



微信公众号

烟线流场可视化与航华SW02

大连航华科技有限公司

2021-12-3

内容

- 什么是烟线可视化
- 不同种类的注入式流场可视化方法：连续vs短暂
- 烟线的历史、特点、优缺点
- 航华SW02烟线使用方法

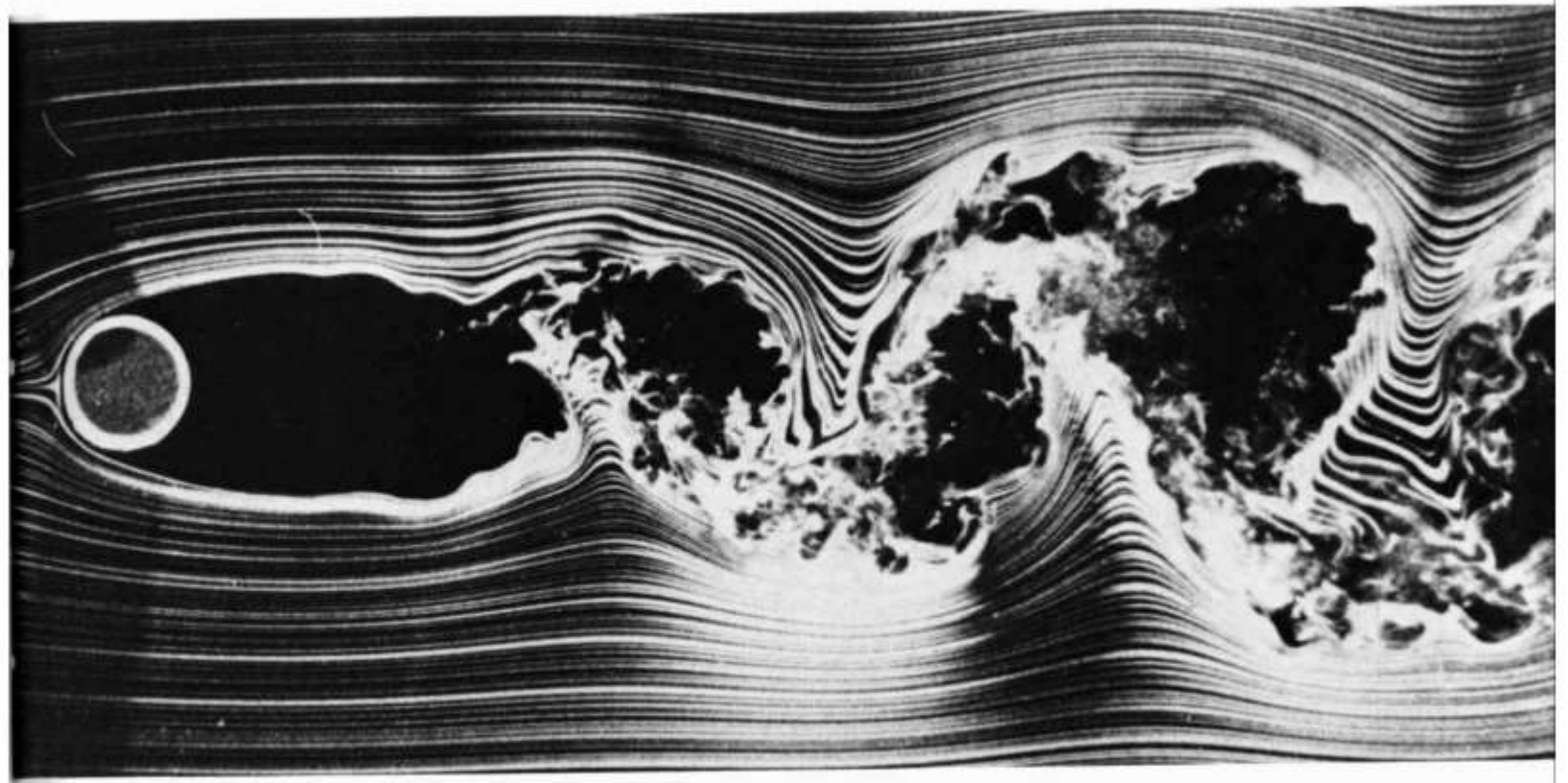
眼见为实

SEEING IS BELIEVING

An Album of Fluid Motion

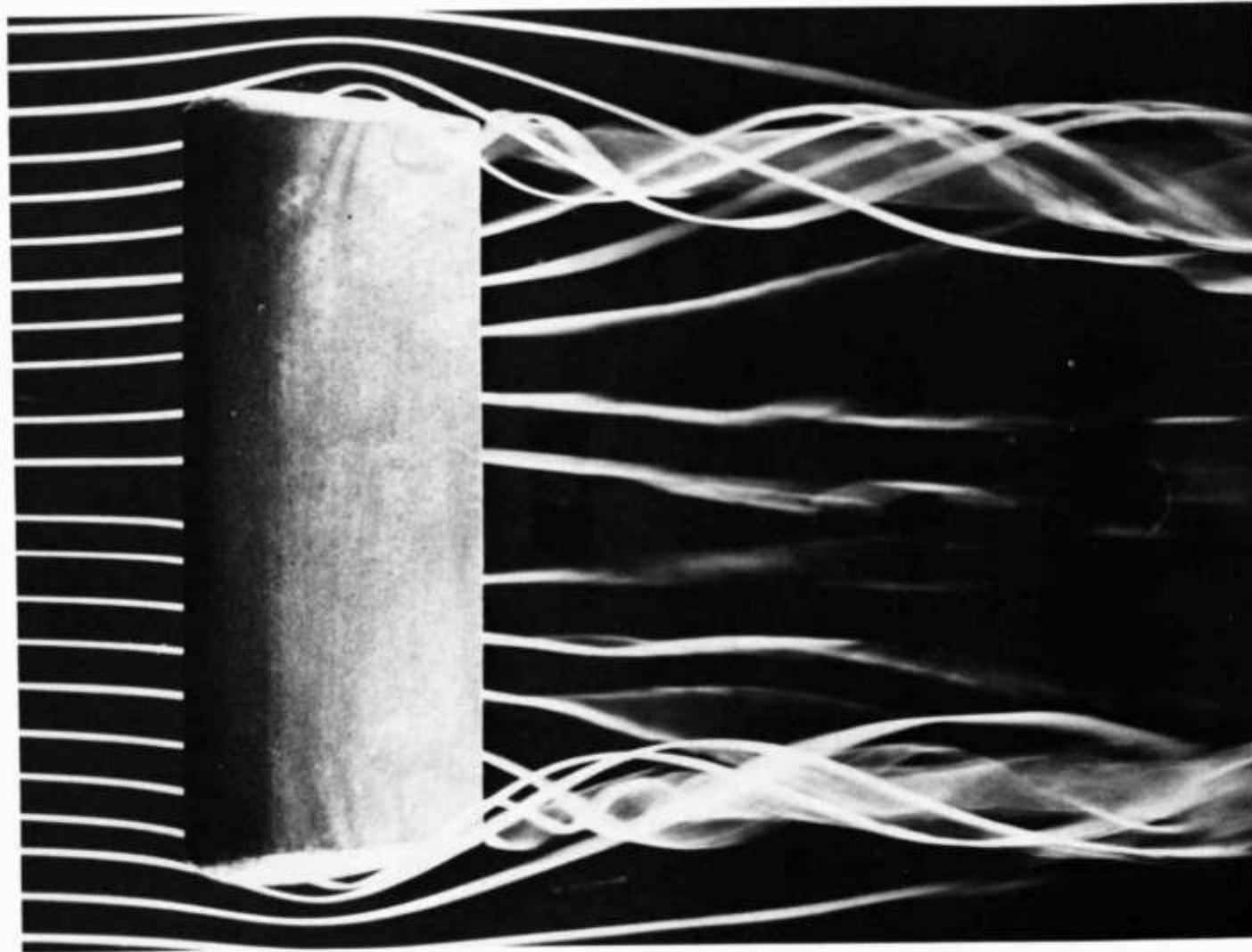
Assembled by Milton Van Dyke

Department of Mechanical Engineering
Stanford University, Stanford, California



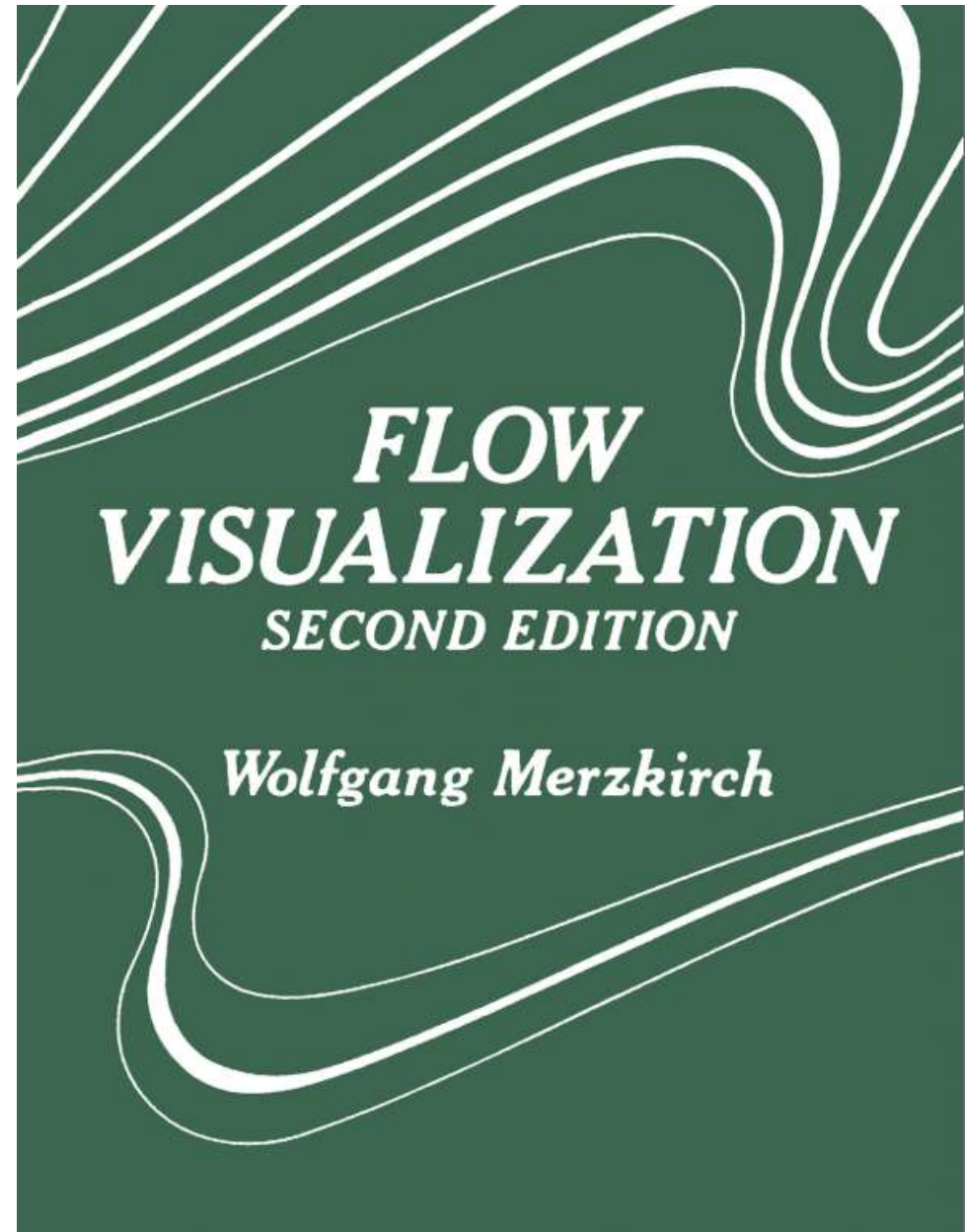
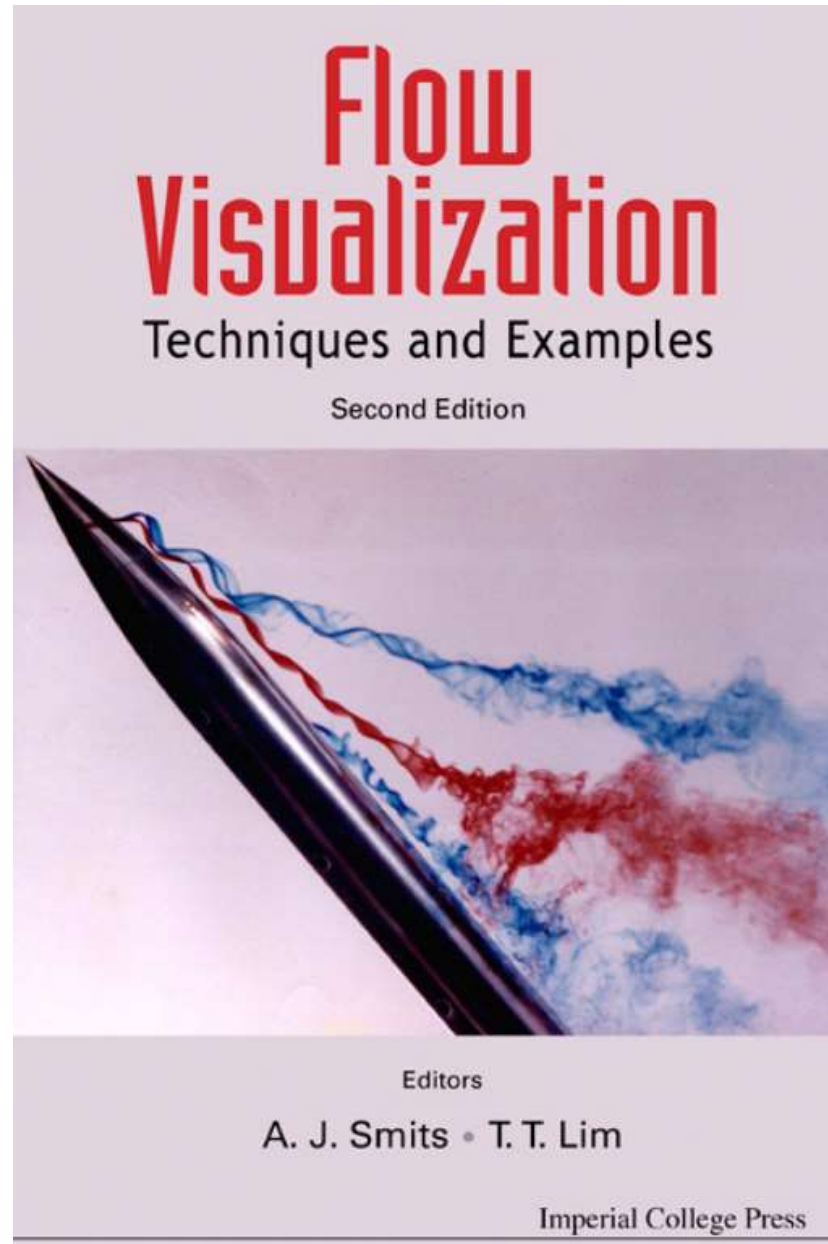
48. Circular cylinder at $R=10,000$. At five times the speed of the photograph at the top of the page, the flow pattern is scarcely changed. The drag coefficient consequently remains almost constant in the range of Reynolds

