

汤姆逊散射技术在 HL-2A 装置上的应用进展

商洁^{1,2}, 黄渊², 杨凯¹, 陈宝维¹, 刘春华², 杨屹¹

1. 中国辐射防护研究院, 山西 太原 030006
2. 核工业西南物理研究院, 四川 成都 610225

摘要 非相干激光汤姆逊散射诊断只需要假设电子速度满足 Maxwell 分布, 测量得到的等离子体电子温度与电子密度的数据准确可靠, 是托卡马克和其他磁约束核聚变研究装置上重要的诊断工具, 并朝着高可靠性、高空间分辨和高重复测量频率的方向发展, 其中高可靠性是前提。电子的汤姆逊散射截面很小, 其总截面为 $\sigma_T = 6.65 \times 10^{-25} \text{ cm}^2$, 通常使用电光调 Q 的 Nd: YAG 激光器作为散射光源, 激光脉冲宽度约 10 ns、脉冲能量约 3 J, 用 5~8 通道的光谱仪对散射光谱进行测量与分析。如何对光电探测模块输出的散射脉冲进行数据采集, 是激光散射诊断的关键问题之一。以前使用电流积分式的数据采集器(Q-ADCs, 如 CMC080 模块), 在一个确定的时间宽度(如 50 ns)将散射脉冲信号积分在采样电容器上, 从而得到散射信号的强度值, 这种方法很难排除电路噪声和外来干扰。该研究通过使用高速数据采集器(纵向分辨率 $\geq 10 \text{ bits}$ 、采样频率 $f \geq 1 \text{ GS} \cdot \text{s}^{-1}$, 如 V1742B 模块)在包含散射信号在内的时间段(如 300~500 ns)进行采集, 获得散射脉冲信号、等离子体发光的扰动与背景噪声等叠加在一起的数据序列。利用最小二乘法, 用高斯函数对散射脉冲的波形进行拟合, 然后在 50 ns 时间宽度对散射波形脉冲进行数值积分, 就得到散射信号的强度值。结果表明, 高速同步采集技术的使用, 能够用数字滤波技术排除大部分的干扰, 从而提高信噪比, 其幅度可以达到 10 倍左右。提取到更加准确可靠的光谱数据后, 以置信水平 95%、误差权重的最小二乘法开展数据处理, 用 A. C. Selden 散射谱表达式对电子温度进行参数估计, 得到了电子温度的测量值, 其统计误差为 3% 左右, 优于以前的 10% 左右。

关键词 汤姆逊散射; 高温等离子体; Nd: YAG 激光器; 散射光谱; 电子温度

中图分类号: O434 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3964/j.issn.1000-0593(2021)02-0333-06

引言

激光散射诊断的空间定位性好, 只需要假设电子速度满足 Maxwell 分布, 得到的电子温度和电子密度数据准确可靠。1968 年, Peacock 小组应邀在前苏联 T-3 托卡马克装置上完成了激光汤姆逊散射诊断史上里程碑式的实验^[1], 实验不仅确立了托卡马克装置在磁约束聚变研究中的主导地位, 也推动了激光汤姆逊散射在聚变实验等离子体诊断中的广泛应用^[2-8]。HL-2A 团队 2006 年率先在国内实现了激光散射诊断的常规运行和稳定可靠的测量, 2009 年实现了在偏滤器位型下从低约束模(L 模)转换到高约束模(H 模)的等离子体放电, 这种 H 模已经选定为国际热核聚变实验堆(ITER)的基本运行模式。电子的汤姆逊散射截面很小, 其总截面为 $\sigma_T = 6.65 \times 10^{-25} \text{ cm}^2$, 通常使用电光调 Q 的 Nd: YAG 激光器作

为散射光源, 激光脉冲宽度约 10 ns、脉冲能量约 3 J, 用 5~8 通道的光谱仪对散射光谱进行测量与分析。光谱测量通道输出的信号脉冲宽度 ~20 ns, 幅度为 10 mV 量级。如何进行数据采集从而得到散射强度, 是激光散射诊断的关键问题之一, 直接影响获得的散射信号强度数据的可靠性。使用高速数据采集器(纵向分辨率 12 bits、 $f > 1 \text{ GS} \cdot \text{s}^{-1}$, 如 CAEN 公司生产的 V1742B 模块^[9]) 在包含散射信号在内的时间段(如 300~500 ns)进行采集, 获得散射脉冲信号、等离子体发光的扰动与背景噪声等叠加在一起的数据序列。然后用数字滤波技术可以排除大部分的干扰, 从而提高信噪比, 其幅度可以达到 10 倍左右^[10]。HL-2A 装置上的激光散射诊断系统, 已经全部替换为 V1742B 模块, 目前通道总数达到 100 个, 得到的电子温度测量值的统计误差为 3% 左右, 优于以前的 10% 左右。

