

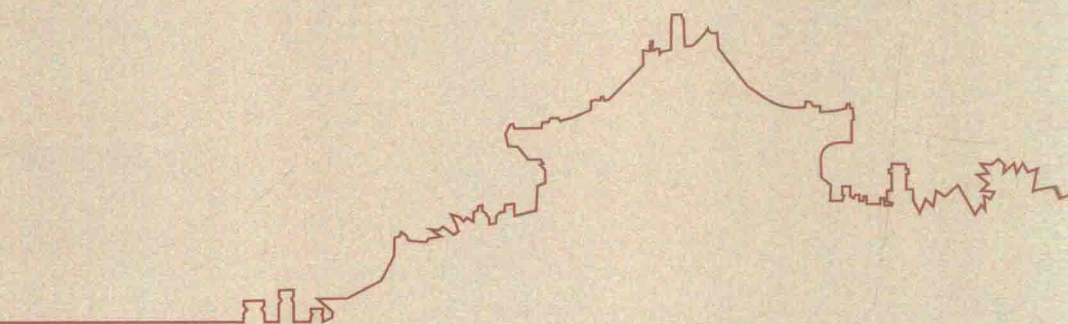
武汉大学优秀博士学位论文文库



基于Arecibo非相干散射雷达的 电离层动力学研究

Incoherent Scatter Radar Study of the Ionospheric Dynamics at Arecibo

龚韵 著



WUHAN UNIVERSITY PRESS

武汉大学出版社

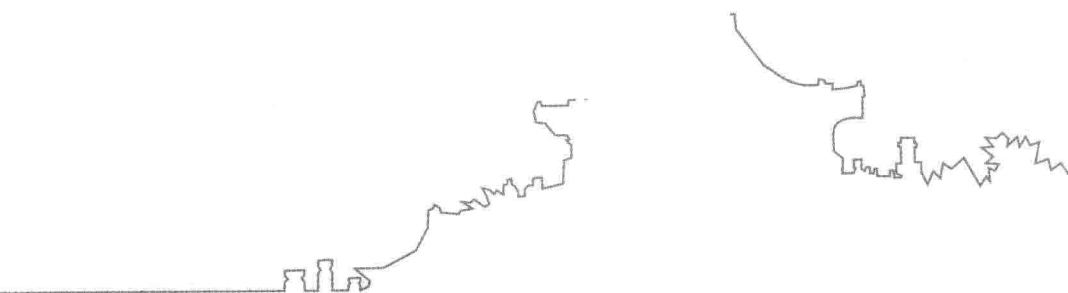
武汉大学优秀博士学位论文文库



基于Arecibo非相干散射雷达的 电离层动力学研究

Incoherent Scatter Radar Study of The Ionospheric Dynamics at Arecibo

龚韵 著



WUHAN UNIVERSITY PRESS

武汉大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

基于 Arecibo 非相干散射雷达的电离层动力学研究/龚韵著. —武汉: 武汉大学出版社, 2015. 2

武汉大学优秀博士学位论文文库

ISBN 978-7-307-14844-4

I. 基… II. 龚… III. 相干雷达—电离层散射—动力学—研究 IV. TN958

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 263884 号



责任编辑:任翔 黄琼 责任校对:汪欣怡 版式设计:马佳

出版发行: 武汉大学出版社 (430072 武昌 珞珈山)

(电子邮件: cbs22@whu.edu.cn 网址: www.wdp.com.cn)

印刷: 武汉市洪林印务有限公司

开本: 720 × 1000 1/16 印张: 7 字数: 96 千字 插页: 2

版次: 2015 年 2 月第 1 版 2015 年 2 月第 1 次印刷

ISBN 978-7-307-14844-4 定价: 20.00 元

版权所有, 不得翻印; 凡购我社的图书, 如有质量问题, 请与当地图书销售部门联系调换。

总 序

创新是一个民族进步的灵魂,也是中国未来发展的核心驱动力。研究生教育作为教育的最高层次,在培养创新人才中具有决定意义,是国家核心竞争力的重要支撑,是提升国家软实力的重要依托,也是国家综合国力和科学文化水平的重要标志。

