

高等学校教学用书

加速器物理基础

JIASUQI WULI JICHU

A. И. 格林別格著

人民教育出版社

本书是在苏联专家阿·伯·格林别格(А. П. Гринберг)的讲义“带电质点加速方法的物理基础”的基础上加以补充编写而成的。书中对现代常用的各种加速器的工作原理作了全面的阐述,并简要的介绍了它的具体结构、应用及现况。

本书可作为高等学校“加速器物理基础”课程的教材用,也可供有关的工程技术人员参考。

加速器物理基础

А. П. 格林别格著

京 华翻译

人民教育出版社出版

高等学校数学用书编委会
北京宣武门内大街2号

(北京市书刊出版业营业登记证出字第2号)

人民教育印刷厂印装

新华书店科技发行所发行

各地新华书店经售

统一书号 13010·982 开本 $850 \times 1168 \frac{1}{32}$ 印张 $8 \frac{11}{32}$

字数 216,000 印数 0001—5,500 定价 (6) 0.85

1961年7月第1版 1961年7月北京第1次印刷

本书中常用符号表

p	质子; 粒子动量数值	r	半径
d	氘核	t	时间
α	氦核	τ	时间区间
γ	伽马射线	e	电子电荷数值
m	粒子质量	c	光速
m_0	粒子静止质量	H	磁场强度
A	粒子质量数	B	磁感强度
Z	粒子电荷数	Φ	磁通量; 俘获相角
v	粒子速度	G	磁刚度
β	粒子相对速度	n	磁场对数梯度; 序数
p	粒子动量	E	电场强度
W	粒子动能	V	电压, 电位
ε	粒子总能	I, i	电流
ε_0	粒子固有能量	Q, q	电荷
F	粒子所受作用力	R, r	电阻; 半径
J, j	粒子束流强度	C	电容
ρ	粒子轨道曲率半径	L	电感
z	粒子轴向坐标	λ	波长
U	位能	P	功率
T	周期	S	面积
f	频率	D	直径
ω	圆频率, 角速度	l	长度
φ	位相	δ	空隙

本书中常用脚注表

н	始值	max	极大
к	終值	min	极小
вх	入射	ср	平均
илк	注入	д	实际
вых	射出	эфф	有效
рез	諧振	ц	中心
а	幅值	орб	軌道
рав 或	平衡	зар	充电
пред	极限	раз	放电
кри	临界	г	发生器
пор	閾值	э	电子
гр	边界		

目 录

本书中常用符号表	1
----------	---

第一章 緒論	1
--------	---

§ 1. 加速器应用的一般介紹	1
§ 2. 加速器技术的发展簡述	3
§ 3. 加速器的种类	7
§ 4. 粒子的动力性性质	8

第二章 高压加速器	18
-----------	----

§ 1. 概述	18
§ 2. 真空高压管	20
§ 3. 高压倍加器	26
§ 4. 静电加速器	33

第三章 直綫諧振加速器	43
-------------	----

§ 1. 直綫諧振加速器的工作原理	43
§ 2. 依金格直綫諧振加速器	45
§ 3. 諧振条件和能量增量	45
§ 4. 諧振与复諧振	47
§ 5. 漂浮管长度的計算	48
§ 6. 時間聚焦	49
§ 7. 出口处束流的能量分布, 束流能譜的計算	50
§ 8. 直綫諧振加速器的优缺点及发展	53

第四章 迴旋加速器	55
-----------	----

§ 1. 迴旋加速器的工作原理	55
§ 2. 迴旋加速器的电磁聚焦	60
§ 3. 迴旋加速器的相移	66
§ 4. 迴旋加速器的粒子流强度和极限能量	73
§ 5. 粒子初始位相的聚合	78
§ 6. 迴旋加速器工作的調整	79
§ 7. 迴旋加速器部件結構的基本	

知識	80
----	----

§ 8. 迴旋加速器的現况和发展趋势	87
--------------------	----

第五章 电子感应加速器	91
-------------	----

§ 1. 电子感应加速器的工作原理	91
§ 2. 电子感应加速器中电子的聚焦和振蕩	97
§ 3. 电子感应加速器的俘获与引出問題	102
§ 4. 电子感应加速器中的电子流强度和能量	108
§ 5. 电子感应加速器的主要构件	111
§ 6. 电子感应加速器的应用及現狀	118