收稿日期: 2020-01-22, 修订日期: 2020-04-17

基金项目: 国家自然科学基金项目(11775193)资助

作者简介: 商洁, 1986 年生, 中国辐射防护研究院助理研究员

e-mail: 591238841@qq.com

1 实验部分

1.1 HL-2A 上激光汤姆逊散射系统

HL-2A 是我国第一个具有偏滤器位形的托卡马克实验装置, 其大半径为 $R_0 = 1.65 \text{ m}$, 小半径为 $a = 0.4 \text{ m}$, 最大环向磁场为 2.8 T , 最大等离子体电流为 480 kA , 等离子体平顶时间可以到 5 s 。HL-2A 装置上的激光汤姆逊散射系统采用 90° 散射方案^[2], 其布局如图 1 所示。入射激光偏振面与装置纵场方向平行, 在垂直于入射激光偏振面的探测方向, 会获得相对较强的散射光信号和好的空间分辨, 而且满足非相干散射条件。该系统主要包括: Nd: YAG 激光器, 散射光成像透镜组, 5 通道光谱仪, 弱光探测与信号放大单元, 散射信号的高速采集元件和数据处理计算机等。激光束位于大半径方向 $R_L = 1.635 \text{ m}$ 的位置。

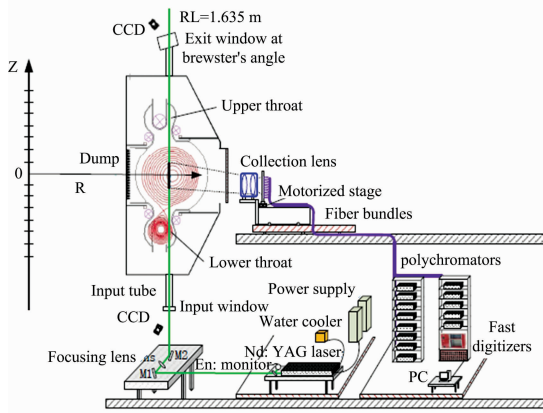


图 1 HL-2A 激光汤姆逊散射诊断的总体布局

Fig. 1 Layout of the HL-2A Thomson scattering system

1.2 散射光的接收和探测

激光束在真空室的中平面 ($Z=0$) 上聚焦后的直径小于 4 mm , 该散射系统的观测区域为中平面下方 40 cm 到中平面上方 30 cm (即 $-40 \sim 30 \text{ cm}$) 的范围内可以检测到等离子体的散射光。计划分为 20 个线段的多空间点的散射测量, 本研究团队通过设计和制造一个接收组合透镜来聚焦测量位置处电子的散射光。该组合透镜具有较大的接收立体角, 并在 $700 \sim 1100 \text{ nm}$ 波长范围内消色差、像差和球差, 且其表面镀增透膜。接收透镜将散射光聚焦到安放在其像平面处的光纤束入射端面上。石英传光光纤束使用的纤丝直径为 $250 \mu\text{m}$, 数值孔径为 0.37 , 光入射端面尺寸为 $1.8 \text{ mm} \times 4 \text{ mm}$, 出射端面直径为 3 mm 。光纤出射端面连接到多色光谱仪。光纤入射端面安装在激光线经过接收透镜后成像的像线上, 15 件光纤束安装在不同的位置上, 对应的散射长度在 $20 \sim 25 \text{ mm}$ 之间。

石英传光光纤束把接收到的散射光信号引到由干涉滤光片组成的五光谱通道多色光谱仪上, 多色仪把散射谱中波长在 $750 \sim 1060 \text{ nm}$ 范围的光, 分为不同的波段, 用量子效率较高的 Si: APD 来将光信号转换成电信号。Si: APD 的型号为 C30659-1060-3AH, 光敏面直径为 3 mm , 内置一个前置