武汉大学是一所崇尚学术、自由探索、追求卓越的大学。美丽的珞珈山水不仅可以诗意栖居,更可以陶冶性情、激发灵感。更为重要的是,这里名师荟萃、英才云集,一批又一批优秀学人在这里砥砺学术、传播真理、探索新知。一流的教育资源,先进的教育制度,为优秀博士学位论文的产生提供了肥沃的土壤和适宜的气候条件。

致力于建设高水平的研究型大学,武汉大学素来重视研究生培养,是我国首批成立有研究生院的大学之一,不仅为国家培育了一大批高层次拔尖创新人才,而且产出了一大批高水平科研成果。近年来,学校明确将“质量是生命线”和“创新是主旋律”作为指导研究生教育工作的基本方针,在稳定研究生教育规模的同时,不断推进和深化研究生教育教学改革,使学校的研究生教育质量和知名度不断提升。

博士研究生教育位于研究生教育的最顶端,博士研究生也是学校科学研究的重要力量。一大批优秀博士研究生,在他们学术创作最激情的时期,来到珞珈山下、东湖之滨。珞珈山的浑厚,奠定了他们学术研究的坚实基础;东湖水的灵动,激发了他们学术创新的无限灵感。在每一篇优秀博士学位论文的背后,都有博士研究生们刻苦钻研的身影,更有他们导师的辛勤汗水。年轻的学者们,犹如在海边拾贝,面对知识与真理的浩瀚海洋,他们在导师的循循善诱下,细心找寻着、收集着一片片靓丽的贝壳,最终把它们连成一串串闪闪夺目的项

链。阳光下的汗水,是他们砥砺创新的注脚;面向太阳的远方,是他们奔跑的方向;导师们的悉心指点,则是他们最值得依赖的臂膀!

博士学位论文是博士生学习活动和研究工作的主要成果,也是学校研究生教育质量的凝结,具有很强的学术性、创造性、规范性和专业性。博士学位论文是一个学者特别是年轻学者踏进学术之门的标志,很多博士学位论文开辟了学术领域的新思想、新观念、新视阈和新境界。

据统计,近几年我校博士研究生所发表的高质量论文占全校高水平论文的一半以上。至今,武汉大学已经培育出 18 篇“全国百篇优秀博士学位论文”,还有数十篇论文获“全国百篇优秀博士学位论文提名奖”,数百篇论文被评为“湖北省优秀博士学位论文”。优秀博士结出的累累硕果,无疑应该为我们好好珍藏,装入思想的宝库,供后学者慢慢汲取其养分,吸收其精华。编辑出版优秀博士学位论文文库,即是这一工作的具体表现。这项工作既是一种文化积累,又能助推这批青年学者更快地成长,更可以为后来者提供一种可资借鉴的范式抑或努力的方向,以鼓励他们勤于学习,善于思考,勇于创新,争取产生数量更多、创新性更强的博士学位论文。

武汉大学即将迎来双甲华诞,学校编辑出版该文库,不仅仅是为武大增光添彩,更重要的是,当岁月无声地滑过 120 个春秋,当我们正大踏步地迈向前方时,我们有必要回首来时的路,我们有必要清晰地审视我们走过的每一个脚印。因为,铭记过去,才能开拓未来。武汉大学深厚的历史底蕴,不仅在于珞珈山的一草一木,也不仅仅在于屋檐上那一片片琉璃瓦,更在于珞珈山下的每一位学者和学生。而本文库收录的每一篇优秀博士学位论文,无疑又给珞珈山注入了新鲜的活力。不知不觉地,你看那珞珈山上的树木,仿佛又茂盛了许多!

