

热阴极微波电子枪预测式自适应前馈控制系统*

李逢天 谢家麟

(中国科学院高能物理所, 北京2732信箱, 100080)

摘 要 北京自由电子激光装置采用热阴极微波电子枪作为电子直线加速器的注入器, 在较长脉冲工作条件下, 热阴极微波枪固有的反轰效应使束流强度随时间增加, 能量因束负载效应而降低, 导致束流能散度变差, 并在随后的加速过程中因注入束流的纵向发射度的扩大而进一步变坏, 最终降低自由电子激光的性能。实验表明, 采用带预测的自适应前馈控制克服束负载效应以及提高微波枪束流质量切实可行。

关键词 热阴极微波电子枪 束流负载 振幅 相位 控制

自由电子激光以低能散、低发射度、高亮度的电子束作为工作介质, 而在微波电子枪和加速器等束一波相互作用器件中, 束的性能决定于波的振幅和相位, 因此微波枪和加速器都需要高稳定度的射频功率源, 否则功率源的振幅和相位抖动将使束流的品质变差。在较长脉冲工作条件下, 热阴极微波枪固有的反轰效应使微波枪输出束的流强随时间增加, 束能降低, 使束流品质在随后的加速过程中进一步变坏。因此, 提高微波枪的出束质量对于北京自由电子激光装置至关重要, 为此在自适应前馈控制^[1]的基础进行了实验。但在实验中发现, 由于受反轰效应影响, 枪内束流负载随时间而变, 故枪场对激励功率的响应特性为时变的, 为解决这一问题, 我们采用了预测分析的方法, 实验结果表明该方法切实有效。

所谓自适应前馈控制, 就是在系统响应重复性较好的前提下, 根据系统以前的输出信号与期望值之差, 求出相应的控制修正量对随后输入信号进行修正, 使系统的输出逐步趋于期望值。一般来说, 加速器系统的响应是非线性带时延的, 很难得到初等解析表达式, 本控制方法用微分线性逼近和矩阵算法分析系统的输入和输出性能, 求出代表系统响应的传输矩阵, 从而可编制程序进行计算和控制。

该控制系统可补偿系统中的绝大部分扰动, 从数十纳秒量级的快速波动到系统慢漂, 可同时对速调管输出微波功率信号的振幅和相位进行控制, 以克服控制元件间的交互影响, 其最终控制效果受系统响应重复性、噪声、时基晃动及测量精度的制约。

1 控制原理

设一时不变系统的响应可分解为下列两部分: 由函数 $f(x)$ 表示的非线性即时响应部分和由冲击响应 $h(t)$ 表示的线性时间相关部分, 则其输入与输出的关系可由卷积表达 $y(\tau) = \int_{-\infty}^{\tau} f(x(t))h(\tau-t)dt$, 输入量 $x_0(t)$ 的微小变化 $\Delta x(t)$ 将导致输出量相应的变化 $\Delta y(\tau)$, 若函数 $f(x)$ 可微, 则有 $\Delta y(\tau) = \int_{-\infty}^{\tau} f'(x_0(t))\Delta x(t)h(\tau-t)dt$, 若用一系列阶跃函数之和来逼近

* 国家自然科学基金资助课题
1997年11月26日收到原稿, 1998年1月14日收到修改稿。
李逢天, 男, 1972年1月生, 在读博士

$\Delta x(t)$, 按一定时间间隔采样 $\Delta y(\tau)$, 则上式可用矩阵缩写式表为

$$\Delta y(\tau) = T_{ij}(\Delta x_j), i, j = 1, 2, \dots, n \tag{1}$$

矩阵元定义为: $T_{ij} = \frac{\Delta T + i\Delta\tau}{j\Delta t} \int_{j\Delta t}^{\Delta T + i\Delta\tau} (x_0(t))h(\tau - t)dt$, 其中 Δt 和 $\Delta\tau$ 分别为 $\Delta x(t)$ 和 $\Delta y(\tau)$ 的采样间隔, ΔT 为响应延时. 令 Δt 等于 $\Delta\tau$, 设 $x_0(t)$ 在控制区间内变化较小, 由系统响应的因果性, 式(1)可简化为

$$\begin{cases} \Delta y(\tau_1) \\ \Delta y(\tau_2) \\ \vdots \\ \Delta y(\tau_n) \end{cases} = \begin{bmatrix} T_1 & 0 & \dots & 0 \\ T_2 & T_1 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ T_n & T_{n-1} & \dots & T_1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta x_1 \\ \Delta x_2 \\ \vdots \\ \Delta x_n \end{bmatrix} \tag{2}$$

