

高等学校交流讲义

# 加速器原理及控制

JIASUQI YUANLI JI KONGZHI

E. B. 阿尔明斯基著

人民教育出版社

高等学校交流讲义



# 加速器原理及控制

JIASUQI YUANLI JI KONGZHI

E. B. 阿尔明斯基著

自控译

人民教育出版社

本书系苏联专家 E. B. 阿尔明斯基副教授对“电气物理装置控制及保护系统”一书的讲稿。

本书内容包括：各种加速器的工作原理、主要结构，加速器的供电、控制、保护系统，对这些系统的要求、设计和选择的原则等。

本书可作为高等学校有关专业的教材，也可作工程技术人员参考用。

仓促译出，会有错误，读者如有意见请径寄北京宣武门内承恩寺七号人民教育出版社转致译者。

## 加速器原理及控制

E. B. 阿尔明斯基著 自控译

人民教育出版社出版 高等学校数学用书编辑组  
北京宣武门内承恩寺7号

北京市书刊出版业营业许可出字第2号

京华印书局印刷

新华书店科技发行所发行

各地新华书店经售

统一书号 15010·1063 开本 850×1168 1/32 印张 6 5/16

字数 149,000 印数 0001—4,000 定价(7) ¥0.75

1961年7月第1版 1961年7月北京第1次印刷

# 目 录

|                                                    |     |
|----------------------------------------------------|-----|
| 第一章 緒 論 .....                                      | 1   |
| § 1-1. 課程的目的 .....                                 | 1   |
| § 1-2. 人工加速粒子問題的提出 .....                           | 1   |
| § 1-3. 粒子的动力学特性 .....                              | 3   |
| § 1-4. 加速粒子技术发展簡述 .....                            | 7   |
| § 1-5. 加速器的分类 .....                                | 10  |
| § 1-6. 控制、保护系統在加速器中的作用 .....                       | 12  |
| 第二章 高压加速器 .....                                    | 13  |
| § 2-1. 真空高压加速管 .....                               | 13  |
| § 2-2. 高压发生器 .....                                 | 17  |
| § 2-3. 静电发生器 .....                                 | 24  |
| § 2-4. 静电发生器上超高电压的稳定与量測 .....                      | 37  |
| 第三章 回旋加速器 .....                                    | 51  |
| § 3-1. 工作原理 .....                                  | 51  |
| § 3-2. 回旋加速器装置及其主要部件 .....                         | 61  |
| § 3-3. 回旋加速器的控制、保护、检查系統 .....                      | 66  |
| § 3-4. 回旋加速器中获得离子的极限能量 .....                       | 77  |
| 第四章 同步加速器 .....                                    | 80  |
| § 4-1. 同步加速器工作原理 .....                             | 80  |
| § 4-2. 同步加速器装置及其主要部件 .....                         | 88  |
| § 4-3. 同步加速器的控制、检查、保护系統 .....                      | 95  |
| 第五章 稳相加速器 .....                                    | 112 |
| § 5-1. 稳相加速器的物理原理 .....                            | 113 |
| § 5-2. 稳相加速器的主要部件及控制、检查系統 .....                    | 116 |
| § 5-3. 稳相加速器的供电系統 .....                            | 128 |
| 第六章 同步稳相加速器 .....                                  | 134 |
| § 6-1. 同步稳相加速器的物理基础及工作原理 .....                     | 138 |
| § 6-2. 同步稳相加速器的磁铁 .....                            | 140 |
| § 6-3. 同步稳相加速器的真空系統 .....                          | 143 |
| § 6-4. 100 亿电子伏同步稳相加速器上的<br>加速电場頻率与磁場强度的耦合系統 ..... | 145 |

|                                                  |            |
|--------------------------------------------------|------------|
| § 6-5. 同步稳相加速器中加速过程的控制系统 .....                   | 151        |
| § 6-6. 同步稳相加速器磁铁绕组的供电系统 .....                    | 157        |
| § 6-7. 同步稳相加速器的供电系统中, 异步电动机<br>供电回路内的电流调节器 ..... | 163        |
| § 6-8. 强聚焦回旋加速器的设计草案 .....                       | 165        |
| <b>第七章 直线加速器</b> .....                           | <b>168</b> |
| § 7-1. 直线电子加速器 .....                             | 171        |
| § 7-2. 直线质子加速器 .....                             | 176        |
| <b>第八章 带电粒子的感应式加速器——电子感应加速器</b> .....            | <b>187</b> |
| § 8-1. 电子感应加速器的工作原理 .....                        | 187        |
| § 8-2. 在电子感应加速器中, 电子稳定运动的条件 .....                | 190        |
| § 8-3. 电子感应加速器的结构 .....                          | 192        |
| § 8-4. 电子感应加速器中粒子的注入和引出 .....                    | 194        |
| § 8-5. 电子感应加速器供电系统中的直流补充磁化 .....                 | 196        |