李晓红

2013 年 10 月于武昌珞珈山

摘 要

地球的电离层很大程度上影响着无线电通信。电离层环境的不规则变化会影响低纬轨道卫星以及卫星导航定位的正常工作。因此,研究电离层不仅有很大的学术价值,还有着实际的意义。本文利用位于 Arecibo, 波多黎各 (18.3°N , 66.7°W) 的双波束非相干散射雷达的观测数据,分析了位于低纬电离层 E 层和 F 层的大气潮汐波和行星波,讨论了中性风、电场以及双极扩散对 Arecibo 电离层午夜塌陷的影响。具体工作概括如下:

1. 利用 Arecibo 双波束非相干散射雷达在 2010 年 1 月 14 日 ~ 23 日的观测数据,我们分析了周期为 24 小时和 12 小时的大气潮汐波的传播特性和垂直结构。以往的观测结果[e. g. , Harpar, 1979, 1981]认为,在海拔高度高于 110 km 处,12 小时潮汐波是最为显著的潮汐分量。然而,我们的观测结果表明 F 层的 24 小时潮汐波在观测时间内占据主导地位。波幅随高度的变化显示出 24 小时潮汐波在 F 层的最大值为 45 m/s,在 E 层的最大值是 70 m/s。从 24 小时潮汐波相位随高度的变化可以推断出,在 F 层的 24 小时潮汐波是受到太阳辐射而在局地激发的。在观测的前 4 天(1 月 14 日 ~ 18 日),中性风两个分量中的 12 小时潮汐波在 E 层高度范围内展现出了相似的波幅随高度的变化。经向和纬向分量的波幅在高度 106 ~ 115 km 的范围内都呈现出了稳定和持续的增长。由此可以估算出 Arecibo 冬季湍流层顶高度大约为 110 km。

2. 第一次报道了在低纬度电离层 F 层周期为 8 小时的大气潮汐波,并且分析了 8 小时潮汐波的垂直结构,讨论了观测到的 8 小时潮汐波的激发机制。8 小时潮汐波的波幅非常强,在 268 km 处达到了最大值 34 m/s,它在 180 ~ 320 km 的高度范围内的垂直波长为

950 km。我们发现 8 小时潮汐波的振幅与 F 层较低高度上的背景经向风场有非常好的相关性。通过仔细研究 8 小时潮汐波的激发机制,我们发现观测到的 8 小时潮汐波并不是受到非线性相互作用而激发的。

3. 第一次报道了在低纬度电离层 F 层周期为 6 小时的大气潮汐波和周期为 40 小时的准 2 天行星波。观测到的 6 小时潮汐波和准 2 天行星波没有 8 小时潮汐波显著。6 小时潮汐波振幅最大值为 11 m/s。在 150 ~ 245 km 的高度范围内,6 小时潮汐波的垂直波长为 126 km。准 2 天行星波振幅最大值为 8 m/s,它的垂直波长在 230 ~ 305 km 的高度范围内为 640 km。

4. Arecibo 电离层午夜塌陷是指电离层 F 层电子密度峰值高度在午夜前后急剧地下降。我们调查了从午夜塌陷前到塌陷结束的整个过程中,中性风、电场以及双极扩散所扮演的角色。整个过程可以归纳成三个阶段:预备塌陷、初始塌陷和持续塌陷。中性风和电场在第一和第三个阶段起到了主要作用。双极扩散则在第二个阶段扮演重要角色。我们的分析结果表明:电场和双极扩散这两个以往被忽视的机制,对于午夜塌陷有重要的影响。午夜塌陷前的预备塌陷阶段,对于塌陷能否发生以及塌陷的强度起到了关键作用。

关键词: 非相干散射雷达 电离层 E 层和 F 层 大气潮汐波 大气行星波 Arecibo 电离层午夜塌陷

Abstract

The earth's ionosphere significantly influences the propagation of radio waves. The irregularity of the ionosphere will devastate the satellites, and damage the GPS signals. Therefore, studying the ionosphere has more than academic value. In this thesis, using the ionospheric parameters measured by the Arecibo dual-beam incoherent scatter radar (ISR), we analyze the tidal and planetary waves at E- and F-region heights in the low latitude, and study the Arecibo ionospheric midnight collapse phenomenon, and discuss its relationship with neutral wind, electric field, and ambipolar diffusion. The primary results are summarized as follow:

