

图4-12 碘分子吸收线扫描子系统程序界面

- ▲ 区域 1: 数据图形显示区域, 用于实时显示测量得到的种子激光器  $I_2$  滤波器透过率曲线、脉冲激光器  $I_2$  滤波器透过率曲线和种子激光器 Fabry-Perot 透过率曲线。该区域横轴由实际扫描电压范围和扫描电压步长自动确定。
- ▲ 区域 2: 区域 1 的纵坐标标尺, 可以人工调节。
- ▲ 区域 3: 实时测量的种子激光参数显示。I 值代表种子激光透过  $I_2$  滤波器的能量, M 代表直接检测的种子激光能量, I/M 为种子激光  $I_2$  滤波器的透过率值。
- ▲ 区域 4: 实时测量的种子激光透过 Fabry\_Perot 参数显示。Out 代表种子激光透过 Fabry\_Perot 的能量, Ratio 为 Out 值与种子激光能量 M 的比值, 即种子激光 Fabry\_Perot 透过率
- ▲ 区域 5: 实时测量的脉冲激光参数显示。I 值代表脉冲激光某一距离

透过  $I_2$  滤波器的能量， $M$  代表直接检测的某一距离脉冲激光能量， $I/M$  为某一距离脉冲激光  $I_2$  滤波器的透过率值。

▲ 区域 6: 扫描控制电压参数。From 表示初始扫描电压，To 表示终止扫描电压，Now 表示当前加到种子激光器上的扫描电压值。

▲ 区域 7: 显示当前软件处于的状态。

### 使用说明

▲ 按钮 A: 显示区域 1 纵轴调节按钮。当该按钮处于激活状态时，按下  $\uparrow$  或  $\downarrow$  按钮可以增加或减小区域 1 的纵坐标范围，区域 2 的纵坐标标尺也相应变化。

▲ 按钮 Setup: 参数初始化按钮，用于设置该部分程序所需参数。当处于激活状态时，按下该按钮可以弹出 Setup 窗口(图 4-13)。需设置的参数含义如下:

- ▶ 起始扫描控制电压: 对应于主窗口中的 From 值，一般为 0
- ▶ 终止扫描控制电压: 对应于主窗口中的 Out 值，该值需要小于起始扫描控制电压
- ▶ 电压步长: 扫描电压步长，每一步长代表 1.5 毫伏，常规值为 10~50
- ▶ 时间步长: 扫描电压时间步长，每一步长代表 1 毫秒，100 为常规值
- ▶ 数据起始电压: 表示从该扫描电压开始存储脉冲激光大气回波数据
- ▶ 数据终止电压: 表示扫描电压小于该值时停止存储脉冲激光大气回波数据，该值应小于起始电压
- ▶ 平均次数: 表示脉冲激光大气回波数据的平均次数
- ▶ Save Data: Yes 表示存储所需的数据，No 相反

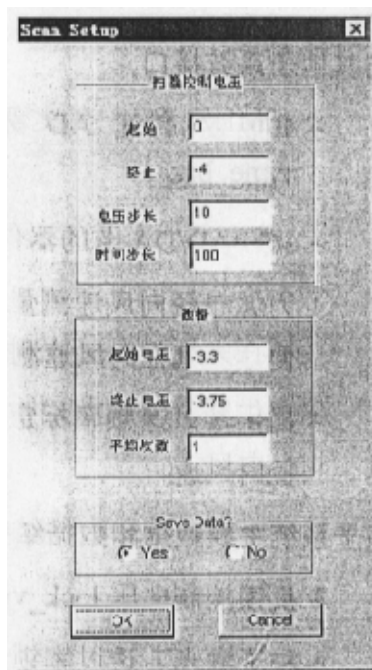


图4-13 Setup窗口

▲ 按钮 Stop: 当处于激活状态时，按下该按钮将停止激光频率扫描流

程

- ▲ 按钮 Scan: 当处于激活状态时, 按下该按钮将开始或继续 (如 Stop 按钮已按下) 激光频率扫描流程
- ▲ 按钮 Quit: 当处于激活状态时, 按下该按钮将退出碘分子吸收线扫描子系统程序。程序退出之前, 下图窗口将弹出, 询问是否将扫描电压归零, 如选择“否”, 则弹出一输入窗口, 添入恰当的值, 则程序自动将控制电压回到该值。

## 第六节 激光输出频率锁定子系统

激光输出频率锁定子系统功能是利用反馈原理控制种子激光的频率, 使其稳定在预定的透过滤值附近, 从而使脉冲激光的频率也稳定在该值, 提供 0 风速参考频率数据, 为测量大气径向风场作准备。

### 与其他子系统接口

- ▲ 40MHz 高速 AD 采集卡的器件控制句柄 hJovian 和采样时基 Time\_base;
- ▲ 16bitAD/DA 卡的器件号 DeviceNumber
- ▲ 为大气径向风速测量子系统提供选定的频率和相应的控制电压, 以便在大气径向风速测量子系统中能继续控制激光频率。
- ▲ 提供零风速频率标定数据, 以便在大气径向风速测量子系统中反演径向风速

### 该子系统主要数据和数据结构

- ▲ 反馈控制电压 lock\_vol: 浮点型数据
- ▲ 种子激光 I<sub>2</sub> 透过率锁定值 lock\_ratio: 浮点型数据
- ▲ 前 20 个种子激光 I<sub>2</sub> 透过率 history\_ratio: 浮点型数组, 长度 20
- ▲ 种子激光碘滤波器透过率 lock\_ratio\_list: 浮点型链表, VC++ 中 Clist 类
- ▲ 种子激光 Fabry\_Perot 透过率 fp\_ratio\_list: 浮点型链表, VC++ 中

Clist 类

▲ 脉冲激光碘滤波器透过率 pulse\_ratio\_list: 浮点型链表, VC++中

Clist 类

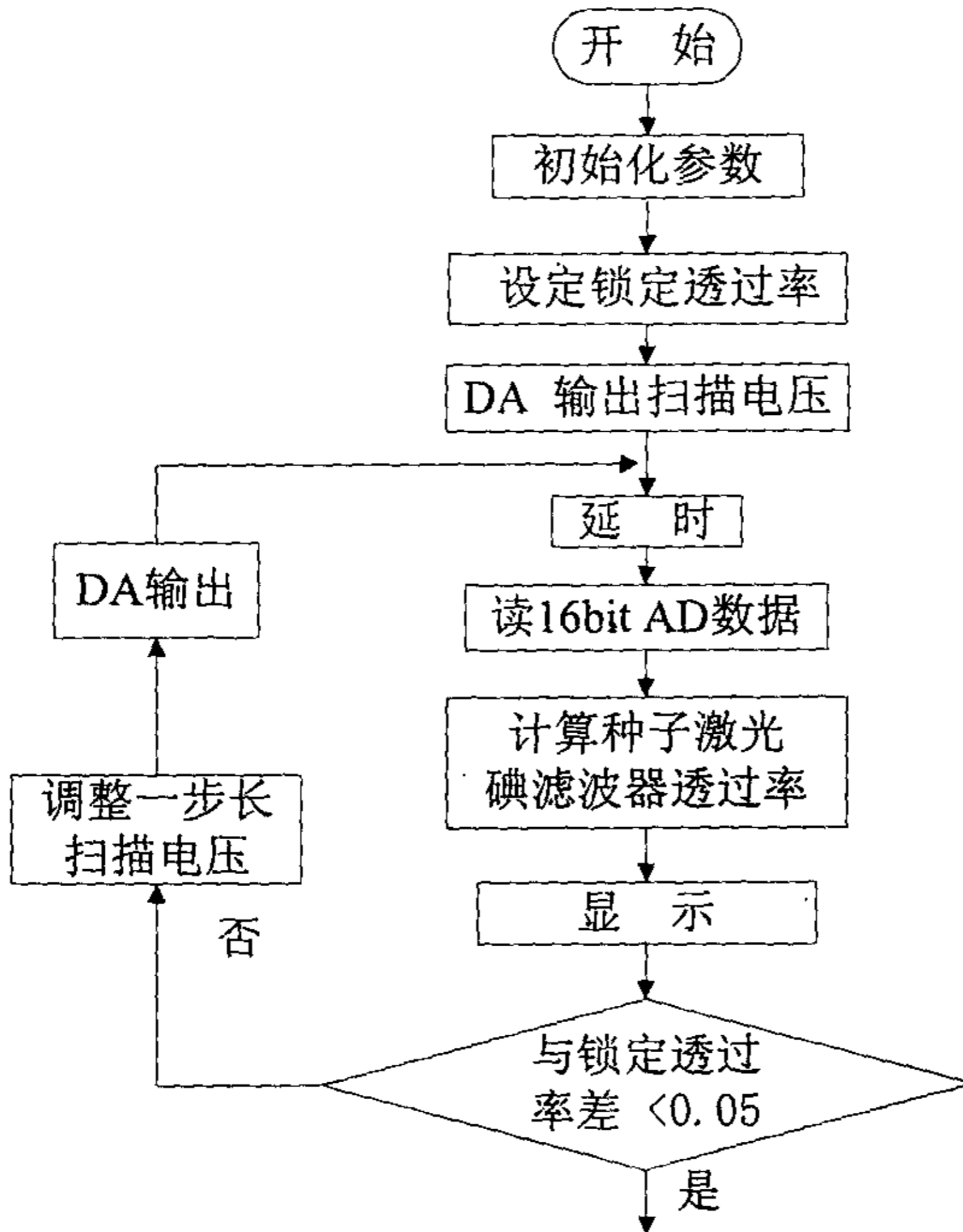
▲ 高速 AD 采集脉冲激光数据 scan\_channel: 浮点型数组, 长度 4K

