

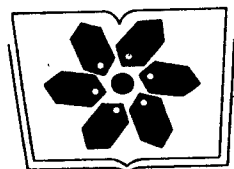
磁层粒子 动力学

徐荣栏 李 磊 著



科学出版社

www.sciencep.com



中国科学院科学出版基金资助出版

磁层粒子动力学

徐荣栏 李 磊 著

科 学 出 版 社

北 京

内 容 简 介

本书较为系统地介绍了磁层粒子动力学的基本概念、方法及其在磁层物理研究中的应用,包括带电粒子在地磁场中的运动区、运动轨道、漂移运动的小扰动理论及其绝热不变量等,并根据磁层不同区域内的电磁场特征,将磁层分成近地球区、近磁尾区和远磁尾区,利用简化的电磁场模式,详细介绍了这三个区域内的粒子动力学特征,并在此基础上解释实际的磁层现象,如辐射带、等离子体片、极光等。最后讨论了在真实的磁层磁场模式中的粒子动力学问题。本书在可能的情况下力求给出解析解,以便读者理解各物理量之间的相互关系。

本书可供从事空间物理和等离子体研究的工作者和高等学校相关专业师生阅读,同时也可供具有物理专业基础的研究工作人员和师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

磁层粒子动力学/徐荣栏,李磊 著. —北京:科学出版社,2005

ISBN 7-03-013370-6

I. 磁… II. ①徐… ②李… III. 磁层物理学 IV. P353

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2004)第 043925 号

责任编辑:鄢德平 邱 璐/责任校对:赵桂芳

责任印制:钱玉芬/封面设计:王 浩

科学出版社 出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

丽源印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2005年1月第 一 版 开本:(850×1168)1/32

2005年1月第一次印刷 印张:9 1/8

印数:1-1 500 字数:239 000

定价:35.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈新欣〉)

序

磁层是地球空间环境中非常重要的区域,又是空间物理研究中十分活跃的研究对象。磁层内充满着稀薄等离子体,其动力学行为理论上可分别应用单粒子方法、磁流体力学近似和统计物理理论来研究,且发展了相应的数值模拟方法。单粒子方法能够计算复杂电磁背景下带电粒子的运动轨道,提供直观而清晰的运动图像,为进一步了解磁层等离子体的集体特征提供了线索。磁流体力学近似将磁层等离子体作为连续介质来处理,讨论各种电磁场背景下等离子体的整体运动特征及各种磁流体波动的激发和传播。统计物理理论则自洽地考虑所有带电粒子的运动特征及其与电磁场之间的相互作用,可以深入研究带电粒子的各种加速机制及电磁波的激发。以上三种方法,是相辅相成的。

20 世纪初,为了探讨北极光的成因,挪威物理学家 Birkeland 通过实地观测和实验室实验证明,入射到磁偶极场中的电子可以产生与极光相似的辉光形态。随后 Störmer 计算了磁偶极场中带电粒子运动的轨道,其结果支持了 Birkeland 的理论。20 世纪 50 年代,Alfvén 引入了引导中心近似,提出了绝热运动的概念,即可应用单粒子方法研究磁层中带电粒子的复杂运动。接着 Northrop 利用严格的数学方法,导出了带电粒子在一般电磁场中满足小扰动条件的运动规律。1958 年人造卫星发现了地球辐射带,这是对由单粒子方法预测磁层中存在捕获区的极大支持。近 100 年来,单粒子动力学方法已被广泛用于解释大量的卫星观测结果和磁层物理现象。

随着 1957 年第一颗人造卫星升空,人类进入了空间时代。在我们的老师、我国空间科学的开拓者赵九章先生的领导下,我国随即开始了空间物理的研究和探测。本书作者徐荣栏教授,当时即跟随赵先生从事地球辐射带的理论和实验研究。40 多年来,徐荣栏教授及其合作者在磁层粒子动力学研究中取得一系列创新的研

究成果。他们研究了磁尾弱磁场区中带电粒子的运动特征,证明在中性线磁场中带电粒子的运动仍然是绝热运动;采用二维的双曲线磁场来描述实际的地磁尾,讨论了带电粒子的投掷角散射、晨昏分离、加速和非线性过程的物理规律;他们还将整个磁层空间分为绝热区、非绝热区和准绝热区,揭示了由于带电粒子在三个区域中不同的运动特征所形成的磁层物理现象。现在,徐荣栏教授和李磊教授根据他们多年的研究成果,写了这本专著,这不仅是他们自己多年研究工作的总结,而且对我国空间物理学科的发展也是一个推进。本书可以作为相关专业研究生的教材,也可供从事空间物理和等离子体物理教学和研究的科技工作者参考。

