

# (12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 102937655 A

(43) 申请公布日 2013. 02. 20

(21) 申请号 201210427360. 0

(22) 申请日 2012. 10. 31

(71) 申请人 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 张仕忠 陈宏

(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 王艺

(51) Int. Cl.  
G01P 5/10 (2006. 01)

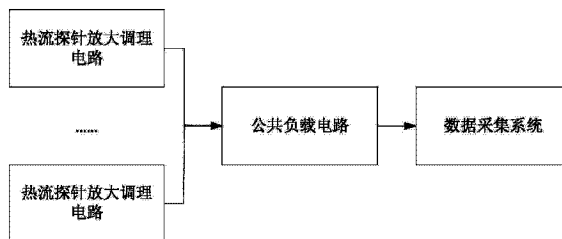
权利要求书 1 页 说明书 6 页 附图 7 页

## (54) 发明名称

一种测量激波速度的系统和方法

## (57) 摘要

本发明公开了一种测量激波速度的系统和方法,其中,所述系统包括公共负载电路、数据采集系统以及两个或两个以上热流探针放大调理电路,所述热流探针放大调理电路、公共负载电路和数据采集系统依次相连,所述热流探针放大调理电路采集激波温度信号,将激波温度信号转换为激波热流脉冲信号,加载到公共负载电路上,数据采集装置采集所述公共负载电路,得到激波脉冲时间序列信号,根据所述激波脉冲时间序列信号得到激波速度。本发明采用热流信号作为信号触发源,实现激波速度瞬态测量,其适用范围更广,可以用于一般激波管和激波风洞测量激波速度,具有优异的实用价值。



1. 一种测量激波速度的系统,其特征在于,包括公共负载电路、数据采集系统以及两个或两个以上热流探针放大调理电路,所述热流探针放大调理电路、公共负载电路和数据采集系统依次相连,所述热流探针放大调理电路采集激波温度信号,将激波温度信号转换为激波热流脉冲信号,加载到公共负载电路上,数据采集装置采集所述公共负载电路,得到激波脉冲时间序列信号,根据所述激波脉冲时间序列信号得到激波速度。

2. 如权利要求 1 所述的系统,其特征在于,

所述热流探针放大调理电路包括:依次相连的热流探针电路、信号放大电路、热电模拟网络电路、二级放大电路和脉冲触发电路,所述热流探针电路采集激波温度信号,经过信号放大电路将激波温度信号放大后,热电模拟网络电路将放大后的激波温度信号转换为激波热流信号,经过二级放大电路将激波热流信号放大后,脉冲触发电路将放大后的激波热流信号转换为激波热流脉冲信号,加载到公共负载电路上。

3. 如权利要求 1 所述的系统,其特征在于,

所述热流探针电路采用同轴热电偶作为激波热流探针,采集激波温度信号。

4. 如权利要求 1 所述的系统,其特征在于,

所述公共负载电路包含公共负载电阻,所述热流探针放大调理电路将激波热流脉冲信号加载到所述公共负载电阻上,所述数据采集系统采集公共负载电阻两端的电压信号得到激波脉冲时间序列信号。

5. 如权利要求 1 所述的系统,其特征在于,

所述数据采集装置根据激波脉冲时间序列信号中各脉冲的时间间隔和各热流探针电路中同轴热电偶的间隔距离,换算出激波速度。

6. 一种激波管中测量激波速度的方法,其特征在于,包括:

采集激波管中多个位置的激波温度信号,转换为激波热流脉冲信号;

将所述多个位置的激波热流脉冲信号合成激波脉冲时间序列信号,根据所述激波脉冲时间序列信号得到激波速度,实现激波速度瞬态测量。

7. 如权利要求 6 所述的方法,其特征在于,

所述采集激波管中多个位置的激波温度信号,转换为激波热流脉冲信号的步骤包括:

所述采集激波管中多个位置的激波温度信号,将激波温度信号放大,转换为激波热流信号;其中,激波热流信号是激波温度信号的导数;

将激波热流信号放大,再转换为激波热流脉冲信号。

8. 如权利要求 6 所述的方法,其特征在于,

采用同轴热电偶作为激波热流探针,采集激波温度信号;所述同轴热电偶的激波热流探针跟工业用铠装热电偶区别很大,工业热电偶响应时间一般为秒级,而本方法所用的热电偶探针响应时间则为微秒级,其结构形式也与工业热电偶不同。

9. 如权利要求 6 所述的方法,其特征在于,

根据激波脉冲时间序列信号中各脉冲的时间间隔和各位置的间隔距离,换算出激波速度。

## 一种测量激波速度的系统和方法

### 技术领域

[0001] 本发明涉及激波领域,尤其涉及一种测量激波速度的系统和方法。

### 背景技术

[0002] 激波速度测量是激波管和激波风洞运行状态的一个重要测量参数,一般都是通过测量传感器信号之间的时间间隔,从而换算得出激波马赫数。常用的激波速度测量方法有:通过压力传感器测量激波压力信号;通过光学方法测量激波波面发光和激波前后密度的跳跃;通过电离探针测出空气电离信号。

[0003] 在激波管各连接环处安装压力传感器,既可以测出激波压力信号,同时也能得到激波速度信息,是一种比较实用的激波管运行状态测量手段。常用的压力传感器有压电传感器和压阻传感器,实验测试中每个传感器都需要占用一个放大器通道和一个数据采集通道。在小型激波管和激波风洞设备中,所需传感器个数并不是很多,可以采用这种压力测试手段,但在大型激波管和激波风洞设备中,由于所需测点数量较多,如果全部采用压力传感器测量会造成测试系统成本很高,特别是激波管的有些位置,我们只关心激波传播速度而忽略激波压力信息,这时候我们就需要用一种成本低、结构简单的激波速度测试系统。

