(19)中华人民共和国国家知识产权局

(12)发明专利

(10)授权公告号 CN 111665014 B
(45)授权公告日 2022.02.22

(21)申请号 202010431026.7
(22)申请日 2020.05.20
(65)同一申请的已公布的文献号
申请公布号 CN 111665014 A
(43)申请公布日 2020.09.15
(73)专利权人 中国科学院力学研究所
地址 100190 北京市海淀区北四环西路15号
(72)发明人 林鑫 余西龙 张仕忠 王传胜 李飞
(74)专利代理机构 北京和信华成知识产权代理事务所(普通合伙) 11390
代理人 胡剑辉
(51)Int.Cl.
G01M 9/06(2006.01)
G01N 27/60(2006.01)

(56)对比文件
CN 110276109 A,2019.09.24
CN 110954794 A,2020.04.03
CN 104749396 A,2015.07.01
CN 102407947 A,2012.04.11
CN 102508002 A,2012.06.20
CN 101825524 A,2010.09.08
汪球 等."高焓流动中电子密度的静电探针测试技术研究".《中国科学(技术科学)》.2016,第46卷(第5期),第500-508页.
汪球 等."高焓风洞中模型外流场电子密度测试研究".《第十五届全国激波与激波管学术交流会论文集》.2012,第427-431页.

审查员 毕凯

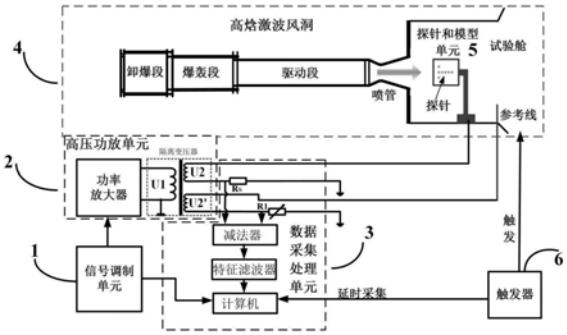
权利要求书2页 说明书6页 附图3页

(54)发明名称

一种基于高频静电探针的高超声速飞行器边界层电子密度诊断系统

(57)摘要

本发明公开一种基于高频静电探针的高超声速飞行器边界层电子密度诊断系统,包括信号调制单元、高压功放单元、数据采集处理单元、高焓激波风洞、探针和模型单元、触发器,信号调制单元输出扫描信号经过高压功放单元被放大隔离产生扫描电压,高焓激波风洞产生激波边界层,诱导出等离子体,扫描电压加载在探针和模型单元中的探针上,产生电流信号,数据采集处理单元采集并处理电流信号和扫描电压信号,触发器控制高焓激波风洞工作以及扫描电压和电流信号采集的延迟时间,生成风洞工作时间内多周期完整伏-安曲线。本发明解决了利用高焓激波风洞研究复杂外形飞行器激波边界层和尾迹区电子密度和电子温度的高时间分辨率难题。



CN 111665014 B

1.一种基于高频静电探针的高超声速飞行器边界层电子密度诊断系统，其特征在于，包括信号调制单元(1)、高压功放单元(2)、数据采集处理单元(3)、高焓激波风洞(4)、探针和模型单元(5)、触发器(6)，所述信号调制单元(1)输出扫描信号，该扫描信号经过高压功放单元(2)被放大隔离产生扫描电压，所述高焓激波风洞(4)产生激波边界层，诱导出等离子体，所述探针和模型单元(5)中的探针设置于等离子体中，所述扫描电压加载在探针上，产生电流信号，所述数据采集处理单元(3)采集并处理电流信号和扫描电压信号，所述触发器(6)控制高焓激波风洞(4)工作以及扫描电压和电流信号采集的延迟时间，生成风洞工作时间内多周期完整伏-安曲线；

所述高压功放单元(2)设置有大功率高电压运算放大器、以RC滤波电路为基础的功率放大器，通过高线性度高电压直流电源给运算放大器提供电压，通过RC滤波电路消除由电源带来的纹波干扰，高压功放单元(2)放置于铝质金属屏蔽盒内；

所述运算放大器使用AD810AN，带宽1MHz，电流20mA，供电电压最大±15V，为运算放大器供电高线性直流电源为ZF-3002D，串联输出0～60V；

所述高压功放单元(2)内还设置有以扼流圈为基础的隔离变压器，所述隔离变压器设置为扼流圈结构；

所述数据采集处理单元(3)包括数据采集单元，数据采集单元包括电阻Rs、减法器和电阻R1，其中R1阻值可调，通过电阻Rs将电流信号转化为电压信号，采集到的电压信号输入给以运算放大器和减法器为基础的补偿相消电路，通过调节电阻R1消除产生的噪声信号。

2.根据权利要求1所述一种基于高频静电探针的高超声速飞行器边界层电子密度诊断系统，其特征在于，所述信号调制单元(1)设置为信号函数发生器，通过信号函数发生器产生不同波形、不同电压和频率的信号，该信号调制单元(1)根据高焓激波风洞(4)的状态调整，输出最优扫描信号。

