

已知输入电压信号有 $1V$ 、 V_1 和 V_2 。请从下表中选择一部分元件设计电路，使之输出 $V_o = 1V + V_1V_2 - 2V_1^2V_2$ 。要求画出电路并推导计算出电路中各电阻的值。（12 分）

器件	运放	模拟乘法器	电阻	可调电阻 R_p
参数	理想运放	理想乘法器 $K = 1$	$10\Omega, 10k\Omega, 1M\Omega$	$0 \sim 100k\Omega$
数量	2 只	4 只	若干	1 只

结合我们学过的线性放大电路（下表 k, k_1, k_2 均大于 0）：

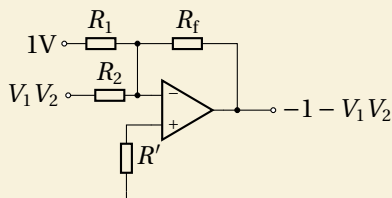
反相放大器	反相加法器	差动减法器	乘法器
$v_o = -kv_i$	$v_o = -k_1v_1 - k_2v_2$	$v_o = k(v_2 - v_1)$	$v_o = v_1v_2$ （本题 $K = 1$ ）

分析输出表达式，可以构思出以下的方案：

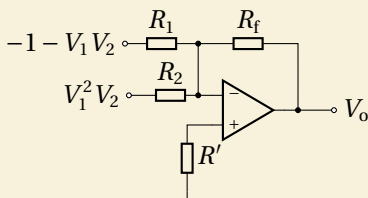
- $V_o = -2V_1^2V_2 - (-1 - V_1V_2)$ ——先用反相加法器得到 $-1 - V_1V_2$ 的信号，再用一次反相加法器把 $V_1^2V_2$ 和 $-1 - V_1V_2$ 的信号反相加起来。
- $V_o = (-1 - V_1V_2) - V_1^2V_2 - V_1^2V_2$ ——同样先用反相加法器得到 $-1 - V_1V_2$ 的信号，再用反相加法器把三个信号反相相加。

这两种方法都能完成要求，但第一种更简洁，故本题采用第一种方法。

首先把反相加法器的两层框架搭起来：



内层（得到 $-1 - V_1V_2$ 的信号）



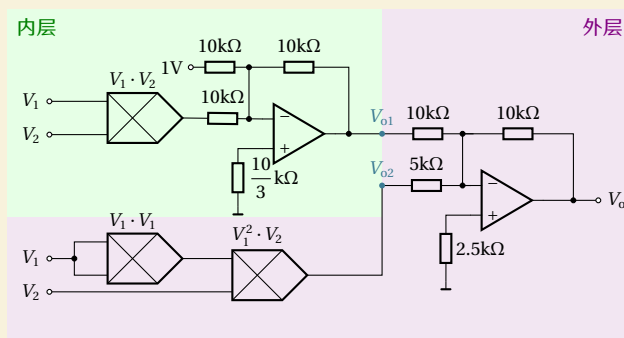
外层（得到最终信号）

有了框架，就可以通过输出表达式推导这些电阻的值。

在 **内层电路** 中，相当于 $v_o = -v_{i1} - v_{i2}$ （默认取上方的输入端为 v_{i1} ，下同），两个系数都是 -1 ，即 $\frac{R_f}{R_1} = \frac{R_f}{R_2} = 1$ ，即 $R_f = R_1 = R_2$ ，按照题目阻值要求取 $10\text{k}\Omega$ 好一些。至于平衡电阻，则有 $R' = R_1 \parallel R_2 \parallel R_f = \frac{10}{3}\text{k}\Omega$ ，直接用三个 $10\text{k}\Omega$ 的电阻并联即可。

在 **外层电路** 中，相当于 $v_o = -v_{i1} - 2v_{i2}$ ，即 $\frac{R_f}{R_1} = 1$ ， $\frac{R_f}{R_2} = 2$ ，可以取 $R_f = 10\text{k}\Omega$ ， $R_1 = 10\text{k}\Omega$ ， $R_2 = 5\text{k}\Omega$ （两个 $10\text{k}\Omega$ 并联），平衡电阻取 $R' = R_1 \parallel R_2 \parallel R_f = 2.5\text{k}\Omega$ （用可调 R_p 实现即可）。

至于如何得到 $V_1 V_2$ ，以及 $V_1^2 V_2$ ，则可用乘法器来实现。以下直接贴出完整电路图，供参考。



（注： $V_{o1} = -1\text{V} - V_1 V_2$ ， $V_{o2} = V_1^2 V_2$ ）

另外，题中给出的电阻只有 10Ω 、 $10\text{k}\Omega$ 、 $1\text{M}\Omega$ ，所以对图上 $5\text{k}\Omega$ 、 $\frac{10}{3}\text{k}\Omega$ 、 $2.5\text{k}\Omega$ 的电阻需要额外说明获取方法，即通过若干个 $10\text{k}\Omega$ 的电阻并联得到，或者使用一个可调电阻代替。

经检查，这个电路没有超出题目器件的限制，而且模拟乘法器只用到了 3 只，是一种有效的设计方案。

【结论】即上述完整电路图。

【点评】本题是一道典型的设计题，考察多种运算模块的综合应用。根据输出表达式构思方案，分内、外层搭接电路，求出电阻阻值，再把电路拼合，是一种可行的解决方案。

【制作花絮】完整电路图大约绘制了 40min，实属不易……