



(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 101978344 A

(43) 申请公布日 2011. 02. 16

(21) 申请号 200980110282. 8

(51) Int. Cl.

(22) 申请日 2009. 08. 07

G06F 3/041 (2006. 01)

G06F 3/038 (2006. 01)

(30) 优先权数据

0814506. 2 2008. 08. 08 GB

(85) PCT申请进入国家阶段日

2010. 09. 21

(86) PCT申请的申请数据

PCT/JP2009/064366 2009. 08. 07

(87) PCT申请的公布数据

W02010/016627 EN 2010. 02. 11

(71) 申请人 日本写真印刷株式会社

地址 日本京都府

(72) 发明人 尼尔·约翰·哈里斯

(74) 专利代理机构 北京集佳知识产权代理有限公司

11227

代理人 王萍 李春晖

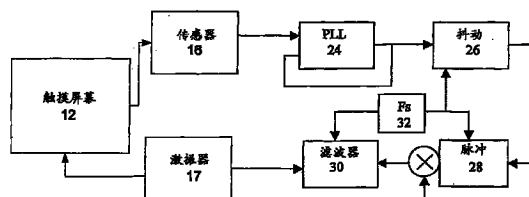
权利要求书 1 页 说明书 12 页 附图 10 页

(54) 发明名称

触敏设备

(57) 摘要

包括触敏屏幕的装置,该触敏屏幕具有适于接收用户经由手持触笔的手写内容的面,其中该屏幕包括激励屏幕振动的部件,以便于当触笔在屏幕的该面上移动时,将振动传送到触笔以模拟在纸上书写的书写器具的感受。该装置可以包括用于对施加到激励部件的电信号进行周期调制的部件以及用于对该电信号进行幅度调制的部件。该装置可以包括用于感测触笔在屏幕面上移动的速度度的部件以及用于根据感测到的速度对振动进行调制的部件。



1. 一种当使用手持触笔在触敏屏幕上书写时模拟在纸上书写的书写器具的感受的方法,包括将所述屏幕布置为在被所述触笔接触时振动以提供用户反馈。

2. 如权利要求 1 所述的方法,包括:感测所述触笔在所述屏幕面上移动的速度,以及根据感测到的速度对所述振动进行调制。

3. 如权利要求 1 或 2 所述的方法,包括:将弯曲波施加到所述屏幕以提供所述振动。

4. 如前面任一权利要求所述的方法,包括:通过对所述振动进行周期调制来对所述振动进行布置以模拟在纸上移动的书写器具的拖拽。

5. 如前面任一权利要求所述的方法,包括:通过对所述振动进行幅度调制来对所述振动进行布置以模拟在纸上移动的书写器具的轴向往复移动。

6. 如前面任一权利要求所述的方法,包括:通过将所述触笔配置为响应于所述屏幕的振动而被激励到束谐振来对所述振动进行布置以模拟在纸上移动的书写器具的谐振。

7. 如前面任一权利要求所述的方法,包括:激励所述屏幕以产生模拟在纸上书写的书写器具的声音效果的声音效果。

8. 一种包括触敏屏幕的装置,所述触敏屏幕具有适于接收用户经由手持触笔的手写内容的面,其中所述屏幕包括激励所述屏幕振动的部件,以便于当所述触笔在所述屏幕的所述面上移动时,将所述振动传送到所述触笔以模拟在纸上书写的书写器具的感受。

9. 如权利要求 8 所述的装置,其中,所述激振器包括用于将弯曲波振动施加到所述屏幕面的部件。

10. 如权利要求 8 或 9 所述的装置,其中,所述激振器是电机械的并且包括用于将电信号施加到所述激振器的信号生成部件。

11. 如权利要求 10 所述的装置,包括:用于对所述电信号进行周期调制的部件。

12. 如权利要求 10 或 11 所述的装置,包括:用于对所述电信号进行幅度调制的部件。

13. 如权利要求 10 至 12 中任一权利要求所述的装置,包括:用于感测所述触笔在所述屏幕面上移动的速度速度的部件,以及用于根据感测到的速度对所述振动进行调制的部件。

14. 如权利要求 10 至 13 中任一权利要求所述的装置,包括:用于感测所述触笔在所述屏幕面上移动的速度速度的部件,以及其中,所述信号生成部件生成使所述屏幕发出声分量的信号,所述声分量模拟在纸上书写的书写器具的声分量,所述声信号由所述速度感测部件调制。

15. 一种承载计算机程序代码的载体,用于在运行时实现如权利要求 1 至 7 所述的方法。

## 触敏设备

### 技术领域

[0001] 本发明涉及包括触敏屏幕或面板的触敏设备,尤其是与触笔或其他书写器械一起使用的面板。

### 背景技术

[0002] US 4,885,565、US 5,638,060、US 5,977,867、US2002/0075135 描述了在被触摸时具有用户的触觉反馈的触摸操作装置。在 US 4,885,565 中提供了致动器,用于在致动器被激活时向 CRT 赋予运动以提供触觉反馈。在 US 5,638,060 中,将电压施加到压电元件,这形成了开关以使元件振动,用于向用户的手指施加反作用力。在 US 5,977,867 中,触觉反馈单元在触摸屏幕被手指或指示器触摸时生成用户感测到的机械振动。机械振动的幅度、振动频率和脉冲长度是受控的,脉冲宽度对于感觉是足够长的,但是也是足够短的,以在下次按键触摸之前终止。US2002/0075135 描述了使用第二换能器提供具有瞬变尖峰形式的脉冲以模拟按钮点击。

[0003] 在以上描述的每个现有技术文献中,响应于用户手指或指示器的离散的触摸来提供触觉反馈。然而,本申请人认识到,触觉反馈也可以用于跨越触摸屏的连续移动。

### 发明内容

[0004] 根据本发明,提供了一种当使用手持触笔在触敏屏幕上书写时模拟在纸上书写的书写器具的感受的方法,包括将屏幕布置为在被触笔接触时振动以提供用户反馈。

[0005] 纸包括粘合剂中的纤维垫,各条纤维具有随机的取向,导致具有铅笔笔尖和纸表面之间的小接触斑所描绘的水平面上的摩擦(滑动摩擦或静摩擦)系数的局部变化的粗糙表面。铅笔在表面上的运动可以被描述为粘滑式样的运动。当使用诸如纤维尖笔的其他书写器械进行书写时,感觉到相似的效果。对于其他类型的书写器械,可以感觉到该效果的变化形式。例如,对于钢笔,如果笔尖是坏的,则将发出刮擦声,但是如果笔尖是好的,则具有相当平滑的水润滑的滑行。纸的类型也有影响并且钢笔用户常常挑选具有适当的笔尖感觉的纸,并且这种纸在没有渗开的情况下以适当的速率获得墨水。对于圆珠笔,存在粘性的平滑的摩擦滑动,但是纸具有某种下面的纤维纹理。

[0006] 相反地,当使用触笔或指示器在触敏屏幕或表面的聚合物或玻璃盖上书写时,丧失了该粘滑运动。铅笔在纸上的粘滑行为是书写感受的关键因素。当模拟铅笔在纸上的书写特性时,使用触笔书写到触敏屏幕具有改进的感受、吸引力和用户满意度。

[0007] 通过施加包括多个脉冲或脉冲流的信号,可以使屏幕振动。

[0008] 该方法可以包括例如通过使用传感器来感测触笔在屏幕表面上的移动的速度。屏幕可以被布置为根据感测到的速度而振动。因此对于具有多个脉冲的信号,信号可以具有与感测到的速度的平均脉冲速率相当的平均脉冲速率。

[0009] 该方法可以包括通过对振动进行周期调制来对振动进行布置以模拟在纸上移动的书写器具的拖拽,例如,对于具有多个脉冲的信号,通过改变脉冲之间的时间间距,也就

是通过改变脉冲速率,来模拟这种拖拽。可以使间距随机化,由此模拟纸张纤维的随机间距。脉冲的间距的范围可以是平均纤维间间距的两倍的  $1/5$  至  $4/5$ 。

[0010] 通过对振动进行幅度调制,振动可以模拟在纸上移动的书写器具的轴向往复移动。可以使幅度随机化,由此模拟纸纤维的随机高度。幅度可以由比例因子定义,其是音频的音量控制在触觉方面的等同物。用户可以调整比例因子以给出适当的模拟水平。幅度的范围可以是比例因子的  $3/8$  至  $7/8$ 。

[0011] 因此可以施加两个连接的随机序列以生成振动,第一序列用于考虑纤维间间距,而第二序列用于考虑纤维的高度。这些随机序列可以一起模拟用于触摸屏幕的合成纸结构。

[0012] 在纸上书写的铅笔也可以具有其自身的谐振,其对书写感受的感觉有贡献。因此,触笔可以被配置为,响应于屏幕的振动而被激励到束谐振,由此振动模拟在纸上移动的书写器具的谐振。

[0013] 屏幕可以被激励为产生声音效果,其模拟在纸上书写的书写器具的声音效果。

[0014] 振动可以包括任何类型的振动,包括弯曲波振动,更具体地,包括谐振弯曲波振动。

[0015] 根据本发明的另一方面,提供了一种包括触敏屏幕的装置,该触敏屏幕具有适于接收和记录用户经由手持触笔的手写内容的面,其中该屏幕包括激励屏幕振动的激振器,以便于当触笔在屏幕的该面上移动时,将振动传送到触笔以模拟在纸上书写的书写器具的感受。

[0016] 激振器可以包括用于将弯曲波振动施加到屏幕面的部件。激振器可以是电机械的并且可以包括用于将电信号施加到激振器以使激振器振动屏幕的信号生成部件。

[0017] 信号生成部件可以包括生成包括多个脉冲的信号的部件,例如生成具有平均脉冲速率的脉冲流的锁相环模块。该装置可以包括用于感测触笔在屏幕面上移动的速度的部件。用于对振动进行调制的部件可以被配置为根据感测到的速度对振动进行调制,例如,生成脉冲信号的部件可以被配置为调整平均脉冲速率以与感测到的速度匹配。

[0018] 该装置可以包括用于对电信号进行周期调制的部件和 / 或用于对电信号进行幅度调制的部件。周期和 / 或幅度调制可以是随机的并且可以由抖动模块施加。

[0019] 信号生成部件可以生成使屏幕发出声分量的信号,该声分量模拟在纸上书写的书写器具的声分量,声信号可以由速度感测部件调制。

[0020] 信号生成部件可以进一步包括用于减少高频内容的滤波器。这样,可以提供具有尽可能少的噪音的逼真感觉。

[0021] 激振器可以是动圈式换能器或者压电弯曲换能器,例如,包括例如 W001/54450 中描述的谐振元件的激振器,该申请的内容通过引用并入本文。激振器可以是惯性激振器。