王水

2003年12月3日

目 录

序

引言	1
第 1 章 磁层等离子体粒子动力学的发展历史	5
第 2 章 磁层的基本结构和模式	10
2.1 磁层等离子体探测	10
2.2 地球的基本磁场和变化磁场	14
2.2.1 地球的基本磁场	14
2.2.2 地球的变化磁场	19
2.3 磁层磁场	22
2.3.1 磁层顶	22
2.3.2 磁层磁场在中心子午面的图形和特征	23
2.3.3 磁层磁场在赤道面上的强度分布	32
2.3.4 磁层磁场的三维空间特征	40
2.3.5 磁层极尖区	43
2.4 磁尾中性片及其正交坐标系	45
2.4.1 磁尾中性片模式	46
2.4.2 磁尾正交曲线坐标系	53
2.5 磁层电场模式	58
2.5.1 对流电场	59
2.5.2 旋转电场	62
第 3 章 磁层粒子动力学理论基础	66
3.1 磁层粒子动力学的动力学方程	66
3.2 带电粒子在电磁场中的运动区	68
3.2.1 带电粒子在轴对称磁场中的运动区域	69
3.2.2 带电粒子在二维平面磁场中的运动区	72
3.3 带电粒子在电磁场中的漂移运动	74
3.3.1 带电粒子的漂移运动	75

3.3.2 漂移运动的小扰动理论	78
3.4 带电粒子在电磁场中运动的绝热不变量	83
3.4.1 磁矩不变量	84
3.4.2 带电粒子沿磁力线运动的纵向不变量	88
3.4.3 带电粒子漂移运动的磁通不变量	91
3.5 磁层不同区域的粒子动力学特征	92
第4章 带电粒子在近地偶极磁场中的运动	98
4.1 带电粒子在偶极磁场中的运动	98
4.1.1 带电粒子的运动区和禁区	99
4.1.2 磁扰期间粒子捕获区的变化	105
4.1.3 带电粒子在偶极磁场中的运动	113
4.1.4 带电粒子在偶极磁场赤道面上的漂移运动	122
4.2 粒子动力学在近地空间的应用	126
4.2.1 L - B 坐标系	126
4.2.2 等离子体层粒子动力学	131
第5章 带电粒子在远磁尾中性片磁场中的运动	142
5.1 带电粒子在磁尾中的运动方程及其一级近似形式	143
5.2 带电粒子在中性片磁场的运动	146
5.2.1 带电粒子在中性片磁场中运动的区域和禁区	146
5.2.2 无电场情况下的运动轨道	150
5.2.3 在有晨昏电场情况下的运动轨道	157
5.2.4 带电粒子在晨昏电场作用下的加速	159
5.3 带电粒子在中性片磁场中运动的解析解	162
5.3.1 带电粒子在中性片磁场中运动的基本方程	162
5.3.2 无晨昏电场情况下带电粒子在中性片磁场非小扰动区 中的运动	163
5.3.3 无晨昏电场时带电粒子在中性片磁场小扰动区中的 运动	168
5.4 带电粒子在中性片磁场中运动的绝热不变量	175
5.4.1 电子和正离子在中性片磁场中运动轨道的一级近似	

形式	176
5.4.2 带电粒子在中性片磁场中运动的几种不变量	182
5.5 利用带电粒子的运动讨论磁尾等离子体片电流和磁场	188
5.5.1 磁尾等离子体片电流	188
5.5.2 带电粒子在中性片磁场中的运动与磁场之间的关系	198
第6章 带电粒子在近磁尾双曲线磁场中的运动	205
6.1 带电粒子在近磁尾双曲线磁场中的运动	205
6.1.1 在晨昏电场作用下带电粒子在近磁尾双曲线磁场中的 运动方程	206
6.1.2 在晨昏电场作用下带电粒子在近磁尾双曲线磁场中的 运动的禁区图形	207
6.1.3 在晨昏电场作用下带电粒子在近磁尾双曲线磁场中的 运动轨道	213
6.1.4 在晨昏电场作用下带电粒子在近磁尾双曲线磁场中的 加速	216
6.1.5 带电粒子在近磁尾双曲线磁场中运动时各个参数的 变化	219
6.2 磁尾中的各向同性粒子点源的动力学过程	223
6.2.1 磁尾带电粒子源的计算模式	224
6.2.2 从点源出发的一群各向同性分布的带电粒子,在晨昏 电场的作用下,穿过双曲线磁场的非小扰动区后, 在近地球平面上的投掷角分布	226
6.2.3 双曲线中心附近各向同性点源的带电粒子向地球方向的 传播及其空间分布的变化	229
6.3 磁尾带电粒子的晨昏不对称分布	233
6.3.1 磁尾带电粒子的晨昏不对称分布	233
6.3.2 IMP-7/8 卫星观测到的带电粒子的晨昏不对称性	237
第7章 带电粒子在磁层磁场中的运动	240
7.1 磁层的电磁场	241
7.1.1 磁层的磁场	241