[0004] 电离探针作为一种激波测速方法,其结构简单,在空气解离的条件下,可以很好的测出激波速度。但是在激波速度较低、波后温度达不到空气电离程度的情况下,实验气流无法满足传统电离探针的工作条件,传统电离探针失效,这时候就需要研究一种新的激波测速装置。

### 发明内容

[0005] 本发明针对传统电离探针在激波速度较低、波后温度达不到空气电离程度的情况下无法测出激波速度的弊端,提出一种测量激波速度的系统和方法,实现了单通道、多测点的激波风洞激波速度测试。

[0006] 为了解决上述问题,本发明提供一种测量激波速度的系统,包括公共负载电路、数据采集系统以及两个或两个以上热流探针放大调理电路,所述热流探针放大调理电路、公共负载电路和数据采集系统依次相连,所述热流探针放大调理电路采集激波温度信号,将激波温度信号转换为激波热流脉冲信号,加载到公共负载电路上,数据采集装置采集所述公共负载电路,得到激波脉冲时间序列信号,根据所述激波脉冲时间序列信号得到激波速度。

[0007] 优选地,上述系统还具有以下特点:

[0008] 所述热流探针放大调理电路包括:依次相连的热流探针电路、信号放大电路、热电模拟网络电路、二级放大电路和脉冲触发电路,所述热流探针电路采集激波温度信号,经过信号放大电路将激波温度信号放大后,热电模拟网络电路将放大后的激波温度信号转换为激波热流信号,经过二级放大电路将激波热流信号放大后,脉冲触发电路将放大后的激波热流信号转换为激波热流脉冲信号,加载到公共负载电路上。

- [0009] 优选地,上述系统还具有以下特点:
- [0010] 所述热流探针电路采用同轴热电偶作为激波热流探针,采集激波温度信号。
- [0011] 优选地,上述系统还具有以下特点:
- [0012] 所述公共负载电路包含公共负载电阻,所述热流探针放大调理电路将激波热流脉冲信号加载到所述公共负载电阻上,所述数据采集系统采集公共负载电阻两端的电压信号得到激波脉冲时间序列信号。
- [0013] 优选地,上述系统还具有以下特点:
- [0014] 所述数据采集装置根据激波脉冲时间序列信号中各脉冲的时间间隔和各热流探针电路中同轴热电偶的间隔距离,换算出激波速度。
- [0015] 为了解决上述问题,本发明还提供一种激波管中测量激波速度的方法,包括:
- [0016] 采集激波管中多个位置的激波温度信号,转换为激波热流脉冲信号;
- [0017] 将所述多个位置的激波热流脉冲信号合成激波脉冲时间序列信号,根据所述激波脉冲时间序列信号得到激波速度,实现激波速度瞬态测量。
- [0018] 优选地,上述方法还具有以下特点:
- [0019] 所述采集激波管中多个位置的激波温度信号,转换为激波热流脉冲信号的步骤包括:
- [0020] 所述采集激波管中多个位置的激波温度信号,将激波温度信号放大,转换为激波热流信号;其中,激波热流信号是激波温度信号的导数;
- [0021] 将激波热流信号放大,再转换为激波热流脉冲信号。
- [0022] 优选地,上述方法还具有以下特点:
- [0023] 采用同轴热电偶作为激波热流探针,采集激波温度信号;所述同轴热电偶的激波热流探针跟工业用铠装热电偶区别很大,工业热电偶响应时间一般为秒级,而本方法所用的热电偶探针响应时间则为微秒级,其结构形式也与工业热电偶不同。
- [0024] 优选地,上述方法还具有以下特点:
- [0025] 根据激波脉冲时间序列信号中各脉冲的时间间隔和各位置的间隔距离,换算出激波速度。
- [0026] 本发明具有如下优点:
- [0027] 1、传统用压电传感器测量激波压力信号,然后从压力信号中获取激波速度信息,每个压电传感器需要占用一个数据采集系统,而激波风洞数据采集系统都是高速数据采集(采样速率至少 1MHz),所以数据采集系统成本很高,占用通道过多直接影响实验成本。而本系统将各个探针信号加载到同一个负载上,只需要占用一个数据采集通道即可,大大降低了实验成本。
- [0028] 2、传统电离探针系统是通过空气解离来实现信号采集的,在激波速度较低、波后温度达不到空气电离程度的情况下,实验气流无法满足传统电离探针的工作条件,传统电离探针无法使用。而本系统在空气解离和不解离的条件下都可以测出激波速度,覆盖的实验条件范围广。
- [0029] 3、用热流探针测量激波速度这种方法是一种创新,之前是没有的。本系统使用的热流探针具有体积小,频响快的优点,处于国际领先水平。
- [0030] 4、本系统成本低,通道数量可以扩展,具有很强的使用价值。

## 附图说明

- [0031] 图 1 是本发明实施例的测量激波速度系统的示意图；
- [0032] 图 2 是本发明实施例的热流探针放大调理电路的示意图；
- [0033] 图 3 是本发明实施例的热流探针放大调理电路的电路组成示意图；
- [0034] 图 4 是热流探针的结构形式示意图；
- [0035] 图 5 是本发明实施例的同轴热电偶测量壁面温度和热流曲线图；
- [0036] 图 6 是同轴热电偶热流响应曲线图；
- [0037] 图 7 是测量激波速度系统的公共负载电路示意图；
- [0038] 图 8 是高焓激波管示意图；
- [0039] 图 9 是本发明应用实例的温度、热流及探针信号曲线图；
- [0040] 图 10 为使用热流作为触发信号曲线图；
- [0041] 图 11 为热电偶探针重复性试验的曲线图。

