

冷等离子体波

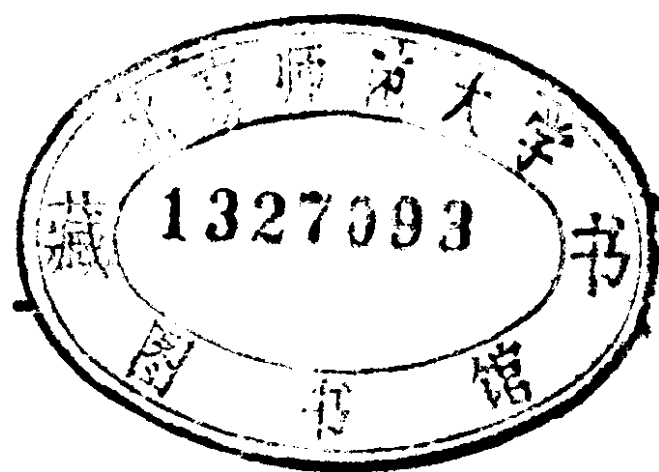
H. G. 布克 著

科学出版社

丁小 11.3/15

冷等离子体波

H. G. 布克 著



科学出版社

1985

内 容 简 介

本书阐述磁等离子体的电磁波传播理论，是作者根据在我国开设的研究生课程讲义扩充而成，由刘曾厚、刘选谋按作者英文手稿翻译的。

全书共分十九章。前五章介绍冷等离子体的一般知识，六——十七章系统阐述在温度效应并不重要的均匀磁等离子体中电磁波传播的理论，作者对电磁频谱的射频和磁流体波段给予了同样重视。最后两章描述均匀磁等离子体中的天线如何辐射脉冲的问题，并研究了一个类似于半波偶极子的天线辐射的功率密度。

本书适合于空间物理、电波传播、等离子体物理、无线电及天线等专业科研人员、教师、研究生及高年级大学生参考。

冷 等 离 子 体 波

H. G. 布克 著

责任编辑 侯建勤

科学出版社出版

北京朝阳门内大街137号

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

1985年10月第 一 版	开本：850×1168 1/32
1985年10月第一次印刷	印张：12 3/8
精1—1,500	插页：精3 平2
印数：平1—1,500	字数：323,000

统一书号：13031·2986

本社书号：4408·13—3

定价：布面精装 5.00 元
平 装 3.55 元

序 言

本书的目的是介绍在温度效应并不重要的均匀磁等离子体中电磁波传播的一般知识,并同样重视电磁频谱的射频和磁流体部分。作者把磁等离子体中的色散特性作为电波频率和电离密度两者的函数来处理。然而,很少涉及分层介质中的传播,关于这方面的情况,可参阅 Budden 的著作^[1]。碰撞的影响仅在可以简化时才加以考虑。本书还描述了均匀磁等离子体中的大小天线如何辐射脉冲的问题,研究了一个类似于半波偶极子天线辐射的功率密度。但没有讨论输入阻抗,只叙述了整个电磁频谱的辐射电阻同电波频率的关系。

在准备本书过程中,有一些著作和文章对作者特别有影响,它们的作者按年代顺序是 Lorentz^[2], Larmor^[3], Lassen^[4], Appleton^[5,6], Ratcliffe^[7], Booker^[8], Eckersley^[9], Lassen^[10], Poverlein^[11], Alfven^[12], Astrom^[13], Storey^[14], Ratcliffe^[15], Barber 和 Crombie^[16], Gendrin^[17], Denisse 和 Delcroix^[18], Helliwell^[19], Gurnett, Shawhan, Brice 和 Smith^[20], Booker 和 Dyce^[21], Booker^[22], Al'pert^[23,24], Al'pert 和 Moiseyev^[25]。作者受到等离子体物理空间应用方面论文的影响比实验室应用方面的更多一些。尽管如此,一些具体的空间应用在本书中并不强调。图和数学符号的编排,是使之同样能适合于空间和实验室应用。对航天飞机,两种应用融为一体。

