

版本号: FR02GN202308A

航华FR02快响测速探针用户使用手册



大连航华科技有限公司

2023 年 11 月 24 日

目录

1 介绍	3
1.1 功能和用途	3
1.2 特点与优势	4
1.2.1 对比多孔探针	4
1.2.2 对比热线风速仪	5
1.2.3 对比LDA、PIV	5
1.2.4 对比TFI眼镜蛇	6
1.3 系统组成	6
1.4 运行要求	8
2 起步	12
2.1 软件安装	12
2.2 硬件连接	12
2.3 运行软件	17
2.4 软件介绍	17
2.4.1 程序控制区	17
2.4.2 采集操作区	18
2.4.3 探针编号及初始角设置区	19
2.4.4 采集参数设置区	20
2.4.5 数据及能谱实时显示	22
2.4.6 统计量显示	24
2.5 软件操作	25
2.5.1 操作流程	25
2.5.2 数据文件	26
附录	30
A 标定	30
A.1 静态标定	30
A.2 方向标定	30

注意

硬件连接 请注意一定要先连接探针导线，再接通信号处理器（主机）电源线，否则有可能产生干扰信号。

软件运行 探针软件CobraLab不能直接运行。请用鼠标右键点击图标，选择“以管理员身份运行”，这样可以避免因权限问题无法保存参数文件及数据文件。

硬件热机 每次连接电源后，尽量给系统多一些时间“热身”，热机时间最少半个小时（最好在2个小时以上），以降低温漂。

1 介绍

FR02快响测速探针（本文中也称为动态风速仪、眼镜蛇探针）是大连航华科技有限公司FR系列快响测速探针的首款产品。其测速范围 $1.5-40m/s$ ，最大动态响应为 $1600Hz$ 。该产品为满足结构风工程、车辆、气象、环境工程等应用流体力学领域对湍流测量的需求而开发。它具有使用方便、可靠性好、功能丰富等特点。

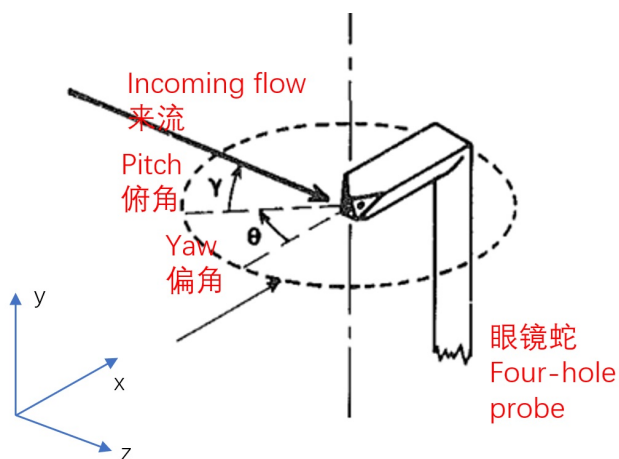
1.1 功能和用途

FR02快响探针利用内置探针内的多枚快响压强传感器感知探针头部不同位置测压孔的压强变化，进而估算来三维流速度矢量。FR02探针采用四孔探针设计。快响压力传感器与顶端测压孔的距离在10厘米以内，这一距离保证了传感器能够响应大尺度旋涡引起的压强变化，因此，FR系列探针也被称为**三维动态风速仪**。因为外形与眼镜蛇相似，FR02 探针也被**眼镜蛇(Cobra)探针**。

FR02快响探针系统主要功能如下：

- a) 测量空间一个位置上的三维风速（三个速度分量）的均值及动态数据，频率响应： 0 Hz （均值）到 1600Hz ，并可实时显示数据；
- b) 通过动态风速数据可计算出湍流度、六组雷诺应力、三阶矩、四阶矩等湍流统计量
- c) 通过频谱分析获得脉动速度的功率谱、积分尺度
- d) 可测量空间一个位置上的静压变化

1.2 特点与优势



(a) 角度定义示意图



(b) 探针头部照片及测压孔编号

图 1: 眼镜蛇探针

- e) 使用多个探针时可测量空间不同位置风速的相关性、互谱、相干性函数
- f) 配合移测架可测量速度及湍流统计量的空间分布

1.2 特点与优势

1.2.1 对比多孔探针

与毕托管、多孔探针等基于测压来测速的传统技术相比，FR系列快响探针的优势在于

a) 动态测量能力

快响探针的功能覆盖了毕托管及常规多孔探针的时均流场（平均速度及方向）测量功能。除此之外，快响探针还可以测量速度动态变化，进而获得湍流度、湍动能谱等湍流信息。传感器与测压孔的距离在10cm 以内，其对应的亥姆霍兹腔体第一模态频率为800Hz 以上，保障了探针在低频段（小于等于500Hz）有较一致的响应幅度。

b) 结构紧凑

探针采用一体化设计：在直径14毫米的探针本体内，集成了压强传感器、信号放大器。主机内集成了数据采集卡、电源。部件比常规多孔测试探针少，也节省了连接测压管等操作步骤。

1.2 特点与优势

c) 使用方便

探针标定数据被集成在软件包内，用户为传感器归零后点击采集即可开始测量。测量结果直接显示，并以文本文件形式保存。使用便利度有明显优势。

1.2.2 对比热线风速仪

热线风速仪是经典的湍流科研测量仪器，具有高频响（可达200kHz以上），测量结果可靠度高（对不同频率的旋涡响应幅度一致）等明显优势。相比于热线风速仪，快响探针具有如下优势

a) 投资小

b) 不易损坏

热线探针的核心部件是裸露的5微米直径金属丝，易氧化，轻触也可造成破损。相比之下，快响探针结构可靠性好，不容易损坏。

c) 对环境变化不敏感（鲁棒性好）

用户仅需在测量前输入当前温度及大气压即可获得相对精确的测量结果。而热线测量结果对温度变化非常敏感（每摄氏度温变引起2%速度测量值变化），需要复杂的补偿算法，且补偿效果有限

d) 使用便利性高

因无需用户标定，即插即用。用户仅需在测量之前为传感器归零。热线风速仪需要设定冷态电阻、过热比、系统平衡参数。另外，需要进行方波测试以获得最佳响应。最后，热线风速仪自身需要依靠测压仪器（如毕托管等）进行标定。热线易受温度、湿度等多种因素的影响，每次使用之前都需要标定。