3.根据权利要求1所述一种基于高频静电探针的高超声速飞行器边界层电子密度诊断系统，其特征在于，所述数据采集处理单元(3)包括数据处理单元，数据处理单元包括特征滤波器和计算机，经过补偿相消电路后的电压信号通过特征滤波器进行滤波，通过计算机进行数据处理。

4.根据权利要求1所述一种基于高频静电探针的高超声速飞行器边界层电子密度诊断系统，其特征在于，所述高焓激波风洞(4)依次连接设置有卸爆段、爆轰段、驱动段、喷管，其设置为氢氧爆轰驱动、重活塞驱动式激波风洞，模拟焓值为10-25MJ/kg，气流速度5-7km/s，并设置有完备的风洞启动、及压力、激波速度测试系统。

5.据权利要求1所述一种基于高频静电探针的高超声速飞行器边界层电子密度诊断系统，其特征在于，所述探针和模型单元(5)设置探针和飞行器模型，飞行器模型设置为有一定角度的尖劈模型，探针通过平面结构装配在尖劈模型表面，平面结构采用耐高温陶瓷将探针与模型绝缘，尖劈模型与支撑机构连接，通过支撑机构调节尖劈模型位于最佳实验位置。

6.根据权利要求1-5任一项 所述一种基于高频静电探针的高超声速飞行器边界层电子密度诊断系统，其特征在于，该系统的运行方法具体包含以下步骤：

S1：高焓激波风洞(4)准备完毕后，信号调制单元(1)输出扫描信号，开启高压功放单元(2)给探针加载扫描电压；

S2:触发器(6)设置好采集延迟时间,控制高焓激波风洞(4)工作,数据采集处理单元(3)同步采集多周期扫描电压和电流信号;

S3:得到电压和电流信号多周期伏-安曲线;

S4:将伏-安曲线进行多周期平均,按照单探针理论依次获得电子温度和电子密度。

7.根据权利要求6所述一种基于高频静电探针的高超声速飞行器边界层电子密度诊断系统,其特征在于,所述步骤S3的具体步骤为:

S301:首先将扫描电压信号和待求解的电流信号平滑,找出单个周期的最大最小区间;

S302:接着通过公式I＝U/Rs得到探针电流信号;

S303:接着将电流电压信号经过数据滤波,最终获得平滑的伏-安曲线。

一种基于高频静电探针的高超声速飞行器边界层电子密度诊断系统

技术领域

[0001] 本发明属于高超声速飞行器黑障通讯、目标识别等研究领域，具体的涉及一种基于高频静电探针的高超声速飞行器边界层电子密度诊断系统。

背景技术

[0002] 当飞行器以高超声速再入大气层或者在大气层长时间巡航时，飞行器周围流场受到头部强大弓形激波压缩和黏性作用，温度高达几千甚至上万度，高温导致了空气分子的振动激发、离解、甚至电离，从而在飞行器周围形成了一个等离子体鞘层，一定浓度的自由电子会不同程度的吸收、反射和散射电磁波，轻则干扰到电磁波的传输，重则导致通讯中断，通讯中断也就是所谓的“黑障”问题。“黑障”作为高超声速飞行中出现的典型气动物理现象，是当前高超声速领域研究的前沿热点之一。反应“黑障”现象的一个主要表现特征是高超声速飞行器边界层的电子密度特性，对再入通讯中断电子密度诊断问题的研究，须满足两个条件：一是能够产生高超声速气流环境的地面实验设备、二是相应的诊断技术。而开展高超声速流动实验研究，极大的依赖于能模拟飞行条件总温的高焓气动设备，以力学所独有爆红驱动技术的JF10为代表的高焓激波风洞能够提供研究高温真实气体效应及再入物理光电特性所需的高焓空气来流环境，喷管出口直径为Φ500mm，能够开展较大尺寸模型实验该风洞可复现高超声速飞行器来流速度和焓值，是研究高超声速气动问题的关键设备，但这种激波风洞有效工作时间极短，仅为ms量级，因此对激波边界层内等离子体参数测量技术的时间分辨能力要求极高。因此实现高时间分辨率高精度的诊断激波风洞产生的等离子体鞘套参数，成为在地面研究黑障通讯问题的关键技术。