许多图取自上述文献。大多数曲线已重新计算和重绘,并纠正了少数地方的错误。很多图的新计算比以前更加精细,有些曲线至今尚未发表过。这些计算是由印度艾哈迈达巴德 (Ahmedabad) 物理研究所的 Hari O. Vats 博士完成的。

这个课程是作者在剑桥大学、康奈尔大学和圣迭戈加利福尼亚大学开设的研究生课程。然而,激励作者写出本书的是 1981 年

春在中华人民共和国教育部赞助下在武汉大学空间物理系开设的课程。作者感谢梁百先教授为该课程所作的组织工作，并感谢为此付出劳动的中国其他人员。在中国所写的教材经过编辑整理，扩充而成为本书。这个工作还得到加利福尼亚大学教学改进资金的资助。

H. G. 布克 (Booker)

参 考 文 献

- [1] Budden, K. G., 1961, Radio waves in the ionosphere, Cambridge University Press, Cambridge.
- [2] Lorentz, H. A., 1909, The theory of electrons, Teubner, Leipzig.
- [3] Larmor, J., 1924, Why wireless waves can bend round the Earth, Phil. Mag. 48, 1025—1036.
- [4] Lassen, H., 1927, Über den Einfluss des Erdmagnetfeldes auf die Fortpflanzung der electrischen Wellen der drahtlosen Telegraphie in der Atmosphäre, Elek. Nachr. Tech., 4, 324—334.
- [5] Appleton, E. V., 1927, Papers of the 1927 General Asscmbly of the International Union of Radio Science, 1, 2—3.
- [6] Appleton, E. V., 1932, Wireless studies of the ionosphere, J. Instrn Electr. Engrs., 71, 642—650.
- [7] Ratcliffe, J. A., 1933, The magneto-ionic theory, Wireless Engineer 10, 354—363.
- [8] Booker, H. G., 1934, Some general properties of the formulae of the magneto-ionic theory, Proc. R. Soc. A147, 352—382.
- [9] Eckersley, T. L., 1935, Musical atmospherics, Nature, Lond. 135, 104—105.
- [10] Lassen, H., 1947, Zur Theorie der Doppelbrechung elektromagnetischer Wellen in einen ionisierten Gas unter dem Einfluss eines konstanten Magnetsfeldes (Ionosphäre) Ann. Ph, s. 1, 415—428.
- [11] Poverlein, H., 1949, Strahlwege von Radiowellen in der Ionosphäre, Z. angew. Phys. 1, 517—525.
- [12] Alfven, H., 1950, Cosmical electrodynamics, Clarendon Press, Oxford.
- [13] Astrom, E., 1951, On waves in an ionized gas, Arkiv. Fysik 2, 443—457.
- [14] Storey, L. R. O., 1953, An investigation of whistling atmospheres, Phil. Trans. R. Soc. Lond. A426, 113—141.

- [15] Ratcliffe, J. A. 1959, The magneto-ionic theory and its applications to the ionosphere. Cambridge University Press, Cambridge.
- [16] Barber, N. F. and Crombie, D. D., 1959, VLF reflection from the ionosphere in the presence of a transverse magnetic field, *J. Atmos. Terr. Phys.* **16**, 37—45.
- [17] Gendrin, R., 1960, Guidage des sifflements radioélectriques par le champ magnétique terrestre, *C. r. Acad. Sci., Paris* **251**, 1085—1087.
- [18] Denisse, J. F. and Delcroix, J. L., 1961, *Théorie des ondes dans les plasmas*, Dunod, Paris.
- [19] Helliwell, R. A., 1965, Whistlers and related ionospheric phenomena, Stanford University Press, Stanford.
- [20] Gurnett, D. A., Shawhan, S. D., Brice, N. M. and Smith, R. L., 1965, Ion cyclotron whistlers, *J. Geophys. Res.* **70**, 1665—1688.
- [21] Booker, H. G. and Dyce, R. B., 1965, Dispersion of waves in a cold magnetoplasma from hydromagnetic to whistler frequencies, *Radio Sci.* **69D**, 463—492.
- [22] Booker, H. G., 1975, Electromagnetic and hydromagnetic waves in a cold magnetoplasma, *Phil. Trans. R. Soc. Lond.* **A280**, 57—93.
- [23] Al'pert, Y. L., 1980, The direction of the group velocity of electromagnetic waves in a multicomponent magnetoactive plasma in the frequency range $0 < \omega \rightarrow \infty$. *J. Atmos. Terr. Phys.* **42**, 205—216.
- [24] Al'pert, Y. L., 1980, On elements of the dielectric tensor, the refractive indices n_{12} and attenuation factors k_{12} of a magnetically active collisional plasma, *J. Atmos. Terr. Phys.* **42**, 217—226.
- [25] Al'pert, Y. L. and Moiseyev, B. S., 1980, On the distribution of the field of electromagnetic waves emitted by a dipole in a homogeneous magnetoactive plasma, *J. Atmos. Terr. Phys.* **42**, 521—528.