由该式可导出 Δx_j 的递推式

$$\Delta x_j = (1/T_1) (\Delta y_j - \sum_{i=1}^{j-1} T_{j-i+1} \cdot \Delta x_i) \tag{3}$$

同时矩阵元的求解也变得非常容易, 在输入端施加一个形式为 $[\Delta x, 0, \dots, 0]$ 的阶跃激励, 测量输出变化量 $\Delta y(\tau)$, 设其采样表达式为 $[\Delta y_1, \dots, \Delta y_i, \dots, \Delta y_n]$, 则有 $T_{ii} = \Delta y_i / \Delta x$.

在本控制系统中, $\Delta y(\tau)$ 代表被控制变量与期望值之差(误差), $\Delta x(t)$ 代表施加的控制量. 上述步骤可用于控制枪内微波场的振幅或相位, 但因控制元件(相移器和衰减器)对振幅和相位都有影响, 故需对二者进行同时控制. 我们可将两路信号看作一路复合信号, 即控制信号 $\Delta x(t)$ 由 $2n$ 个元素组成, 前 n 个代表振幅控制信号, 后 n 个代表相位控制信号, 对于 $\Delta y(\tau)$ 可类推, 则系统矩阵将由四个矩阵组成: 对角线上的两个子矩阵分别反映两路控制信道的自身特性, 另两个子矩阵则描述了两路控制信道间的耦合关系. 新的系统方程为

$$\begin{bmatrix} \Delta y_1^a \\ \Delta y_2^a \\ \vdots \\ \Delta y_n^a \\ \Delta y_1^p \\ \Delta y_2^p \\ \vdots \\ \Delta y_n^p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_1^{aa} & 0 & \dots & 0 & T_1^{pa} & 0 & \dots & 0 \\ T_2^{aa} & T_1^{aa} & \dots & 0 & T_2^{pa} & T_1^{pa} & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ T_n^{aa} & T_{n-1}^{aa} & \dots & T_1^{aa} & T_n^{pa} & T_{n-1}^{pa} & \dots & T_1^{pa} \\ T_1^{ap} & 0 & \dots & 0 & T_1^{pp} & 0 & \dots & 0 \\ T_2^{ap} & T_1^{ap} & \dots & 0 & T_2^{pp} & T_1^{pp} & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ T_n^{ap} & T_{n-1}^{ap} & \dots & T_1^{ap} & T_n^{pp} & T_{n-1}^{pp} & \dots & T_1^{pp} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta x_1^a \\ \Delta x_2^a \\ \vdots \\ \Delta x_n^a \\ \Delta x_1^p \\ \Delta x_2^p \\ \vdots \\ \Delta x_n^p \end{bmatrix} \tag{4}$$

2 系统结构

图1示出了系统结构示意图. 控制系统由衰减器、相移器、数字示波器、任意函数发生器(AFG)、计算机、鉴相器、检波器组成, 其中衰减器和相移器作为执行元件, 鉴相器和检波器作为检测元件. 计算机通过示波器读取检测元件输出的被控变量, 与期望值相比, 计算出控制量, 输出给AFG, 由AFG将控制量转换成控制波形输出给执行元件. 重复上述步骤直到被控变量已充分趋近期望值. 每隔一段时间可重复该过程以消除系统漂移的影响.