第六章 电子同步加速器	120
-------------	-----

§ 1. 工作原理	120
§ 2. 自动稳相原理	125
§ 3. 摆模型	132
§ 4. 相图和最佳平衡位相	137
§ 5. 輻射損失对加速的影响	145
§ 6. 电子感应加速器起办法	148
§ 7. 同步加速器的构造	150
§ 8. 同步加速器与电子感应加速器比較及同步加速器的概況	156
§ 9. 附录	157

第七章 稳相加速器	161
-----------	-----

§ 1. 引言	161
§ 2. 稳相加速器的工作原理	163
§ 3. 高频加速电压	164
§ 4. 平衡位相及其改变方法	168

§ 5. 最佳平衡位相 φ_s^* 与俘获效率.....	169	些资料.....	225
§ 6. 俘获效率与平均流强的关系.....	175	§ 6. 微波加速器的优缺点及发展 远景.....	227
§ 7. 最佳调制频率.....	177	第十章 现代直线加速器.....	229
§ 8. 稳相加速器的结构.....	178	§ 1. 引言.....	229
§ 9. 稳相加速器的优缺点及一些 资料.....	184	§ 2. 现代直线加速器的工作原理.....	230
§ 10. 发展趋势.....	187	§ 3. 直线加速器的现状与发展.....	241
§ 11. 附录.....	187	第十一章 磁场强度随方位角 变化的回旋加速器.....	246
第八章 同步稳相加速器.....	190	§ 1. 磁场强度随方位角变化的回 旋加速器的实际意义.....	246
§ 1. 同步稳相加速器的工作原理.....	190	§ 2. 工作原理.....	246
§ 2. 同步稳相加速器的结构特点.....	196	§ 3. 磁场强度随方位角变化的回 旋加速器的一些结构特点.....	251
§ 3. 现有同步稳相加速器的资料 及其发展情况.....	201	§ 4. 目前状况及近代发展.....	253
§ 4. 强聚焦的高能加速器.....	203	第十二章 结束语.....	255
第九章 微波加速器.....	219	§ 1. 提高被加速粒子的极限能量.....	255
§ 1. 微波加速器的工作原理.....	219	§ 2. 低造价小尺寸高能加速器的 制造.....	258
§ 2. 微波加速器工作状态的选择.....	220	§ 3. 强流加速器.....	259
§ 3. 微波加速器中自动稳相的特 点.....	221	附录.....	262
§ 4. 微波加速器的结构.....	222		
§ 5. 关于制成的微波加速器的一 些资料.....	225		

第一章 緒論

§ 1. 加速器应用的一般介紹

“带电粒子加速器”是用人工方法使带电粒子受电磁场作用而加速到高能量的装置,一般称为“加速器”,其用途很广:

1. 首先在原子核物理领域中常要求从加速器中得到高能粒子,以便作为核弹去轰击各种原子核。主要进行的工作有以下三方面:

- (1)核反应工作;
- (2)核结构问题的研究;
- (3)核力问题的研究。

通常作为核弹的粒子有五种: α (氦核 ${}^4_2\text{He}^{2+}$), d (氘核 ${}^2_1\text{H}^+$), p (氕核 ${}^1_1\text{H}^+$), 中子(n)和光子(γ)。后两种核弹不带电,虽不能直接用加速器获得,但可以通过带电粒子的核反应间接得到。例如氘核与氘核作用放出中子,电子射线遇到其它物质则放出 γ 射线等等。

用加速器供给的核弹进行核反应工作,比天然放射物来有无可疑的优越性:一是核弹种类多,二是能量高,三是强度大而且发散角小,束流密度大。

天然放射物放出的射线一般有三种: α 射线(甲种射线); β 射线(乙种射线); γ 射线(丙种射线)。其中 β 射线所包含的电子因和原子核之间没有核力作用,故不能用作核弹,由它放出的 γ 射线也因能量太低,很难引起核反应。而天然放射之 α 粒子当作核弹,效果也是很差的,因为 α 粒子带有正电,在射击过程中沿途使其它原子产生电离,因而要消耗能量。而想要射入原子核,还必须克服

其与原子核間的庫倫斥力，加以原子核所占的截面比原子来只有一万万分之一，要想一次击中本来就不容易，因此对于能量不大的天然 α 射綫(Ra C' 放出之 α 只有五兆电子伏能量)完成这项任务是很困难的。卢瑟福在他第一次用 Ra C' 放出的 α 粒子进行的核反应中，发现四十万个 α 核彈内只有八个引起了核反应就是这个道理。