[0022] 触摸屏幕可以是面板形式的部件,其是弯曲波设备,例如谐振弯曲波设备。触摸屏幕还可以是扬声器,其中第二激振器激励产生声输出的振动。例如,触摸屏可以是如国际专利申请 W097/09842 中描述的谐振弯曲波模扬声器,该申请的内容通过引用并入本文。

[0023] 如转让给本申请人的国际专利申请 WO 01/48684、WO 03/005292 和 / 或 WO 04/053781 中描述的,可以检测和 / 或跟踪屏幕上的触笔的接触。这些国际专利申请的内容通过引用并入本文。可替代地,可以使用其他的已知方法接收和记录或者感测这些接触。

[0024] 本发明进一步提供了用于实现上述方法的处理器控制代码,该代码位于具体地,诸如磁盘、CD-ROM 或 DVD-ROM、诸如只读存储器(固件)的编程存储器的数据载体上,或者位于诸如光信号载体或电信号载体的数据载体上。用于实现本发明的实施例的代码(和/或数据)可以包括具有诸如 C 或者汇编代码的常规的编程语言(解释或编译)的形式的源代码、目标代码或者可执行代码,用于设置或者控制 ASIC(专用集成电路)或 FPGA(现场可编程门阵列)的代码,或者用于诸如 verilog(注册商标)或者 VHDL(超高速集成电路硬件描述语言)的硬件描述语言的代码。如本领域的技术人员将意识到的,这些代码和/或数据可以分布在彼此通信的多个耦合的部件之间。

## 附图说明

- [0025] 在附图中借助于示例以图的方式说明了本发明,在附图中:
- [0026] 图 1a 是触敏屏幕的平面视图;
- [0027] 图 1b 是用于与图 1a 的触敏屏幕一起使用的系统的框图;
- [0028] 图 2 是示出图 1b 的系统中的各种部件的相互作用的流程图;
- [0029] 图 3a 示出了可以由图 1b 的系统生成的四个信号的脉冲响应;
- [0030] 图 3b 示出了图 3a 的信号的平滑的频谱;
- [0031] 图 4 示出了纸上的铅笔的 2-D 模型;
- [0032] 图 5a 示出了 FE 模拟期间的图 4 中的握持铅笔的手处的反作用力的跟踪历史;
- [0033] 图 5b 示出了 FE 模拟期间的图 4 中的铅笔笔尖的跟踪历史;
- [0034] 图 6a 绘制了关于随机化表面结构的在时间( $t_c$ )和幅度( $h$ )上的表面纤维分布的图线;
- [0035] 图 6b 是关于图 6a 的结构采样谱的平滑形式;
- [0036] 图 6c 示出了在 44.1kHz 处测量的图 6a 的结构平滑加速度和力谱;
- [0037] 图 7a 绘制了经修改的触感点击信号相对于时间的图线;
- [0038] 图 7b 绘制了图 7a 的经修改的触感信号的谱和目标谱的图线;
- [0039] 图 8a 绘制了可替代的经修改的触感点击信号相对于时间的图线;
- [0040] 图 8b 绘制了图 8a 的经修改的触感信号的谱和目标谱的图线;
- [0041] 图 9a 绘制了关于四种类型的信号的随时间的比例幅度变化的图线;以及
- [0042] 图 9b 绘制了对应于图 9a 的脉冲信号中的每一个的所生成的随机化触觉信号的频谱。

## 具体实施方式

[0043] 图 1a 示出包括触敏屏幕 12 的触敏设备 10,在该触敏屏幕 12 上使用触笔 18 或者铅笔或者相似的书写器械来书写文本 20。一个或多个传感器 17 用于检测触笔在屏幕上的触摸或移动,并且激振器 16 被提供用于生成屏幕中的信号。铅笔在纸上的粘滑行为是书写感受的关键因素。当模拟铅笔在纸上的书写特性时,使用触笔书写到触敏表面具有改进的感受、吸引力和用户满意度。

[0044] 图 1b 示出了触敏设备 10 如何可以适于使用触感方法和机械反馈技术创建该模拟。在来自触笔的书写输入的预先编程的控制下,书写表面被机械激活以模拟铅笔在纸上

的感觉。如下文更详细解释的,可以将包括铅笔的固有的机械行为的模型并入到系统中,但是简单地感觉到模拟的结果的用户将不会认识或理解这一点。

[0045] 如图 1b 中所示,触敏屏幕 12 连接到传感器 16,该传感器 16 检测来自触笔的接触的性质。传感器连接到 PLL(锁相环)24,该 PLL 24 是用于生成如下算法的关键元件之一,该算法用于生成所期望的铅笔在纸上的感受。该算法的元件可以按硬件或软件方式实现。各个元件具有如下的描述:

[0046]

元件	简述	功能
PLL 模块 24	锁相环	提供脉冲流,该脉冲流具有被锁定到来自触摸屏幕的软件确定的书写速度的平均脉冲速率。
抖动模块 26	脉冲随机化器	根据统计规则将有规律的脉冲随机地修改为具有变化的幅度和间隔的脉冲
Fs 32	音频采样速率	生成关于音频样本的时钟(纹理)
脉冲生成器 28	FIR 滤波器	抖动脉冲触发的脉冲响应
滤波器 30	可选的后置滤波器	减少高频内容以变得更安静

[0047]

[0048] PLL 和抖动块 24、26 按得到的脉冲串设定的相对慢的速率运行。该速率应在 150Hz 的平均速率以下,但是抖动的分辨率应接近音频速率。针对所需的信号带宽适当地设定音频速率  $F_s$ ,但是其几乎肯定不大于 11025Hz(也就是标准的 CD 音频速率的 1/4)。在使用多个音频通道的情况中,这些信号可以在单个通道中复用。因此在使用四个音频通道的情况中,并且不同于具有四个 11025Hz 的通道,可以具有一个 44100Hz 的音频通道,其将被时域复用(TDM)到四个触感通道中。来自滤波器 30 的输出被发送到激振器 17,该激振器 17 生成屏幕中的信号以模拟所期望的感觉。

[0049] 图 2 是示出系统中的每个框实现的步骤的流程图。可以被实现为触敏设备上的软件的传感器正在监控触敏屏幕。当在步骤 S10 中检测到“触摸”时,从信号生成器或者脉冲生成器 28 请求“触感点击”(步骤 S12)并且在步骤 28 中脉冲生成器生成提供“点击”感受的脉冲。屏幕表面通常是有点软的并且具有非常好的阻尼。因此触笔的撞击是相当安静的。根据所提出的触摸屏幕的用途,“点击”可以提供或不提供听觉反馈。当在步骤 S14 中检测到“拖拽”时,在步骤 S16 中传感器监控位置改变并且计算拖拽速率或者速度。随后该速度数据被馈送到 PLL 模块 24,其产生脉冲流。当触笔抬起时,在步骤 S30 中传感器未检测到触摸并且向 PLL 发送停止指示(步骤 S32)。在步骤 S34 中,PLL 停止生成任何命令。

[0050] 用于触感点击感受的脉冲可以与形成书写模拟的基础的脉冲相同,但是并非一定相同。例如,在下文建议的实现方案中,它们是不同的。不同信号的谱均被选择为使手指尖的灵敏度与振动匹配。

[0051] PLL 模块 24 的功能如下文所述。在步骤 S18 中,在接收到来自传感器的速度信息时,PLL 模块向抖动模块提供用作开始命令的稳定的脉冲流(步骤 S20)。PLL 模块测量该流的速率(实际速率)和输入的速度估值(目标速率)之间的平均误差,并且调整实际速率以与目标匹配。PLL 模块应提供存储器和某种滤波,从而在存在噪声或者丢失估值的情况中,仍存在有规律的输出。总之,

[0052] 输入:开始/停止、速度(目标速率)

[0053] 输出:目标速率下的脉冲

[0054] 功能:测量目标速率和实际速率之间的平均误差,并且进行适当的调整。

[0055] 注释:目标脉冲频率=拖拽速度/纤维间间距。

[0056] 提供针对纹理的合成纸结构的抖动模块 26 的功能如下文所述。在步骤 S20 中,抖动模块 26 向脉冲分配随机的幅度,并且随后在步骤 S22 中使脉冲延迟随机的时长,此后在步骤 S24 中将其传递到信号或脉冲生成器 28。幅度分布的统计不受脉冲速率的限制,但是平均延迟应是脉冲间间距的 1/2,这意味着需要在一定程度上了解脉冲速率。总之,

[0057] 输入:同步(开始)、平均速率

[0058] 输出:幅度、经延迟的同步

[0059] 功能:有效地,具有另外的输出的可编程的单稳态

[0060] 对于随机信号可以使用 Beta 分布。这设定了关于抖动和幅度数据的正确的平均值和方差。“通过检查”选择的值似乎接近最优,所测试的其他值产生了逼真度较低的感受。通过软件或硬件生成 Beta 统计是困难的,因此在实效上建议使用具有相同平均值和方差的简单的均匀分布(也就是矩形分布)。到目前为止矩形分布是最易于生成的并且与最复杂的形式一样好或者几乎一样好。

[0061] 通过软件或硬件生成样本的均匀分布的标准方法是 PRBS 或者伪随机比特序列。该 PRBS 是由移位寄存器产生的,该移位寄存器具有出现在某些比特模式或掩码上的反馈。掩码的选择影响序列的重复长度以及噪声的“白度”。

[0062] 用于从均匀分布生成指定的统计分布的标准方法是所谓的“逆变换采样”方法(参见)。其将来自 (0, 1] 上的均匀分布的噪声样本映射到具有指定的统计分布的样本。对于该方法,有必要了解累加密度函数的逆函数。简单的示例如下;

[0063] 假设 (a, b] 上的目标均匀分布;概率密度函数 (PDF) 是

[0064]

$$\text{PDF}(x) = \begin{cases} 1/(b-a) & \text{如果 } a < x \leq b; \\ 0 & \text{否则} \end{cases}$$

[0065] 通过对 PDF 积分获得了累加密度函数 (CDF)。逆 CDF 是 CDF 的逆函数,也就是  $\text{CDF}^{-1}(\text{CDF}(x)) = x$ 。从 PDF 还可以计算平均值和标准偏差。固定任何两个不同的统计性质允许确定 a 和 b。

