

基于改进 VPP 方法的激光雷达小尺度风场反演

何清芳¹, 王青梅², 毕波², 曾祥能², 史倩义²

(1. 南京信息工程大学 电子与信息工程学院, 江苏 南京 210044;
2. 北京航空气象研究所, 北京 100085)

摘要: VPP 方法对小尺度风场结构中心区域的反演展现了良好的性能,但在边缘区域,由于风速变化剧烈,破坏了径向风场的连续性,导致反演算法在该区域失效。研究了受干扰的反演区域的识别和定位方法,推导出同一个径向上水平切向风速一致,依此对水平切向风速修正,提出一种改进的 VPP 反演算法,采用该方法反演模拟的小尺度辐散风场,仿真结果验证了方法的有效性。

关键词: 风场反演; 多普勒激光雷达; VPP 算法; 小尺度风场

中图分类号: TN958.98 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2014)05-1484-06

Inversion of micro-scale wind field for lidar based on improved VPP algorithm

He Qingfang¹, Wang Qingmei², Bi Bo², Zeng Xiangneng², Shi Qianyi²

(1. College of Electronic and Information Engineering, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China; 2. Beijing Institute of Aviation Meteorology, Beijing 100085, China)

Abstract: VPP retrieval algorithm shows good performance among the central region of micro scale wind field. But on the edge, the wind field changes dramatically, destroys the continuity, and makes the retrieval method invalid. The method of identifying and locating the interference inversion region was studied. It was derived that horizontal tangential wind speed was the same at the same radial, thus the initial inversion results were corrected. An improved algorithm was put forward. The experiment was conducted using simulated doppler lidar data to prove the method, and it is proved to be effective.

Key words: wind retrieval; Doppler lidar; VPP algorithm; micro-scale wind field

收稿日期: 2013-09-15; 修订日期: 2013-10-24

作者简介: 何清芳(1987-), 女, 硕士生, 主要从事雷达探测及应用方面的研究。Email: chinahqf2011@163.com

导师简介: 王青梅(1959-), 女, 高级工程师, 硕士生导师, 博士, 主要从事大气光探测应用方面的研究工作。

Email: wqm6666@sina.com

0 引言

风是对飞行安全影响最大的气象要素^[1],飞机的起飞、着陆及起降方向的选择都要考虑低空风场的影响,而小尺度风场的剧烈变化在飞机起降阶段对飞行安全的威胁极大。多普勒激光测风雷达^[2-4]由于其高时间、空间分辨率,高精度等技术优势及其良好的“晴空”探测能力,采用低仰角扫描方式,能够为低空风场反演提供有效的数据资料。

目前,单多普勒雷达的反演方法主要有 VAD^[5]、VAP^[6]、VVP^[7]、VPP^[8]、涡度-散度法^[9]、变分同化法和它们的改进方案。VAD 方法求出的是风场平均情况,在实际应用中局限性很大^[10];VAP 方法对多普勒速度变化敏感,计算误差大,只对均匀风场效果好^[10];VVP 方法计算较为复杂,需要很大的样本数量才能达到必要的精度,蒋立辉等^[11]通过假设分析体积内各点三维风场分布完全相同,简化 VVP 方法,实现了对激光雷达小尺度风场的反演,但反演的风向误差较大;涡度-散度方法能够较好地反演较小强对流天气,但可能会夸大原本不太强的天气系统^[9],庄子波等运用该方法对激光雷达低空三维风场进行反演实验,受边界条件影响,在初始点附近区域反演偏差较大;变分同化法需要连续的观测资料,计算量庞大;王改利等^[12]采用变分同化法对多普勒激光雷达实际探测的海面风场进行了反演,研究表明反演风场与浮标数据基本一致,在风速较大的天气情况比风速较小时反演效果好。VPP 算法利用低仰角 PPI 代替地面径向风矢量,假设单位分析体积内部风场保持一致,利用变分思想求出水平切向风场,其方法简单、计算量小,由于其分析单元选取的较小,能很好地反演出中小尺度风场结构,适合于机场低空风场的反演;但在风场突变区域,由于径向风场的不连续性,使得 VPP 反演算法在该区域失效。