放大器。HL-2A 主等离子体电子温度范围可以简单的分为 3 个, 芯部的高温、边缘的低温, 以及介于芯部与边缘之间的中温等离子体区域。每个多色光谱仪对应 1 个空间点的测量需求, 5 个用于高温等离子体, 按 1 至 5 编号, 从第 1 通道 (CH1) 到第 5 通道 (CH5) 干涉滤光片的中心波长/带宽 (CWL/BW, nm) 分别为 $1035/20$, $1005/35$, $965/45$, $900/85$, $810/100$; 10 个用于中温, 按 6 至 15 编号, 从 CH1 到 CH5 干涉滤光片的 CWL/BW 分别为 $1050/10$, $1035/20$, $1005/35$, $965/45$, $900/85$ 。

如果电子受入射激光作用而产生的加速度为 $\dot{\vec{v}}$, 散射光的观测方向为 \vec{s} , ϕ 为 $\dot{\vec{v}}$ 与 \vec{s} 的夹角, 则微分散射截面为 $d\sigma/d\Omega = (r_e \sin\phi)^2$ 。对于一个入射激光脉冲, 散射体积内的电子在立体角 $\delta\Omega$ 内向接收系统辐射的散射光总能量可以表示为 $E_s = E_0 n_e (r_e \sin\phi)^2 L \delta\Omega = G n_e (E_0 \text{ 为入射到等离子体里的激光脉冲能量, } L \text{ 为散射长度})$ 。对于高温等离子体, A. C. Selden 给出了 $\phi \sim 90^\circ$ 散射布局、电子温度范围在 $100 \text{ eV} \sim 100 \text{ keV}$ 之间的考虑了相对论效应的散射光谱按波长分布的精确表达式^[11]

$$I(\lambda_s) = \frac{A(E_s, T_e)}{Y(\theta, \eta)} [1 - 1.875B^{-1} + 2.695B^{-2}]^{-B(T_e)X(\theta, \eta)} = E_s S(\lambda_s, T_e) \quad (1)$$

式(1)中, $\eta = (\lambda_s - \lambda_0)/\lambda_0$ 为散射光波长相对于入射激光波长的偏移系数, $S(\lambda_s, T_e)$ 为散射谱的形状因子。当 $T_e = 20 \text{ keV}$ 时, 其误差小于 0.1% ; 当电子温度高达 100 keV 时, 误差小于 1% 。其中

$$A(E_s, T_e) = E_s \frac{2.86 \times 10^2}{\lambda_0 \sqrt{T_e}} \quad (2)$$

$$B(T_e) = 5.11 \times 10^5 / T_e \quad (3)$$

$$X(\theta, \eta) = \sqrt{1 + \eta^2 / [2(1 - \cos\theta)(1 + \eta)]} - 1 \quad (4)$$

$$Y(\theta, \eta) = (1 + \eta)^3 \sqrt{2(1 - \cos\theta)(1 + \eta) + \eta^2} \quad (5)$$

根据上面的散射光谱表达式, 可测量不同波长(或波长范围)散射光的强度, 来得到散射谱的形状, 从而推导出等离子体中的电子温度。如果等离子体在第 k 个散射体积处的电子温度为 T_e , 则第 i 光谱测量道采集的散射信号值 D_i^k 为

$$D_i^k = G^k n_e^k \int S(\lambda, T_e) T_w^k T_{\text{lens}}^k T_{\text{OF}}^k R^k(\lambda) d\lambda \quad (6)$$

式(6)中, T_w 为光学窗口的透过率, T_{lens} 为散射光接收透镜组(大口径消色差、像差)的透过率, T_{OF} 为石英传光光纤束的透过率; $S(\lambda, T_e)$ 是散射光谱形状因子的 Selden 表达式, $R(\lambda)$ 为五通道多色光谱仪的光谱响应系数。从式(6)可知, 提高光学系统的透过率, 选择合适的光电探测器, 可以增强探测到的信号强度、提高信噪比。高温等离子体的散射光谱比较宽。由于光的波长会影响到多色光谱仪的透射率和 Si-APD 探测器的量子效率, 后者又与偏压电压、环境温度等有关, 所以光谱响应系数与波长有强烈的依赖关系, 必须用标定方法将它测量出来。在激光 Thomson 散射实验中, 主要有两方面的标定工作, 即光谱响应系数的标定实验从而测量等离子体的电子温度, 以及在真空室内充中性气体的 Rayleigh 或 Raman 散射标定实验从而测量等离子体的电子密度。为