[0003] 等离子体参数诊断手段一般有微波诊断，光谱诊断，静电探针诊断等。相较于前两种诊断技术所需大型设备，光学窗口等。静电探针因其结构简单，诊断数据多样而受到广泛关注，但以前主要局限于等离子体发生器、低压长时间低温等离子体系统，而在短时间脉冲型高焓试验设备上开展的研究相对较少，尤其是在能够模拟再入飞行速度、产生高焓高速试验气流的激波风洞上更少。静电探针的基本原理是将一根金属探针伸入等离子体中，给探针加上由负到正的扫描电压，探针吸引等离子体中的离子和电子，从而在探针上形成电流。目前针对高焓激波风洞常用的探针为假设电子温度为某一个值，然后通过固定偏压诊断离子收集流而得到密度。该方法获得的信号含有噪声，产生较大误差，且不能定量，假设电子温度的方式需要结合流动获得，目前对高超声速的模拟更是困难。因此只有获得完整的伏-安曲线才能更好的诊断电子密度和电子温度。要在毫秒级激波风洞上获得多个完整伏-安曲线周期，这就需要扫描频率至少要高于10kHz，但传统的单探针在如此高的扫描周期时，由于真实线路RLC导通特性会导致数据产生空间电势量级的干扰噪声，严重影响实验结果可靠性。

发明内容

[0004] 针对现有技术中存在的现有探针技术在高频扫描时产生的RLC导通干扰和高超声速特征干扰的技术问题，本发明的目的在于提供一种基于高频静电探针的高超声速飞行器边界层电子密度诊断系统，获得高信噪比伏-安曲线，该系统扫描频率1kHz～100kHz，扫描电压±10V～±30V，具体参数可根据实验状态灵活调整。使用电子学减法电路结合补偿极方式实现RLC干扰消除，并添加特征滤波器消除流动干扰，实现高信噪比高时间分辨率诊断激波风洞电子密度、电子温度的目的。

[0005] 本发明采取的技术方案为：

[0006] 一种基于高频静电探针的高超声速飞行器边界层电子密度诊断系统，包括信号调制单元、高压功放单元、数据采集处理单元、高焓激波风洞、探针和模型单元、触发器，所述信号调制单元输出扫描信号，该扫描信号经过高压功放单元被放大隔离产生扫描电压，所述高焓激波风洞产生激波边界层，诱导出等离子体，所述探针和模型单元中的探针设置于等离子体中，所述扫描电压加载在探针上，产生电流信号，所述数据采集处理单元采集电流信号和扫描电压信号，所述触发器控制高焓激波风洞工作以及扫描电压和电流信号采集的延迟时间，生成风洞工作时间内多周期完整伏-安曲线。

[0007] 进一步的，所述信号调制单元设置为信号函数发生器，通过信号函数发生器产生不同波形、不同电压和频率的信号，该信号调制单元根据高焓激波风洞的状态调整，输出最优扫描信号。用于诊断不同风洞状态下的等离子体参数。

[0008] 进一步的，所述高压功放单元设置有大功率高电压运算放大器、以RC滤波电路为基础的功率放大器，通过高线性度高电压直流电源给运算放大器提供电压，通过RC滤波电路消除由电源带来的纹波干扰，高压功放单元放置于铝质金属屏蔽盒内。

[0009] 更进一步的，所述高压功放单元内还设置有以扼流圈为基础的隔离变压器，所述隔离变压器设置为扼流圈结构。

[0010] 进一步的，所述数据采集处理单元包括电阻Rs、减法器、特征滤波器、电阻R1和计算机，其中R1阻值可调，通过电阻Rs将电流信号转化为电压信号，采集到的电压信号输入给以运算放大器和减法器为基础的补偿相消电路，通过调节电阻R1消除产生的噪声信号，经过补偿相消电路后的电压信号通过特征滤波器进行滤波，通过计算机进行数据处理。

[0011] 进一步的，所述高焓激波风洞依次连接设置有卸爆段、爆轰段、驱动段、喷管，其设置为氢氧爆轰驱动、重活塞驱动式激波风洞，模拟焓值为10-25MJ/kg，气流速度5-7km/s，并设置有完备的风洞启动、及压力、激波速度测试系统。

[0012] 进一步的，所述探针和模型单元设置探针和飞行器模型，飞行器模型设置为有一定角度的尖劈模型，探针通过平面结构装配在尖劈模型表面，平面结构采用耐高温陶瓷将探针与模型绝缘，尖劈模型与支撑机构连接，通过支撑机构调节尖劈模型位于最佳实验位置。