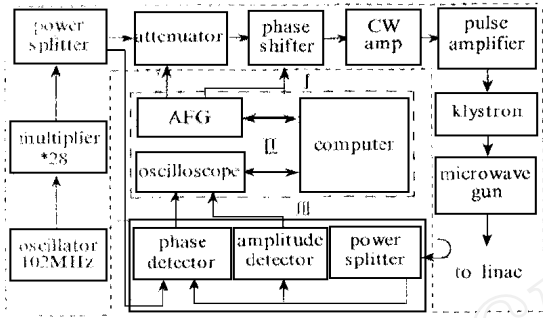


Fig 1 RF system for electron gun with self-adaptive feed-forward control system (I) controlled system, (II) control system, (III) monitor & transducer system

图1 带自适应前馈控制的微波电子枪射频系统的示意图

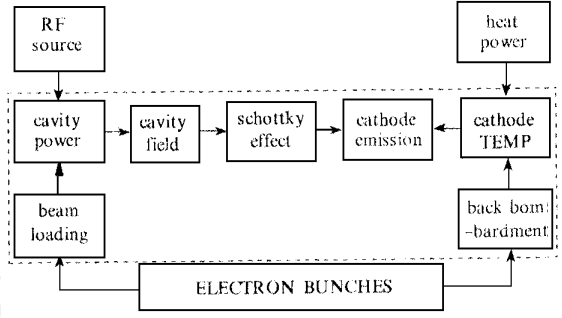


Fig 2 Schematic diagram illustrating the physical process in the thermionic-cathode RF gun

图2 热阴极微波枪内部物理过程的示意图

3 实施中的困难及对策

在加速器这种高压、高微波功率和高辐射本底恶劣环境下,电磁干扰、高压脉冲前沿抖晃、脉冲重复性的不理想等都严重影响测量精度。另外,测量仪器分辨率的限制,速调管工作点接近饱和区时响应的不敏感也会影响测量精度。若将这些影响看作一个“复合噪声”,并用 $\Delta y_j = \Delta y_j + \delta y_j, \Delta x_j = \Delta x_j + \delta x_j, T_j = T_j + \delta T_j$ 来代表方程(3)中 $\Delta y_j, \Delta x_j$ 和 T_j 受噪声干扰而含有误差的值,可得

$$\delta x_j = \frac{1}{T_j} - \frac{1}{T_1} (\Delta y_j - \sum_{i=1}^{j-1} T_{j-i+1} \Delta x_i) + \frac{1}{T_1} [\delta y_j - \sum_{i=1}^{j-1} (T_{j-i+1} \delta x_i + \delta T_{j-i+1} \Delta x_i)] \quad (5)$$

由(5)式可见,任一点上的误差将影响其后所有的点,即误差将被积累,随着控制跨度的增大这将极易导致控制波形的不稳定。

对于随机性误差,可采用多次平均来削弱其影响,而测量仪器分辨率的限制属于系统误差,因此在求矩阵元时应保证响应幅度至少应大于测量仪器分辨率,否则会因信噪比太小而影响计算精度。在求矩阵元时采取的具体措施如下:对测量值进行多次平均并用浮点型变量存储;判断系统响应的延时以确保第一个矩阵元的有效性;对测量数据进行局部滤波以克服较大的时基抖晃。另外,因存在时基抖晃,当计算任一点的修正量时,不仅要考虑该点上的误差,还应将其后一定数量的误差考虑在内。

参照图2所示微波枪内的物理过程,枪场与激励功率、束流负载等因素的关系可表示为枪场 = F_1 (激励,束流负载), (枪场对激励功率的响应随参变数—束流负载而变,见图3),束流负载 = F_2 (枪场,阴极温度),阴极温度 = F_3 (加热功率,反轰功率),反轰功率 = F_4 (束流负载,枪场)。故枪场对激励功率的响应是时变、强非线性、大迟滞的。例如,当在某个工作点附近将激励功率增大某个值时,枪场振幅首先随之增大,但由于束流强随枪场变大,导致反轰增强,使得阴极温度慢慢上升,束流进一步增大,几分钟后枪场振幅反而比增加激励前变小了!但若选择另一个工作点或将激励功率增加另一个值时,枪场的变化可能又截然相反。为解决这个问题,我们采用了对系统的阶跃响应进行预测的方法,具体如下:尽量将工作点选择得靠近期望值;通过选择增大或减小激励功率,使系统阶跃响应的变化方向指向期望值;调节激励功率的增减幅