number spanned by these two photographs. It drops later when, as in figure 57, the boundary layer becomes turbulent at separation. Photograph by Thomas Corke and Hassan Nagib



86. Trailing vortices from a rectangular wing. Suction is applied so that at 24° angle of attack the flow remains attached over the entire wing surface, in contrast to the preceding photograph. The centers of the vortex cores there-

fore spring from the trailing edge at the tips. The model is made of perforated metal covered with blotting paper, and tested in a smoke tunnel at Reynolds number 100,000. Head 1982



烟管(Smoke tube) vs 烟线 (Smoke wire)

烟管

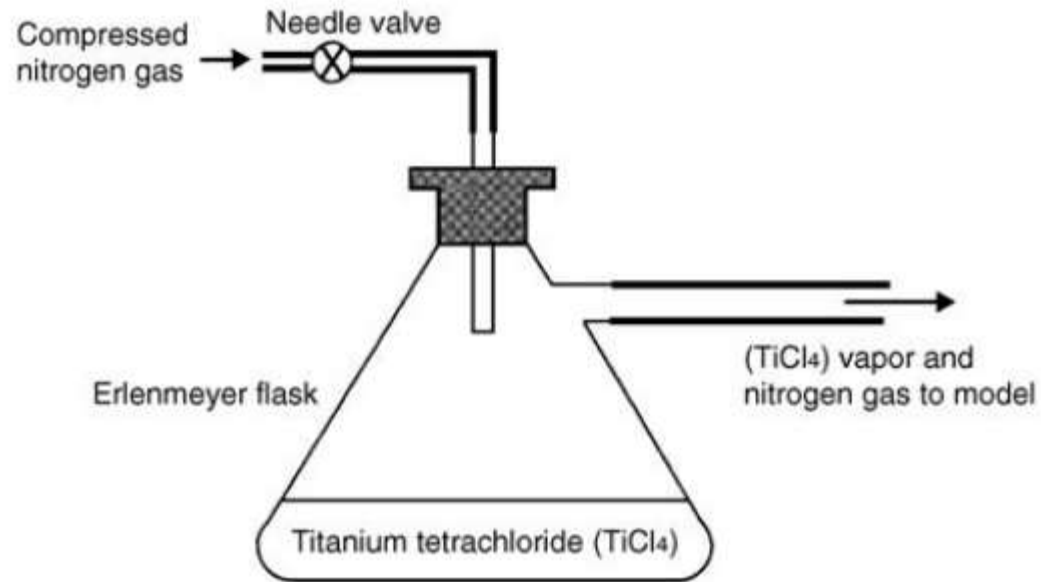


Figure 2. Diagram of a delivery system for titanium tetrachloride for flow visualization; adapted from Visser, Nelson and Ng (1988) (Image courtesy of A. Pelletier).

氯化钛

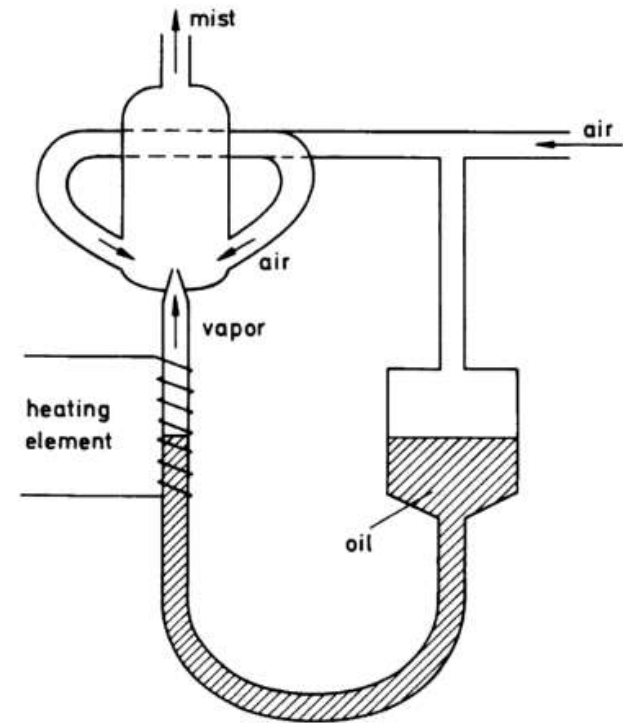


Fig. 2.5 Preston—Sweeting paraffin mist generator. (From Bradshaw, 1970.)

石蜡油

Mueller, T. J. (1983). **Flow visualization by direct injection.** In "Fluid Mechanics Measurements" (R. J. Goldstein, ed.), pp. 307-375. Hemisphere, Washington

TiCl₄四氯化钛

- 烟雾弹的主要组成部分之一
- 室温下，四氯化钛为无色液体，并在空气中发烟，生成二氧化钛固体和盐酸液滴的混合物。



对环境的影响

健康危害

侵入途径：吸入、食入。

健康危害：皮肤直接接触液态四氯化钛可引起不同程度的灼伤。其烟尘对呼吸道粘膜有强烈刺激作用。轻度中毒有喘息性支气管炎，严重者出现呼吸困难、呼吸脉搏加快、体温升高、咳嗽等，可发展成肺水肿。

毒理学资料及环境行为

毒性：属高毒类。

急性毒性：LC50400mg/m³（大鼠吸入）

危险特性：受热或遇水分解放热，放出有毒的腐蚀性烟气。

燃烧（分解）产物：氯化物、氧化钛。

语音 编辑

烟雾效果图

¥78.00 包邮 0人付款

发烟罐全新拍摄专用烟雾手弹发烟器
白色无味烟罐铁道具表演舞台

战军企业2 浙江 金华

管排

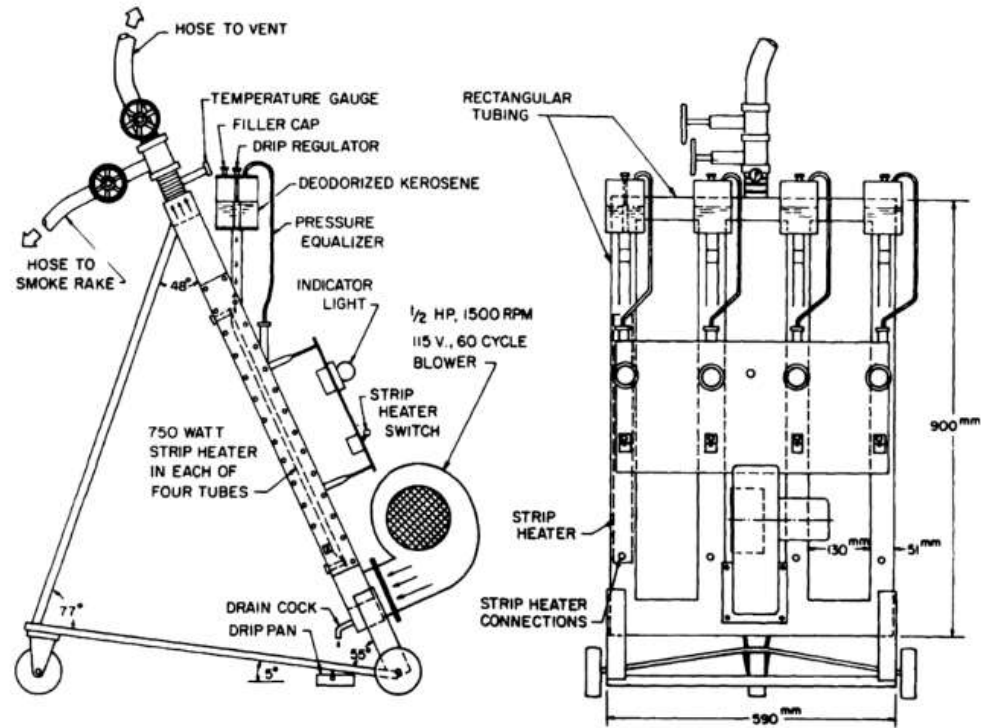


Fig. 2.6 Smoke generator designed at the University of Notre Dame. (From Mueller, 1983. Published by Hemisphere Publishing Corporation.)

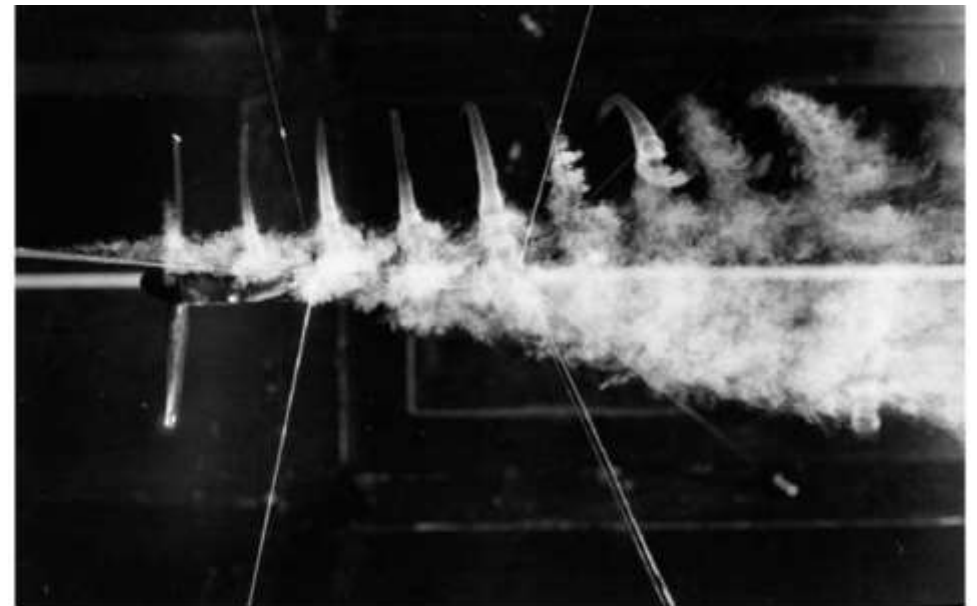


Fig. 5. Flow visualisation with smoke, revealing smoke trails being 'sucked' into the vortex spirals (from [16]).