1. Using the observational data derived from Arecibo dual-beam ISR in the period of Jan. 14 ~ 23, 2010, we analyze the propagation characteristics and vertical structures of the diurnal and semidiurnal atmospheric tides. Previous observational studies [e. g., Harper 1979, 1981] suggest that the semidiurnal tide is the most dominant tidal component above 110 km in the low latitude. However, our results reveal that the diurnal tide dominates the semidiurnal tide as the most important tidal component above 110 km. In the F-region, the peak amplitude of diurnal tide is 45 m/s, and in the E-region that value is 70 m/s at around 120 km. The diurnal tide is largely evanescent, which suggests it may be excited by in situ solar radiation. In the first four days of the observation, the semidiurnal tides in both neutral wind components show continuous amplitude increase in the altitude range from 106 km to 115 km. This amplitude behavior is helpful in determining that the turbopause at

Arecibo in winter condition is around 110 km.

2. This is the first time a terdiurnal tide has been observed in the F-region at a low latitude station. We analyze the vertical structure of the terdiurnal tide, and discuss its excitation mechanism. The amplitude of the terdiurnal tide is prominent. The vertical amplitude profile is single peaked with the peak value of 34 m/s occurred at about 268 km. The phase in the region of 180 ~ 320 km is largely linear. The vertical wavelength is about 950 km. The F-region terdiurnal tide amplitude is found to be well correlated with the background meridional wind in the lower F-region. Our analysis does not reveal any evidence that non-linear interaction between diurnal and semidiurnal tides is important for the F-region terdiurnal tide.

3. This is the first time a 6-hour tide and a quasi-2 day (40 hours) planetary wave has been reported at F-region height in the low latitude. Unlike the terdiurnal tide, the amplitude of 6-hour tide and quasi-2 day planetary are much weaker. The amplitude of 6-hour tide exhibits two peaks and the peak magnitude is about 11 m/s for both peaks. In the altitude range of 150 ~ 245 km, the phase progresses downward linearly with a vertical wavelength determined to be 126 km. For the quasi-2 day planetary, the peak amplitude is about 8 m/s. The vertical wavelength is computed to be 640 km in the altitude range from 230 km to 305 km.

4. The Arecibo ionosphere midnight collapse is characterized by a rapid drop of F_2 layer peak height (HmF_2) around midnight. We examined the roles played by the neutral wind, electric field, and ambipolar diffusion in driving the vertical ion motion throughout the whole collapse process. The collapse process can be classified into three stages: preconditioning, initial descent, and sustained descent. The neutral wind and electric field are dominant in the stage 1 and 3. The ambipolar diffusion plays an important role in the stage 2. Our results reveal that electric field and ambipolar diffusion also play an important role with the former being the most dominant factor in some cases. Stage 1 plays a key role

on the extent of the collapse.

Key words: Incoherent scatter radar the ionosphere E- and F-region
atmospheric tides atmospheric planetary waves the Arecibo ionosphere
midnight collapse

目 录

第 1 章 引言	1
1.1 电离层简介	1
1.1.1 电离层的垂直结构	1
1.1.2 风剪切理论和离子运动	4
1.1.3 电离层探测技术	8
1.2 非相干散射雷达简介	9
1.2.1 非相干散射雷达方程以及散射截面	10
1.2.2 非相干散射雷达功率谱	13
1.2.3 Arecibo 非相干散射雷达	15
1.2.4 美国非相干散射雷达简介	16
1.3 本文的工作目的与内容安排	19
第 2 章 非相干散射雷达数据分析	21
2.1 离子矢量速度的获取	21
2.2 中性风的获取	25
2.2.1 E 层中性风的推导	26
2.2.2 经向风在 F 层的推导	28
2.3 约束谐波拟合方法	30
第 3 章 Arecibo 上空低频大气潮汐波和准 2 天行星波的 观测研究	32
3.1 大气潮汐波简介	32
3.2 功率密度谱分析	34
3.2.1 F 层经向风功率谱密度结果	35
3.2.2 E 层中性风功率谱密度结果	36
3.3 24 小时潮汐波结果与讨论	39

