

电子电路与系统基础II

习题课第一讲 上学期期末考题讲解

李国林
清华大学电子工程系

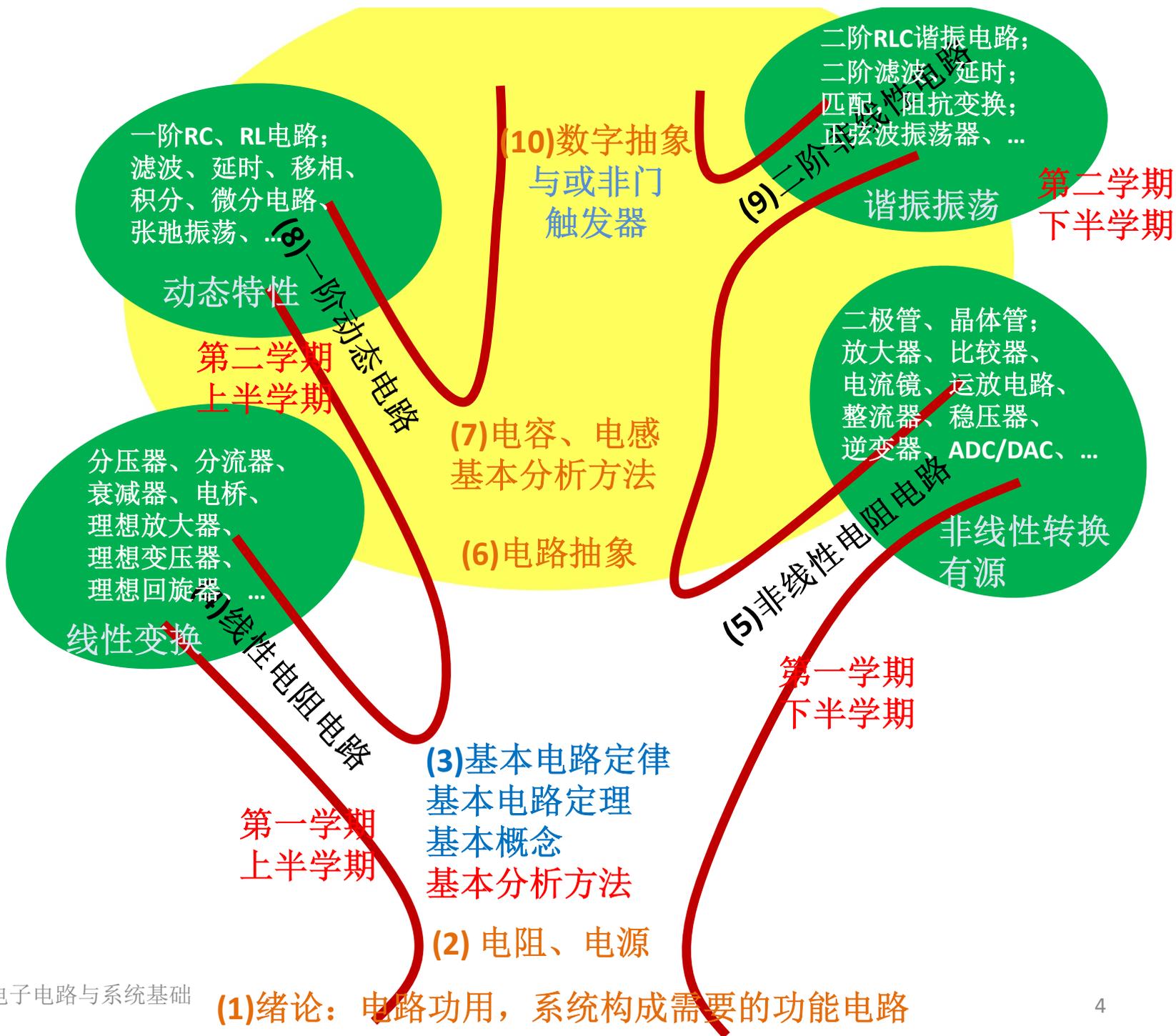
联系方式

- 李国林
 - **EMAIL: guolinli@tsinghua.edu.cn**
 - **TEL(O): 62781842**
 - 罗姆楼**4105**房间
 - 周四下午固定答疑: **2:00-4:30**
 - 可以预约线上视频答疑

课程回顾与展望

- 课程名称：电子电路与系统基础
- 课程内容
 - 大一下学期：基础I---电阻电路
 - 线性电阻电路：线性电阻、电源、受控源、...
 - 非线性电阻电路：二极管、晶体管、放大器、运放、...
 - 大二上学期：基础II---动态电路
 - 动态电路
 - 一阶动态电路：一阶RC、RL电路（延时，滤波），整流器，张弛振荡器
 - 二阶动态电路：二阶RLC电路（滤波、匹配），正弦波振荡器
 - 电路抽象
 - 数字电路
 - 组合逻辑电路：非门、或门、与门、数字加法器、...
 - 时序逻辑电路：锁存器、触发器、存储器、计数器、...

