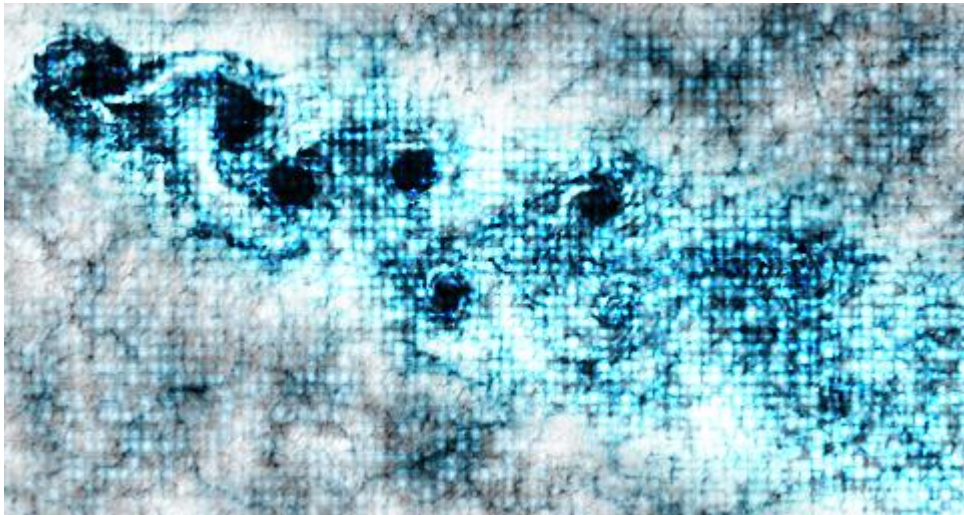

是谁在风中歌唱（Who is singing in the wind）



目 录

1. 圆柱绕流与漩涡现象	1
2. 漩涡频率经验公式	1
3. 实例计算	2
4. 风声模拟方案	2
5. 风声能量分析与扬声器功率选择.....	8
6. 风声模拟电子装置	9
7. 风声下载	12
8. 附 录	13

1. 圆柱绕流与漩涡现象

对于圆柱二维绕流：

- 1) 在来流雷诺数 $Re < 1$ 时，绕流持续为粘性流动；
- 2) 在来流雷诺数 $2 < Re < 30$ 时，流动边界层对称地从圆柱两侧分离，形成对称排列的漩涡；
- 3) 在来流雷诺数 $Re > 60$ 时，流动边界层从圆柱两侧分离且形成的漩涡发生脱落，即形成“卡门涡街”；
- 4) 在来流雷诺数 $60 < Re < 120$ 时，流动边界层从圆柱两侧分离且间次形成脱落的漩涡，造成动力学的不稳定。当物体的固有振动频率接近漩涡脱落频率时，可能会出现严重的后果；
- 5) 在来流雷诺数 $120 < Re < 10000$ 时，情况和前者相同，虽然难以观察涡街现象，但漩涡仍是交替产生的；
- 6) 在来流雷诺数 Re 达到 350000 时，绕流由层流边界层变成湍流边界层，阻力系数急剧下降。

2. 漩涡频率经验公式

G I Tarlor 注意到了脱落的漩涡频率，又由 LORD 总结出如下的频率计算公式：

$$f = 0.2 \times \frac{V}{D} \times \left(1 - \frac{20}{Re}\right) \quad (1)$$

注：式中字母依次为漩涡频率 (Hz)、来流流速 (m/s)、绕流体直径 (m)、绕流雷诺数。

1月初，郊区一家物流公司的快递员把两个快件送丢了，店里给的快递员手机号也多天关机状态，最后联系到店面经理，又让本人到公司处理。于是乘车 1 个小时到了店里，经理正在给员工开会，等会散去后，走过去说明来意，经理立刻满脸堆笑，说快年底了快递员们都陆续放假回家了，走了的货应该都清了，但还是亲自逐个摊点翻找起来。出去走了走，尘僻小巷里满是各色掺杂的小广告，连高压线塔上也不例外，用单反随意拍拍，这时一个年轻的老哥凑上来盯着相机紧张的问：你是记者吧。说不是，拍着玩的，拍着玩？他又看了看手里的相机，似乎没反应过来。问他，你们家家都装了小锅盖，信号怎么样，他说不清楚。说你住处却没装，没听见他说了什么。而后，他谨慎的说这地方每到晚上刮风，那声音可吓人，都不敢出门。觉得好笑，问哪儿的声音。他往北指了指。说现在冬天刮的是北风，刚好横吹这些东西向的输电线，是风吹电线的声音，又说你看东边和西边也有输电线，但拉线方向是南北的，顺着风就刮不出来声音。他似乎明白了点，也似乎并不相信。。。 。。。

3. 实例计算

本例给出风刮输电线造成漩涡脱落而产生声振的频率试算过程。首先要获得公式(1)的各个基本参数,这里假设情况如下:

1) 风速

选择6级风(即谓之强风,举伞困难,大树枝摇动,电线有声),对应的风速范围:10.8m/s~13.8m/s。不妨取12m/s。需要了解风力和风速的关系表的可参见附录。