主要文件存储格式:

▲ 表 4-4 零风速频率标定数据文件格式

脉冲激光回波能量	拟和系数 1	拟和系数 2	...	拟和系数 m
E0	C11	C21	...	Cm1
E1	C12	C22	...	Cm2
...	...	...	...	...
En	C1n	C2n	...	Cmn

该功能子系统的详细程序流程图如图 4-14 所示



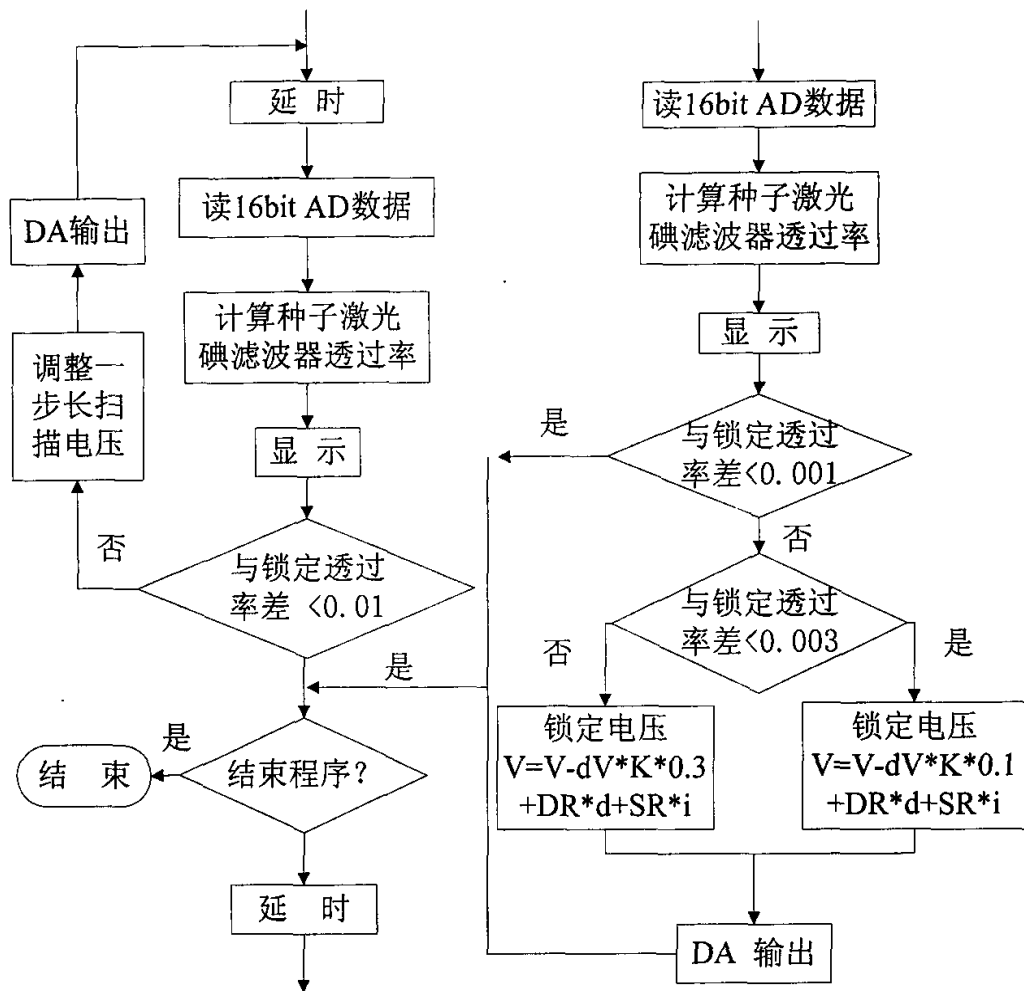


图4-14 激光输出频率锁定子系统程序流程图

### 程序界面和使用说明

该子系统的程序界面和使用说明与碘分子吸收线扫描子系统程序界面和使用说明基本一致，这里就不再重述。

## 第七节 大气径向风速测量子系统

大气径向风速测量子系统功能是在硬件初始化子系统、碘分子吸收线扫描子系统和激光输出频率锁定子系统的基础上，测量大气径向风速。

## 与其他子系统接口

- ▲ 40MHz 高速 AD 采集卡的器件控制句柄 hJovian 和采样时基 Time\_base;
- ▲ 16bitAD/DA 卡的器件号 DeviceNumber
- ▲ 接受碘分子吸收线扫描子系统提供的碘分子滤波器透过率脉冲激光频率标定数据文件
- ▲ 接受激光输出频率锁定子系统提供的锁定频率和相应的控制电压
- ▲ 接受激光输出频率锁定子系统提供的零风速频率标定数据
- ▲ 为大气风场反演提供大气径向风速数据文件

## 该子系统主要数据和数据结构

- ▲ 激光频率控制电压：浮点型数据
- ▲ 种子激光碘分子滤波器透过率：浮点型数组，长度 500
- ▲ 16 位 A/D 采集种子激光数据：浮点型
- ▲ 高速 AD 采集脉冲激光数据：浮点型数组，长度 4K
- ▲ 大气径向风速数据：

```

struct WIND_DATA
{
    float angle;      测量仰角
    wdata[30];      径向风速数据
};

