

研究论文

电子直线加速器中束流的温度响应

王光裕

(南京化工学院)

本文探讨了电子直线加速器中束流对热耗的影响,计算了加速器在不同束流下的温度响应,并讨论了开机后注入束流的适当时刻,为加速器的设计与使用提供参考。

关键词: 束流 温度响应 转变时刻

一、引言

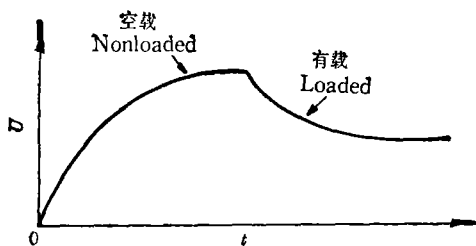


图1 束流对加速管温度的影响

Fig. 1 Influence of electron beam on temperature of the accelerating tube

文献[1]讨论了在空载时由于微波热耗引起的加速器温度变化,探讨了达到稳定所需的时间。但在实际过程中当加速管注入束流负载后由于束流吸收微波能量,降低了在加速管壁口的热耗,从而破坏了空载时期达到的稳态,使壁温重新下降,要到一定时间后才能在较低温度处重新达到稳定(图1)。而且不同束流所能达到的最后稳定温度也不同。为了使用时节省时间,在开机输入微波后,不必等到空载稳定,可以适当提前注入

束流。本文就是利用文献[1]所得结果对一个20MeV加速器^[2]进一步研讨这些问题。

二、有载热耗公式

根据文献[3],我们可以推算该加速器的有载(空载作为特殊情况)热耗公式。

在加速管加入束流后,其功率 $P(z)$ 服从有载耗散方程

$$dP/dz = -2\alpha P - i\sqrt{2\alpha\gamma P} \quad (1)$$

式中, α 为场衰减系数; γ 为分路阻抗;右边第一项为微波能量因热耗而损失的部分。用 $Q'(z)$ 代表热耗,则

$$Q'(z) = 2\alpha \overline{P(z)} \quad (2)$$

式中, $P(z)$ 是脉冲功率; $\overline{P(z)}$ 是 $P(z)$ 对时间的平均值, $\overline{P(z)} = tP(z)/T$ (t 为脉冲宽度, T 为脉冲周期)。只要解出 $P(z)$,则有载热耗 $Q'(z)$ 即可获得。

对反馈加速器,文献[3]已详细解出。在实际情况下,反馈回路桥臂衰减 τ_1, τ_2 较回路总衰减小很多,可以略去,而总衰减也就成为 $\tau \doteq \alpha L$ 。于是

$$P(z) = P_{ai} [e^{-\alpha z} - m'(1 - e^{-\alpha z})]^2 \quad (3)$$

式中, P_{ai} 为盘荷波导入口功率; $m' = i\sqrt{\gamma/2\alpha P_{ai}}$ 。

由于反馈作用, P_{oi} 与磁控管射频功率 P_i 间有关系 $P_{oi} = M_{oi}^2 P_i$, 于是

$$m' = (i/M_{oi}) \sqrt{Y/2\alpha P_i} = m_i/M_{oi}$$

式中, $m_i = i \sqrt{Y/2\alpha P_i}$, M_{oi} 称场增比。

$$M_{oi} = \frac{1 - \sqrt{n} m_i [1 - e^{-\alpha l}] \cos \varphi}{\sqrt{1+n} - \sqrt{n} e^{-\alpha l} \cos \varphi}$$

式中, φ 值可取为 0, 桥比 n 取为 1。则

$$M_{oi} = \frac{1 - m_i (1 - e^{-\alpha l})}{\sqrt{2} - e^{-\alpha l}}$$

于是

$$Q'(z) = 2\alpha P_{oi} \frac{t}{T} [(1+m')^2 e^{-2\alpha z} - 2m'(1+m') e^{-\alpha z} + m'^2] \quad (4)$$

