

# 100 MeV 电子直线加速器激励系统

孙玉振 栗国萍 王修龙 杨天禄

(中国原子能科学研究院, 北京)

文章描述了100 MeV 电子直线加速器激励系统的原理、结构、调试结果和主要技术性能。该系统的中功率速调管放大器能够输出15 kW 的脉冲功率, 经微波输出部分分别激励6 只高功率速调管。结果表明, 系统结构简单, 性能良好, 完全满足加速器的使用要求。

关键词 激励 刚管调制器, 锁相。

## 一、引言

100 MeV 电子直线加速器要求激励系统提供6 路千瓦量级的脉冲功率, 且6 路脉冲同步触发, 功率、相位可调。就目前国内微波元器件的生产情况, 对行波管、大功率速调管和中功率速调管三种放大器比较, 则中功率速调管放大器具有造价低、省电、结构简单实用的优点, 采用这种方案可使激励系统满足以下技术指标:

工作频率	2856 MHz
频率稳定度	优于 $1 \times 10^{-6}/d$
脉冲宽度	0.8 $\mu s$ , 1.6 $\mu s$ , 300 次/s, 1000 次/s
脉冲功率	6 路输出, 每路大于1 kW, 相位在 $360^\circ$ 内可调。

## 二、微波激励系统的组成

激励系统方框图示于图1。它是由输入设备、中功率速调管放大器和输出功率分配系统组成。

### 1. 输入设备

采用 WSY-A 11 锁相晶振源作信号源, 输出功率可达1 W, 通过同轴可变衰减器和定向耦合器对激励功率的大小进行调整和监测, 使速调管工作在最佳状态。经过102 h 稳定性考验, 频率稳定度优于 $1 \times 10^{-6}/d$ 。

### 2. 中功率速调管放大器

该放大器由中功率速调管, 电磁聚焦系统和刚管调制器组成。

中功率速调管工作频率在 $2856 \pm 5$  MHz 范围内, 主要电气参数为: 工作电压 $U \leq -25$  kV; 输出功率 $\hat{P} \geq 15$  kW; 饱和增益 $A > 55$  dB; 电压-相位调制灵敏度 $S \geq 21^\circ$ 。