[0013] 更进一步的，所述飞行器模型设置为采用不锈钢材质加工成尖劈，探针采用钼丝制备而成。

[0014] 一种基于高频静电探针的高超声速飞行器边界层电子密度诊断系统的运行方法，具体包含以下步骤：

[0015] S1：高焓激波风洞准备完毕后，信号调制单元输出扫描信号，开启高压功放单元给

探针加载扫描电压；

[0016] S2：触发器设置好采集延迟时间，控制高焓激波风洞工作，数据采集处理单元同步采集多周期扫描电压和电流信号；

[0017] S3：得到电压和电流信号多周期伏-安曲线；

[0018] S4：将伏-安曲线进行多周期平均，按照单探针理论依次获得电子温度和电子密度。

[0019] 进一步的，所述步骤S3的具体步骤为：

[0020] S301：首先将扫描电压信号和待求解的电流信号平滑，找出单个周期的最大最小区间；

[0021] S302：接着通过公式I＝U/Rs得到探针电流信号；

[0022] S303：接着将电流电压信号经过数据滤波，最终获得平滑的伏-安曲线。

[0023] 本发明的有益效果为：

[0024] (1)高焓激波风洞可实现焓值和气流速度的模拟，即最大程度模拟飞行器飞行状态；低温等离子体发生器压力很低且无法模拟流动状态，通常用于探针原理技术的验证，实验结果无法应用于工程应用；电弧风洞通常用于气动热防护试验，虽然可实现焓值模拟，但为达到高热流环境，喷管马赫数通常小于5，这与实际飞行环境差别较大，而电子密度的变化与实际流动状态密切相关。

[0025] 高焓激波风洞是复现高超声速飞行器流场的关键设备，可实现高超声速飞行器焓值、气流速度模拟，但由于其采用激波加热方式，导致有效流场时间仅为毫秒量级，此外高焓激波风洞高速气流环境会产生10kHz～100kHz特征噪声、流动噪声等离子体振动耦合形成复杂噪声严重干扰诊断信号。该系统的具体扫描参数可根据实验状态灵活调整。触发器用于控制风洞工作时间与探针数据采集的延迟时间实现完整伏安特性曲线多周期采集。使用电子学减法电路结合补偿极方式实现RLC干扰消除，并添加特征滤波器消除流动干扰，解决了利用高焓激波风洞研究复杂外形飞行器激波边界层和尾迹区电子密度和电子温度的高时间分辨率难题，实现高信噪比高时间分辨率诊断激波风洞电子密度、电子温度的目的。

[0026] (2)本发明系统中的减法电路和补偿极组合消除了在高频扫描时由于电路RLC导通特性带来的噪声干扰，经补偿后的噪声减少40dB以上，实现高频扫描；在高焓激波风洞工作有效时间内，可获得多个完整的伏-安特性曲线。特征滤波器消除10kHz～100kHz的流动噪声，去除了流动特征干扰，进一步提高信噪比，实现了高信噪比毫秒级时间分辨率的电子密度诊断。

[0027] (3)本系统信号调制单元可实现1kHz～100kHz扫描信号输出，根据不同的风洞状态调整到最佳扫描频率，提高诊断信号的精确性和静电探针的适用性；本发明的信号调制单元产生的高频扫描信号经高压功放单元功率放大后加载给探针，此时探针收集到电流信号，该信号经过滤波后被数据采集处理单元采集后输入到计算机的控制系统，采用高频扫描的方式获得完整伏安特性曲线，同时扫描电压±10V～±30V可调，扫描频率1kHz～100kHz可调，解决了高频扫描带来的RLC导通干扰，进一步提高适用性。

附图说明

[0028] 图1为一种基于高频静电探针的高超声速飞行器边界层电子密度诊断系统示意

图；

[0029] 图2为一种基于高频静电探针的高超声速飞行器边界层电子密度诊断系统流程图；

[0030] 图3为本发明中用于高焓激波风洞鞘套等离子体的高频补偿静电探针系获得待处理伏-安曲线流程图；

[0031] 图4为本发明实施例一种基于高频静电探针的高超声速飞行器边界层电子密度诊断系统中的伏-安曲线——补偿和滤波前伏-安曲线a。

[0032] 图5为本发明实施例一种基于高频静电探针的高超声速飞行器边界层电子密度诊断系统中的伏-安曲线——补偿和滤波后伏-安曲线b。

[0033] 其中，1、信号调制单元；2、高压功放单元；3、数据采集处理单元；4、高焓激波风洞；5、探针和模型单元；6、触发器。

具体实施方式

[0034] 为表明本发明的技术优势和目的性描述更加清楚，下面结合附图以及实例进行分析。实例只为阐述本发明的优势，并不对本发明产生限制。

[0035] 实施例1

[0036] 如图1所示，在本发明的实例中，一种基于高频静电探针的高超声速飞行器边界层电子密度诊断系统系统，包括信号调制单元1、高压功放单元2、数据采集处理单元3、高焓激波风洞4、探针和模型单元5、触发器6，用于产生扫描电压波形信号的所述信号调制单元1根据风洞工作状态输出合适频率的扫描信号，该信号经过所述高压功放单元2而被放大产生合适的扫描电压并通过隔离变压器实现高压功放单元2与探针单元的隔离，以避免等离子体噪声干扰的同时保护电路，所述探针和模型单元5中的探针设置于等离子体中，所述扫描电压加载在位于所述高焓激波风实验段的所述探针和模型单元5的单探针上，高焓激波风洞4用于模拟飞行器高速飞行环境，所述高焓激波风洞4产生的高温高速气流在飞行器模型前形成激波边界层诱导出等离子体，等离子体中的探针在电压的作用下收集电流信号经过所述数据采集处理单元3和扫描电压信号同步输入到计算机的控制系统。所述触发器6控制高焓激波风洞4工作以及扫描电压和电流信号采集的延迟时间，生成风洞工作时间内多周期完整伏-安曲线。