1.2.3 对比LDA、PIV

与激光多普勒（LDA）以及激光离子测速仪（PIV）这两种基于激光的测速方法相比，快响探针具有如下特点

a) 投资小。LDA与PIV系统非常昂贵。

b) 系统简单、体积小、使用便利性高。不仅可在实验室内使用，还可安装在车辆、飞行器上进行外场测量。

c) 无需示踪粒子。

1.3 系统组成

1.2.4 对比TFI眼镜蛇

澳洲Turbulent Flow Instrument (TFI) 公司的Cobra 100系列动态测速探针是此类产品的先行者。其产品在国内外风工程领域有良好的口碑和很高的市场占有率。但近年来TFI主动退出市场，形成了市场空白。航华眼镜蛇探针力图填补这一空白，所以采取了如下设计

a) 两者外形相同

关键外形参数都相同，包括探针头部、探针柱体直径、长度。这样有利于已经实验支架的用户顺利过渡。

b) 原理相同

航华眼镜蛇探针的标定及速度解析参照文献 Hooper 和Musgrove (1997) 开展，基本原理的过程与TFI眼镜蛇一致。

c) 测量精度相仿

航华眼镜蛇采用TFI Cobra相似的核心传感器，保障了测量精度。

d) 软件更简洁

相比TFI Cobra软件，航华眼镜蛇的软件界面更简洁，操作更简便。

e) 提供便捷的本土技术服务。

1.3 系统组成

航华FR02快响探针系统有探针、信号采集仪（主机）、电源和线缆等组成，具体见表 1。其中主机和探针是核心部件。

a) 主机，也被称为**信号采集仪**，照片见图3b。主机内含电源整流装置、数据采集卡（NI USB6211 www.ni.com/en-us/shop/model/usb-6210.html）。主机具体参数见表 2。

- 主机正面(图2a)有四个接口，四个接口通过探针线（图3d）分别及探针1-4相连。

☞ 注意：如果只使用1支探针，则必须接Probe 1口；如使用两支探针，则接Probe 1和Probe 2 口，不能随意接线。

表 1: 系统组成

序号	品名	功能	数量
1	FR02探针，图3a	探针内置4枚动态压力传感器，通过导管连接至探针顶端，每个传感器通过一个朝向不同的小孔测量来流压强。	1-4支。最少1支，最多4支
2	主机（信号采集仪），图3b	内置NI-USB6210数据采集卡。通过USB线缆连接电脑	1
3	电源，图3c	12V，3A直流电源	1
4	探针线，图3d	两端为9芯雷莫LEMO连接器，导线标准长度10或20米	1-4
5	USB数据线，图3e	连接信号处理器与电脑，长0.5米	1
6	外触发线缆	选购，发送触发信号给数据采集卡，开始采集数据	1
7	U盘	内含软件，可采集、处理、分析并记录数据	1
8	说明书	本文	1

表 2: 主机参数

	参数
厂商	National Instrument
型号	USB 6210
模拟量通道数	16（单端）
采样精度	16 位
输入范围	±10 V
最大采样频率	250 kHz
外形尺寸	213*127*48 mm
重量	300 g
电源	12V直流，10 W

1.4 运行要求

- 主机背面(图2b)有五个接口，自左至右分别是电源插口（接电源，图3c）、USB插口（USB数据线，图3e）、触发信号接口、同步时钟入口、同步时钟出口。
 - 触发信号接口接外部触发信号。在主机内部，该端口与采集卡PFI0数字输入输出端口相连。外触发信号需为TTL方波信号：用户在软件中将“下一测点启动方式”设置为**外触发采集**模式后（见第2.4.4节），当该端口电压从0V 阶跃至5V 时，软件会启动采集。该用途可用来配合其他传感器测量，保证多个传感器采集能同步开始。
 - 如果用户对多传感器同步采集的同步性要求较高，比如需要微秒级的同步精度（对与眼镜蛇探针这种毫秒级响应时间的仪器来讲，这样高的要求并没有实际意义），用户可以考虑将眼镜蛇采集卡与其他仪器的采集卡做时间上的同步：通过使用最右边的两个接口（同步时钟入口、同步时钟出口）与其他仪器入口出口相连，使它们在同一晶振形成的时序下工作。尽管我们保留了这个功能，但不推荐用户做此操作。
- b) 探针：每支探针内置4枚动态压力传感器，通过导管连接至探针顶端，每个传感器通过一个朝向不同的小孔测量来流压强。探针具体参数见表 3。
- 一套完整系统最少包括1支探针，每个主机最多包括4支探针
 - 每台电脑可连接多台主机（截止2023-08-22，软件功能尚不支持此功能，将来会支持此功能）
 - ☞ 请注意每个探针都有独立编号，通常在探针尾部通过钢印或激光打标进行标识。探针编号是软件读取标定文件的重要依据，需要在软件中输入。
 - ☞ 探针如果出现变形或其他损坏，即使读数“正常”，也需要返厂重新进行标定。

1.4 运行要求

眼镜蛇探针需要对多个传感器测量的动态压强数据进行插值，拟合出速度数据，因此对计算机的计算能力有一定的要求，我们推荐计算机配置如下：

- Intel I5 及以上CPU；8G及以上内存，500G以上硬盘；
- Windows 10 或Windows 11，64位系统；



(a) 主机正面照片，四个接口分别接探针1-4

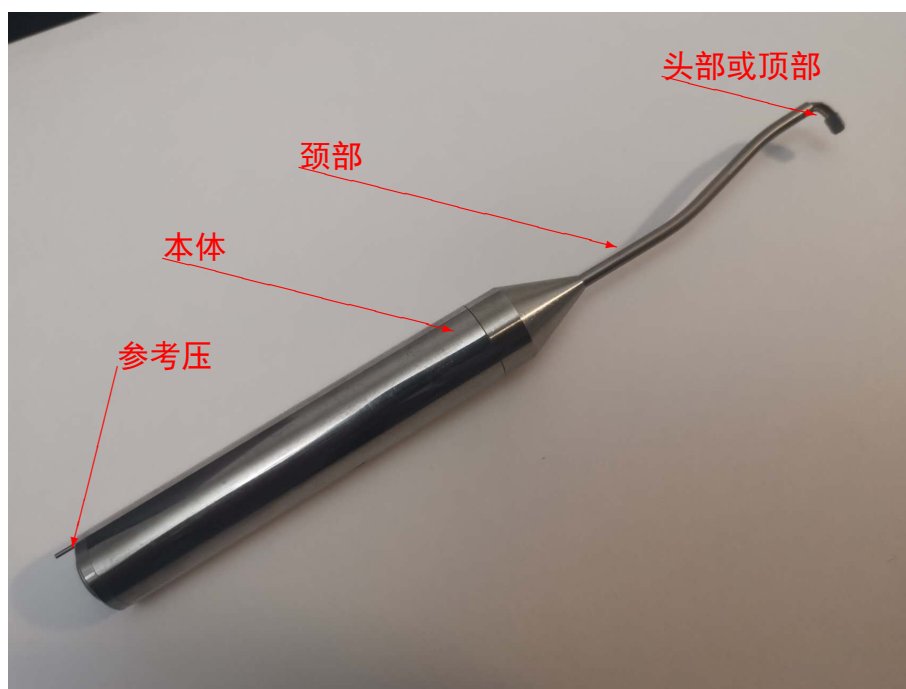


(b) 主机背面照片。5个接口自左至右分别是电源插口、USB插口、触发口、同步时钟入口、同步时钟出口

图 2: 主机（信号采集仪）正反面照片

表 3: FR02探针参数

	参数
测速范围	1.5 - 40 m/s
测速精度	±0.5m/s (30m/s)
角度范围	40度椎体
角度精度	±1.0度
频响	1.6 kHz
长度	18 cm
本体直径	14 mm
参考压管直径	0.8 mm