```

## 主要文件存储格式

- ▲ 表 4-5 大气径向风速数据文件存储格式

大气径向风速数据
W0
W1
...
Wn

该功能子系统的详细程序流程如图 4-15 所示

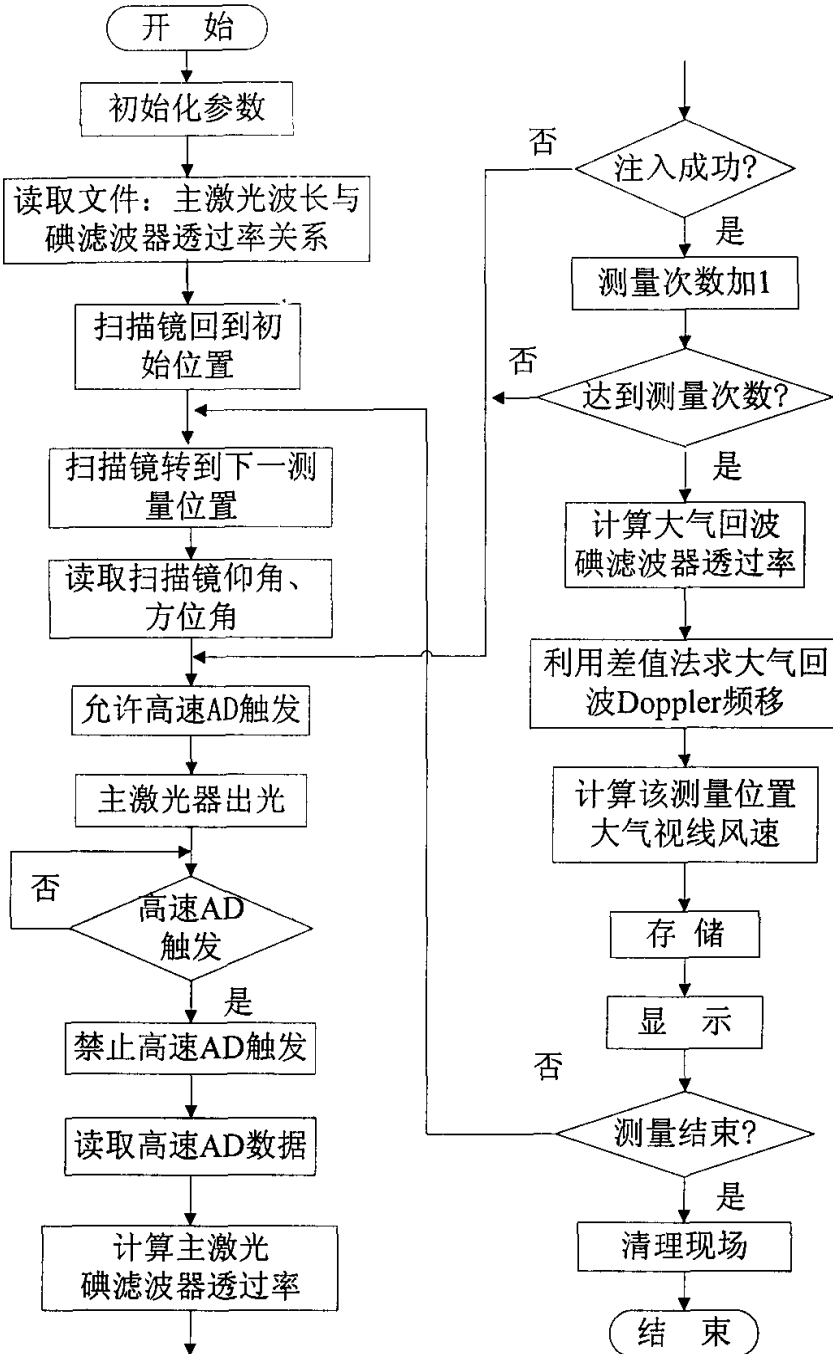


图4-15 大气径向风速测量子系统程序流程

## 激光锁频控制子程序

在测量径向风速的同时，应保持激光输出频率稳定。该子系统中，利用 Windows 系统的定时器控件定时控制激光输出频率，该部分程序如图 4-16 所示。

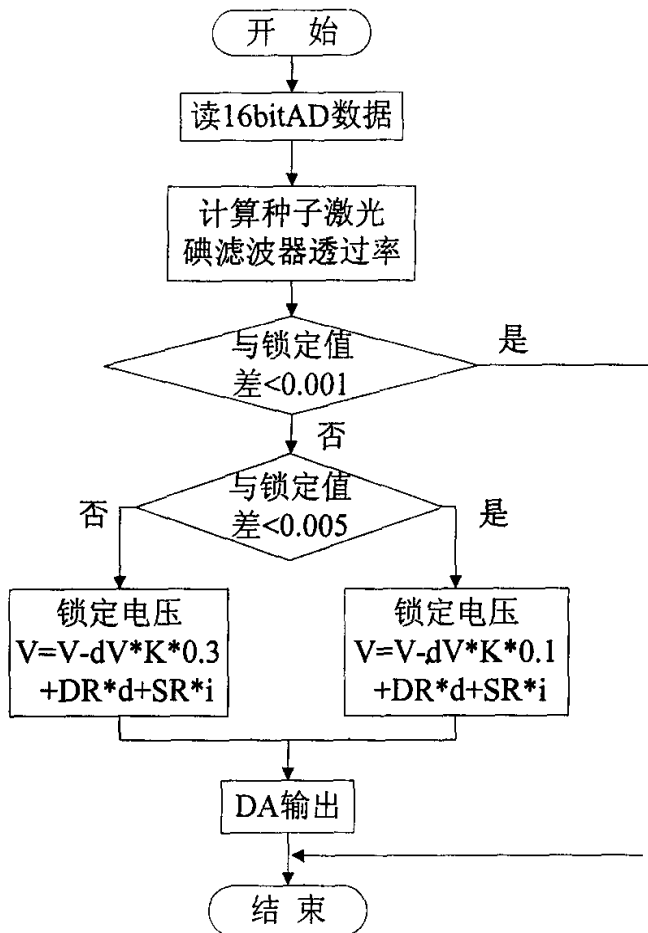


图4-16 激光锁频控制子程序流程图

## 程序界面和使用说明

该部分程序界面分为两部分：激光锁频界面和径向风场测量界面。图 4-17 中上部分为激光锁频界面，下部分为径向风场测量界面。界面中区域 1、3、7 和 9 与前面介绍的含义相同。下面仅对不同部分给予说明：

- ▲ 区域 2：种子激光锁频数据曲线实时显示窗口
- ▲ 区域 4：大气径向风速数据显示窗口。非相干激光多普勒雷达系统

在扫描测量三维风场时，采用的是选定方位角，仰角转动  $0\sim 180^\circ$  测量，然后再转到下一个方位角。这是因为控制仰角转动的次镜重量较轻，易于转动。因此图中采用距离-高度(RHI)进行显示。

- ▲ 区域 5：风速色标。用于标识区域 4 中的风速
- ▲ 区域 6：显示最新一次测量得到的径向风速廓线
- ▲ 区域 8：显示了当前扫描转镜的仰角和方位角度信息

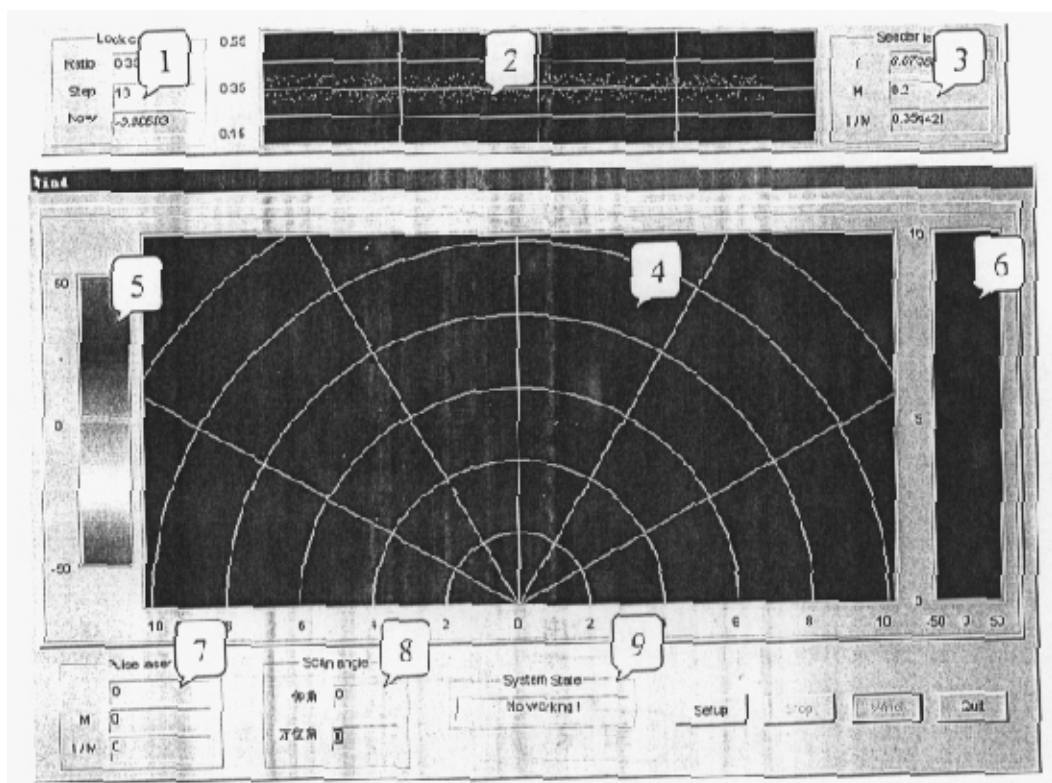


图4-17 大气径向风速测量子系统程序界面

该部分软件的使用与前两个子系统基本相同，这里不再重复。

## 第八节 大气风场反演和开发产品子系统

大气风场反演和开发产品子系统相对独立于其他部分，单独成为一个程序。该程序在实时测量程序得到的测量数据的基础上，进一步计算得到径向风速 PPI、RHI、CAPPI、时间序列图，利用大气径向风速反演出大气

风场，并以此为基础得到大气风场 PPI、CaPPI 和 RHI 分布图，进行显示和存储。

该部分程序利用 Visual Basic 编程语言开发，程序结构比较简单。程序开始运行时，调用数据库中大气径向风速数据文件索引，使用者选择恰当的数据文件和显示模式，相应的程序调用基于 Matlab 的程序处理、显示、存储数据。由于程序流程简单琐碎，此处略去。

#### 与其他子系统接口

▲ 接受实时测量程序提供的大气径向风速数据文件。

#### 主要文件存储格式：

▲ 表 4-6 径向风场 PPI 数据文件存储格式

方位角度	风速
A0	W0
A1	W1
...	...
An	Wn

▲ 表 4-7 径向风场 RHI 数据文件存储格式

仰角角度	风速
A0	W0
A1	W1
...	...
An	Wn

▲ 表 4-8 径向风场 CAPPI 数据文件存储格式

方位角度	仰角角度	风速
A0	B0	W0
A1	B1	W1
...	...	...

