

# 团 体 标 准

T/CIRA XXXX—2021

## 高压谐振变压器型电子加速器

High voltage resonant transformer electron accelerator

(征求意见稿)

2021/9/29

XXXX - XX - XX 发布

XXXX - XX - XX 实施

中国同位素与辐射行业协会

发布

# 目 次

前 言 .....	II
1 范围 .....	1
2 规范性引用文件 .....	1
3 术语和定义 .....	1
4 高压谐振变压器型电子加速器组成及型号命名 .....	2
5 技术要求 .....	3
6 检验方法 .....	5
7 检验规则 .....	6
8 包装、运输、贮存 .....	6
参 考 文 献 .....	7
附 录 A（资料性附录） 测量方法与公式 .....	8
附 录 B（资料性附录） 束流扫描不均匀度剂量带测量方法 .....	15
附 录 C（资料性附录） 四面辐照系统方位角测量 .....	16

## 前 言

本文件按照GB/T 1.1-2020给出的规则起草。

本文件由中国同位素与辐射行业协会提出。

本文件由中国同位素与辐射行业协会标准化工作委员会和核工业标准化研究所归口。

本文件起草单位：山西壹泰科电工设备有限公司、核工业标准化研究所、北京市射线应用研究中心、深圳市沃尔核材股份有限公司。

本文件主要起草人：

# 高压谐振变压器型电子加速器

## 1 范围

本文件规定了高压谐振变压器型电子加速器的组成及型号命名、技术要求、检验方法、检验规则、包装、运输和贮存。

本文件适用于辐射加工用电子束能量为0.3MeV~3MeV的高压谐振变压器型电子加速器设计、制造。

## 2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中，注日期的引用文件，仅该日期对应的版本适用于本文件；不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

GB 3095 环境空气质量标准

GB/T 15446 辐射加工剂量学术语

GB/T 16841 能量为300 keV~25 MeV电子束辐射加工装置剂量学导则

GB/T 25306-2010 辐射加工用电子加速器工程通用规范

GBZ 2.1-2007 工作场所有害因素职业接触限值 第1部分：化学有害因素

GBZ 2.2-2007 工作场所有害因素职业接触限值 第2部分：物理因素

HJ 979-2018 电子加速器辐照装置辐射安全和防护

## 3 术语和定义

GB/T 25306-2010确立的以及下列术语和定义适用于本文件。

### 3.1

**高压谐振变压器型电子加速器** high voltage resonant transformer electron accelerator

经由谐振调试的空芯高压变压器整流电路级联产生直流高压的电子加速器。

### 3.2

**辐射加工** irradiation processing

电离辐射作用于物质，使其品质或性能得以改善的一种技术。

[引用 GB/T 15446]

### 3.3

**电子束能量** electron beam energy

**电子能量**

电子束流在参考面处的能量，单位为兆电子伏(MeV)。

### 3.4

**电子束流强度** electron beam intensity

**束流强度**

通过参考面的束流的时间平均值，单位为毫安（mA）。

3.5

**束流功率** electron beam power

单位时间束流所做的功。其数值为电子能量乘以束流强度除以电子电荷，单位为千瓦（kW）。

3.6

**电子能量不稳定性** electron beam energy instability

给定时间内，由于加速器参数的未受控自然变化导致电子能量的变化率，以百分比表示。

3.7

**束流强度不稳定性** electron beam intensity instability

给定时间内，由于加速器参数的未受控自然变化导致束流强度的变化率，以百分比表示。

3.8

**束流扫描不均匀度** electron beam scanning uniformity

在参考面上，束流扫描宽度内，束流线性密度分布的不均匀程度，以百分比表示。

3.9

**束流射程** electron beam range

在指定的全吸收材料中沿着电子束轴线所贯穿的距离。

[引用 GB/T 16841]

3.10

**变频电源** power supply cabinet

给电子加速器提供中频电源的装置。

3.11

**高压整流柱** high voltage rectifier column

由多级整流单元叠加组成产生直流高压的部件。

注：每个整流单元由次级线圈、整流二极管、电容和电阻组成。

## 4 高压谐振变压器型电子加速器组成及型号命名

### 4.1 组成

#### 4.1.1 电子加速器主要由以下部分组成：

- a) 高压发生系统：由变频电源、初级绕组及磁导、高压整流柱等组成；
- b) 束流输运系统：由束流发射组件、加速管、加速管屏蔽环、电子透镜等组成；
- c) 真空系统：由真空腔体、真空泵系统、管道、阀门及测量组件组成；

- d) 束栅形成系统：由束流引出窗、扫描系统组成；
- e) 气体系统：由钢筒和气体回收装置、管道、阀门、测量组成；
- f) 冷却系统：由风冷系统和水冷系统组成；
- g) 磁铁偏转系统：改变电子束运动轨迹以满足特定生产工艺的系统。