课程内容规划



课程考评

期中成绩低于期末成绩

期中成绩高于期末成绩

本学期大概率无期中考试

- | 考核项目 | 期中成绩高于期末成绩 | 期中成绩低于期末成绩 | 本学期大概率无期中考试 |
|-------------------------|------------|------------|-------------|
| 期末考试 | 45分 | 75分 | 85 |
| 期中考试 | 40分 | 10分 | |
| 作业 | 5分 | 5分 | 5 |
| CAD作业 | 10分 | 10分 | 10 |
| 课堂回答问题 | 额外最多5分 | | |
| 教材纠错 | 不定额外分 | | |
| - 格式、表述、定义、论证、结构、... | | | |
| - 任何你认为有问题的地方，我确认后均计入评分 | | | |
- 关于作业
 - 当周布置的作业，在**1**周内提交
 - 助教批改，同学有问题直接向助教汇总，助教集体视频答疑
 - 助教解决不了的，可拉我入讨论群一并讨论
 - 作业不要抄袭：独立思考，多方讨论（自己理解的应努力让同组同学理解），随时答疑（**Email**，可预约视频答疑）

助教批 改作业 分班 情况

- **黄恒: 18811085724 huang_heng@live.com**
 - 罗姆楼715
 - 学生
- **李瑄: 18611019067 l-x15@mails.tsinghua.edu.cn**
 - 罗姆楼4-201
 - 学生
- **关平达: 15600699640 gpd17@mails.tsinghua.edu.cn**
 - 东主楼一层小阁楼北
 - 学生
- **柳泱: 15611740100 liuy-19@mails.tsinghua.edu.cn**
 - 罗姆楼715右数第二列靠窗位置
 - 学生
- **陈子朋: 18810461875 czp17@mails.tsinghua.edu.cn**
 - 东主楼9区一楼小阁楼北屋
 - 学生
- **马泰坤 13701064309 mtk16@mails.tsinghua.edu.cn**
 - 东主楼一层小二楼北
 - 学生
- **赵夫源 15652697994 15652697994@163.com**
 - 东主楼微电子所小二楼一层北屋
 - 学生

秋季学期课程进度安排

- 第6章 电路抽象
 - 第二周习题课
- 第7章 组合逻辑电路 一周 1
- 第8章 电容、电感及动态电路分析方法 两周 2/3
 - 第四周十一放假?
- 第9章 一阶动态电路 三周 5/6/7
 - 第9周周末期中考试，只考前7周内容
- 第7章 时序逻辑电路 一周 8
- 第10章 二阶动态电路 七周 9-15
- 总复习 一周 16

上学期期末考试情况

- 大小班共**283**人参加考试
 - **102.5, 101.5, 99, ...**

- 综评成绩

– >=90	25.4%
– >=80	25.1%
– >=70	15.9%
– >=60	16.6%
– 不通过	17.0%

- **平均分74.1**

2020年春季学期期末考题

- 一、二、三题为必做题。第四第五题中任选一题，如果两题都做，选高分一题分数计入总分；第六第七题中任选一题，如果两题都做，选高分一题分数计入总分。如果选做一、二、三、四、六，卷面满分100分，如果选做一、二、三、五、七，卷面满分108分。

一 填空题	60分
二 线性电阻电路分析	10分
三 非线性电阻电路分析（电流镜）	10分
四 晶体管放大器分析（能量转换分析）	14分
五 负反馈晶体管放大器分析	18分
六 运放线性应用	6分
七 运放非线性应用	10分