An	Bn	Wn
----	----	----

▲ 表 4-9 大气三维风场数据文件存储格式:

方位角度	仰角角度	反演方位角	反演仰角	风速值
A0	B0	RA0	RB0	W0
A1	B1	RA1	RB1	W1
...	...	...	...	...
An	Bn	RAn	RBn	Wn

程序界面和使用说明

运行该程序后，弹出图 4-18 的界面。其中区域 1 显示数据库中测量的纪录及相应的含义，区域 2 显示简单的操作提示。



图4-18 测风数据索引

在图 4-18 区域 1 中选定的行双击鼠标左键，就可选中相应的数据集，并弹出图 4-19 的窗口。图 4-19 中区域 1 给出此次测量所有数据的相关信息，区域 2 给出简单的提示。同样在区域 1 中选定的行双击鼠标的左键，

就可选中相应的数据集，弹出“显示模式选择”窗口，并且程序激活相应的 Matlab 程序。

2000年11月23日  
第0测量数据索引

方位角	仰角	测量时间	测量索引
0	15	014212	
0	30	014310	1
0	45	014409	0
0	60	014507	0
0	75	014606	0
0	90	014704	0
0	105	014803	0
0	120	014901	0
0	135	015000	0
0	150	015058	0

方位角0度, 仰角60度数据 退出

图4-19 单次测风数据索引

在“显示模式选择”窗口(图 4-20)中点击相应的按钮，则控制程序处理出相应的结果。如果选择了“CAPPI 显示”按钮，则会弹出“显示高度参数”窗口(图 4-21)，提示输入高度参数。



图4-20 显示模式选择界面

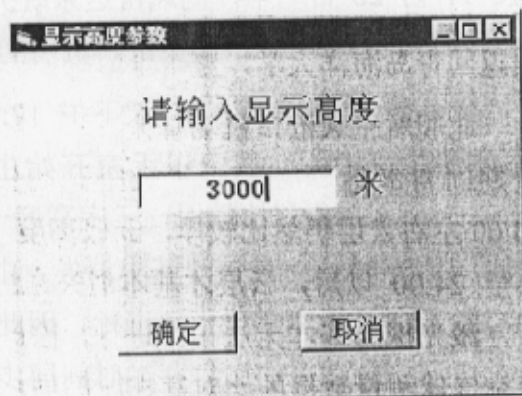


图4-21 CAPPI 显示参数  
输入界面

## 第五章 现场实验

2000年11月30日,由课题工程监理和中国科学院物理所、中国国家气象中心、中国气象科学研究院、青岛市气象台、青岛海洋大学等多家单位专家组成的检测小组按照课题开发合同的规定对激光测风雷达系统主要性能指标做了现场检测。检测结果表明激光测风雷达系统主要性能指标:探测距离、距离分辨率、径向风速范围、风速精度、风向范围、风向精度,达到或超过了课题开发合同的要求。

为了进一步测试在现场环境下非相干激光多普勒测风雷达系统工作的可靠性和稳定性,验证该测风雷达系统经一定距离的公路运输和现场安装调试后可迅速投入测量试验,2000年11月18日至11月26日,测风雷达系统在中国人民解放军北舰航空兵沧口机场进行了测风实验。

测风雷达系统于11月18日早晨开始拆卸装箱,下午14:00左右开始运输,并于18:00左右到达实验场地,晚上即开始进行安装调试。11月19日上午,连接好测风雷达系统的水路、电路,并进行了一系列的检测,证明所有设备正常工作,功能完好。由于天气原因(小到中雨),11月19日仅完成集装箱内光路的安装调试,未进行试验。11月20日系统全部调试完毕,开始试验。一直到11月25日测风雷达系统完成了各种预定的实验。11月26日一早,测风雷达系统拆卸装箱开始往回运,下午16:00安全返回青岛海洋大学,整个沧口机场的外场顺利实验完成。

北舰航空兵沧口机场每天下午17:00放探空气球。在测风雷达系统实验期间青岛地区一般中午天空开始生成云,下午云层不断增厚,晚上20:00左右云层仍然比较厚,云底高度一般在600~1000m,一直到22:00点甚至24:00以后,云层才基本消失。由于在云层比较低,又比较厚的情况下,激光探测基本无法正常进行,因此测风雷达系统测量大气风场数据与探空气球测量数据的比对存在时间同步的问题。尽管如此,考虑到测量相差一般为2~6小时以内,可以认为两者所观测到的风速、风向是具有一定可比性的。

在测量大气水平风场垂直剖面时，一般按照约  $60^\circ$  的仰角，每一方向数据的平均次数最少为 1500 次，测量东西南北四个方位角的径向风速，反演出激光雷达系统正上方的水平大气风场。径向风速的反演按照第二章第五节的方法进行。从径向风速反演大气水平风场时，由于只有四个方向，所以没有使用第二章第六节推导的公式，而是选择了更为简单直接的方法。设  $v_+$  和  $v_-$  为两个相对方位角方向的径向风速，例如东和西方向，则有如下关系：

$$\begin{cases} v_+ = v_h \sin\theta + v_v \cos\theta \\ v_- = -v_h \sin\theta + v_v \cos\theta \end{cases} \quad (5.1)$$

其中， $v_h$  为大气水平风速在该方向的分量， $v_v$  为大气垂直风速， $\theta$  为测量仰角。从式 5.1 可以得到：

$$v_h = \frac{v_+ - v_-}{2 \sin\theta} \quad (5.2)$$

如果  $v_{h1}$  为大气水平风速在东西方向的分量， $v_{h2}$  为南北方向的分量，则由三角函数关系可以得到：

$$\begin{aligned} v &= \sqrt{v_{h1}^2 + v_{h2}^2} \\ \varphi &= \arctg \frac{v_{h1}}{v_{h2}} + k\pi \end{aligned} \quad (5.3)$$

其中， $v$  为大气水平风场风速， $\varphi$  为水平风场风向。

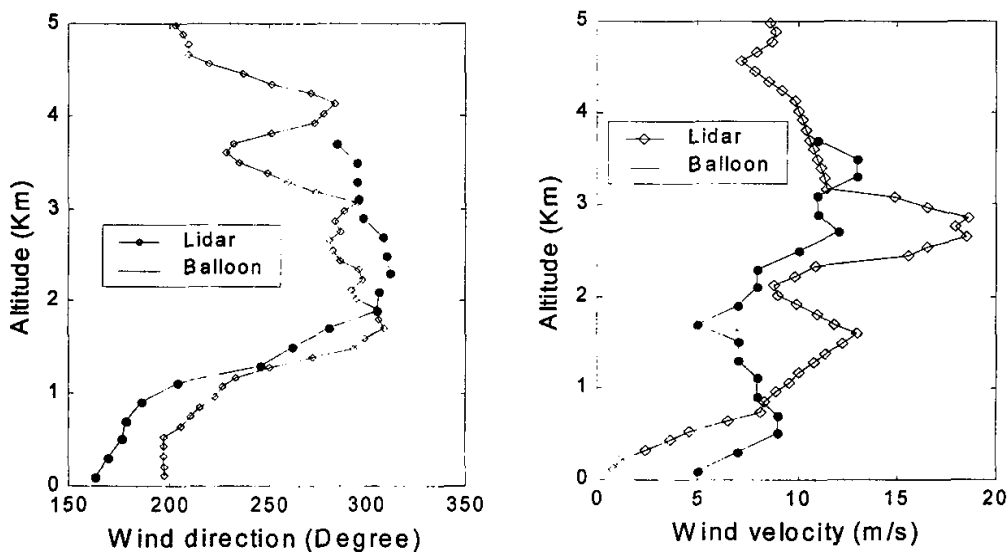


图5-1 11月21日激光测风雷达与探空气球测量数据比对

图 5-1 是 11 月 21 日测风雷达系统与探空气球观测数据对比结果。从图中可以看出，风向在低空吻合不好，在中高空吻合得比较好。风速的趋势基本是一致的，但数值相差较大。尤其在 2.5km 处有明显的偏差。激光测风雷达在 2~3km 之间测到一个很大的风速，但是气球数据没有显示，估计是测量时间差别引起的。

图 5-2 是 11 月 22 日测风雷达系统与探空气球观测数据对比结果。可以看出，风速、风向数据整体趋势基本吻合，并且风速吻合得比风向好。同时测风雷达数据提供了大气风场更多的细节。

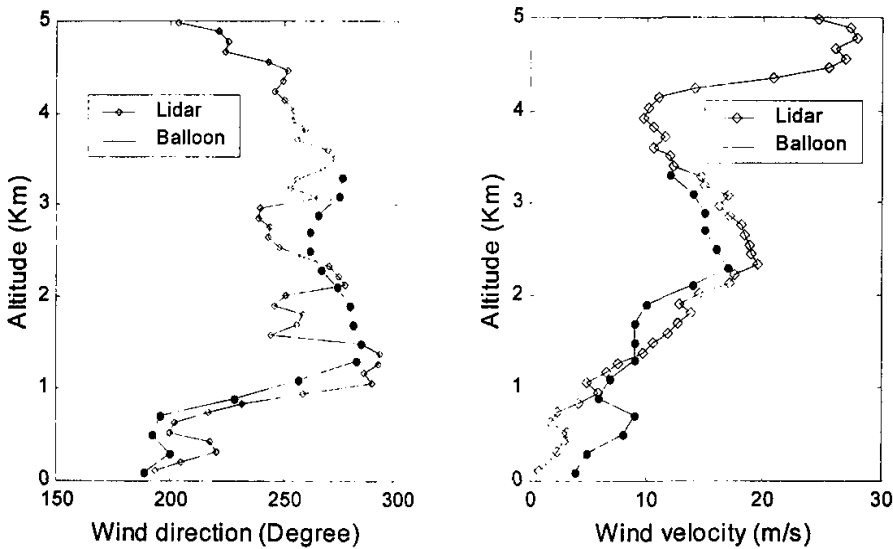


图5-2 11月22日激光测风雷达与探空气球测量数据比对

从图 5-1 和 5-2 可以看出，总体上激光测风雷达与探空气球的观测结果有一定的差距，这一方面可能是由激光测风雷达与气球的观测时间不能完全同步造成的；另一方面气球数据高度分辨率没有激光测风雷达的高，因此，风速、风向的细微结构可能探测不到。