4.1.2 控制系统的设计要遵循确保人身、设备、辐射安全的原则；智能化控制，功能齐全，保证运行正常、稳定、可靠。应满足测量、控制、联锁和保护的要求。控制系统必须具备如下控制功能：

- a) 正常开机和停机的逻辑控制；
- b) 设备故障显示、报警及自动停机；
- c) 保证与辐射安全系统联锁的可靠性，包括加速器室门联锁、辐照室门联锁、剂量联锁、停扫联锁、高压放电联锁、排风系统控制联锁，水系统联锁等；
- d) 紧急停机；
- e) 采用智能化控制；
- f) 控制台上应能显示加速器的主要参数，运行参数的设置、自动跟踪、显示和记录
- g) 具备束下系统的相关接口；
- h) 辐照室内供电、控制、测量电缆（线），应采用耐辐照的电缆（线），或加金属保护管或保护罩。

## 4.2 产品型号规格和命名规则

按图1所示内容与顺序命名。

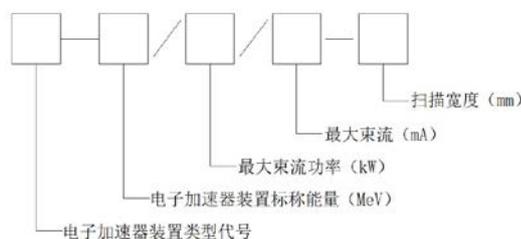


图1 电子加速器装置型号命名示意图

类型代号以字母表示：DG—高压谐振变压器型电子加速器。示例：高压谐振变压器型电子加速器，最高电子能量2.5MeV，最大束流强度60mA，输出功率100kW，扫描宽度为1600mm，型号命名表示为DG-2.5/100/60-1600。

## 5 技术要求

### 5.1 整机性能要求

#### 5.1.1 电子能量

电子能量要求如下：

- a) 电子能量应连续可调；根据机型不同，在标称能量范围内连续可调；
- b) 电子能量测量值与随机文件标称电子能量值的偏差 $\leq 3\%$ ；
- c) 标称电子能量是指加速器能稳定可靠运行的最高能量；

- d) 电子能量不稳定性 $\leq 2\%$ 。

### 5.1.2 束流强度

束流强度要求如下：

- a) 束流强度应连续可调；根据机型不同，在标称束流强度范围内连续可调；
- b) 束流强度测量值与随机文件标称束流强度值的偏差 $\leq 3\%$ ；
- c) 标称束流强度是指加速器在额定功率下稳定运行的最大束流强度；
- d) 束流强度不稳定性 $\leq 2\%$ 。

### 5.1.3 束流功率

束流功率要求如下：

- a) 束流功率测量值与随机文件标称束流功率值的偏差 $\leq 6\%$ ；
- b) 束流功率不稳定性 $\leq 4\%$ 。

### 5.1.4 束流扫描不均匀度

束流扫描不均匀度 $\leq 7\%$ 。

### 5.1.5 运行可靠性

运行可靠性要求如下：

- a) 在标称能量及束流负荷条件下，应 24 h 持续运行；
- b) 停机后处于高真空保持状态，非故障停机时间 $< 1$  h 时，重新开机进入工作状态时间 $\leq 5$ min；
- c) 停机后处于高真空保持状态，非故障停机时间 $\leq 48$  h 时，重新开机进入工作状态的时间 $\leq 10$  min。

### 5.1.6 耗电要求

电子加速器以100kW束流功率计，总用电量 $< 150$ kW·h。

## 5.2 供电及辅助系统

**5.2.1 供电系统：**要求分系统分开供电控制，具备电能计量功能。三相四线制，交流 380V，频率为  $50 \pm 1$ Hz。电压波动不超过 $\pm 5\%$ （当地电网达不到此条件时，用户应加电压自动调整装置）。接地要求：系统供电电缆在用户配电房需要接地，电子加速器进线侧需接地，接地电阻 $\leq 4$  欧姆，不得与防雷接地共接。且在电子加速器屏蔽体底部制作独立接地体，与加速器接地点连接在一起。供电功率按加速器型号及束流功率不同，在产品说明书中分别提出。

**5.2.2 水系统：**满足加速器冷却的需要，供水可采用市政供水。建议采用软化水。水冷分为两路，变频电源和引出窗，进水水温  $25^\circ\text{C} \leq t \leq 35^\circ\text{C}$ ；初级绕组和电抗器水温  $18^\circ\text{C} \leq t \leq 25^\circ\text{C}$ ；