此目的, 研制了一套光谱标定系统^[12], 主要由标准光源和步进电机驱动扫描单色仪、可调直流稳压电源、机械斩光器、1 拖 2 分支(Y 型, 透射比约为 1:1)的传光光纤束与控制电路构成。使用斩光器对标准光源输出的连续光进行脉冲化, 可以扣除“零电平”基线漂移的影响, 也有助于消除测量电路 $1/f$ 噪声的影响; 使用 Y 型光纤束, 1 个分支接到高精度光功率监测系统, 另一个分支连接到需要标定的多色光谱仪。在国际上众多的“标准光源+单色仪”标定系统中, 这样的技术方案是最先进的, 它保证了标定数据的可靠性, 短期与长期一致性和可重复性。标准光源发出的在一定波长范围内的光经过聚焦透镜聚焦后, 在被斩波器变成脉冲光源的同时, 通过光电耦合器给出一个同步脉冲, 启动数据记录。光谱扫描范围为 $700\sim 1\ 100\text{ nm}$, 步长 1 nm , 光谱宽度 $\sim 1\text{ nm}$ 。如果向多色光谱仪馈入的光功率为 $J(\lambda)$, 采集系统得到的读数为 D_r , 则光谱响应系数为 $R(\lambda) = D_r/J(\lambda)$ 。脉冲化的光信号, 以及一个多色光谱仪的标定例子, 如图 2 所示。

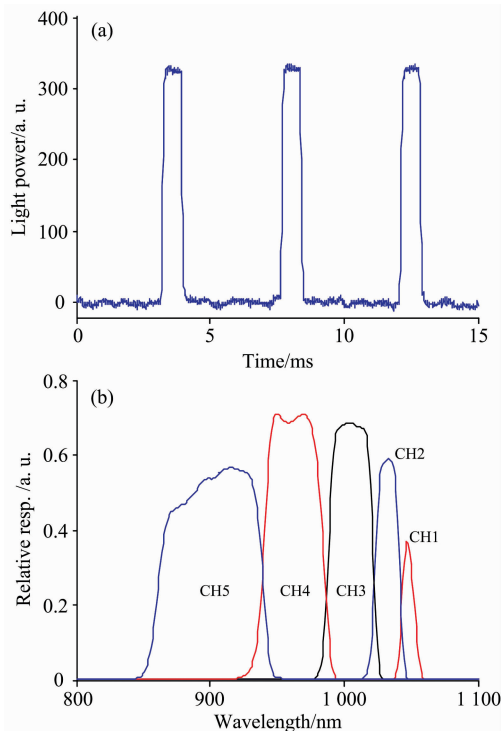


图 2 (a)为用斩光器调制后用于光谱标定的脉冲光信号, 光脉冲的宽度约 0.8 ms , 重复周期约 4.5 ms ; (b)为一个五通道多色光谱仪的相对光谱响应, 它适合测量的电子温度范围为 $50\text{ eV}\sim 3\text{ keV}$

Fig. 2 (a) is the pulsed light used for spectral calibration, its width is about 0.8 ms and repetition time is about 4.5 ms ; (b) is relative spectral responsibility of a 5-channel polychromator for T_e measurement of $50\text{ eV}\sim 3\text{ keV}$