舞台发烟机

- 廉价的选择



¥ 30.00 包邮

19人付款

1500w烟雾机小型便携LED恒温婚庆
酒吧气氛道具喷烟机遥控舞台喷雾机

果儿电子银能专卖店

广东 广州

掌柜热卖

广告



¥ 178.00 包邮

100+人付款

1500W烟雾机小型便携LED恒温喷雾
机婚庆酒吧遥控发生器舞台干冰机

裕峰电器旗舰店

广东 广州

掌柜热卖

广告

烟雾注入方法

- 注入速度需要与流动速度相近
 - 如果过快、过慢都应产生粘性剪切作用，形成漩涡，加速混合



烟线

- 烟注入速度与来流速度相同
- 烟线保持距离长

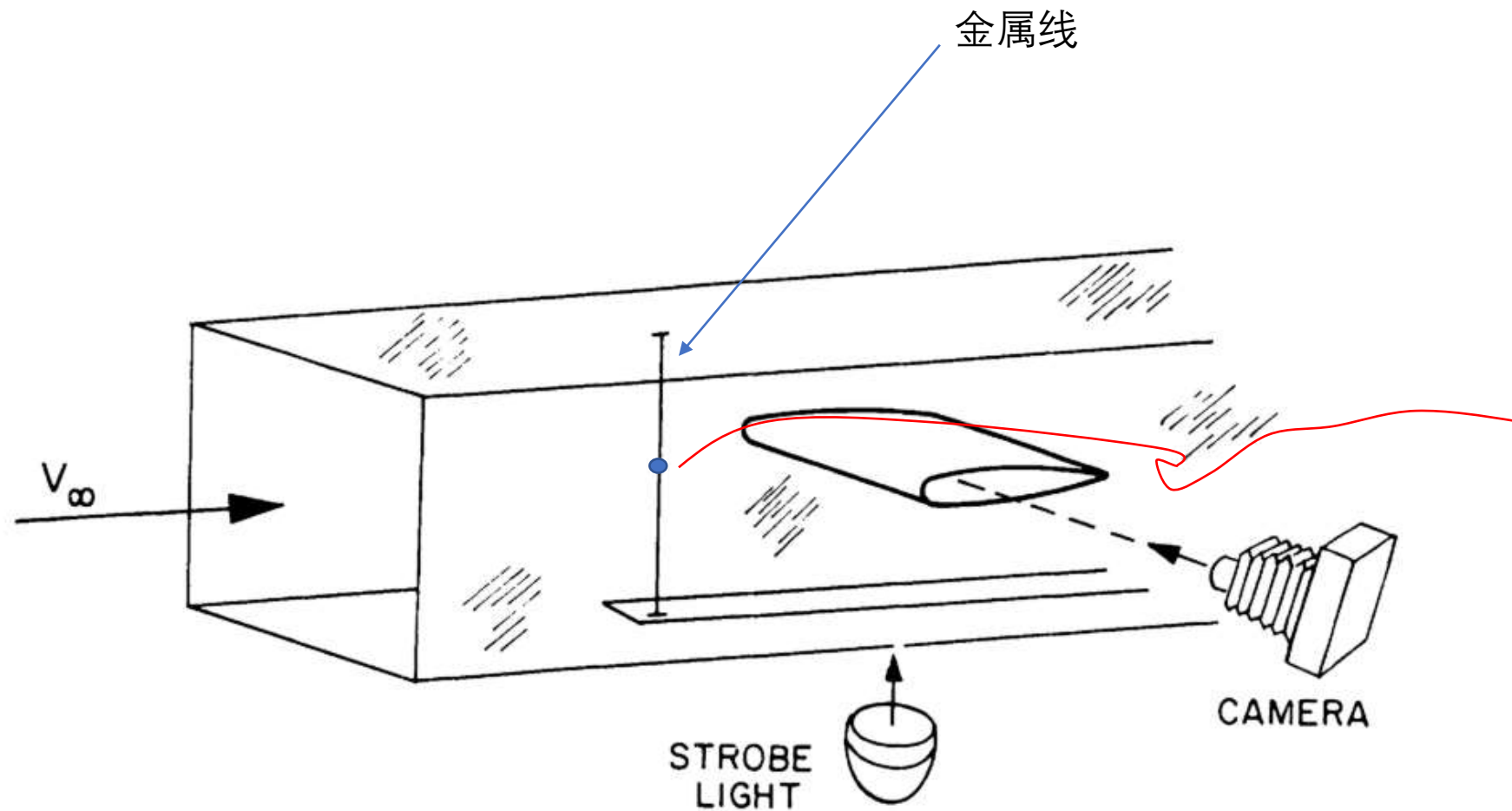
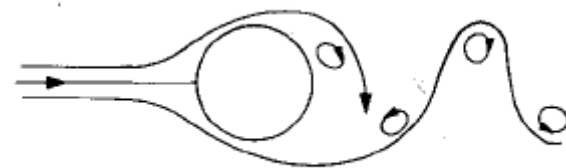


Fig. 2.9 Locations of smoke wire, camera, and light source for vertical wire position in wind tunnel. (From Mueller, 1983. Published by Hemisphere Publishing Corporation.)

选择金属线

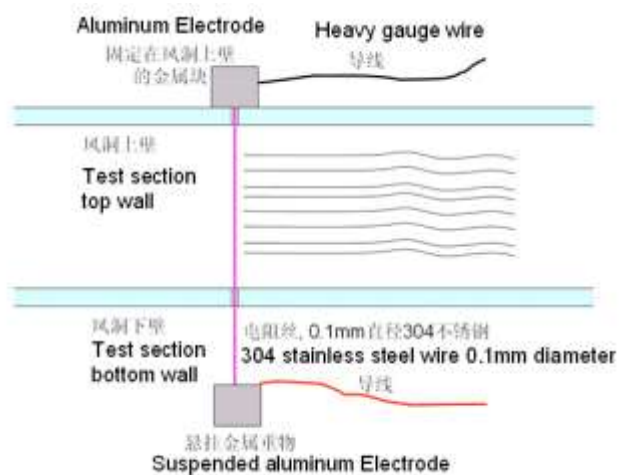
- 直径（尽量小）
 - 金属线对流场干扰要尽量小： $Re_d < 40$
 - 通常小于0.1mm，可选择0.1mm不锈钢、0.08mm钨丝等
- 强度（尽量大）
 - 直径小于0.08mm金属线强度有限，不推荐
 - 若选择 $d=0.08\text{mm}$ ， $Re_d=40$ 对应的速度为7.5m/s
- 电阻（适中）
 - 不锈钢电阻率 $0.73 \Omega \cdot \text{mm}^2 \cdot \text{m}^{-1}$ ，电阻约为70~90 Ω/m
 - 0.1mm 直径不锈钢丝，若电压70V
 - 0.5米电阻约为40 Ω ，电流约为2A
 - 1.0米电阻约为80 Ω ，电流约为1A



c) $40 \lesssim Re \lesssim 150$ Laminar Vortex Street

安装金属线

- 在流场中拉紧
- 因放电加热金属线会变长，需要连接重物，拉紧金属线



发烟油

- 石油精炼制品
 - 矿物油: 液态石蜡油
 - 煤油
- 舞台发烟液
- 涂油
 - 毛刷 
 - 直径0.1mm不锈钢
 - 每厘米7-8个液珠
 - 冷藏发烟油可在一定程度上改变液珠大小



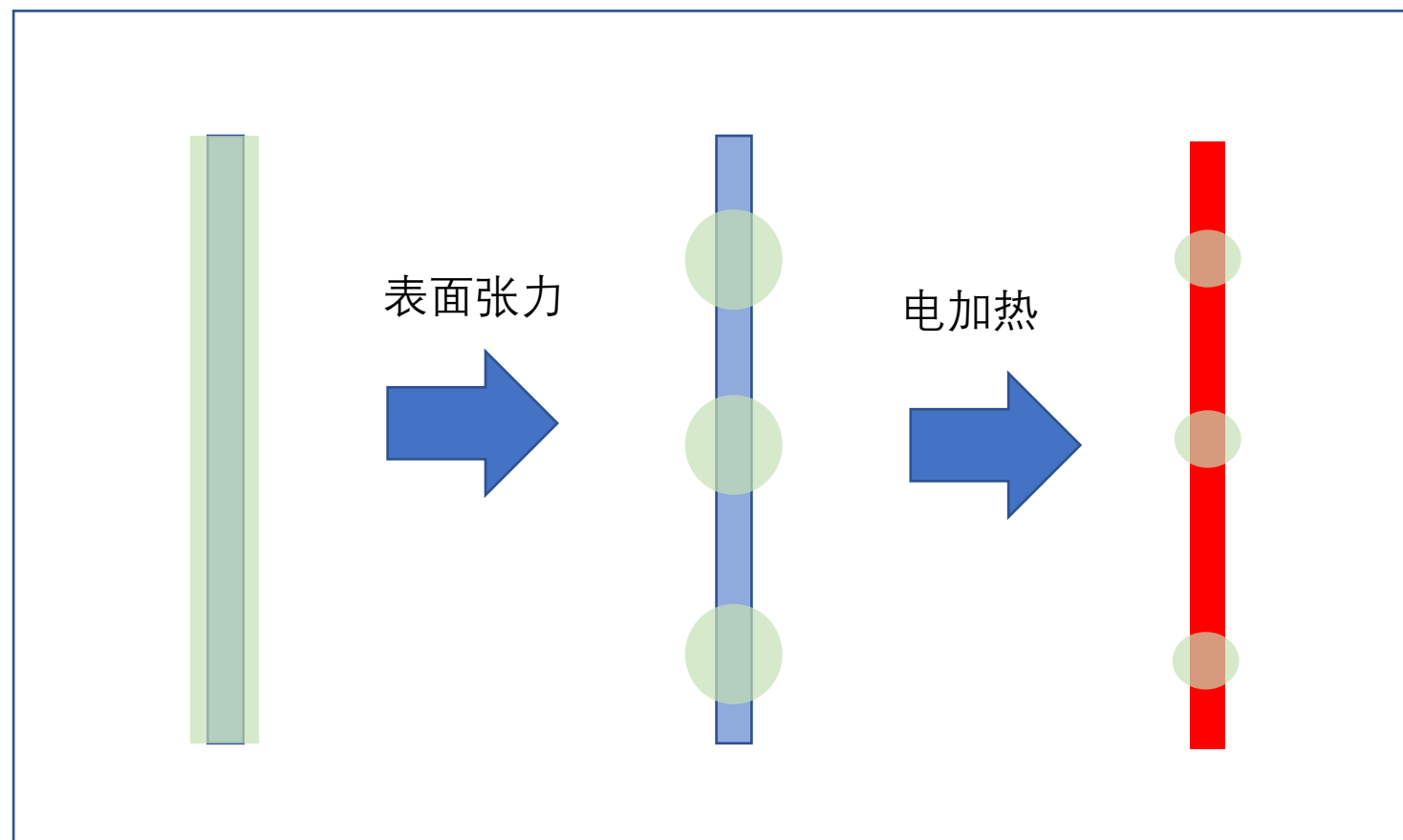
医用石蜡油



煤油

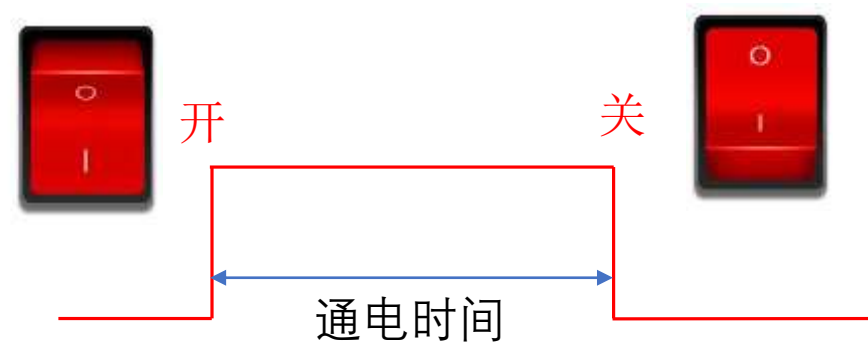


SAFEX



电源

- 提供超过1A的电流：1-2微米油雾
 - 交流电源
 - 自耦变压器
 - 直流电源
 - 电流更平稳
- 问题：
 - 发烟时间非常短
 - 0.2mm直径液珠发烟时间约20-30毫秒
 - 目视隐约可见
 - 如何拍摄是个挑战
 - 手动控制通电时间
 - 精度有限，通常会超过0.5s
 - 过长，会烧断金属丝



光源

- 闪光时间尽量短、光强尽量强
 - 闪光灯 Electronic flash, duration 1/200s to 1/4000s
 - 频闪灯 Strobe light (Stroboscope, strobe), repetitive flash, duration $\sim 20\mu\text{s}$
 - 脉冲激光 Pulse laser (PIV laser), duration $\sim 10\text{ns}$