**5.2.3 安全系统：**应符合 HJ979-2018 和 GBZ 2.2 的要求。

**5.2.4 排风系统：**应符合 GB 3095 和 GBZ 2.1 的要求。

**5.2.5 吊装设备：**满足安装、维修维护的需要。

**5.2.6 束下新风：**配有束下系统的设备，在束下机箱内宜接入正压新风。

5.2.7 SF6 气体：气体纯度 99.9%，含水量小于 150ppm。

### 5.3 外观要求

装置总体布局紧凑、合理，接线整齐，外观平整光洁，无伤痕缺陷。

## 6 检验方法

### 6.1 整机性能测试

6.1.1 根据额定电子能量范围，取最低、中间、最高三种能量的加速器工作参数测试整机性能技术指标。

6.1.2 电子能量测量方法如下：

- a) 楔形法，见附录 A，按附录 A 中式 (A.1) 和 (A.2) 计算出对应的标定能量  $E_p$ ，按附录 A 中式 (A.3) 计算电子能量值的偏差，附录 A 中式 (A.3) 中  $EPR$  等同于该标定能量  $E_p$ ；
- b) 铝片阻挡法，标定能量  $E_p$  按附录 A 中式 (A.3) 计算电子能量值的偏差；
- c) 欧姆定律法，按附录 A 中式 (A.4) 计算标定能量  $E_p$ ，按附录 A 中式 (A.5) 计算电子能量值的偏差；
- d) 电子能量不稳定性。每一特定参数的连续 8 小时长时间满功率或最大参数测试过程中，记录电子能量运行参数。运行第一小时内，每隔 20 分钟记录一次能量值，运行第 2 小时内，每隔 5 分钟记录一次能量值，随后运行的 6 小时每 20 分钟记录一次能量值。能量不稳定度的计算，使用运行记录的参数，每次运行分第 2 小时段和整个运行测试时间段单独计算不稳定性。按附录 A 中式 (A.6) 计算。

### 6.1.3 束流强度

6.1.3.1 检验连续束流强度方法：用精度优于 0.5 级的直流电流表直接测量直流高压回路电流，减去除束流以及其他直流高压的分支电流，即为束流强度。

6.1.3.2 束流强度测量值与随机文件标称束流强度值的偏差按式 (A.7) 计算。

6.1.3.3 束流强度不稳定性：每一特定参数的连续 8 小时长时间满功率或最大参数测试过程中，记录束流强度运行参数。运行第一小时内，每隔 20 分钟记录一次束流强度值，运行第 2 小时内，每隔 5 分钟记录一次束流强度值，随后运行的 6 小时每 20 分钟记录一次束流强度值。束流强度不稳定度的计算，使用运行记录的参数，每次运行分第 2 小时段和整个运行测试时间段单独计算束流强度不稳定性。按附录 A 中式 (A.8) 计算。

### 6.1.4 束流功率

根据  $n$  次测量电子能量的平均值和  $n$  次测量对应能量下平均束流强度的平均值，按式 (A.9) 计算，得  $n$  次测量束流 (平均) 功率的平均值。

束流功率测量值与随机文件标称束流功率值的偏差分别按式 (A.10)、式 (A.11) 计算；束流功率不稳定性按式 (A.12) 计算。

### 6.1.5 束流扫描不均匀度

测量束流扫描不均匀度可任选下列一种方法进行：

- a) 在参考面上用铝棒均匀排列组成的分布靶，测量束流扫描不均匀度按式 (A.13) 计算；

- b) 在参考面上用薄膜剂量片测量束流扫描不均匀度按式(A. 14)计算;
- c) 束流扫描不均匀度剂量带测量方法, 见附录 B。

#### 6.1.6 四面辐照系统方位角测量

见附录 C。

### 6.2 可靠性检验

#### 6.2.1 连续运行检验

加速器达到热平衡后, 在额定输出功率情况下, 加速器连续运行24h, 24h内非外界因素引起自然停机的累计停机时间不大于10min。24h运行后停机检查各部件无过热或烧坏现象。