2 结果与讨论

散射光的脉冲宽度约 10 ns , 经过 Si-APD 探测器、低通和高通滤波器、信号放大后, 输出二路模拟信号^[12]。具有低

通滤波器通道的信号输出, 使用普通的低频数据采集器, 主要用于光谱标定、监测等离子体本底光辐射的强度^[13], 评估本底光强度水平对激光散射测量的可能影响, 经过数据处理后也可以得到等离子体中的等效杂质浓度。具有高通滤波器通道的信号输出, 用于散射信号的测量, 其宽度通常在 20 ns 左右。在早期阶段, 激光汤姆逊散射系统使用电流积分式的数据采集器(Q-ADCs, 如 CMC080 模块), 在一个确定的时间宽度(如 50 ns)内将散射脉冲信号积分在采样电容器上, 然后通过恒流电路放电, 测量出放电时间的长度(转换时间), 得到的数值就代表散射信号的强度值。在散射信号测量通道, 尽管使用高通滤波器排除了等离子体本底光的强度影响, 但其残余效应会引起“零电平”基线的漂移; 向托卡马克装置线圈的大电流放电, 以及辅助加热系统工作时的高功率电源, 以及周边其他的电源设备, 有可能会产生随机电磁干扰以及“零电平”基线的波动。使用 Q-ADC 采集器, 在激光散射信号的测量后, 通常再进行 $4\sim 10$ 次背景信号的采集, 时间间隔约 $25\text{ }\mu\text{s}$, 以便尽可能扣除这些干扰。如果是白噪声, 这种扣除方式较好; 如果是有色噪声和尖峰噪声, 就不能达到预期的效果。使用高速同步采集器, 在包含散射信号的 $300\sim 500\text{ ns}$ 时间内采集一系列数据, 就能获得散射光的强度、等离子体发光的扰动与背景噪声等方面的信息。 1 GHz 以上采样率、 12 bit 的电压分辨率可以采集到高质量的短脉冲激光散射信号, 能够用数字滤波技术排除大部分的干扰, 从而获得更准确可靠的测量值。CAEN 公司生产的 V1742B 模块具有较高的性价比, 每张模块包含 32 个模拟信号的输入通道、 2 个触发采集的控制通道以及 1 个网络接口。在每个模拟信号通道, $1\ 025$ 只电容器构成的阵列与高速电子开关连接, 其通、断切换的速率($1, 2.5$ 和 5 GHz)可以程序选择。它的满量程转换时间与 Q-ADC 采集器的相当, 但不需要附加额外的背景信号采集流程, 所以激光散射信号测量的最高重复频率可以达到 4 kHz 。触发后, 就得到在一个有限的时间段内的 $1\ 025$ 个数据, 板载存储器可以存储 $1\ 024$ 次触发的采集进程获得的数据。目前, HL-2A 激光散射诊断的高速数据采集系统包括 3 张 V1742B 模块, 安装在 VME-8008X 机箱上, 采集速率设置为 $2.5\text{ GS}\cdot\text{s}^{-1}$, 输入信号幅度为 $0\sim -1\text{ V}$ 。使用标准信号源进行了检测, 在 $0\sim -0.9\text{ V}$ 范围采集的数据是准确的和线性的, 在 -0.9 V 以外出现偏差和非线性。图 3 给出了用这种采集模块得到的散射信号和激光能量监测信号。图 3(a)为用模块采集到的一个汤姆逊散射脉冲信号, 其半高宽约 25 ns , 用高斯函数对散射信号的脉冲波形进行拟合(时间长度 80 ns , 红色曲线)。图 3(b)为 $1\ 064\text{ nm}$ 激光的能量监测信号, 对其脉冲形状也进行了拟合(时间长度 160 ns , 红色曲线)。激光能量监测信号, 同时也用作启动采集进程的触发信号, 它是经过一个脉冲整形电路后得到的输出宽度为 200 ns 的 TTL 脉冲, 在其脉冲前沿的以前、以后都采集 512 个数据。在时间序列上, 每个光谱仪的每个测量通道得到的散射脉冲信号, 与激光能量监测信号有一个比较确定的时间间隔。首先就需要得到这个时间间隔的数据, 如图 4 所示是第 7 号光谱仪的时间间隔数据的变化范围, 平均值用红色表示。激光能量监测信号的幅度大、不

容易受到干扰, 在数据处理过程中就以其峰值对应的时刻作为时间基点, 用高斯函数 $a\exp(-(x-t_0)^2/2c^2)$ 对脉冲波形进行数值滤波与数值积分, 就得到汤姆逊散射的强度值。这里 a 代表散射脉冲的峰值, b 代表峰值对应的时刻, c 代表散射脉冲的宽度。如果数据处理程序搜索、预判到某个通道的散射信号较弱, 就可以用这个通道“内在的”波形参数 b 和 c 拟合出散射信号的脉冲波形, 如图 5 所示。

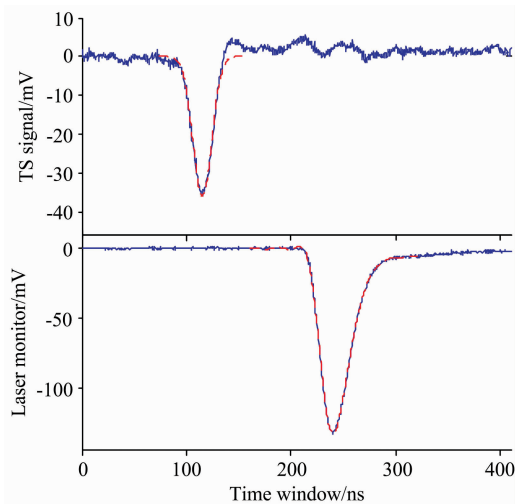


图 3 V1742B 模块采集速率设置为 $2.5 \text{ GS} \cdot \text{s}^{-1}$, 信号采集窗口的时间长度约 410 ns

(a): 用模块采集到的一个汤姆逊散射脉冲信号, 其半高宽约 25 ns, 用高斯函数对散射信号的脉冲波形进行拟合(红色曲线); (b): 1 064 nm 激光能量的监测信号