以上各式中, 若令束流 $i=0$, 就是空载情况。

三、出束时刻的估算

利用上述公式按以下步骤可估计各种负载下较合适的出束时刻。

1. 空载和有载的温度变化

空载 ($i=0$) 时由 (4) 式知 $Q'(z)$ 只有一项指数函数

$$Q'(z) = Q_0 e^{-2\alpha z} \quad (5)$$

式中, $Q_0 = 2\alpha P_{oi} \frac{t}{T}$ 。

当有载时, 根据束流 i 的值, 由公式 (4) 算出的热耗 $Q'(z)$ 中含有常数项 $Q_0 m'^2$ 。为利用文献[1]中的结果, 我们仍把 $Q'(z)$ 展为不含常数项的 6 项指数函数迭加

$$Q'(z) = \sum_{\mu=1}^6 Q_{\mu 0} e^{-\lambda_{\mu} z}$$

当取 $\lambda = \alpha$ 时, 只须把常数项展为指数函数, 再与其余二指数函数项加在一起即可。展开后再

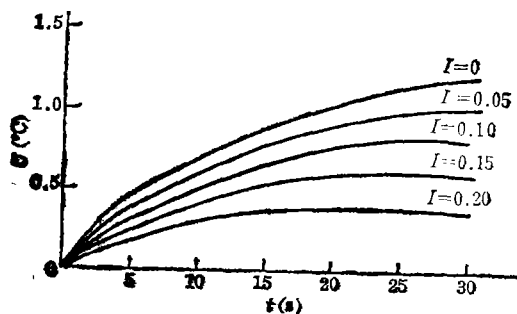


图2 各种负载下加速管中点平均壁温随时间的变化
Fig. 2 Average temperatures at the middle point of the accelerating tube varying with time under various beam loads

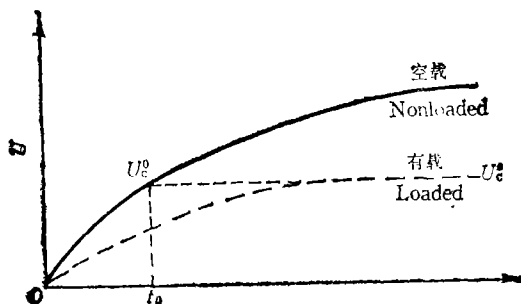


图3 空载转有载时刻的计算
Fig. 3 Method of determining the transition moment from nonloaded state to loaded state

按下式^[1]算出 $A_{\mu 0}$, 即可进一步计算温度。

$$A_{\mu 0} = -Q_{\mu 0} / 2\pi R_1 k_0$$

式中, R_1 为加速管的平均半径; k_0 为加速管的热传导系数。

为了求得有载情况下达到稳态时的温度, 我们假设一开始就加上束流, 并且持续稳定地吸收微波能量, 这就使热耗始终保持恒定值 $Q'(z)$, 从而能应用文献[1]的公式。

取加速管中点 C 作代表。图2是在各种负载下(包括空载) C 点的平均壁温 U_c 随时间变化的曲线。图中显示完全达到稳定均约需 30s 左右。

2. 空载中心壁温达到有载稳定温度所需时间

对某一束流 i , 设它达到稳态时中心温度为 U_c^* (图3)。由此画水平线交空载曲线于 U_c^* , 再由 U_c^* 向下引, 交横轴于 t_0 。这说明在 t_0 时刻空载中心温度 U_c 达到了有载稳定温度 U_c^* , 若在此时由空载转入有载, 注入束流 i 有可能使温度稳定不变。