[0066] 不幸地,对于 Beta 分布,不了解封闭形式的逆 CDF,因此该方法没有帮助。然而,可

以观察具有已知的逆 CDF 的相似分布,并且作为替换使用这些分布。最简单的近似是三角形分布,其之所以被称为三角形分布是因为其 PDF 具有三角形的形状。在其最一般的形式中,其由三个变量 a、b 和 c 控制。在简化的形式中,  $a = 0$ ,  $b = 1$  并且  $0 \leq c \leq 1$ , 并且

[0067]

$$\text{PDF}(x) = \begin{cases} 2 \frac{x-a}{(b-a)(c-a)} & \text{如果 } a < x \leq c; \\ 2 \frac{b-x}{(b-a)(b-c)} & \text{如果 } c < x \leq b; \\ 0 & \text{否则} \end{cases}$$

[0068] 最接近 Beta 分布的近似是 Kumaraswamy 分布。其由两个变量 a 和 b (正实数) 控制,并且被限制在 [0, 1] 上

[0069]

$$\text{PDF}(x) = \begin{cases} abx^{a-1}(1-x^a)^{b-1} & \text{如果 } 0 < x \leq 1; \\ 0 & \text{否则} \end{cases}$$

[0070] 上文强调的三个分布中的每一个可以用于生成随机性以模拟纹理。每个样本需要两个随机数据集,即间距和幅度。在原理上,这两个集合可以是完全独立的,但是测试建议它们应从同一均匀分布生成。(这确有其合理之处,其在于,由于长的间隙与大的幅度关联并且小的间隙与小的幅度关联,因此使得信号能量更加均匀。)

[0071]

分布	关于间距的参数	关于幅度的参数
Kumaraswamy	$a = 3, b = 5$	$a = 5, b = 3$
三角形 [0, 1]	$a = 0, b = 1, c = 0.5$	$a = 0, b = 1, c = 0.75$
矩形	$a = 0.207, b = 0.793$	$a = 0.375, b = 0.875$

[0072] 与关于每个分布的谱一起绘制 PDF 的图线表明与其他分布不同的分布是三角形分布。主要差异在于 1-5Hz 的范围,并且在 50Hz 的平均重复速率下程度较小。允许三角形分布覆盖整个范围不是最佳的。矩形分布与最复杂的形式 (Kumaraswamy) 一样好或者几乎一样好,并且由于迄今为止是最易于生成的,因此是最合理的选择。

[0073] 提供纹理的谱性质的脉冲生成器 28 的功能如下文所述。在接收到来自抖动模块 26 的信号时,脉冲生成器 28 输出具有样本值的流的形式信号 (步骤 S26)。如果在流完成之前接收到另一输入,则新的流开始。根据从抖动模块 26 接收到的数据修改输出信号的幅度。总之,

[0074] 输入:同步(开始)、幅度

[0075] 输出: 触感“音频”样本的序列

[0076] 功能: 将脉冲串滤波为模拟信号

[0077] 该功能可以选自许多数学模型并且被馈送适当的(可调整的)参数。使用这些功能, 如下文解释的, 任意的非整数滚降速率是可能的。脉冲生成器包括 FIR(有限脉冲响应)滤波器, 用于使从脉冲生成器 28 输出的触感信号与手指触摸的灵敏度匹配。滤波器可以将高频内容减少到合理的水平。

[0078] 可选的滤波器 30 可以被提供用于减少来自脉冲生成器的任何剩余的高频穿通。设想这将是简单的递归一阶分级滤波器, 具有被选择用于避免乘法的系数; 例如  $2^{-n}$ 、 $1-2^{-n}$ 。如果这证明是不够的, 则作为替换可以使用二阶滤波器。滚降频率约为如 500Hz-600Hz。

[0079] 图 3a 示出了来自并入滤波器的脉冲生成器的四个信号的脉冲响应, 每个脉冲响应应具有 300Hz 或者其附近的截止。滤波器通常具有整数阶的滚降; 例如, 电子元件的 R-C 网络具有一阶响应, 而 L-C-R 网络可以具有二阶响应。波特图上的 n 阶滚降由每八倍频  $6 \times n$  dB 或者每十倍频  $20 \times n$  dB 的斜率表示。

[0080] 许多自然现象具有“不规则碎片”的特性, 就是说, 它们的维度不是整数。简单的和公知的示例是“1/f 噪声”, 其具有 1/2 阶滚降, 或者每八倍频 3dB 的斜率。为了产生具有适当的“感觉”和“声音”的信号, 发现有用的是有能力向信号分配完全可变的滚降。就是说, 其电平随着频率的 p 次方下降或者其功率随着频率的 2p 次方下降。

[0081] 由拉普拉斯变换理论已知, 存在脉冲响应及其传输函数之间的直接关系; 并且具体地, 存在它们的衰减速率之间的直接关系(参见例如 Abramowitz 和 Stegun 的“Handbook of mathematical functions”, 章节 29.3.7)

$$[0082] \quad \frac{\Gamma(k)}{s^k} \Leftrightarrow t^{k-1}$$

[0083] 所有这些传输函数在 DC 上是无限的, 因此实际上不是特别有用的。然而, 存在允许任一域中的合成的更有用的变换对。

[0084] 图 3a 中示出的类型 1 信号是单极点的并且发现约 2.25 至 2.5 的速率给出了最佳的感觉/声音。可以使用级联的具有单位增益通带的一阶滚降滤波器来生成该信号。该类型的滤波器具有传输函数

$$[0085] \quad H(s) = \left( \frac{a}{s+a} \right)^p$$

[0086] 对于整数 p, 易于看到其如何表示 p 个一阶低通滤波器的级联。每个滤波器具有  $\omega_c = a$  弧度/秒的截止频率。滚降速率是 p 阶的, 即  $6p$  dB/八倍频。希望将其推广到 p 不是整数的情况。

[0087] 由拉普拉斯变换表, 或者对它们进行符号计算的程序, 发现(参见例如 Abramowitz 和 Stegun 的“Handbook of mathematical functions”, 章节 29.3.11)

$$[0088] \quad t^{p-1} e^{-at} \Leftrightarrow \frac{\Gamma(p)}{(s+a)^p}, \quad \text{因此 } h(t) = \frac{a^p}{\Gamma(p)} t^{p-1} e^{-at}$$

[0089] 脉冲响应是单极点的, 并且可以被视为指数衰减的推广。

[0090] 滤波器可以是  $p = 1$  的传统的一阶滤波器。这对于从事简单系统设计的任何人应是熟悉的。

$$[0091] \quad H(s) = \frac{a}{s+a}, h(t) = ae^{-at}$$

[0092] 可替代地, 滤波器可以是  $p = 1/2$  的半阶滤波器。该滤波器在截止之上将白噪声转换为粉噪声。

$$[0093] \quad H(s) = \sqrt{\frac{a}{s+a}}, h(t) = \frac{1}{\Gamma(1/2)} \sqrt{\frac{a}{t}} e^{-at} = \sqrt{\frac{a}{\pi t}} e^{-at}$$

[0094] 注意到在时域和频域中的该变换对的对称本质, 幂律是平方根的倒数。该对称本质是  $1/f$  噪声 (其是量子-机械现象) 的解释的核心内容。

[0095] 图 3a 中示出的类型 2 信号是双极点的并且发现约 1.75 至 2.0 的速率给出了最佳的感觉/声音。可以使用级联的具有单位增益通带的二阶滚降滤波器来生成该信号。该类型的滤波器具有传输函数

$$[0096] \quad H(s) = \left( \frac{a^2 + b^2}{(s+a)^2 + b^2} \right)^p$$

[0097] 对于整数  $p$ , 易于看到其如何表示  $p$  个二阶低通滤波器的级联。每个滤波器具有  $\omega_c = \sqrt{a^2 + b^2}$  弧度/秒的截止频率, 以及  $\omega_c/2a$  的  $Q$ 。滚降速率是  $2p$  阶的, 即  $12p$  dB/八倍频。再次地, 希望将其推广到  $p$  不是整数的情况。

[0098] 由拉普拉斯变换表, 或者对它们进行符号计算的程序, 发现 (参见例如 Abramowitz 和 Stegun 的“Handbook of mathematical functions”, 章节 29.3.57 和 29.2.12)

$$[0099] \quad (bt)^p e^{-at} J_p(bt) \Leftrightarrow 2^p \frac{\Gamma\left(p + \frac{1}{2}\right)}{b\sqrt{\pi}} \left( \frac{b^2}{(s+a)^2 + b^2} \right)^{p + \frac{1}{2}},$$

[0100] 其中  $J_p$  是  $p$  阶贝赛尔函数。

[0101] 因此

$$[0102] \quad h(t) = b \frac{\sqrt{2\pi}}{\Gamma(p)} \left( \frac{a^2 + b^2}{2b^2} \right)^p (bt)^{p - \frac{1}{2}} e^{-at} J_{p - \frac{1}{2}}(bt)$$

[0103] 脉冲响应是双极点的, 并且可以被视为阻尼正弦曲线的推广。

[0104] 滤波器可以是  $p = 1$  的传统二阶滤波器。该传统的滤波器在时域中变换到熟悉的阻尼正弦曲线。

$$[0105] \quad H(s) = \frac{a^2 + b^2}{(s+a)^2 + b^2},$$

$$[0106] \quad h(t) = b \sqrt{2\pi} \left( \frac{a^2 + b^2}{2b^2} \right) (bt)^{\frac{1}{2}} e^{-at} J_{\frac{1}{2}}(bt) = \frac{a^2 + b^2}{b} e^{-at} \sin(bt)$$

[0107] 可替代地,滤波器可以是具有  $Q$  和  $p = 1/2$  的一阶滤波器。

$$[0108] \quad H(s) = \sqrt{\frac{a^2 + b^2}{(s+a)^2 + b^2}}, h(t) = \sqrt{a^2 + b^2} e^{-at} J_0(bt)$$

[0109] 时域响应简单地是阻尼零阶贝赛尔函数。对于大的  $t$ , 可以使用三角近似法 (参见例如 Abramowitz 和 Stegun 的“Handbook of mathematical functions”, 章节 9.2.1), 也就是

$$[0110] \quad h(t) \approx \sqrt{a^2 + b^2} e^{-at} \sqrt{\frac{2}{\pi bt}} \cos\left(bt - \frac{\pi}{4}\right)$$

[0111] 其示出了这基本上是上文描述的半阶滤波器的  $1/2$  阶滤波器的幅度调制形式。

[0112] 类型 1 和类型 2 信号均不具有铅笔产生的声音中的染色。通过使类型 1 信号与具有更高频率的相似信号进行卷积, 产生了类型 6 信号。在该情况中卷积具有封闭形式。通过使类型 2 信号与具有更高频率但是具有较低的  $Q$  的相似信号直接进行卷积, 产生了“类型 8”信号。