目 录

第一章 等离子体的基本特性	1
1.1 引言	1
1.2 等离子体	1
1.3 漂移运动方程	2
1.4 平衡态等温大气层	4
1.5 波的类型	7
1.6 碰撞的影响	8
1.7 连续方程	10
第二章 麦克斯韦方程组	13
2.1 引言	13
2.2 用电流和电荷密度表示的方程	13
2.3 用单位体积电矩表示的方程	14
2.4 指数波函数	16
2.5 色散关系的概念	19
2.6 色散关系的计算(电流法)	20
2.7 色散关系的计算(电矩法)	23
第三章 各向同性等离子体	26
3.1 引言	26
3.2 各向同性等离子体的迁移率和电导率	26
3.3 各向同性等离子体的电极化率和介电常数	27
3.4 等离子体频率	28
3.5 各向同性等离子体的折射指数	30
3.6 各向同性等离子体中波的色散	31
3.7 各向同性等离子体中碰撞的影响	32
第四章 冷等离子体中的能量	36
4.1 引言	36
4.2 等离子体中动能的重要性	36

4.3	各向同性等离子体中的能量密度	37
4.4	各向同性等离子体中的能流	38
4.5	通过等离子体的电磁传输中动能的作用	40
4.6	各向同性等离子体中的群传播	42
4.7	等离子体的坡印廷定理(型式1)	43
4.8	等离子体的坡印廷定理(型式2)	44
4.9	等离子体的坡印廷定理(型式3)	47
4.10	等离子体的复坡印廷定理(型式1)	49
4.11	等离子体的复坡印廷定理(型式2)	50
4.12	等离子体的复坡印廷定理(型式3)	51
4.13	复介电常数同能量之间的关系	52
第五章	磁等离子体中的交变电流	54
5.1	引言	54
5.2	磁等离子体的迁移率张量	54
5.3	磁等离子体的电导率张量	57
5.4	无限均匀磁等离子体的低频导电特性	60
5.5	磁等离子体平板的低频导电特性	62
5.6	等离子体尺度对波传播的影响	65
第六章	磁等离子体中相传播的一般特性	67
6.1	引言	67
6.2	磁等离子体的极化率张量	67
6.3	无多种离子时极化率张量分量的其他表达式	69
6.4	磁等离子体的色散关系	70
6.5	椭圆极化	72
6.6	磁等离子体色散关系的另一推导方法	76
6.7	射频近似和磁流体近似	78
6.8	磁等离子体中碰撞的影响	80
第七章	磁等离子体中群传播的一般特性	83
7.1	引言	83
7.2	频谱和角谱	84
7.3	波包的速度	85
7.4	相传播和群传播之间的关系	86