#### 6.2.2 重复开机检验

加速器全部停机, 保持高真空状态, 1h后重新按操作程序开机, 达到额定功率正常工作时间不大于5min。

### 6.3 控制联锁检验

在加速器开机过程中, 选择主要联锁保护系统人为输入故障模拟信号(试验项目由**制造商**与用户共同商定), 观察故障显示、报警和保护动作是否正常。

### 6.4 电能消耗检验

加速器变频电源柜的市电三相供电入口接入电能计量表, 设定加速器在最大束流功率下运行, 以连续5小时为一时间段进行计量。

### 6.5 外观

以目视观察

## 7 检验规则

7.1 辐射加工用电子加速器检验, 一般情况下分出厂检验和现场检验两种, 以用户现场检验为最终检验。

7.2 出厂检验是指用户在制造商进行设备的初步验收, 根据技术合同内容规定的检验项目, 按第6节检验方法逐项进行, 双方形成初步检验验收报告, 确认可以交货。

7.3 现场检验是指制造商在用户现场安装调试后的正式交接验收, 根据技术合同内容规定的检验项目, 检验合格后形成正式验收文件。

## 8 包装、运输、贮存

应符合 GB/T 25306—2010 的要求。

## 参 考 文 献

- [1] GB 5172—1985 粒子加速器辐射防护规定
- [2] GB 18871-2002 电离辐射防护与辐射源安全基本标准
- [3] GB 50752-2012 电子辐射工程技术规范
- [4] GBZ 1—2002 工业企业设计卫生标准
- [5] JJG 772 电子束辐射源（辐射加工用）
- [6] IEC61010 测量、控制和实验室用电气设备的安全要求
- [7] ISO/ASTM 51649:2005(E)

附录 A  
(资料性附录)  
测量方法与公式

## A.1 电子能量

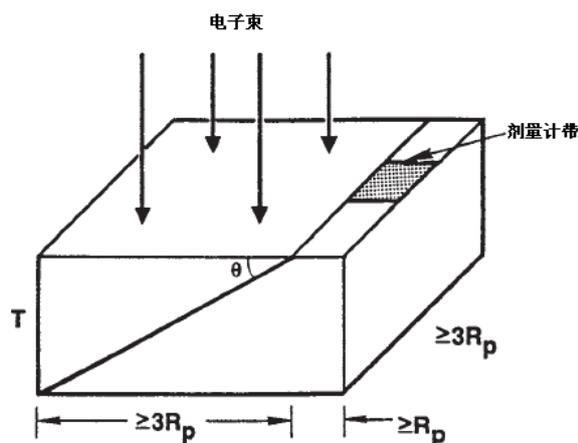
### A.1.1 测量方法分类

电子能量的测量可采用楔形法、铝片阻挡法、欧姆定律等测量方法。

### A.1.2 楔形法测量能量

#### A.1.2.1 楔形模体

A.1.2.1.1 楔子应由导电材料制成，以避免电荷累积对深度剂量分布测量的可能影响。由于铝和石墨容易加工，它们常被用来作楔形模体。两个楔子叠放在一起形成矩形块（见图1）。实践中多使用接近于水密度的聚苯乙烯（PP）材料制作楔子。



注：高度  $T \geq 1.5 R_p$ ，其中  $R$  是电子束在楔形材料（例如铝，PP）中的预期实用范围。 $\theta$  不大于  $30^\circ$ 。沿两块楔子之间的斜面放置一个带状剂量计条（剂量带）

图 A.1 楔形法能量测量模体 ( $T \geq 1.5 R_p$ )

A.1.2.1.2 楔子的尺寸应至少为  $3R_p \times 3R_p$ ，以避免边缘效应对剂量带的影响，其最小厚度至少为电子束预期实用范围  $R_p$  的 1.5 倍。此外，如图 1 所示，楔子的宽度应至少延伸至  $R_p$ ，超过剂量带的突出部分，以便为剂量计提供适当的散射条件。楔子的角度  $\theta$  不应大于  $30^\circ$ 。

A.1.2.1.3 在两个楔子之间沿斜面中线放置经过校准的薄膜剂量带，该剂量带（或片）应覆盖斜面的整个长度，并在电子入射的那一表面上要伸出一小部分。在剂量计（或带）进入楔子斜面的地方作一标

记；该标记也可放在剂量带上已知位置的其他地方，其目的是便于今后进行一致性检查。剂量计进入楔子斜面之前，表面剂量应是不变的。

注：剂量计独立排列可以替代连续的带状剂量计

#### A. 1. 2. 2 楔形法

A. 1. 2. 2. 1 将楔子放置在传输装置上，让剂量带（或剂量片）线性排列平行于产品运动方向（垂直于扫描方向）。

A. 1. 2. 2. 2 确定剂量带全部长度的剂量值，深度等于楔子斜面距边沿（由剂量带上的标记确定）的长度乘以  $\sin \theta$ ， $\theta$  为楔子入射表面与薄膜剂量带表面之间的夹角（见图A. 1）。

A. 1. 2. 2. 3 电子能量的计算：依据深度剂量分布曲线，确定电子束在模体参考材料中的实际射程、外推射程以及半值深度。依据所使用的参考材料，按照A. 1和A. 2给出的指南计算入射电子的能量。

注：通常在实际中采用实际射程确定电子束能量。

#### A. 1. 2. 3 能量在 $0.3\text{MeV} < E_p < 2\text{MeV}$ 范围的 $E_p \sim R_p$ 关系

在水或其他等效材料作测量束流射程的测试模块时， $E_p \sim R_p$  的关系按式(A. 1)计算：

$$E_p = 1.972R_p + 0.245 \dots\dots\dots (A. 1)$$

能量在  $2\text{MeV} < E_p < 3\text{MeV}$  范围的  $E_p \sim R_p$  关系

在水或其他等效材料作测量束流射程的测试模块时， $E_p \sim R_p$  的关系按式(A. 2)计算：

$$E_p = 1.876R_p + 0.298 \dots\dots\dots (A. 2)$$

式中：

$E_p$ ——电子能量，单位为兆电子伏(MeV)；

$R_p$ ——束流实际射程，单位为克每平方厘米( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-2}$ )。