# 第一章 結論

## § 1-1. 課程的目的

电气物理装置(带电粒子加速器)的控制及保护系統一課是为了向听課者介紹:加速器的基本工作原理,同样也介紹各种不同能量的带电粒子加速器的自动装置所起的主要作用。

本課內要讲解的有:(1)带电粒子加速器的工作原理;(2)近代加速器的控制、供电及保护系統;(3)控制供电及保护系統的設計及选择原則,以及在加速装置中应用的主要电气设备;(4)各种装置的供电。

本課大概 40 学时可讲完。

## § 1-2. 人工加速粒子問題的提出

1919 年英国物理学家卢瑟福 (редерфорд) 实现了第一次核反应。他用  $\alpha$  粒子轰击氮原子核,得到快速质子。

氧的同位素含量为:

$O^{16} - 99,7575\%$

$N^{14}(\alpha, p)O^{17}$

$O^{17} - 00,0392\%$

$O^{18} - 00,2033\%$

发现快速粒子(本情况下是  $\alpha$  粒子)克服了核的力場而进入到核內,把自己的能量傳給了核,用来使核分裂,或用来研究核力的性质。

大家都知道,原子核是由质子和中子构成,他們之間用核力联系着,核力的作用半径不大。

$$\text{核半径 } r = r_0 A^{\frac{1}{3}}$$

其中  $A$ ——质量数(质子和中子的质量数),

$r_0$ ——单个核子的半径;  $r_0 \approx 1.4 \times 10^{-13}$  厘米。

单个核子半径可以用来衡量核力的作用半径。

当用带正电的粒子去轰击原子核时,由于库仑力的作用,粒子和原子核就相互排斥。质量数在  $1 < A < 200$  之内的物质的原子,在  $r$  距离内,它的位能屏障(Потенциальный барьер)在 1 到 10 百万电子伏范围内。这就是说,为了使带正电的粒子能通过这一位能屏障,它就需要具有与此同样的能量。这样,粒子才能接近原子核表面,那里就非常可能产生核反应。

虽然,有时根据或然率的波动理论,即使能量小一些,粒子也能通过位能屏障,但是这种粒子数目非常少。

因此为了使粒子能到达原子核,就需要粒子具有约 1—10 百万电子伏的能量。

在卢瑟福的第一批试验之后,又进行了许多年的核反应的研究,那时用来作为研究工具的是“核子炮弹” $\alpha$  粒子。科学家们通过镭裂变或其他放射性物质的裂变而取得了这些  $\alpha$  粒子(氦元素  $\text{He}_2^+$  的原子核)。

在很长时期里,已获得的核反应数量是极其微小的。例如:到 1932 年只知道 11 种反应。开始,这一套能供给研究者天然放射性物质的核子炮弹完全能满足他们的要求。但是后来这种天然的核子炮弹愈来愈不满足要求了。

这是由于下列原因:第一,那些能给出放射性物质所发射的带电粒子流很小。如为了引起一个原子的转化,就必须平均约一百万个粒子打到靶上去,而试验室现有的放射性物质,在最好的情况下也只能给出每秒几十亿个  $\alpha$  粒子,因而在这段时间里,它们只

能使几万个原子轉化。

1932 年以前,天然放射性物质的  $\alpha$  粒子曾是唯一的“炮弹”。

物理学家們知道,当  $\alpha$  粒子和氢的原子核相撞,或者用  $\alpha$  粒子先撞击其他物质,可得氢原子核的快速质子。利用这些快速质子来作为“核炮弹”,的确是一件非常引人心动的事;然而他們的数量实在太少,而如何获得大量的这种粒子当时又不知道。

其次,天然核炮弹的动能也常常不能滿足研究工作者的要求。研究工作者就面临了这样一项任务,如何取得“人工的  $\alpha$  粒子”和“人工的 H 粒子”(快速质子)。当然,問題不在于获得相应的  $\text{He}^{++}$  或  $\text{H}^+$  的离子,而在于如何能够赋予这些离子比天然粒子能量大得多的动能。