(a) FR02探针



(b) 主机（信号采集仪）



(c) 电源



(d) 探针线



(e) USB线

图 3: 眼镜蛇探针系统各个部件照片

1.4 运行要求

- ☞ 不小于1280*960的显示器分辨率，小于该分辨率部分软件界面在显示区域之外，需频繁拖动鼠标。

2 起步

2.1 软件安装

在系统安装盘内找到setup.exe, 点击运行（图4a），依照提示逐步完成安装航华热线风速仪控制程序（图4b-4d）。程序将安装NI DAQmx 及NI VISA等底层驱动软件（美国National Instrument 公司免费软件），安装过程较长，请耐性等待。当安装完毕后，

- Windows桌面会出现Cobra应用程序图标（如未出现，请进入安装目录，找到exe文件运行）。
- ☞ 用鼠标右键点击软件图标，选择“以管理员身份运行程序”，这样避免出现权限问题，导致程序无法存储用户设定的测量参数。
- ☞ 尽量避免把安装目录设在C盘，以减少使用中出现权限不足的问题
- 安装成功后，在安装目录下出现一个data目录。该目录下包含以文本文件形式的探针标定信息、传感器零点信息（无风时输出的电压值）。软件会调用该目录内的文件，用户不要直接修改该目录下文件，否则会出现运行错误。

2.2 硬件连接

硬件连接方式参见图 5，其中每个部件照片见图 3。这里需要注意的是

- 第1步，把探针线连接在主机上。具体方式是将探针线一端（任一端）的红色标识与主机探针接口的红色标识相对再插入，见图 2a（注意此时因为接电源，红灯不亮）。插入到位后会有“咔哒”落位轻声。
 - ☞ 注意：如果仅使用1支探针，则必须接Probe 1口
 - ☞ 注意：如果没有感觉到清晰的“咔哒”落位声，不要用力硬插，拔出口检查导线接头内铜针的状态，是否已弯。另外，请百度“雷莫连接器怎么插拔”。
- 第2步，安装探针。
 - 将探针线另一端的红色标识与探针尾部插口的红色标识对应后插入。插拔方式与另一端（导线与主机之间）相同；

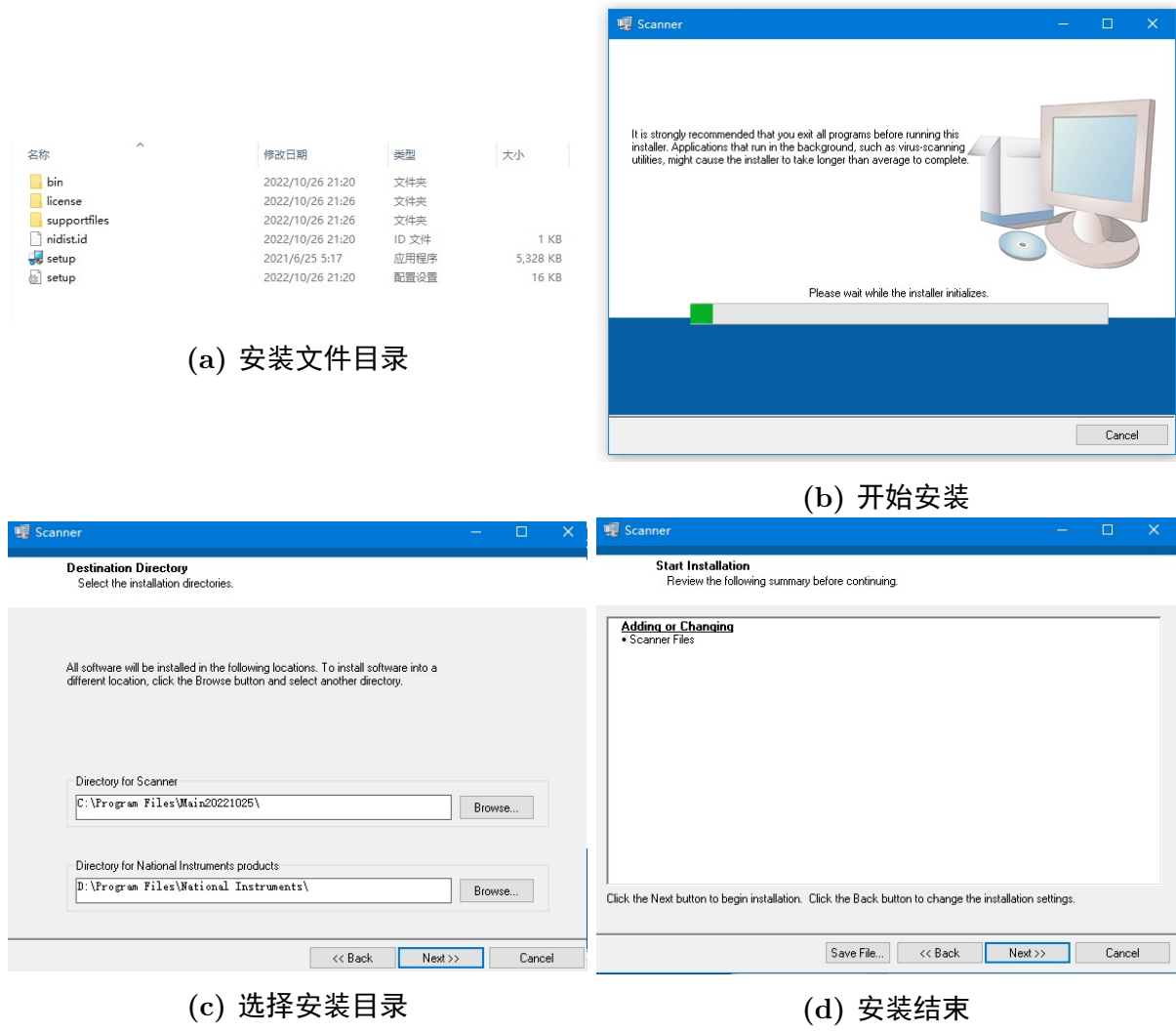
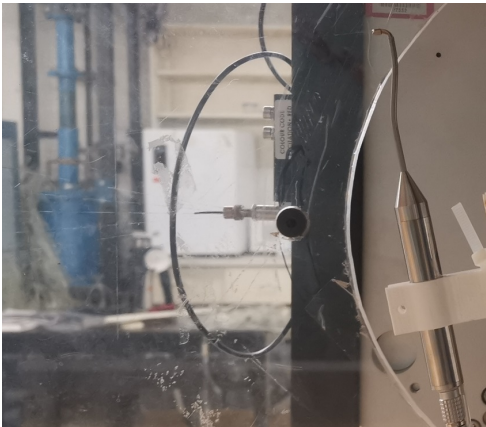