7.1.2 磁层的电场	241
7.2 磁层中的绝热和非绝热区	242
7.2.1 磁层中心子午面上的不同粒子动力学区域	243
7.2.2 三维磁层空间中的非小扰动区	245
7.3 带电粒子在磁层中的运动轨道	253
7.3.1 带电粒子在磁层中的三维运动	254
7.3.2 具体轨道特征确定 δ 的大小	256
附录 A 引导中心的运动方程的推导	259
A1 磁场强度的一级小扰动近似表达式	259
A2 物理量在一个圆周轨道上的行平均	260
A3 引导中心的基本运动方程	261
附录 B 非线性的波动方程的解法	264
B1 第一种非线性波动方程的解法	264
B2 第二种非线性波动方程的解法	268
参考文献	271
主要符号及其物理量	276

引 言

本专著是为了纪念我们的老师,当代杰出的科学家、教育家、卓越的科技工作组织者和我国空间科学的开拓者赵九章先生诞辰 97 周年而出版的。著者在先生倡导的磁层粒子动力学研究的基础上,完成了一系列有关磁层粒子动力学及其探测方面的系统研究。本专著写作的另一个目的是总结著者 40 年来,利用粒子动力学方法研究磁层的研究成果。

磁层粒子动力学利用单粒子方法,研究磁层等离子体中的各种动力学过程。由于磁层等离子体的密度非常稀薄,因此单粒子方法是研究磁层等离子体的一种有效手段,其结果可解释磁层空间的许多现象。著者从 1960 年便开始从事这方面的研究,至今已有 40 多年的历史。本专著主要总结两位著者利用粒子动力学方法研究磁层的成果内容,包括著者在国内外学术刊物上发表的 38 篇论文的研究成果,其中有早期和赵九章合作的研究成果;著者在 1962 ~ 1966 年在中国科技大学地球物理系讲授空间物理的讲稿;未出版的赵九章等编写的《高空大气物理学》的第 15 章和第 20 章手稿的内容;以及近几年两位著者在磁层粒子动力学及其卫星探测数据分析方面的研究成果。

第 1 章主要介绍磁层粒子动力学的发展历史,尤其是在人造卫星上天后,利用磁层等离子体粒子动力学方法,对辐射带、等离子体层以及磁尾等卫星观测结果的解释。

第 2 章作为后几章的基础,介绍了磁层的基本结构以及磁层各个区域的模式,包括磁层等离子体探测、磁层顶、地球磁场、磁层磁场、电场模式和磁尾中性片模式等。考虑到磁层磁场在磁层粒子动力学过程中有非常重要作用,因此本专著分析了不同版本的 Tsyganenko 磁层磁场模式的主要特征,以便于在第 7 章利用这些特

征讨论磁层粒子动力学的有关问题。另外中性片模式是两位著者根据卫星的观测数据建立起来的,该模式于 1998 年获中国科学院自然科学二等奖,并被收录在美国宇航局资料中心网页中(<http://nssdc.gsfc.nasa.gov/space/model>),供大家使用。此外,本章还介绍了著者最近在电场、磁场三维结构特征方面的研究成果。

第 3 章介绍磁层粒子动力学的基本理论,包括带电粒子在地磁场中运动的轨道、运动区、漂移运动的小扰动理论及其绝热不变量。根据磁层电磁场在不同区域的粒子动力学特征,我们将磁层分成近地球区、近磁尾区和远磁尾区三种区域,并在以后的章节里,详细介绍在这三种不同区域内的粒子动力学特征。