增加带电粒子速度的唯一办法是使它处于电场的作用之下。因此,为了給粒子以很大的能量,必須获得很高的电压。

为了确定电压所必要的值,我們简单地討論一下,那些参量可以說明粒子的运动特性。

### 1-3. 粒子的动力学特性

#### 1. 带电粒子的能量

假使在一理想的真空中,建立一电场,并把带  $Ze$  电荷的带电粒子放到这电场中,其中  $Z$  是整数,而  $e$  是电子电荷;  $e=4.8 \times 10^{-10}$  CGS, 在电场作用下,粒子从电位  $U_1$  点移动到电位  $U_2$  点,得到的能量增量为:

$$W = Ze(U_2 - U_1) = ZeU,$$

其中  $U = U_2 - U_1$ ,

假使电荷  $e$  和电位差用靜电单位表示,則我們所得能量增量单位为尔格。

因为电子电荷的值为  $4.8 \times 10^{-10}$  CGS 和  $\frac{1}{300}$  都是常数,假使换算成另外一种能量单位它是可以消去的。这种能量单位叫做“电子伏特”(Электронно-вольт)。这样,我們就可得到一个很方便的公式:

$$W = ZU,$$

其中  $W$  用电子伏表示,  $U$  用伏表示。1 个电子伏(1ev), 就是电子或者具有与电子同样电荷的任何物质的粒子通过一个伏电位差时所获得的能量。)

除了公式簡易外, 它还比較明显, 因为从公式可以立即看出, 需要多高电压才能赋予該类粒子以需要能量。

例: 质子( $p$ )要获得 100 电子伏(ev)的能量, 須經過 100 伏的电位差而具有  $2e$  电荷的  $\alpha$  粒子( $\text{He}_2^+$ )获得同样的能量, 只要經過 50 伏电位差就行了, 依此类推。

对大能量來說, 把电子伏单位化为大一些:

$$1 \text{ 千电子伏} = 10^3 \text{ ev} = 1 \text{ Kev},$$

$$1 \text{ 百万电子伏} = 10^6 \text{ ev} = 1 \text{ Mev}.$$

在加速器中近来采用了更大的单位。

1 十亿电子伏  $= 10^9 \text{ ev} = 1 \text{ Gev}$ , 即十亿电子伏。  $10^9$  又叫“Биллион”。無論在我們这里<sup>①</sup>, 或是在美国常用  $\text{Bev}$ :

$$10^9 \text{ ev} = 1 \text{ Bev}.$$

## 2. 粒子的磁剛度

在近代加速装置中, 广泛采用磁場作用于粒子, 因此粒子最方便的动特性是用磁場强度  $H$  和粒子作用軌道的曲率半径  $\rho$  的乘积来表示; 叫做粒子的磁剛度。用奥斯特厘米做单位。

为什么引用这样一个参量呢?

① 指苏联(譯者)。

大家知道,假使直线运动的粒子进入磁场,在磁场作用下,粒子的轨道就要发生弯曲。磁场作用于粒子的力(罗伦茨力 Лоренцова сила)的方向又垂直于磁场强度  $H$  向量,也垂直于粒子速度  $v$  向量(图 1)。因之,粒子的轨道将是垂直于磁场强度  $H$  的平面曲线。

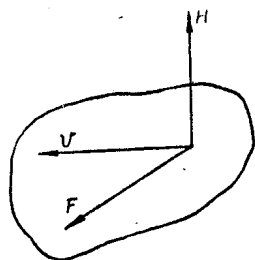


图 1

已知某  $A$  点的曲率半径,也已知这一点的磁场强度  $H$ ,就可以求出粒子通过  $A$  点时的动能  $W$ 。这时在能量公式中,磁场强度和曲率半径是以乘积来表示的,即

$$W = f(H\rho).$$

这一函数可以从以下条件求得。粒子在磁场中的每一点的轨道半径可用离心力和罗伦茨力的相等来求,这样可以写成:

$$\frac{mv^2}{\rho} = \frac{Ze}{c} U \cdot H$$

其中  $v$ ——粒子速度,

$c$ ——光速,

$m$ ——粒子质量。

其余符号我们已经知道。

可以求出粒子的动量:

$$P = mv$$

$$mv = P = \frac{Ze}{c} H\rho.$$

( $m, v, c$  和  $\rho$  用静电单位制,  $e$ ——用静电单位,  $H$ ——用奥)。

在相对力学中动能通过动量来表示有以下关系。

$$W = 1 \sqrt{c^2 P^2 + \varepsilon_0^2} - \varepsilon_0,$$

其中  $\varepsilon_0 = m_0 c^2$ ——静止能量;