[0113] 图 3b 中示出了关于 72.6Hz 的平均脉冲速率的相应的纹理信号的谱 (也就是相对频率的声音输出)。经修改的谱偏离原始谱约 800Hz, 并且这些信号在“静默模式中”是明显更安静的。

[0114] 使用具有一阶部分的级联对的滤波器可以生成可替代的信号 (类型 3), 这些一阶部分具有两个不相等的拐点。该类型的滤波器具有传输函数

$$[0115] \quad H(s) = \left(\frac{a}{s+a}\right)^p \left(\frac{b}{s+b}\right)^p$$

$$[0116] \quad h(t) = \frac{a^p b^p}{\Gamma(p)} \sqrt{\pi} \left(\frac{t}{a-b}\right)^{p-\frac{1}{2}} e^{-\frac{a+b}{2}t} I_{p-\frac{1}{2}}\left(\frac{a-b}{2}t\right)$$

[0117] 其中  $I_p$  是经修改的贝赛尔函数 (参见例如 Abramowitz 和 Stegun 的“Handbook of mathematical functions”, 章节 29.3.50)

$$[0118] \quad h(t) \approx \frac{a^p b^p}{\Gamma(p)} \left(\frac{t}{a-b}\right)^{p-\frac{1}{2}} \sqrt{\frac{2}{(a-b)t}} P\left((2p-1)^2, \frac{1}{8} \frac{2}{(a-b)t}\right) e^{-bt}$$

$$[0119] \quad P(\mu, x) = 1 - (\mu-1)x + (\mu-1)(\mu-9)x^2/2! - (\mu-1)(\mu-9)(\mu-25)x^3/3! + \dots$$

[0120] 一个示例是  $p = 1$  的级联一阶滤波器, 其中

$$[0121] \quad h(t) = \frac{2ab}{a-b} e^{-\frac{a+b}{2}t} \sinh\left(\frac{a-b}{2}t\right) = \frac{ab}{a-b} (e^{-bt} - e^{-at})$$

[0122] 如上文所述, PLL 模块的目标脉冲频率等于拖拽速度 / 纤维间间距。该式是通过生成纸表面和铅笔的相互作用的简单的 2-D 模型而得到的, 用以理解基础过程。纸典型地是使用长度为 2-5mm 的纤维素纤维的“网”和细粘土涂层 (颗粒直径约为  $0.1 \mu\text{m}$ ) 制造的。根据纸的不同, 得到的表面具有许多距离尺度下的隆起, 但是主要的尺度的范围是 0.1mm 至 0.5mm。

[0123] 铅笔典型是由围绕“铅笔芯”的软木（落叶松或雪松）制造的。铅笔芯实际上是被形成石墨和粘土的共烧混合物的陶瓷，其通常被浸在聚合物中。铅笔的典型的“声音”是铅笔芯的硬度和笔杆的束谐振的函数。典型的众数系列可以是，比如；350Hz、900Hz、2.0kHz、3.3kHz 等。当然，这些值将取决于铅笔的长度。

[0124] 这样，该机制可以被描述为铅笔在粗糙的纸表面上的粘滑运动，声音通过铅笔的谐振而被修改。

[0125] 图 4 示出了纸表面和铅笔的相互作用的简单的 2-D 模型，其中使用按有规律的 0.15mm 间距隔开的具有相等高度的半圆形隆起对纸进行建模。铅笔笔尖和短的笔杆部分被明确地建模，并且手 - 手臂系统通过集总参数进行建模。

[0126] 在两个阶段中进行模拟，每个阶段持续 1 秒。在第一阶段中，铅笔被降低到纸表面，并且施加 1N 的书写力。在第二阶段中，沿纸表面以 1mm/s 的速度拖拽铅笔。在图 5a 和图 5b 中分别可以看见手上的合力和铅笔笔尖的运动。在两个迹线集合中看到的“齿滞”部分起因于模型的离散本质（波节）。在现实生活中，其他纹理细节很可能引起相似的效果。

[0127] 可以清楚地看到信号的周期性直接获得自拖拽速率和纤维间间距，也就是，频率 = 拖拽速率 / 纤维间间距。

[0128] 精确的波形状由施加到铅笔的控制的程度设定。在该模拟中，手的速度是恒定的，并且笔尖适当地跟随。相反的极端情况是施加足以克服平均动态摩擦的恒定力。在该情况中，速度将是不均匀的。

[0129] 图 6a 示出了纸表面的更现实的模型。纤维距离和高度的统计分布用于生成所示出的随机化表面结构。选择 Beta 分布来生成模型的两个主要原因是：其被限制在 [0, 1] 上（不同于无边界的正态分布），并且使用两个独立的参数可以控制主要的统计参数（平均值、众数和方差）中的两个。在这一点上，统计分布的准确参数完全是任意的。

[0130] 从拖拽速率和平均纤维间隔计算截止频率 ( $f_c$ )。在图 5b 中可以看到图 5a 的模型生成的谱的平滑形式，其中看到  $f_c$  具有明显的特征。

[0131] 使用渗漏积分器对采样数据进行卷积。在测量结果中，时间常数对应于 40rad/s，但是这仅控制所得到的信号中的频率很低的信息的量。当在膝上型电脑的扬声器上播放信号时，其听起来像手指甲在纸上拖拽。

[0132] 图 6c 示出了关于从定制书写工具获得的测量结果的力谱。该工具具有可互换的笔尖，并且配备有测力计和加速度计，它们均连接到电荷放大器 (ENDEVCO Model 133)。这两个测量仪器都不是完全校准的，但是已知测力计的灵敏度接近 1V/N。经由 NI PCI-4452 数据采集卡获取数据。所测量的信号的谱受到书写速度的强烈影响。基本上低通谱具有直接与书写速度成比例的截止频率。通过在坐标纸上描记并且使用秒表来粗略地建立带宽，对于通常的纸，在 1 英寸 / 秒的书写速率下，带宽约为 50-60Hz。对于不同的表面，带宽不同。

[0133] 在图 6c 的示例中，书写速度约为 2in/s 并且在 44.1kHz 下对数据采样。力的结果测得了施加在铅笔笔尖和书写器具的笔杆之间的力。加速度的结果测得了铅笔的合成运动。通过使用如下关系，从这些测量结果可以得到系统的有效阻抗

$$[0134] \quad Z_m = F/v = j \cdot 2 \cdot \pi \cdot f \cdot F/a$$

[0135] 其中  $F$  = 力,  $v$  = 速度,  $a$  = 加速度,  $f$  = 频率。

[0136] 应当记得,加速度计是未校准的,有效阻抗类似于 0.4kg 的质量和 100Ns/m 的阻尼器的组合。就是说,实际上用作具有约 40rad/s 的拐角频率的有损积分器。

[0137] 如清楚地看到的,图 6c 的所测量的力谱对应于图 6b 的模拟谱。随后对图 6b 的信号进行滤波以在对应于铅笔中的众数的频率处进行提升。新的信号谱使得想到在图 6c 中看的加速度计谱,其因书写器具中的众数而具有加速度迹线中的一些谐振。当在膝上型电脑的扬声器上播放该信号时,其听起来更像是在纸上拖拽铅笔。

[0138] 如图 2 中所示,如果传感器检测到触摸,则请求“点击”信号。一个该信号是进行频率和幅度调制的余弦函数,即

$$[0139] \quad h(t) = \alpha t e^{1-\alpha t} \cos\left(\frac{\omega c t}{1 + \beta t}\right)$$

[0140]  $h(t)$  是包络函数  $g(t)$  和频率调制函数  $f_m(t)$  的积。

[0141] 其中  $g(t) = \alpha \cdot t \cdot e^{1-\alpha \cdot t}$ , 其在时间  $t = 1/\alpha$  处具有单位最大值,

[0142]  $\alpha$  是包络的衰减速率,

[0143]  $\beta$  是控制频率调制速率的参数,以及

[0144]  $\omega c$  是时间  $t = 0$  处的角频率。

[0145] 该信号还可以用作上文提及的“类型 3”信号,其用于在检测到拖拽时生成手写纹理。

[0146] 发现该余弦函数信号比其基于正弦的对应信号更加有效并且下文通过添加新的变量(将  $\phi$  添加到函数)来研究进一步的改进。随后优选地将此经修正的函数拟合到目标触感谱。

$$[0147] \quad h(t) = \alpha t e^{1-\alpha t} \cos\left(\frac{\omega c t}{1 + \beta t} - \phi\right)$$

[0148] 观察到对于最佳的信号, $t = 1/\alpha$  处的包络的峰值与余弦函数中的峰值一致。在该情况中,可以直接设定  $\phi$ 。使用初等微积分学确认了在  $t = 1/\alpha$  时正确的值将余弦函数的自变量设定为 0,因此:

$$[0149] \quad h(t) = \alpha t e^{1-\alpha t} \cos\left(\frac{\omega c t}{1 + \beta t} - \frac{\omega c}{\alpha + \beta}\right)$$

[0150] 如前文所述, $h(t)$  是包络函数  $g(t)$  和频率调制函数  $f_m(t)$  的积,但是在该情况中

$$[0151] \quad f_m(t) = \cos\left(\frac{\omega c t}{1 + \beta t} - \frac{\omega c}{\alpha + \beta}\right)$$

[0152] 关于三个变量的最优值,即  $\alpha = 532.5$ ,  $\beta = 83.85$ ,  $\omega c = 3133$ ,略微不同于原始函数的最优值。在这两种情况中,参数被选择为与作为振动频率的函数的谱模板匹配,其示出了手指尖对于振动的相对灵敏度。目标在于将大部分能量置于手指最敏感的频率范围中。

[0153] 图 7a 示出了关于信号的包络函数  $g(t)$  和频率调制函数  $f_m(t)$  的时间变化。图 7a 还示出了如何得到  $\alpha$ 。第一个非零交叉点的时间等同于  $1/\alpha$ 。图 7b 示出了向用户给出所期望的感应的目标谱(虚线)以及上文描述的经修改的函数的实际谱。存在两个谱之间的

良好的匹配。其他参数值,甚至其他信号,可以用于实现相似的目的。图 8a 和 8b 的信号正是参数值也被选择为与目标谱匹配的信号。

[0154] 图 8a 和 8b 图示了可替选的信号,其具有在频域中开始的起点并且被表述为

$$[0155] \quad h(t) = \sqrt{2at} \exp(0.5 - at^2) \cos(\omega ct - \phi)$$

[0156] 其中  $a = 96505 = 310.7^2$ ,  $b = 2011$ ,  $\phi = 5.181$ ,  $\text{rad} = 297^\circ$ 。

