有方便操作，结构可靠合理，能够满足一般性地解决流谱分析，并在一定程度上获得阻力数据。

3. 利用计算机数值模拟技术分析了表面结构的成因和应用规律，即表面结构主要的作用部位是在最大横截面侧/顶面上。为能够合理地对具体的实例进行应用打下了良好的基础。
4. 通过沙盘风洞实验从自然界抽象出三种表面结构，都具有良好的减阻效果，并且气动稳定性良好。

得出以下结论：

1. 三种表面结构减阻机理完全相同，通过数值模拟和水洞染料示踪都证实了内部逆向涡流的存在。
2. 这类不光滑减阻表面结构的减阻率随速度的增加而增加。且综合各类不光滑减阻表面结构，而完善出的复合型表面结构有着突出的减阻效果。
3. 不光滑减阻表面结构高效却成本低廉、尺寸小、覆盖布局灵活，结构形状与矩阵设计可随运行速度改变。对各类有着减阻要求的物体能够很好地适应。
4. 水洞设备在特殊条件的流体场实验中有着成本低廉、效果良好、结构简单实用的特点，用途广泛。

在汽车、火车、高铁、舰艇、飞机等高速运行的现代化装备越来越多的年代里，探索新的表面构造，减少空气、水流的边界后流场进行层流控制，减少阻力具有极大的意义。在不远的将来，相信不光滑减阻表面结构大有用武之地。

8 致谢

感谢老师、父母及朋友们对我研究工作的默默支持，特别感谢吴维青教授和魏丽真老师对我的帮助和指导。没有日日夜夜父母的陪伴和理解，没有时时刻刻老师们给予的帮助。我不可能在自己感兴趣的研究课题上行走至今。科学的世界浩瀚无垠，未来的路何其修远，吾等仍需孜孜求索。

9 参考文献

- 【1】鄂学泉 流谱实验装置及显示技术 中国科学院力学研究所.
- 【2】孔斌. (2008). 基于空气动力学的车身造型设计. (Doctoral dissertation, 武汉理工大学).
- 【3】彭世冲, 董彦非, & 阴小晖. 空气中非光滑凸包面减阻性能的数值仿真研究. 计算机仿真, (2013), 30(12), 35-39.
- 【4】李济绵. (2002). 匀速水流原理及其应用. 物理教学探讨, 20(4), 43-43.
- 【5】安德森 (Anderson. J. D.) 著. 杨永, 宋文萍, 张正科等注. 空气动力学基础. 航空工业出版社.
- 【6】杨琳, 邹正平, 宁方飞, 等. 边界层转捩的数值模拟[J]. 航空动力学报, 2005, 20(3):355-360.