1 改进 VPP 方法反演小尺度风场

1.1 VPP 反演方法

VPP 反演方法主要思想是求取分析单元内探测的径向速度与分析单元风场在各径向上投影风场之间平方和最小时的水平切向风速,进而反演二维风

场^[8],即:

$$V_t = - \frac{\sum_{r=r_1}^{r_2} \sum_{\theta=\theta_1}^{\theta_2} C_{r\theta} \sin(\theta_0 - \theta)}{\sum_{r=r_1}^{r_2} \sum_{\theta=\theta_1}^{\theta_2} \sin(\theta_0 - \theta)^2} \quad (1)$$

当分析单元径向只取一个距离库,方位角跨度只取两个角度,上式可化简为^[5]:

$$V_t = \frac{C_{r\theta_2} - C_{r\theta_1}}{2\sin(\frac{\theta_2 - \theta_1}{2})^2} \quad (2)$$

最后进行坐标变换,求取直角坐标系下风场的 u、v 分量^[8]:

$$\begin{aligned} u &= v_r \sin\theta + v_\theta \cos\theta \\ v &= v_r \cos\theta - v_\theta \sin\theta \end{aligned} \quad (3)$$

根据郎需兴等研究表明分析单元通常选取径向 1~4 个距离库,方位角跨度 2~10°,其中方位角跨度选取 6°时反演效果较好。当径向风场变化大时,假设不成立,由简化的公式(2)同样可以看出,由于 θ_1 与 θ_2 差值较小,使得分母 $2\sin(\frac{\theta_2 - \theta_1}{2})$ 值很小,而风速差值较大,反演结果受到严重的干扰^[13]。通过对多组模拟数据的试验观察发现,同一径向上各距离库水平切向风速相同,若该规律成立,则可定位受干扰区域,用同一径向上的数据对其进行修正。

1.2 同一个径向上切向风速相等

在 VPP 算法假设条件下,水平切向风速可表示为:

$$v_t = V_0 \sin\beta \quad (4)$$

式中: V_0 为实际风场风速大小; β 为径向波束与实际风矢量的夹角。

(1) 均匀风场中,同一个径向上任意一点 V_0 和 β 都是相同的,由公式(4)可得该风场中同一个径向上任意一点的水平切向风速均相等。

(2) 小尺度辐合、辐散风场中,风速根据 Rankine 近似^[14]可表示为:

$$\begin{aligned} V(r) &= V_{\max} \cdot \frac{r}{R_0} \quad (r \leq R_0) \\ V(r) &= V_{\max} \cdot \frac{R_0}{r} \quad (r > R_0) \end{aligned} \quad (5)$$

式中: R_0 为涡旋的核半径; V_{\max} 为涡旋最大风速; r 为涡旋风场中各探测点对涡旋中心 O 点的距离。图 1

显示了辐散场中 A、B 两点的水平切向风矢量。

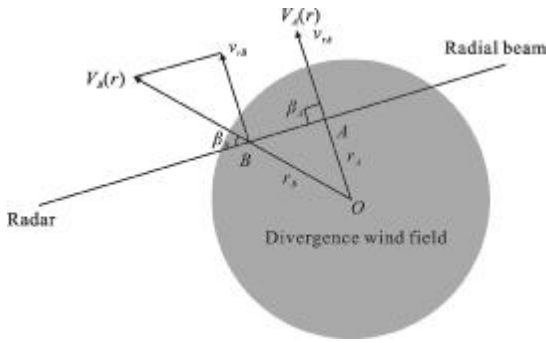


图 1 辐散风场水平切向风速示意图

Fig.1 Diagram of the horizontal tangential velocity of divergence wind field

O 点为辐散风场区域中心； r_A 为辐散风场中心到径向波束的垂直距离（即到径向上 A 点距离）； r_B 为辐散风场中心到径向上 B 点的距离； $V_A(r)$ 、 $V_B(r)$ 分别为 A、B 点实际风场， β_A 、 β_B 分别为 A、B 点实际风场与径向波束的夹角，则在径向上 A 点的水平切向风速为：

$$v_{IA} = V_A(r) \cdot \sin\beta_A = V_{\max} \cdot \frac{r_A}{R_0} \quad (6)$$

B 点的水平切向风速为：

$$v_{IB} = V_B(r) \cdot \sin\beta_B = V_{\max} \cdot \frac{r_B}{R_0} \cdot \sin\beta_B \quad (7)$$