度,使系统阶跃响应的幅度与误差的大小相当。

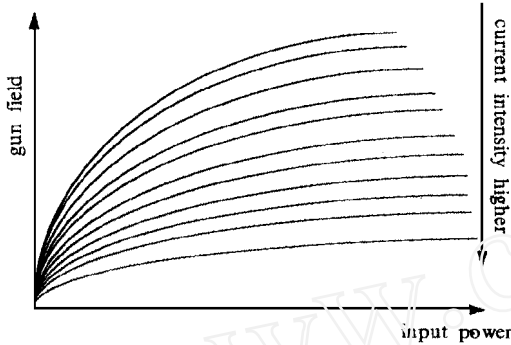


Fig 3 Gun field vs beam loading and input power
图3 微波枪场与激励功率、束流负载的关系曲线

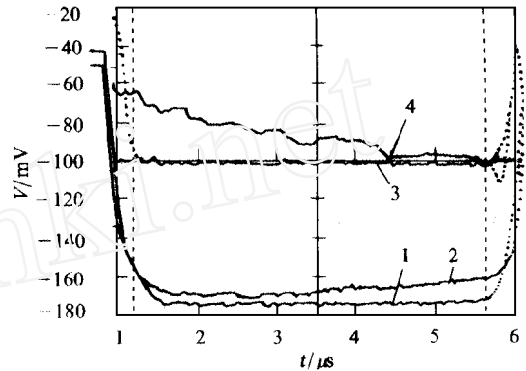


Fig 4 Amplitude and phase of the RF field in the gun cavity (before and after control)

图4 微波枪场振幅与相位波形(控制前及控制后)

采取上述措施后取得了两个显著的进展:扩展了控制宽度—仅受限于调制器或速调管的脉冲宽度;工作点可选择在紧邻速调管饱和区。

在处理双路控制中的相互影响时,有一个问题需要指出:由于相移器的插入损耗在整个控制范围内变化较小(小于 $\pm 6\%$),故其对振幅控制的影响较小(尤其当工作点靠近速调管的饱和区时),在这种情况下,受测量仪器分辨率的限制很难精确求出方程(4)中的矩阵元 T_{ij}^{pa} 。对这一问题的处理有两种方法:一是人为将这些矩阵元置为零;二是沿用单路控制的方法,先控制振幅然后控制相位,重复数次直到振幅和相位都已趋近期望值。方法二计算简单且占用内存较少。

4 结 论

本控制系统在对微波枪场的控制上已取得初步结果,图4示出了微波枪场的控制结果:曲线1,2是控制后与控制前的振幅波形,在 $4\mu\text{s}$ 脉宽内束流负载的影响由 $\pm 8\%$ (max)被削弱至 $\pm 0.4\%$ (max);曲线3,4分别是控制后与控制前的相位波形,相位波动由 ± 2.2 (max)被改善至 ± 0.4 (max)。

由此可见,本控制系统是提高束流质量进而提高自由电子激光性能的一条有效途径;微波枪束流负载效应的克服也展示了该控制系统在内部过程未知的条件下处理复杂物理问题(时变、非线性、大迟滞)的能力。

致 谢 对李永贵研究员,王言山、汪伯副研究员,畅祥云、杨学平、吴 钢,及北京自由电子激光研究室其他工作人员为本实验提供的帮助表示感谢!。

参考文献

- 1 Zhang Renshan, Ilan Ben-Zvi, and Xie Jialin. A self-adaptive feedforward RF control system for L NACs. *Nucl Instr and Meth*, 1993, A324: 421-428

A PREDICTION-BASED SELF-ADAPTIVE FEED-FORWARD CONTROL SYSTEM FOR THERM IONIC CATHODE MICROWAVE ELECTRON GUN

Li Fengtian, Xie Jialin

Institute of High Energy Physics, CA S, P. O. Box 2723, Beijing 100080, P. R. China

ABSTRACT Beijing Free Electron Laser Facility (BFEL) adopts a thermionic cathode microwave electron gun as its RF linac injector. For relatively long macro-pulse operation, the back-bombardment effect deteriorates the characteristics of the accelerated electron beam. So we developed a prediction-based self-adaptive feed-forward control system to compensate for the beam-loading. The system is operational and some experimental results have been obtained, which suggests that the system is effective to improve the beam quality, and that it's capable of dealing with complicated systems whose response is time-variable, non-linear and of long delay.

KEY WORDS RF gun, beam loading, amplitude, phase, control