图 4: 软件安装示例



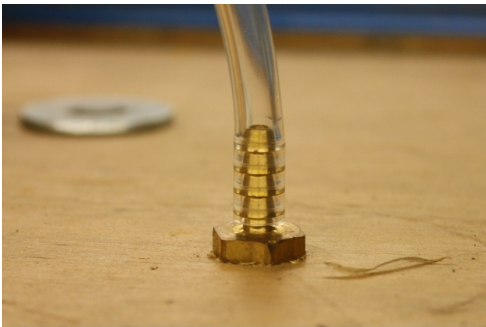
图 5：系统连接方法示意图



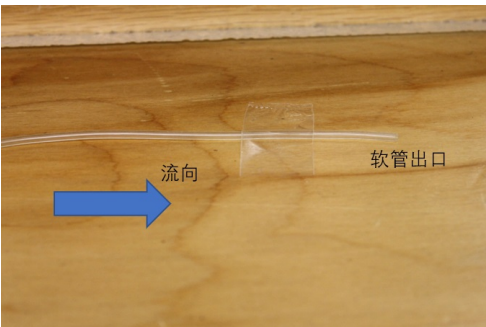
(a) 风洞内部安装的探针



(b) 探针的参考压连接端口



(c) 风洞外部拍摄的风洞侧壁压强测量孔



(d) 置于风洞实验段内部的参考压软管

图 6：探针安装

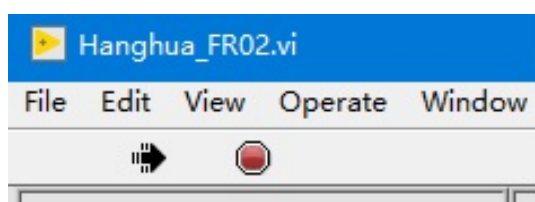
2.2 硬件连接

- 将探针置于流场之内，探针方向对准来流。探针识别来流方向能力局限在 $\pm 40^\circ$ 锥体以内。探针与自由来流（没有安装模型的、没有受到干扰的来流）的初始夹角越小越好。
- 第3步，安装参考压软管。探针尾部的参考压测量孔（见图 6b）不能暴露于风中，可以考虑如下方法：
 - 使用测压软管连出风洞实验段，并接在风洞侧壁的静压孔上，使其测量风洞实验段内壁静压，如图（见图 6c）所示。管长不限。
 - 如果实践中不方便将软管引出风洞，可以考虑开口端固定于壁面之上。开口方向指向流动的反方向（见图 6d）。
 - 如果使用开口风洞，或者射流等实验区开放的情况，参考点需要放置在没有风的地方。
- 第4步，使用USB线（图 3e）连接主机及电脑（图 2b）。
- 第5步，主机连接电源（图 3c与图 2b）。因主机未设置开关，所以连接电源后系统自动上电。
 - ☞ 注意：需要先插探针再上电。如果插探针时主机已经上电，会产生一定程度的干扰电信号。此时，需重新拔、插电源
 - ☞ 注意：每次测量以前，都要进行一个小时左右的“热机”：插入电源及探针后，让系统在无风条件下工作一小时。这样可降低传感器的零点漂移带来的影响。
- 第6步，检查指示灯。主机前后面板各有一个指示灯
 - 当连接好探针和电源线后，前面板红色指示灯亮（探针插口上方，见图 2a），标志系统识别了探针。
 - 当连接好USB数据线后，后面板（见图 2b）绿色指示灯闪烁（位于电源插口和USB插口之间），代表采集卡正在工作。

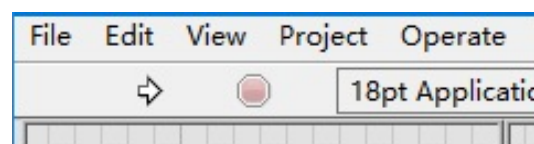
2.2 硬件连接



图 7: 软件主界面分为不同的功能区: ①程序控制、②采集操作、③探针编号及初始角、④采集设置、⑤数据及能谱实时显示、⑥统计量显示。



(a) 程序运行中



(b) 程序未运行

图 8: 软件功能区1: 程序控制区

2.3 运行软件



图 9: 软件功能区2: 采集操作区



(a) 提示用户将开始归零



(b) 提示用户归零结束

图 10: 传感器归零提示窗口

2.3 运行软件

在Windows快捷方式、或桌面、或者安装目录下找到并运行可执行文件。具体方法为鼠标右击图标并选择以管理员身份运行该程序。程序运行后须先设置参数，具体方法见第2.4 节。

2.4 软件介绍

2.4.1 程序控制区

软件界面左上角区域为程序控制区（见图7），这里是软件的“开关”：

- 功能区有两个按钮，自左至右分别为：运行（箭头）与终止按钮（圆形按钮）
- 程序运行后，按钮状态见图8a；
- 用户可按红色按钮随时终止程序运行
- 程序出错后系统也会终止运行，用户可点击“运行”重新运行程序
- 程序每次重新运行后都会从硬盘读取以前存储的参数。用户改变参数设置以后如果未按“储存参数”按钮进行保存的话，重新运行时设置结果将被刷新
- 用户完成参数设置以后（且未保存），想恢复原来设置的话，可通过停止运行、重新运行来读取硬盘存储参数

2.4 软件介绍

2.4.2 采集操作区

采集操作区内包括四个按键（图9），分别是

- “归零” 按键
 - 压差传感器的零点（无压差时的电压输出）会受到温度、大气压等多个因素影响而发生微小变化，即零点漂移。
 - 零点漂移对低速测量会产生一定影响。该影响可通过测量前读取零点值进行修正。
 - 航华眼镜蛇探针要求用户最长每三小时进行一次归零。用户在无风条件下按“传感器归零”键。系统将弹窗请用户确认，结束后也会弹窗通知用户归零结束，见图10。
 - 结束后，在安装目录下的data目录内，会出现文本文件zero_cobra.txt，保存零点电压数据。
- “清屏” 按键。安下“清屏”按键后，功能区5内显示数据被清屏。
- “采集” 按键。用户安下“采集”按键后，系统开始采集。采集前，系统间首先读取标定文件及零点文件。如果归零时间距离当前超过3个小时，系统将提醒用户重新归零，以提高采样质量。
- “停止” 按键。“停止”按键是低级别的停止键（与功能区1内的停止键相比）。系统采集数据的时候，该键无效。建议用户直接使用功能区1内的停止键终止程序。

另外，采集操作区内还包括三个显示项，分别是

- 采集工作显示灯：采集中，该灯亮；反之，则灭；
- 采集进程显示条：系统每秒钟更新一次，如果采集时长为10秒，显示条每秒钟增加10%。
- 状态文本提示栏：系统将以文字形式提示用户目前的工作状态。