3.4	12 小时潮汐波结果与讨论	44
3.5	行星波简介	48
3.6	准 2 天行星波的振幅和垂直结构	50
3.7	小结	51
第 4 章	高频潮汐波的观测研究	53
4.1	8 小时潮汐波简介	53
4.2	8 小时潮汐波结果与讨论	54
4.3	8 小时潮汐波小结	60
4.4	6 小时潮汐波的结果与讨论	61
4.5	6 小时潮汐波小结	63
第 5 章	Arecibo 电离层午夜塌陷以及其与中性风、电场 和双极扩散之间的关系	64
5.1	引言	64
5.2	数据展示	65
5.2.1	Arecibo 电子浓度分布	65
5.2.2	HmF2, NmF2 和 V_z	67
5.2.3	离子垂直运动的三个分量	70
5.3	讨论	72
5.3.1	午夜塌陷主要是由哪一(几) 个机制引发的?	72
5.3.2	哪一(几)个潮汐波分量对午夜 塌陷最为重要?	73
5.3.3	其他观测周期内的 Arecibo 午夜塌陷	76
5.4	小结	78
第 6 章	总结与展望	80
6.1	总结	80
6.2	展望	83
参考文献		85
致谢		97

第1章 引言

1.1 电离层简介

地球的电离层是一个由于受到太阳辐射而部分电离的区域。它是地球大气层的一部分,整个区域范围从海拔 60 km 延伸至 1000 km 有余。电离层作为一个承上启下的区域,很好地衔接了地球大气层和外太空。电离层既受到太阳辐射和磁暴的影响,同时又会感应到低层大气剧烈天气活动。太阳风、磁暴以及从低层大气上传到电离层的扰动,都会使电离层发生不规则扰动,甚至剧烈的变化。电离层内充斥着大量的电离气体,这些电离气体会显著影响电磁波在电离层中的传播,使电磁波发生反射、折射和散射。当电离层发生剧烈扰动时,电离层会威胁到地面通信以及导航定位卫星的正常工作。电离层空间天气、电离层气候学、电离层与磁层,以及电离层与大气层的耦合是现在电离层研究的主要方向。这一节主要从以下三个方面对电离层进行介绍:电离层的垂直结构,风剪切理论和离子运动以及电离层探测技术。

1.1.1 电离层的垂直结构

由于受到重力作用,电离层是水平分层的。与大气垂直结构依照温度的高度分布来划分不同,电离层的垂直结构是根据电子密度随高度的变化来决定的。图 1-1 展示了在正午以及午夜由 Arecibo 双波束非相干散射雷达测量得到的电子密度随高度分布。

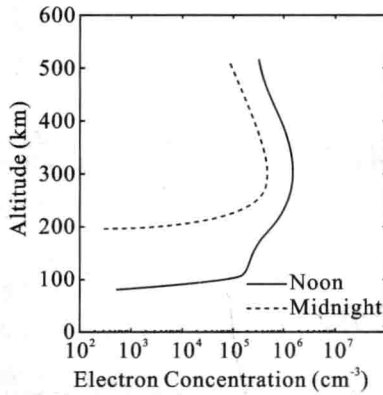


图 1-1 由 Arecibo 非相干散射雷达得到的电子密度垂直剖面图,2002 年 12 月 4 日 12:00 LT (实线),2002 年 12 月 5 日 00:00 LT (虚线)