Canon Speedlite 600EX-RT



Martin 3000W Strobe
Light DMX 512 Light



Litron laser

部分使用烟线的研究

N. Gao and X.H. Liu / Theoretical & Applied Mechanics Letters 8 (2018) 378-383

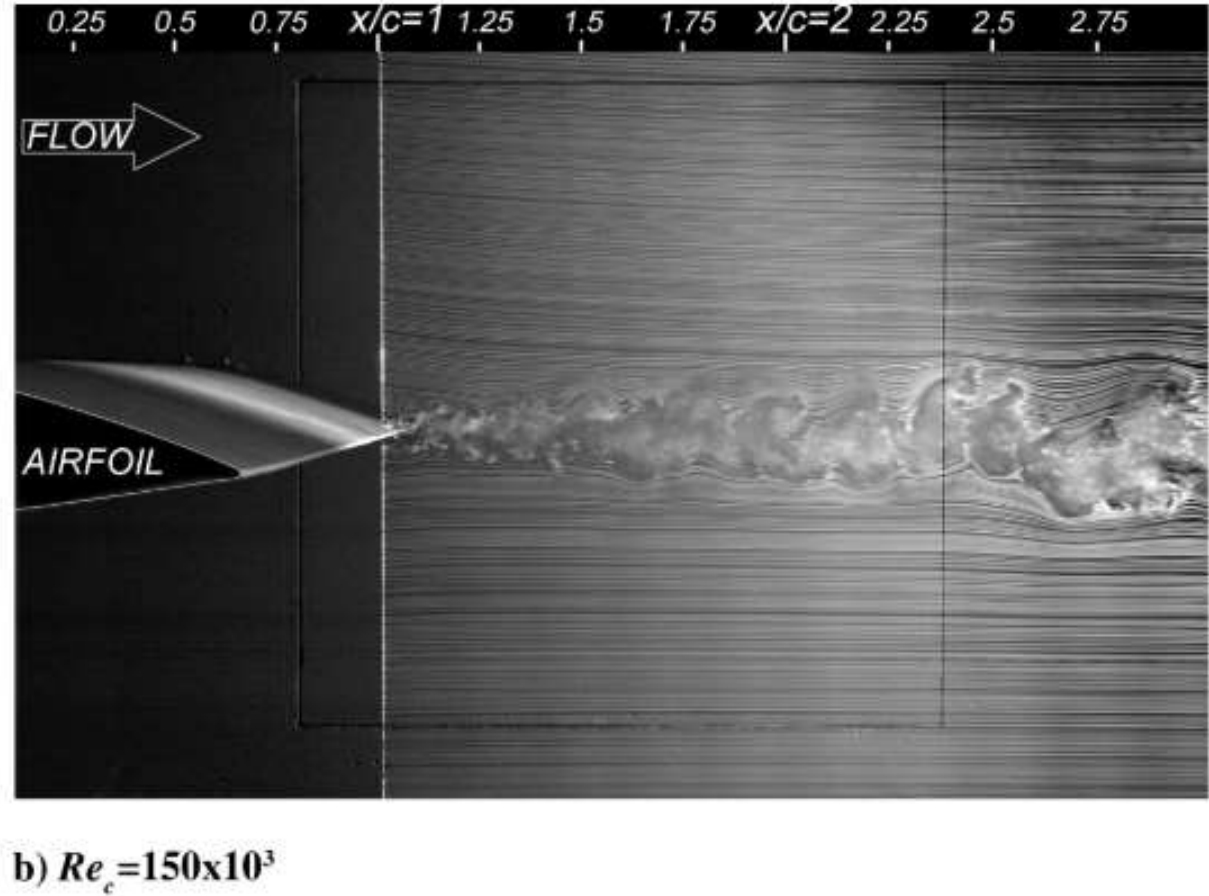
379

Table 1 Summary of the existing smoke-wire flow visualization technique.

Investigation	Year	U_{∞} (m/s)	d (mm)	Re_d	Oil	Power source	Timing control
Mueller et al. [2-4]	1980	3.0	0.025, 0.076, 0.152	<30	Mineral oil	40–80 V AC	NE555 timer
Cimbala et al. [5, 6]	1988	2.0	0.13	12	Mineral oil	N/A	NE555 timer
Swiryczuk et al. [7]	1993	2.0	0.11	14	N/A	20–30 V DC	Timing circuit
Huang and Lin [8]	1994	1.0	0.1	20	Mineral oil	N/A	Manual
Prasad and Williamson [9]	1997	6.2	0.1	40	Mineral oil	N/A	NE555 timer
Lee et al. [10]	1999	3.0, 5.0	0.1	19, 32	Safex, paraffin	25–35 V DC	74LS160 counter
Al-garni et al. [11]	2000	5.0	0.1	32	Mineral oil	65 V DC	Manual
Lee et al. [12]	2000	N/A	0.15	N/A	Safex	N/A	N/A
Yen et al. [13, 14]	2007, 2014	3.1	0.2	40	Mineral oil	N/A	Manual
Wang et al. [15]	2009	2.0	0.05	<30	Paraffin	N/A	N/A
Yarusevych et al. [16–20]	2009–2013	7.8	0.076	40	Water glycol	Regulated AC	Manual
Sohn and Chang [21]	2012	3.6	0.25	61	Paraffin and oil	50 V AC	NE555 timer
Kim et al. [22]	2014	2.0–4.0	0.14	45	N/A	N/A	Electronic relay
Nadesan et al. [23]	2014	1.5	0.193	36	Paraffin	DC	N/A
Current	2018	2.6–12.9	0.08	12–64	Paraffin	Capacitors	Micro-controller

Yarusevych et al. 2012

- Nikon D70s 相机
- Nikon SB 800 Speedlight 闪光灯
- 电源：自耦变压器
- 0.15mm 金属丝
- 最大来流速度7.8m/s
- glycerol-based smoke-generating liquid 丙三醇, 发烟时间1s
- **手动**加电、拍摄



Kobayashi et al. 2014

- 注烟
- 高速摄影机拍摄
- 全手动

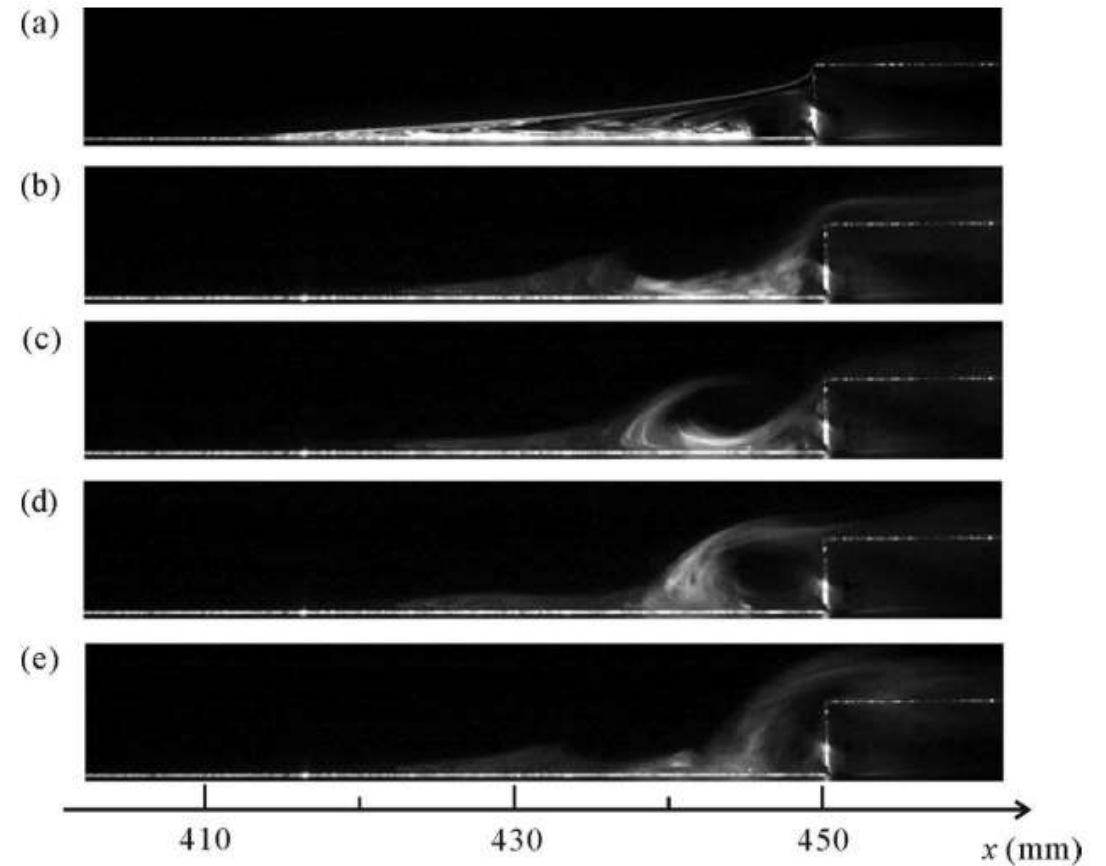
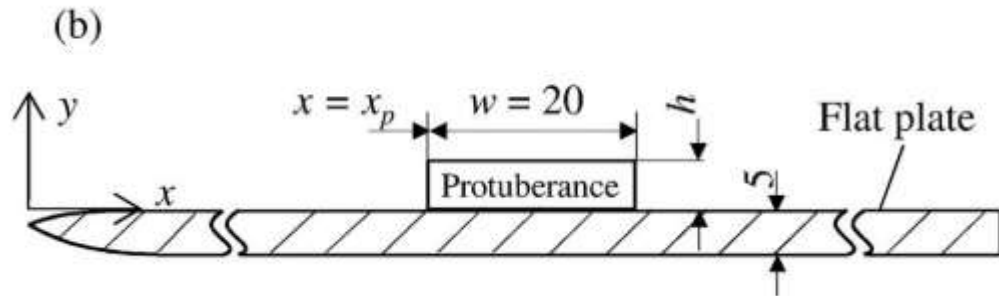


FIG. 6. Flow visualization in the separation region ($h = 4.9$ mm and $x_p = 450$ mm). (a) $U_\infty = 20$ m/s and (b)–(e) $U_\infty = 30$ m/s. The time interval between pictures is 0.4 ms in (b)–(e).

Lee and Lee 2000

- 射流速度 6m/s
- 0.15mm 金属丝
- SAFEX fog fluid
- 脉冲激光 Nd-YAG laser 6 ns
- Nikon F5单反相机, shutter 1/60 s
- 同步器控制动作