$\varepsilon_0$  电子 0.51 百万电子伏;

$\varepsilon_0$  质子 9318 百万电子伏;

$\varepsilon_0\alpha$  粒子 3724 百万电子伏。

把动量代入該式得

$$W = \sqrt{9 \times 10^4 (H\rho)^2 Z^2 + \varepsilon_0^2} - \varepsilon_0,$$

其中  $W$  和  $\varepsilon_0$  的单位用百万电子伏,  $H\rho$  用百万奥厘米。

也可以求出用粒子能量  $W$  来表示磁刚度  $H\rho$  的公式。

$$H\rho = \frac{1}{300Z} \sqrt{W^2 + 2W\varepsilon_0},$$

其中  $H\rho$  用百万奥厘米,  $W$  和  $\varepsilon_0$  用百万电子伏。

### 3. 粒子的相对速度

粒子运动中还有一个参量, 采用了  $\beta$ ——粒子相对速度作为速度的衡量:

$$\beta = \frac{v}{c}.$$

运用大家都知道的相对論公式, 可以找到粒子能量  $W$  和它的相对速度  $\beta$  之間的关系:

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1-\beta^2}} \quad \text{或} \quad \varepsilon = \frac{\varepsilon_0}{\sqrt{1-\beta^2}}.$$

其中  $\varepsilon = mc^2 = W + \varepsilon_0$  是粒子全能量, 这样  $W$  和  $\beta$  間的函数关系求为:

$$W = \varepsilon_0 \left( \frac{1}{\sqrt{1-\beta^2}} - 1 \right),$$

$$\beta = \sqrt{1 - \left( \frac{\varepsilon_0}{W + \varepsilon_0} \right)^2}.$$

也可以找到所有三个参量的关系式:

$$H\rho = \frac{(W + \varepsilon_0) \cdot \beta}{300Z}.$$

这公式說明，当粒子速度很大  $\beta \approx 1$  时，則  $H\rho$  与  $W$  成綫性关系。对輕粒子來說如电子，即  $W$  比較小时也有  $\beta \approx 1$ 。电子的静止能量我們已知道为： $\varepsilon_0 = 0.51$  百万电子伏，这样，当能量  $W > 1$  百万电子伏时，就已可以利用下面公式了：

$$W = 3 \times 10^{-4} H\rho - 0.511.$$

对重粒子來說，根据电子和质子质量差别，可以知道  $H\rho$  和  $\varepsilon$  之間綫性关系是在比电子大得多的能量下才开始的。

## § 1-4. 加速粒子技术发展簡述

我們已經讲过，粒子能量

$$W = Zv,$$

$$U = U_2 - U_1.$$

即，要增加粒子的能量可以用电场来作用于它。

用天然核反应过程所获得的快速  $\alpha$  粒子的动能平均只在 8 到 9 百万电子伏（最大到 10.5 百万电子伏）。显然，要获得近于天然能量的人工  $\alpha$  粒子就必须有 3 百万伏到 4 百万伏的电压。必須指出，使电场对带电粒子起作用应在真空中进行，这是为了使带电粒子可以自由地加速而不致于与空气粒子相碰。

最早出現的是直綫加速法。这种加速器形式如下：从某一发生器得来的高电压加到真空管柱的两电极之間。管子一端是被加速的粒子源。一般是各种气体放电的离子源，能放出氦离子（ $\alpha$  粒子）和氢离子（质子）。管子另一端是第二个电极，这一电极内部（空心圓柱）装有靶，或在阴极后面装小窗而大量放出离子流。天然放射性物质也能得到 8 百万电子伏能量的离子，而我們的裝置也只是得到这样能量的离子流，那么它究竟有什么优点呢？这里要注意到我們获得的是高强度的离子流。

例如：一克純鐳的全部  $\alpha$  蛻變為  $3.7 \times 10^{10}$   $\alpha$  粒子/秒。而帶兩個電荷的離子流若能得到一微安電流（這在直綫加速法下很容易做到）就是一般在很小面積飛奔的  $3.125 \times 10^{12}$  離子/秒的離子流。這樣，假使鐳放射時包括整個立體角  $4\pi$ ，並且一點沒有吸收  $\alpha$  粒子，即使這樣，兩電荷氦離子流，在 1 微安電流下，也可代替 84.5 克的鐳，這麼多鐳是科學家在實驗室里怎麼也不能取得的。此外，在加速裝置中，可以根據需要改變被加速粒子的性質和它們的能量。因此發展初期，約在三十年代前所進行的工作，主要是建立高電壓能源和建立能耐很高電壓的管子。依靠這種管子和脈沖發生器在 1930 年獲得最大能量為 2.4 百萬電子伏的 X 射綫。稍晚一些獲得了能量為 900 千電子伏的質子。