[0157] 图 8a 示出了类似于正态分布曲线的灵敏度曲线 ( $f_m(t)$ )。还已知该曲线 ( $f_m(t)$ ) 是其自身的傅立叶变换,因此时域信号应是相似的。图 8a 还示出了如何计算  $a$  和  $\omega c$ 。如上文所述计算  $a$  和  $\omega c$ 。如图 8b 中所示,该可替选的信号未提供与图 7a 的信号一样好的针对目标谱的拟合,但是具有如下主要优点,其谱的高频端下降得更快。

[0158] 针对同一峰值幅度比较这两个信号,可替选的信号呈现出高出 25% 的能量效率。然而,一些测试表明需要高出 15% -20% 的幅度来获得相同的感受,由此消除了这一优点。在可替选的信号中存在较少的高频能量,这可以良好地有助于使其更加静默。简言之,在它们之间没有更多的选择。可替选的信号在图 8a 和 8b 中被图示为“类型 9”信号。

[0159] 图 9a 和 9b 针对有效性比较作为纹理波形的四个信号。在幅度上调整这些信号以给出相同程度的感受,但是使用不同的功率量来实现这一感受。

[0160]

类型	描述	积分 rms 水平
3	具有图 7a 和 7b 的相位最优化的原始触感点击	0.251
6	从类型 1 推广的单极点、双斜率脉冲, 参见图 3a	0.406
8	从类型 2 推广的双极点、双斜率脉冲, 参见图 3a	0.201
9	图 8a 和 8b 的可替选的触感点击	0.237

[0161] 类型 8 信号是能量效率最高的,新的触感点击 (类型 9) 次之。类型 6 的能量效率最低。

[0162] 当与另外的相似的类型 3 信号比较时,类型 9 信号的较快速的衰减极大地改善了感觉。在没有另外的滤波的情况下,类型 9 在“静默模式”中是最安静的。

[0163] 对于参照图 7a 和 7b 描述的现有的类型 3 点击的小的改变是值得进行的,其没有任何代价,并且实现了改进。改变为可替选的信号 (类型 9) 是否是有价值的将取决于主观评价。