7.5	磁等离子体中计算群速度的方法	88
7.6	磁等离子体中群速度的公式	89
7.7	磁等离子体中波束的辐射	91
第八章	沿外磁场的相传播	94
8.1	引言	94
8.2	圆偏振	94
8.3	纵向传播的色散关系	95
8.4	纵向阿尔文波	97
8.5	处理纵向阿尔文波的拉伸弹性弦方法	99
8.6	纵向传播的磁流体近似	100
8.7	纵向传播的射频近似	101
8.8	纵向传播的 Eckersley 近似	102
8.9	几种近似的比较	103
8.10	纵向传播时频率的通带和阻带	103
8.11	纵向传播中粒子的振动	106
8.12	纵向阿尔文波中的等离子体运动	110
8.13	低密度和高密度磁等离子体中的纵向传播	113
8.14	碰撞对纵向传播的影响	114
8.15	增加离子种类对纵向传播的影响	117
8.16	纵向传播时电离密度的通带和阻带	118
第九章	纵向传播的能流和群速	122
9.1	引言	122
9.2	纵向传播的电磁能密度	122
9.3	纵向传播的动能密度	123
9.4	纵向传播的能流和群速	125
9.5	纵向阿尔文波中的能量	127
9.6	纵向阿尔文波的法拉第旋转	129
9.7	纵向阿尔文波谐振器	131
9.8	磁流体琴弦的工作方式	134
9.9	等离子体中磁场的冻结(纵向阿尔文波)	135
9.10	在 $\omega_{Mi} \ll \omega \ll \omega_{Me}$ 频带内纵向哨声波中的能量	137
9.11	在 $\omega_{Mi} \ll \omega \ll \omega_{Me}$ 频带内纵向哨声波的谐振器	140

9.12	电子气中的磁场冻结(纵向哨声波)	142
9.13	固态等离子体	143
第十章	垂直于外磁场的相传播	145
10.1	引言	145
10.2	O波	145
10.3	X波	146
10.4	O波和X波的叠加	147
10.5	横向传播时频率的通带和阻带	148
10.6	混合谐振频率	150
10.7	低密度磁等离子体中的横向传播	154
10.8	横向传播时电离密度的通带和阻带	155
10.9	碰撞对横向传播的影响	160
第十一章	横向传播中X波的椭圆偏振特性	162
11.1	引言	162
11.2	X波横向传播的电椭圆	162
11.3	电椭圆和频率的关系	164
11.4	X波横向传播中粒子的振动	166
11.5	X波横向传播中等离子体的压缩和膨胀	170
11.6	非互易性	171
第十二章	横向传播中X波的能量特性	174
12.1	引言	174
12.2	X波横向传播的电磁能量密度	174
12.3	X波横向传播的动能密度	175
12.4	X波横向传播的能流和群速度	176
12.5	横向阿尔文波的谐振器	177
12.6	磁流体风琴管的工作方式	181
12.7	等离子体中磁场的冻结(横向阿尔文波)	183
第十三章	方向与外磁场成任意角度的传播	185
13.1	引言	185
13.2	频率色散曲线中的零值	186
13.3	特征波的命名	187
13.4	频率色散曲线的交叉联结现象	188

13.5	近横传播的频率色散曲线	189
13.6	近纵传播的频率色散曲线	191
13.7	在等离子体频率上O波和X波的椭圆偏振	198
13.8	交叉联结现象中附加离子种类的作用	199
13.9	频率色散曲线上的无穷大	202
13.10	频率色散曲线的存在区域	204
13.11	电离色散曲线的交叉联结现象	208
13.12	电离色散曲线的存在区域	212
13.13	自由空间到磁等离子体的传播	218
第十四章 射频近似		220
14.1	引言	220
14.2	色散关系的射频近似	220
14.3	射频段的频率色散曲线	223
14.4	射频段中椭圆极化和频率的关系	223
14.5	射频段中群传播方向和频率的关系	231
14.6	射频段中转动的边射天线偏斜角的变化	234
14.7	射频段中折射指数和电离密度的关系	240
14.8	射频段中椭圆偏振和电离密度的关系	242
14.9	射频段中群传播方向和电离密度的关系	245
第十五章 磁流体近似		250
15.1	引言	250
15.2	色散关系的磁流体近似	250
15.3	磁流体波段的频率色散曲线	252
15.4	磁流体波段中离子碰撞的作用	253
15.5	磁流体近似和射频近似间的配合问题	255
15.6	磁流体波段中椭圆偏振和频率的关系	257
15.7	磁流体波段中电子椭圆和电流椭圆的倾斜与频率的 关系	263
15.8	磁流体波段中群传播方向和频率的关系	266
15.9	磁流体波段中群速度的极图	267
15.10	磁流体波段中折射指数和电离密度的关系	274
15.11	磁流体波段中椭圆偏振和电离密度的关系	277