采用铝或水或聚苯乙烯作测量模块材料是成熟的技术方法。按式(A. 1)和(A. 2)计算结果

#### A. 1. 3 铝片阻挡法

加速后电子能量，等于高压整流器的电压值，单位为电子伏。该高压值由旋转伏特计或电阻排测量，并在控制计算机的显示器上显示。旋转伏特计或电阻排具有高线性度，因此，在一个电子能量点由单独标定过的探头来检验电子能量值的偏差就足够了。旋转伏特计或电阻排的线性度已在配备有标定电子能量分压器的加速器上进行过检查。

标定电子能量的探头原理如图A. 2所示。铝板1和2放置于带有绝缘垫圈的腔体3之内，腔体3接地，板的输出端经电阻连接到地端。测量电阻安装在测量盒之内。直流电压表用来测量两块板之间的电压差。

一定厚度的铝板，在某一特定电子能量值（标定值），上下挡板的电流值会相等。该厚度的铝板对应的特定电子能量点需要标定。

探头放置在电子束之下。为了避免探头过热，束流不能超过0.3mA

在低于特定电子能量点状态下，大部分电子能量耗散在上挡板，因此R20电阻的电压值比R21的高，因此，它们之间的电压差会具有一定极性。随着电子能量的增加，耗散在上挡板的电子能量减少，而耗散在下挡板的电子能量增加。因此，增加能量会使上挡板的电流减少，下挡板的电流增加。

在标定点，电压显示为0。进一步增加能量，下挡板的电流会超过上挡板的电流，电压表会改变极性。

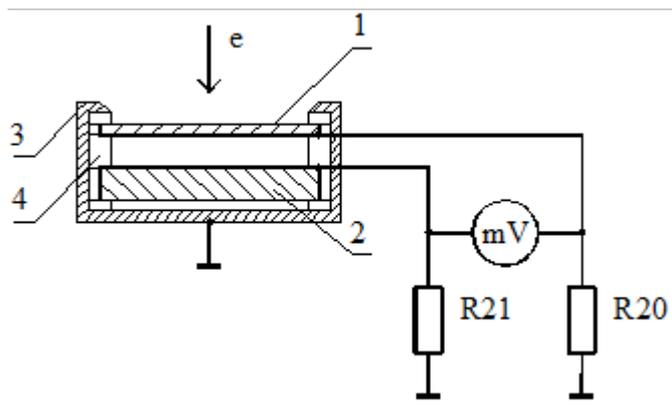


图 A.2 铝片阻挡法

为进行测量：

- a) 将标定的探头放置在引出窗中心之下，并联接测量电路；
- b) 将测量箱的插座地线接地；
- c) 电压表连接到测量箱的插座“T”和“U/T”；
- d) 启动加速器，设置电子能量值；
- e) 设置束流为 0.2...0.3mA 等待束流稳定；
- f) 将读取到的电压值记录到验收报告。
- g) 减少能量和读取每一步的显示值；
- h) 找到电压表显示为 0 的电子能量值。

通过公式(A.3)计算电子能量值的偏差：

$$J_{\Delta U_{pr}=0} = \frac{E - E_{PR}}{E_{PR}} \times 100\% \dots\dots\dots (A.3)$$

式中：

J——在标定点( $\Delta U_{pr} = 0$ )时的电子能量值的偏差；

$E_{PR}$  ——是标定探头的输出电子能量；

E ——是显示器上显示的标定点( $\Delta U_{pr}=0$ ) 能量值；

#### A. 1.4 欧姆定律法

加速后电子能量等于高压整流器的电压值，单位为电子伏（eV）。此高压值可采用能量分压电阻排依据欧姆定律  $U=I \cdot R$  测定。图 A. 3 示意能量分压电阻排与控制单元的电连接原理图。

