

重庆邮电大学

学生实验实习报告册

学年学期： 2022 -2023 学年 ☐春 ☒秋学期

课程名称： 信号处理实验

学生学院： 通信与信息工程学院

专业班级：

学生学号：

学生姓名：

联系电话：

重庆邮电大学教务处制

课程名称	信号处理实验	课程编号	A2010550
实验地点	YF314	实验时间	2022 年 11 月 18 日
校外指导教师	郑丹玲	校内指导教师	郑丹玲
实验名称	用 MATLAB 设计 IIR 数字滤波器		
评阅人签字		成绩	

一、实验目的

- 1、加深对 IIR 数字滤波器设计方法和设计步骤的理解；
- 2、掌握用模拟滤波器原型设计 IIR 数字滤波器的方法；
- 3、能编写 MATLAB 函数，掌握设计 IIR 数字滤波器的函数调用方法；
- 4、根据不同的应用场景，确定不同的设计指标，设计出具有不同功能和性能的滤波器。不同滤波器的设计方法具有不同的优缺点，因此要全面、客观看待可能面对或出现的问题。

二、实验原理

2.1 脉冲响应不变法的基本知识

脉冲响应不变法又称冲激响应不变法，是将系统从 s 平面映射到 z 平面的一种变换方法，使数字滤波器的单位脉冲响应 $h(n)$ 模仿模拟滤波器的冲激响应 $h_a(n)$ 。其变换关系式为 $z = e^{sT}$ 。

由于 e^{sT} 是一个周期函数，因而 s 平面虚轴上每一段 $2\pi/T$ 的线段都映射到 z 平面单位圆上一周。由于重叠映射，因而冲激响应不变法是一种多值映射关系。数字滤波器的频率响应是原模拟滤波器的频率响应的周期延拓（如图 2-1）所示。只有当模拟滤波器的频率响应是有限带宽，且频带宽 $|\Omega| \leq (\pi/T) = \Omega_s/2$ ，才能避免数字滤波器的频率响应发生混叠现象。因此，脉冲响应不变法只适用于限带的模拟滤波器，对于高频区幅频特性不等于零的高通和带阻滤波器不适用。

用脉冲响应不变法设计 IIR 数字滤波器的步骤如下：

- ① 输入给定的数字滤波器的设计指标；
- ② 根据公式 $\Omega = \omega/T$ 将数字滤波器设计指标转换为模拟滤波器设计指标；
- ③ 确定模拟滤波器的最小阶数和截止频率；
- ④ 计算模拟低通原型滤波器的系统传递函数；
- ⑤ 利用模拟域频率变换法求解实际模拟滤波器的系统传递函数；
- ⑥ 用脉冲响应不变法将模拟滤波器转换为数字滤波器。

2. 双线性变化法的基本知识

双线性变换法是将整个 s 平面映射到 z 平面，其映射关系为

$$s = \frac{2(1-z^{-1})}{T(1+z^{-1})} \quad \text{或} \quad s = \frac{1+sT/2}{1-sT/2}$$

双线性变换法克服了脉冲响应不变法从 s 平面到 z 平面的多值映射的缺点，消除了频谱混叠现象。但其在变换过程中产生了非线性畸变，在设计 IIR 数字滤波器的过程中需要进行一定的修正。

用双线性变换法设计 IIR 数字滤波器的步骤如下：

- ① 输入给定的数字滤波器的设计指标；

- ②根据公式 $\Omega=(2/T)\tan(\omega/2)$ 进行预修正，将数字滤波器设计指标转换为模拟滤波器设计指标；
- ③确定模拟滤波器的最小阶数和截止频率；
- ④计算模拟低通原型滤波器的系统传递函数；
- ⑤利用模拟域频率变换法求解实际模拟滤波器的系统传递函数；
- ⑥用双线性变换法将模拟滤波器转换为数字滤波器。

3. 信号的整数倍抽取

设 $x(n)$ 是连续信号 $x_a(t)$ 的采样序列，其采样频率为 $f_1 = 1/T_1(\text{Hz})$ ， T_1 是采样间隔。如果将其采样频率降低到原来的 $1/D$ (D 为大于 1 的整数，称为抽取因子)，最简单的方法是对 $x(n)$ 每 $D-1$ 个点抽取 1 点，组成一个新的序列 $y(n)$ 。由于 $y(n)$ 的采样间隔 $T_2 = DT_1$ ，除非抽取后仍能满足采样定理，否则会引起频谱混叠现象。信号抽取前后的频谱关系见教材第 8 章的 8.2 节。为了避免抽取后的频率混叠，在抽取前先采用一个抗混叠低通滤波器对信号滤波，把信号的频带限制在某个频率以下。

抗混叠滤波器的系统函数为：

$$H(e^{j\omega}) = \begin{cases} 1, & |\omega| < \frac{\pi}{D} \\ 0, & \frac{\pi}{D} \leq |\omega| \leq \pi \end{cases}$$

三、实验程序

```

1.  clc;
2.  clear;
3.  close all;
4.
5.  %% 用脉冲响应不变法设计 IIR 数字低通滤波器
6.  omega_p = 0.25 * pi;    %滤波器的通带截止频率
7.  omega_s = 0.4 * pi;    %滤波器的通带截止频率
8.  Rp = 1;                %滤波器的通带衰减指标
9.  As = 15;               %滤波器的阻带衰减指标
10. ripple = 10^(-Rp/20);  %滤波器的通带衰减对应的幅度值
11. Attn = 10^(-As/20);    %滤波器的阻带衰减对应的幅度值
12.
13. Fs = 2000;
14. T = 1 / Fs;
15. Omgp = omega_p * Fs;
16. Omgs = omega_s * Fs;
17. [n,Omgc] = buttord(Omgp,Omgs,Rp,As,'s');    %计算阶数 n 和截止频率
18. [z0,p0,k0] = buttap(n);    %设计归一化的巴特沃思模拟滤波器原型
19. ba1 = k0 * real(poly(z0));  %求原型滤波器的系数 b
20. aa1 = real(poly(p0));      %求原型滤波器的系数 a
21. [ba,aa] = lp2lp(ba1,aa1,Omgc);    %将模拟低通原型滤波器转换为实际的低通滤波器：ba 为分子多项式系数、aa 为分母多项式系数