[0164] 当前建议的信号类型 (类型 8) 是对先前选择的类型 2 信号的细微调整。其仍是最高效的,尽管没有高出多少。值得将其与新的类型 9 信号比较。

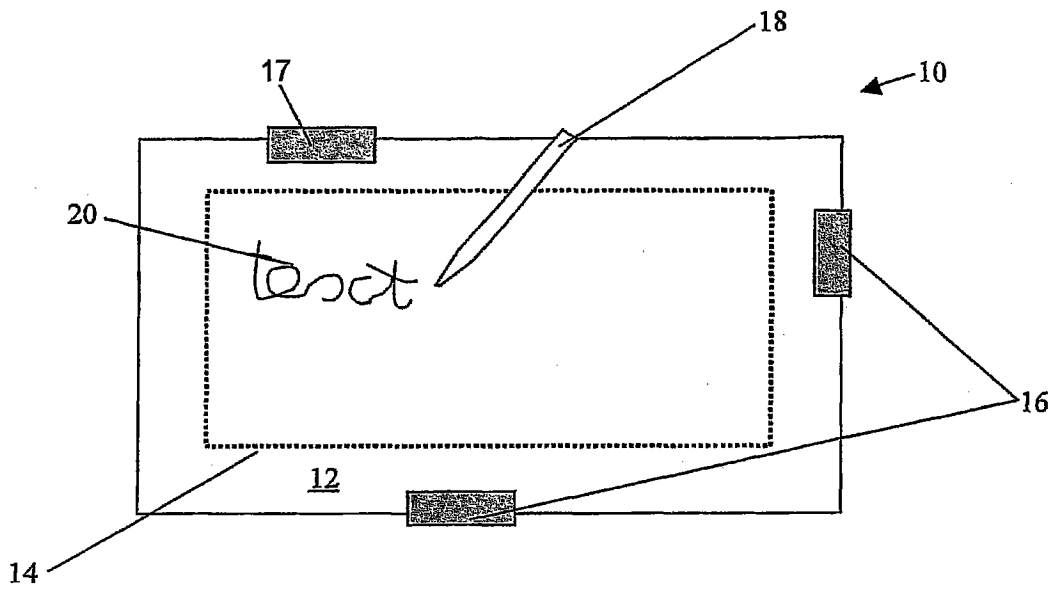


图 1a

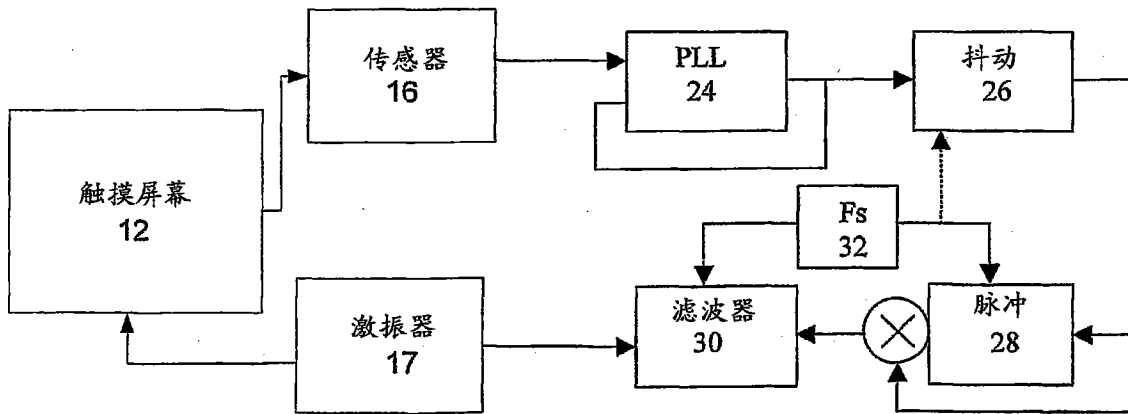


图 1b

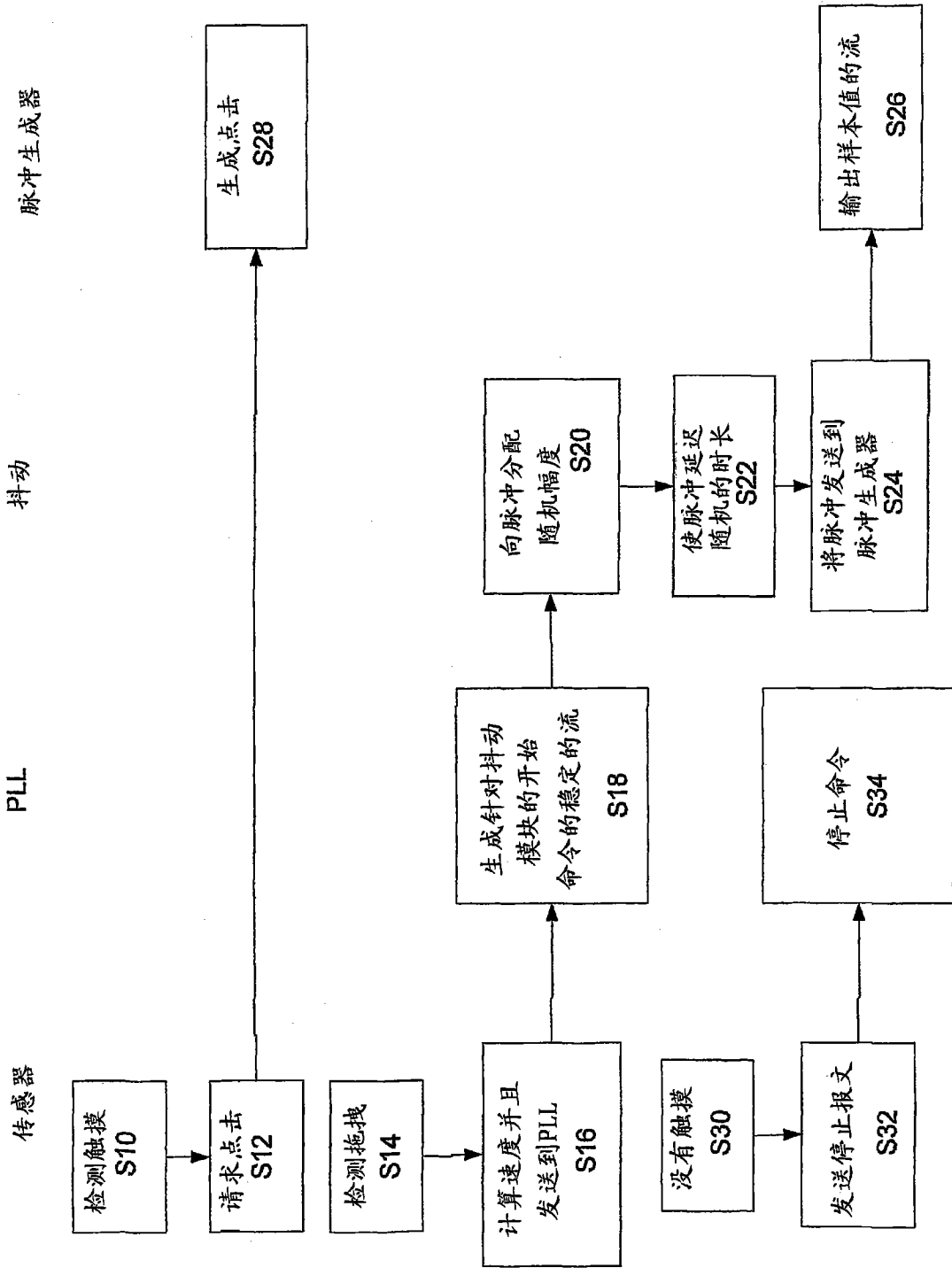


图 2

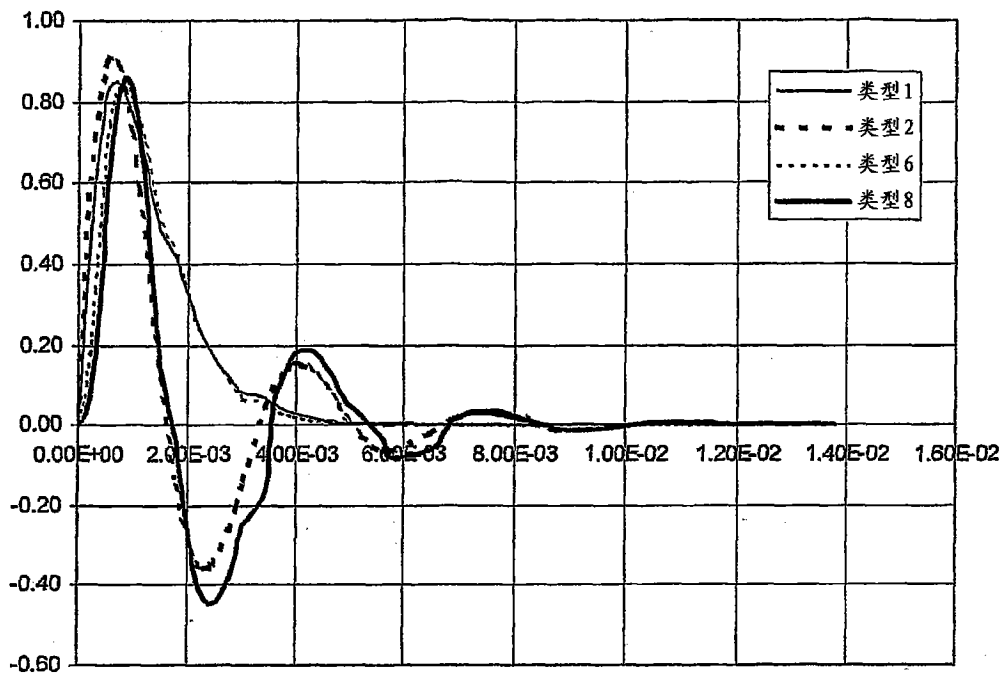


图 3a

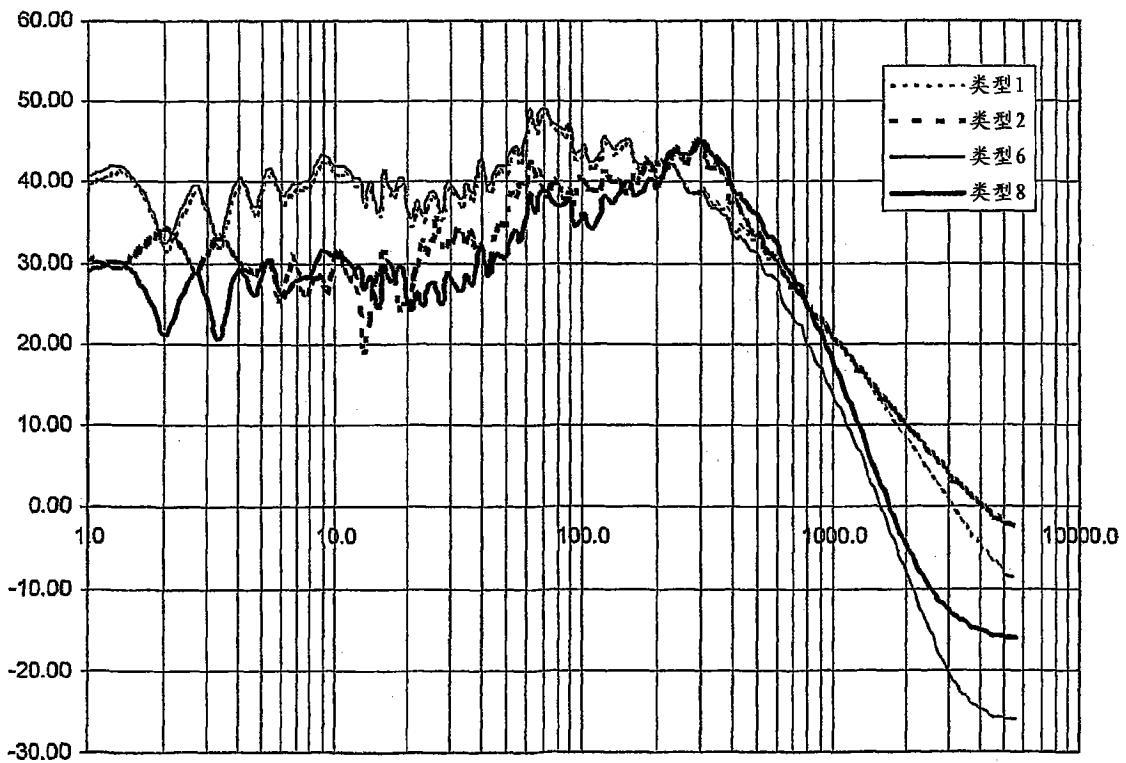
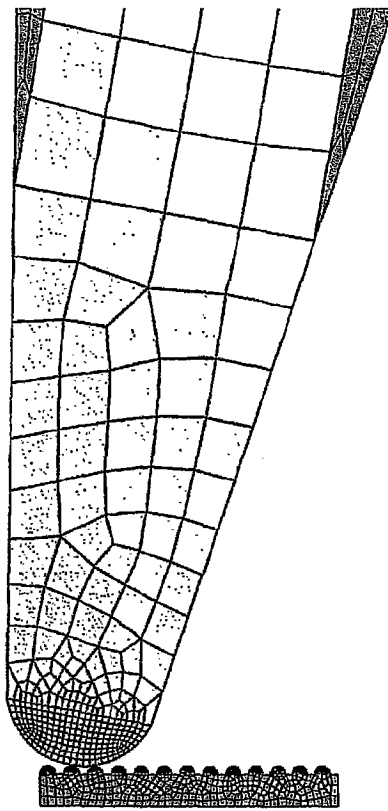
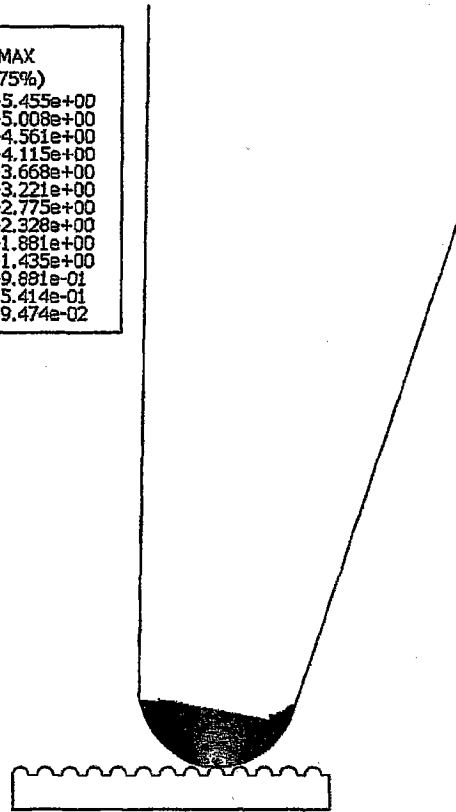
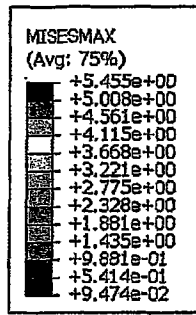


图 3b



在模拟的纸上拖拽铅笔  
 ODB: Pdrag.odb Abaqus/Standard Version 6.7-EF1

Y  
 ↓  
 Z-X  
 步长: 拖拽, 拖拽铅笔1mm  
 增量 1042; 步长时间=1,000



在模拟的纸上拖拽铅笔  
 ODB: Pdrag.odb Abaqus/Standard Version 6.7-EF1

Y  
 ↓  
 Z-X  
 步长: 拖拽, 拖拽铅笔1mm  
 增量 1042; 步长时间=1,000  
 主变量 : MISESMAX  
 变形变量 : U 变形比例因子: +1,000e+