[0037] 高焓激波风洞4依次连接设置有卸爆段、爆轰段、驱动段、喷管，其设置为氢氧爆轰驱动、重活塞驱动式激波风洞，模拟焓值为10-25MJ/kg，气流速度5-7km/s，并设置有完备的风洞启动、及压力、激波速度测试系统。具体的是，高焓激波风洞4为中国科学院力学研究所的JF10高焓风洞，有效工作时间3ms。

[0038] 探针和模型单元5设置探针和飞行器模型，飞行器模型设置为有一定角度的尖劈模型，更为具体的是，飞行器模型设置为采用不锈钢材质加工成尖劈，探针采用钼丝制备而成，探针通过平面结构装配在尖劈模型表面，平面结构采用耐高温陶瓷将探针与模型绝缘，尖劈模型与支撑机构连接，通过支撑机构调节尖劈模型位于最佳实验位置。

[0039] 更为具体的是：使用信号调制单元1产生频率10KHz，振幅5V的正弦信号，该信号经过高压功放单元2的以AD810AN为基础的功率放大器后变成振幅为10V的扫描电压并通过隔离变压器同时加载在飞行器模型探针和绝缘哑针(参考线)电路上。飞行器模型设置为采用

不锈钢材质加工成尖劈，探针采用钼丝制备而成，直径5mm，使用耐高温陶瓷将探针与飞行器模型进行绝缘。使用DG645触发器6首先触发激波风洞，10ms后触发探针采集系统。运算放大器使用AD810AN，带宽1MHz，电流20mA，供电电压最大±15V。为运算放大器供电高线性直流电源为ZF-3002D，串联输出0～60V。本发明解决了利用高焓激波风洞4研究复杂外形飞行器激波边界层和尾迹区电子密度和电子温度的高时间分辨率难题。

[0040] 实施例2

[0041] 在实施例1的基础上，不同于实施例1，如图1所示，一种基于高频静电探针的高超声速飞行器边界层电子密度诊断系统，包括信号调制单元1、高压功放单元2、数据采集处理单元3、高焓激波风洞4、探针和模型单元5、触发器6，所述信号调制单元1设置为信号函数发生器，通过信号函数发生器产生不同波形、不同电压和频率的信号，具体的是，可以产生如正弦、锯齿等不同波形、可调扫描电压(±10V或者±30V)和可调测量频率(1kHz～100KHz)的调制信号，该信号调制单元1根据高焓激波风洞4的状态调整，输出最优扫描信号。用于诊断不同风洞状态下的等离子体参数。产生的信号需要高阻抗输出给高压功放单元2，即产生的信号配合高阻抗输出从而消除反射干扰。

[0042] 实施例3

[0043] 在实施例1的基础上，不同于实施例1，一种基于高频静电探针的高超声速飞行器边界层电子密度诊断系统，包括信号调制单元1、高压功放单元2、数据采集处理单元3、高焓激波风洞4、探针和模型单元5、触发器6，所述高压功放单元2用于将扫描信号功率放大，高压功放单元2设置有大功率高电压运算放大器、以RC滤波电路为基础的功率放大器，通过高线性度高电压直流电源给运算放大器提供电压，通过RC滤波电路消除由电源带来的纹波干扰，高压功放单元2(2)放置于铝质金属屏蔽盒内。

[0044] 高压功放单元2内还设置有以扼流圈为基础的隔离变压器，所述隔离变压器设置为扼流圈结构。可以保证窄频带通特性，隔离高压功放单元2和探针单元，以避免由于探针位置等离子体噪声和可能的高电压损坏功率放大器。

[0045] 其中变压器的次级线圈U2和U2’完全相同，保证产生的信号完全相同，其中U2’为参考线(绝缘哑针)提供电源。整个高压功放单元2电子学装置放置于铝质金属屏蔽盒内，用于屏蔽空间电磁信号产生的干扰。

[0046] 实施例4

[0047] 在实施例1的基础上，不同于实施例1，一种基于高频静电探针的高超声速飞行器边界层电子密度诊断系统，包括信号调制单元1、高压功放单元2、数据采集处理单元3、高焓激波风洞4、探针和模型单元5、触发器6，所述数据采集处理单元3包括电阻Rs、减法器、特征滤波器、电阻R1和计算机，其中R1阻值可调，通过电阻Rs将电流信号转化为电压信号，采集到的电压信号输入给以运算放大器和减法器为基础的补偿相消电路，通过调节电阻R1消除产生的噪声信号，经过补偿相消电路后的电压信号通过特征滤波器进行滤波，通过计算机进行数据处理。