除进行大气水平风场的垂直剖面探测外，为测试激光测风雷达系统整体工作状况，尤其是系统软件的各方面性能，在沧口机场专门做了 PPI、RHI 扫描方式等测风实验，成功的得到了风场的 PPI、RHI、CAPPI、时间序列等图。

下面各图种显示的数据是 11 月 23 日晚测量得到的，测量方位角得步进角度为  $20^\circ$ ，仰角的步进角度是  $15^\circ$ ，每一方向数据的平均次数大于为 1500 次。

图 5-3 是大气径向风场的 PPI(平面位置显示)图，即测量仰角固定不变，方位角按照一定步长扫描  $360^\circ$ ，将观测数据投影到一个平面得到的显示结果。PPI 图显示的是大气风场在一个锥面的特性。图中显示的是仰角为  $15^\circ$  PPI 显示结果。

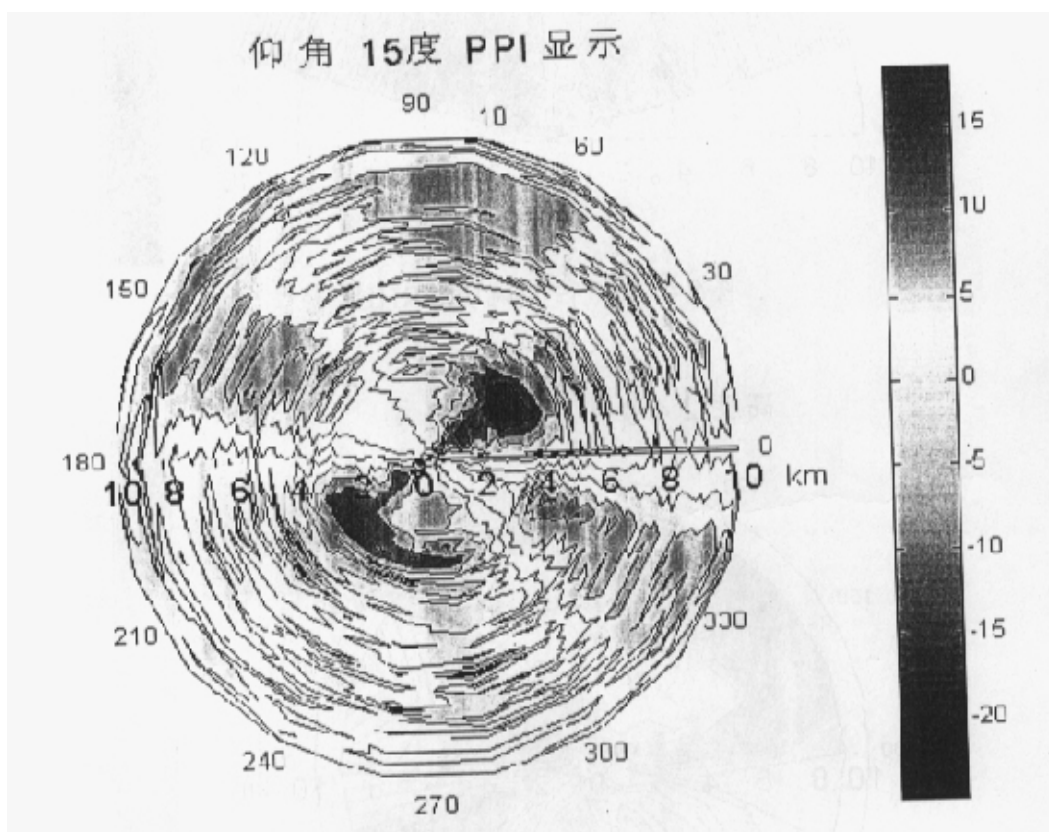


图5-3 大气径向风场的PPI显示

图 5-4 是大气风场 RHI(距离高度显示)图，即测量方位角固定不变，仰角按照一定步长扫描  $180^\circ$  并投影到一个平面得到的显示结果。RHI 图显示的是大气风场垂直结构的特性。图中显示的是方位角为  $0^\circ$  时的测量结果，测量时为了安全仰角的测量范围是  $15^\circ \sim 165^\circ$ 。

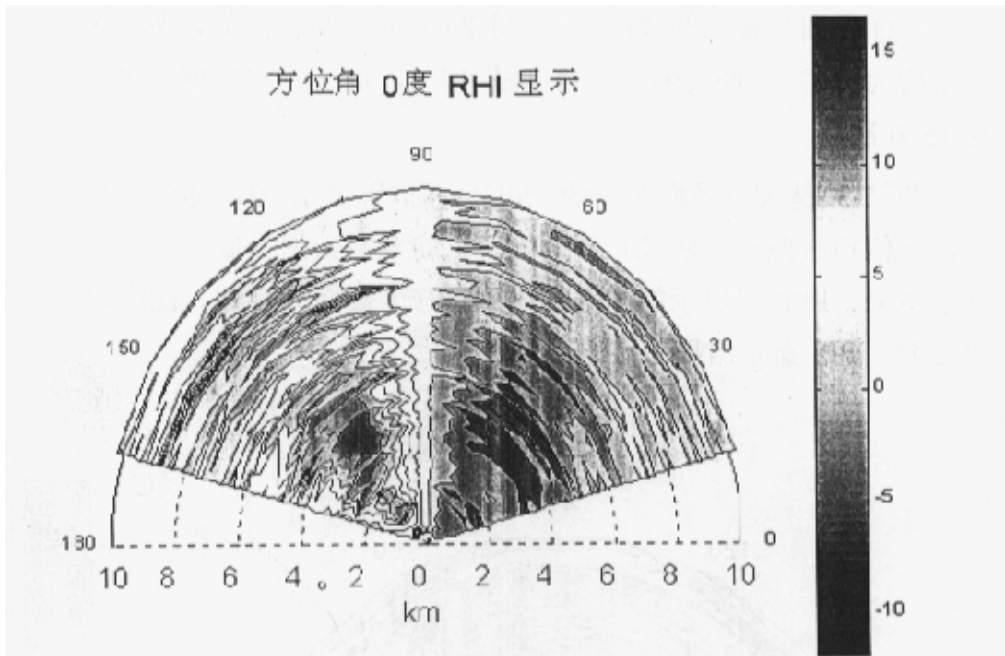


图5-4 大气径向风场的RHI显示

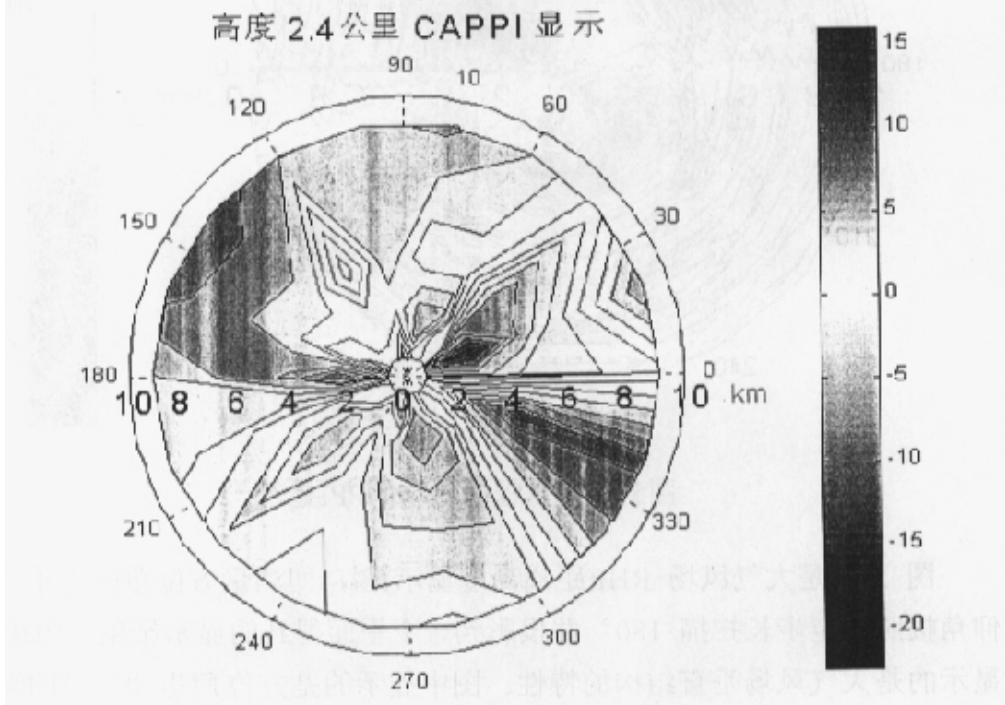


图5-5 大气径向风场的CAPPI显示

图 5-5 是大气径向风场的 CAPPI(等高平面位置显示)图, 即在所有径向风场扫描数据的基础上, 计算出的某一实际高度的各方向和距离径向风速显示。计算时, 近距离的使用高仰角的数据, 远距离的使用低仰角的数据。