3. t_0-i 曲线

通过计算得出各种负载下束流 i 与相应的 t_0 间的关系如图4所示。

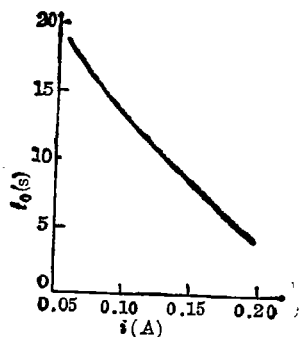


图4 t_0 与 i 的关系

Fig. 4 Relation of t_0 with i

四、讨 论

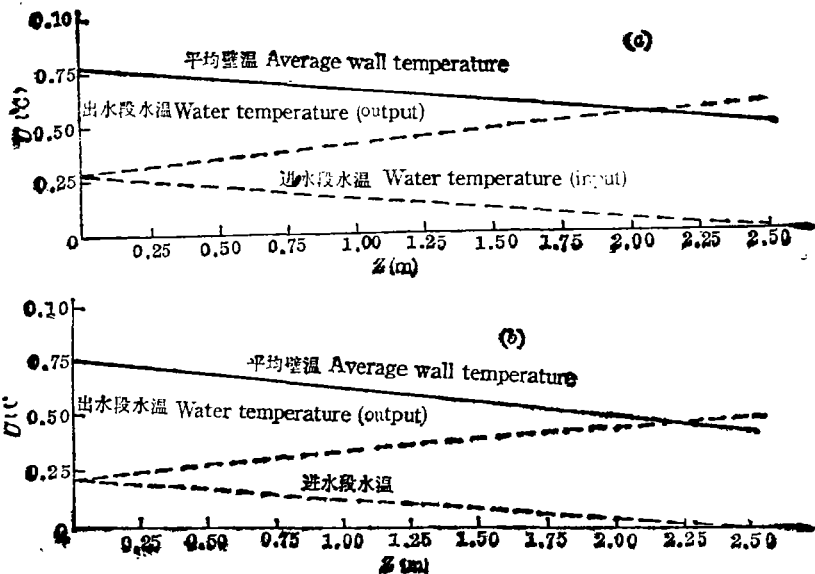


图5 (a) 有载 $i=0.15A$ 稳态时纵长温度分布

(b) 空载在 $t_0=8.434s$ 时纵长温度分布

Fig. 5 (a) Longitudinal temperature distribution under steady state when $i=0.15A$.

(b) Longitudinal temperature distribution under nonloaded state when $t_0=8.434s$

1. 空载转有载时刻纵长温度分布的比较

取 $i=0.15\text{A}$ 为例进行考察。与此束流相应的空载转有载时刻 $t_0=8.434\text{s}$ 。取三次近似算出相应的空载与有载(稳态)平均壁温及水温的纵长分布如图 5。

可以看到:在转变(即出束)时平均壁温在纵长方向几与有载稳态完全吻合,只水温略低些。对其他束流值进行考察也得到类似结果。因此 t_0 作为转变时刻(即出束时刻)确是较合适的,转变后能较快地转入有载稳定。

2. 沿壁厚方向温度分布的比较

以上所讨论的壁温都是在纵长方向某点的平均壁温,亦即在壁厚方向及进出水两半全部作了平均。但在壁厚 x 方向存在着一定的温度梯度^[1],这一梯度的大小由热耗决定。由于空载热耗较有载明显为大,因此刚转变(出束)时壁厚方向的温度梯度较有载稳态时为陡(图 6)。从而使刚转变时外壁温度偏低,水温也就相应偏低。这就是使图 5(b)中水温偏低的因素之一。

经简单计算,在空载转有载后约经 3—4s,沿壁厚方向的温度分布(梯度)也转化为有载稳定。

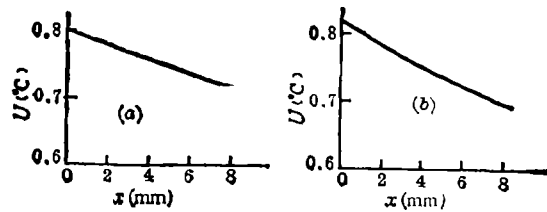


图6 (a)有载 $i=0.15\text{A}$ 稳态时沿壁厚方向的温度分布

(b)空载当 $t_0=8.434\text{s}$ 时沿壁厚方向的温度分布

Fig. 6 (a) Temperature distribution across the wall under steady state when $i=0.15\text{A}$

(b) Temperature distribution across the wall under nonloaded state when $t_0=8.434\text{s}$

参 考 文 献

- [1] 王光裕, 原子能科学技术, 25(1991), 2.
- [2] 姚充国和陈益梅, 原子能科学技术, 13(1979), 5:526.
- [3] 赖启基和王元林, 原子能科学技术, 20(1986), 6:686.

The temperature response of beams in an electron linac

Wang Guangyu

(Nanjing Institute of Chemical Engineering)

Abstract

The influence of electron beams on heat dissipation in an electron linac has been studied. The temperature responses for different electron beams in the linac are calculated. The suitable moment for inputting electron beam after the start of the linac is given. These results may provide a reference to the design and operation of a linac.

Keywords: Beams Temperature response Transition moment

(1990年2月5日收到)