2) 输电线直径:线径不一,不妨取10mm。

3) 空气粘度:气压不妨取标准海平面大气压;气温不妨取5℃。经查空气物性表,可得动力粘度为 $13.65 \times 10^{-6} \text{m}^2/\text{s}$ 。

基本参数上述已给出,接下来求得绕流雷诺数:

$$R_e = \frac{DV}{\nu} = \frac{0.01 \times 12}{13.65 \times 10^{-6}} = 8791.21。$$

因此,本算例中风横吹过输电线产生和脱落的空气漩涡频率:

$$f = 0.2 \times \frac{V}{D} \times \left(1 - \frac{20}{R_e}\right) = 0.2 \times \frac{12}{0.01} \times \left(1 - \frac{20}{8791.21}\right) \approx 239.45 \text{ (Hz)}$$

这音调和蜜蜂的飞行音较为接近,见图1。

4. 风声模拟方案

人耳可产生听觉的声波振动频率范围:20 Hz ~20000 Hz(超出此范围的次声、超声均无法听见),因此大家可以幸运的听见上节算例的风振。有意思的是,我们这里还可以借用音频编辑软件通过普通PC机制造出风的声音。这里对风振音色不做深入研究,假设风振的音色趋近于理想正弦波(回想下初中物理,声音的三要素:频率(音调)、音色、响度(音量))。

我们选用一款专业音频编辑软件GoldWave(本例使用的为汉化版本)。使用其表达式方式制造声音的资料很少,这里介绍下操作过程:启动GoldWave.exe,新建音频文件,采用默认参数,创建时长1min的无音频内容的声音文件。接下来是核心操作,即采用“表达式求值计算器”制造频率为239.45Hz的理论正弦波音频:

- 1) 在表达式栏输入的表达式较为简单: $\sin(2 * \pi * f * t)$ 。至于表达式为什么这么写,不妨这么理解,频率 f 为周期 T 的倒数,当时间 t 从0s开始走

完一个周期 T 时， \sin 函数中的弧度恰好随之线性走完 2π 。如果实在想不通再请教下高中数学老师；

- 2) 表达式中 π 为内置常量，只有频率 f (Hz) 和时间 t (s) 两个变量，自然设置 f 为 239.45Hz、默认初始(时间) t 为 0s。其它参数不起作用，不用设置。

OK，现在可以开始试听 (F4 快捷键)，感觉如何，是否蛮有震撼力？停止试听 (F8 快捷键)。确定，这时可以看到生成的是标准音量的音频内容，可以用右侧的控制器进行播放，由于这里未对音频进行编辑，因此与试听的声音效果一样。

最后，可以将制造的声音保存为“风声.mp3”文件保存在电脑里，音质一般选择 44100Hz (采样频率)、128kbps (播放码率)、双声道即可。至此本文的主体内容介绍完毕。

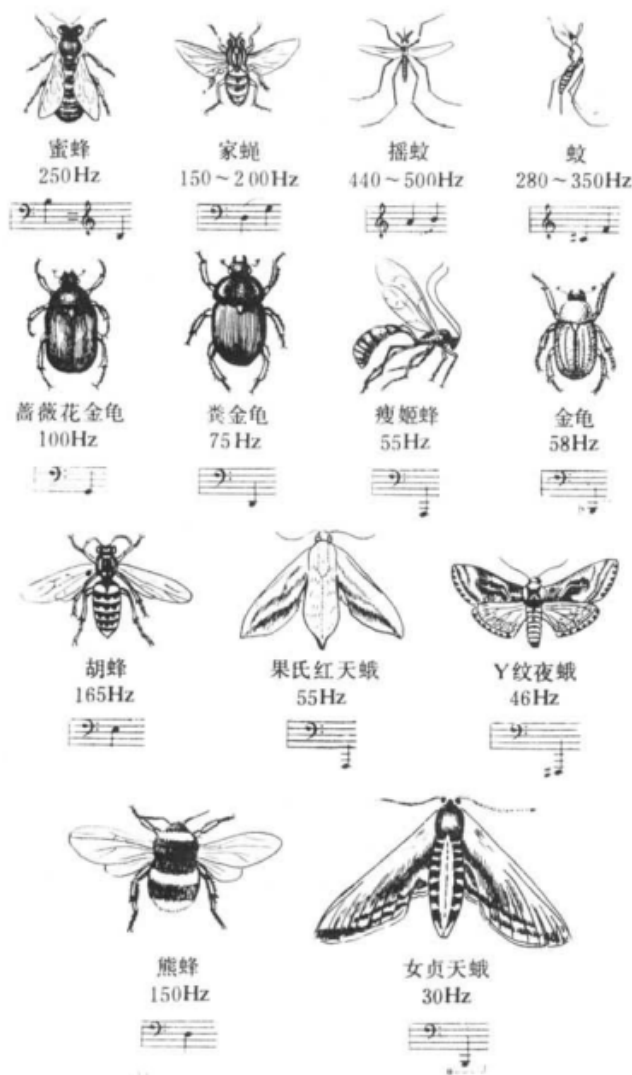


图 1 几种昆虫飞行声振频率



图 2 GoldWave 启动界面



图 3 新建声音 (默认参数)