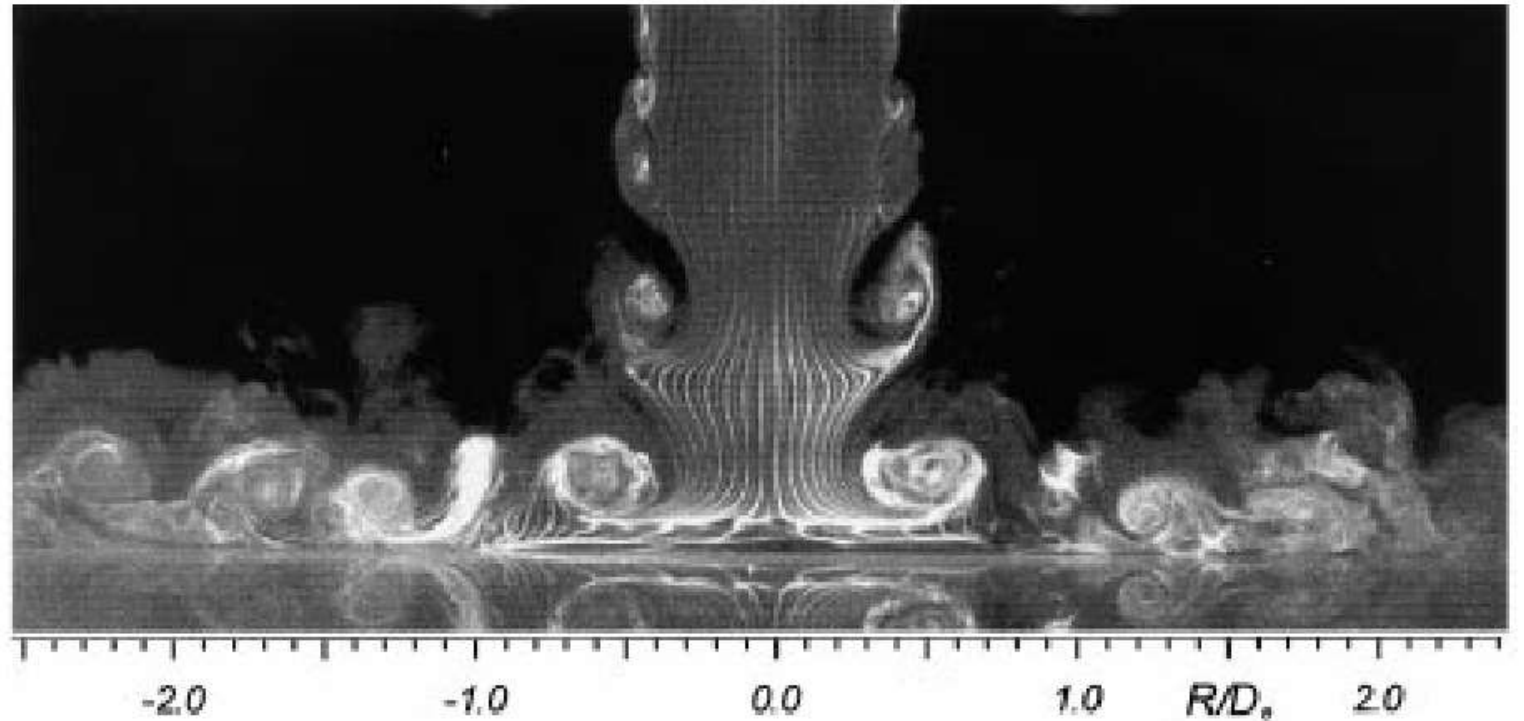
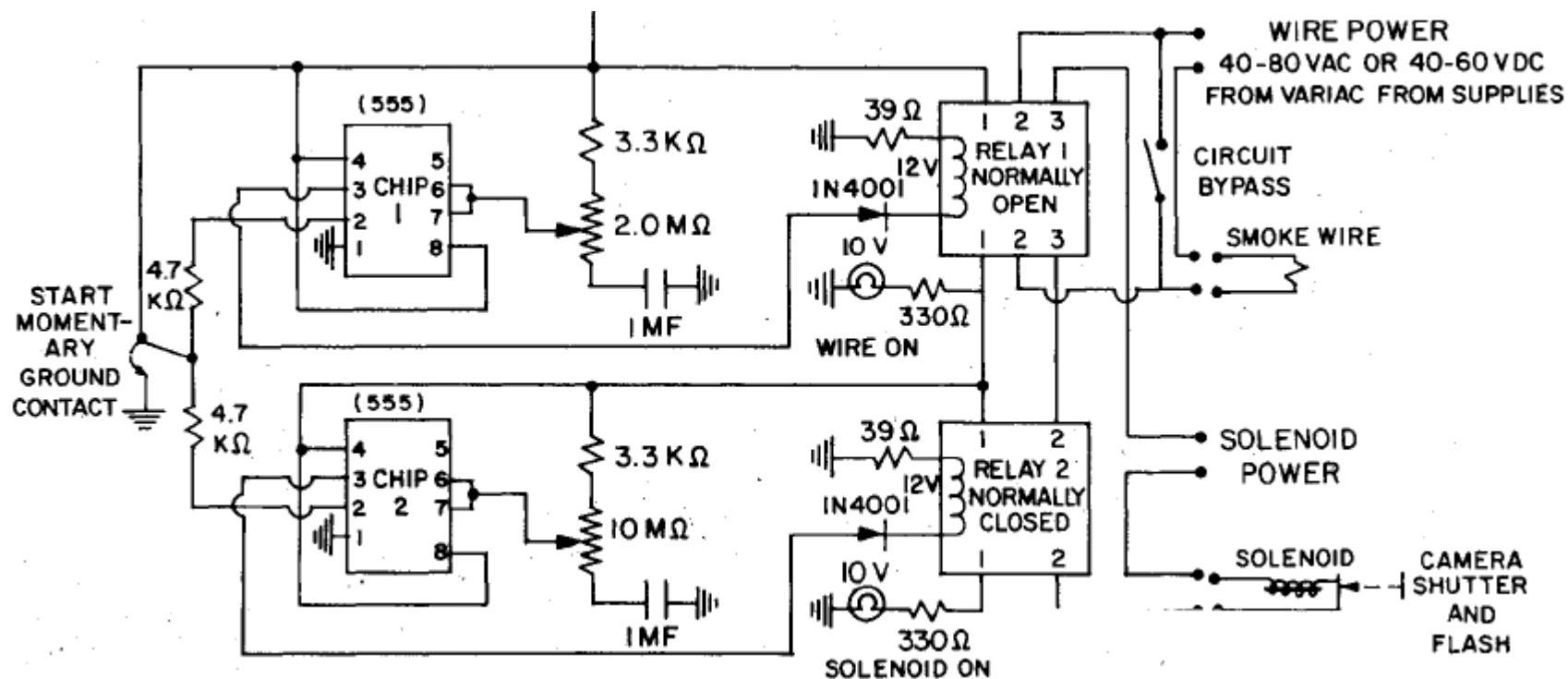


Fig. 4. Flow visualization of axisymmetric impinging jet ($AR = 1$) for $Re = 10,000$ and $L/D_0 = 2$.

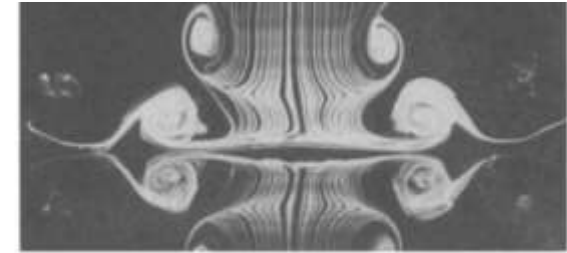
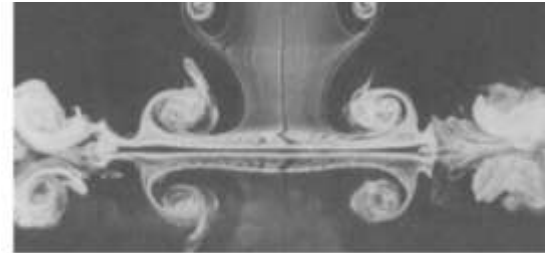
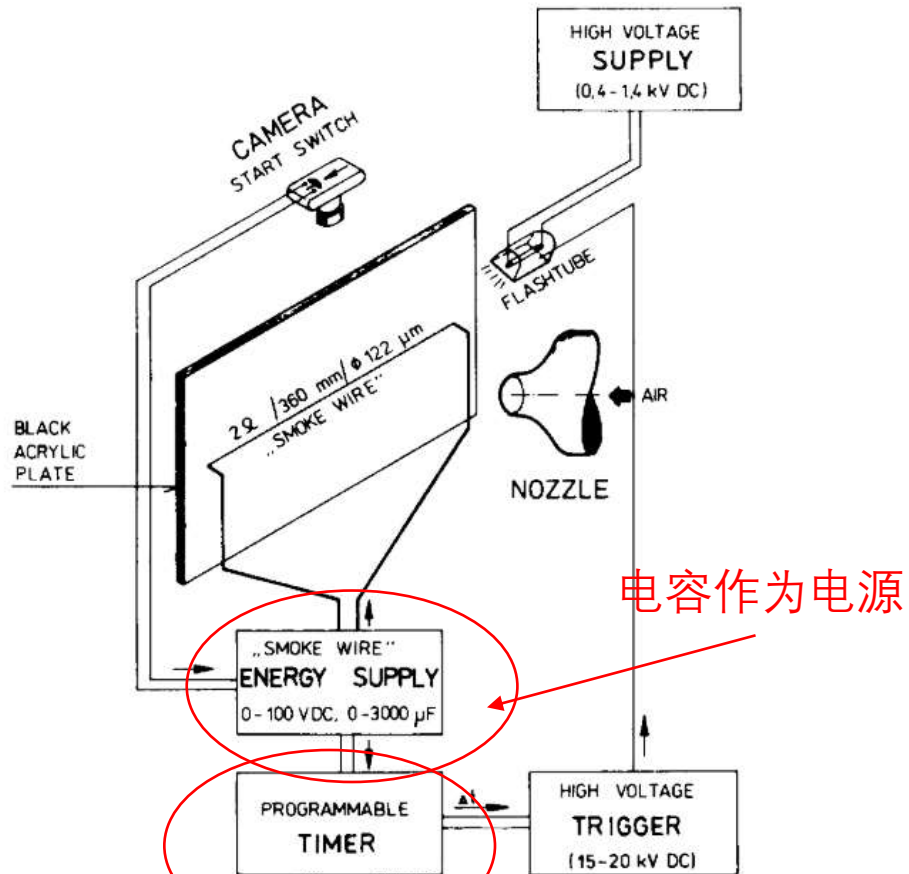
电子同步控制器

- Batill & Mueller (1980)

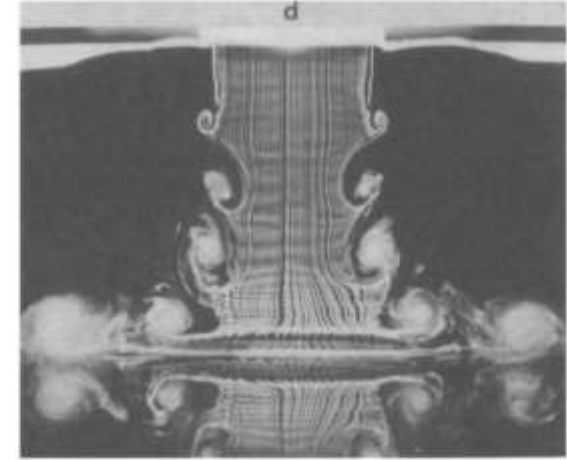
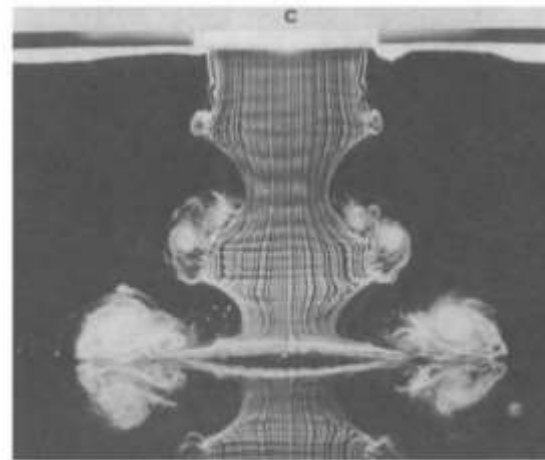


Popiel and Trass 1991

- 电容+电子控制器



1m/s



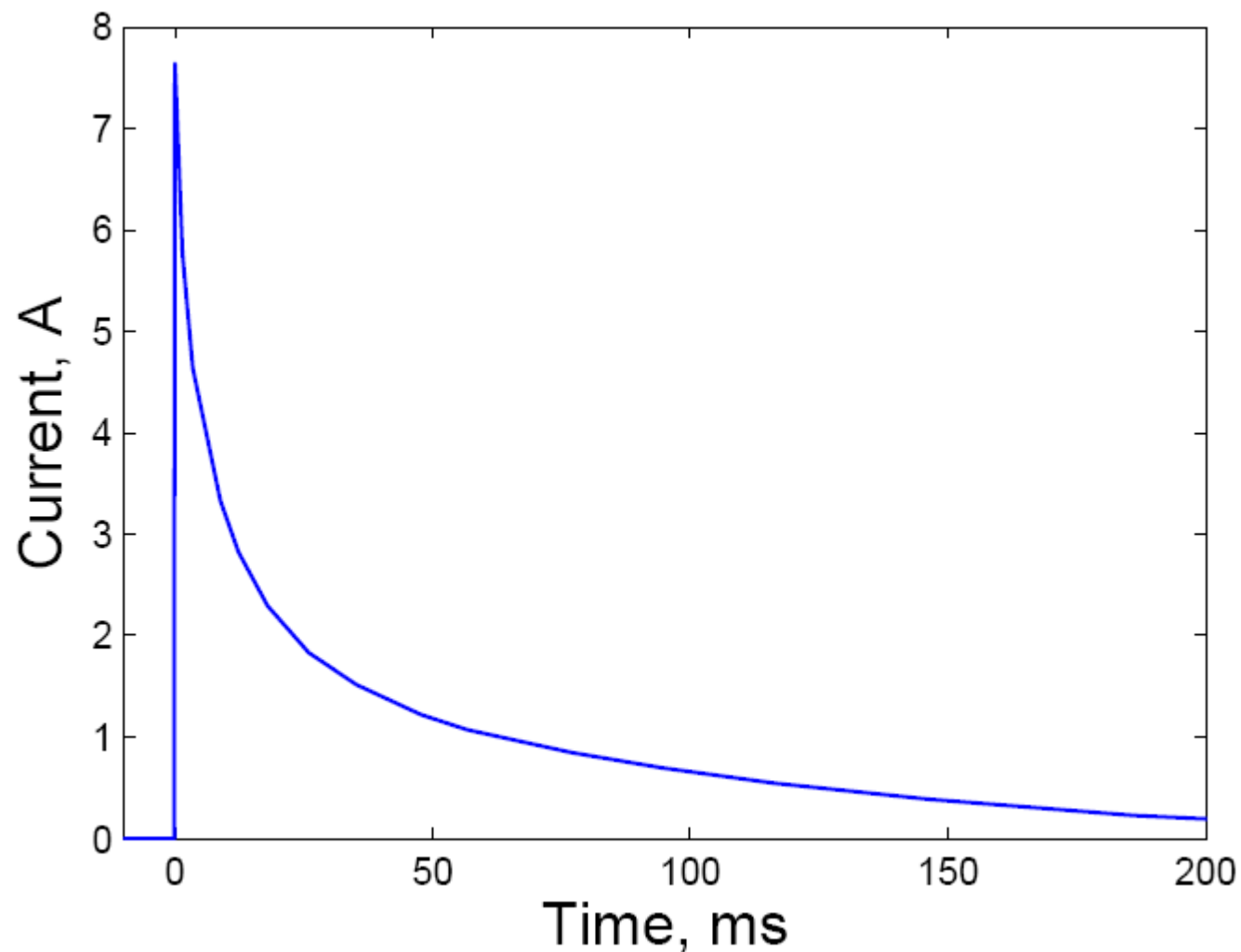
6m/s

Figure 14. Round impinging jet at $H/D = 2$. (a, b) $Re = 3500$; (c, d) $Re = 20,000$.