```

```

22. [bd,ad] =impinvar(ba,aa,Fs);           %利用脉冲响应不变法将模拟滤波器转换为数字
      滤波器
23. [H,w] = freqz(bd,ad);                 %求数字系统的频率特性
24. dbH = 20 * log10((abs(H) + eps)/max(abs(H)));
25. figure(1);
26. subplot(2,2,1);
27. plot(w / pi,abs(H));
28. ylabel('|H|');
29. title("幅频响应");
30. axis([0,1,0,1.1]);
31. set(gca,'XTickMode','manual','XTick',[0,0.25,0.4,1]);
32. set(gca,'YTickMode','manual','YTick',[0,Attn,ripple,1]);
33. grid;
34. subplot(2,2,2);
35. plot(w / pi,angle(H)/pi);
36. ylabel('\phi');
37. title("相频响应");
38. axis([0,1,-1,1]);
39. set(gca,'XTickMode','manual','XTick',[0,0.25,0.4,1]);
40. set(gca,'YTickMode','manual','YTick',[-1,0,1]);
41. grid;
42. subplot(2,2,3);
43. plot(w / pi,dbH);
44. ylabel('dB');
45. xlabel('频率 (\pi)');
46. title("幅频响应(dB)");
47. axis([0,1,-40,5]);
48. set(gca,'XTickMode','manual','XTick',[0,0.25,0.4,1]);
49. set(gca,'YTickMode','manual','YTick',[-50,-15,-1,0]);
50. grid;
51. subplot(2,2,4);
52. zplane(bd,ad);
53. axis([-1.1,1.1,-1.1,1.1]);
54. title('零极点图');
55.
56. %% 用双线性变换法设计 IIR 数字低通滤波器
57. omega_p = 0.25 * pi;                 %滤波器的通带截止频率
58. omega_s = 0.4 * pi; %滤波器的通带截止频率
59. Rp = 1;                               %滤波器的通带衰减指标
60. As = 15;                              %滤波器的阻带衰减指标
61. ripple = 10^(-Rp/20);                %滤波器的通带衰减对应的幅度值
62. Attn = 10^(-As/20);                  %滤波器的阻带衰减对应的幅度值
63.
64. Fs = 100;
65. T = 1 / Fs;
66. Omgp = tan(omega_p / 2) * Fs * 2;

```

```

67. Omgs = tan(omega_s / 2) * Fs * 2;
68. [n,Omgc] = buttord(Omgp,Omgc,Rp,As,'s'); %计算阶数 n 和截止频率
69. [z0,p0,k0] = buttap(n); %设计归一化的巴特沃思模拟滤波器原型
70. ba1 = k0 * real(poly(z0)); %求原型滤波器的系数 b
71. aa1 = real(poly(p0)); %求原型滤波器的系数 a
72. [ba,aa] = lp2lp(ba1,aa1,Omgc); %将模拟低通原型滤波器转换为实际的低通滤波器: ba 为分子多项式系数、aa 为分母多项式系数
73. [bd,ad] = bilinear(ba,aa,Fs); %利用双线性变换法将模拟滤波器转换为数字滤波器
74. dbH = 20 * log10((abs(H) + eps)/max(abs(H)));
75. figure(2);
76. subplot(2,2,1);
77. plot(w / pi,abs(H));
78. ylabel('|H|');
79. title("幅频响应");
80. axis([0,1,0,1.1]);
81. set(gca,'XTickMode','manual','XTick',[0,0.25,0.4,1]);
82. set(gca,'YTickMode','manual','YTick',[0,Attn,ripple,1]);
83. grid;
84. subplot(2,2,2);
85. plot(w / pi,angle(H)/pi);
86. ylabel('\phi');
87. title("相频响应");
88. axis([0,1,-1,1]);
89. set(gca,'XTickMode','manual','XTick',[0,0.25,0.4,1]);
90. set(gca,'YTickMode','manual','YTick',[-1,0,1]);
91. grid;
92. subplot(2,2,3);
93. plot(w / pi,dbH);
94. ylabel('dB');
95. xlabel('频率 (\pi)');
96. title("幅频响应(dB)");
97. axis([0,1,-40,5]);
98. set(gca,'XTickMode','manual','XTick',[0,0.25,0.4,1]);
99. set(gca,'YTickMode','manual','YTick',[-50,-15,-1,0]);
100. grid;
101. subplot(2,2,4);
102. zplane(bd,ad);
103. axis([-1.1,1.1,-1.1,1.1]);
104. title('零极点图');
105.
106. %% 实验内容
107. % 1. 设计滤波器
108. omega_p = 0.2 * pi; %滤波器的通带截止频率
109. omega_s = 0.35 * pi; %滤波器的通带截止频率
110. Rp = 1; %滤波器的通带衰减指标

```

```

111. As = 15; %滤波器的阻带衰减指标
112. ripple = 10^(-Rp/20); %滤波器的通带衰减对应的幅度值
113. Attn = 10^(-As/20); %滤波器的阻带衰减对应的幅度值
114.
115. Fs = 10;
116. T = 1 / Fs;
117. Omgp = tan(omega_p / 2) * Fs * 2;
118. Omgs = tan(omega_s / 2) * Fs * 2;
119. [n,Omgc] = buttord(Omgp,Omgs,Rp,As,'s'); %计算阶数 n 和截止频率
120. [z0,p0,k0] = buttap(n); %设计归一化的巴特沃思模拟滤波器原型
121. ba1 = k0 * real(poly(z0)); %求原型滤波器的系数 b
122. aa1 = real(poly(p0)); %求原型滤波器的系数 a
123. [ba,aa] = lp2lp(ba1,aa1,Omgc); %将模拟低通原型滤波器转换为实际的低通滤波器: ba 为分子多项式系数、aa 为分母多项式系数
124. [bd,ad] = bilinear(ba,aa,Fs); %利用双线性变换法将模拟滤波器转换为数字滤波器
125. dbH = 20 * log10((abs(H) + eps)/max(abs(H)));
126. figure(3);
127. subplot(2,2,1);
128. plot(w / pi,abs(H));
129. ylabel('|H|');
130. title("幅频响应");
131. axis([0,1,0,1.1]);
132. set(gca,'XTickMode','manual','XTick',[0,0.2,0.35,1]);
133. set(gca,'YTickMode','manual','YTick',[0,Attn,ripple,1]);
134. grid;
135. subplot(2,2,2);
136. plot(w / pi,angle(H)/pi);
137. ylabel('\phi');
138. title("相频响应");
139. axis([0,1,-1,1]);
140. set(gca,'XTickMode','manual','XTick',[0,0.2,0.35,1]);
141. set(gca,'YTickMode','manual','YTick',[-1,0,1]);
142. grid;
143. subplot(2,2,3);
144. plot(w / pi,dbH);
145. ylabel('dB');
146. xlabel('频率 (\pi)');
147. title("幅频响应(dB)");
148. axis([0,1,-40,5]);
149. set(gca,'XTickMode','manual','XTick',[0,0.2,0.35,1]);
150. set(gca,'YTickMode','manual','YTick',[-50,-15,-1,0]);
151. grid;
152. subplot(2,2,4);
153. zplane(bd,ad);
154. axis([-1.1,1.1,-1.1,1.1]);

```

```

155. title('零极点图');
156.
157. % 滤波
158. xn = [-4, -2, 0, -4, -6, -4, -2, -4, -6, -6, -4, -4, -6, -2, 6, 12, 8, ...
159.        0, -16, -38, -60, -84, -90, -66, -32, -4, -2, -4, 8, 12, 12, 10, 6, 6, 6, ...
160.        4, 0, 0, 0, 0, 0, -2, -4, 0, 0, 0, -2, -2, 0, 0, -2, -2, -2, -2, 0];
161. figure(4);
162. subplot(2,2,1);
163. stem(0:length(xn)-1,xn, '.');
164. grid;
165. title("滤波前波形");
166. xk = fft(xn,1024);
167. k = 0:1023;
168. k = k / 512;
169. subplot(2,2,3);
170. X = abs(xk);
171. plot(k,X);
172. ylabel('|X|');
173. title("幅频响应");
174. xlabel('\omega/\pi');
175. grid;
176. yn = filter(bd,ad,xn);
177. subplot(2,2,2);
178. stem(0:length(yn)-1,yn, '.');
179. grid;
180. title("滤波后波形");
181. yk = fft(yn,1024);
182. k = 0:1023;
183. k = k / 512;
184. subplot(2,2,4);
185. Y = abs(yk);
186. plot(k,Y);
187. ylabel('|Y|');
188. title("幅频响应");
189. xlabel('\omega/\pi');
190. grid;
191.
192. %% 选做题
193. % 读取音频
194. D = 2;
195. [xn, fs] = audioread('motherland.wav');
196. yn1 = xn(1:D:length(xn));
197. % sound(yn1,fs/D); %播放损坏音质版本
198.
199. %设计数字滤波器
200. omega_p = 0.45 * pi; %滤波器的通带截止频率