Fig. 3 V1742B digitizers are set to sample at $2.5 \text{ GS} \cdot \text{s}^{-1}$, the time window of data acquisition is 410 ns

(a) is shown the raw data of a TS signal, its FWHM is about 25 ns, and Gaussian function is utilized to fit the pulse shape (red line); (b) is displayed the laser monitor

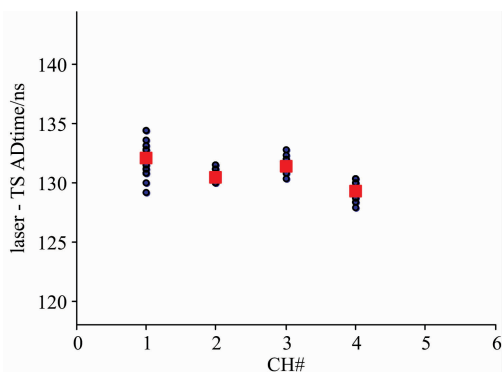


图 4 第 7 号光谱仪得到的汤姆逊散射脉冲信号与激光能量监测信号的时间间隔

CH# 表示通道序号; 第 5 通道的信号太弱, 没有使用

Fig. 4 The time interval of TS signals and laser monitor is shown for poly #7

CH# denotes the index of optical channels; the TS data of 5th channel is very weak and not used

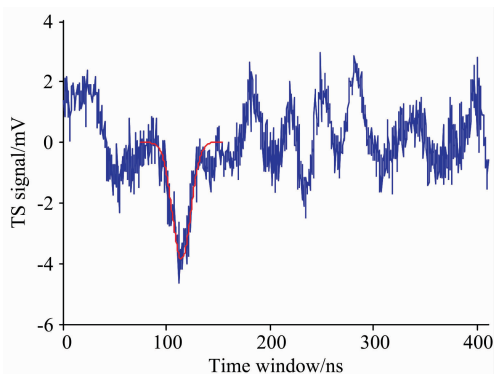


图 5 当散射信号比较弱时, 可以用这个通道“内在的”函数参数 b 和 c 拟合出散射信号的脉冲波形

Fig. 5 When the scattering signal is weak, the “intrinsic” function parameters b and c of this channel can be used to fit the pulse shape of the scattering signal

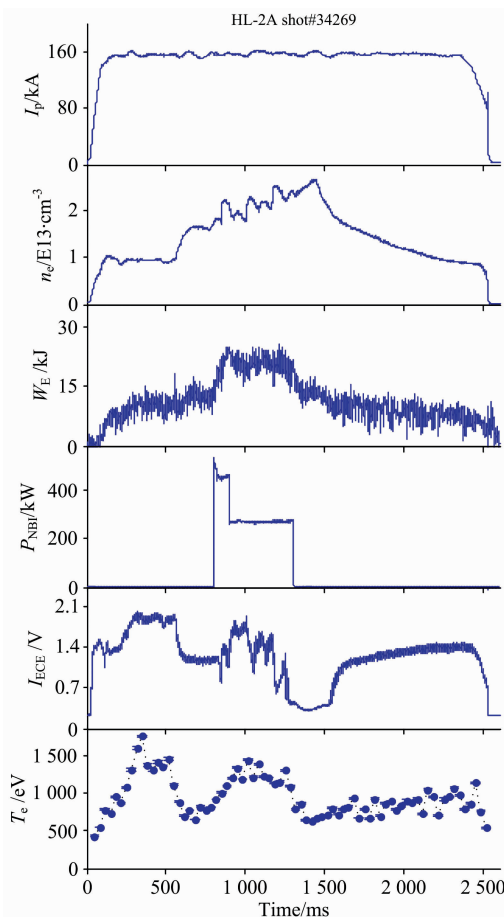


图 6 在 HL-2A 装置上第 34269 次等离子体放电期间芯部电子温度的测量结果, 中性束注入加热的时间段为 800~1 300 ms

Fig. 6 Measurement results of electron temperature at core plasma for shot # 34269, with NBI during 800~1 300 ms