[0048] 位于探针和参考线(绝缘哑针)的高性能电阻Rs和R1用于将电流信号转化为电压信号，其中R1阻值可调。通过运算放大器采集共模电压信号，采集到的信号输入给以运算放大器和减法器为基础的补偿相消电路，通过调节R1，实现将由导线杂散电容导致的RLC导通产生的噪声信号消除的目的，经过补偿相消电路后的信号输入特征滤波器进行滤波，进一

步去除由于流动产生的特征噪声，经过以上两步处理后(使用减法电路和补偿极组合的方法)信号噪声降低40dB以上，信噪比提高两个量级。用于诊断射频等离子体的电子密度、电子温度。整个数据采集处理单元3电子学装置置于铝质金属屏蔽盒内，用于屏蔽空间电磁信号产生的干扰。

[0049] 实施例5

[0050] 在实施例1的基础上，不同于实施例1，在本发明的实例中，如图2、图3、图4和图5所示，一种基于高频静电探针的高超声速飞行器边界层电子密度诊断系统的运行方法，具体包含以下步骤：

[0051] S1：激波风洞准备完毕后，信号调制单元1输出扫描信号，开启高压功放单元2给探针加载扫描10V电压；

[0052] S2：触发器6设置好延迟时间10ms，控制激波风洞工作，数据采集处理单元3同步采集多周期探针电流和电压信号；

[0053] S3：采集到的电压和电流信号，通过拟合实验前初始时间段的数据并延伸到实验时段得到零点，用采集到的数据减去零点获得真实数据，然后经过滤波后得到多周期伏-安曲线；

[0054] S4：将伏-安曲线进行多周期平均，按照单探针理论依次获得电子温度和电子密度。

[0055] 在上述的步骤S3具体步骤为：

[0056] S301：首先将扫描电压信号和待求解的电流信号平滑，找出单个周期的最大最小区间。

[0057] S302：接着讲通过公式I＝U/Rs，其中Rs＝1000Ω，得到探针电流信号。

[0058] S303：接着将电流电压信号经过滤波，最终获得平滑的伏-安曲线。

[0059] 以上所述并非是对本发明的限制，应当指出：对于本技术领域的普通技术人员来说，在不脱离本发明实质范围的前提下，还可以做出若干变化、改型、添加或替换，这些改进和润饰也应视为本发明的保护范围。

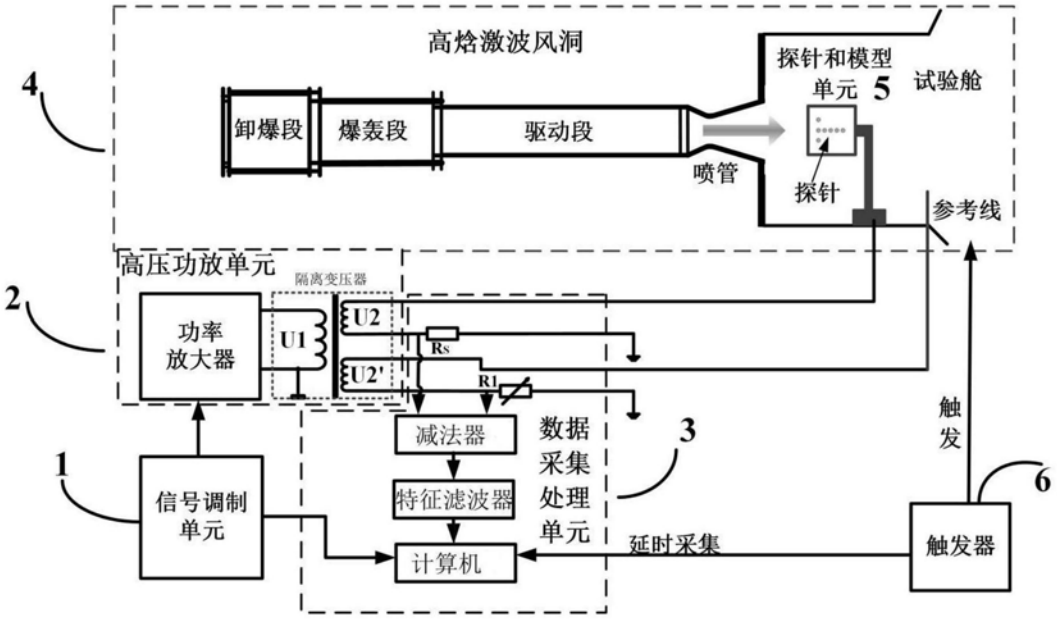

高焓激波风洞
4
卸爆段
爆轰段
驱动段
喷管
探针和模型
单元
5
试验舱
探针
参考线
高压功放单元
隔离变压器
2
功率
放大器
U1
U2
U2'
Rs
R1
减法器
特征滤波器
计算机
数据
采集
处理
单元
3
1
信号调制
单元
延时采集
触
发
6
触发器