探针1编号	探针1初始俯角,度	探针1初始偏角,度
311	0	0
探针2编号	探针2初始俯角,度	探针2初始偏角,度
101	0	0
探针3编号	探针3初始俯角,度	探针3初始偏角,度
101	0	0
探针4编号	探针4初始俯角,度	探针4初始偏角,度
101	0	0
 读取参数  储存参数		

图 11: 软件功能区③: 探针编号及初始角设置

2.4.3 探针编号及初始角设置区

用户在第3功能区设置探针的信息（见图 11），包括

- 探针编号

编号通常为三位数字。用户须从探针尾部读取编号，并在软件“探针编号”框内输入该编号。系统运行后将根据探针编号提取标定文件

- 初始俯角 γ_o 与初始偏角 θ_o 。

- 初始角是用户安装探针后，探针与来流之间的角度。
- 考虑到大多数情况下，用户希望安装后探针与自由来流之间的夹角为零， $\gamma_o = 0^\circ$ 、 $\theta_o = 0^\circ$ ，但该情况仅靠调节探针角度很难实现。
- 针对以上需求，我们提供了角度归零功能：
 - 用户完成安装以后，在空风洞（风洞中部、没有模型阻挡情况下）进行一次测量，系统汇报的 γ 与 θ 即为初始角度 γ_o 与 θ_o 。
- 用户在软件第3功能区输入 γ_o 与 θ_o 。
- 在实际测量过程中，软件会将测得的角度（ γ_m 与 θ_m ）根据初始角度进行空间变换，获得修正后的角度 γ 与 θ 。
- 如果用户不需要角度归零功能，将初始角度保持为0即可。



图 12: 软件功能区④：采集参数设置

- 填好以上参数后，点击第3功能区下方“储存参数”更新系统变量，同时进行保存。再次运行后，系统自动读取以往存储数据。

☞ “储存参数”键将保存软件所有参数，不限于第3功能区参数

2.4.4 采集参数设置区

用户在第4功能区设置数据采集参数（见图 12），具体包括

- 选择探针通道

如果仅使用1个探针，鼠标点击Probe 1。如果使用2个探针，在点击Probe 1 之后，按ctrl 键同时点击Probe 2进行选择

- 选择采集卡设备号

通常为Dev1。用户可点击采集卡设备号选项右侧下拉符号，再点击Browse查看系统所有采集设备，并作出选择。

- 采样频率

采样频率为每秒钟采集的样本数，单位为赫兹Hz。建议设在800到3000之间。采样频率应为流场中主要旋涡频率的2倍以上（推荐按10倍选取。比如某项研究中要研究的涡脱频率为150Hz，采样频率建议设为1500Hz

2.4 软件介绍

- 每点采样时长

采样时长为秒s。系统总采样数为采样时间*采样频率。如果采样时间为10 秒（本小节将以此为例），采样频率为1024Hz，每点总采样数则为10240个

- 测点数量

测点数量为系统重复采样时长的次数。比如，测点数量为8，每点采样时长为10秒，系统则重复8次，总计采样时间为80秒

- 下一测点启动方式

下一测点启动方式决定了两个测点之间的过渡方式（以上面为例，一个测点10 秒中采样结束之后，下一个10秒如何开始由启动方式决定）。用户可点击下拉符号进行选择，可选内容包括

- 自动：一个测点结束之后（10秒钟结束之后，以上面为例），系统暂停0.5 秒，自动开始下一个测点采集（下一个10 秒）
- 手动：一个测点结束之后，弹出对话框，待用户点击OK回应之后，进入下一个测点的测量。该方式下，用户可通过手动位移台将探针移动到不同位置上开展测量
- 移测架：该方式需要使用航华移测架系统（由一台运动控制器及若干个步进电机驱动的移动模组组成）。系统将在安装目录下的data 目录内读取文本文件motor_positions.txt。该文件是一个大小为[3, N]的二维数组（即3行N列），N为测点数量。该文件可使用EXCEL 建立，但需以“制表符分隔的文本文件”格式保存。系统读取该文件后根据数组的列数自动设定测点数量。移测架依次移动到每个指定位置，并进行时间为“每点采样时长”（10 秒，以上面为例）的测量。测量结束后，移测架回到初始位置。
- 外触发：该方式下，一个测点（一个10秒）结束之后，系统进入等待状态，并实时扫描外触发端口，当收到触发的TTL 方波信号的跃升沿之后，系统将进入下一点（下一个10 秒）的测量工作

- 数据文件保存

用户需要设置存储**数据目录**及数据文件名前缀（项目名称），以保证每次采集的数据文件都有不同的名字

2.4 软件介绍

● 大气压和室温

大气压和温度决定了空气密度，而空气密度对确定速度非常关键。眼镜蛇探针系统**没有**测量这两个参数的能力。用户需选用可靠的仪表在实验前读取当地大气压及实验室温度，并输入给软件。