图 4

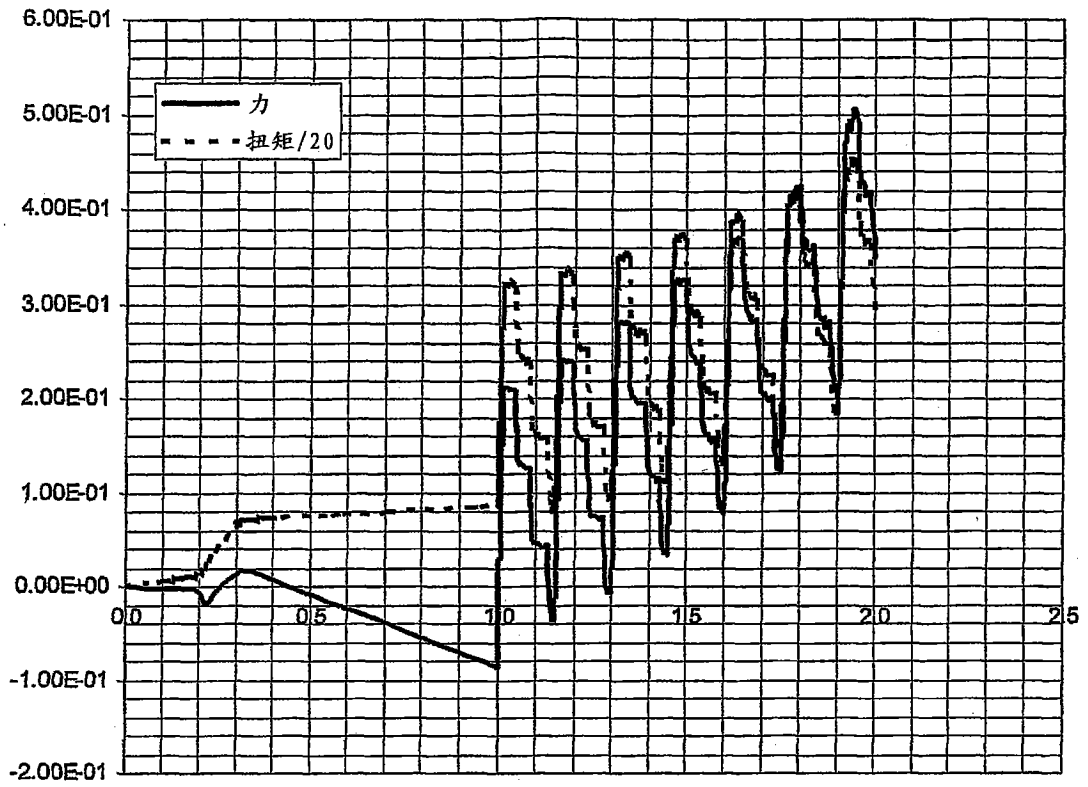


图 5a

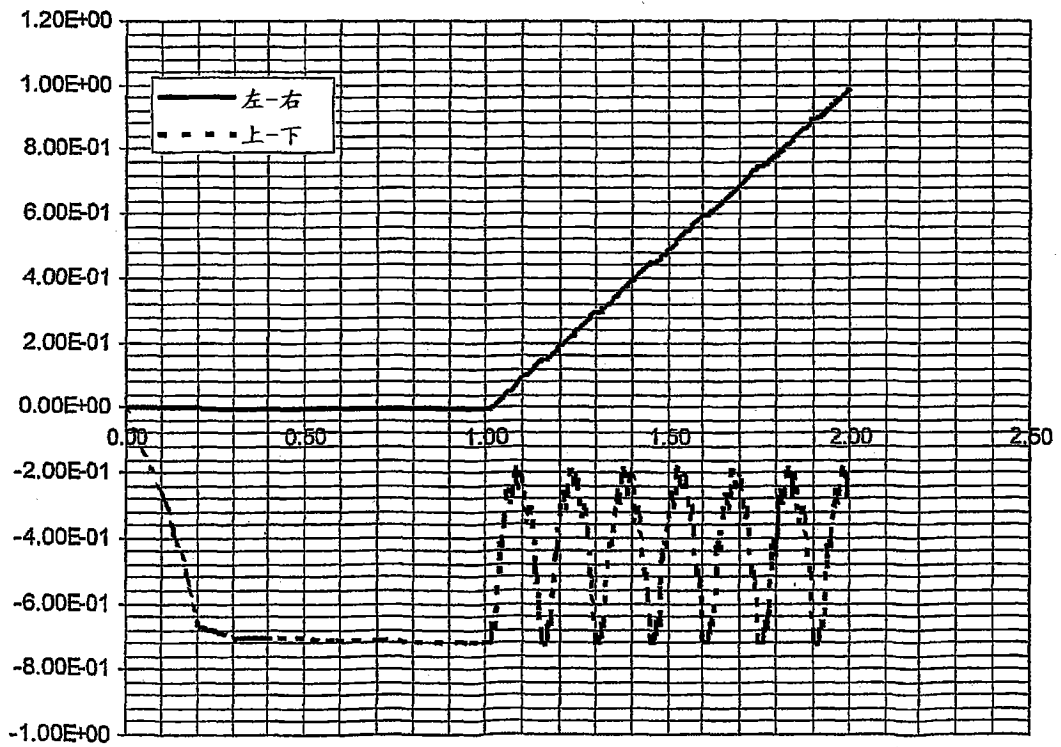


图 5b

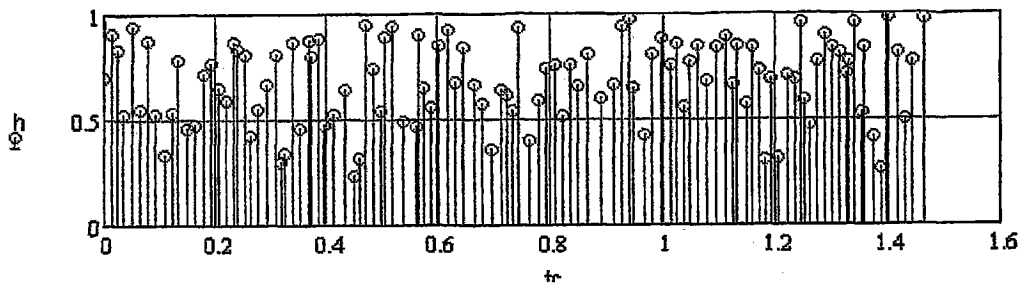


图 6a

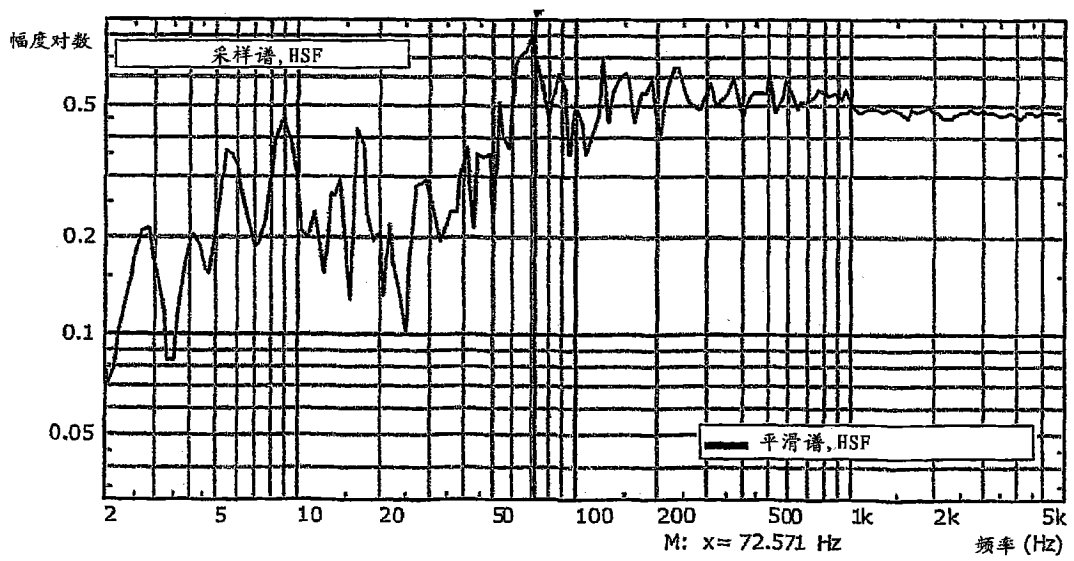


图 6b

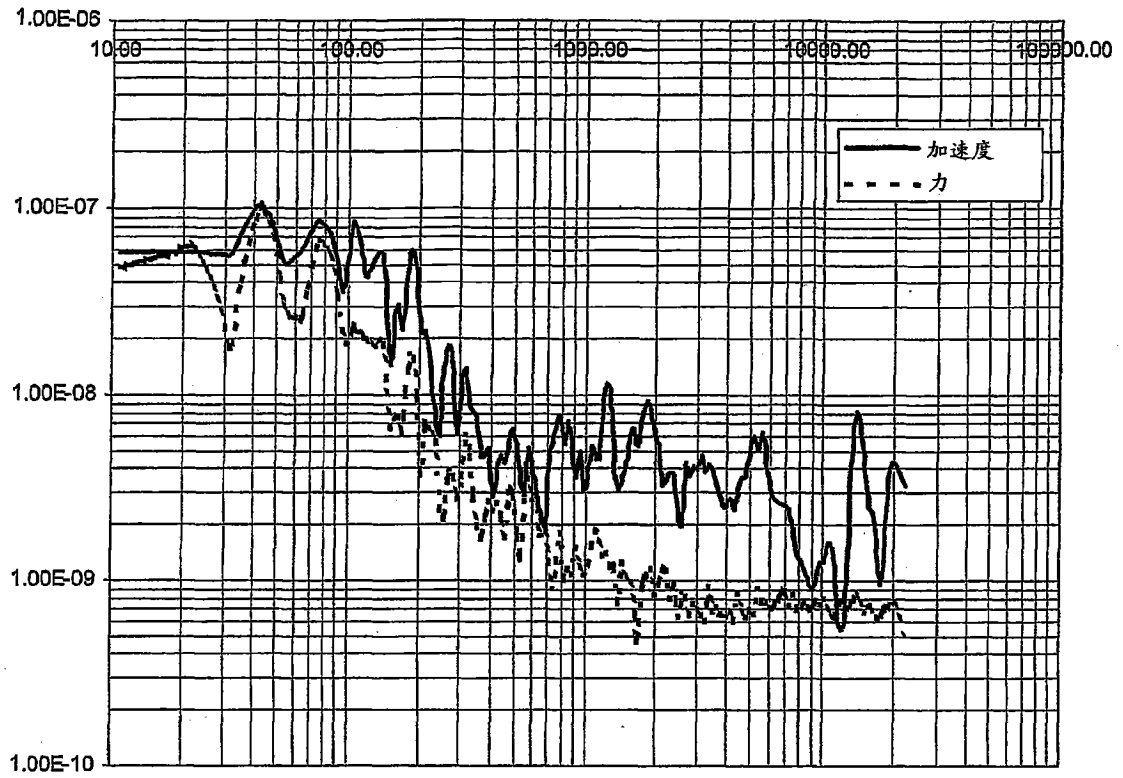


图 6c