电磁聚焦系统有6 组线圈, 采用稳定度为1% 的稳流源分别供电, 并可实行远距离操作, 当速调管工作在最佳状态时, 磁场电源数据列于表1。

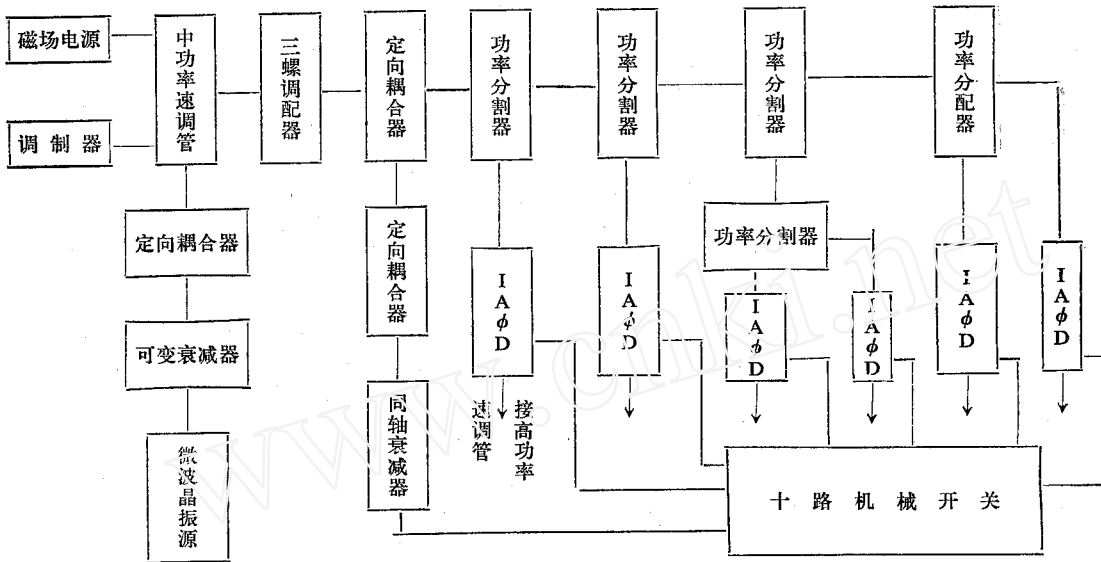


图 1 激励系统方框图

Fig 1 Block diagram of drive system

表 1 磁场线圈的电源

Table 1 Electric source of field coil

编 号	$I_{反}$	$I_1$	$I_2$	$I_3$	$I_4$	$I_5$
电 流	0.3	3.0	1.0	2.8	4.3	3.9

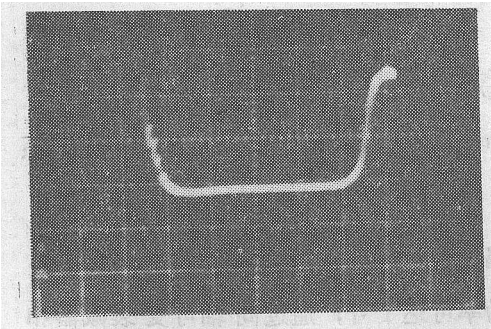


图 2 调制电压

Fig. Modulation voltage

中功率速调管调制器的脉冲电压为  $-27\text{ kV}$ ；脉冲电流为  $3\text{ A}$ ；脉冲顶宽为  $1.6\ \mu\text{s}$ ， $0.8\ \mu\text{s}$ ；重复频率为  $300\text{ 次/s}$ ， $1000\text{ 次/s}$ 。脉冲前沿为  $0.36\ \mu\text{s}$ ，脉冲后沿为  $0.33\ \mu\text{s}$ 。调制电压波形示于图 2。

本机备有门开关、速调管收集极、冷却水、磁场和真空度等连锁装置，灯丝自动升压，高压可遥控操作。

### 3. 输出功率分配系统

功率分配系统的微波元件采用 S 波段标准矩形波导，为保证良好的匹配和高的隔离度，速调管输出端连接三螺调配器和三端隔离器。6 路馈电均采用  $IA\phi D$  单元，该单元包括隔离器、可变衰减器、移相器和定向耦合器。其主要技术指标为：电压驻波比  $\rho \leq 1.15$ ，隔离度  $D \geq 30\text{ dB}$ ，相移范围  $0-360^\circ$ 。

在  $IA\phi D$  单元中，插入自动保护衰减器，当调制器高压升至设定值，并且加上激励功率后，回零信号使自动保护衰减器由衰减最大降到 0，当高压跳闸时，复位信号使衰减从 0 变为最大，只有衰减最大时才能加得上调制器高压。这样可以防止速调管受到瞬时大功

率的冲击，从而起到保护输出窗的作用。经功率分配后的6路激励功率，用低损耗电缆馈入6只20 MW管子输入腔。

激励线相位稳定性分析如下：

$$\frac{d\theta}{\theta} = \frac{\delta\theta_e - \delta\theta_d}{\theta_e} = \left(1 - \frac{C}{V_g}\right) \frac{\delta f}{f} + \alpha_e \delta T_e + \frac{C}{V_p} \left(\frac{1}{V_p} \frac{\partial V_p}{\partial T} - \alpha_d\right) \delta T_d$$

其中  $\theta_e = \frac{\omega Z}{C} = \frac{2\pi Z}{\lambda}$  (Z 长度加速波导的相移)

$$\theta_d = \frac{\omega Z}{V_p} \quad (Z \text{ 长度激励线的相移})$$

$V_p, U_g$  分别表示相速和群速； $\alpha_e, \alpha_d$  分别表示加速波导、激励线的线胀系数。采用 S 波段矩形波导，频率 2856 MHz 时则

$$\frac{\delta\theta}{\theta} = -0.462 \frac{\delta f}{f} + \alpha_e \delta T_e - 1.46 \alpha_d \delta T_d$$