## 具体实施方式

[0042] 下文中将结合附图对本发明的实施例进行详细说明。需要说明的是,在不冲突的情况下,本申请中的实施例及实施例中的特征可以相互任意组合。

[0043] 如图 1 所示,本发明实施例的测量激波速度的系统,包括公共负载电路、数据采集系统以及两个或两个以上热流探针放大调理电路,所述热流探针放大调理电路、公共负载电路和数据采集系统依次相连,所述热流探针放大调理电路采集激波温度信号,将激波温度信号转换为激波热流脉冲信号,加载到公共负载电路上,数据采集装置采集所述公共负载电路,得到激波脉冲时间序列信号,根据所述激波脉冲时间序列信号得到激波速度。

[0044] 如图 2 和图 3 所示,优选的热流探针放大调理电路包括:依次相连的热流探针电路、信号放大电路、热电模拟网络电路、二级放大电路和脉冲触发电路,所述热流探针电路采集激波温度信号,经过信号放大电路将激波温度信号放大后,热电模拟网络电路将放大后的激波温度信号转换为激波热流信号,经过二级放大电路将激波热流信号放大后,脉冲触发电路将放大后的激波热流信号转换为激波热流脉冲信号,加载到公共负载电路上。

[0045] 如图 3 所示,为优选的热流探针放大调理电路的电路示意图,其中,热流探针电路采用热电偶作为激波热流探针,采集激波温度信号。

[0046] 热流探针电路包括热电偶和电阻 R12、R13、R9、R10 和 R11,其中电阻 R12 和 R13 串联,电阻 R12 一端接电源 VCC,另一端接 R13,R13 一端接 R12,另一端接地。电阻 R9、R10 和 R11 依次串联,电阻 R9 的一端接电源 VCC,另一端接 R10,R11 一端接 R10,另一端接地。其中电阻 R10 为可调电阻。热电偶的一端接电阻 R12 和 R13 之间,另一端接信号放大电路的电阻 R8。

[0047] 信号放大电路包括放大器 U2、电阻 R8、R7、电容 C11 和 C7。其中电阻 R8 一端接热电偶,另一端接放大器 U2 的端口 2,放大器 U2 的端口 3 接到可调电阻 R10 的触点端,放大器 U2 的端口 4 接电源 VEE,放大器 U2 的端口 7 接电源 VDD,放大器 U2 的端口 6 (输出端)接热电模拟网络电路的电容 C4、C5 和 C6,电容 C11 一端接电源 VEE,一端接地,电容 C7 一端接电源 VDD,一端接地。电阻 R7 一端接放大器 U2 的端口 2,另一端接放大器 U2 的端口 6。

[0048] 热电模拟网络电路包括电容 C4、C5、C6，电阻 R4、R5 和 R6。其中电容 C6 和电阻 R6 串联，再与电容 C5 并联，电阻 R5 的一端接电容 R5 和电阻 R6，另一端接电容 C4，电容 C4 一端接电容 C5、C6 和放大器 U2 的端口 6，另一端接电阻 R4 和 R5，电阻 R4 一端接电容 C4 和电阻 R5，另一端接二级放大电路的放大器 U1 的端口 2。

[0049] 二级放大电路包括放大器 U1、电阻 R3 和电容 C2、C3。其中放大器 U1 的端口 2 接电阻 R4，放大器 U1 的端口接电阻 R3，R3 的另一端接地。放大器 U1 的端口 4 接电源 VEE，放大器 U1 的端口 7 接电源 VDD，放大器 U1 的端口 6（输出端）接脉冲触发电路的二极管 D2 的阳极，电容 C2 一端接电源 VEE，一端接地，电容 C3 一端接电源 VDD，一端接地。电阻 R2 一端接放大器 U1 的端口 2，另一端接放大器 U1 的端口 6。

[0050] 脉冲触发电路包括二极管 D1、D2，电阻 R1，电容 C1，发光二极管 LED1（指示灯）和单向可控硅 SCR1。其中二极管 D2 的阳极接放大器 U1 的端口 6，阴极接单向可控硅 SCR1 的控制极。单向可控硅 SCR1 的阳极接电阻 R1 和电容 C1，阴极接地。电阻 R1 的一端接单向可控硅 SCR1 的阳极和电容 C1，另一端接发光二极管 LED1 的阴极，发光二极管 LED1 的阳极接电源 VDD。电容 C1 的一端接电阻 R1，另一端接二极管 D1 的阴极，二极管 D1 的阳极接公共负载电路。

[0051] 激波测速探针需要测量激波管内的一种变化量，而激波管内气体化学反应除了压力变化外还有温度变化。充分利用热电偶频响快的优点，优选采用热电偶作为热流探针，通过信号放大和脉冲触发电路，实现了单通道、多测点的激波测速。

[0052] 热电偶热流探针是一种基于热电效应的温度传感器，本发明中采用专用同轴热电偶探针测量热流信号，所使用的热电偶探针跟工业用铠装热电偶区别很大，工业热电偶响应时间一般为秒级，而本系统所用的热电偶探针响应时间则为微秒级，其结构形式也与工业热电偶不同，其测量原理是将两种不同材料的导体或半导体 A 和 B 连接成一个闭合回路。当导体 A 和 B 之间存在温度差时，两者之间便产生电动势，因而在回路中形成电流，这种现象称为塞贝克效应。热流探针的结构如图 4 所示，将康铜丝穿入紫铜管中，使用环氧树脂隔离，表面使用机械打磨使其导通，从而构成铜—康铜热电偶。