第 4 章主要介绍带电粒子在近地球区的偶极磁场中的运动轨道、绝热不变量、运动区,以及带电粒子在偶极磁场中的动力学特征及其在地磁扰动期间的变化,并将结果用于解释空间环境的动力学特征,包括地磁 L - B 坐标系、地球辐射带和等离子体层等。带电粒子在偶极磁场中运动的理论发展于 20 世纪中期,但至今仍然被大量引用,是磁层研究的重要理论基础之一。本章的内容来源于著者在中国科技大学讲授空间物理的讲稿、赵九章等编写的《高空大气物理学》下册的手稿、赵九章先生和著者合作的几项工作,以及两位著者近期开展等离子体层研究的成果等内容。其中赵九章等的“近地空间探测和理论研究”1987 年获国家自然科学三等奖。

从这一章起,在以后的各章里,我们首先介绍粒子轨道的运动区,再进一步讨论带电粒子在运动区内的运动轨道及其特征。我们还利用大量不同初始条件的带电粒子,研究它们在运动过程中参数间的关系,并用于解释实际的磁层现象。在可能情况下,力求给出解析解,以助于理解各物理量间的相互关系。

第 5 章主要介绍磁层远磁尾区的粒子动力学。根据磁尾电磁场特征,我们用一维中性片磁场模式和均匀晨昏电场模式近似地描述磁尾电磁场。虽然这些模式比较简单,但由此得出的解析解有助于理解各物理量间的相互关系。利用粒子“8”字准绝热运动,

解释了磁尾等离子体片;利用非线性数学方法将 Alfvén 的引导中心理论,推广到远磁尾磁场为零的区域,我们还根据这些绝热不变量建立了带电粒子的分布函数,并由此推出这些粒子运动所产生的电流及其磁场。

第 6 章主要介绍磁层近磁尾区的粒子动力学。根据近磁尾磁场以及粒子动力学特征,我们用双曲线磁场模式和均匀晨昏电场模式近似地描述磁尾电磁场。解释非绝热运动引起的带电粒子在近磁尾区的投掷角散射等过程,讨论粒子进入地球附近的过程和极光的形成等现象。有关“磁尾粒子动力学”的研究工作,1987 年曾获中国科学院科技进步二等奖。

最后的第 7 章是在了解了带电粒子在近地球偶极磁场、远磁尾中性片磁场和近磁尾双曲线磁场中的运动规律的基础上,介绍在 Tsyanenko 磁层磁场模式中的粒子动力学问题。但由于目前尚未能找到在 Tsyanenko 磁场模式中使平行于磁场方向的电场为零的电场模式,我们无法利用带电粒子的轨道讨论磁层中带电粒子的动力学问题。因此,在这章里我们只能根据带电粒子的动力学特征讨论磁尾带电粒子的投掷角散射及沉降到地球表面的行为。

国外已出版的和本专著内容相关的代表性著作有 Alfvén 的《宇宙电动力学》、Northrop 的“The Adiabatic Motion of Charged Particles”、Roederer 的“Dynamics of Geomagnetically Trapped Radiation”, Lyons 和 William 的《磁层物理的定量形态》,但这些著作只限于描述近地球的磁层粒子动力学及粒子的绝热运动。有关极尖区和远离地球的磁尾粒子动力学及粒子的非绝热混沌运动,主要是以论文和评论性文章发表,目前尚无专门的书籍介绍。在国内和本专著内容相近的书籍有:1984 年冯克嘉翻译的《日地空间物理》,1988 年涂传诒等编著的《日地空间物理学》和 2000 年曹晋滨、李磊和吴季翻译的《空间物理导论》等的部分章节。有关粒子动力学的书籍有:1977 年戴世强和陆志云翻译的《等离子体动力学》,1998 年杜刚和王乃彦编著的《等离子体物理》等的部分章节。它们的内容比较广泛,而且是翻译和编著。专门写磁层物理,特别是根据自己的

工作总结出来的磁层粒子动力学的书籍,在国内目前尚未发现。

作为专著,本书以介绍著者自己的工作为主。但为了使本书比较系统,书中还引用了一些参考文献,参考文献中有不少是综合性的文章和专著,读者可通过查阅这些参考资料,进一步了解其他有关工作。本书由浅入深地介绍了各个物理量,重视数学公式推导的严谨性,尽量突出其物理含义。

本书主要由徐荣栏起草,李磊参与第2章和第4章的部分起草工作。最后由徐荣栏和李磊共同补充、修改、核对和定稿。

本书的主要读者对象是从事空间物理和等离子体研究的工作者和高等学校有关专业,包括空间物理和等离子体等专业的师生,同时也可供具有物理专业基础的研究工作人员和师生阅读。