```

```

201. omega_s = 0.6 * pi; %滤波器的阻带截止频率
202. Rp = 0.3; %滤波器的通带衰减指标
203. As = 40; %滤波器的阻带衰减指标
204. ripple = 10^(-Rp/20); %滤波器的通带衰减对应的幅度值
205. Attn = 10^(-As/20); %滤波器的阻带衰减对应的幅度值
206.
207. Fs = fs;
208. T = 1 / Fs;
209. Omgp = omega_p * Fs;
210. Omgs = omega_s * Fs;
211. [n,Omgc] = buttord(Omgp,Omgs,Rp,As,'s'); %计算阶数 n 和截止频率
212. [z0,p0,k0] = buttap(n); %设计归一化的巴特沃思模拟滤波器原型
213. ba1 = k0 * real(poly(z0)); %求原型滤波器的系数 b
214. aa1 = real(poly(p0)); %求原型滤波器的系数 a
215. [ba,aa] = lp2lp(ba1,aa1,Omgc); %将模拟低通原型滤波器转换为实际的低通滤波器: ba 为分子多项式系数、aa 为分母多项式系数
216. [bd,ad] =impinvar(ba,aa,Fs); %利用脉冲响应不变法将模拟滤波器转换为数字滤波器
217. [H,w] = freqz(bd,ad); %求数字系统的频率特性
218. dbH = 20 * log10((abs(H) + eps)/max(abs(H)));
219. figure(5);
220. subplot(2,2,1);
221. plot(w / pi,abs(H));
222. ylabel('|H|');
223. title("幅频响应");
224. axis([0,1,0,1.1]);
225. set(gca,'XTickMode','manual','XTick',[0,0.45,0.6,1]);
226. set(gca,'YTickMode','manual','YTick',[0,Attn,ripple,1]);
227. grid;
228. subplot(2,2,2);
229. plot(w / pi,angle(H)/pi);
230. ylabel('\phi');
231. title("相频响应");
232. axis([0,1,-1,1]);
233. set(gca,'XTickMode','manual','XTick',[0,0.45,0.6,1]);
234. set(gca,'YTickMode','manual','YTick',[-1,0,1]);
235. grid;
236. subplot(2,2,3);
237. plot(w / pi,dbH);
238. ylabel('dB');
239. xlabel('频率 (\pi)');
240. title("幅频响应(dB)");
241. axis([0,1,-40,5]);
242. set(gca,'XTickMode','manual','XTick',[0,0.45,0.6,1]);
243. set(gca,'YTickMode','manual','YTick',[-50,-15,-1,0]);
244. grid;

```



```

245. subplot(2,2,4);
246. zplane(bd,ad);
247. axis([-1.1,1.1,-1.1,1.1]);
248. title('零极点图');
249.
250. x = filter(bd,ad,xn);
251. yn2 = x(1:D:length(x));
252. sound(yn2,fs/D);    %播放抗混叠版
253. % audiowrite('鬼哭狼嚎版一条大河.wav',yn2,fs/D);
254.
255. %% 思考题 1
256. omega_p = 0.2 * pi;    %滤波器的通带截止频率
257. omega_s = 0.3 * pi; %滤波器的通带截止频率
258. Rp = 1;                %滤波器的通带衰减指标
259. As = 20;               %滤波器的阻带衰减指标
260. ripple = 10^(-Rp/20); %滤波器的通带衰减对应的幅度值
261. Attn = 10^(-As/20);   %滤波器的阻带衰减对应的幅度值
262.
263. Fs = 2000;
264. T = 1 / Fs;
265. Omgp = omega_p * Fs;
266. Omgs = omega_s * Fs;
267. [n,Omgc] = buttord(Omgp,Omgs,Rp,As,'s');    %计算阶数 n 和截止频率
268. [z0,p0,k0] = buttap(n);    %设计归一化的巴特沃思模拟滤波器原型
269. ba1 = k0 * real(poly(z0)); %求原型滤波器的系数 b
270. aa1 = real(poly(p0));      %求原型滤波器的系数 a
271. [ba,aa] = lp2lp(ba1,aa1,Omgc); %将模拟低通原型滤波器转换为实际的低通滤波器: ba 为分子多项式系数、aa 为分母多项式系数
272. [bd,ad] =impinvar(ba,aa,Fs); %利用脉冲响应不变法将模拟滤波器转换为数字滤波器
273. [H,w] = freqz(bd,ad);      %求数字系统的频率特性
274. dbH = 20 * log10((abs(H) + eps)/max(abs(H)));
275. figure(6);
276. subplot(2,2,1);
277. plot(w / pi,abs(H));
278. ylabel('|H|');
279. title("幅频响应");
280. axis([0,1,0,1.1]);
281. set(gca,'XTickMode','manual','XTick',[0,0.25,0.4,1]);
282. set(gca,'YTickMode','manual','YTick',[0,Attn,ripple,1]);
283. grid;
284. subplot(2,2,2);
285. plot(w / pi,angle(H)/pi);
286. ylabel('\phi');
287. title("相频响应");
288. axis([0,1,-1,1]);

```

```

289. set(gca, 'XTickMode', 'manual', 'XTick', [0, 0.25, 0.4, 1]);
290. set(gca, 'YTickMode', 'manual', 'YTick', [-1, 0, 1]);
291. grid;
292. subplot(2, 2, 3);
293. plot(w / pi, dBH);
294. ylabel('dB');
295. xlabel('频率 (\pi)');
296. title("幅频响应(dB)");
297. axis([0, 1, -40, 5]);
298. set(gca, 'XTickMode', 'manual', 'XTick', [0, 0.25, 0.4, 1]);
299. set(gca, 'YTickMode', 'manual', 'YTick', [-50, -20, -1, 0]);
300. grid;
301. subplot(2, 2, 4);
302. zplane(bd, ad);
303. axis([-1.1, 1.1, -1.1, 1.1]);
304. title('零极点图');
305.
306.
307. %% 思考题 2
308. wp=0.6;
309. ws=0.4;
310. Rp=1;
311. As=20;
312. ripple = 10^(-Rp/20); %滤波器的通带衰减对应的幅度值
313. Attn = 10^(-As/20); %滤波器的阻带衰减对应的幅度值
314. [n1, wc1]=buttord(wp, ws, Rp, As);
315. [b1, a1]=butter(n1, wc1, 'high');
316. figure(7);
317. [h1, w1]=freqz(b1, a1);
318. db1=20*log10(abs(h1)/max(abs(h1)));
319. subplot(221);
320. plot(w1/pi, abs(h1));
321. xlabel('\omega');
322. ylabel('|H|');
323. title("幅频响应");
324. axis([0, 1, 0, 1.1]);
325. set(gca, 'XTickMode', 'manual', 'XTick', [0, 0.4, 0.6, 1]);
326. set(gca, 'YTickMode', 'manual', 'YTick', [0, Attn, ripple, 1]);
327. grid;
328. subplot(222);
329. plot(w1/pi, angle(h1)/pi);
330. ylabel('\phi');
331. title("相频响应");
332. axis([0, 1, -1, 1]);
333. grid;
334. set(gca, 'XTickMode', 'manual', 'XTick', [0, 0.4, 0.6, 1]);