结果  $\frac{\delta\theta}{\delta f} = 0.055/\text{m} \cdot 100 \text{ kHz}$

$$\frac{\delta\theta}{\delta T_d} = 0.082/\text{m} \cdot ^\circ\text{C}$$

$$\frac{\delta\theta}{\delta T_e} = 0.057/\text{m} \cdot ^\circ\text{C}$$

由此可见，激励线的相位稳定性对整机相位稳定性影响不大。

### 三、测试结果

本系统安装前对所用 19 种计 70 余个元件进行了严格检验，安装总调后各主要技术参数均达到设计指标。工作频率 2856 MHz

保护衰减器衰减量 0—35 dB

脉冲宽度(顶宽) 1.6 μs, 0.8 μs

重复频率 300 次/s, 1000 次/s

表 2 速调管在每个电压下的输出功率

Table 2 Output power of klystron at each voltage

功率 电压/kV	P <sub>总</sub>		P <sub>1</sub>		P <sub>2</sub>		P <sub>3</sub>		P <sub>4</sub>		P <sub>5</sub>		P <sub>6</sub>	
	$\bar{P}/\text{W}$	$\hat{P}/\text{kW}$	$\bar{P}/\text{W}$	$\hat{P}/\text{kW}$	$\bar{P}/\text{W}$	$\hat{P}/\text{kW}$	$\bar{P}/\text{W}$	$\hat{P}/\text{kW}$	$\bar{P}/\text{W}$	$\hat{P}/\text{kW}$	$\bar{P}/\text{W}$	$\hat{P}/\text{kW}$	$\bar{P}/\text{W}$	$\hat{P}/\text{kW}$
19.2	9.7	8.82	0.83	0.75	0.73	0.66	1.13	1.02	1.17	1.05	1.18	1.06	1.21	1.09
20.5	12.4	11.17	1.25	1.13	1.02	0.92	1.33	1.20	1.48	1.33	1.49	1.34	1.52	1.37
21.7	13.7	12.30	1.48	1.33	1.14	1.03	1.63	1.47	1.68	1.51	1.70	1.53	1.73	1.56
22.9	18.1	16.30	1.89	1.70	1.45	1.31	2.10	1.89	2.16	1.95	2.19	1.97	2.25	2.03
24.0	18.6	16.80	1.92	1.73	1.47	1.32	2.11	1.90	2.19	1.97	2.19	1.97	2.25	2.03
25.3	21.4	19.30	2.28	2.05	1.71	1.54	2.48	2.23	2.54	2.29	2.56	2.31	3.14	2.83

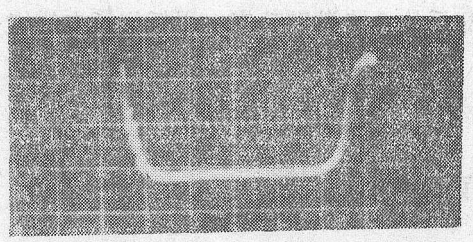


图 3 微波包络  
Fig. 3 Microwave envelope

脉冲前沿 0.36  $\mu$ s, 脉冲后沿 0.33  $\mu$ s  
 相移量 0—360°, IA $\phi$ D单元损耗 < 1.8 dB  
 频率稳定度  $3 \times 10^{-7}/d$  或  $4 \times 10^{-7}/100$  h  
 各路输出功率列于表 2。为获得较好的波形, 示波器用隔离变压器供电, 以减小公共地线耦合和辐射场的干扰。微波包络示于图 3。采用电桥比较法测试调速管高压, 相位调制灵敏度为 21°。

#### 四、结 束 语

本系统于1986年3月研制成功, 经过36 h 考验。证明系统设计合理, 工作性能稳定, 满足100 MeV 电子直线加速器的要求。在研制过程中, 得到电子工业部12所、13所、38所和航天工业部二院23所的大力支持, 在此表示衷心感谢。

#### 参 考 文 献

刘文华等, S波段D 4009 大功率速调管稳定性测试, 原子能科学技术, (6), 1985。  
 (编辑部收到日期: 1988年2月21日)

## THE DRIVE SYSTEM OF 100 MeV ELECTRON LINEAR ACCELERATOR

SUN YUZHEN SU GUOPING WANG XIULONG  
 YANG TIANLU

(China Institute of Atomic Energy P. O. Box 275, Beijing)

#### ABSTRACT

The principle, structure, measured result and technical performance of microwave drive system for 100 MeV electron linear accelerator are presented. In this system the peak power of 15 kW is produced by the middle power klystron. The power is divided into 6 parts, as it passes through the microwave output device and 6 high power klystron are driven. The result show this system has simple structure and good characteristic. This system completely satisfies accelerator requiement.

Key words Drive, Hard tube modulator, Phase lock.