徐荣栏

于北京中国科学院空间科学与应用研究中心

2003年10月

第 1 章 磁层等离子体粒子 动力学的发展历史

在具体介绍磁层粒子动力学之前,本章首先介绍磁层等离子体粒子动力学研究的发展历史。

1957 年人造卫星上天后,人们对空间环境的认识有了飞速发展(徐荣栏 1995)。人们不仅可以根据地面观测结果去推测高空发生的各种物理现象,而且还可利用卫星携带的各种探测器对空间环境进行直接探测,由此发现了大量新事实:最早发现的为辐射带(Van Allen 1963,1983),后来被命名为 Van Allen 带。接着卫星探测又发现了太阳风、磁层顶、磁尾和等离子体层等(Roederer 1970;Lyon and William 1984;大林辰藏 1970;涂传诒 1988;Kilverson and Russell 1995)。根据这些探测结果,我们可编制各种空间环境的静态模式,同时,又需要人们利用等离子体理论进一步解释这些结果,理解其物理意义。

等离子体的行为本质上是一种集体效应,需要用统计物理方法来处理,但也可用近似处理方法来研究。近似方法一般可分单粒子方法和流体方法两种(Boyd and Sanderson 1969;徐家峦,金尚先 1981;杜世刚,王乃彦 1998)。单粒子方法是把等离子体当做独立的粒子系统,根据牛顿运动方程来确定单粒子在电磁场中的运动轨道。它的条件首先是完全忽略粒子间的相互作用,其次是不考虑由于带电粒子运动产生的电流对外界电磁场的影响。随着计算机技术的不断发展,我们有可能在复杂的电磁场模式中计算带电粒子的运动轨道,这个复杂的电磁场模式可包含由于带电粒子运动产生的电流对电磁场的影响。因此,第二个条件就显得不很重要。单粒子方法最适合于描述稀薄的等离子体,而磁层等离子体是非常稀薄的,因此单粒子方法是研究磁层等离子体一

种有效的手段。它可以提供直观的图像,有助于了解等离子体的某些集体特征,是统计方法中不可缺少的第一步。目前单粒子方法已经成功地解释了磁层中的辐射带、极光、等离子体层、磁尾及其动力学过程产生的磁暴和亚暴中的一些重要现象。

流体方法或称之为磁流体力学方法,感兴趣的不是等离子体的运动,而是在各种电磁场位形下,等离子体的平衡和稳定,以及振荡和波动等问题。这是单粒子方法不能解决的问题。本书着重介绍单粒子方法,因此不涉及磁层中的波和不稳定性问题,读者可从有关文献和书籍中了解此方面的内容。

在磁层粒子动力学的发展过程中,首先是 Störmer(1955)为了计算高能宇宙线粒子在地球附近的运动,利用数值计算方法,大量地计算带电粒子在偶极磁场中的运动轨道。当时的计算机条件还很差,因此工作量是相当大的。在计算过程中,Störmer 发现在地球附近有一个和外面隔绝的运动区。由于当时人们认为地球附近的带电粒子来自无穷远的宇宙线,因此这个和外面隔绝的运动区并未引起他的注意。直到 1958 年人造卫星发现辐射带后,这个与外面隔绝的运动区才引起人们的注意。人们认识到辐射带是由这个隔绝的运动区——地磁场的捕获区——中的带电粒子构成的,粒子一旦进入这个区,将始终被捕获在内。因此我们可解释地球附近长期存在大量带电粒子的现象,预测捕获区的形状,而卫星观测到的辐射带与捕获区的形状恰好相同。

我国的空间物理研究是在辐射带发现不久后的 1959 年开始的。当时著者在赵九章先生的带领和指导下,利用捕获区的变化研究带电粒子如何进入捕获区形成辐射带(徐荣栏,赵九章 1962;赵九章等 1962;徐荣栏,周国成 1963a;Shu et al. 1964;Jaw et al. 1965),与此同时还利用等离子体辉光放电开展这方面的实验研究(赵九章等 1962;徐荣栏,周国成 1963a;Shu et al. 1964;Jaw et al. 1965)。