15.12	磁流体波段中群传播的方向和电离密度的关系	277
第十六章	准纵近似和准横近似	286
16.1	引言	286
16.2	准纵近似和准横近似间的转换角	286
16.3	射频波段中的准纵近似和准横近似	290
16.4	磁流体波段中的准纵近似和准横近似	291
16.5	全向阿尔文波	292
16.6	射频波段中哨声波的准纵近似	293
16.7	射频波段中电子碰撞对哨声传播的作用	298
16.8	高频时的法拉第旋转	299
16.9	准纵近似和准横近似的准确度	300
第十七章	群速度的极图	303
17.1	引言	303
17.2	$\omega > \omega_{c2}$ 通带内 X 波的群传播	304
17.3	$\omega > \omega_N$ 通带内 O 波的群传播	305
17.4	哨声波段较高部分 [$\omega_{\infty 1} < \omega < \text{Min}(\omega_N, \omega_{Mc})$] 中的群传播	307
17.5	哨声波段较低部分 ($\omega \leq \omega_{\infty 1}$) 的群传播	311
17.6	$\omega < \omega_{Mi}$ 通带内 O 波的群传播	312
17.7	$\omega_N > \omega_{Mc}$ 时 $\omega_{c1} < \omega < \omega_{\infty 2}$ 通带内 X 波的群传播	314
17.8	$\omega_N < \omega_{Mc}$ 时 $\omega_{c1} < \omega < \omega_{\infty 2}$ 通带内 X 波的群传播	318
第十八章	磁等离子体中天线的场	322
18.1	引言	322
18.2	坐标系	322
18.3	O 波与 X 波的角谱	324
18.4	远场中群传播和相传播的主方向	328
18.5	最速下降法	330
18.6	符号的简化	332
18.7	远场中的功率密度	334
18.8	相传播角作为一独立变量的应用	334
18.9	高斯偶极子向均匀磁等离子体的辐射	337
18.10	各向同性参考介质	340

18.11 均匀磁等离子体中高斯偶极子的辐射电阻	341
第十九章 磁等离子体中偶极子辐射功率的方向特性	343
19.1 引言	343
19.2 磁等离子体和辐射体的说明	344
19.3 $\omega > \omega_{c2}$ 频带内的辐射	346
19.4 $\omega_{c2} > \omega > \omega_{\infty 2}$ 频带内的辐射	348
19.5 $\omega_{\infty 2} > \omega > \omega_N$ 频带内的辐射	350
19.6 $\omega_N > \omega > \omega_{c1}$ 频带内的辐射	355
19.7 $\omega_{Me} > \omega > \omega_{\infty 1}$ 频带内的辐射	355
19.8 $\omega_{\infty 1} > \omega > \omega_{Mi}$ 频带内的辐射	364
19.9 $\omega < \omega_{Mi}$ 频带内的辐射	370
19.10 辐射电阻和频率的关系	371
19.11 均匀磁等离子体中束射和导行间的关系	374
19.12 $\omega_{\infty 1} < \omega \ll \text{Min}(\omega_N, \omega_{Me})$ 时哨声波束射和导行间的关系	376
19.13 $\omega \ll \omega_{Mi}$ 时 O 波的束射和导行间的关系	377
19.14 $\omega \ll \omega_{Mi}$ 时混合的 O 波与 X 波束射和导行间的关系	380
19.15 能量吸收对阿尔文导行的影响	382
译后记	383

第一章 等离子体的基本特性

1.1 引言

麦克斯韦方程是描述等离子体中电磁波传播的基本方程，下一章我们将引入这些方程。为了应用麦克斯韦方程，我们需要了解一些等离子体物理的知识。具体地说，我们要能把波的电磁场同波在等离子体中产生的电荷密度和电流密度联系起来。

1.2 等离子体

等离子体是一种气体，它是包含自由电子和自由离子的统一体，也可能存在有中性粒子。

所有粒子都作热运动。假如等离子体处于热平衡状态，则各种类型的粒子具有一个相同的温度 T 。然而，通常并不是完全的平衡。尽管如此，人们通常能够令电子温度为 T_e ，离子温度为 T_i ，中性粒子温度为 T 。且常有 $T_e > T_i \approx T$ 。