Figure 3. Schematic arrangement of the apparatus for a smoke-wire flow visualization.

电容放电

- 放电时间非常短
- 4000微法，充电70V电容器，导线电阻10欧姆时放电曲线
- 放电时间约50毫秒
- 放电、拍摄需要有电子设备协助



分类

昂贵

- 高速相机
- 脉冲激光
- PIV控制器



航华SW02

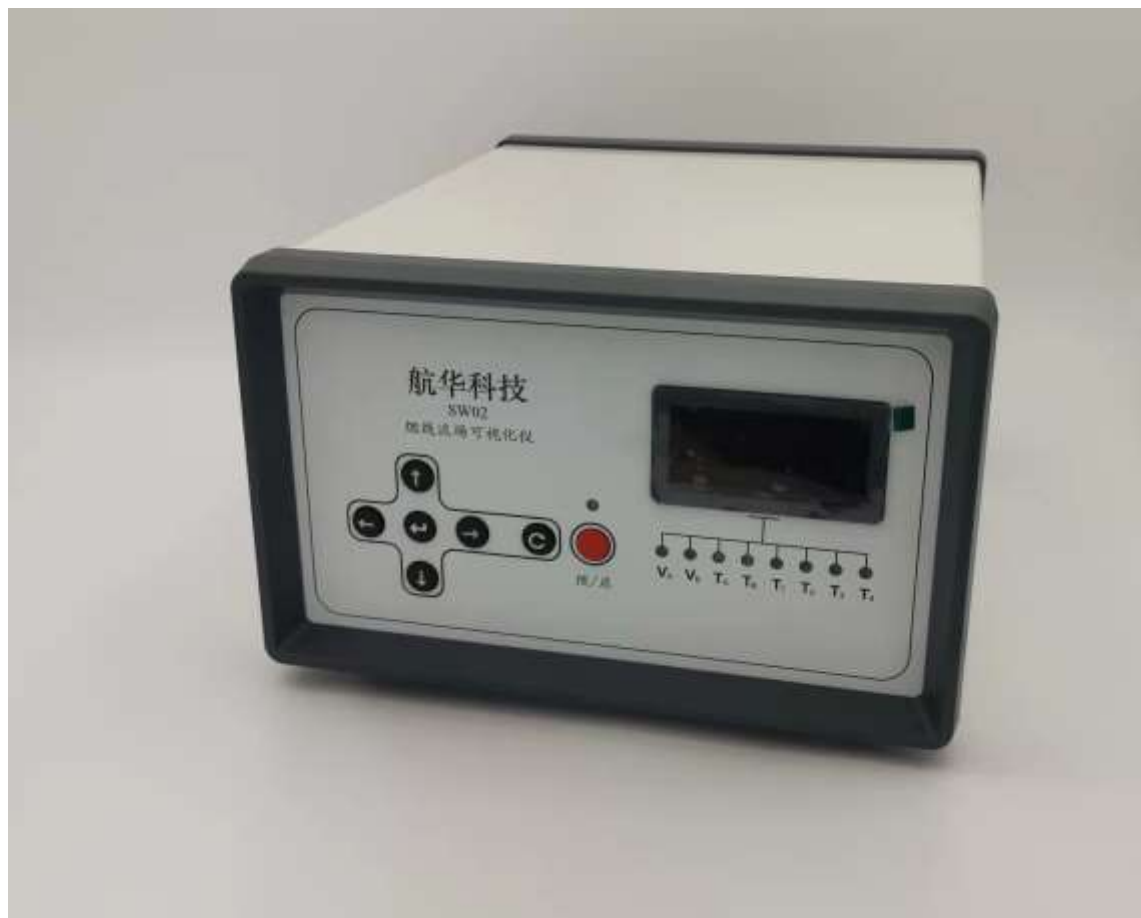
- 单反相机
- 闪光灯
- 电容放电
- 电路控制



费力、不可靠

- 单反相机
- 闪光灯
- 全手动

航华SW02烟线流动可视化仪



系统安置1： 金属线

- 将烟线连接线插在后面板的1号烟线连接线插口上；
- 将金属丝（烟线）与烟线连接线相连；电阻丝上端应固定，下端应悬挂重物，以保证电阻丝在通电伸长以后不弯曲，如图所示。另注，金属重物不应太重（<100g），否则会在放电瞬间拉断电阻丝；

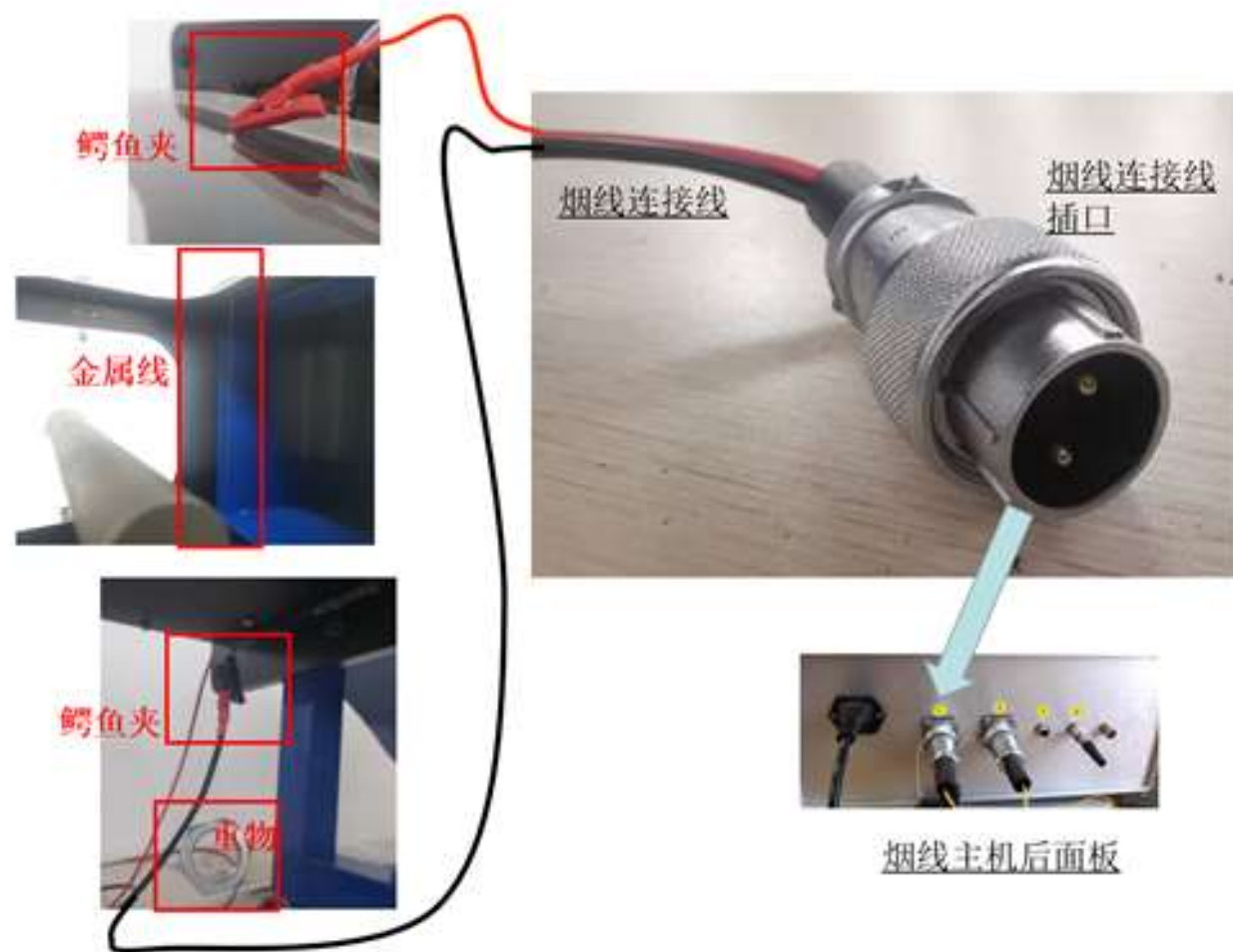
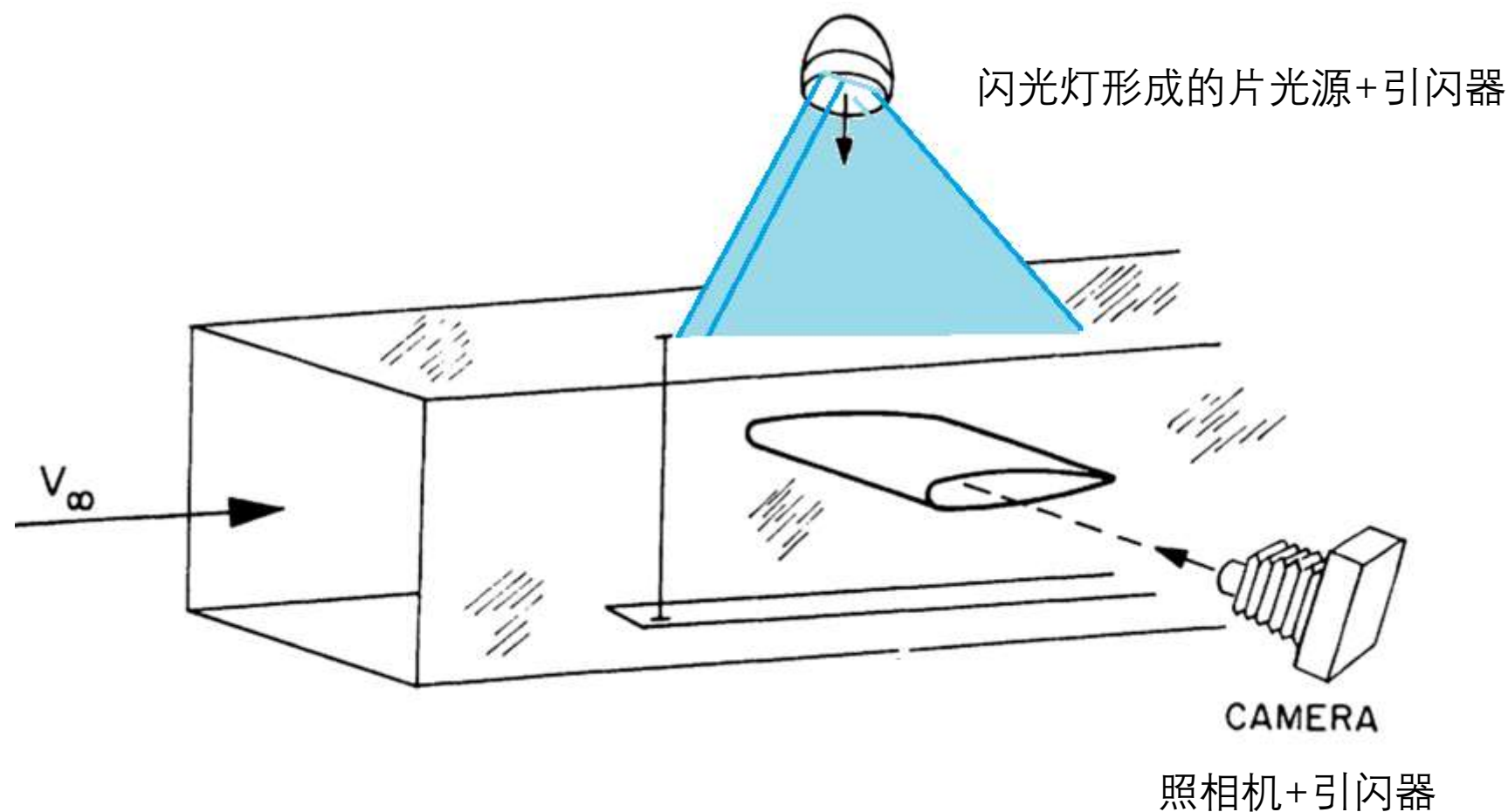