2.4.5 数据及能谱实时显示

第5功能区显示的是系统采集的实时数据（见图 7），每秒钟更新。

如果仅使用**单支探针**，功能区5的选项卡自动保持为“探针1”，具体显示的内容包括

- 左侧：实时速度的三个分量 $u(t), v(t), w(t)$ ，颜色分别为黑、红、蓝，单位 $[m/s]$ 。速度分解方式参见图1a，具体为

$$u = |\vec{V}| \cos(\gamma) \cos(\theta) \quad (1)$$

$$v = |\vec{V}| \sin(\gamma) \quad (2)$$

$$w = |\vec{V}| \cos(\gamma) \sin(\theta) \quad (3)$$

这里，实时速度矢量 $\vec{V} = u\vec{i} + v\vec{j} + w\vec{k}$ ，实时速度大小 $|\vec{V}|$ 。

- 左侧横轴为时间 t ，单位为 $[s]$ 。
- 右侧为速度分量 u 的功率谱 E_{uu} ，单位为 $[(m/s)^2/Hz]$

$$E_{uu} = |fft(u - U)|^2 / N \quad (4)$$

这里， fft 为快速傅里叶变换， N 为采样数量， U 为 u 的时均值： $U = \bar{u}$ 。

- 右侧横轴为频率 f ，单位为 $[Hz]$ 。

如果使用**两支探针**，系统自动切换功能区5的选项卡到“探针1,2”（见图 13），具体显示的包括

- 两个探针的实时速度数据：左侧为探针1，右侧为探针2。

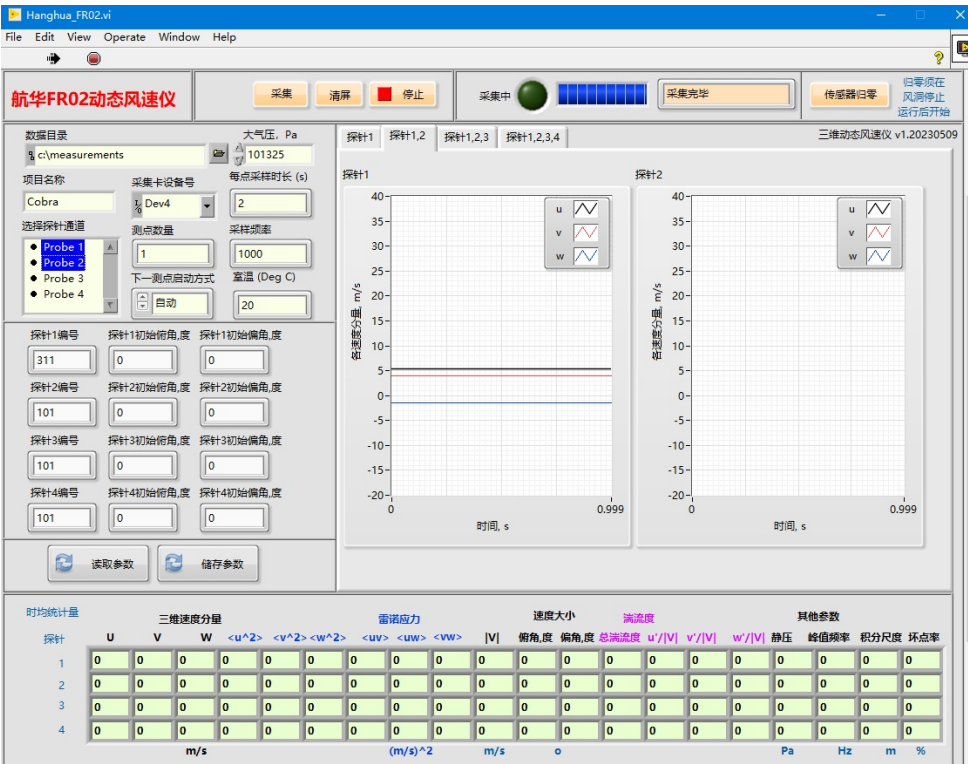


图 13: 选择了2个探针的软件界面，功能区5的选项卡自动变成了“探针1,2”



图 14: 软件功能区⑥：统计量显示

2.4 软件介绍

2.4.6 统计量显示

第6功能区显示的是数据的统计量（见图 14），共4行20列，每秒钟更新，所显示的数据是上一秒测量结果的时均值。4 行对应4 个探针，20列统计量具体为（自左至右）：

- 三个速度分量的时均值： $U = \bar{u}$; $V = \bar{v}$; $W = \bar{w}$;
- 三个雷诺正应力： $\overline{(u - U)^2}$, $\overline{(v - V)^2}$, $\overline{(w - W)^2}$;
- 三个雷诺切应力： $\overline{(u - U)(v - V)}$, $\overline{(u - U)(w - W)}$, $\overline{(v - V)(w - W)}$;
- 速度大小的时均值： $|V| = |\bar{V}| = \sqrt{U^2 + V^2 + W^2}$
- 俯角和偏角的时均值： $\bar{\gamma}$ 和 $\bar{\theta}$ 。满足

$$U = |V| \cos(\bar{\gamma}) \cos(\bar{\theta}) \quad (5)$$

$$V = |V| \sin(\bar{\gamma}) \quad (6)$$

$$W = |V| \cos(\bar{\gamma}) \sin(\bar{\theta}) \quad (7)$$

- 总湍流度

$$I = \frac{\sqrt{\overline{(u - U)^2}/3 + \overline{(v - V)^2}/3 + \overline{(w - W)^2}/3}}{|V|} \quad (8)$$

- 三个方向上的湍流度

$$I_x = \frac{\sqrt{\overline{(u - U)^2}}}{|V|} \quad (9)$$

$$I_y = \frac{\sqrt{\overline{(v - V)^2}}}{|V|} \quad (10)$$

$$I_z = \frac{\sqrt{\overline{(w - W)^2}}}{|V|} \quad (11)$$

- 静压 P_o , [Pa]
- 频谱峰值对应频率, f_{max} , [Hz]
- 积分尺度(Pearson 等, 2002): $L_{int} = U/f_{max}$, [m]
- 坏点率。当系统无法通过插值获取速度时会将此数据点标记为坏点，计算统计量时不计入这些数据。在来流角度较大、速度过低或者湍流度较大时可出现较多坏点。

2.5 软件操作

2.5 软件操作

2.5.1 操作流程

假设，用户计划使用1个探针（编号311），在5个位置上，每个位置以频率1024Hz采集10秒数据。当前大气压101000Pa，温度24°C，采集卡编号Dev1。计划把数据保存在“c:\measurements”目录下，所有数据文件都以“Cobra_”开头。具体流程如下：

- a) 连接好探针、主机、导线，检查主机后面板灯是否亮起
- b) 以管理员身份运行程序
- c) （功能区③，以下省略“功能区”）填入探针1 编号311，将探针1 初始俯角和偏角置为0
- d) ④选择探针通道：Probe 1
- e) ④选择数据目录：c:\measurements, ④填入项目名称：Cobra_
- f) ④选择采集卡编号：Dev1
- g) ④填入每点采样时长：10
- h) ④填入采样频率：1024
- i) ④填入测点数量：5
- j) ④选择下一测点启动方式为“手动”
- k) ④填入大气压：110000，温度：24
- l) ③点击“储存参数”，保存参数
- m) ②关闭风洞，点击“传感器归零”
- n) ②打开风洞，稳定后点击“采集”
- o) 该测点采集结束后，系统弹窗“下一位置2/5，OK?”。这时，不点击OK，先检查测量数据是否正确保存。合格后进入下一步。（如果要中断，按Esc键，然后鼠标点击功能区1内的圆形红钮）

2.5 软件操作

(C:) > measurements

名称	修改日期 ^	类型	大小
 Cobra_probe1_data1	2023/8/26 16:47	文本文档	38 KB
 Cobra_probe1_data2	2023/8/26 16:47	文本文档	38 KB
 Cobra_probe1_data3	2023/8/26 16:47	文本文档	39 KB
 Cobra_probe1_data4	2023/8/26 16:47	文本文档	39 KB
 Cobra_probe1_data5	2023/8/26 16:47	文本文档	40 KB
 Cobra_stats_probe1	2023/8/26 16:47	文本文档	1 KB

图 15: 单支探针在5个测量点采集的数据文件被保存在用户指定目录下

- p) 如果用户希望使用角度修正（见第2.4.3小节），中断程序，并重新运行以后，在“初始俯角”和“初始偏角”内填入俯角和偏角测量结果（在功能区6读取），并点击“储存参数”进行保存。然后点击“采集”开始采集数据，直到系统弹窗，提示进入下一个测点
- q) 把探头移动到下一个位置，点击OK继续实验，
- r) 直至实验结束