而人工加速的粒子，由于能量可以很高，命中率也就大为增加，目前世界上最大的强聚焦质子同步加速器可以加速质子能量达到 25 千兆电子伏。

另一方面人工加速获得的粒子流强度之大也远非天然放射綫所能比拟。一克镭在一秒钟内向四面八方放射出的 α 粒子总数为 3.7×10^{10} 个，相当于粒子流强度为：

$$\begin{aligned} & (3.7 \times 10^{10}) \times 2 \times (4.8 \times 10^{-10}) \text{ (静电单位)} \\ & = 35.6 \text{ (静电单位)} \\ & = 0.012 \text{ (微安),} \end{aligned}$$

而由一般迴旋加速器就已经可以获得几百微安数量级的粒子流。相当于几十克镭在各个方向放射性强度总和。自然，用加速器放出的粒子流来作为核彈，定将显示出无比强大的威力。因此加速器被誉为“向原子核进军中的必不可少的武器”。

2. 在机械工业領域，可以用加速器中得到的 γ 射綫进行探伤。

3. 冶金、塑料及其它領域也可以用 γ 射綫来照射，以求改良材料的机械、耐热或絕緣等各方面的性能。如钢材受照射后可以提高机械强度，热塑高分子化合物聚乙烯受照射后，耐热性可由 70°C 提高到 190°C 这些都是很有发展前途的。

4. 医学上以加速器作为各种射綫源(n, α, β, γ 等)，来治疗毒癌或对生物进行射綫病的研究。

5. 农业方面, 射綫的照射的应用更为广泛:

A. 农产品儲存方面, 可以起杀虫及抑制发芽的效用: 如大谷庫受 5,000—10,000 倫琴的射綫照射后, 可以将象鼻虫全部杀死。有的害虫藏在种子内部, 为一般药力所不及, 但应用射綫則可得到显著效果。馬鈴薯受 5,000—20,000 倫琴的剂量后, 则可以保存几个月不发芽变质, 新鮮如故。

B. 創造新品种: 麦受中子照射后, 可得到具有抵抗杆锈病能力的新品种。

C. 刺激生长: 如黄瓜、萝卜、蕎麦等种子經過适当的 γ 射綫照射, 下种后发芽又快又好, 对增产很有价值。

D. 食品工业以 γ 射綫来消毒, 可以保持食物的新鮮程度和营养价值。

如此等等, 不胜列举。

加速器所产生的射綫强度大, 用以进行各种工作, 不但效率比較高, 而且具有很多独特的优点。这在以后讲述具体的加速器时, 还要提到。

§ 2. 加速技术的发展簡述

第一个核子反应是英国物理学家卢瑟福在 1919 年发现的。为了进行这种反应, 他利用了具有能量約为 7.7 兆电子伏由 RaC' 所放出的 α 粒子。1922 年苏联物理学家 A. B 梅索夫斯基就提出了为了进一步发展核子物理領域内的研究工作, 必須建造能获得人工加速 α 粒子的装置。但在那时候要完成这个任务是非常困难的。因为为了把氦核 ${}^4\text{He}^{2+}$ 加速到約 7.7 兆电子伏的装置, 必須使这个离子通过 $\Delta V \approx 3.85$ 兆伏的电位差。但是那时誰也不能做到这一点。后来梅索夫斯基建議利用高频諧振变压器来实现上述要求。

加速器装置为物理試驗工作者提供了良好条件,应用加速器可以得到各种快速粒子,并可連續地改变粒子的能量。譬如,可以为試驗获得快速質子。而天然放射源不产生質子。加速粒子束的强度可以大大地超过由天然放射源所产生的粒子束强度。在加速器研究的第一个阶段之后,在加速器出口处粒子的能量达到很大数值。比天然源发射的大許多倍。

1922年美国斯列班提出了不用高电压,而是靠电磁感应来加速电子的設想,并且請求专利,这設想在1927年公开了,并在以后的电子感应加速器中采用了。

瑞士物理学家依金格1924年提出了很主要的設想:粒子反复加速的原理及同步的(諧振)的原理。这些原理在現代加速器中得到广泛地利用。但是加速器技术在初期并未利用斯列班和依金格的設想。而走了研究高压加速器的道路。我們仅仅簡短地列举加速器研究历史的一些主要事件。

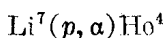
1926年,美国庫里德提出了串級X射綫管的想法:把三只帶有薄片小窗的X射綫管串联起来,并把加速的电子极限能量提高到数倍。1927年他获得了能量为900千电子伏的电子束,代替了他早已在X射綫管中得到的,能量为300千电子伏的电子。