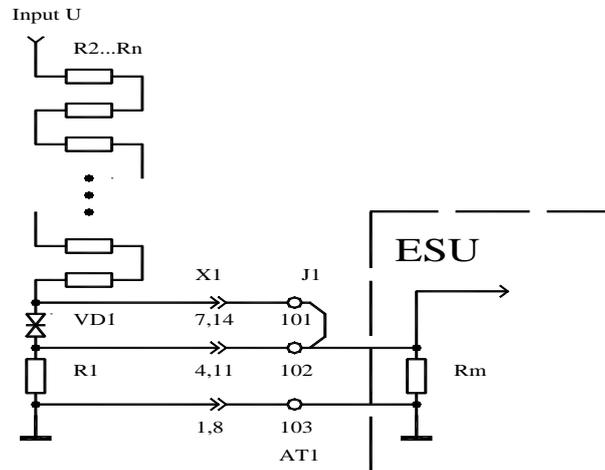


图 A. 3 电子能量分压电阻排与控制单元的电连接原理图

电子能量分压电阻排由多个高压电阻串接，上端连接高压，下端由电阻  $R_1$  和控制单元测量电阻  $R_m$  共同形成测量电路，测量电阻总值为  $R_{ED}$ ， $R_1$  经由双向稳压管  $VD_1$  连接测量高压电阻，由  $VD_1$  接出的两个端子为 101，102，正常运行时，101，102 端子短接，由  $R_1$  和  $R_m$  组成的测量电路参与电子能量测量与稳定的控制。在标定电子能量时，按照以下程序进行：

- 断开 101，102 端子的短接线，接入微安电流表，
- 运行加速器设置电子能量值
- 记录微安表的读数  $I_{ED}$ ，
- 由以下公式计算测量电子能量与电子能量值的偏差的计算公式[见 A. 4 和 A. 5]

$$E = I_{ED} \times R_{ED} / 10^6, \dots\dots\dots (A. 4)$$

$$J = \frac{E - E_{SC}}{E} \times 100\% \dots\dots\dots (A. 5)$$

式中：  $E$  - 电子能量值，单位为兆电子伏特 (MeV)；

$I_{ED}$  - 电子能量分压器的电流，单位为安培 (A)；

$R_{ED}$  - 电子能量分压器的电阻值；

$J$  - 电子能量值的偏差，%。

$E_{SC}$  - 控制器显示电子能量值，单位为兆电子伏特 (MeV)。

#### A. 1.5 电子能量不稳定性计算公式

见公式 (A. 6)。

$$J(E) = \frac{E_{\max} - E_{\min}}{E_{\max} + E_{\min}} \times 100\% \dots\dots\dots (A. 6)$$

A. 2 束流强度

A. 2.1 平均束流强度测量电路图

图A. 4 表明电子加速器高压整流器HVR的负载为电子束，加速管分压电阻R<sub>td</sub>，第一整流次级电压的测量电阻R<sub>fs</sub> 以及电子能量分压器（如使用电子能量分压器测量加速器高压）和杂散电晕电流。整流器的总电流I<sub>h/v</sub>通过测量电阻R<sub>m</sub>。

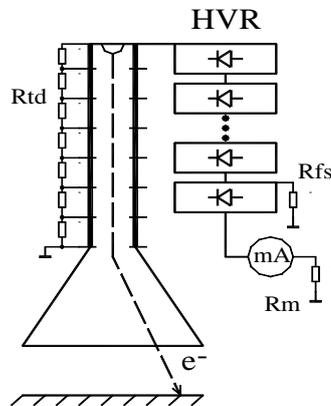


图 A. 4 平均束流强度测量电路示意图

未设置电子束流时，高压整流器的电流值等于该设置能量下的空载电流I<sub>h/v</sub> (0)。在显示器上显示器上显示。设置电子束流时，控制计算机从整流器电流中减去空载电流I<sub>h/v</sub> (0)，电子束流 = I<sub>h/v</sub> - I<sub>h/v</sub> (0)。并在显示器上显示电子束流。测量次数 n ≥ 5, 每次测量时间间隔2 min。

A. 2.2 束流强度测量值与随机文件标称束流强度值的偏差计算

束流强度测量值与随机文件标称束流强度值计算见公式 (A. 7)和公式 (A. 8)。

$$\frac{\Delta I_e}{\Delta I_{es}} = \frac{I_{eav} - I_{es}}{I_{es}} \times 100\% \dots\dots\dots (A. 7)$$

$$I_{eav} = \left( \sum_{i=1}^n I_{ei} \right) / n \dots\dots\dots (A. 8)$$

式中：

ΔI<sub>e</sub>—束流强度变量；

$I_{es}$ —随机文件标称平均束流强度值，单位为毫安(mA)；

$I_{eav}$ ——n次测量束流强度的平均值，单位为毫安(mA)；

$I_{ei}$ 为第*i*次平均束流强度的测量值，单位为毫安(mA)。

注：按公式计算的偏差值有可能为负值，为简便起见，采用其绝对值。

### A.2.3 束流强度不稳定性计算

束流强度不稳定性计算见式(A.9)。

$$J(I) = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}} \times 100\% \dots\dots\dots (A.9)$$