设 q_e ， m_e 分别为电子的电荷和质量 ($q_e = -1.60 \times 10^{-19}$ 库仑， $m_e = 9.11 \times 10^{-31}$ 千克)， N_e 为单位体积内的自由电子数； q_i ， m_i 为离子的电荷和质量， N_i 为单位体积内的粒子数。并设每个中性粒子的质量为 m ，单位体积内的中性离子数是 N 。除固态等离子体(见 9.13 节)外，我们有

$$m_e \ll m_i. \quad (1.1)$$

可能有几种类型的离子，一些是正的，一些是负的。然而，假如只有一种离子，而且每个离子带单一电荷，则有

$$q_i = -q_e. \quad (1.2)$$

我们还假设，平均说来，等离子体呈中性，于是

$$N_e = N_i. \quad (1.3)$$

只有在其线性尺度比德拜距离 λ 大得多的体积里，方程 (1.3)

才成立。在其线性尺度比 Λ 小得多的体积内，热运动使电子浓度和离子浓度不相等，这是由于静电能量参与了能量均分的缘故。德拜距离 Λ 的表达式为

$$\Lambda = \left(\frac{\epsilon_0 k T_e}{N_e q_e^2} \right)^{1/2}, \quad (1.4)$$

这里 k 是玻尔兹曼常数 (1.380×10^{-23} 焦耳/度), $\epsilon_0 = 8.854 \times 10^{-12}$ 法拉/米。通常我们将使用线性尺度比德拜距离大得多的体积元。

1.3 漂移运动方程

推导漂移运动方程，最好应用统计力学中的分布函数方法。但是，我们将用洛伦兹的一种较简单方法^[1]，并且不需要相对论修正。

在象电磁波那样的扰动影响下，宏观体元中的电子获得一漂移运动，它叠加在无规热运动上。通过求体元中所有电子运动的平均值，就可得到漂移速度，从而消除热运动的影响。设电子的漂移运动速度为 v_e ，离子的漂移速度为 v_i ，中性粒子的漂移速度为 v 。带电粒子的漂移运动方程取以下形式：

$$\begin{aligned} & \text{质量} \times \text{加速度} = \text{电力} + \text{磁力} \\ & \quad + \text{重力} + \text{压力梯度力} + \text{碰撞力}. \end{aligned} \quad (1.5)$$

对中性粒子，没有电力和磁力。我们忽略束缚在中性原子和分子中的电子振动。

浓度梯度所引起的同类粒子间的碰撞力会产生粘滞性作用，我们将它忽略。不同粒子间的碰撞力对这两类粒子施加的力相等而反向，我们将在有用的近似程度上对这个力加以考虑。但是，目前我们完全忽略碰撞。

我们可令

$$\begin{aligned} \text{加速度} &= \frac{\partial v}{\partial t} + v_x \frac{\partial v}{\partial x} + v_y \frac{\partial v}{\partial y} + v_z \frac{\partial v}{\partial z} \\ &= \frac{\partial v}{\partial t} + v \cdot \nabla v, \end{aligned} \quad (1.6)$$

$$\text{单位电荷的电力} = \mathbf{E}, \quad (1.7)$$

$$\text{单位电荷的磁力} = \mathbf{v} \times \mathbf{B}, \quad (1.8)$$

$$\text{单位质量的重力} = \mathbf{g}, \quad (1.9)$$

$$\text{压力} \quad p = NkT. \quad (1.10)$$

这里,对于电子和离子,分别加下标 e 和 i. 每类粒子的漂移运动方程则为

$$Nm \left(\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \nabla \mathbf{v} \right) = Nq\mathbf{E} + Nq\mathbf{v} \times \mathbf{B} + Nm\mathbf{g} - \nabla p. \quad (1.11)$$

如果粒子有稳定的流速(电子为 $\mathbf{v}_{0e}$, 离子为 $\mathbf{v}_{0i}$, 中性粒子为 $\mathbf{v}_0$), 而且有通量密度为 $\mathbf{B}_0$ 的恒定外磁场, 于是等离子体成为所谓的磁等离子体. 这时就有

$$\begin{aligned} \text{总速度} &= \mathbf{v}_0 + \mathbf{v}, \\ \text{总磁场} &= \mathbf{B}_0 + \mathbf{B}. \end{aligned} \quad (1.12)$$