[0053] 同轴热电偶优点是频响高，适用温度范围较宽，抗冲刷能力较好。

[0054] 在探针设计中，首先通过现有的实验设备测量同轴热电偶的频响特性，图 5 是使用热电偶测激波管壁面温度和热流的电压信号（未进行换算处理），放大器采用东华 DH-3840P 放大器。

[0055] 从图 5 中可以看出，热流响应比温度曲线要快，对图 5 的热流曲线进行局部放大，如图 6 所示。

[0056] 图 6 说明同轴热电偶热流响应在微秒量级，其频率响应完全可以用来作为激波测速探针。

[0057] 由于同轴热电偶信号很弱，所以必须先对热电偶温度信号进行放大。由图 5 可知，要提高热电偶探针激波测速系统的响应时间，必须使用热流信号作为触发源，所以电路设计中需要通过热电模拟网络电路将温度信号转换成热流信号。

[0058] 如图 7 所示，公共负载电路包含公共负载电阻 R0，热流探针放大调理电路将激波热流脉冲信号加载到公共负载电阻 R0 上，数据采集系统采集公共负载电阻 R0 两端的电压信号得到激波脉冲时间序列信号。

[0059] 如图 8 所示,在激波管各个中间环①~⑩的位置,都可分别安装有热流探针,通过热流探针探测激波达到信号,然后通过时间间隔和间隔距离,换算出激波管内激波运行速度。

[0060] 下面通过具体实验说明本发明的效果:

[0061] 本文实验所用的爆轰激波管如图 8 所示。该设备激波管全长 31m,包括驱动段、被驱动段和卸爆段,内径均为 224mm;试验段直径 1m、长大于 8m。实验气体为空气,驱动气体是氢气和氧气,使用火花塞+点火管装置点火。

[0062] 为了获得最佳的运行时间,驱动段和被驱动段最佳长度比是根据模拟飞行马赫数不同计算出来。该激波管比较适合模拟飞行高度  $H=30\sim 60\text{km}$ ,飞行马赫数  $8\sim 18$  范围内的模型头部驻点区气动加热实验。

[0063] 实验中同轴热电偶探针安装在标号⑧和⑨的位置,同时,在这两个位置分别安装有压电传感器,用来作为本系统测量的对比信号。本次实验激波管运行激波马赫数为 3.0,实验气体温度计算公式如下:

$$[0064] \quad T_2 = \frac{[2\gamma_1 M_s^2 - (\gamma_1 - 1)][(\gamma_1 - 1)M_s^2 + 2]}{(\gamma_1 + 1)^2 M_s^2} T_1$$

[0065] 式中

[0066]  $T_1$ ——被驱动段初始温度

[0067]  $\gamma_1$ ——被驱动段气体比热比,当空气时,  $\gamma_1=1.4$

[0068]  $M_s$ ——为激波马赫数

[0069] 计算结果为 804K,低于空气解离温度。

[0070] 如图 9 所示,为使用本发明的系统得到的一个热电偶探针测点的温度、热流及探针脉冲信号,激波达到时温度平缓上升,而热流值则会出现尖峰信号。

[0071] 如图 10 所示,为使用热流作为触发信号源测得激波速度信号,可以看出,采用热流作为激波信号源,可以保证触发无延时,能够获得比较准确的激波速度。

[0072] 图 10 说明使用热电偶作为激波速度探针,其测量结果可以和压电传感器一样准确,但本系统的成本却要低很多。

[0073] 如图 11 所示,为热电偶激波测速探针多次试验结果,从图中可以看出,本测速系统重复性很好。

[0074] 本发明采用热流信号作为信号触发源,实现激波速度瞬态测量。激波管中气流产生的激波所引起的压力和温度变化都是突变的,压力和温度变化速率相同,热流信号是温度信号的导数,其反应速度比温度信号更快,所以能够更准确的反应激波速度。

[0075] 相对于传统电离探针系统,本系统使用同轴热电偶作为探针,其频响可以满足测试要求,在使用温度和热流作为触发信号的对比实验中可以看出,只有使用热流信号才能满足激波速度测量时间要求。

[0076] 本系统克服了传统电离探针在激波速度较低、波后温度达不到空气电离程度的情况下无法测出激波速度的弊端,其适用范围更广,可以用于一般激波管和激波风洞测量激波速度需求,具有很好的实用价值。

[0077] 以上所述仅为本发明的优选实施例而已,并不用于限制本发明,对于本领域的技术人员来说,本发明可以有各种更改和变化。凡在本发明的精神和原则之内,所作的任何修