电路抽象 大纲

- 电路抽象
 - 端口抽象
 - 抽象三原则
 - 分层抽象

一、什么是电路抽象

- 抽象

- **Abstract: extract or remove**, 提取和去除
 - 提取出部分东西来, 去掉其他部分

- 电路抽象

- 将电路电特性的关键特征抽取出来, 并将对关键特征的描述扩大化为电路元件、电路网络、电路系统的‘唯一’特征
 - 抽象出的这个‘唯一’特征可以用最简单的概念、公式或原理来表述, 从而电路系统的分析和设计变得简单明了
 - 有了解决问题的把手, 难以入手的问题得以进展, 问题在一定程度上得以解决

关键特征

- 关键特征

- 能够表述事物运动规律的特征，可以用这个特征概括事物的一类运动
- 对电路而言：端口是其对外界面，因而端口电压电流之间的关系，就是该电路系统的‘唯一’电特性，端口电压电流关系概括了一类电路

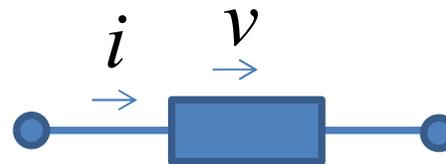
$$v = Ri$$

端口电压、电流具有线性比值关系，则这类单端口网络则被抽象为线性电阻器件

而不论电路网络内部具有什么样的结构

抓住关键特征

- 电阻



$$v = Ri$$

当‘线性电阻’的关键特性用**电阻阻值R**表述后，

我们不关注电阻器件的物质构成是什么，尺寸大小多少

只关注其端口电压和端口电流的这种线性比值关系可以被用来实现某种电路功能

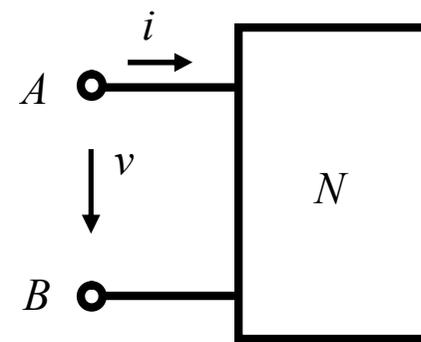
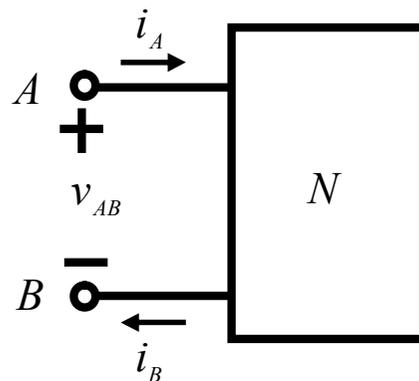
抽象 就是抓住主要矛盾，舍弃次要矛盾的过程

电路抽象的核心

端口抽象

器件的功能由其端口方程描述，多个器件连接后，它们通过端口间的相互作用，形成某种电路功能，这种功能模块也是通过对外端口的端口方程表现其功能

端口是一个系统和另外一个系统相互作用的界面或接口 (interface)



$$i_B = i_A \quad d_{AB} \ll \lambda$$

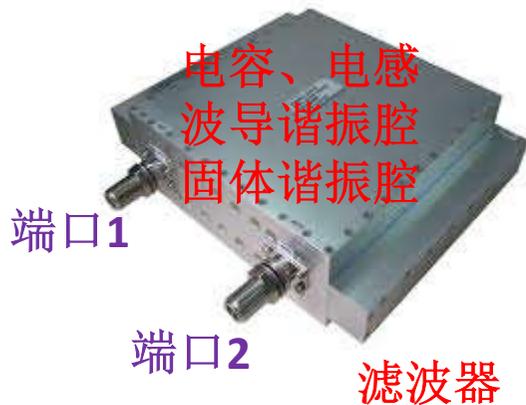
端口条件是在电磁作用下的实体物质可以用电路建模并分析的前提条件，换句话说，如果某电磁系统无法定义端口，则不能用电路方法解析该系统，只要能够定义出端口，那么无论电磁系统内部的电磁场和构成系统的实体物质如何作用，我们都可以用端口电压、端口电流之间的关系描述它的端口特性，该系统则可以端口为界面用电路理论进行电特性分析

二、电路抽象三原则

- 抽象是为了降低复杂度
 - 抽象的基本原则就是简单化
 - 把不能处理的变成可以处理的，把复杂处理的变成简单处理
- 离散化原则 **discretization**
- 极致化原则 **perfection**
- 限定性原则 **limitation**