由于 $r_B = r_A / \sin\beta_B$ ，则 B 点水平切向风速可化简为：

$$v_{IB} = V_{\max} \cdot \frac{r_A}{R_0} \quad (8)$$

比较公式(6)和(8)，可以发现该风场中同一径向上各点的水平切向风速均相等。

(3) 均匀风场叠加辐合、辐散风场中，水平切向风速即为两个风场在水平切向上投影之和，依据上述推导，同样可得同一径向上各点的水平切向风速均相等。

综上所述，小尺度辐合、辐散风场中同一径向上各点水平切向风速相等。因此利用这个规律可用同一径向上未受风速突变干扰反演的水平切向风速修正受干扰区域的水平切向风速。

1.3 受干扰区域的识别与定位

小尺度风场结构边缘风速变化剧烈，破坏了径向风场的连续性，VPP 方法假设不成立，反演的水平

切向风速误差很大，受干扰区域的大小与选取的分析单元有关。定义距离圈 r 与方位角 θ 交叉的点为一个格点，假设只选取一个距离圈，方位角跨度为 n 个角度间隔进行水平切向风速的反演，根据公式(2)可以发现，受选取格点数的影响，以风速差值很大的两个格点为中心的 n 个点，反演的水平切向风速均受到干扰。图 2 显示了某一距离圈上反演的水平切向风速，该距离圈上有两个突变点分别在方位角 80° 和 100° ，反演的水平切向风速在两个突变点处分别形成了宽为 n 个角度间隔的受干扰区域，如图 2 中 ab 段、 cd 段。每个受干扰区域内的水平切向风速仍是连续变化的，但两端点分别与区域外相邻点的水平切向风速发生了跳变，如图 2 中 ab 段端点 a 点、 b 点。

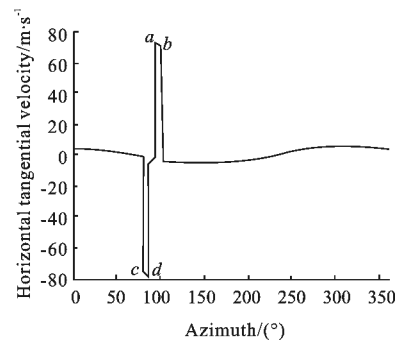


图 2 某一距离圈上未进行修正的水平切向风速

Fig.2 Horizontal tangential velocity of a certain distance circle without modification

要修正受干扰区域的切向风速，需要先确定突变点位置。首先通过计算 VPP 反演后的整个风场区域相邻两个点之间的水平切向风速的差值，然后比较各差值，进行排序，找出比其他大一个数量级以上的差值，确定得出该差值的两个风速所在的格点位置。当确定了所有突变格点位置后，找出这些格点中距离圈的最大最小值及中间值 r_{\max} 、 r_{\min} 、 r_{mid} 和方位角的最大最小值及中间值 θ_{\max} 、 θ_{\min} 、 θ_{mid} ，其中 $(r_{\text{mid}}, \theta_{\text{mid}})$ 即为涡旋场的中心， r_{\max} 、 r_{\min} 、 θ_{\max} 、 θ_{\min} 确定了涡旋场最大范围。将涡旋场分为左右两部分， $\theta > \theta_{\text{mid}}$ 即为左边的突变区域，将左边受干扰区域也平均分为左右两部分，左边 $n/2$ 个格点的水平切向风速通过受干扰区域外的相同径向上切向风速修正，右边 $n/2$ 个格点的水平切向风速通过涡旋场中间距离圈 r_{mid} 相

同径向上的切向风速修正; $\theta < \theta_{mid}$ 即为右边的突变区域, 同样平均分为左右两部分, 左边 $n/2$ 个格点的水平切向风速通过涡旋场中间距离圈 r_{mid} 相同径向上的切向风速修正, 右边 $n/2$ 个格点的水平切向风速, 通过受干扰区域外相同径向上的切向风速修正。修正后的结果如图 3 所示, 可以看出有效地消除了风速突变引起的干扰。

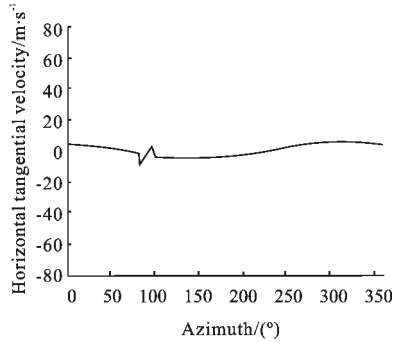


图 3 某一距离圈上水平切向风速修正结果

Fig.3 Correction result of the horizontal tangential velocity on a certain distance circle