图1

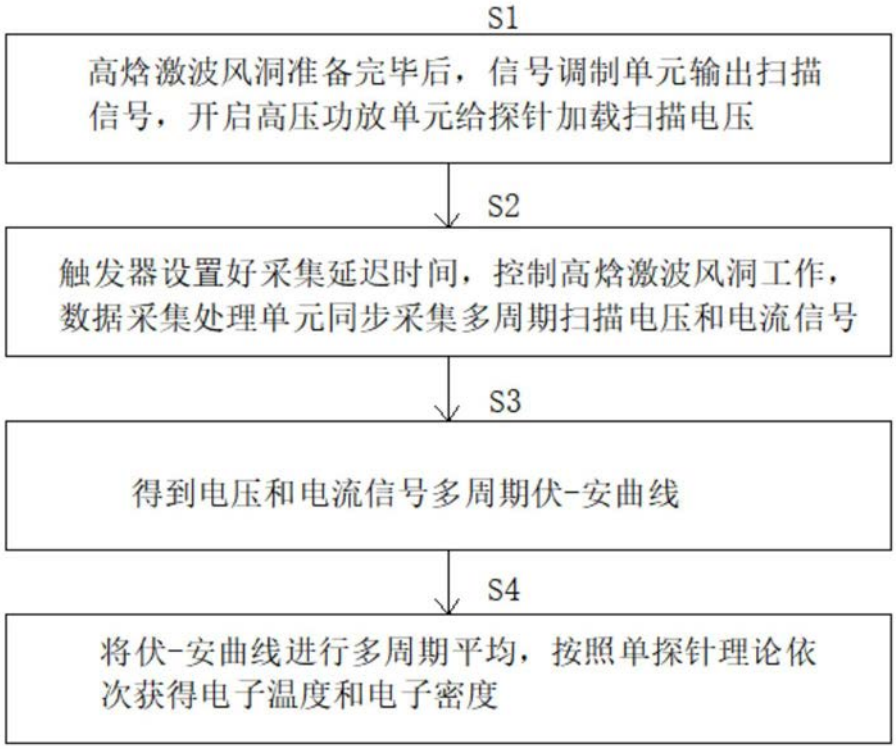

S1
高焓激波风洞准备完毕后，信号调制单元输出扫描信号，开启高压功放单元给探针加载扫描电压
S2
触发器设置好采集延迟时间，控制高焓激波风洞工作，数据采集处理单元同步采集多周期扫描电压和电流信号
S3
得到电压和电流信号多周期伏-安曲线
S4
将伏-安曲线进行多周期平均，按照单探针理论依次获得电子温度和电子密度

图2

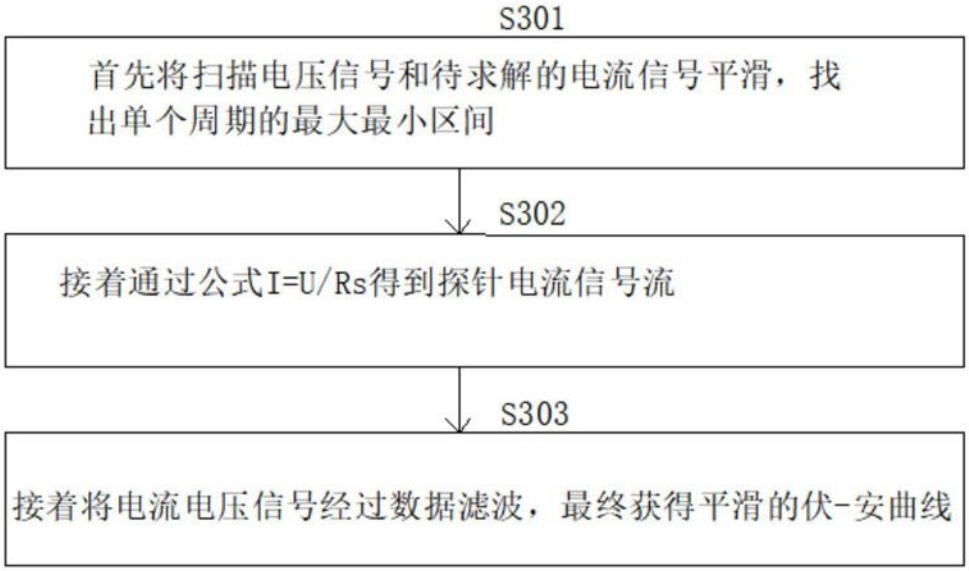

S301
首先将扫描电压信号和待求解的电流信号平滑，找出单个周期的最大最小区间
S302
接着通过公式I=U/Rs得到探针电流信号流
S303
接着将电流电压信号经过数据滤波，最终获得平滑的伏-安曲线