```

```

335. set(gca, 'YTickMode', 'manual', 'YTick', [-1,0,1]);
336. subplot(223);
337. plot(w1/pi, db1);
338. ylabel('dB');
339. xlabel('频率 (\pi) ');
340. axis([0,1,-40,5]);
341. set(gca, 'XTickMode', 'manual', 'XTick', [0,0.4,0.6,1]);
342. set(gca, 'YTickMode', 'manual', 'YTick', [-50,-30,-2,0]);
343. grid;
344. subplot(224);
345. subplot(2,2,4);
346. zplane(b1,a1);
347. axis([-1.1,1.1,-1.1,1.1]);
348. title('零极点图');
349.
350. %% 思考题 3
351. wp=[0.2,0.6];
352. ws=[0.15,0.65];
353. rp=1;
354. as=45;
355. ripple = 10^(-Rp/20); %滤波器的通带衰减对应的幅度值
356. Attn = 10^(-As/20); %滤波器的阻带衰减对应的幅度值
357. [n1,wc1]=buttord(wp,ws,rp,as);
358. [b1,a1]=butter(n1,wc1);
359. figure(8);
360. [h1,w1]=freqz(b1,a1);
361. db1=20*log10(abs(h1)/max(abs(h1)));
362. subplot(221);
363. plot(w1/pi,abs(h1));
364. xlabel('\omega');
365. ylabel('|H|');
366. title("幅频响应");
367. axis([0,1,0,1.1]);
368. set(gca, 'XTickMode', 'manual', 'XTick', [0,0.15,0.2,0.6,0.65,1]);
369. set(gca, 'YTickMode', 'manual', 'YTick', [0,Attn,ripple,1]);
370. grid;
371. subplot(222);
372. plot(w1/pi,angle(h1)/pi);
373. ylabel('\phi');
374. title("相频响应");
375. axis([0,1,-1,1]);
376. grid;
377. set(gca, 'XTickMode', 'manual', 'XTick', [0,0.15,0.2,0.6,0.65,1]);
378. set(gca, 'YTickMode', 'manual', 'YTick', [-1,0,1]);
379. subplot(223);
380. plot(w1/pi,db1);

```

```

381. ylabel('dB');
382. xlabel('频率 (\pi) ');
383. axis([0,1,-40,5]);
384. set(gca,'XTickMode','manual','XTick',[0,0.15,0.2,0.6,0.65,1]);
385. set(gca,'YTickMode','manual','YTick',[-70,-45,-1,0]);
386. axis([0,1.1,-80,5]);
387. grid;
388. subplot(224);
389. subplot(2,2,4);
390. zplane(b1,a1);
391. axis([-1.1,1.1,-1.1,1.1]);
392. title('零极点图');
393.
394.
395. %% 思考题 4
396. wp=[0.2,0.6];
397. ws=[0.15,0.65];
398. rp=1;
399. as=45;
400. ripple = 10^(-Rp/20); %滤波器的通带衰减对应的幅度值
401. Attn = 10^(-As/20); %滤波器的阻带衰减对应的幅度值
402. [n1,wc1]=buttord(wp,ws,rp,as);
403. [b1,a1]=butter(n1,wc1,'stop');
404. figure(9);
405. [h1,w1]=freqz(b1,a1);
406. db1=20*log10(abs(h1)/max(abs(h1)));
407. subplot(221);
408. plot(w1/pi,abs(h1));
409. xlabel('\omega');
410. ylabel('|H|');
411. title("幅频响应");
412. axis([0,1,0,1.1]);
413. set(gca,'XTickMode','manual','XTick',[0,0.15,0.2,0.6,0.65,1]);
414. set(gca,'YTickMode','manual','YTick',[0,Attn,ripple,1]);
415. grid;
416. subplot(222);
417. plot(w1/pi,angle(h1)/pi);
418. ylabel('\phi');
419. title("相频响应");
420. axis([0,1,-1,1]);
421. grid;
422. set(gca,'XTickMode','manual','XTick',[0,0.15,0.2,0.6,0.65,1]);
423. set(gca,'YTickMode','manual','YTick',[-1,0,1]);
424. subplot(223);
425. plot(w1/pi,db1);
426. ylabel('dB');

```

```

427. xlabel('频率 (\pi) ');
428. axis([0,1,-40,5]);
429. set(gca,'XTickMode','manual','XTick',[0,0.15,0.2,0.6,0.65,1]);
430. set(gca,'YTickMode','manual','YTick',[-70,-45,-1,0]);
431. axis([0,1.1,-80,5]);
432. grid;
433. subplot(224);
434. subplot(2,2,4);
435. zplane(b1,a1);
436. axis([-1.1,1.1,-1.1,1.1]);
437. title('零极点图');

```

四、仿真分析

1. 用双线性变换法设计的巴特沃斯数字低通滤波器，要求： $\omega_p=0.2\pi$ ， $R_p=1\text{dB}$ ；阻带： $\omega_s=0.35\pi$ ， $A_s=15\text{dB}$ ，滤波器采样频率 $F_s=10\text{Hz}$ 。

首先，设计巴特沃斯模拟滤波器，此时，首先计算对应的参数：

$$\lambda_{sp} = \frac{\Omega_s}{\Omega_p} = 1.886$$

$$k_{sp} = \sqrt{\frac{10^{\alpha_s/10} - 1}{10^{\alpha_p/10} - 1}} \approx 10.875$$

$$N = \frac{\lg k_{sp}}{\lg \lambda_{sp}} \approx 3.76$$

所以，最终 N 向上取整，最终 N 取 4，巴特沃斯模拟滤波器归一化系统函数为：

$$G_a(p) = \frac{1}{p^4 + b_3 p^3 + b_2 p^2 + b_1 p + b_0}$$

查表可得，极点 p 分别为： $-0.3827 \pm j0.9239$ ， $-0.9239 \pm j0.3827$ ，系数分别为 $b_0=1, b_1=2.6131, b_2=3.4142, b_3=2.6131$

利用双线性变换法，就是将整个 s 平面映射到 z 平面，其映射关系为：

$$s = \frac{2(1-z^{-1})}{T(1+z^{-1})} \quad \text{或} \quad s = \frac{1+sT/2}{1-sT/2}$$