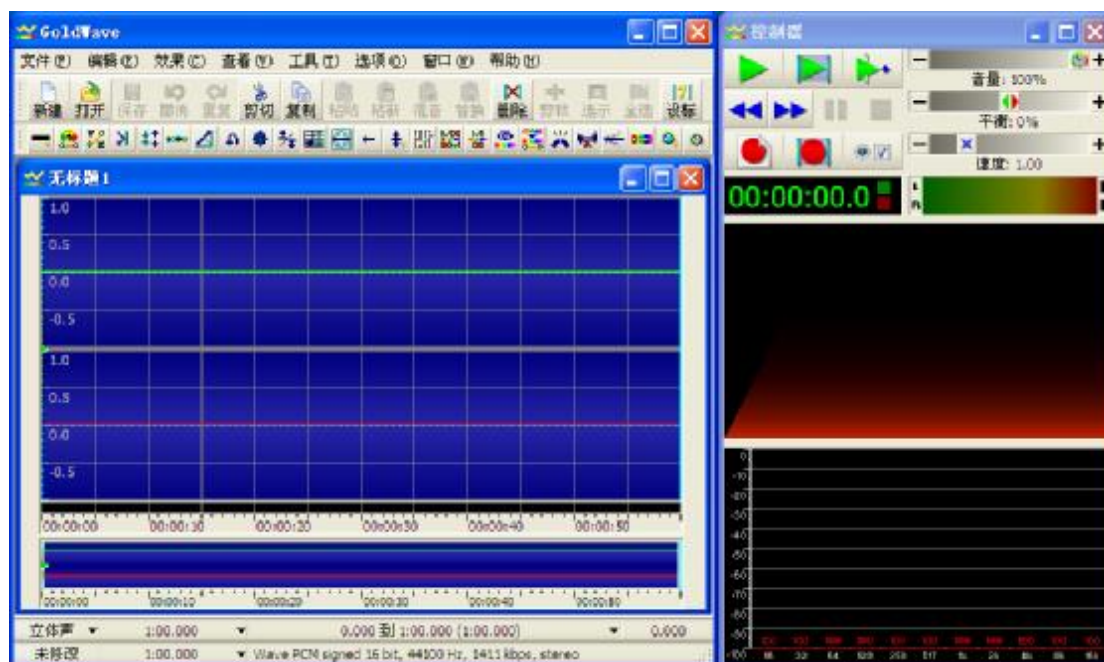


图 4 新建声音（空音频）

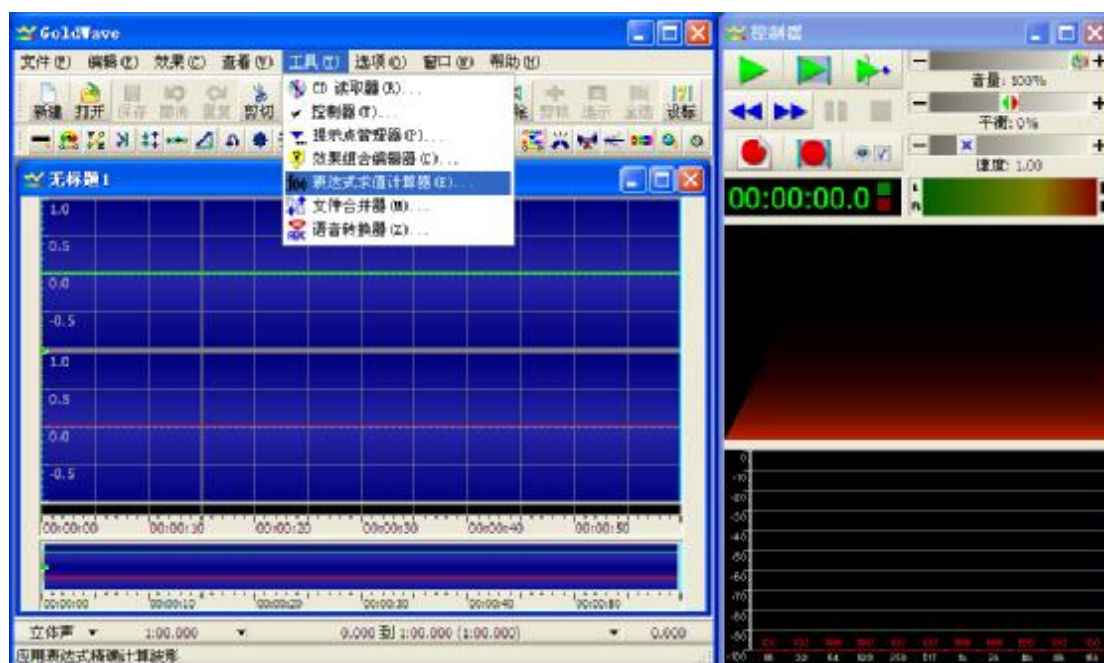


图 5 表达式求值计算器

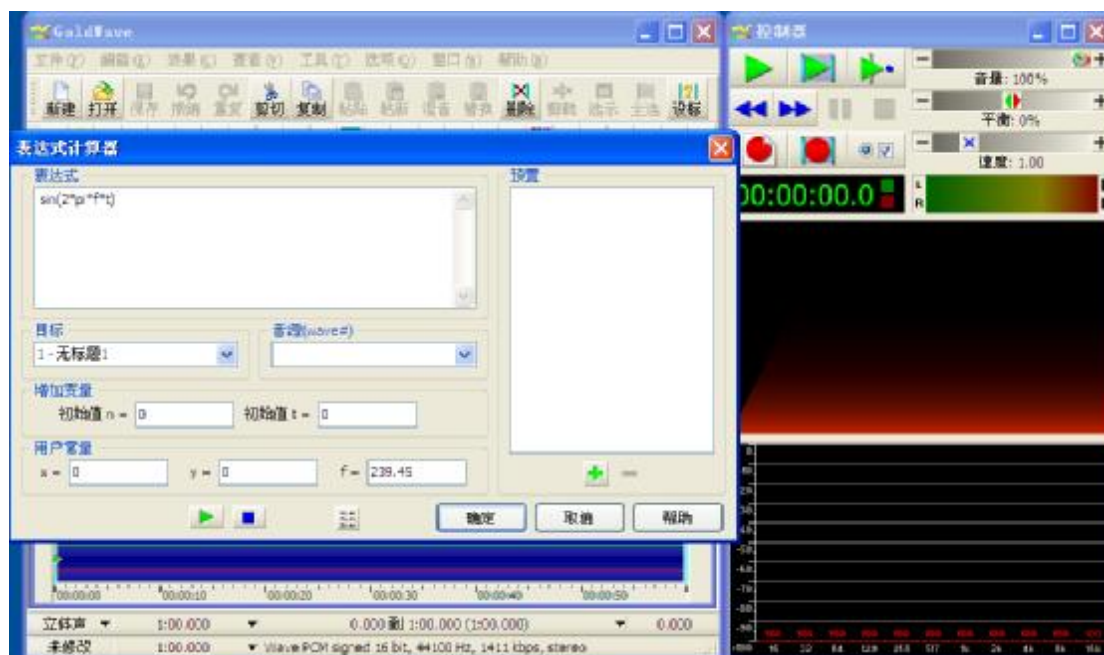


图 6 输入表达式和设置参数

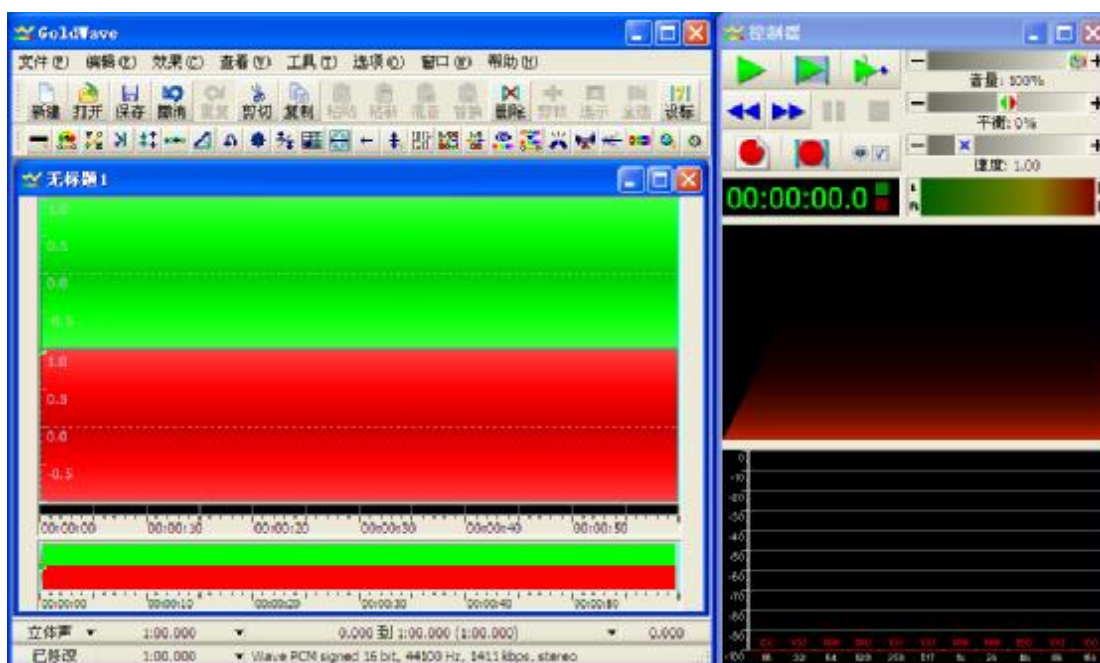


图 7 生成的音频文件（音量为 100%）

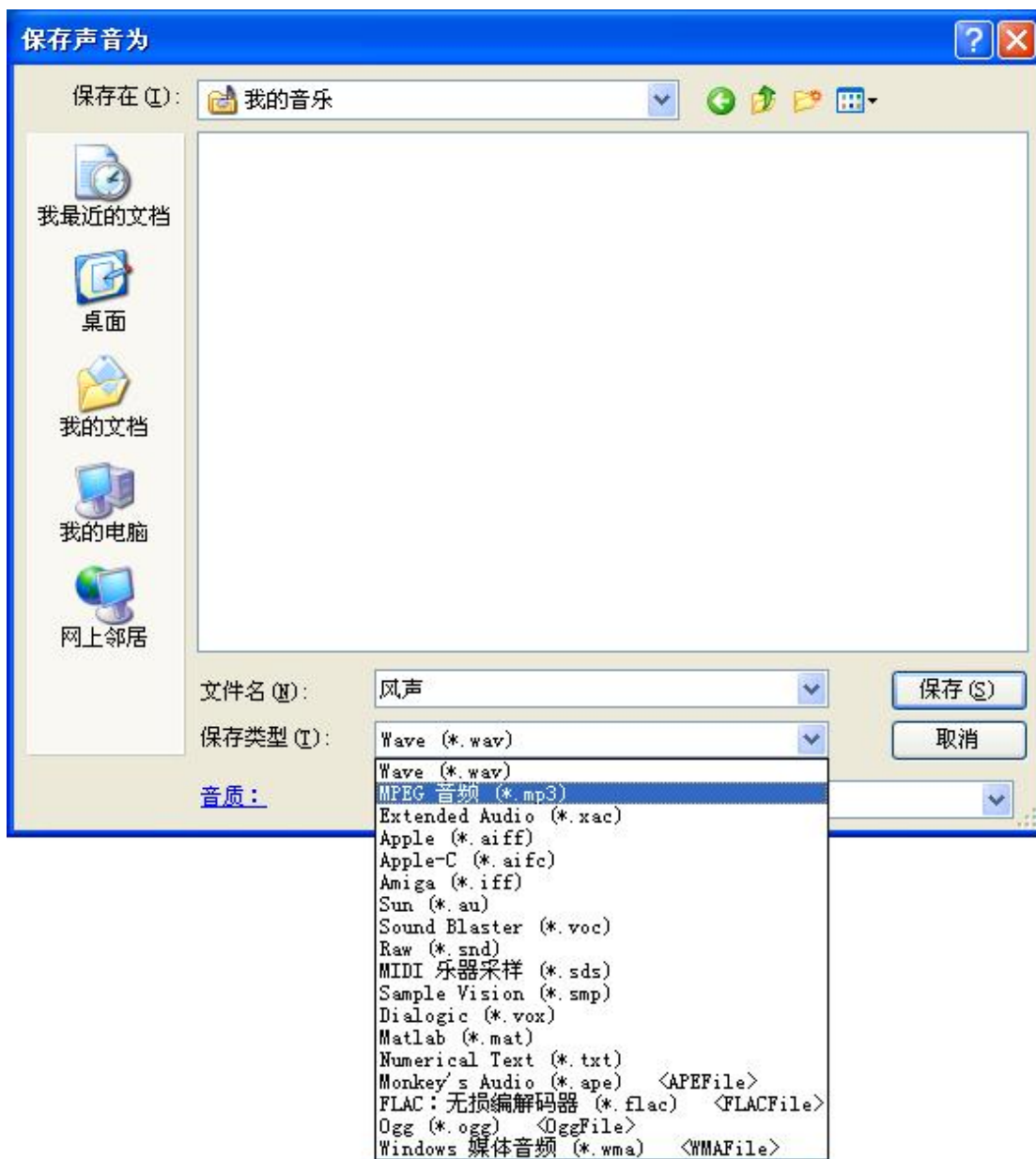