离散化原则

- 所谓离散，就是可数
 - 用离散的端口电压、电流对电路特性进行描述，不论电路内部连续的物质如何构造，不论电路内部连续的电磁场如何分布
 - 我们通过有限个端口的定义，将电磁问题转化为电路问题



只对端口电压电流感兴趣，加载在端口1的信号，在端口看，发现某些频率分量可以通过，某些频率分量不能通过，从而确认这是一个具有选频作用的滤波器

极致化原则

- 所谓极致，就是走极端，追求完美，忽略细枝末节
- 数学上的简单表述

$$|a| \gg |b|$$

$$a + b \approx a$$

b是可以忽略不计的小量：
b被极致化为0

$$\frac{1}{a} + \frac{1}{b} \approx \frac{1}{b}$$

1/a是可以忽略不计的小量：
a被极致化为无穷大

极致化原则：留大弃小

- 实际电路原理性分析和设计中，大量地舍弃小量，做极致化抽象，从而可以获得极为简单的原理性结论，并由这些简单结论进一步进行电路的原理性设计
- 一句话：电路设计中，没有掌握极致化原则的，会淹没在一大堆混乱的公式或混乱的思维中，没有头绪，不知如何进行电路设计
- 而掌握了极致化原则的，电路设计将变得十分的简单
 - 因为我们抓住了主要矛盾

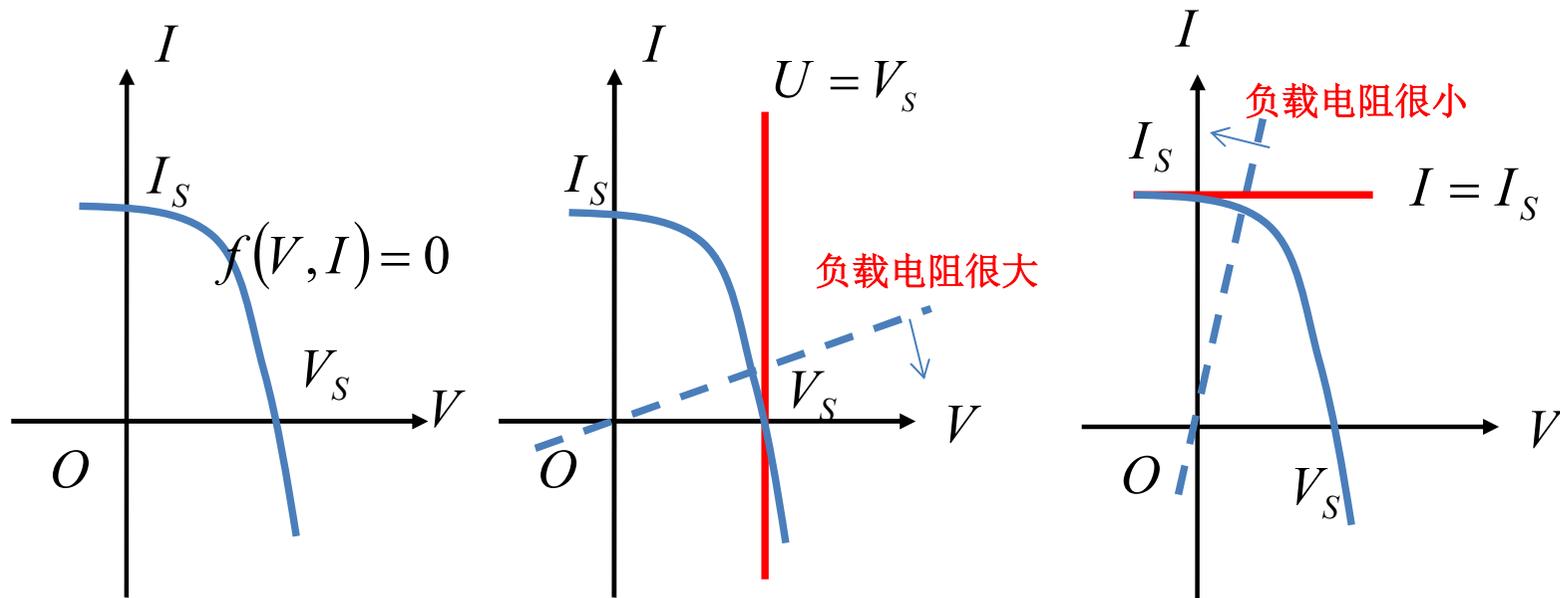
限定性原则

- 不管是离散化原则，还是极致化原则，抽象最根本的思想就是抓住主要矛盾，舍弃次要矛盾
 - 有所舍弃，则必有限制
- 所谓限定，指的是**抽象结果都有其适用范围**，超过了适用范围，抽象就是不适当的
 - 大家记住一点：我们运用抽象时，并不打算用一个概念、一个公式、一个原理解决所有的问题，我们只着眼于解决并因此解决了其中一部分问题
 - 超过抽象适用范围后，次要矛盾则有可能上升为主要矛盾，我们需要采用新的抽象来理解适用范围之外出现的问题
 - 当然，新的抽象模型也有它自己的限定性范围