最终，将巴特沃斯数字低通滤波器的仿真结果如下图 1 所示：

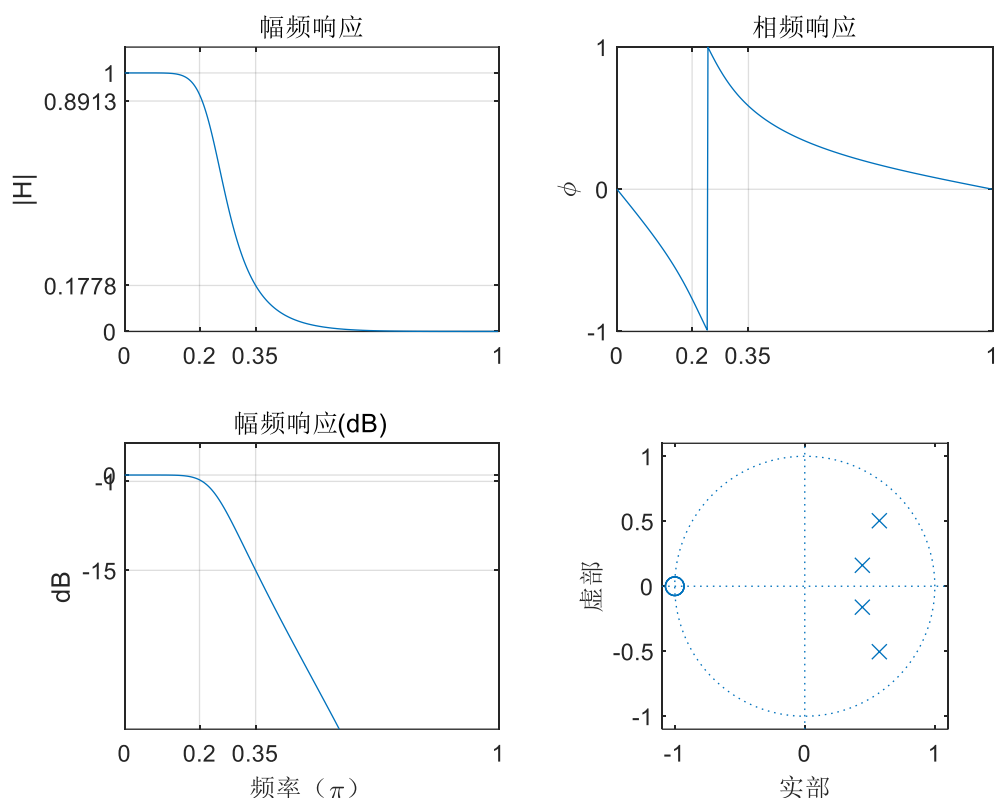


图 1 利用双线性变换法设计巴特沃斯数字低通滤波器仿真图

最终，可以由上图仿真结果中得到，最终的滤波器设计满足 $\omega_p=0.2\pi$ ， $R_p=1\text{dB}$ ；阻带： $\omega_s=0.35\pi$ ， $A_s=15\text{dB}$ 的低通滤波器要求。

2. 用 1 设计的数字滤波器对实际心电图信号采样序列 (实验原理中已给出) 进行滤波处理，分别绘制出滤波前后的心电图波形图和其幅频特性曲线，观察总结滤波作用与效果。

题中所给的心电图序列为：

$x_n = [-4, -2, 0, -4, -6, -4, -2, -4, -6, -6, -4, -4, -6, -2, 6, 12, 8, \dots$
 $0, -16, -38, -60, -84, -90, -66, -32, -4, -2, -4, 8, 12, 12, 10, 6, 6, 6, \dots$
 $4, 0, 0, 0, 0, 0, -2, -4, 0, 0, 0, -2, -2, 0, 0, -2, -2, -2, 0];$

而实验 1 中的低通滤波器的指标为 $\omega_p=0.2\pi$ ， $R_p=1\text{dB}$ ， $\omega_s=0.35\pi$ ， $A_s=15\text{dB}$ 。所以心电图高于 0.35π 的高频分量将会被滤除，仿真结果如下图 2 所示。

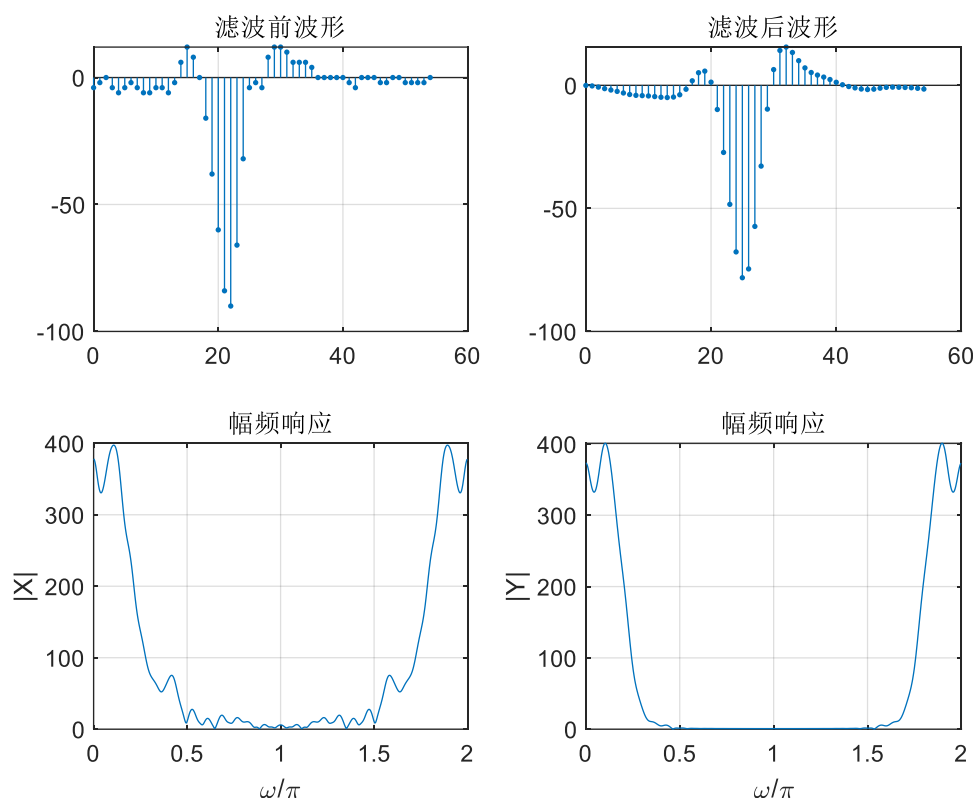


图2 心电信号前后滤波图

从上述仿真结果图中可以看出滤波后的幅频特性曲线高频部分明显被滤去，最终的时域信号相比原新店波形表现出更平滑的结果，与滤波器的设计指标的应用结果相互吻合。

3. 设计一个抗混叠低通滤波器

- (1) 读取音频信号 motherland.wav，得到 x_n ；
- (2) 对 x_n 进行 $D=2$ 的整数倍抽取，得到整数倍抽取后的音频信号 y_{n1} ；
- (3) 对 x_n 先进行抗混叠滤波，再进行 $D=2$ 的整数倍抽取，得到音频信号 y_{n2} 。
- (4) 取原音频某段信号，如 $n=8000\sim 8199$ 。画出该段信号模拟域幅度谱（横坐标为 f Hz）；画出该段信号 $D=2$ 抽取后的模拟域幅度谱；画出该段信号先经过抗混叠滤波再进行 $D=2$ 抽取的模拟域幅度谱。