从另一个角度来说,由于磁场的作用,特别是在地球附近磁场比较强的区域,能量比较低的带电粒子的运动轨道非常复杂,当时

的计算技术无法解决其运动问题。为了描述带电粒子的复杂运动,Alfvén(1950)引进了引导中心的概念,认为带电粒子在地球附近的运动可分解为三种运动,即围绕引导中心的圆周运动,引导中心沿磁力线在两个磁镜点之间的来回振荡,引导中心沿垂直于磁场方向的漂移运动。其中,圆周运动的特征可用磁矩表示,粒子在两个磁镜点之间沿磁力线的运动特征可用平行于磁场方向的速度沿运动路径的积分来表示,漂移运动的特征可用粒子围绕地球一周形成的封闭磁通量来表示。这三个物理量在粒子运动满足小扰动条件时,始终保持不变,因而称之为绝热运动。20 世纪 60 年代,Northorp(1963)利用严格的数学方法,推导了带电粒子在一般电磁场中满足小扰动条件时的运动规律,提出了绝热运动的小扰动理论。从此,粒子动力学方法就被广泛地应用于解释大量的卫星观测结果,如辐射带、等离子体层、磁暴环电流等近地磁层的重要现象(Roederer 1970;Lyon and William 1984;大林辰藏 1976;徐传诒 1988;Kivelson and Russell 1995)。

随着卫星技术的发展,卫星可进入磁层极尖区和离地球较远的磁尾进行探测。在这些区域,由于磁场很弱,因此不能用上述小扰动理论来解释卫星所观测的结果。20 世纪 60 年代末期,Speiser 等(1967)便开始研究在一维的中性片弱磁场中的粒子动力学问题。当时我国正处于“文化大革命”时期,许多研究项目,包括粒子动力学的研究停顿了十余年,直到 70 年代末、80 年代初,才恢复并开展了一系列有关在磁尾弱磁场区中的粒子动力学研究(徐荣栏等 1980;徐荣栏 1981;Xu 1981a, 1981b, 1981c, 1981d; Xu and Gu 1982; 徐荣栏,古士芬 1983a, 1983b; Xu et al. 1986b; Xu 1988, 1991a; Xu et al. 1992; Xu and Zhu 1995; Xu 1996, 1997; Xu and Li 2003)和卫星探测数据的分析研究(Xu et al. 1983, 1984; Xu and Jin 1984; Xu et al. 1986a; Xu 1988, 1991a, 1991b; Xu et al. 1992; 黄汉辉等 1993; Wang and Xu 1994; 朱明,徐荣栏 1994; Xu et al. 1995; Xu 1996; 李磊,徐荣栏 1998; Li and Xu 2000, 2003)。在一维中性片弱磁场区,特别

是当磁场为零时,上述小扰动理论不再适用。但研究结果表明,仍然可用类似方法,将带电粒子的运动分成类似的三种运动,用严格的小扰动方法给出其解析表达式。但与上述圆周运动对应的是“8”字形的运动,或在磁场为零的平面上下的两个方向相反的圆周运动。“8”字形轨道等效于两个极性相反的小磁偶极。该磁偶极在粒子运动过程中保持不变,因此带电粒子在中性片磁场中的运动仍然是绝热运动(徐荣栏等 1980;徐荣栏 1981,1981b, 1982; Xu 1981b, 1981c, 1981d; Xu 1988, 1991a)。

但在实际的磁尾中,磁场的北向分量是不为零的,离地球越近北向分量越大,因此需要用二维的双曲线磁场来描述(Xu 1981a, 1981b; Xu and Gu 1982; 徐荣栏,古士芬 1983a, 1983b; Xu et al. 1986b; Xu 1988, 1991a; Xu et al. 1992; Xu and Zhu 1995; Xu 1996, 1997)。在这种磁场的某些区域,往往会出现大量的非线性问题,粒子的运动不再是绝热运动,因此须计算大量不同初始条件的带电粒子在双曲线磁场的运动轨道,并求出带电粒子运动的规律。为此我们大量计算了由一个点,甚至由一个面出发的各种投掷角的粒子在非绝热区的运动特征,研究粒子的投掷角散射、晨昏分离、加速和非线性过程等的物理规律,并用来解释磁尾粒子进入到近地空间形成极光和环电流等过程。这种非线性过程也可用混沌方法来研究。

此外,根据带电粒子动力学的绝热条件,我们将整个磁层空间分成绝热区、非绝热区和准绝热区(Xu et al. 1992; Xu and Zhu 1995),进一步了解带电粒子在这三种区域的不同运动规律,以及由于这些不同运动形成的极区沉降粒子、等离子体层的扩展、环电流的形成等现象。

近几年随着空间研究的不断发展,人们根据大量的卫星探测数据,建立了符合实际情况的磁层磁场模式,而在这些磁场模式的建立过程中考虑了带电粒子运动产生的电流对磁场的影响,因此借助于飞速发展的计算机技术,我们有可能研究带电粒子在这些复杂的磁层电磁场模式中的运动及其动力学特征,得到近似自治的解。