图-4 推荐的一种电阻丝(烟线)安装方式

系统安置2：相机、闪光灯

- 相机建议放在风洞之外
- 闪光灯在风洞之上，
 - 光不在相机一侧
 - 光不直射相机方向
- 模型及风洞后侧板使用哑光黑白喷漆喷黑



闪光灯建议通过引闪器引闪

- 避免使用引线，方便



片光发生器

- 利用两条狭缝产生一面片光



相机

- 将快门连接线一端与相机快门线插口相连，另一端与后面板的1号快门线插口相连。



对焦

- 设置相机

- 调节摄影模式为手动“M”;
- 设置ISO值200;
- 设置快门时间1/50秒;
- 设置光圈大小为5.6 ;
- 闪光灯输出为1/32 (这些仅仅为建议初始值,见图5及图6a);
- 相机镜头stabilizer调至off , 关闭“防抖”功能。

- 调焦

- 转动镜头变焦环调节焦距 (物体大小)
- 在烟丝附近放置协助对焦物体, 转动镜头对焦环进行对焦。建议按disp键, 在LCD显示的实时图像上进行对焦, 效果更好。

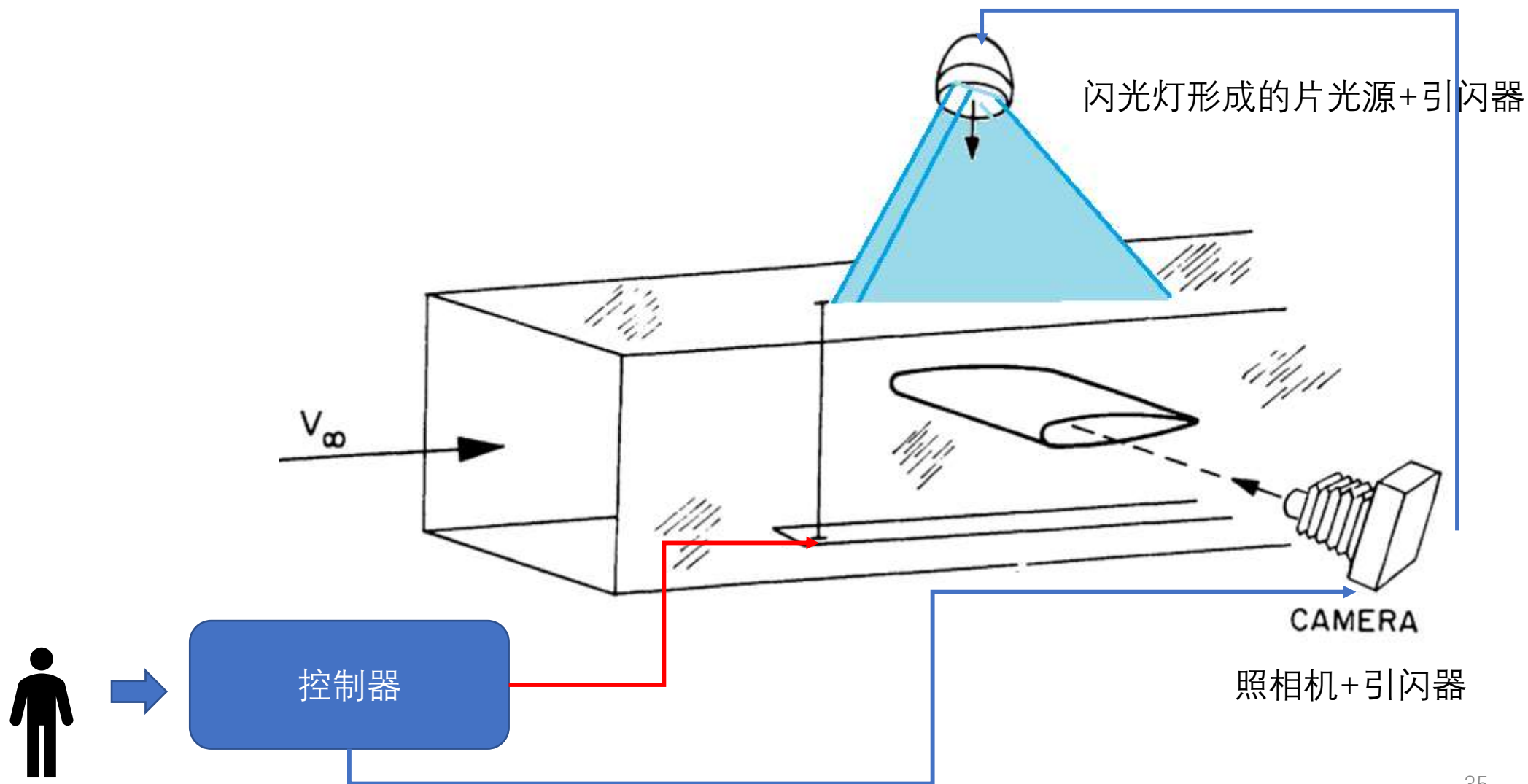


反光镜预升

- 相机响应命令的时间更短、重复性更好

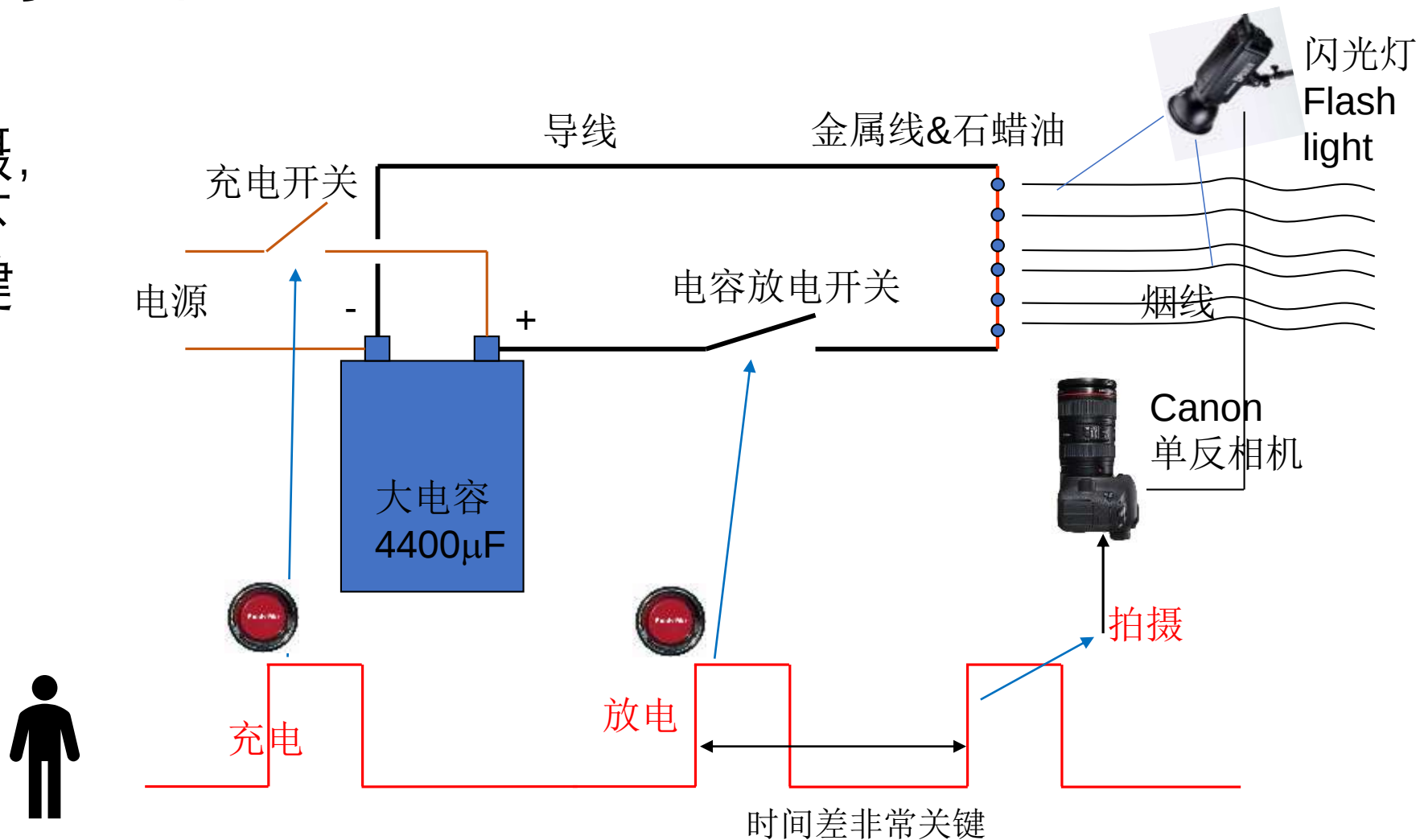


系统安置3： 控制系统



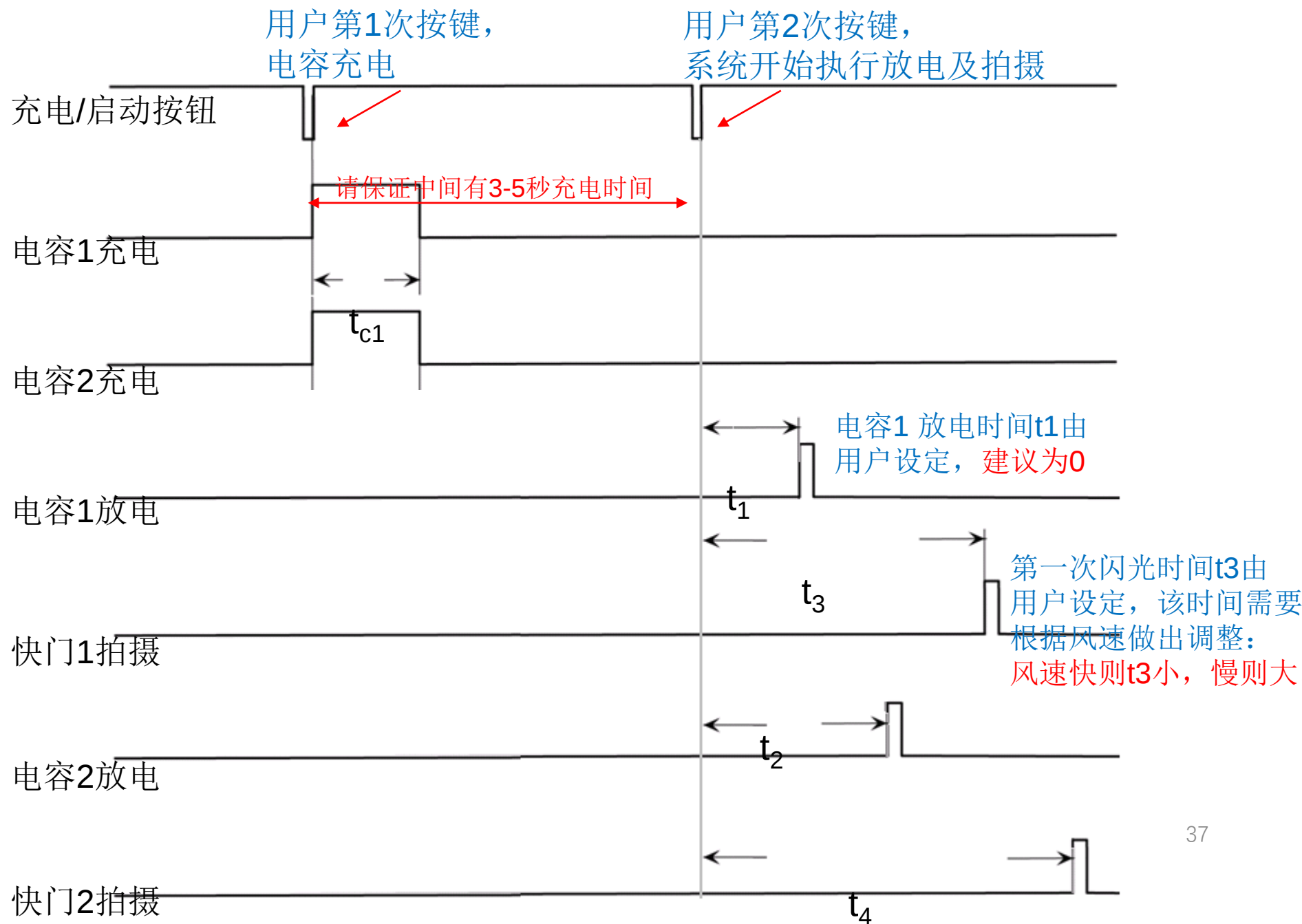
系统原理图

- 每次拍摄，用户按下两次按键



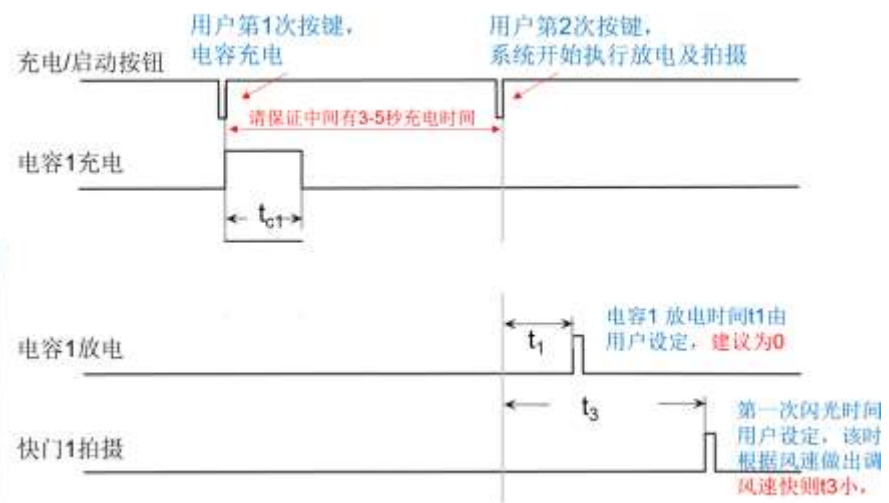
时序图

	建议值
V1 (V)	65
V2 (V)	0
t1 (ms)	0
t2 (ms)	0
t3 (ms)	30
t4 (ms)	0



参数t3

- 烟还没到，需要增加t3



参数：ISO

ISO的影响

华为Mate20拍摄



光圈F1.8,快门1/60,ISO=50



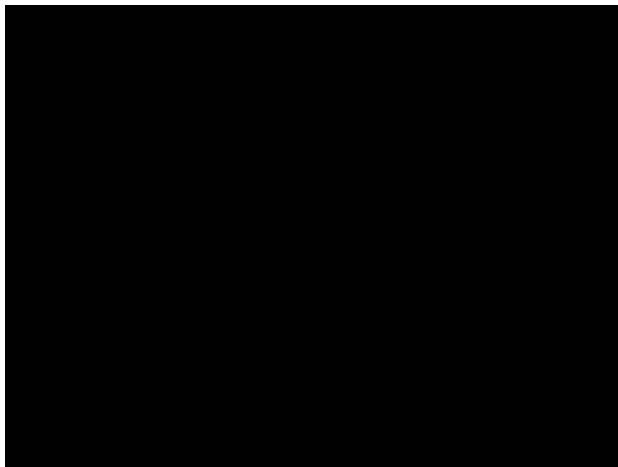
光圈F1.8,快门1/60,ISO=500



光圈F1.8,快门1/60,ISO=3200

ISO 感光度	大（比如3200）	感光度高，图像较亮，适于照明不好的情况，好，但图像中“噪点”较多，图像质量不好。背景中其他的物体的光也强，干扰主体图像，不好。
	小（比如100）	感光度低，图像较暗，线条不浓，不好。图像噪点较少。背景光较弱，图像中其他物体较暗，好。

参数：快门速度



光圈F1.8,快门1/4000,ISO=50



光圈F1.8,快门1/80,ISO=50



光圈F2.2,快门0.6,ISO=50

快门速度 Shutter speed	大（比如1/10 s，俗称快门慢）	曝光时间长，进光量多，背景较亮（不好）。如果主体在运动中，易造成模糊（不好）
	小（比如1/50，俗称快门快）	曝光时间短，进光量少，背景较暗（好）。但快门太快，会出现同步问题，在曝光时间内闪光灯没有亮，不好。

参数：光圈



光圈F16,快门1/100,ISO=320



光圈F1,快门1/100,ISO=250

光圈 Aperture	大（比如2.8，光圈值越小，光圈开得越大）	进光量多、景深浅（图像中对焦部分清晰，其他部分模糊。主体得到了突出，好。但有时会造成图像部分清晰，部分模糊，不好）