抗混叠滤波器的系统函数为：

$$H(e^{j\omega}) = \begin{cases} 1, & |\omega| < \frac{\pi}{D} \\ 0, & \frac{\pi}{D} \leq |\omega| \leq \pi \end{cases}$$

因为题目中的整数倍抽取 $D=2$ ，所以最终的抗混叠滤波器系统函数为：

$$H(e^{j\omega}) = \begin{cases} 1, & |\omega| < \frac{\pi}{2} \\ 0, & \frac{\pi}{2} \leq |\omega| \leq \pi \end{cases}$$

此时，通过不断地测试，发现设置其对应的抗混叠滤波器（低通滤波器）的指标为 $\omega_p=0.45\pi$ ， $R_p=1\text{dB}$ ， $\omega_s=0.55\pi$ ， $A_s=30\text{dB}$ 效果最好，所以，此时的参数：

$$\lambda_{sp} = \frac{\Omega_s}{\Omega_p} = \frac{\omega_s}{\omega_p} \approx 1.22$$

$$k_{sp} = \sqrt{\frac{10^{\alpha_s/10} - 1}{10^{\alpha_p/10} - 1}} \approx 62.115$$

$$N = \frac{\lg k_{sp}}{\lg \lambda_{sp}} \approx 20.76$$

即此时的 $N=21$ ，最终得到此时的抗混叠滤波器仿真结果如图 3 所示：

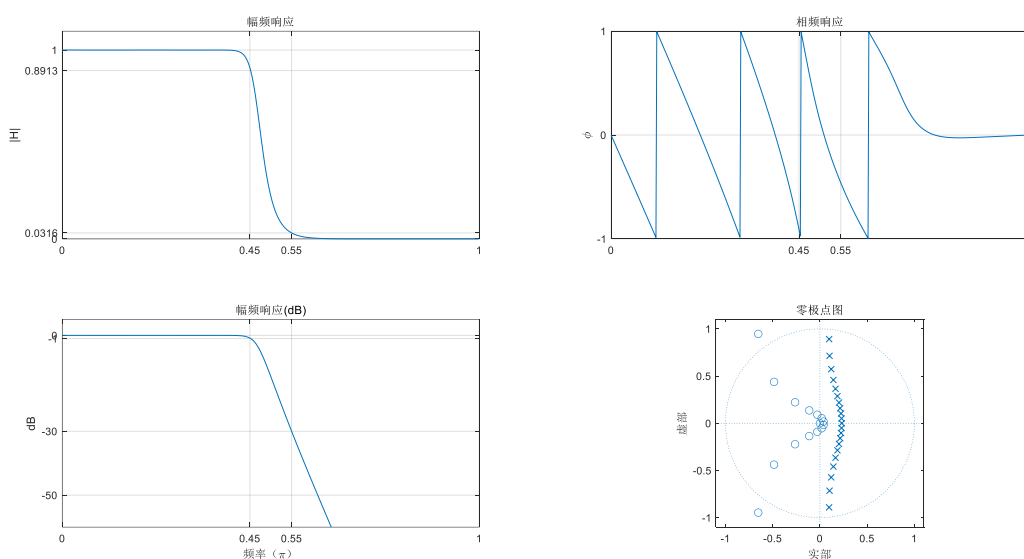


图 3 抗混叠低通滤波器仿真设计图

可以由图 3 仿真结果可以看出，满足设计指标可以做到抗混叠滤波的作用。

此时，分别音频信号、对进行整数倍抽取的音频信号与滤波后的音频信号进行仿真验证，取 2-4s 展示，最终结果如下图 4 所示。

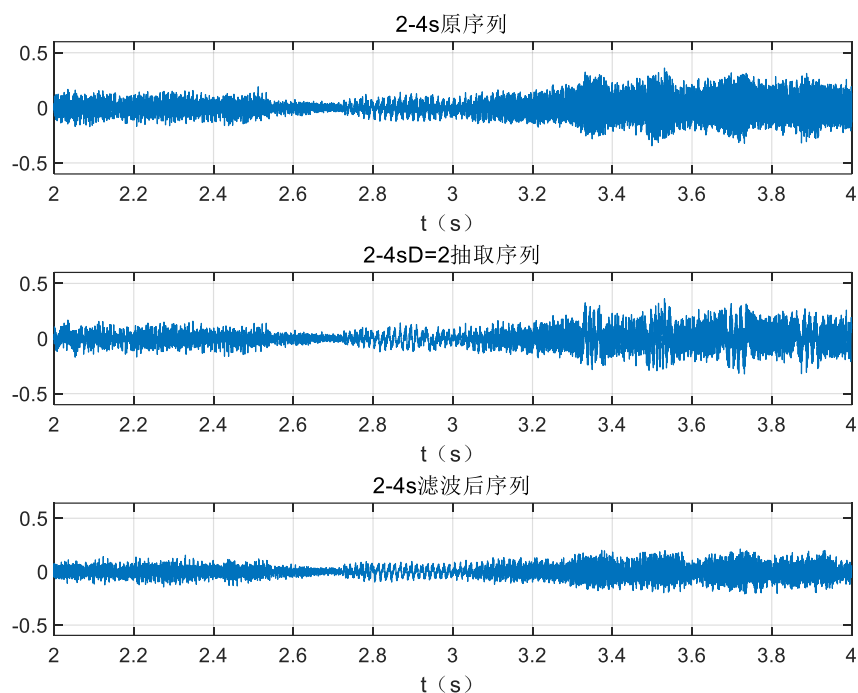


图 4 音频信号滤波仿真设计图

此时，通过抗混叠滤波器，可以发现音频信号发生了恢复，恢复效果与滤波器性能有关，从听觉中可以听出混叠的效果很明显减弱。

与此同时，对该音频信号取 1s-1.025s 进行模拟频谱的频谱分析，最终得到对应的频谱如下图 5 所示。

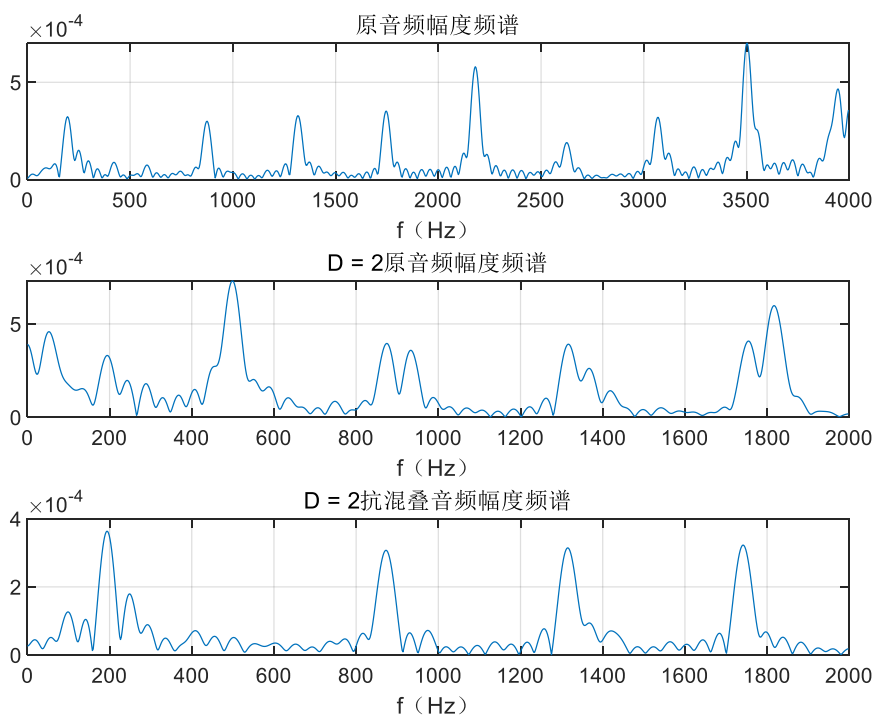


图 5 音频信号模拟谱分析对比图