因此, 现在 $\mathbf{v}$ 就是相对于恒定速度 $\mathbf{v}_0$ 的偏离, $\mathbf{B}$ 亦为相对于恒定磁场 $\mathbf{B}_0$ 的偏离. 每种粒子的漂移运动方程有如下形式:

$$\begin{aligned} Nm \left\{ \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + (\mathbf{v}_0 + \mathbf{v}) \cdot \nabla \mathbf{v} \right\} &= Nq\mathbf{E} \\ &+ Nq(\mathbf{v}_0 + \mathbf{v}) \times (\mathbf{B}_0 + \mathbf{B}) \\ &+ Nm\mathbf{g} - \nabla p. \end{aligned} \quad (1.13)$$

$\mathbf{v} \cdot \nabla \mathbf{v}$ 项构成一非线性作用; $\mathbf{v} \times \mathbf{B}$ 项也是如此. 处理它们甚为困难, 而且常常并不重要. 忽略它们, 则得每种粒子漂移运动的方程为

$$\begin{aligned} Nm \left(\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + \mathbf{v}_0 \cdot \nabla \mathbf{v} \right) &= Nq\mathbf{E} \\ &+ Nq(\mathbf{v}_0 \times \mathbf{B}_0 + \mathbf{v} \times \mathbf{B}_0 + \mathbf{v}_0 \times \mathbf{B}) \\ &+ Nm\mathbf{g} - \nabla p. \end{aligned} \quad (1.14)$$

恒定的漂移速度常常并不重要, 而恒定的外磁场却起重要的作用. 在这些情况下, 我们有

$$\mathbf{v}_0 = 0, \quad \mathbf{B}_0 \neq 0, \quad (1.15)$$

于是每种粒子的漂移运动方程取如下形式:

$$Nm \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} = Nq\mathbf{E} + Nq\mathbf{v} \times \mathbf{B}_0 + Nm\mathbf{g} - \nabla p. \quad (1.16)$$

如我们采用方程(1.16)这种形式的漂移运动方程,分别对电子、离子和中性粒子写出这种方程,则有

$$\begin{cases} N_e m_e \frac{\partial \mathbf{v}_e}{\partial t} = N_e q_e \mathbf{E} + N_e q_e \mathbf{v}_e \times \mathbf{B}_0 + N_e m_e \mathbf{g} - \nabla p_e, & (1.17) \\ N_i m_i \frac{\partial \mathbf{v}_i}{\partial t} = N_i q_i \mathbf{E} + N_i q_i \mathbf{v}_i \times \mathbf{B}_0 + N_i m_i \mathbf{g} - \nabla p_i, & (1.18) \\ Nm \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} = Nm\mathbf{g} - \nabla p. & (1.19) \end{cases}$$

这里(方程 1.10)

$$p_e = N_e k T_e, \quad p_i = N_i k T_i, \quad p = N k T. \quad (1.20)$$

因为方程(1.17), (1.18) 和(1.19)中已略去碰撞,方程(1.19)与方程(1.17)和(1.18)就解除联系了. 当碰撞不重要时,中性大气层里的波和带电粒子的等离子体中的波基本上是去耦的.

还要注意,即使忽略碰撞,电子和粒子的运动也不是彼此无关的. 同一电场 $\mathbf{E}$ 出现在两个方程里,这即引起耦合. 产生这种耦合的是带电粒子间的反平方定律的力.

1.4 平衡态等温大气层

作为方程(1.17)一(1.20)的一个简单应用,我们来研究平衡态的大气层.

首先考虑一中性大气层.为此我们需要方程(1.19).设大气层是等温的,温度为 T ,重力和高度 z 无关,因此方程(1.19)的 z 分量为

$$Nm \frac{\partial v}{\partial t} = -Nm g - \frac{\partial p}{\partial z}, \quad (1.21)$$

这里[方程(1.20)的最后一个]

$$p = N k T. \quad (1.22)$$

在平衡态,我们有 $v = 0$, 因此方程(1.21)变为