1930年,在一些實驗室中(美国的伯莱特和他的同事,德国的伯拉斯和兰格)。由于多年工作的結果,联成多级的高压加速管获得了能量为2.1兆电子伏的X射綫光子,和能量为2.0兆电子伏的电子束。

1931年范德格拉夫在美国开始利用以前他自己建造的靜电起电机进行試驗,用这个起电机加速粒子,他所建造的起电机能給出空前大的直流电压約1.5兆伏。

1932年卢瑟福的同事考克洛夫脫和华尔頓建造了直流串級发生器和建造了能在700千伏电压下工作的真空管。这个装置,

他們第一个实现了用人工加速的粒子激发核反应(我們曉得,由梅索夫斯基提出这个任务开始到解决这个任务为止,共經過十年)。这就是用質子使鋰分裂的反应。



1932 年在美国貝克萊地方罗倫斯的實驗室中,能够把質子加速到 1.22 兆电子伏的迴旋加速器开始工作了。該實驗室是从 1930 年开始研究高频加速方法的。

1939 年,在迴旋加速器中加速的粒子最大能量大大地超过了用直接方法加速的粒子能量。同样也大大超过了天然放射源所放出的粒子能量(質子—8 兆电子伏,氦核—16 兆电子伏, α 粒子—32 兆电子伏),那时候在美国和在欧洲,已經在建造的迴旋加速器和許多各种形式的高频加速器有几十个。

1940 年第一个电子感应加速器投入运行了。电子感应加速器的制造成功对于以后加速器的发展具有巨大意义。在电子感应加速器里,揭示了一种新的軌道形式。即用圓形軌道代替螺旋形軌道。并且表明了粒子在它自己加速期內,在真空室里可能走过长达几百公里的路程。

1944 年苏联物理学家 B. H. 維克斯列尔发现了一定型式的諧振加速器中粒子自动穩相的現象。那个时候可以称为加速器发展历史的一个新时期的开端。利用粒子自动穩相的各种諧振加速器(也就是同步加速器、穩相加速器、同步穩相加速器)在最近几年內被很快地建造起来。它們能給出大大超过第一时期所能达到的最大能量。

1947 年經過长时期理論与实验的研究,建造了波导管中加速的电子行波直綫加速器。并且建造了帶有漂浮管道的質子駐波直綫加速器。这些新的直綫加速器的建造是由于利用了无綫电工程方面在厘米波和米波領域中的最新成就,才成为可能。

1952年古兰特和其他人发表的論文中建議在加速器中用新的聚焦方法即所謂交变梯度法或称为强聚焦的方法。采用这种建議可以大大地节省消耗在同步穩相加速器和同步加速器中磁铁上的鋼材。

1952年3月在美国布鲁克海文地方的3千兆电子伏的同步穩相加速器(命名为 *Cosmotron*)获得能量为2.2千兆电子伏的质子流。

1953年英国伯明翰的1千兆电子伏同步穩相加速器开始工作。

1954年美国貝克莱的3.3千兆电子伏同步穩相加速器(以 *Bevafron* 命名)調整出来,质子能量达3千兆电子伏。

1957年苏联莫斯科10千兆电子伏同步穩相加速器正式投入运轉。

1958年7月設在我国科学院的我国第一台迴旋加速器(苏联帮助建造)調整完毕正式开始运轉,可以把 α 粒子加速到25兆电子伏的能量。

1959年在苏联磁場强度空間变化的新型迴旋加速器投入运行,加速 α 粒子达24兆电子伏,这是加速器历史上的新成就。

1960年在日内瓦欧洲原子核研究所建造的25千兆电子伏的强聚焦同步穩相加速器投入运轉。

目前,美国斯坦福大学正在筹建45千兆电子伏的电子直綫加速器,預期七年建成;苏联选定在莫斯科近郊建造50千兆电子伏的强聚焦同步穩相加速器。

从事加速器工作的各国科学家們,正在探索和开辟新的粒子加速器的途徑,以期获得更强的粒子流和把粒子能量提高到 10^6 兆电子伏的水平。

§ 3. 加速器的种类

到目前为止, 世界上曾經有过的加速器形形色色已不下数十种。其中有的已經被淘汰, 有的还不够成熟。就拿已經定型了的并被广泛采用的來說, 也有十余种之多。我們可以用不同的原則加以分类。例如有人从被加速粒子的种类出发, 把它們分成: (1) 专门加速电子、(2) 专门加速离子(α 、 d 、 p)和(3)可加速任意一种带电粒子等三大类加速器; 也有人从粒子运动軌道形式的角度着眼, 归并成: (1) 直綫軌道、(2) 閉合圓軌道、(3) 螺旋式軌道三类加速器。