电路抽象例

- 对上学期课程中的某些电路抽象做简单的回顾
 - 电源抽象
 - 当我们抽象出电源元件后，电路分析中，我们不再关注电源的能量从何而来
 - 风能，水势能，化学能，热能，太阳能，电能，...
 - 不再关注电源的具体构成如何
 - 发电机，电池，...
 - 不再关注...
 - 我们只关注它的端口特性具有（抽象）电源电路的伏安特性
 - 晶体管抽象
 - ...

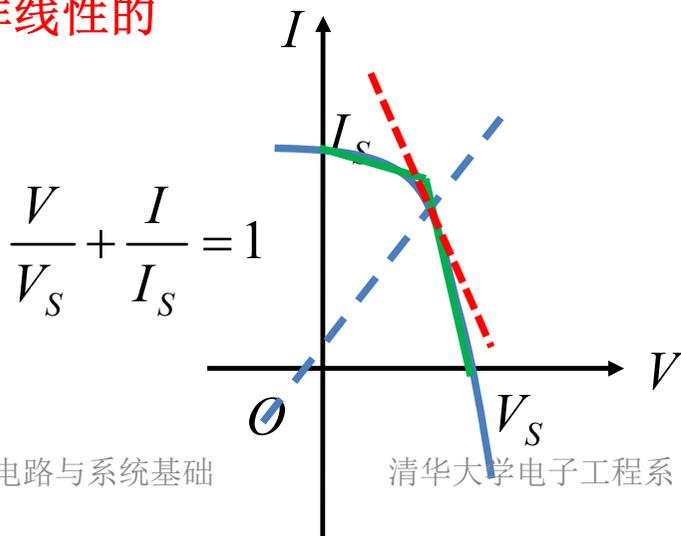
电源抽象



离散化: 不考虑太阳能电池内部如何形成能量输出, 只关注端口电压、电流, 从端口特性看, 电池内阻是非线性的

极致化: 负载电阻很大时, 电池被极致化为恒压源;
限定性: 抽象只适用于负载电阻远大于电池内阻

极致化: 负载电阻很小时, 电池被极致化为恒流源。