但是這還不能滿足研究工作的要求，還需要在已得到的強粒子流下獲得更大的粒子能量。

到那時為止所積累的經驗證明，用任何種高壓加速方法是無論如何也不能取得更大的粒子能量，因為這需要建立非常的電壓，但這存在巨大的技術上的困難。

愈來愈清楚需要有另外種不用這麼高壓來加速粒子的方法。

為了用直綫加速法來加速粒子，曾設計出了許多不同的發生器和高壓管。包括有：高壓發生器，其中有脈沖電壓發生器、交流和直流電壓發生器、高壓變壓器及 Ван-де-Граффа 的靜電發生器。這些直綫加速的裝置能夠取得的帶電粒子能量不超過 10 百萬電子伏。

顯然，可以用來取得帶電粒子更大能量的新方法應採用非直綫加速法。勞倫斯(Лоуренс)在 1930 年建立的回旋加速器，是用這種新加速法加速的。在回旋加速器中，帶電粒子多次地經過加速電場，其軌道具有螺旋形。每次當粒子接近加速空隙時，加到加速空隙上的高頻電場的方向就發生變化，從而與粒子運動取得諧

振。为了使粒子按一接近于圓的曲綫运动，使用了磁場。作了許多实验后，明确了由于粒子质量和能量增长的相对力学效应，使得粒子运动和加速电場間的諧振失步，理論上回旋加速器极限能量可到几亿电子伏。而目前在回旋加速器上取得的质子最大能量为 22 百万电子伏。用来加速輕粒子也有一种非直綫加速法，它利用漩渦电場，叫做电子感应加速器。

在电子感应加速器中，磁場一方面用来使带电粒子保持在一定軌道內(电子感应加速器的軌道是圓)，同时也用来建立使带电粒子加速的漩渦电場。

第二种加速輕粒子的装置是諧振加速器——同步加速器。在同步加速器中，粒子沿圓旋轉，經過加速空隙多次获得加速。为了使粒子維持在軌道內(圓形軌道)采用了磁場，磁場随時間变化，因为在这种情况下(指輕粒子)粒子质量很快就开始增长(从很小能量就开始)。能够建立同步加速器只有在 1949 年，当优秀的苏联物理学家，列宁奖金获得者 B. И. 維克斯勒尔发现了自动稳相原理之后，借助于这一原理建立了加速重离子的带电粒子新型加速器，稳相加速器和同步稳相加速器。稳相加速器有时还叫作同步回旋加速器或叫帶頻率調制的回旋加速器。

我們前面已經提到，回旋加速器的极限能量受到限制是由于在很大的能量下(几亿电子伏)质量也相对增长，因而高频加速电場和粒子运动之間失去同步。

为了避免失去同步，在稳相加速器中，精确地結合粒子运动和质量的对高频电場进行調制，也就是說稳相加速器与回旋加速器不同的地方在于  $U_1 \neq \text{常数}$ 。这样一来，假使对回旋加速器來說  $H = \text{常数}$ ，电場頻率  $f = \text{常数}$ ，則对稳相加速器來說  $H = \text{常数}$ ， $f = \text{变数}$ ，稳相加速器中粒子运行的軌道同样也是展开的螺旋形。

在苏联，在联合核子研究所內有一个世界上最大的稳相加速

器,它的能量为 680 百万电子伏。

但是即使是这样大的能量对现代物理来说还是不够,因此为了取得更大的能量有另一种加速器,在这种加速器中为了保持粒子在同一固定轨道内运行,磁场也随时间变化即  $H = \text{var}$ 。

这种加速器叫做同步稳相加速器(苏联称之为“Синхрофазотрон”),或叫做(美国称之为“Космотрон”)。

西方现在在运行的这种加速器中最大的二个是在美国。

1. 加利福尼亚的 Веэатрон, 能量为 62 亿电子伏;
2. 蒲鲁克赫温的 Космотрон, 能量为 30 亿电子伏。

苏联联合核子研究所内建立了世界上最大的一个带电粒子加速器,并且已在运转,它的能量有 100 亿电子伏特(10 亿电子伏)。

目前无论是在苏联,还是其他国家内,一种带有强聚焦的回旋式加速器的设计和建造工作正在加强进行。这种加速器在国外设计的能量为 250 亿到 300 亿电子伏。苏联正在设计二个强聚焦加速器,分别为 70 亿和 500 亿电子伏。