图 8 保存声音文件（可选多种音频文件类型）

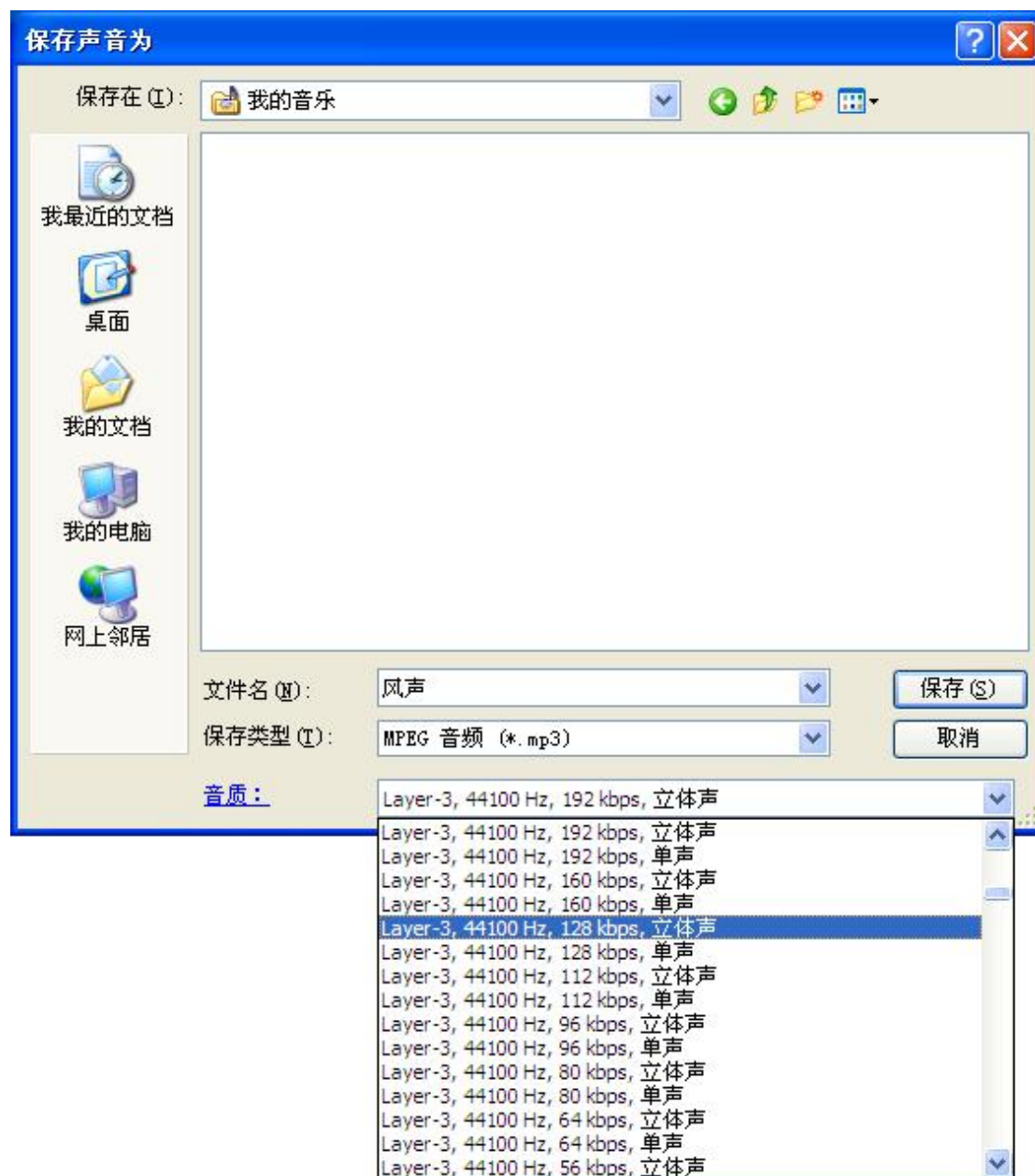


图 9 保存声音文件（可选多种音质效果）

5. 风声能量分析与扬声器功率选择

不妨再半定量的估算下风吹过输电线的声音能量到底有多大。假设从无穷远处理想来流到抵达输电线纵截面滞止位置，忽略粘性热损，风流动能部分完全变成了频率 239.45Hz 的理想正弦波声音。则单位长度输电线每秒产生的声能：

$$E = \frac{1}{2} \times m \times v^2 = \frac{1}{2} \times (0.01 \times 1 \times 12 \times 1.2705) \times 12^2 = 10.97712 \text{ (W/m)}$$

再简化假设声音沿输电线横截面向二维空间均匀扩散、人耳距离输电线 10m 远且人耳听力当量有效接收长度为 5cm，则到达人耳的声能：

$$E' = 10.97712 \times \frac{0.05}{2 \times 3.14159 \times 10} \approx 0.008735 \text{ (W)}$$

可见采用电子市场上常见的 0.5W 小扬声器（喇叭）足以模拟该声能的响度，觉得声音小的话可把耳朵凑近扬声器。现在这类小扬声器和耳机一般为电磁式（判断方式是在耳机不通电的情况下看它是否能吸附铁类磁性材料）。电磁式工作原理是：扬声器后部都固定一个永磁体（磁铁），前侧为振膜，仔细看振膜内侧还附有很细的铜线圈（音圈），永磁体和振膜之间是有微小空隙，这样当对铜线圈通电的时候，由于电磁感应铜线圈将产生感生磁场，这个感生磁场和永磁体磁场之间就发生吸引或排斥作用，形成位移，这样在一定的电流交变情况下，振膜也将产生相同频率的振动，最后带动空气振动传播形成声波进入人耳，见图 10。