限定性: 抽象只适用于负载电阻远小于电池内阻



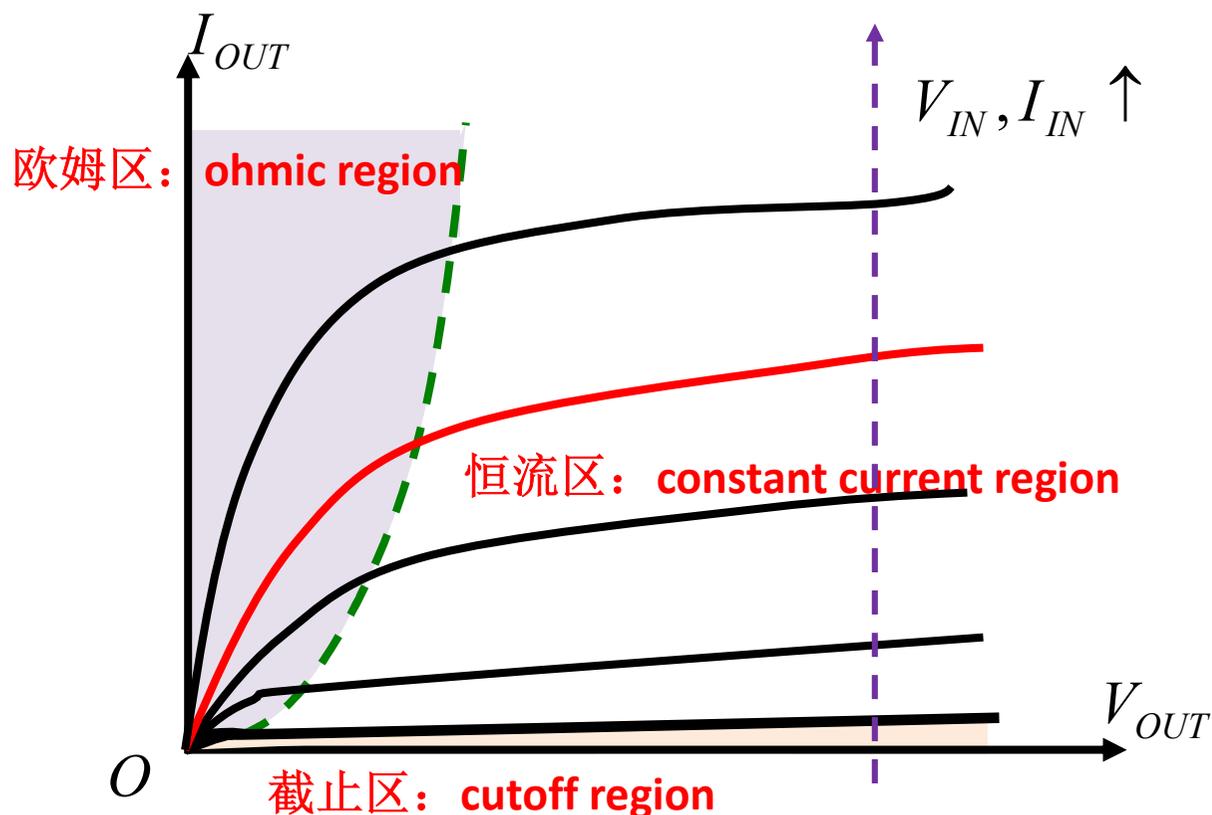
极致化: 线性内阻抽象

限定性: 负载在小范围内波动

恒压源、恒流源抽象

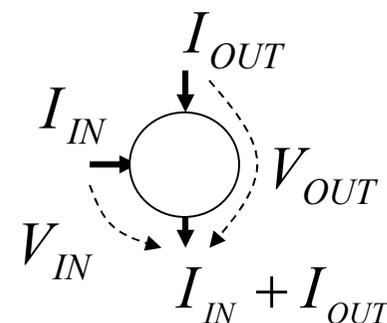
- 由于有了恒压恒流电源抽象后，对于提供电能的电源，我们追求理想恒压、恒流特性
 - (1) 对外驱动不因外部阻抗变化而变化
 - (2) 没有内耗
- 我们试图通过工艺的、电路的技术实现尽可能接近理想的恒压特性、恒流特性
 - 器件具有恒压特性，则可等效为恒压源
 - 令稳压二极管工作在反向击穿区，对外可提供近似恒压特性，可实现恒压源
 - 令晶体管工作在有源区，对外可提供近似恒流特性，可实现恒流源
 - 通过电路技术，如负反馈，滤波等措施，使得恒压、恒流特性更接近理想