2.5.2 数据文件

经过上面操作（单支探针在5个不同位置测量）以后，

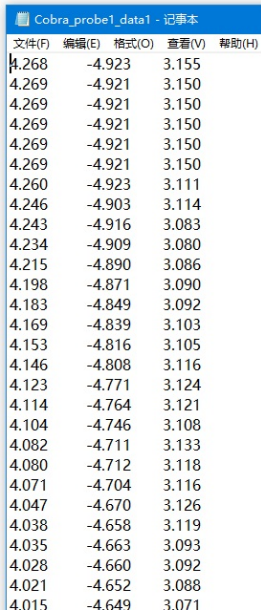
- a) 数据存储在用户指定的目录c:\measurements下，见图 15。文件均以项目名为文件名前缀（本例为Cobra_）
- b) 共有两种文件被储存，统计数据文件（文件名=项目名_stats+探头编号.txt）以及实时数据文件（文件名=项目名+ 探头编号+data+测点号.txt）
- c) 统计数据内含一个大小为[测点数量，20]的二维数组。本例为[5，20]（5行20列），见图 16a。每列数据与第 2.4.6小节中给出的列表相对应
- d) 每个测点上采集的实时数据被单独保存，所以本例有5个实时数据文件，见图 15。每个数据文件包含一个大小为[每点总采样数，3]的二维数组（即N行3 列，N 为总采样数），本例为[10240，3]。3列数据依次为水平速度u、竖直速度v和展向速度w。第一个测量点的数据文件见图 16b。

Cobra_stats_probe1 - 记事本

文件(F) 编辑(E) 格式(O) 查看(V) 帮助(H)

%U [m/s]	V [m/s]	W [m/s]	u2 [m2/s2]	v2 [m2/s2]	w2 [m2/s2]	uv [m2/s2]	uw [m2/s2]	vw [m2/s2]	V [m/s]	pitch Deg	yaw Deg	turbulence intensi		
4.978	-0.513	0.440	2.339	0.795	0.318	0.513	-0.355	-0.500	5.109	-6.706	5.932	0.203	0.293	0.160
4.110	-0.924	0.855	3.008	0.642	0.343	0.905	-0.685	-0.464	4.532	-14.888	15.469	0.271	0.407	0.186
2.272	-1.648	1.335	1.891	0.413	0.242	0.744	-0.562	-0.309	3.109	-32.104	30.460	0.284	0.424	0.196
2.288	-1.416	1.070	0.547	0.122	0.075	0.185	-0.148	-0.091	2.899	-29.281	25.141	0.168	0.251	0.114
2.661	-1.186	0.885	0.296	0.040	0.026	0.064	-0.060	-0.030	3.050	-23.014	18.550	0.110	0.173	0.062

(a) 文件类型1：统计数据文件Cobra_probe1_stats.txt，每行数据对应一个测量点



u	v	w
4.268	-4.923	3.155
4.269	-4.921	3.150
4.269	-4.921	3.150
4.269	-4.921	3.150
4.269	-4.921	3.150
4.269	-4.921	3.150
4.260	-4.923	3.111
4.246	-4.903	3.114
4.243	-4.916	3.083
4.234	-4.909	3.080
4.215	-4.890	3.086
4.198	-4.871	3.090
4.183	-4.849	3.092
4.169	-4.839	3.103
4.153	-4.816	3.105
4.146	-4.808	3.116
4.123	-4.771	3.124
4.114	-4.764	3.121
4.104	-4.746	3.108
4.082	-4.711	3.133
4.080	-4.712	3.118
4.071	-4.704	3.116
4.047	-4.670	3.126
4.038	-4.658	3.119
4.035	-4.663	3.093
4.028	-4.660	3.092
4.021	-4.652	3.088
4.015	-4.649	3.071

(b) 文件类型2：第一个位置测到的实时数据文件Cobra_probe1_data1.txt，三列分别为u, v, w，每行数据时间间隔为1/1024秒

图 16：两种不同类型的输出文件

2.5 软件操作

名称	修改日期	类型	大小
Cobra_probe1_data1	2023/8/26 17:52	文本文档	39 KB
Cobra_probe2_data1	2023/8/26 17:52	文本文档	39 KB
Cobra_probe1_data2	2023/8/26 17:52	文本文档	40 KB
Cobra_probe2_data2	2023/8/26 17:52	文本文档	38 KB
Cobra_probe1_data3	2023/8/26 17:53	文本文档	40 KB
Cobra_probe2_data3	2023/8/26 17:53	文本文档	38 KB
Cobra_probe1_data4	2023/8/26 17:53	文本文档	39 KB
Cobra_probe2_data4	2023/8/26 17:53	文本文档	38 KB
Cobra_probe1_data5	2023/8/26 17:53	文本文档	39 KB
Cobra_probe2_data5	2023/8/26 17:53	文本文档	38 KB
Cobra_stats_probe1	2023/8/26 17:53	文本文档	1 KB
Cobra_stats_probe2	2023/8/26 17:53	文本文档	1 KB

图 17: 两支探针在5个测量点采集的数据文件输出

- e) 系统没有保存时间文件，如果用户需要，可根据采样频率1024Hz自行生成。比如，在matlab 中可参考

```
t=[1:10240]*(1/1024);
```

- f) 如用户不更改项目名称而再次运行程序，实时数据文件以及统计文件内的信息将被覆盖。

如果用户使用了两支探针（在5个不同位置测量），数据文件输入见图17。每个探针输出一套统计数据文件及实时数据文件。文件名中包含探针标识：probe1及probe2。

如果用户需要使用Matlab来读取并处理数据，可直接进入数据目录运行

```
cd C:\measurements
t=[1:1024]*(1/1024);
data=load('Cobra_probe1_data1.txt');
figure,plot(t,data(1:1024,1))
```

Python则可运行

```
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
```

```
data = np.loadtxt("C:\measurements\Cobra_probe1_data1.txt", delimiter="\t")
fig, ax1 = plt.subplots(1, 1, sharey=True, figsize=(8, 6))
ax1.plot(data[range(1,1024),1])
```

参考文献

Hooper JD, Musgrove AR (1997) Reynolds Stress, Mean Velocity, and Dynamic Static Pressure Measurement by a Four-Hole Pressure Probe. *Exp Therm Fluid Sci* 15(4):375–383, DOI 10.1016/S0894-1777(97)00005-8

Pearson BR, Krogstad PÅ, Van De Water W (2002) Measurements of the turbulent energy dissipation rate. *Phys Fluids* 14(3):1288–1290, DOI 10.1063/1.1445422

附录

A 标定

FR系列眼镜蛇探针出厂进行标定，用户不需要进行标定。本节简要介绍出厂前标定的过程。探针标定分为静态标定和方向标定两个过程。

A.1 静态标定

静态标定是获得眼镜蛇探针内部四个压强传感器敏感度系数的过程。通常使用一个手动加压泵在 $\pm 1\text{kPa}$ 范围内创造若干个已知压强值的环境（通过高精度压强传感器读取），并记录在这些环境下各个传感器的电压输出值，进而通过线性拟合获得敏感度系数。