改、等同替换、改进等,比如,对实例中的工艺参数进行了简单的改变,均应包含在本发明的保护范围之内。



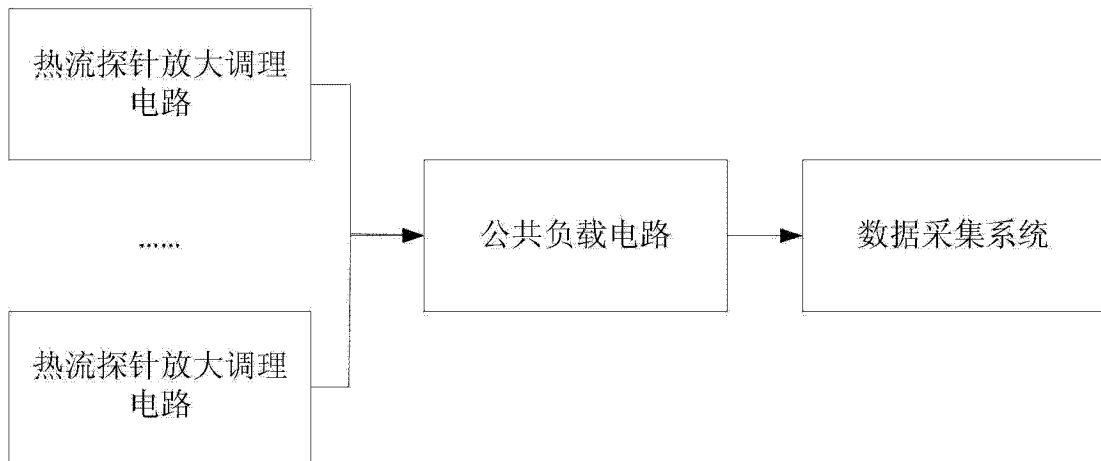


图 1

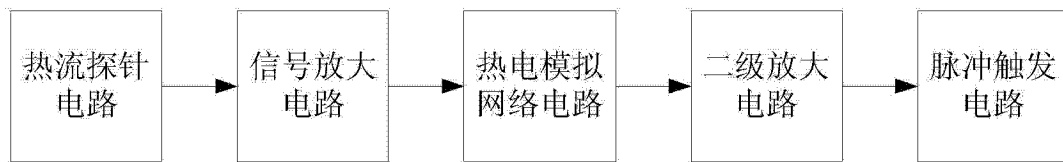