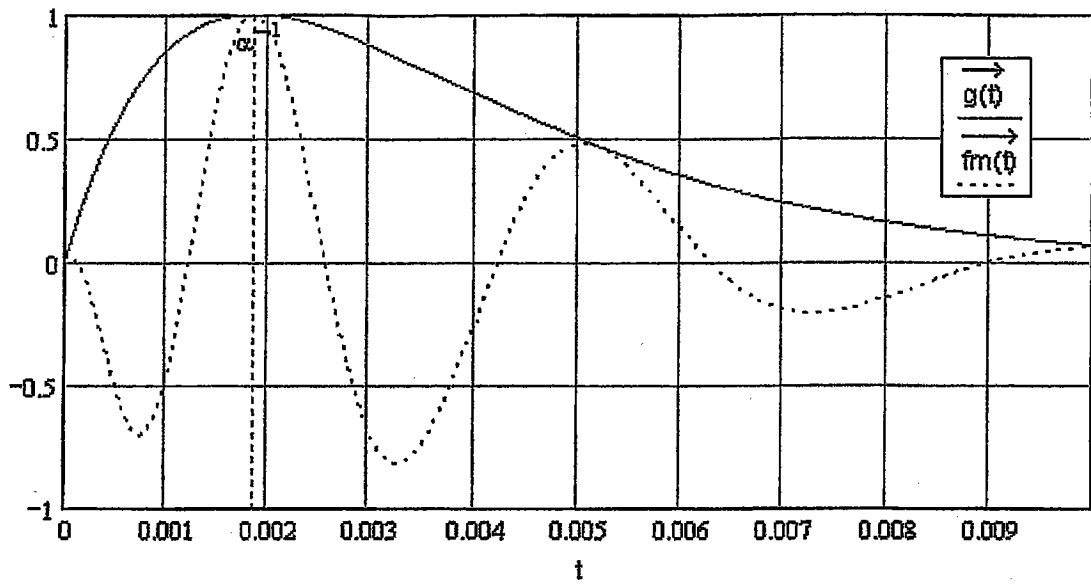


图 7a

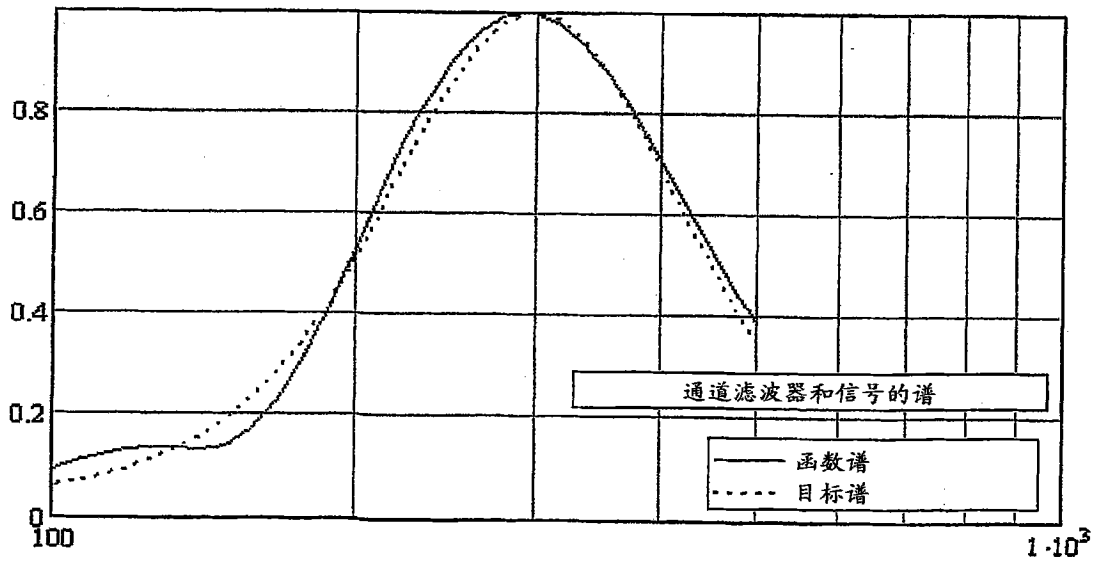


图 7b

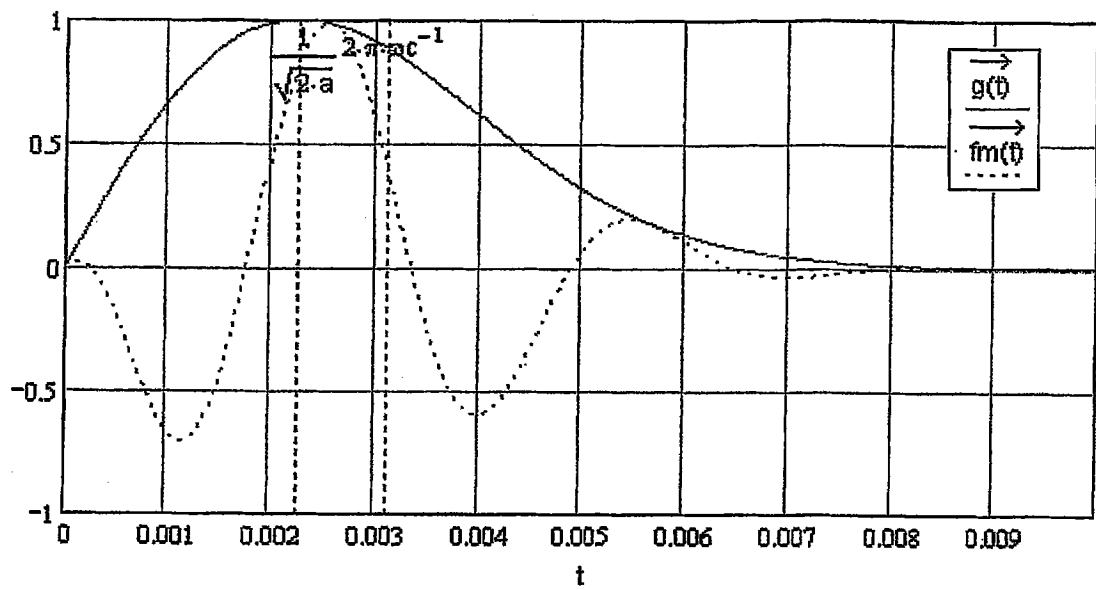


图 8a

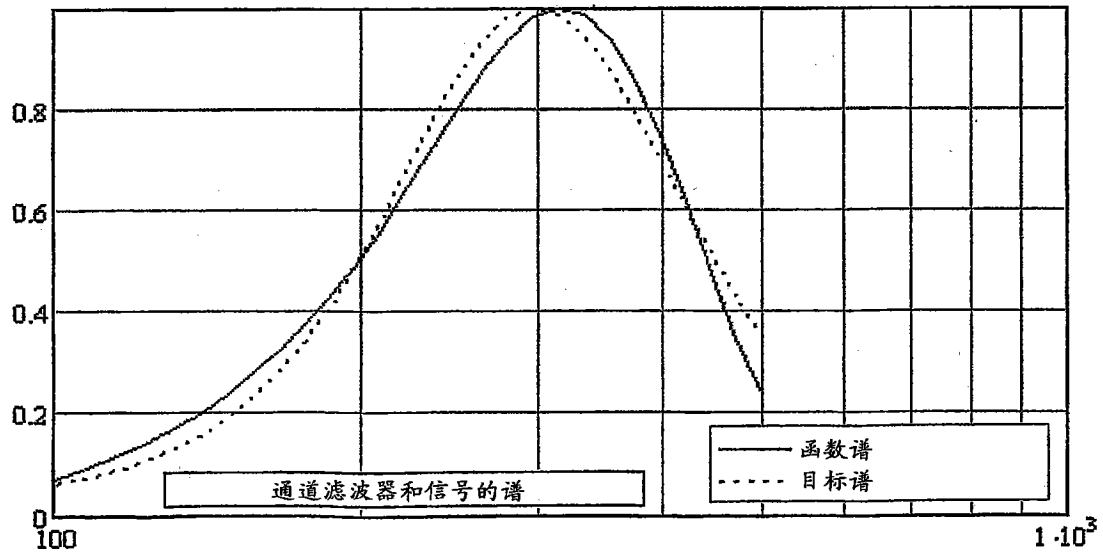


图 8b

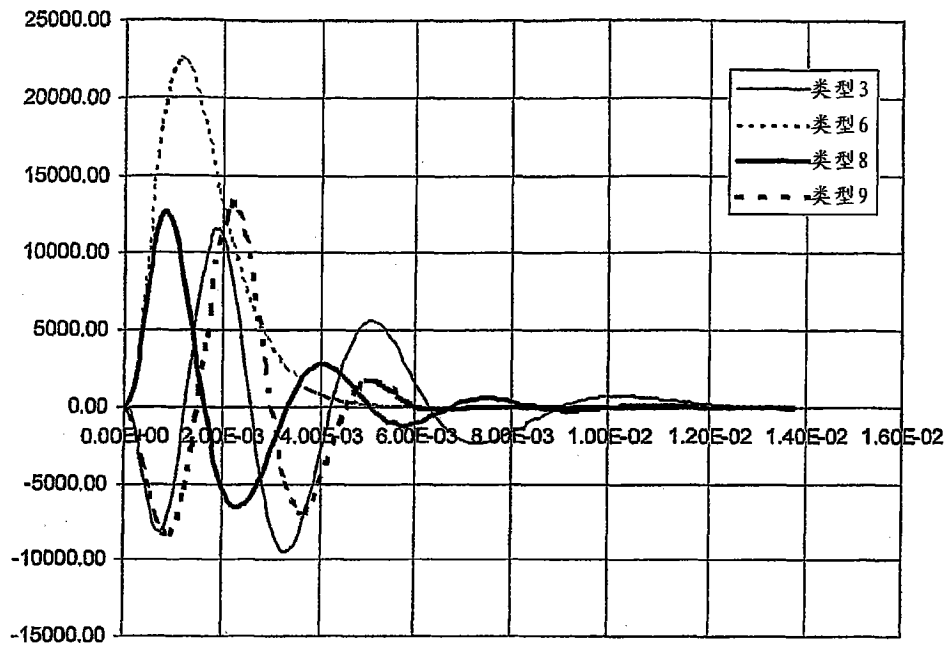


图 9a

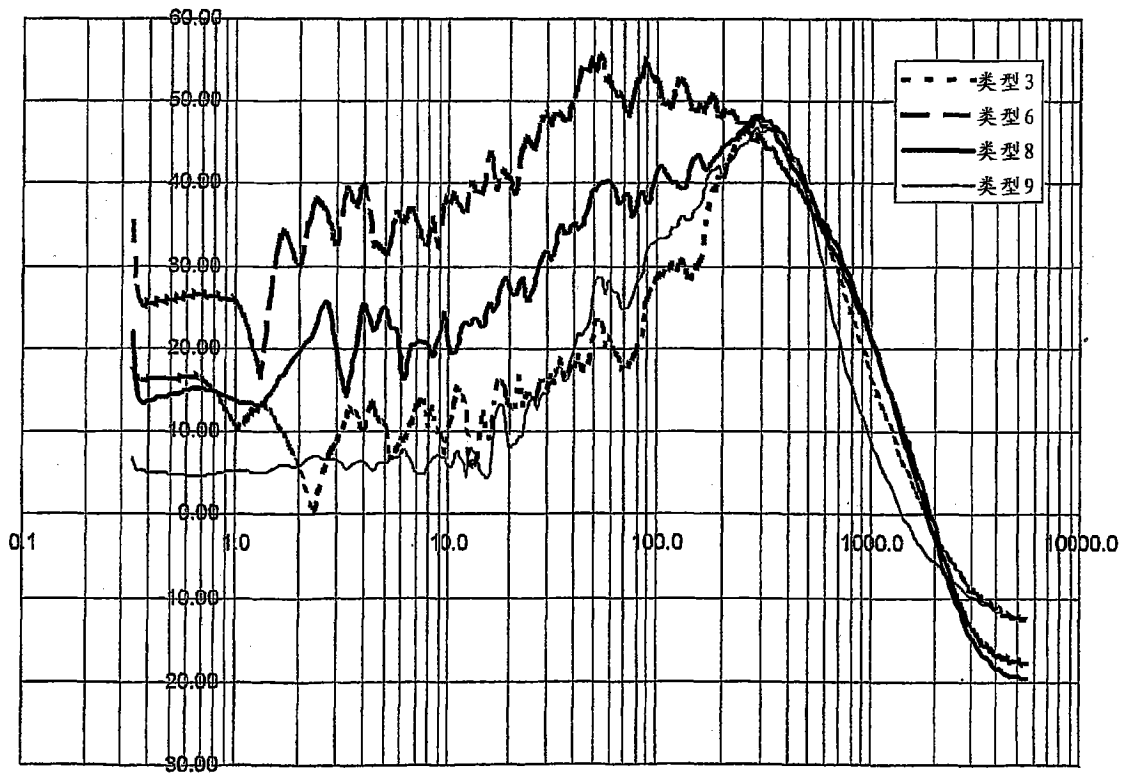


图 9b