从图 1-1 可以看出,在正午和午夜,电子密度随高度变化的趋势是基本一致的。正午和午夜的电子密度都随着高度的降低而先增大后减小,并且都在 300 km 左右处达到峰值。这种变化趋势是由两个重要的因素所决定的,电离过程和化学复合过程。电离过程是指,当强烈的太阳短波(极紫外线和 X 射线)辐射作用到中性原子和分子上,这些中性原子和分子吸收了部分辐射能量后释放出一个电子以达到能量守恒。由于释放出了电子,原来这些中性气体就被电离为离子。化学复合过程是电离过程的反作用过程。它是指离子和电子通过化学作用结合为中性原子或分子。化学复合作用的强度可以由复合率来度量。由于大气密度高度增加而减小,在比较高的高度上,中性气体密度稀薄,虽然太阳辐射非常强,电离作用并不明显。在比较低的高度上,一方面,太阳辐射随着射线的辐射距离变长而减弱;另一方面,由于中性气体密度变大,自由电子和离子的碰撞频率加剧,化学复合作用逐渐占据着主导地位。因此,大量的离子存在于高度范围为 100 ~ 500 km 的高度上,峰值高度在 300 km 左右。虽然正午和午夜电子密度随高度分布的变化趋势是一致的,但在密度的数值大小上却有很大的差异。如图 1-1 所示,正午的峰值密度是午夜的 3 倍多。

并且,由于在午夜 200 km 以下电子密度太稀薄,非相干散射雷达不能测得任何有效数据。这种正午和午夜电子密度的差别主要是由于在夜间缺少太阳辐射能,电离效应相较于白天而言大大减弱了。

根据电子密度随高度的变化,电离层在垂直方向上主要分为三层。距离地球表面 60 ~ 90 km 的区域是电离层最低的一层,称为 D 层。D 层的电离过程主要分为两部分。波长大约为 79.6 nm 的 X 射线电离氧气和氮气,以及波长为 121.6 nm 的莱曼 α 射线电离一氧化碳。因此,电离后的主要产物为 N_2^+ , O_2^+ 和 NO^+ 。由于 D 层所处的高度比较低,中性气体密度比较大,离子对自由电子的捕获率比较高,化学复合作用非常强。D 层的电离效应比较低,对高频无线电波的传播没有影响。

在 D 层的上方,90 ~ 150 km 的高度范围内是电离层 E 层。E 层的形成主要是通过波长范围 3.1 ~ 100 nm 的 X 射线电离氧气、氮气和氧原子。在 E 层占据主导地位的离子成分是 NO^+ 和 O_2^+ 。图 1-2 给出了在 2002 年 12 月 3 日到 5 日之间由非相干散射雷达得到的电子浓度随时间和高度变化的分布图。

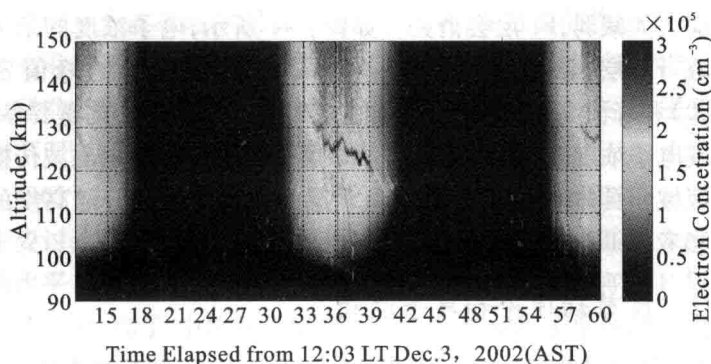


图 1-2 电子浓度随时间和高度变化的分布图,2002 年 12 月 3 日 12:03 到 2002 年 12 月 5 日 12:00

电子浓度的最大值大概在 $3 \times 10^5 \text{ cm}^{-3}$ 。在夜间,由于缺少了太阳辐射的作用,电离效应迅速减弱,电子浓度相较于白天来说下降了很

多。夜间 E 层的存在主要是因为地冕和流星以及其他弱电离源的电离作用。然而,非相干散射雷达回波信号的信噪比与电子密度有直接的关系。电子密度太低,我们就不能从雷达回波信号中提取有用的信息。因此,在一般情况下,非相干散射雷达不能准确测量电子浓度在 E 层夜间的分布。(非相干散射雷达会在 1.2 节中做具体介绍)但是,如果我们仔细观察图 1-2,就会发现在 100 km 左右处有一些很窄的线条状结构。这种结构被称为偶发 E 层。由于偶发 E 层内的电离效应比较强,它们可以被非相干散射雷达捕捉到。除了气体离子外,E 层内还存在很多金属离子。由于每天有大量的流星注入地球,这些流星与地球大气层摩擦后发生消融作用使大量的金属原子比如 Fe、Na 和 K 沉降在 E 层中。这些中性原子在 E 层中受到电离作用后形成金属离子。由于这些金属离子的化学复合率比较低,它们一旦形成就会有很长的寿命。