图 2

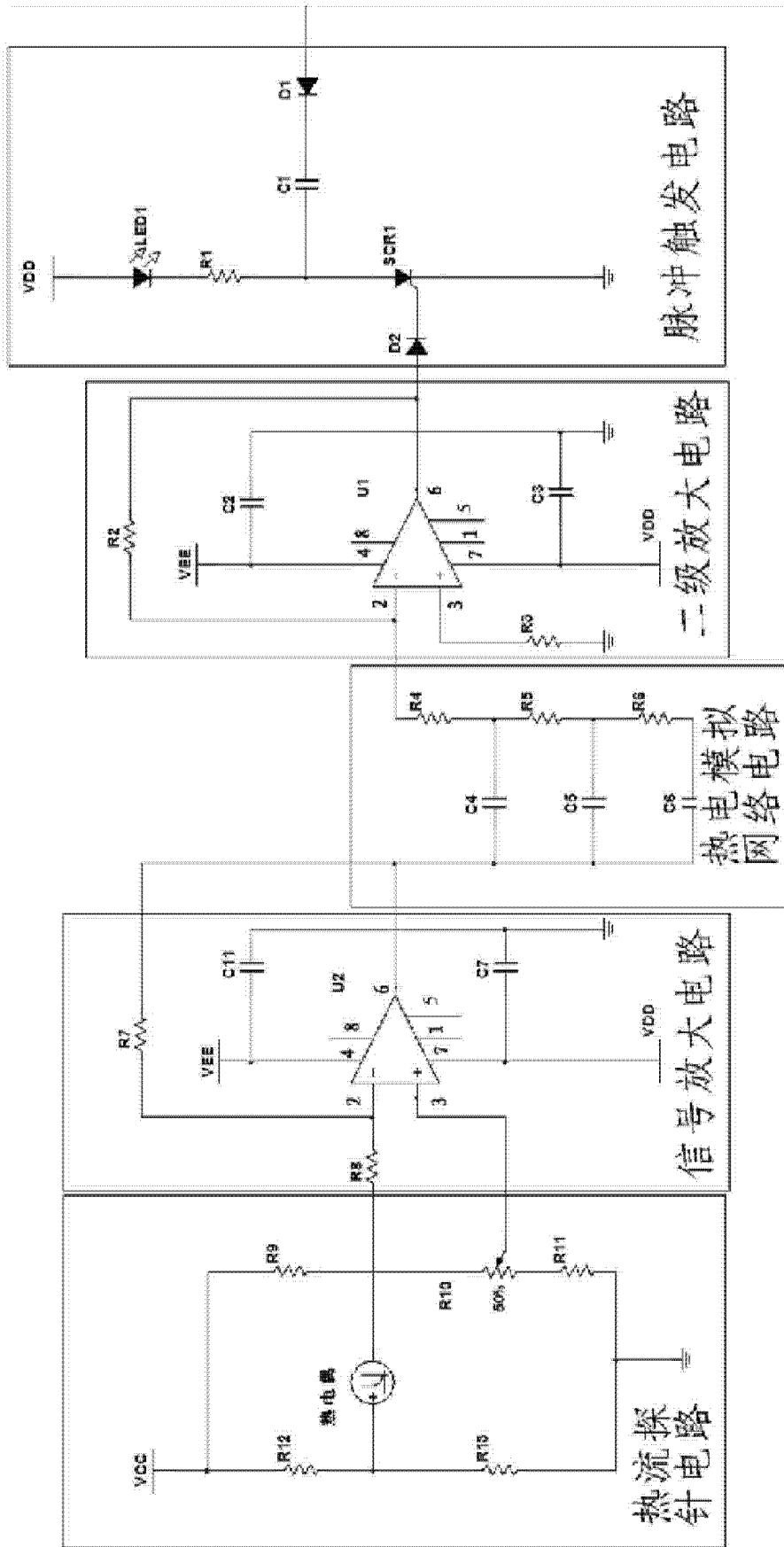


图 3

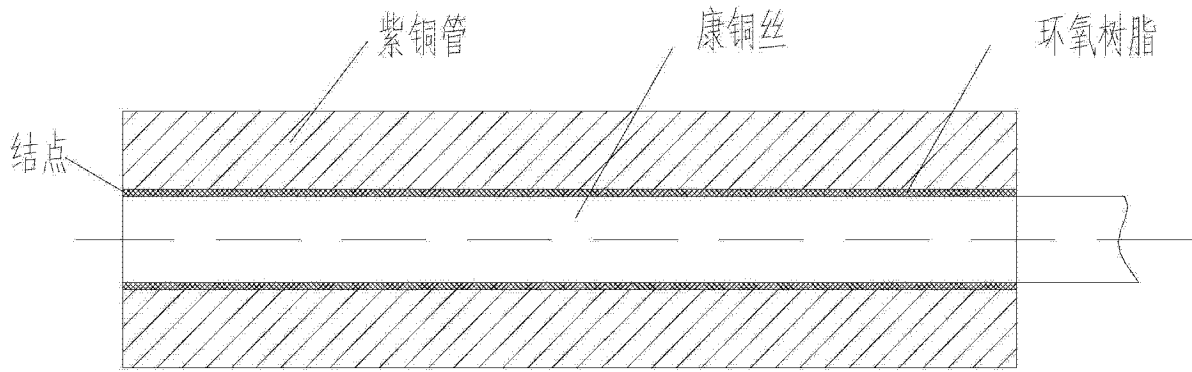


图 4

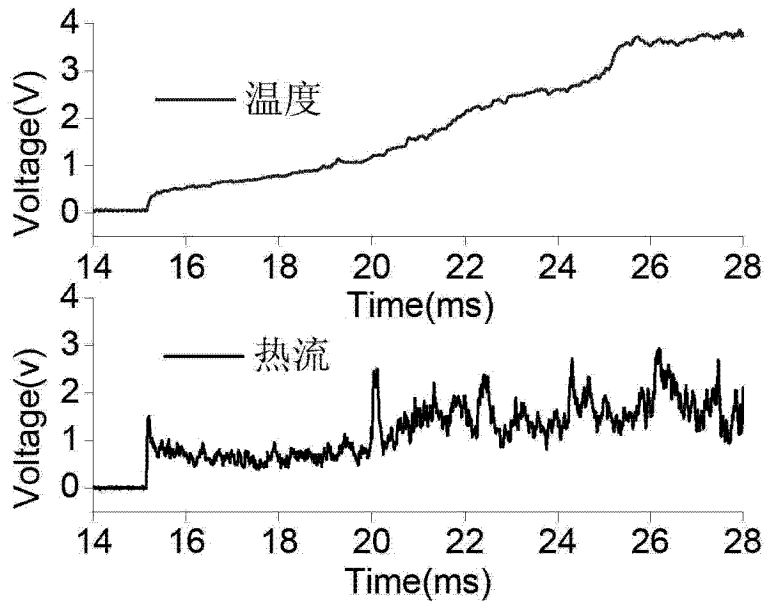


图 5