	小（比如8.0）	进光量少、景深深（图像中不仅主体，其他部分也相对清晰，好。但图像主体得不到突出，不好）

参数： 闪光灯输出

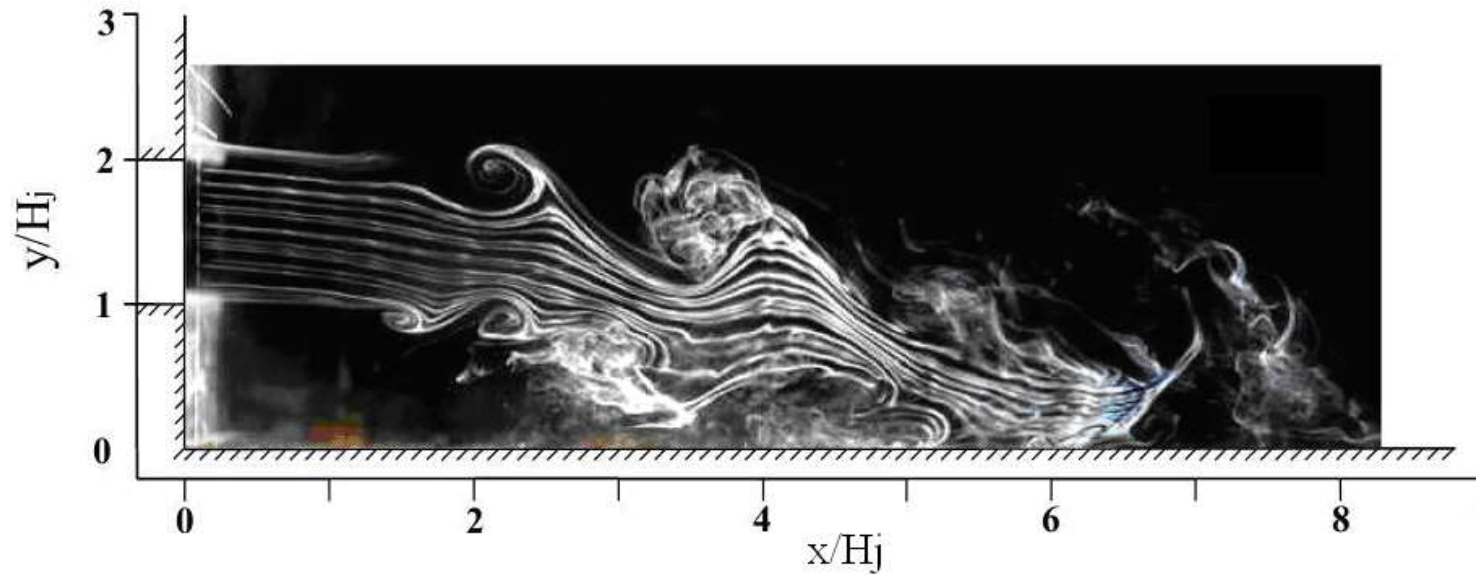
- 调节能量输出可以改变闪光灯的光强及闪光时间

能量输出



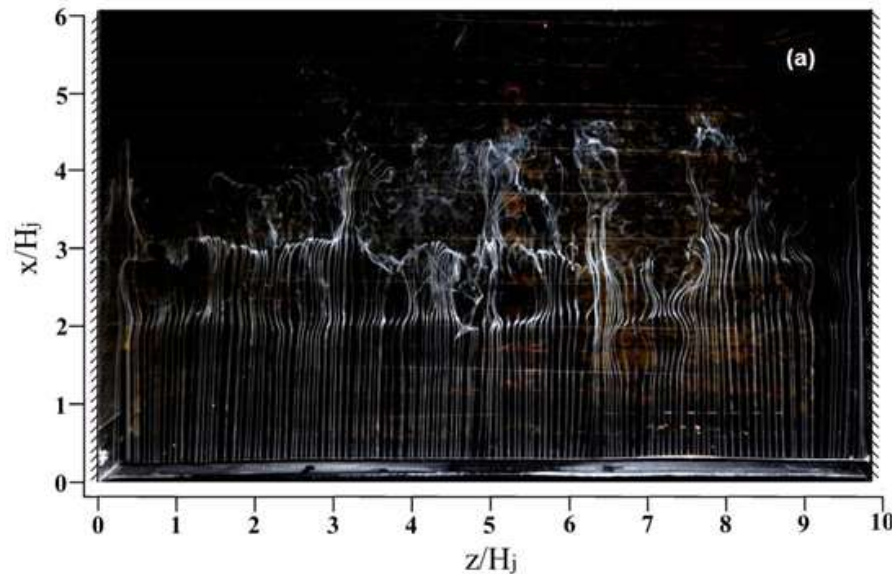
闪光灯输出值	大 （比如 1/2）	曝光时间长（约400微秒），强度大。图像较亮，烟线浓，好。但速度高的流动条件下，烟线会模糊，不好。比如如果流动是10m/s，闪光时间内旋涡移动距离为 $1e4 \text{ mm/s} * 4e-4 \text{ s} = 4\text{mm}$
	小 （比如 1/128）	曝光时间短（约50微秒），强度相对较小。图像较暗，烟线不浓，不好（这个情况需要ISO来增加亮度，但记住增加ISO的同时也会增加背景光的亮度，这是难以避免的副作用）。速度高的流动条件下，旋涡移动距离短，更清晰，好。

例子： Offset attaching jet issued from a contoured nozzle

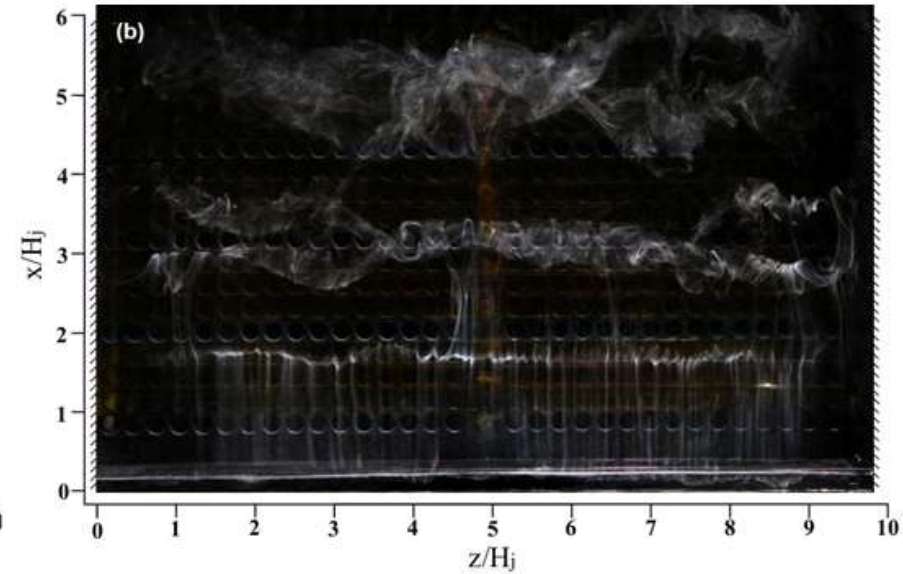


Visualization of an offset attaching jet issued from a contoured nozzle with offset distance equals one jet height and $Re=7600$ using the vertical wire.

Offset attaching jet issued from a contoured nozzle



Lower shear layer



Upper shear layer

Visualizations of an offset attaching jet issued from a contoured nozzle with offset distance equals one jet height and $Re=7600$ using the horizontal wires located at $x/H_j=0.1$, $y/H_j=$ (left) 0 and (right) 1.0.

例子: Turbulent wake behind a D-shaped bluff body

$U_{\infty}=11.7\text{m/s}$



$U_{\infty}=17.0\text{m/s}$



Smoke-wire visualization of a turbulent wake behind a D-shaped bluff body for a Reynolds number of (left) 47000 ($U_{\infty}=11.7\text{m/s}$) and (right) 68300 ($U_{\infty}=17.0\text{m/s}$).

总结

- 烟线基本原理
- 主要构成
- 航华SW02特点与使用方法