高度为 150 ~ 500 km 的范围被称为电离层 F 层。在白天,F 层又可以根据主要的离子成分不同而分为 F1 层和 F2 层。F1 层的高度范围是 150 ~ 210 km,主要的离子成分为 O^+ 、 NO^+ 和 O_2^+ 。F2 层的高度范围是 210 ~ 500 km,主要离子成分为 O^+ 。在夜间,由于电离效应大大减弱,F1 层会消失。如图 1-1 所示,电子浓度的最大值发生在 F2 层,浓度值大约为 10^6 cm^{-3} 。F 层电子的峰值密度(NmF2)和峰值高度(HmF2)是描述电离层 F 层形态学的重要参数。由于其电子浓度高以及昼夜可见,F2 层是电离层影响电磁波传播的主要区域。具体的电离层 D、E 和 F 层的主要离子成分随高度的分布请参考 Kelley [2008] 的图 1-2 和图 1-8。

1.1.2 风剪切理论和离子运动

在 1.1.1 小节中,我们提到了在图 1-2 中可以看到偶发 E 层。偶发 E 层中的电离效应很强,它可以反射频率为 25 ~ 225 MHz 的无线电波。偶发 E 层的形成机制以及主要离子成分已经被许多专家学者们研究了五十多年 [e. g., Whitehead, 1961, 1989; Macleod, 1965; Philbrick et al., 1973; Mathews and Bekeny, 1979; Carter and Forbes, 1999; Zhou et al., 2005, 2008]。偶发 E 层的出现很不稳

定,而且难以预测。对于偶发 E 层形成机制的解释也很多。1958 年, Dungey 首次提出了风剪切理论。经过不断发展与实验证实后 [Whitehead, 1961; Axford, 1963], 风剪切理论作为偶发 E 层的一种形成机制得到了大多数专家的认可。风剪切理论的基本解释可以由图 1-3 来描述。

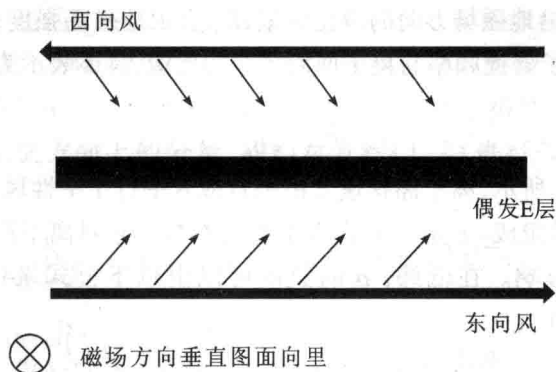


图 1-3 风剪切原理描述图

受到重力波和潮汐波驱动的水平风场,在磁场的作用下,使带电粒子有沿着垂直于风场传播方向运动的趋势。东向风场使带电粒子向上运动,而西向风场使带电粒子向下运动。由此一来,上层的西向风和下层东向风压缩带电粒子积聚到一个薄层中,从而形成偶发 E 层。1965 年, Macleod 提出了离子在电离层中运动的理论。这个理论主要讨论了离子在受到离子-中性粒子碰撞力和地磁场力的情况下的水平与垂直运动趋势。离子运动理论指出,在电离层 E 层的大部分高度内,离子-中性粒子碰撞力与地磁力是趋于平衡的。离子运动理论很好地证明了风剪切效应可以形成偶发 E 层。离子运动理论的具体描述如下 [Macleod, 1965]。

仅仅考虑碰撞力、电场力和地磁场力对离子的作用,离子运动方程可以写为如下形式 [Dungey, 1958]:

$$\frac{dV_+}{dt} = v_{in}(U - V_+) + \frac{e}{m_+}(V_+ \times B) + \frac{e}{m_+}E \quad (1.1)$$