## A.3 束流功率

### A.3.1 束流功率平均值计算

束流功率平均值计算见式(A.10)。

$$P_{eav} = \frac{1}{e} E_{pav} I_{eav} \dots\dots\dots (A.10)$$

式中：

$P_{eav}$ ——束流功率平均值，单位为千瓦(kW)；

随机文件标称束流(平均)功率按式(A.11)计算：

$$P_{es} = \frac{1}{e} E_{ps} I_{es} \dots\dots\dots (A.11)$$

式中：

$P_{es}$ ——随机文件标称束流(平均)功率值，单位为千瓦(kW)；

### A.3.2 束流功率测量值与随机文件标称束流功率值的偏差计算

束流功率测量值与随机文件标称束流功率值的偏差见式(A.12)。

$$\frac{\Delta P_e}{\Delta P_{es}} = \frac{\Delta P_e - P_{es}}{\Delta P_{es}} \times 100\% \dots\dots\dots (A.12)$$

式中：

$\Delta P_e$ —束流功率变量；

$P_e$ —束流功率值，单位为千瓦(kW)。

注：按公式计算的偏差值有可能为负值，为简便起见，采用其绝对值。

### A.3.3 束流功率不稳定性计算

束流功率不稳定性计算见式(A.13)。

$$\frac{\Delta P_e}{\Delta P_{eav}} = \frac{1}{P_{eav}} \frac{\sum_{i=1}^n (E_{pav} - E_{pi})^2 \times \sum_{i=1}^n (I_{eav} - I_{ei})^2}{n - 1} \times 100\% \dots\dots (A.13)$$

### A.4 束流扫描不均匀度测量方法

A.4.1 电子加速器装置达到热平衡后，在参考面上由间隔50mm的n根材质相同、 $\phi 10$  mm的铝棒或铝管均匀排列组成的分布靶，测量扫描宽度内的束流分布。铝棒最上面母线应在参考面上并平行于Y方向，铝棒的长度和位置应全覆盖穿越引出窗到达参考面的所有束流的Y方向投影长度。各铝棒直径的最大偏差应 $\leq 0.1$  mm。使电子加速器装置在各额定脉冲重复率(连续束流无此条件)和扫描频率条件下输出束流扫描，测量同一时刻各铝棒截获束流所输出的电流强度 $I_0$ ，获得 $I_0$ 的最大值 $I_{0max}$ 和最小值 $I_{0min}$ 按式(A.13)计算束流扫描不均匀度 $U_x$ 。

$$U_x = \frac{I_{0\max} - I_{0\min}}{I_{0\max} + I_{0\min}} \times 100\% \dots\dots\dots (A.13)$$

A.4.2 在参考面上放置一块能由束下装置带动的非金属板，将薄膜剂量片均匀分布在板上的扫描宽度范围内。引出束流后，束下装置带动贴有剂量片的板移动并通过辐射场。使其接受束流照射。测量剂量片上剂量 $D$ ，取其最大值 $D_{max}$ 和最小值 $D_{min}$ 按式(A.14)计算：

$$U_x = \frac{D_{\max} - D_{\min}}{D_{\max} + D_{\min}} \times 100\% \dots\dots\dots (A.14)$$

附 录 B  
(资料性附录)  
束流扫描不均匀度剂量带测量方法

使用 CTA 薄膜剂量带 (Dos'ASAP spectrophotometer) 测量束流扫描不均匀度。将 CTA 薄膜剂量带放置在距引出窗法兰 H=150mm 的位置，束流参考面 X 扫描方向束流中心线。CTA 薄膜剂量带安装示意图见图 5。



图 5 CTA 薄膜剂量带在引出窗下安装示意图

设定平均剂量为 80-100 kGy，沿参考面 X 方向测量，测量结果由连续剂量测量仪器读取。束流扫描不均匀度由 B.1 公式计算，通过测量软件自动完成。

$$J = \frac{D_{\max} - D_{\min}}{D_{\max} + D_{\min}} \times 100\% \dots\dots\dots (B.1)$$