高速采集技术在散射系统中逐步获得了广泛的应用。Kurzan 小组发现,在满足 SNR=1 的相同条件下,使用高速数据采集器可以测量的等离子体电子密度的最低值为 $0.75 \times 10^{12} \text{ cm}^{-3}$,比使用 QADCs 时可测的最低密度值小 3 倍。Minami 小组研究发现^[10],高速数据采集以及数据处理程序的优化应用,Nd:YAG 激光散射测量的 SNR 可以提高 10 倍左右。得到积分了的散射信号强度值后,使用误差权重的最小二乘法^[14]拟合,可以得到电子温度 T_e 的测量值

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^5 w_i (D_i - \beta F_i)^2 \quad (7)$$

式(7)中, $w_i = 1/\sigma_i^2$ 为第 i 光谱通道与该通道测量误差 σ_i^2 有关的权重因子, D_i 为测量到的汤姆逊散射信号的积分值, F_i 是电子密度为单位值($1, \times 10^{13} \text{ cm}^{-3}$)、电子温度为 T_e 时散射信号的预期值, β 是与电子密度以及散射几何参数有关的拟合变量。基于 95%置信水平的参数估计,得到了电子温度的测量值及误差。

HL-2A 上的 Nd:YAG 激光汤姆逊散射诊断系统能够测量在各种放电条件下等离子体电子温度的分布。在替换为高速数据采集的情况下,激光散射诊断的多空间点电子温度测量能力有了较大的提高,在 2018 年度实验中先后达到 5 个点^[15]、15 个点^[16]。图 6 是第 34269 次等离子体放电期间的测量结果,中性束(NBI)在 800~1 300 ms 时间段加热等离子体。其中 I_p 表示等离子体环电流, n_e 表示远红外(FIR)激光干涉所测得的中心弦平均的电子密度, W_E 为等离子体内能, P_{NBI} 为 NBI 注入功率, I_{ECE} 为来自芯部等离子体的电子回旋辐射信号, T_e 为散射系统测得的芯部等离子体的电子温度,从中可以看出,在 NBI 加热期间,等离子体内能和电子温度明显增加。在等离子体黑体辐射近似下, I_{ECE} 信号

强度与电子温度 T_e 成正比,从图中可以看出,两者在趋势上总体一致。图中也标出了 T_e 的误差棒,其相对误差在 3% 左右,优于以前使用 QADCs 得到的相对误差 10% 左右^[2]。

3 结 论

在使用高速数据采集模块 V1742B 的情况下,激光散射诊断的多空间点电子温度测量能力有了较大的提高,在 2018 年度 HL-2A 运行实验中先后达到 5 个点、15 个点,在 2020 年度拟开展多达 20 个以上空间点的汤姆逊散射诊断实验。用高斯函数对散射信号的脉冲波形进行拟合,数值积分后就得到汤姆逊散射的强度值。采用误差权重的最小二乘法进行数据处理,推演出等离子体的电子温度值,获得的 T_e 误差更小。信噪比的提高,表明可以测量的等离子体电子密度的下限值更低了,从而拓展了激光散射诊断系统的测量区间。现在,HL-2A 装置放电结束后才进行数据传输与数据处理,在即将建成的 HL-2M 装置上为了进行等离子体参数的剖面控制、破裂预测与缓解等方面的研究工作,需要向控制中心实时提供电子温度/密度数据,要求进行原始数据的实时传输与数据处理,而数据处理速度是制约因素。基于机器学习的人工智能是一种强大的非线性数据分析算法,数据处理速度可以提高 20 倍以上,本研究团队在这方面的研究工作已取得了初步的结果^[17]。激光散射诊断技术的进展以及测量能力的提高,将在 HL-2A 装置以及 HL-2M 装置上开展高约束模的稳定运行、破裂预测与缓解、先进偏滤器位型的实现与控制等方面的物理与工程实验中,提供有价值的数