11 月 24 日晚进一步做了测风雷达 PPI 方式扫描实验。测量时, 仰角固定在  $45^\circ$ , 方位角的步长是  $3^\circ$ , 每一方向数据的平均次数大于为 1500 次。由于测量时间的关系, 方位角的扫描范围是  $180^\circ$ 。图 5-6 是用专门编制的 PPI 方式显示软件显示的测量数据。

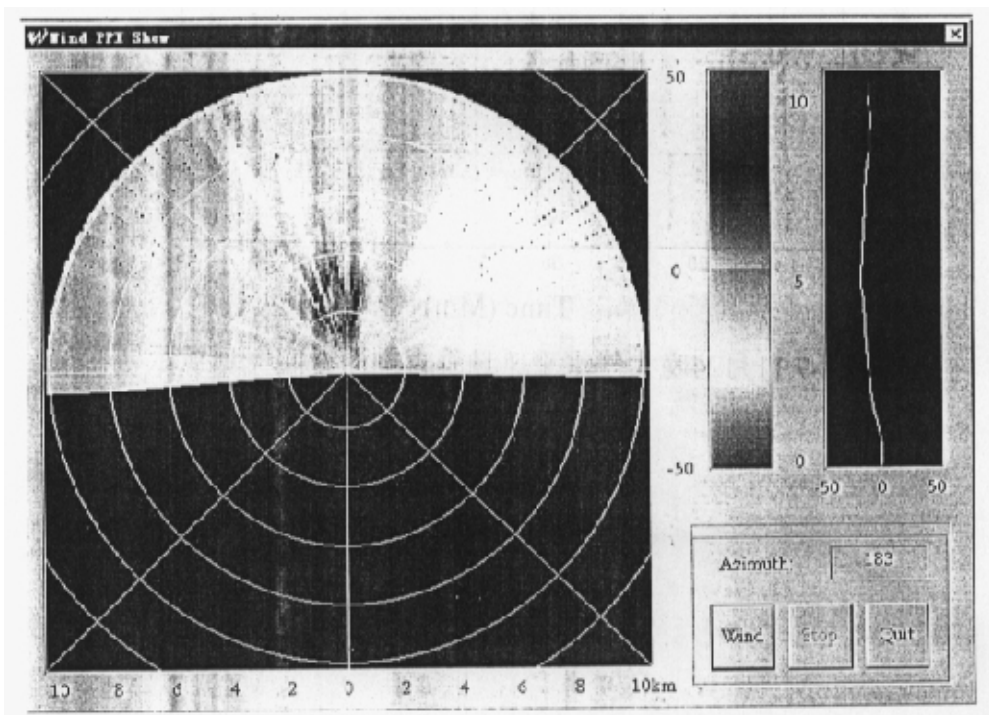


图5-6 11月24日测量数据PPI显示

11 月 24 日晚的另一个实验是对大气水平风场的连续监测。测量时仰角为  $60^\circ$ , 每一方向数据的平均次数约为 1500 次, 测量东西南北四个方位角方向的径向风速, 并利用公式 5.1~5.3 方法反演出雷达系统正上方的水平大气风场的垂直剖面。图 5-7 为由测量数据得到的大气水平风场垂直剖面的时间序列显示。

由图 5-7 可以看出, 在测量的时间内, 大气水平风场比较平稳, 变化

不是很大。另一方面，这也说明了测风雷达系统的工作比较稳定、可靠。

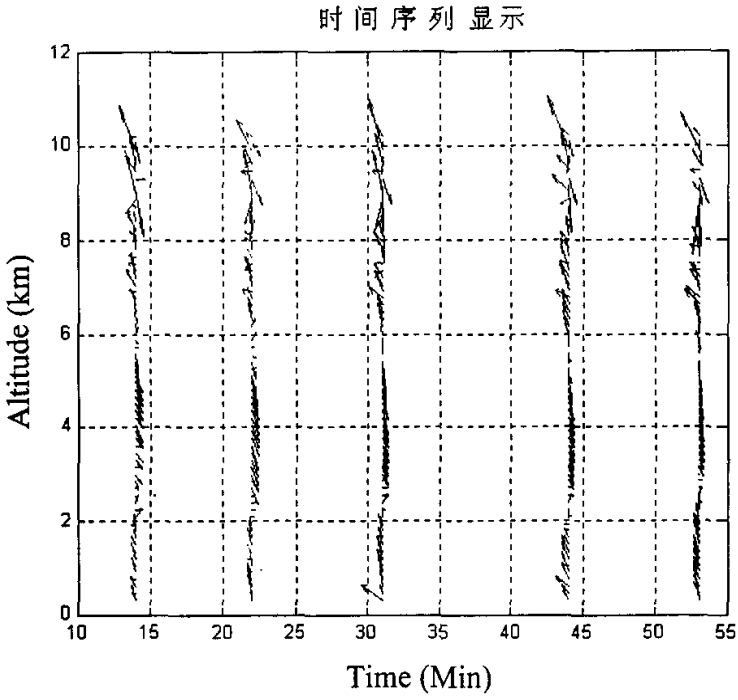


图5-7 11月24晚大气水平风场垂直剖面时间序列显示

## 第六章 结论

非相干激光多普勒测风雷达是目前测量大气风场的最先进技术之一。它作为潜在的星载全球测风设备，在国际上备受关注。由于技术难度高，所需资金多，相关资料又少，因此国际上只有法国和美国的少数单位研制了非相干激光多普勒测风雷达。在国内，目前没有其他单位开展相关研究。经过两年的努力，我们研制了一台基于碘分子吸收滤波器的非相干激光多普勒测风雷达。该激光测风雷达顺利的通过了“863-308”专家组的现场验收，并获得了各种大气风场数据，课题研究取得圆满成功。但在实际运行和现场测量过程中也发现了该系统存在的不足，在以下方面仍然需要进一步研究和改进：

- ▲ 缩短探测时间。由第五章实验过程可以知道，每一方向的测量数据平均次数大于 1500 次，时间约需 3 分钟。测量 4 个方向需要约 15 分钟，测量周期偏长，这就使该测风雷达系统很难测量大气三维风场。造成这一结果的主要原因是 40MHzAD 采样卡数据传输到计算机内存的时间过长，跟不上脉冲激光 10Hz 脉冲重复频率。这一点可以通过使用数字处理芯片(DSP)解决，它可以负责数据采样和预处理，并将处理好的数据送入计算机。这样不仅加快了数据采样和处理，还减少了数据传输量和传输时间，可以大大提高系统性能。数据采样和处理问题解决后，还可以采用重复频率更高的脉冲激光器，从总体上缩短测量周期。
- ▲ 改进激光种子注入技术。目前激光测风雷达的种子激光注入系统中，采用了 Q 开关脉冲建立时间最小化技术，该技术通过不断调节脉冲激光器谐振腔的长度达到脉冲激光与种子激光的频率匹配。由于脉冲激光谐振腔处于不断调节中，使脉冲激光频率总是与种子激光频率有很小的差距，而很难达到频率的完全一致，这在一定程度上造成了使用脉冲激光测量的碘分子 1109 吸收线存在的抖动，影响了风速测量精度。同时，该激光注入技术比较容易受到外界干扰，会产生未注入成功的激光脉冲，在信号处理时需要将其滤掉，

影响了数据采样和处理的时间。E. D. Fry 等在 1991 年提出了更为稳定的激光种子注入技术，但实现该技术需要对脉冲激光器进行改造，激光注入电子学系统也比较复杂<sup>[70]</sup>。

- ▲ 提高探测距离和精度。目前测风雷达系统中光电倍增管工作于模拟状态，10km 的探测距离基本已达到探测极限。可以通过光子计数技术提高探测距离和精度。目前实验室也具有了相关的全部设备。采用光子计数技术后，探测距离可以达到 30~40km，但这是以牺牲 3~5km 以下的测量为代价的。
- ▲ 进一步进行测风精度定标研究。目前，国际上还没有公认的激光测风雷达定标方案。激光测风雷达测量距离比较远，信号信噪比变化大，探测机制也与其他测风仪器相异，因此激光雷达测风精度一般通过理论计算完成。我们研制的激光测风雷达风速探测精度测定是通过同步硬靶实验完成的，即利用测风雷达系统测量一个转盘的转速，转盘转速同时利用精度更高仪器测定。虽然初步完成了定标，但也存在信噪比和探测机制的问题。
- ▲ 进一步研究反演和开发技术。在激光测风雷达预期的主要功能中，有一项是提供中尺度涡旋、切变线、龙卷等产品。由于对气象学等专业知识比较陌生，目前测风雷达系统中无法提供这一类数据产品。今后应加强这一方面工作，为气象科研提供更全面的产品。
- ▲ 对测风雷达系统中的部分功能进行改进，使其更符合工程化系统的需要。需要增加和改进的功能主要包括：进一步增加系统状态的监控，如光电倍增管的电压监控、集装箱内温度监控等；改进脉冲激光器外循环水，使其可以长时间工作于 0℃ 以下；进一步优化软件结构，加快软件运行速度；改进系统软件界面，使其使用更加简单、方便。