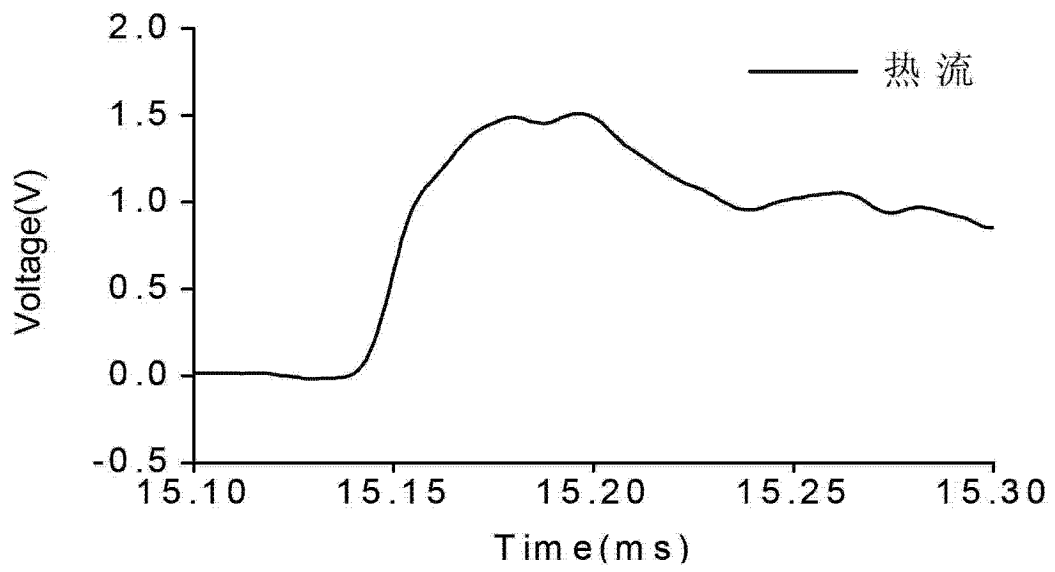


图 6

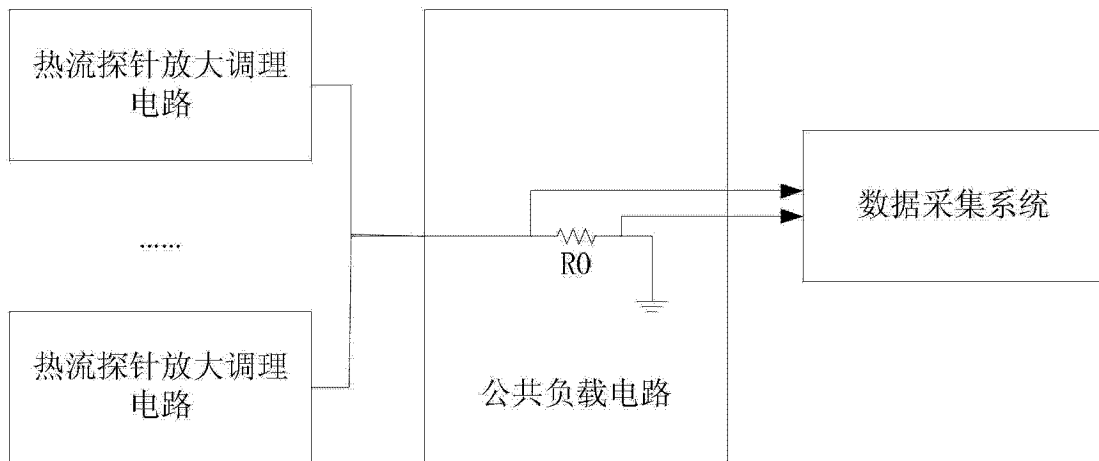


图 7

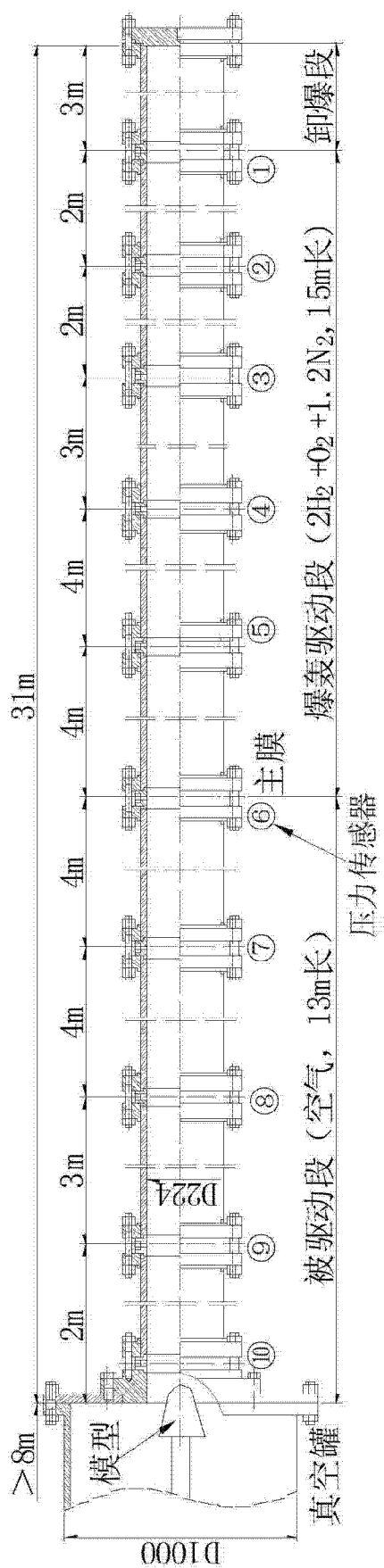


图 8