2 仿真分析

为验证文中提出方法的有效性, 对模拟的辐散风场进行反演实验, 辐散风场是在水平风速为 5 m/s 的均匀西南风场上叠加一个辐散气流进行风矢量合成。

2.1 辐散风场反演实验

模拟风场在 x 方向的 u 分量速度大小为 4 m/s, y 方向的 v 分量速度大小为 3 m/s 的均匀风场背景下叠加一个最大值为 10 m/s, 半径为 10 个格点的水平方向的辐散风场, 辐散风场位于径向上第 40~60 个距离库位置, 方位角为 $80^\circ \sim 100^\circ$; (叠加后风场分别如图 4(a)、图 4(d)所示)。文中借鉴国内研究成果, 选取 VPP 单位分析体积单元为 1×6 区域(即径向选取 1 个距离库, 方位角跨度选取 6°)进行风场反演实验。

图 4 中显示了模拟风场与反演风场的对比。图 4(b)、图 4(e)分别为未进行修正时反演的 u 分量、 v 分量风场, 可以看出在(50, 90)为中心的位置上均仍存在辐散风场, 但反演的风速有很大的误差; 图 4(c)、图 4(f)分别显示了进行修正后反演的 u 分量、 v 分量风场, 可以看出与原始模拟风场一致。

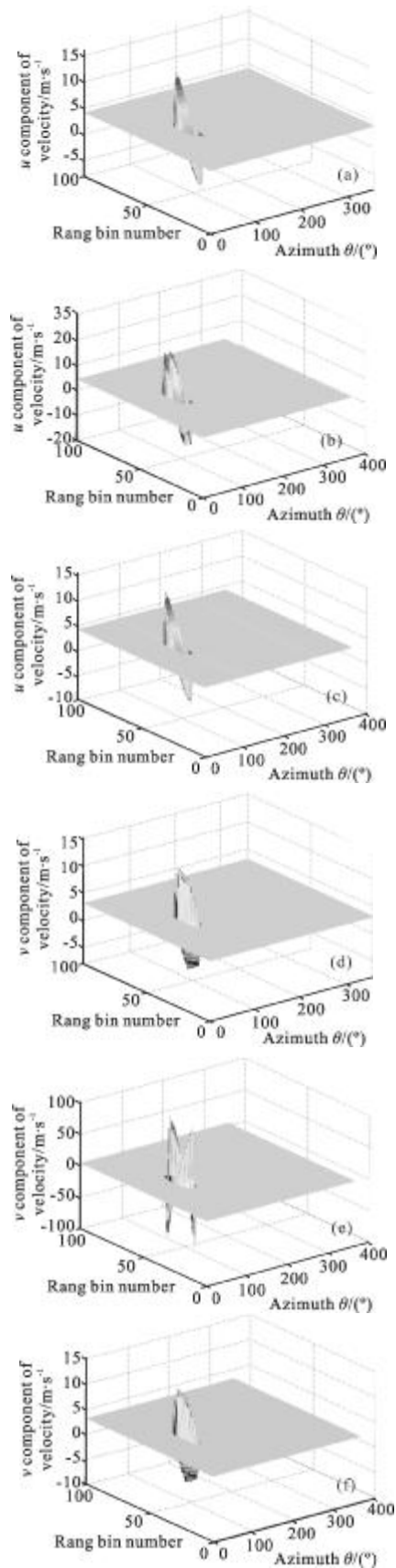


图 4 模拟风场与反演风场的对比

Fig.4 Contrast between simulated and retrieved wind field

图 5(a)以箭头的方式显示了初始模拟风场的水平速度大小和风向分布,图 5(b)显示了未进行修正时反演风场的水平风速大小和风向分布,可以看出均匀风场及辐散风场中心区域反演效果较好,但在辐散风场边缘区域的失真较为严重,图 5(c)显示了进行修正后反演风场的水平风速大小和风向分布,可以看出进行修正后反演的风场与初始模拟风场一致。