作为我国第一台非相干激光多普勒测风雷达的主要完成人，我主要在以下两个方面做出了贡献：

- ▲ 在论文中首次详细论述了同时利用大气 Rayleigh 和 Mie 回向散射的基于碘分子滤波器的非相干激光测风原理，推导了大气径向风速公

式，分析了测量灵敏度和测量误差，给出了大气水平风场反演算法。在此基础上，提出了同时利用 Rayleigh 和 Mie 回向散射进行的大气风场测量的方法。北航航空兵沧口机场的现场测量证明了以上理论和方法的正确性和可行性。该测量方法解决了目前激光测风雷达无法兼顾 Rayleigh 和 Mie 回向散射的问题。因为大气 Rayleigh 和 Mie 散射光谱难以区分，所以只有法国 CNRS 的基于双 Fabry-Perot 干涉仪的系统可以兼顾 Rayleigh 和 Mie 回向散射<sup>[34,35]</sup>，但他们的系统基本是按照大气 Rayleigh 优化的。与我们的系统最相近的 C. A. Tepley 和 J. S. Firedman 等研制的基于碘分子滤波器的激光雷达系统利用 Rayleigh 散射探测了 15~60km 的大气风速剖面，在此高度气溶胶稀薄得可以忽略<sup>[37,38,40]</sup>。基于多通道技术的 V. J. Abreu 等的系统和采用单边缘技术的 C. L. Korb 等的系统则利用 Mie 散射探测了 1.5km 以下的边界层的风场<sup>[31,41]</sup>。在 1.5km 以下，气溶胶含量大于大气分子，因此 Rayleigh 散射基本可以忽略。C. Flesia 等提出了通过优化双 Fabry-Perot 干涉仪的参数达到兼顾 Rayleigh 和 Mie 散射的方法<sup>[45]</sup>。但目前仍然没有相应的实际的系统出现。而且在他们的方案中，Mie 散射实际上基本被忽略。在我们的系统中，实测的、不同高度的大气回向散射透过碘分子吸收滤波器的光谱响应曲线被用于反演各高度风场，从而 Rayleigh 和 Mie 散射光谱的峰值响应同时被利用，无需再区分 Rayleigh 和 Mie 散射，因此风场探测高度可以覆盖大气边界层和低对流层。

- ▲ 研制的地基非相干激光多普勒测风雷达是按照工程样机的标准设计的，在保证系统性能指标和功能的基础上，光机系统和雷达软件系统综合考虑了安全性、鲁棒性、灵活性、易维护性、易操作性等。该激光雷达系统的整体性能在现场实验中得到了验证。这推动了激光测风雷达向业务化运行系统的发展。目前国际上其它系统基本都是实验室的原理系统或科研样机，对光机系统尤其是软件的设计要求不高，研制难度相对较小。

## 参考文献

- [1] 青岛海洋大学海洋遥感研究所, “海面风场激光遥测系统” 项目技术报告, 1995。
- [2] 陈卫标, 基于碘滤波器的非相干激光测风系统研究, 博士论文, 1997。
- [3] L. E. Drain, *The Laser Doppler Technique*, New York, 1976.
- [4] S. L. Valley, *Handbook of Geophysics and Space Environments*, McGrawHill Book Company, 1965.
- [5] G. Benedetti-Michelangeli, F. Congeduti and G. Fiocco, Measurement of aerosol motion and wind velocity in the lower troposphere by Doppler optical radar, *J. Atmos. Sci.*, vol. 29, 906, 1972.
- [6] R. M. Measures, *Laser Remote Sensing Fundamentals and Applications*, A Wiley-Interscience Publication, John Wiley&Sons, New York, 1984.
- [7] R. T. H. Collis and P. B. Russell, Lidar Measurements of Particles and Gases by Elastic Backscattering and Differential Absorption, *Laser Monitoring of the Atmosphere*(E. D. Hinkley, Ed.), Springer-Verlag, 1976.
- [8] R. M. Huffaker, A. V. Jelalin, and J. A. L. Thomson, Laser Doppler system for detection of aircraft trailing vortices, *Proc. IEEE*, vol. 58, 322, 1970.
- [9] T. R. Lawrence, D. L. Wilson, C. E. Craven, *et al.*, Laser velocimeter for remote sensing, *Rev. Sci. Instru.*, vol. 43, 512, 1972a.
- [10] R. L. Schweissow, R. E. Cupp, Remote Doppler velocity measurements of atmospheric dust devil vortices, *Appl. Opt.* vol. 15, 1, 1976.
- [11] M. J. Post, R. L. Schweissow, R. E. Cupp, *et al.*, A comparison of anemometer and lidar sensed wind velocity data, *J. Appl. Meteor.*, vol. 17, 1179, 1978.
- [12] F. Koepp, R. L. Schweissow, and C. Werner, Remote measurements of boundary layer wind profiles using a cw Doppler lidar, *J. Climate Appl. Meteor.*, vol. 23, 148, 1984.
- [13] M. R. Brashears, T. R. Lawrence, and A. D. Zalay, Mobile laser Doppler system checkout and calibration, FAA Report FAA-RD-77-84, Parts I and II, 1977.
- [14] R. M. Munoz, H. W. Mocker, and L. Koehler, Airborne laser Doppler velocimeter, *Appl. Opt.*, 13, 2890, 1974.
- [15] J. W. Bilbro, H. B. Jeffreys, E. A. Weaver, *et al.*, Laser Doppler velocimeter wake vortex tests, *NASA Report TMX-64996, FAA-RD-76-11*, 1976.

- [16] J. M. Vaughan, and A. A. Woodfield, Airspeed and wind shear measurements with an airborne CO<sub>2</sub> cw laser, *Int. J., Aviation Safety*, vol. 1, 207, 1983.
- [17] E. A. Weaver, Clear air turbulence using lasers, *NASA Aircraft safety and operating problem conference, NASA SP 270*, 89, 1971.
- [18] J. W. Bilbro, G.H. Fichtl, D. Fitzjarrald, *et al.*, Airborne Doppler lidar wind field measurements, *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, vol. 65, 348, 1984.
- [19] C. A. DiMarzio, C. Harris, J. W. Bilbro, *et al.*, Pulsed laser Doppler measurements of wind shear, *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, vol. 60, 1061, 1979.
- [20] M J. Post, R. A. Richter, R. M. Hardesty, *et al.*, NOAA's pulsed, coherent IR Doppler lidar-characteristics and data, in *Proceeding of Physics and Technology of Coherent IR Radar*(San Diego, CA), *SPIE*, vol. 300, 60, 1981.
- [21] R. T. Menzies, M. J. kavaya, P. H. Flamant, *et al.*, Atmospheric aerosol backscatter measurements using a tunable coherent CO<sub>2</sub> lidar, *Appl. Opt.* vol. 23, 2510, 1984.
- [22] J. Rothermel, *et al.*, Dual-Doppler lidar measurement of winds in the JAWS experiment, *J.Atmos. Ocean. Tech.*, vol. 2, 138, 1985.
- [23] T. J. Kane, B. Zhou and R. L. Byer, Potential for coherent Doppler wind velocity lidar using neodymium lasers, *Appl. Opt.*, vol. 23, 2477, 1984.
- [24] T. J. Kane, W. J. Kozlovsky, R. L. Byer, and C. Byvik, Coherent laser radar at 1.06 $\mu$ m using Nd:YAG Lasers, *Opt. Lett.*, vol. 12, 239-241, 1987.
- [25] M. J. Kavaya, S. K. Henderson, *et al.*, Remote wind profiling with a solid-state Nd:YAG coherent Lidar system, *Opt. Lett.*, vol. 14, 776, 1989.
- [26] K. P. Chan, and D. K. Killinger, Short pulsed coherent Doppler Nd:YAG lidar, *Opt. Eng.*, vol. 30, 49, 1991.
- [27] J. G. Hawley, R. Targ, *et al.*, Coherent launch-site atmospheric wind sounder: theory and experiment, *Appl. Opt.*, vol. 32, 4557, 1993.
- [28] S. M. Henderson, C. P. Hale, J. R. Magee, *et al.*, Eyesafe Coherent laser radar system at 2.1 $\mu$ m using Tm, Ho:YAG lasers, *Opt. Lett.* vol. 16, 773, 1991.
- [29] R. Targ, B. C. Steakley, *et al.*, Coherent lidar airborne wind sensor II: flight-test results at 2 and 10 $\mu$ m, *Appl. Opt.*, vol. 35, 7117, 1996
- [30] V. J. Abreu, Wind measurements from an orbital platform using a lidar system with incoherent detection: an analysis, *Appl. Opt.* vol. 18, 2992, 1979.