A.2 方向标定

方向标定的基本过程是在一个（FR02探针仅适用于低速范围，单一流速下进行方向标定即可满足需求）固定风速 U_o 条件下，用不同方向来流吹响探针，并记录4个传感器输出压强。实际操作中，通常使用一个钟形收口产生均匀射流，并将探针头部放置在射流中心区域（potential core）。在电机的带动下，探针转过一系列俯角(Pitch, γ)与偏角(Yaw, θ)，角度示意图见图 1a。具体操作过程如下：

- 探针在多个俯角 γ 与偏角 θ 组合上进行测量。每个位置上获取四个压强传感器的测量值 P_0, P_1, P_2 以及 P_3 ，孔位与测量值对应关系见图 1b。
- 利用 P_0, P_1, P_2, P_3 计算每个位置 (γ, θ) 的无量纲参数 X_1, X_2, X_T, X_D

$$X_1(\gamma, \theta) = \frac{P_2 - P_3}{P_0 - P_{min}}, \quad (12)$$

$$X_2(\gamma, \theta) = \frac{(P_2 + P_3)/2 - P_1}{P_0 - P_{min}}, \quad (13)$$

$$X_T(\gamma, \theta) = \frac{0.5\rho U_o^2}{P_0 - P_{min}}, \quad (14)$$

$$X_D(\gamma, \theta) = \frac{P_T - P_0}{P_0 - P_{min}}. \quad (15)$$

这里， P_{min} 是每个位置上外围三个传感器（ P_1, P_2, P_3 ）的最小值。一个典型的标定结果， $X_1(\gamma, \theta)$ 与 $X_2(\gamma, \theta)$ 的分布，见图 A.1。

- 利用上一步建立起来的 $X_1(\gamma, \theta)$ 与 $X_2(\gamma, \theta)$ 建立新的关系表： $\gamma = \gamma(X_1, X_2)$ ， $\theta = \theta(X_1, X_2)$ 以及 $X_T = X_T(X_1, X_2)$ 和 $X_D = X_D(X_1, X_2)$ 。图 A.1 显示的标定结果经转换后形成的关系表见图 A.2。

A.2 方向标定

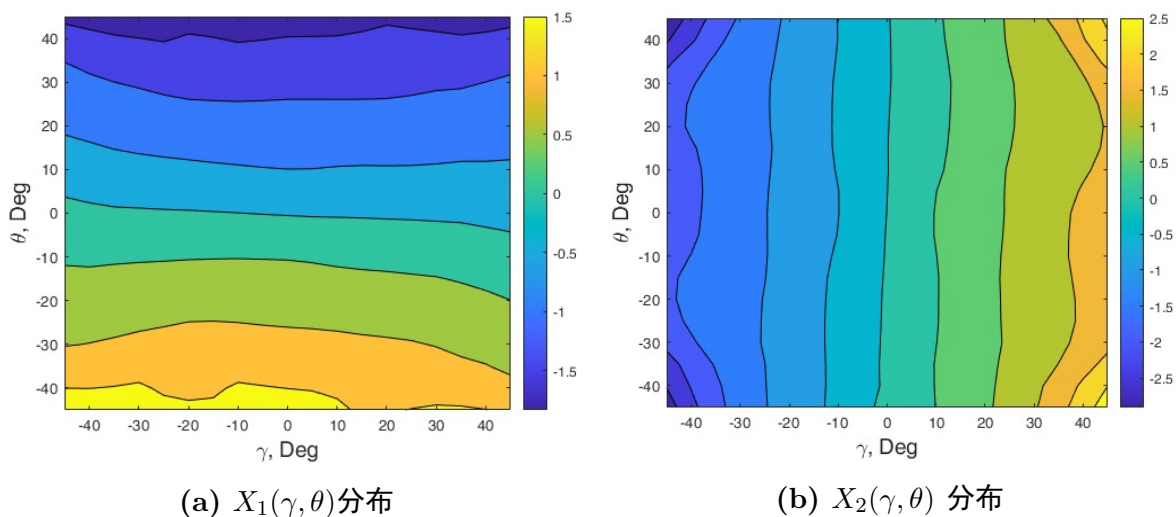


图 A.1: 一个典型的FR02探针方向标定结果

完成以上工作后，系统把关系表（图 A.1数据）保存并被安装在data目录下供程序调用。用户不必进行标定工作。本节信息仅供用户了解内部运行原理。

系统进行测量时，

- 系统首先获取个压强传感器的实际测量值 P_0, P_1, P_2 和 P_3 ；
- 系统使用这四个压强值利用公式12, 13计算无量纲数 X_1, X_2 ；
- 系统使用 (X_1, X_2) ，根据标定过程形成的关系表 $\gamma(X_1, X_2)$ 、 $\theta(X_1, X_2)$ 和 $X_D(X_1, X_2)$ ，拟合（在图A.2中插值）出 γ 、 θ 与 X_D
- 最后，系统使用 X_D 根据公式15计算来流速度大小 $|\vec{V}|$ 。

FR02探针软件内置以上功能，用户使用软件可以直接获得 $|\vec{V}|, \gamma, \theta$ 。

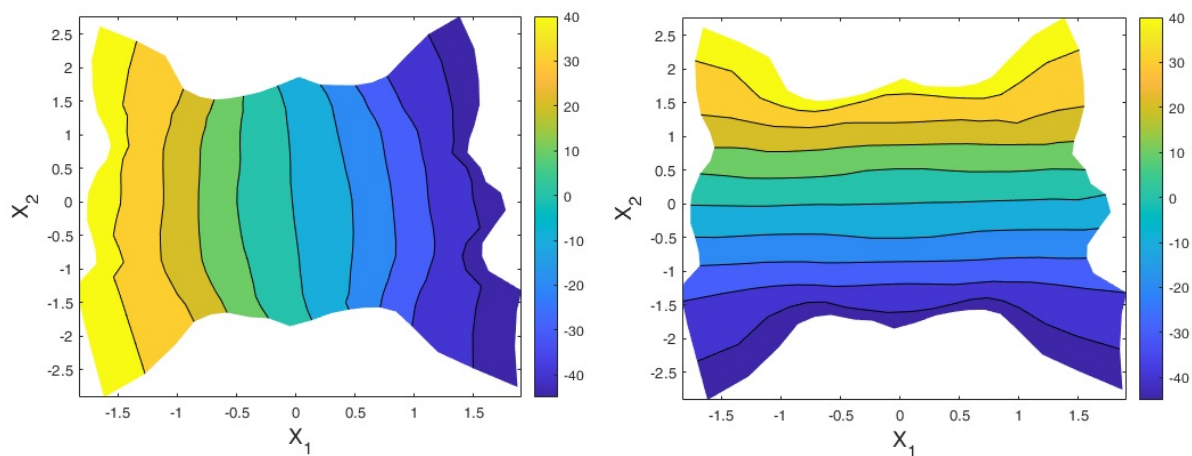
(a) $\gamma = \gamma(X_1, X_2)$ 分布(b) $\theta = \theta(X_1, X_2)$ 分布

图 A.2: 一个典型的FR02探针方向标定(图 A.1中数据)转换后的结果