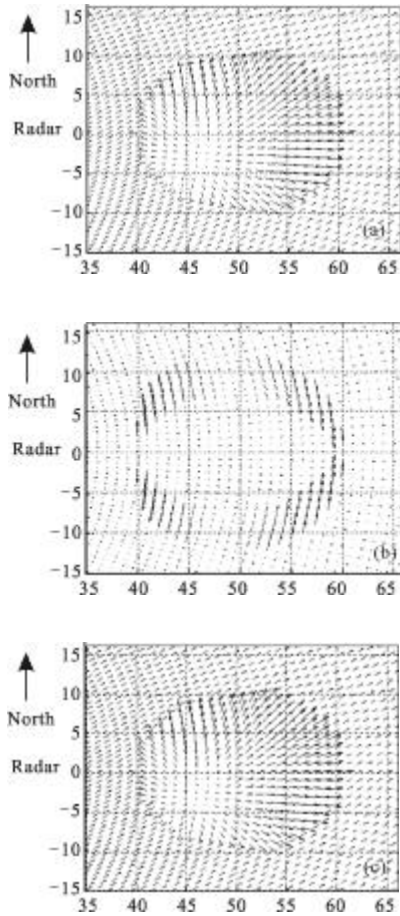


图 5 模拟水平风场与反演后水平风场的对比

Fig.5 Contrast between simulated actual horizontal wind field and retrieved horizontal wind field

2.2 反演误差分析

反演方法的误差主要来源于径向速度本身的测量误差、数据的缺失及分析区域范围的选取等。其中径向速度的误差可以通过提高设备的精密度进行改进;数据的缺失可以通过对初始探测资料预处理进行填补;分析区域范围选取的误差主要体现在方位角跨度的选取,根据郎需兴等^[5]研究表明分析单元方位角跨度增大时,水平切向风速 v_t 的 MRE 越来越小,但其跨度越大,分析体积内风场均匀的假设

就越不成立,且是以牺牲分辨率为前提。通过实验比较发现方位角跨度选取 6° 时较好,既能保证精度,同时尽可能地提高了反演风场分辨率。

通过计算均方根误差,来定量分析反演方法的精度。采用修正后的 VPP 反演算法对不同风场进行反演,最大偏差用 σ_{max} 表示,标准偏差用 σ 表示, u 分量、 v 分量及风向 α 的误差如表 1 所示。可以看出对水平切向风速修正后的反演效果较好。

表 1 修正后 VPP 反演不同风场产生的误差

Tab.1 Error of the VPP retrieved different wind after correction

Item		σ_{max}	σ
Divergence wind field	$u=4$ m/s	0.020 2	1.89×10^{-4}
	$v=3$ m/s	0.114 3	2.52×10^{-4}
	α	0.604 4	0.006 1
Convergence wind field	$u=10$ m/s	0.022 1	2.02×10^{-4}
	$v=10$ m/s	0.125 2	2.85×10^{-4}
	α	0.494 4	0.003 2

3 结 论

- (1) 通过证明每个径向上的水平切向风速相等,采用相同径向上的数据对受干扰区域的数据进行修正,能够有效克服风速突变时对风速反演的干扰;
- (2) VPP 反演方法简单,计算量小,由于分析体积选取的较小,能够很好地从多普勒风场资料中反演小尺度风场,实现对风切变的探测和反演;
- (3) VPP 算法使用的是多个相邻格点的数据,当激光雷达数据分布不均匀或有缺失时,将会引起相应区域风场反演误差大,因此在进行风场反演前还需对初始数据进行预处理;
- (4) 受干扰区域的定位仅考虑了扫描范围内只出现一个小尺度天气系统结构的情况,当扫描范围内出现多个涡旋场时,受干扰区域的定位将更加复杂;
- (5) 文中采用的是理想的风场模拟数据,与实际中多普勒激光雷达探测的数据还有一定差距,在后续工作中还需要根据实际情况进行相应的改进。

参考文献:

[1] Zhou Jianhua. Aviation Meteorological Service [M]. Beijing:

- China Meteorological Press, 2011: 37-45. (in Chinese)
- 周建华. 航空气象业务[M]. 北京: 气象出版社, 2011: 37-45.
- [2] Shu Zhifeng, Tang Lei, Wang Guocheng, et al. Application of triple Fabry-Perot etalon for rayleigh wind lidar [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(8): 1474-1480. (in Chinese)
- 舒志峰, 唐磊, 王国成, 等. 三通道 Fabry-Perot 标准具在瑞利测风激光雷达中的应用 [J]. *红外与激光工程*, 2011, 40(8): 1474-1480.
- [3] Shu Zhifeng, Xu Wenjing, Tang Lei, et al. Development of wind lidar based on Rayleigh scattering [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 40(11): 2153-2157. (in Chinese)
- 舒志峰, 徐文静, 唐磊, 等. 基于瑞利散射的测风激光雷达研制[J]. *红外与激光工程*, 2012, 40(11): 2153-2157.
- [4] Pan Jingyan, Wu Shuangyang, Liu Guo, et al. Wind measurement techniques of coherent wind lidar [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(7): 1720-1724. (in Chinese)
- 潘静岩, 邬双阳, 刘果, 等. 相干激光测风雷达风场测量技术[J]. *红外与激光工程*, 2013, 42(7): 1720-1724.
- [5] Tao Zuyu. A study of Doppler radar VAD technique [J]. *Quarterly Journal of Applied Meteorology*, 1992, 50 (1): 81-90. (in Chinese)
- 陶祖钰. 关于 Doppler 雷达 VAD 技术的讨论 [J]. *应用气象学报*, 1992, 50(1): 81-90.
- [6] Tao Zuyu. The VAP method to retrieve the wind vector field based on single-Doppler velocity field [J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 1992, 50(1): 81-90. (in Chinese)
- 陶祖钰. 从单 Doppler 速度场反演风矢量场的 VAP 方法 [J]. *气象学报*, 1992, 50(1): 81-90.
- [7] Xin Lingyan, Tang Dazhang. Method on extraction of wind information from Doppler data by VVP technique [J]. *Scientia Meteorologica Sinica*, 1990, 10(4): 400-408. (in Chinese)
- 忻翎艳, 汤达章. 由 VVP 探测技术提取风场信息的方法 [J]. *气象科学*, 1990, 10(4): 400-408.
- [8] Lang Xuxing, Wei Ming, Ge Wenzhong, et al. A new method of retrieving windfield using single Doppler radar [J]. *Scientia Meteorologica Sinica*, 2001, 21(4): 417-424. (in Chinese)
- 郎需兴, 魏鸣, 葛文忠, 等. 一种新的单多普勒雷达风场反演方法[J]. *气象科学*, 2001, 21(4): 417-424.
- [9] Jiang Haiyan, Ge Runsheng. A new retrieval technique for single-Doppler radar [J]. *Quarterly Journal of Applied Meteorology*, 1997, 8(2): 219-223. (in Chinese)
- 姜海燕, 葛润生. 一种新的单多普勒雷达反演技术[J]. *应用气象学报*, 1997, 8(2): 219-223.
- [10] Zhou Haiguang. Progress in retrieval of wind field from Doppler radar [J]. *Advance Earth Sciences*, 2002, 17 (3): 384-390. (in Chinese)
- 周海光. 多普勒天气雷达风场反演技术研究进展 [J]. *地球科学进展*, 2002, 17(3): 384-390.
- [11] Jiang Lihui, Fan Daobing, Zhuang Zibo, et al. Research of airport microscale wind field retrieval with single Doppler lidar [J]. *Laser & Infrared*, 2010, 40(11): 1168-1172. (in Chinese)
- 蒋立辉, 范道兵, 庄子波, 单多普勒激光雷达机场小尺度风场反演研究[J]. *激光与红外*, 2010, 40(11): 1168-1172.
- [12] Wang Gaili, Liu Liping, Qiu Chongjian, et al. A study of wind field retrieval from Doppler lidar observations [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2010, 34 (1): 143-153. (in Chinese)
- 王改利, 刘黎平, 邱崇践, 等. 多普勒激光雷达风场反演方法研究[J]. *大气科学*, 2010, 34(1): 143-153.
- [13] Wang Yan. New generation weather radar map design and research of Doppler radar horizontal wind field some inversion technique[D]. Nanjing: Nanjing Institute of Meteorology, 2002. (in Chinese)
- 王岩. 新一代天气雷达的地图设计及单多普勒雷达水平风场某些反演技术的研究[D]. 南京: 南京气象学院, 2002.
- [14] Yu Zhihao. *Hydromechanics*[M]. Beijing: China Meteorological Press, 2004. (in Chinese)
- 余志豪. *流体力学*[M]. 北京: 气象出版社, 2004.