- [31] V. J. Abreu, J. E. Barnes, and P. B. Hays, Observations of winds with an incoherent lidar detector, *Appl. Opt.*, vol. 31, 4509, 1992.
- [32] K. W. Fischer, V. J. Abreu, W. R. Skinner, *et al.*, Visible wavelength Doppler lidar for measurement of wind and aerosol profiles during day and night, *Opt. Eng.*, vol. 34, 499, 1995.
- [33] M. L. Chanin, A. Garnier, *et al.*, A Doppler Lidar for measuring winds in the middle atmosphere, *Geophys. Res. Lett.*, vol. 16, 1273, 1989.
- [34] A. Garnier, and M. L. Chanin, Description of a Doppler Rayleigh lidar for measuring winds in the middle atmosphere, *Appl. Phys. B.*, vol. 55, 35, 1992.
- [35] C. Souprayen, A. Garnier, *et al.*, Rayleigh-Mie Doppler wind lidar for atmospheric measurements. I. Instrumental setup, validation, and first climatological results, *Appl. Opt.*, vol. 38, 2410, 1999.
- [36] C. Souprayen, A. Garnier and A. Hertzog, Rayleigh-Mie Doppler wind lidar for atmospheric measurements. II. Mie scattering effect, theory, and calibration, *Appl. Opt.*, vol. 38, 2422, 1999.
- [37] C. A. Tepley and S. I. S. Sargoytchev, The Doppler Rayleigh lidar system at Arecibo, *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, vol. 31, 36, 1993.
- [38] C. A. Tepley, Neutral winds of the middle atmosphere observed at Arecibo using a Doppler Rayleigh lidar, *J. Geophys. Res.*, vol. 99, 25781, 1994.
- [39] Z. S. Liu, W. B. Chen, *et al.*, An incoherent Doppler lidar for ground-based atmospheric wind profiling, *Appl. Phys. B*, vol. 64, 561, 1997.
- [40] J. S. Firedman, C. A. Tepley, *et al.*, Middle-atmospheric Doppler lidar using an iodine-vapor edge filter, *Opt. Lett.*, vol. 22, 1648, 1997.
- [41] C. L. Korb, B. M. Gentry and C. Y. Weng, Edge technique: theory and application to the lidar measurement of atmospheric wind, *Appl. Opt.*, vol. 31, 4202, 1992.
- [42] B. M. Gentry and C. L. Korb, Edge technique for high-accuracy Doppler velocimetry, *Appl. Opt.*, vol. 33, 5770, 1994.
- [43] C. L. Korb, B. M. Gentry and S. X. Li, Edge technique Doppler lidar wind measurements with high vertical resolution, *Appl. Opt.*, vol. 36, 5976, 1997.
- [44] C. L. Korb, B. M. Gentry, S. X. Li, *et al.*, Theory of the double-edge technique for Doppler lidar wind measurement, *Appl. Opt.*, vol. 37, 3097, 1998.
- [45] C. Flesia and C. L. Korb, Theory of the double-edge molecular technique for Doppler lidar wind measurement, *Appl. Opt.*, vol. 38, 432, 1999.

- [46] R. T. Menzies and R. M. Hardesty, Coherent Doppler lidar for measurements of wind fields, *Proc. of The IEEE*, vol. 77, 449, 1989.
- [47] K. P. Chan, and D. K. Killinger, Coherent 1- $\mu\text{m}$  lidar measurements of atmospheric-turbulence-induced spatial decorrelation using a multielement heterodyne detector array, *Appl. Opt.*, vol. 31, No. 10, 1992.
- [48] M. J. McGill, W. R. Skinner and T. D. Irgang, Analysis techniques for the recovery of winds and backscatter coefficients from a multiple-channel incoherent Doppler lidar, *Appl. Opt.*, vol. 36, 1253, 1997.
- [49] J. A. McKay, Modeling of direct detection Doppler wind lidar. I. The edge technique, *Appl. Opt.*, vol. 37, 6480, 1998.
- [50] J. A. McKay, Modeling of direct detection Doppler wind lidar. II. The fringe imaging technique, *Appl. Opt.*, vol. 37, 6487, 1998.
- [51] M. J. McGill and J. D. Spinhirne, Comparison of two direct-detection Doppler lidar techniques, *Opt. Eng.* vol. 37, 2675, 1998.
- [52] M. J. McGill, W. D. Hart, M. J. McGill and J. D. Spinhirne, Modeling the performance of direct-detection Doppler lidar systems including cloud and solar background variability, *Appl. Opt.*, vol. 38, 6388, 1999.
- [53] J. A. McKay, Fabry-Perot etalon aperture requirements for direct detection Doppler wind lidar from Earth orbit, *Appl. Opt.*, vol. 38, 5859, 1999.
- [54] J. A. Gelbwachs, Atomic Resonance Filters, *IEEE J. of Quant. Electronics*, vol. 24, 1266, 1988.
- [55] J. B. Marling, J. Nilsen, L. C. West, and L. L. Wood, An ultrahigh-Q isotropically sensitive optical filter employing atomic resonance transitions, *J. Appl. Phys.*, vol.50, 610, 1979.
- [56] H. Shimizu, S. A. Lee, and C. Y. She, High spectral resolution lidar system with atomic blocking filters for measuring atmospheric parameters, *Appl. Opt.*, vol. 22, 1373, 1983.
- [57] R. J. Alvarez, L. M. Caldwell, Y. H. Li, D. A. Krueger, and C. Y. She, High-Spectral Resolution lidar measurement of tropospheric backscatter ratio using Barium Atomic blocking Filters, *J. of Atmospheric and Oceanic Technology*, vol.7, 876, 1990.
- [58] J. W. Hair, L. M. Caldwell, D. A. Krueger, and C. Y. She, High spectral resolution lidar for measuring aerosol and atmospheric state parameters using an iodine vapor filter at 532 nm, *Proceeding of SPIE*, vol. 2833, 34, 1996.
- [59] P. Piironen, and W. W. Eloranta, Demonstration of a high-spectral-resolution lidar based on an iodine absorption filter, *Opt. Lett.*, vol. 19, 234, 1994.

- [60] S. Gerstenkorn and P. Luc, *Atlas du Spectre d'Absorption de la Molecule d'Iode, 14,800-20,000 cm<sup>-1</sup>* (Laboratoire Aime-Cotton Centre Nationale de la Recherche Scientifique, Paris), 53, 1978.
- [61] A. C. G. Mitchell and M. W. Zemansky, *Resonance Radiation and Excited Atoms*, Cambridge, U.P., London, 1971.
- [62] R. C. Weast, *Handbook of Chemistry and Physics*. The Chemical Rubber Co., 1971.
- [63] J. D. Spinhirne, Micro pulse lidar, *IEEE Trans. Geosc. Rem. Sens.*, vol. 31, 48, 1993.
- [64] 戴铁丕, 张培昌, 詹煜编著, 雷达气候学, 北京, 气象出版社, 251, 1995.
- [65] 盛骤, 谢式千, 潘承毅编, 概率论与数理统计, 北京, 高等教育出版社, 173, 1989.
- [66] Y. K. Park, G. Giuliani and R. L. Byer, Stable single-axial-mode operation of an unstable-resonance Nd:YAG oscillator by injection locking, *Opt. Lett.*, vol. 5, 96, 1980.
- [67] R. L. Schmitt and L. A. Rahn, Diode-laser-pumped Nd:YAG laser injection seeding system, *Appl. Opt.*, vol. 25, 629, 1986.
- [68] U. Von Zahn, E. V. Thrane and R. Skatteboe, The ALOMAR project: status and outlook, Proc. 12<sup>th</sup> ESA symp. on European Rocket and Balloon Programs and related Research, Lillehammer, Norway, *Europe Space Agency Publ. ESA SP-370*, 379, 1995.
- [69] W. 戴姆特瑞德著, 激光光谱学, 北京, 科学出版社, 108, 1989。
- [70] E. D. Fry, Q. Hu and X. Li, Single-frequency operation of an injection-seeded Nd:YAG laser in high noise and vibration environments, *Appl. Opt.*, vol. 30, 1015, 1991.

## 致 谢

在青岛海洋大学海洋遥感研究所学习和工作的六年是我人生之中一个关键阶段，得益于研究所雄厚的科研实力、浓郁的学术氛围和融洽的人际关系，我自身综合素质得到了全方位的提高，为将来的工作学习奠定了坚实的基础。

衷心感谢我的导师刘智深教授，是刘老师指引我走上了科学研究的道路，并给予了我无私的教诲。刘老师渊博的知识、严谨的作风和勇于创新的精神将使我终生受益。

感谢贺明霞教授几年来在工作和学业上对我的关怀和帮助。对贺老师忘我的工作热忱和一丝不苟的工作精神表示由衷的钦佩。

在非相干激光测风雷达系统的研制中，张凯临老师自始至终发挥了重要的作用。没有张凯临老师的工作，脉冲激光器的改造、集装箱内部电路水路设计等就不可能按期完成，整个雷达系统的研制就无法顺利进行。张凯临老师的创新和实践精神，值得我学习。

感谢陈卫标博士和吴东老师在激光测风雷达系统的理论推导和信号处理方面给予的指导，以及他们在激光雷达系统后期实验中的重要工作。

在激光雷达系统研制中，宋小全、吴松华、贺岩、张博、丁田夫、孙大鹏等同学承担了几乎全部的实验，经常工作到深夜。在此表示感谢。

感谢研究所的其他老师和同学六年中给予的指导和帮助。