式中：

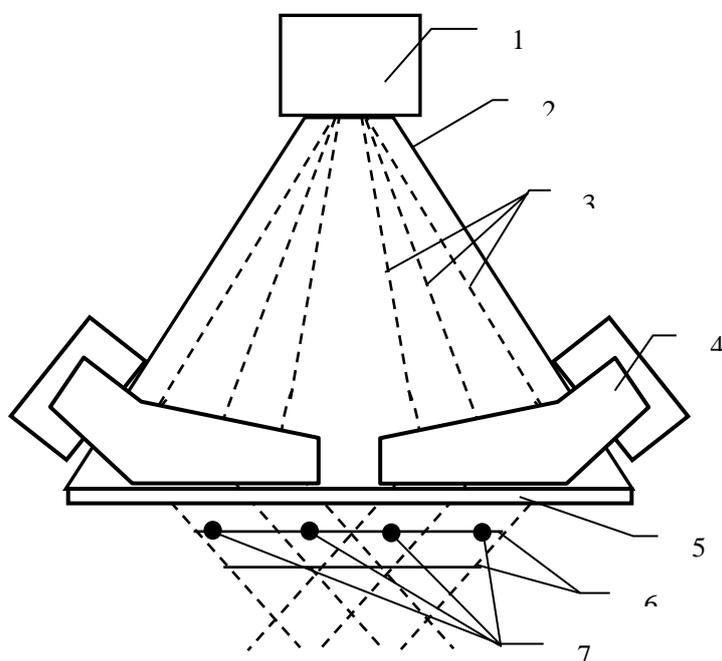
$D_{\max}$ ——是沿参考面 X 方向 CTA 薄膜剂量带的最大吸收剂量；

$D_{\min}$ ——是沿参考面 X 方向 CTA 薄膜剂量带的最小吸收剂量。

附 录 C  
(资料性附录)  
四面辐照系统方位角测量

### C.1 四面辐照系统组成

针对加速器引出窗下移动的圆柱形物体的四面辐照系统,电子轨迹在偏转磁铁的横向磁场的影响下发生变化(如图C.1所示)。通过选择磁铁的极性和磁场的强度,可以使电子对称地偏离引出窗轴线45°角。辐照区域由探头位置平面和加速器输出窗口法兰之间的距离确定。



标引序号说明:

- 1 - 扫描系统;
- 2 - 束流引出室;
- 3 - 电子轨迹;
- 4 - 旋转磁铁;
- 5 - 钛箔法兰;
- 6 - 辐照区域位置;
- 7 - 角度测量位置。

图 C.1 四面辐照系统测试

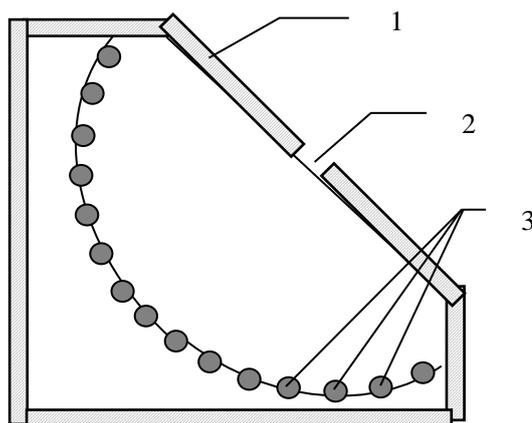
### C.2 电子束引出方位角的平均值

引出角度的测量是在每个旋转磁铁(图C.2所示)下的两点进行的。

探测器测量缝距引出窗110mm, 放置位置距引出窗中心线±175mm 和±300mm,

由偏转磁铁的磁场导致电子偏离角度的测量是在角度分布（如图7）的帮助下进行的。角度分布的计量是通过圆柱形探头进行的，相邻探头之间的角度为 $7.5^\circ$ 。中心探头安装在距离输入槽 $45^\circ$ 的位置。每个探头通过 $20\text{ k}\Omega$ 的电阻接地。因此，探头的电流可通过电阻的电压测量。电子的平均输出角度由探头电流的最大强度所决定。

### C.3 束流方位输出角度平均值的测量



标引序号说明：

- 1 - 屏蔽面板；
- 2 - 测量缝；
- 3 - 圆柱形铝探头，槽宽 10mm。

注：相邻探头的角度 -  $7.5^\circ$ 。

图 C.2 角度测量 Angle gauge

在图 C.2 位置 1 安装探测器（从引出装置法兰到测量槽的距离为 110mm），从而能够测量探头电压，其他位置的探测器也是如此。

为确定电子束的平均偏置角  $\alpha_{average}$ ，使用公式：

$$\alpha_{average} = \frac{1}{4} \sum_{i=1} \alpha_i \dots\dots\dots (C.1)$$

$$\Delta\alpha_{average} = \frac{\alpha_{i\max} - \alpha_{i\min}}{\alpha_{average}} \times 100\% \dots\dots\dots (C.2)$$

式中：

$\alpha_i$  ——每个计量器所位置的探头电流平均电子束偏置角；

$\alpha_{i\max}$  ——测量的平均偏置角的最大值；

$\alpha_{i\min}$  ——测量的平均偏置角的最小值。

---