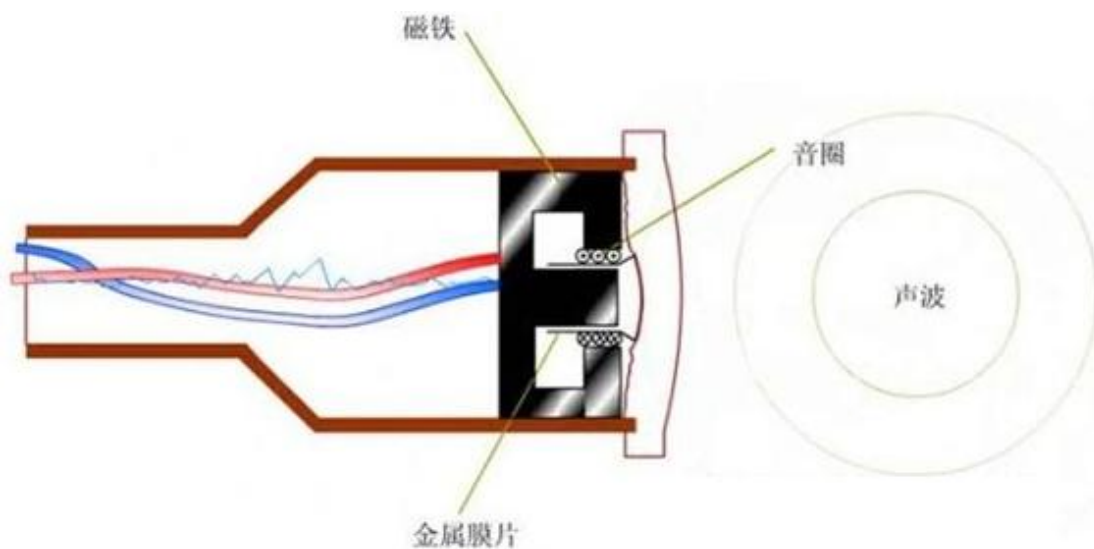


图 10 扬声器工作原理示意图

6. 风声模拟电子装置

接下来，再搭建一套风声模拟电子装置：

1) 硬件方案

可采用任何最小单片机系统进行构建，发声装置采用一般单片机引脚可直接驱动的 0.5W 迷你型扬声器。由于扬声器音量的大小与电压幅度有关，为了便于实时调节音量，可把扬声器并联到一个大电阻（如 2K2 的）电位器的一端和滑动端，电位器的两固定端分别与单片机输出引脚和 GND 引脚连接，这样在播放声音时可转动电位器旋转杆以增大和减小扬声器两端电压幅值，从而控制音量的大小。此外，为了防止电压毛刺，考虑对扬声器并联一个小电容。

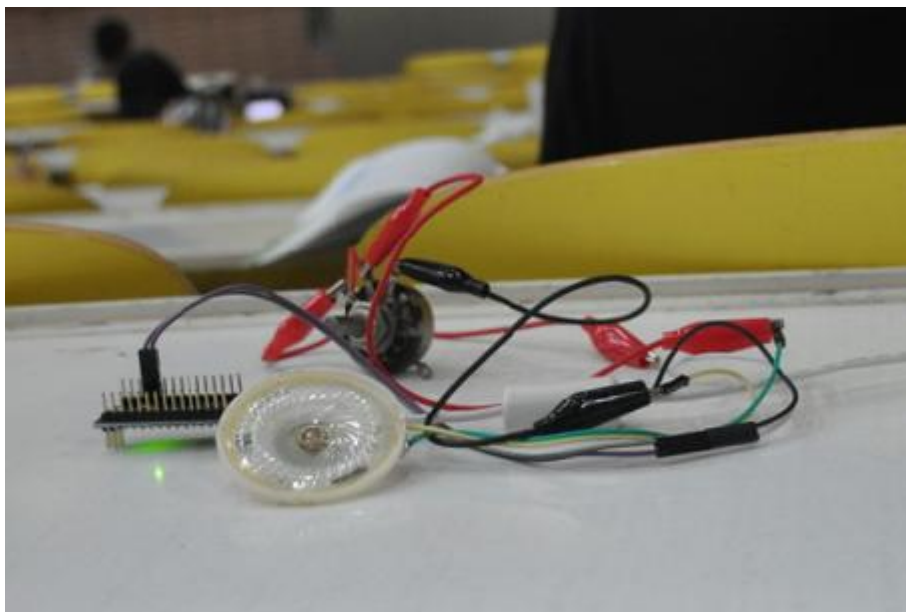


图 11 风声模拟电子装置

2) 软件方案

采用同频率的方波近似模拟，正好大家也可以体会下两者在音色上的不同。已知频率，取倒数即为周期，即只需要实现对扬声器的正极电压在一半周期置高，另一半周期置低即可。可求得实例风振的一半周期约为 2ms，最简单但精度较差的方式是使用软件内置的 `delay()` 函数或 `sleep()` 函数，也可以使用精度更高的微秒级已工作时间长度函数：只需要先置高，再进入半周期的时间判断循环，当时间差达到 2ms 条件时跳出（如用 `GOTO` 语句）当前循环，然后置低并再进入下一个半周期的时间判断循环… …

3) 声音录制方案

拾音器采用 QQ 视频聊天用的普通 PC 麦克风，将麦克风尽量靠近扬声器。录制软件有很多，比如 WindowsXP 自带的录音机（路径为“开始”-“附件”-“娱乐”-“录音机”），但只能保存 60s 的 wav 格式，这里选择混录天王（试用版可以录制 20s），保存的声音文件格式选择最常用的 mp3 格式，参数基本可以默认。由于在教室里录，难免偶尔会有杂音。