除了粒子运行轨道为接近于圆的曲线的带电粒子回旋式加速外,还有一种线性谐振加速器,它可以用来加速轻的电子,也可以加速重的质子。这种加速器的工作原理:也同样基于粒子与高频电场之间的谐振,但是粒子运行轨道是直线。这种加速器的特点是非常长。

简单地了解了带电粒子加速器名称以后,所有这些加速器都可以列表分类。

## § 1-5. 加速器的分类

加速器的分类可以按两种依据进行:

1. 按轨道形状;

## 2. 按加速原理。

按被加速粒子运行轨道的形状, 加速器分为两大类:

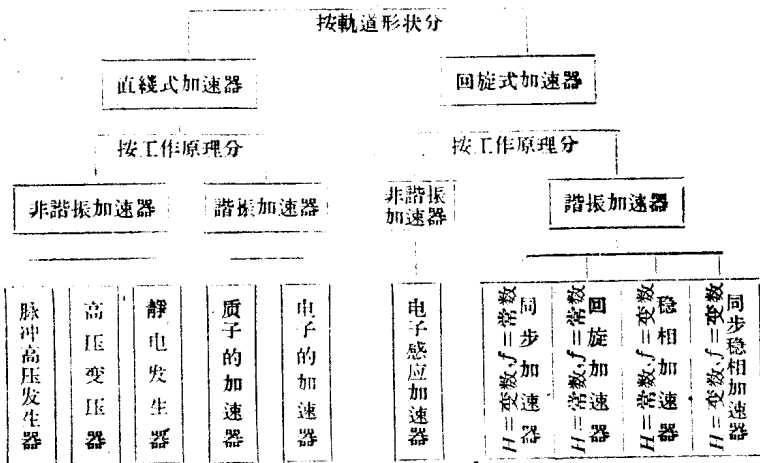
- (1) 直线式加速器;
- (2) 回旋式加速器。

按加速原理可分, 所有加速器也可分两类:

- (1) 谐振加速器;
- (2) 非谐振加速器。

为了更明显起见, 把它们列表如下 (表 1):

**表 1 带电粒子加速器**



我們已經可以看出, 在最新設計的加速器, 同步稳相加速器中, 带电粒子的能量已达到了 100 亿电子伏。加速器能量愈来愈大的发展到什么时候才能停止呢? 在大自然中存在許多尚未解决的问题, 而解答这些问题只有依靠巨大能量的粒子, 只要科学要想解决这些问题, 則就存在不断把带电粒子加速器往更大能量上发展的必要性。

加速器是这样发展过来的: 一旦一种加速器已达到极限, 馬上,

就出現另一種有更大能量的加速器來代替它。

加速器發展的順序大致是這樣的：帶有高壓發生器的高壓加速裝置，靜電發生器(Ван-де-граф)，回旋加速器，電子感應加速器，穩相加速器和同步加速器，同步穩相加速器，最後，現在的強聚焦的同步穩相加速器。

在各種加速器上所獲得的能量是與時間(按年代)成指數關係增長的。

### § 1-6. 控制、保護系統在加速器中的作用

假使說第一批的加速裝置雖然也應用自動裝置的話，它們的自動裝置很少，那麼每一個近代的帶電粒子加速器就是一個獨特的電氣裝置，它帶有複雜的無線電、真空、自動化、遠距離操縱的設備。

一般說來，近代大功率回旋式加速器(穩相加速器，同步穩相加速器)，內部包括有特殊的非標準設備，製造這些設備，就要事先進行一大套試驗、結構設計及研究工作。設計和製造自動控制裝置，這種自動裝置可以在加速器運轉過程中對其主要部件進行距離調節，同樣也能保證整個加速器各部件無事故運行。保證可靠地保護所有電氣元件，這是具有極大意義的。

例如：在近代同步穩相加速器中約有 30000 個電子管，幾百台電機，包括微型電機和大功率電機，以及幾百種測量儀表等等。

這些裝置中的自動裝置和運動裝置的主要任務，就是保證這些綫路、保護系統正常工作，運用特殊信號系統(事故信號和報警信號)來使維護人員能及時採取必要措施。這也就是本課的主要內容。