我們这里則从加速电磁場的不同特点出发, 把它們分成四大类:

(1) 靜电場加速的高压加速器——串級加速器 Δ^* , 靜电加速器 Δ^* 。

(2) 渦旋电場加速的感应加速器——电子感应加速器 Δ 。

(3) 高频电場加速的迴旋式加速器——迴旋加速器 * , 电子迴旋加速器 Δ (微波加速器), 穩相加速器 * (同步迴旋加速器或称調頻迴旋加速器), 电子同步加速器 Δ , 同步穩相加速器 * (質子同步加速器)。

(4) 微波电場加速的直綫加速器——电子行波直綫加速器 Δ , 質子駐波直綫加速器 * 。

其中符号“ Δ ”是表示加速电子的, “ * ”是表示加速离子的。

不同的加速器虽各具有特点, 但大体都具备以下三个主要部分:

(1) 产生带电粒子的机构, 这就是所謂电子枪或离子源。电子枪是在真空状态下工作的, 应用高温阴极的热发射或高电場的場致发射原理来获得电子, 再由阳极电压的电場作用将电子束射出

电子枪,准备加速。离子源中則經常充以低压气体(其种类由加速离子种类决定),它是应用热游离或高频游离的方法造成大量离子,再以附加电场将离子吸出离子源,引到加速轨道上去。

(2)加速器的主体部分:这部分的主要任务是保证带电粒子顺利地加速到预定的能量。按其具体任务不同又可再细分为三个体系:

A. 加速电场系统(包括电极、电源):产生电场使粒子加速。

B. 控制磁场系统(包括磁极、电源):产生磁场力使粒子保持在预定的空间内运动(非迴旋式加速器无此系统)。

C. 真空系统(包括真空室及抽气设备):主要是保证粒子在运动过程中,尽可能避免与气体分子碰撞而造成不必要的影响与损失。真空度通常总得在 10^{-5} 毫米汞柱以上。

(3)粒子流引出机构:主要任务是使加速后的粒子通过附加的电场或磁场,偏离其原有的轨道,按预定的方向引出加速器而加以应用。

必须指出,并不是所有加速器都必须具备以上各个部分,例如直线式轨道加速器就不必要控制磁场。电子加速器往往不要求引出电子流,因此就不必要粒子流引出机构。

§ 4. 粒子的动力学性质

最普遍的动力学性质就是粒子的动能 W 。在绝对物理单位制中(即 C. G. S. 制)能量用尔格表示。但是在原子物理与核子物理中粒子能量总是用另外一种单位表示,即电子伏。这个单位是这样引入的:假如粒子的电荷 $q = Ze$, e ——正电荷,按绝对值讲它等于一个电子的电荷, Z ——正的或负的整数,如果这个粒子不受任何牵制,在一个静电场中受这个场的力的作用就要沿着一定的轨道运动。当把粒子由电位为 V_1 处移到电位为 V_2 处时,电场力

就要作功:

$$A = Ze |V_1 - V_2|$$

假如粒子在移动过程中, 没有与其它粒子发生碰撞, 那么, 就不会把能量传递给其它粒子。如果我们的粒子是在高真空中运动, 那么实际上是可以做到的。在这种情况下, 粒子由场力获得之能量在数值上, 应该与 A 值相吻合。就是

$$W = Ze |V_1 - V_2| \quad (1-1)$$

如果 e 和 V 用 CGSE 制表示, W 就是尔格, 如果电位差用习惯的单位伏特来表示那么:

$$W = Ze \frac{\Delta V'}{300} (\text{尔格}) \quad (1-2)$$

这里 $\Delta V'$ 代表电位差, 以伏特为单位。

在这公式中 Z 和 $\Delta V'$ 是可以改变的, 然而乘子 $\frac{e}{300}$ 总是不变的。因此就可以把这个公式写的更简单一些, 不要常数的乘子:

$$W = Z \cdot \Delta V' \quad (1-3)$$

当然, 按公式(1-3)所计算出的能量已经不是用尔格表示了, 而是用另外单位表示, 这个另外的单位就称为“电子伏”。比较公式(1-2)和(1-3)很明显:

$$1 \text{ 电子伏} = \frac{e}{300} (\text{尔格}) \quad (1-4)$$

或是, 因为:

$$e = 4.8 \times 10^{-10} \text{ CGSE.}$$

$$1 \text{ 电子伏} = 1.6 \times 10^{-12} \text{ 尔格} \quad (1-5)$$

由公式(1-3)中可以看出 1 电子伏的能量就是具有电荷数为 $Z=1$ 的粒子在真空中经过电位差 $\Delta V' = 1$ 伏的作用所获得之能量。

这样, 以电子伏表示的粒子能量用起来很方便。因为公式简化了能量的计算。除此以外, 还有这个好处, 当用电子伏来表示粒

子能量时, 很容易想象到在靜电場要傳遞給这种粒子这么大能量需要多大的电位差。例如要把質子加速到 10^6 电子伏, 需要 10^6 伏的电位差。加速 α 粒子到同样大的能量要 500 千伏的电位差。因为 α 粒子 $Z=2$, 見公式(1-3)。

很明显, 1 电子伏是很小的能量, 因此实际上常常采用更大的能量单位:

千电子伏 $= 10^3$ 电子伏; 兆电子伏 $= 10^6$ 电子伏; 千兆电子伏 $= 10^9$ 电子伏, 兆兆电子伏 $= 10^{12}$ 电子伏。

第二个常用的粒子动力学性质是相对速度, 以符号 β 表示:

$$\beta = v/c, \quad (1-6)$$

其中 v 是用某单位所表示的粒子的速度, c 是用同一种单位表示的光速。显然, 相对速度比 v 本身大小更有意义些。

第三个常用的粒子动力学性质是“磁刚度”, 因为在許多加速器及加速器的各种輔助装置中要应用到它。我們以符号 G 表示它, 单位是奥斯特·厘米。“磁刚度”的引入如下: 众所周知, 磁場对运动带电粒子的作用力, 即劳倫茲力:

$$F_A = \frac{Ze}{c} (\mathbf{v} \times \mathbf{H}) \quad (1-7)$$

因 $\mathbf{F} \perp \mathbf{v}$ 所以劳倫茲力不作功, 不能增加粒子的动能。垂直作用于粒子速度 $\mathbf{v}$ 的力改变速度 $\mathbf{v}$ 的方向, 因此代替直綫軌道得到的是曲綫軌道。我們来計算 $\mathbf{v} \perp \mathbf{H}$ 情形下这一軌道的曲率半徑。在这种情形下向量方程式(1-7)簡化成标量的形式:

$$F_A = \frac{Ze}{c} vH \quad (1-8)$$

而且軌道是平面曲綫。我們在下面的基础上来計算这曲綫某点 A 的曲率半徑 ρ_A (图 1-1)。这个基础是: 在每点起着向心力作用的是劳倫茲力应与离心力 F_c 平衡, 这个离心力 F_c 当粒子的軌道不再

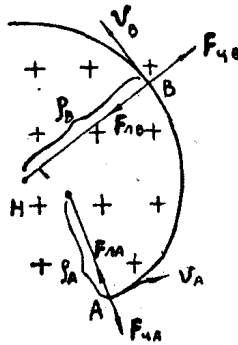


图 1-1 带电粒子在磁场中的运动轨迹。(磁场垂直图面向里)

是直线时立刻发生,那么

$$F_{AA} = F_{vA}$$

或

$$\frac{Ze}{c} v_A H_A = \frac{mv_A^2}{\rho_A} \quad (1-9)$$

$$\rho_A = \frac{cmv_A}{ZeH_A} = \frac{cp_A}{ZeH_A} \quad (1-10)$$

其中 p_A 是粒子在 A 点时的动量。从公式(1-10)显然可以看出:

$$p_A = \frac{Ze}{c} H_A \rho_A \quad (1-11)$$

因此 $H_A \rho_A$ 就是在轨道上该点粒子动量的量度,称“磁刚度”。因而

$$G_A = H_A \rho_A \quad (1-12)$$

$$p_A = \frac{Ze}{c} G_A \quad (1-13)$$

可以说粒子的磁刚度即其动量,不过是以磁单位来量度的。

磁刚度的量纲是奥斯特·厘米,在文献中常碰到高斯·厘米的单位,这是错误的。当然也可以引进另外的定义,即假定

$$G_A = B_A \rho_A \quad (1-14)$$

其量纲是高斯·厘米在数值上(1-12)与(1-14)彼此没有什么不