图 12 录音机（只能录 60s）



图 13 录音机（只能保存 wav 格式）



图 14 混录天王（加载“全能录音器”）

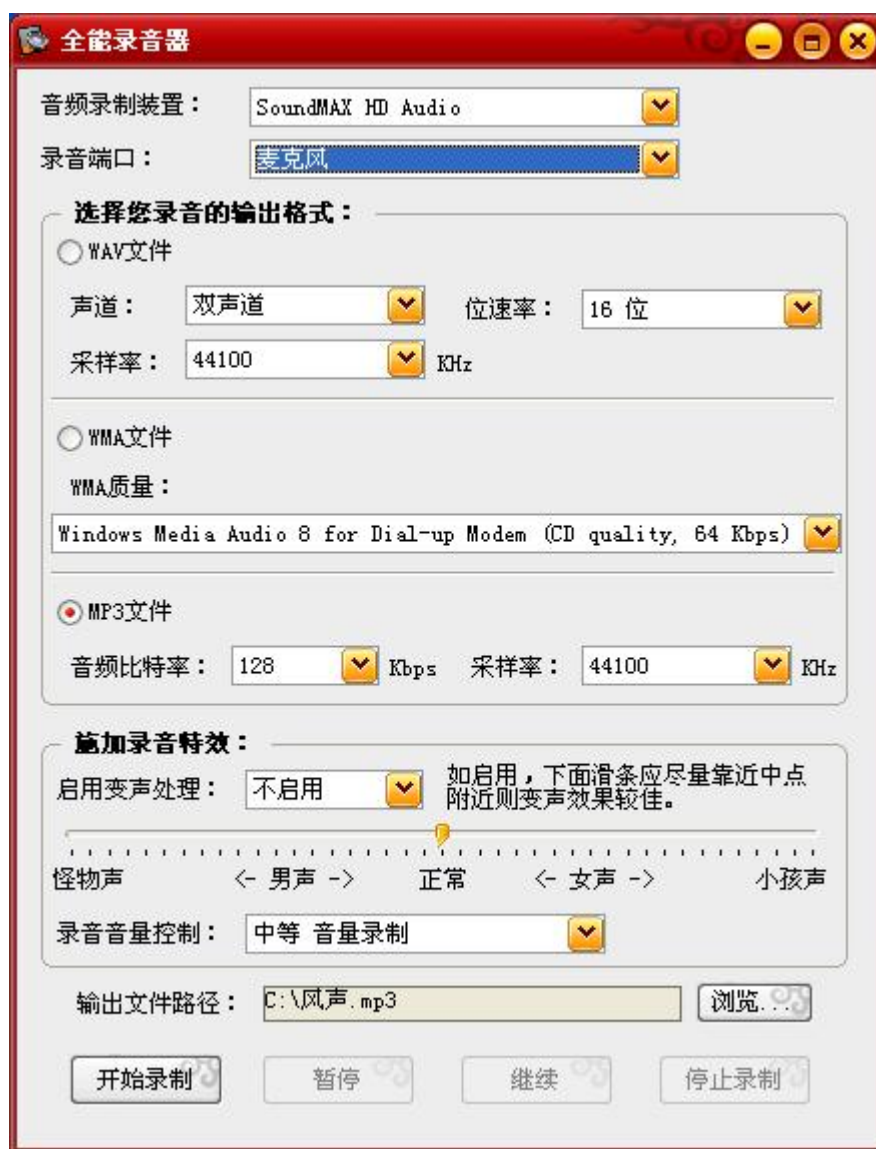


图 15 混录天王（麦克风+MP3 文件）

7. 风声下载

本站提供上文已保存和录制的风声音频文件，可点击链接下载试听：

http://www.ecengine.com/download/cfd/windsound_1.mp3

http://www.ecengine.com/download/cfd/windsound_2.mp3

8. 附录

风力等级与风速表

风力等级	风的名称	风速 (m/s)	风速 (Km/h)	陆地状况	海面状况
0	无风	0~0.2	小于1	静, 烟直上	平静如镜
1	软风	0.3~1.5	1~5	烟能表示风向, 但风向标不能转动	微浪
2	轻风	1.6~3.3	6~11	人面感觉有风, 树叶有微响, 风向标能转动	小浪
3	微风	3.4~5.4	12~19	树叶及微枝摆动不息, 旗帜展开	小浪
4	和风	5.5~7.9	20~28	能吹起地面灰尘和纸张, 树的小枝微动	轻浪
5	清劲风	8.0~10.7	29~38	有叶的小树枝摇摆, 内陆水面有小波	中浪
6	强风	10.8~13.8	39~49	大树枝摆动, 电线呼呼有声, 举伞困难	大浪
7	疾风	13.9~17.1	50~61	全树摇动, 迎风步行感觉不便	巨浪
8	大风	17.2~20.7	62~74	微枝折毁, 人向前行感觉阻力甚大	猛浪
9	烈风	20.8~24.4	75~88	建筑物有损坏 (烟囱顶部及屋顶瓦片移动)	狂涛
10	狂风	24.5~28.4	89~102	陆上少见, 见时可使树木拔起将建筑物损坏严重	狂涛
11	暴风	28.5~32.6	103~117	陆上很少, 有则必有重大损毁	非凡现象
12	飓风	32.7~36.9	118~133	陆上绝少, 其摧毁力极大	非凡现象
		37.0~41.4	134~149		
		41.5~46.1	150~166		
		46.2~50.9	167~183		
		51.0~56.0	184~201		
		56.1~61.2	202~220		