References

- [1] Peacock N J, Robinson D C, Forrest M J, et al. *Nature*, 1969, 224: 488.
- [2] Huang Y, Zhang P, Feng Z, et al. *Review of Scientific Instruments*, 2007, 78(11): 113501.
- [3] Zang Q, Zhao J Y, Li Y, et al. *Review of Scientific Instruments*, 2011, 82(6): 063502.
- [4] Walsh M J, Arends E R, Carolan P G, et al. *Review of Scientific Instruments*, 2003, 74(3): 1663.
- [5] Kurzan B, Jakobi M, Murmann H. *Plasma Phys. Control. Fusion*, 2004, 46(1): 299.
- [6] Carlstrom T N, Campbell G L, Deboo J C, et al. *Review of Scientific Instruments*, 1992, 63(10): 4901.
- [7] Yamada I, Narihara K, Funaba H, et al. *Review of Scientific Instruments*, 2010, 81(10): 10D522.
- [8] Van der Meiden H J, Barth C J, Oyevaar T, et al. *Review of Scientific Instruments*, 2004, 75(10): 3849.
- [9] See www.caen.it for MOD. V1742, V1742x. MUTx/06.
- [10] Minami T, Itoh Y, Yamada I, et al. *Review of Scientific Instruments*, 2014, 85: 11D837.
- [11] Selden A C. *Physics Letter A*, 1980, 79(5): 405.
- [12] Feng Z, Wang Y Q, Hou Z P, et al. *Journal of Instrumentation*, 2017, 12: C11012.
- [13] SHANG Jie, HUANG Yuan, LIU Chun-hua, et al(商 洁, 黄 渊, 刘春华, 等). *Laser & Optoelectronics Progress(激光与光电子学进展)*, 2015, 52(11): 111201.
- [14] Press W H, Teukolsky S A, Vetterling W T, et al. *Numerical Recipes in C. Second Edition*.
- [15] Huang Y, Wang Y Q, Hou Z P, et al. *Review of Scientific Instruments*, 2018, 89: 10C116.
- [16] Huang Y, Wang Y Q, Hou Z P, et al. *Journal of Instrumentation*, 2019, 14: C11021.
- [17] LIU Chun-hua, HOU Zhi-pei, WANG Yu-qin, et al(刘春华, 侯智培, 王瑜琴, 等). *High Power Laser and Particle Beams(强激光与粒子束)*, 2019, 31(2): 022003.

Progress of Thomson Scattering Diagnostic on HL-2A Tokamak

SHANG Jie^{1,2}, HUANG Yuan², YANG Kai¹, CHEN Bao-wei¹, LIU Chun-hua², YANG Yi¹

1. China Institute for Radiation Protection, Taiyuan 030006, China

2. Southwestern Institute of Physics, Chengdu 610225, China

Abstract The diagnosis of incoherent laser Thomson scattering only needs to assume that the electron velocity satisfies the Maxwell distribution, and the measured data of plasma electron temperature and electron density are accurate and reliable. It is an important diagnostic tool in the Tokamak and other magnetically confined fusion research device, and it is developing towards the measurement requirements of high reliability, high spatial resolution and high repetition rate, while high reliability is the premise condition. The Thomson scattering cross section of electron is very small, and its total cross section is $\sigma_T = 6.65 \times 10^{-25} \text{ cm}^2$. Generally, the Q-switched Nd : YAG laser is used as the scattering light source. The laser pulse width is about 10 ns, and the pulse energy is about 3 J. The scattering spectrum is measured and analyzed by a 5~8 channel polychromator. One of the key problems of laser scattering diagnosis is how to collect the scattering-related electric pulse output from photoelectric detection module. In the past, charge-sensitive analogue-to-digital converters (Q-ADCs, such as CMC080 module) were used to integrate the scattered pulse signal on the sampling capacitor over a certain time width (such as 50 ns), so as to obtain the strength value of the scattered signal. This method is difficult to eliminate circuit noise and external interference. Now, fast digitizers (vertical resolution ≥ 10 bits, sampling frequency $f \geq 1 \text{ GS} \cdot \text{s}^{-1}$, such as V1742B module) are used to collect the data in the time period including the scattering signal (such as 300~500 ns), so as to obtain the data sequence superimposed by the scattering pulse signal, the disturbance of plasma light and background noise. In this paper, the least square method is used to fit the scattering pulse with Gaussian function, and then the scattering pulse is numerically integrated into 50 ns-width to get the strength value of the scattering signal. The results show that the use of high-speed synchronous acquisition technology can eliminate most of the interference with digital filtering technology, so as to improve the signal-to-noise ratio, and its amplitude can reach about 10 times. After more accurate and reliable spectral data are extracted, the error-weighted least square method is used to process the data at the confidence level of 95%. A. C. Selden scattering spectral expression is used to estimate the parameters of electron temperature, and the measured value of electron temperature is obtained. The statistical error is about 3%, which is better than the previous 10%.

Keywords Thomson Scattering; High-temperature plasma; Nd : YAG laser; HL-2A tokamak; Electron temperature

(Received Jan. 22, 2020; accepted Apr. 17, 2020)