从上图 5 中可以发现，进行了抗混叠处理后，经过抗混叠滤波器的音频信号的频谱很好地和原音频频谱保持很高的相似度，表明此时的滤波器的效果好。

五、思考题

按照如下指标要求设计四种选频数字滤波器，要求画出滤波器的幅频特性、相频特性和幅度衰减曲线，标注相关信息，如横坐标，纵坐标的单位，曲线名称等。

(1) 设计数字低通滤波器，指标为：通带截止频率 $\omega_p = 0.2\pi$ ，阻带截止频率 $\omega_s = 0.3\pi$ ，通带衰减 $\alpha_p = 1\text{dB}$ ，阻带衰减 $\alpha_s = 20\text{dB}$ 。

此时，对应的巴特沃斯低通滤波器相关参数为：

$$\lambda_{sp} = \frac{\Omega_s}{\Omega_p} = \frac{\omega_s}{\omega_p} = 1.5$$

$$k_{sp} = \sqrt{\frac{10^{\alpha_s/10} - 1}{10^{\alpha_p/10} - 1}} \approx 19.554$$

$$N = \frac{\lg k_{sp}}{\lg \lambda_{sp}} \approx 7.33$$

所以此时 $N=8$ ，对应的仿真结果如图 6 所示。

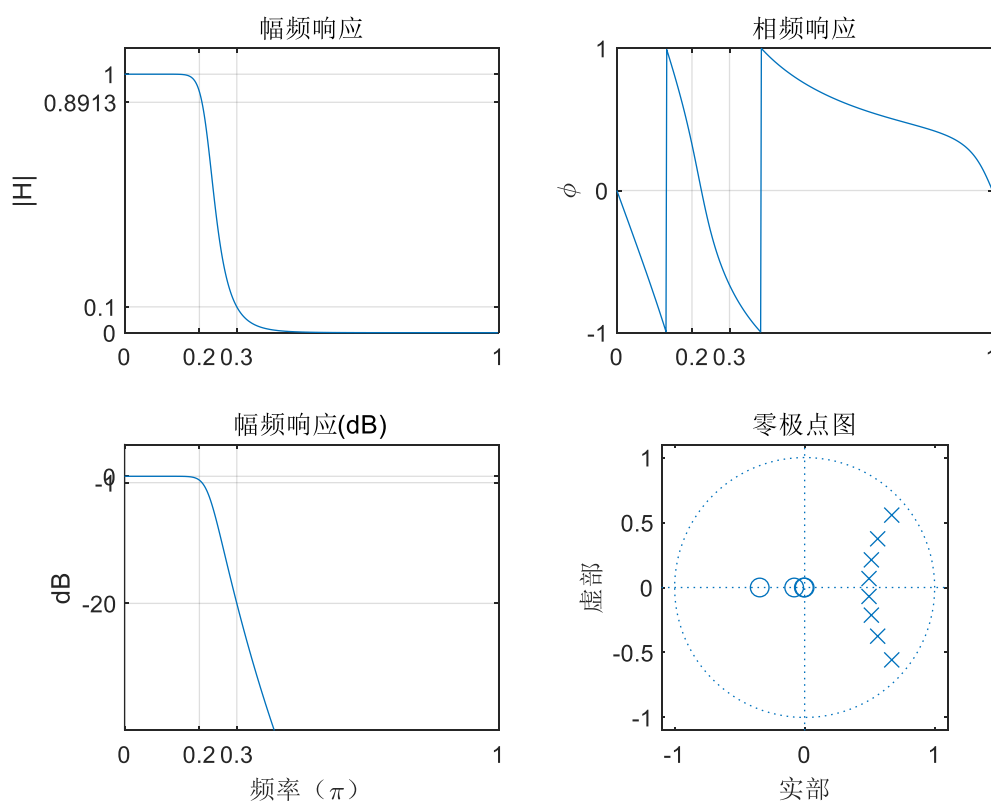


图 6 低通滤波器仿真设计图

最终由图 6 的仿真结果发现此时的设计满足原来的设计要求：通带截止频率 $\omega_p = 0.2\pi$ ，阻带截止频率 $\omega_s = 0.3\pi$ ，通带衰减 $\alpha_p = 1\text{dB}$ ，阻带衰减 $\alpha_s = 20\text{dB}$ 。

(2) 设计数字高通滤波器，指标为：阻带截止频率 $\omega_s = 0.4\pi$ ，通带截止频率 $\omega_s = 0.6\pi$ ，通带衰减 $\alpha_p = 2\text{dB}$ ，阻带衰减 $\alpha_s = 30\text{dB}$ 。

此时，对应的巴特沃斯低通滤波器相关参数为：

$$\lambda_{sp} = \frac{\Omega_s}{\Omega_p} = \frac{\omega_s}{\omega_p} = 1.5$$

$$k_{sp} = \sqrt{\frac{10^{\alpha_s/10} - 1}{10^{\alpha_p/10} - 1}} \approx 41.328$$