图3

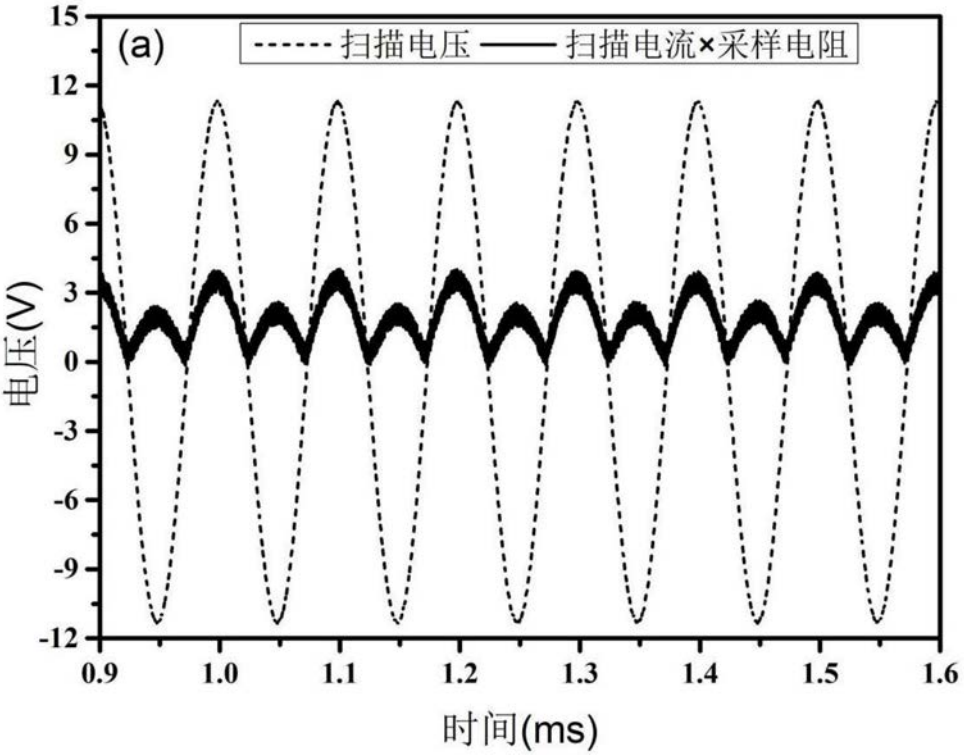

(a)
扫描电压
扫描电流×采样电阻
电压(V)
时间(ms)
15
12
9
6
3
0
-3
-6
-9
-12
0.9
1.0
1.1
1.2
1.3
1.4
1.5
1.6

图4

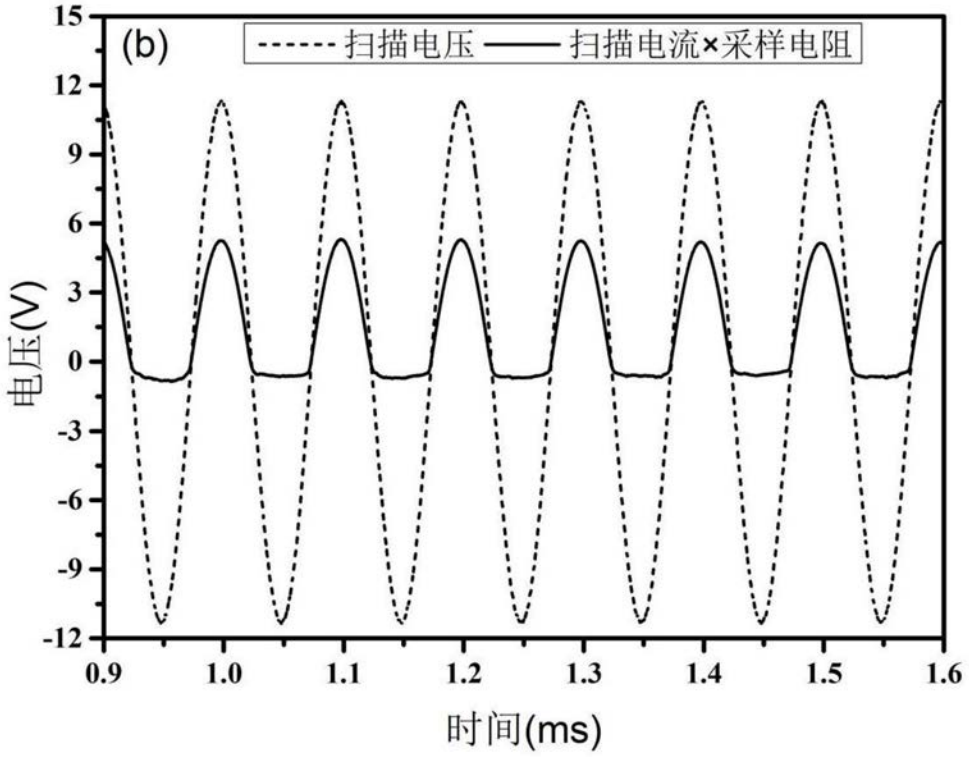


图5