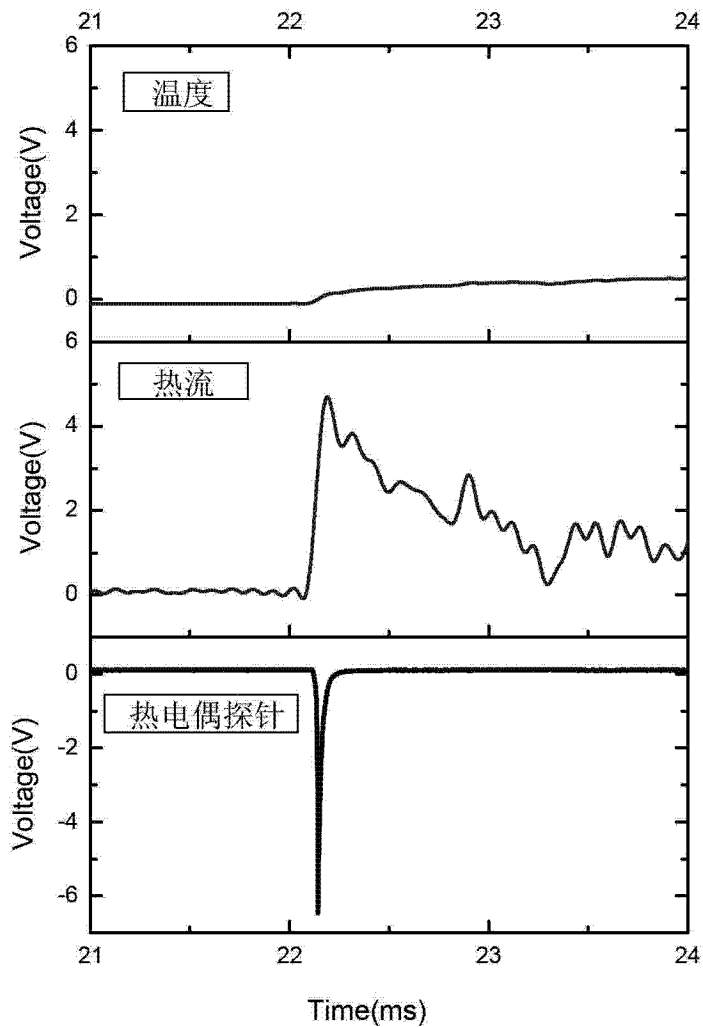


图 9

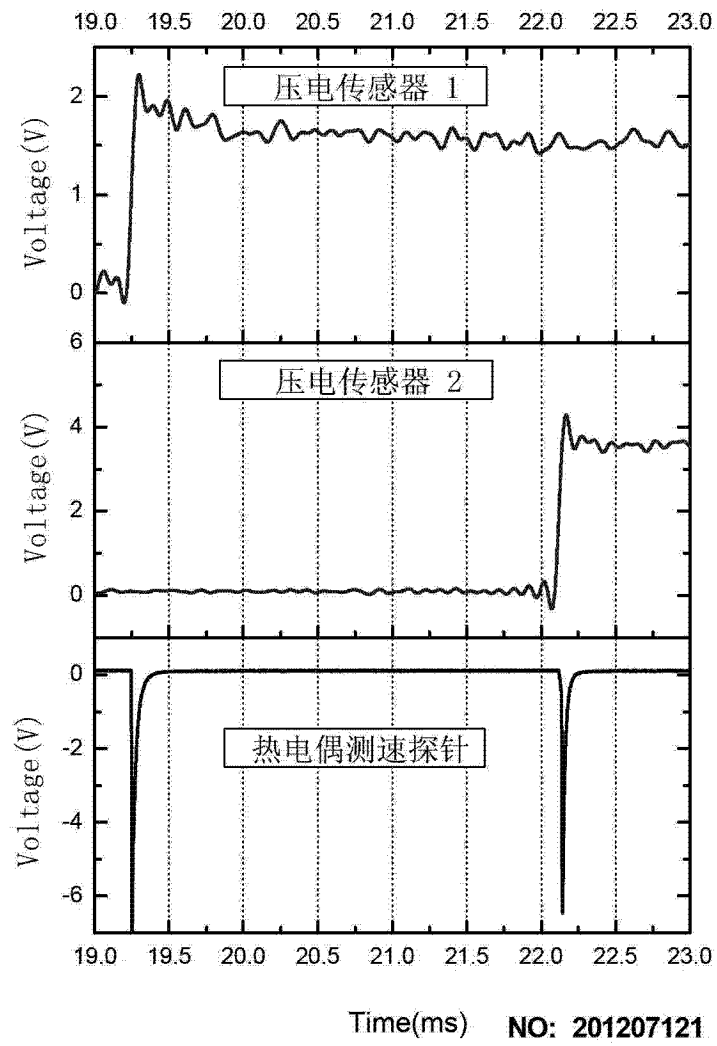


图 10

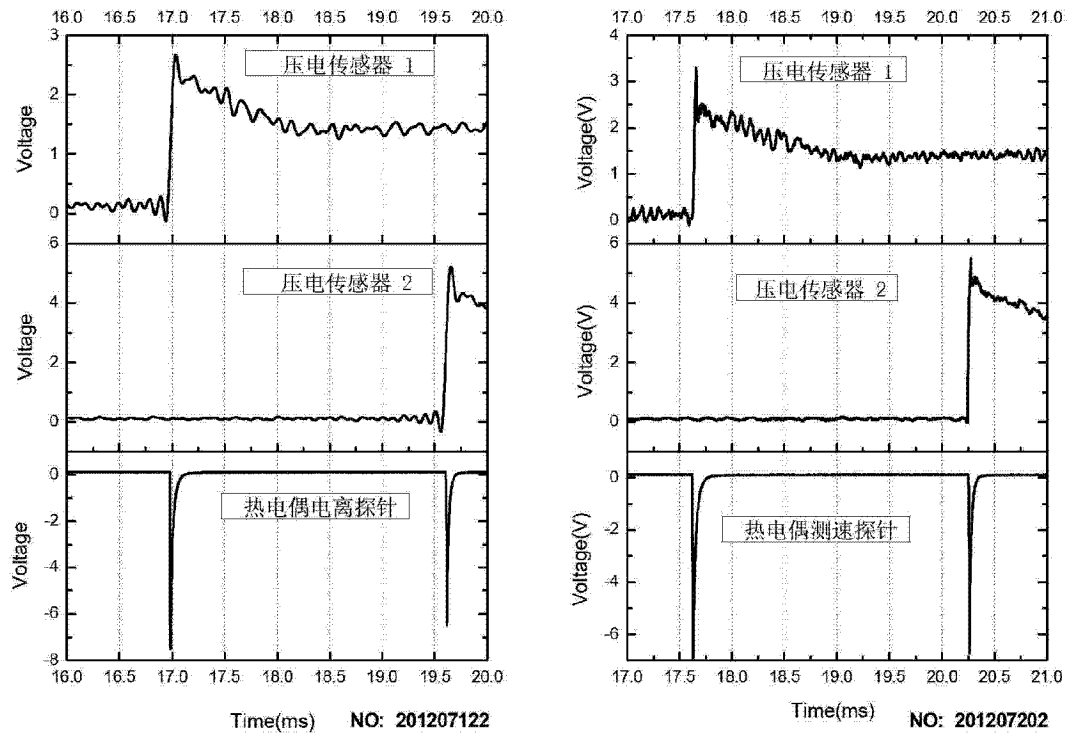


图 11