$$N = \frac{\lg k_{sp}}{\lg \lambda_{sp}} \approx 9.178$$

所以此时 $N=10$ ，对低通滤波器转换最终对应的仿真结果如图 7 所示。

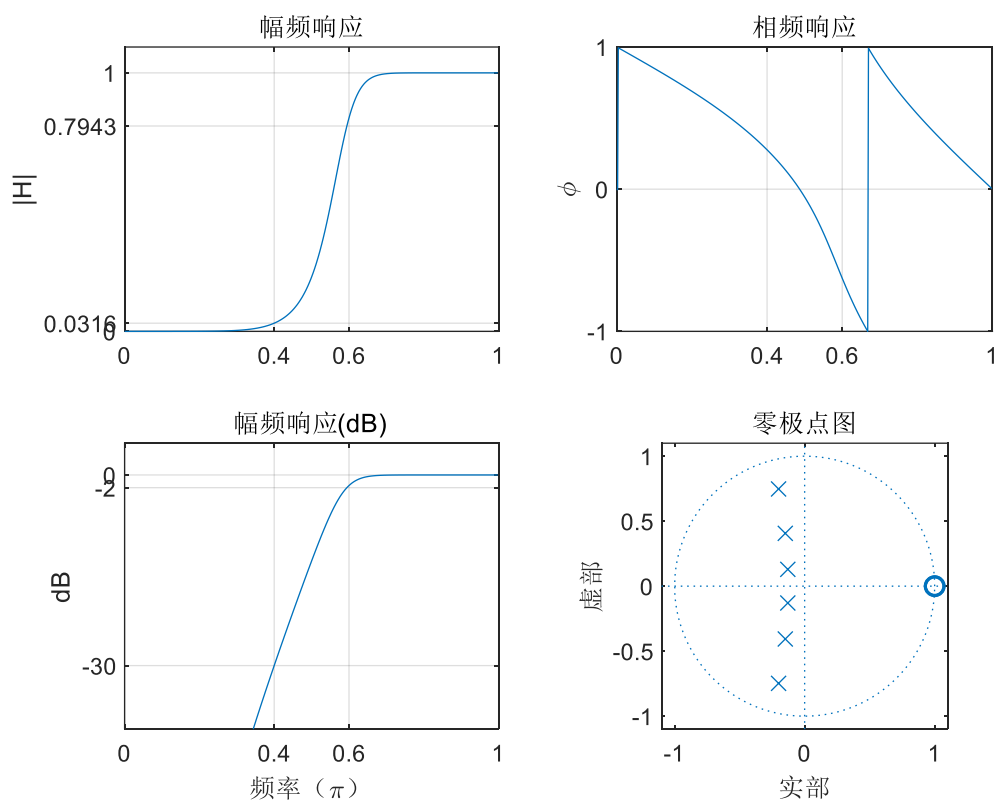


图 7 高通滤波器仿真设计图

最终由图 7 的仿真结果发现此时的设计满足原来的设计要求：阻带截止频率 $\omega_s = 0.4\pi$ ，通带截止频率 $\omega_s = 0.6\pi$ ，通带衰减 $\alpha_p = 2dB$ ，阻带衰减 $\alpha_s = 30dB$ 。

(3) 设计数字带通滤波器，指标为：通带范围 $0.2\pi \leq \omega \leq 0.6\pi$ ，阻带范围 $0 \leq \omega \leq 0.15\pi$ 和 $0.65\pi \leq \omega \leq \pi$ ，通带衰减 $\alpha_p = 1dB$ ，阻带衰减 $\alpha_s = 45dB$ 。

同理，完成将上述指标转化为带通滤波器最终对应的仿真结果如图 8 所示。

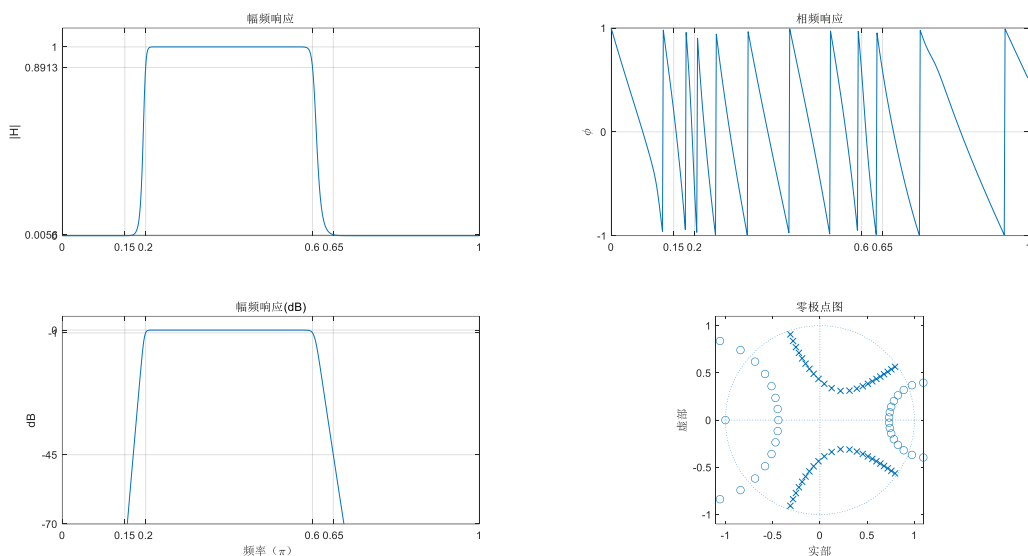


图 8 带通滤波器仿真设计图

最终由图 8 的仿真结果发现此时的设计满足原来的设计要求：通带范围 $0.2\pi \leq \omega \leq 0.6\pi$ ，阻带范围 $0 \leq \omega \leq 0.15\pi$ 和 $0.65\pi \leq \omega \leq \pi$ ，通带衰减 $\alpha_p = 1dB$ ，阻带衰减 $\alpha_s = 45dB$ 。

(4) 设计数字带阻滤波器，指标为：阻带范围 $0.2\pi \leq \omega \leq 0.6\pi$ ，通带范围 $0 \leq \omega \leq 0.15\pi$ 和 $0.65\pi \leq \omega \leq \pi$ ，通带衰减 $\alpha_p = 1dB$ ，阻带衰减 $\alpha_s = 45dB$

同理，完成将上述指标转化为带阻滤波器最终对应的仿真结果如图 9 所示。

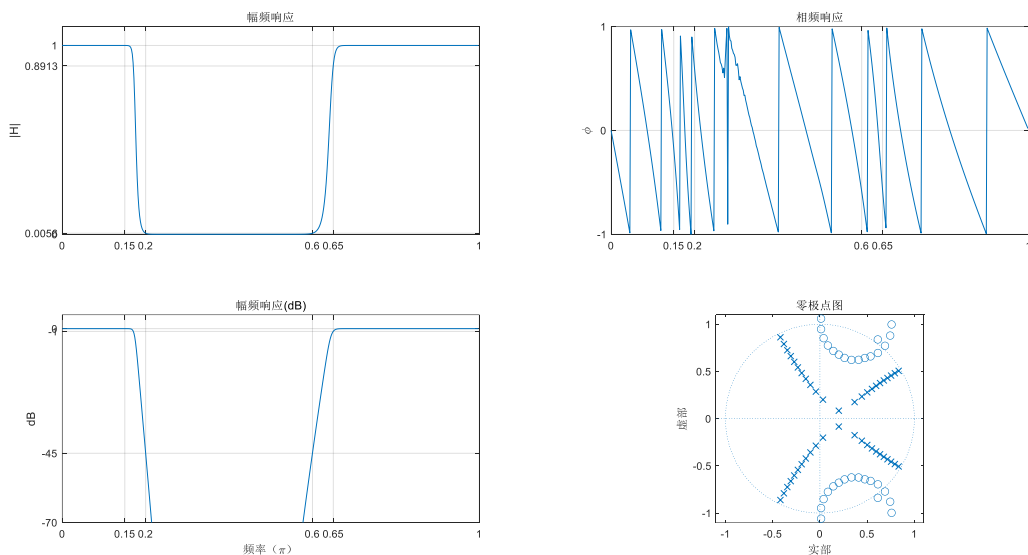


图 9 带阻滤波器仿真设计图

最终由图 9 的仿真结果发现此时的设计满足原来的设计要求：通带范围 $0.2\pi \leq \omega \leq 0.6\pi$ ，阻带范围 $0 \leq \omega \leq 0.15\pi$ 和 $0.65\pi \leq \omega \leq \pi$ ，通带衰减 $\alpha_p = 1dB$ ，阻带衰减 $\alpha_s = 45dB$ 。