晶体管抽象



离散化原则体现2: 分区处理

离散化原则体现1: 端口

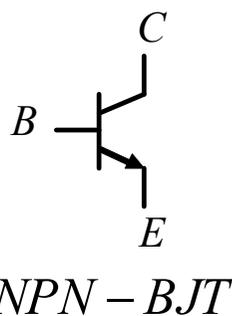
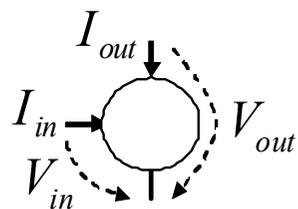
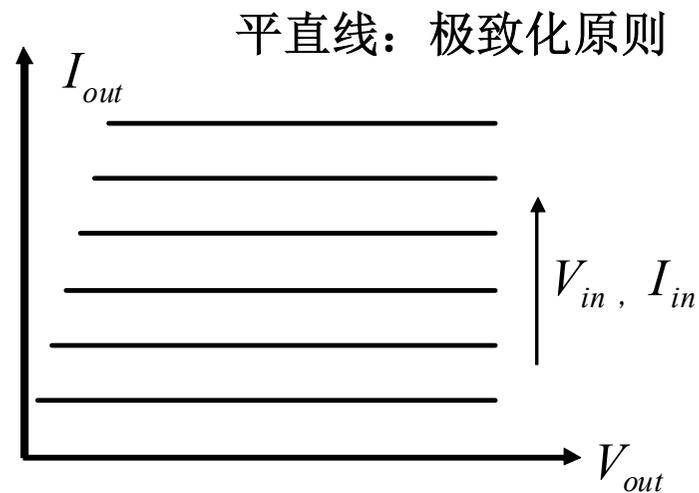
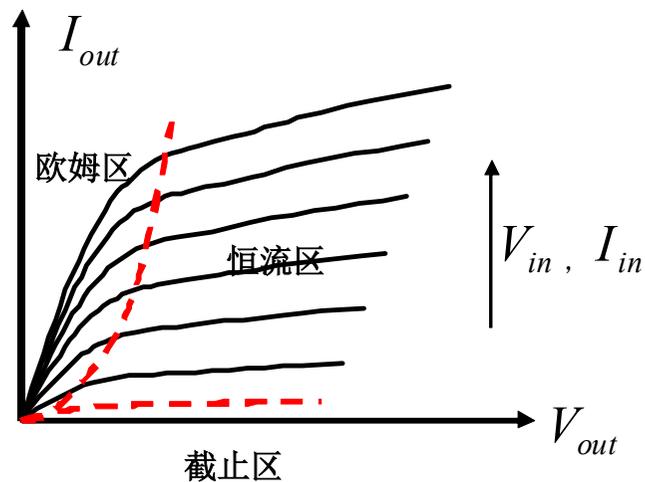


三端电阻器件，以一端为公共地，构成二端口网络

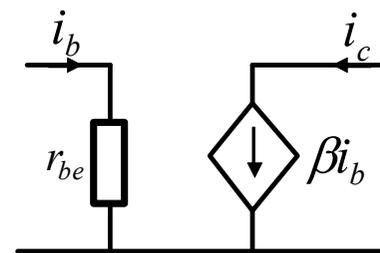
在输入电压/电流控制下，输出电流和输出电压的伏安关系曲线

恒流区

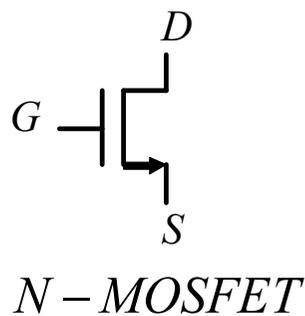
电路抽象



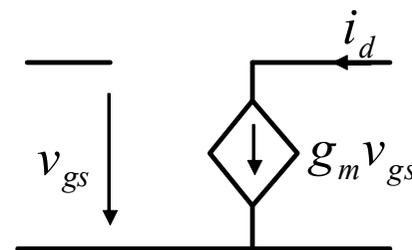
NPN-BJT



这里,我们以BJT的发射极,以MOSFET的源极作为公共端,构成二端口网络

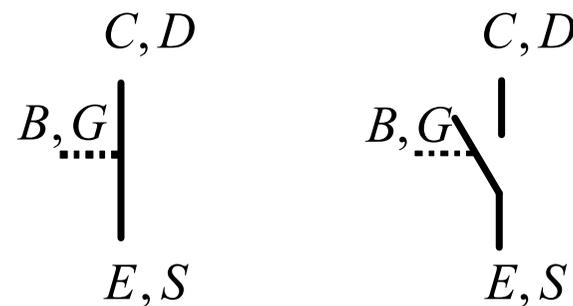
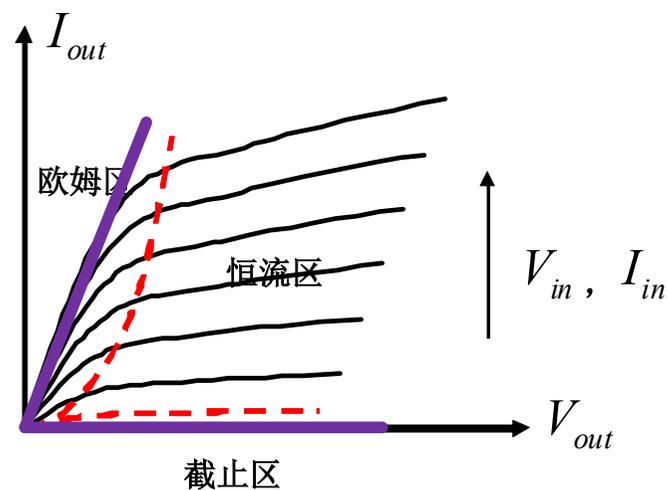
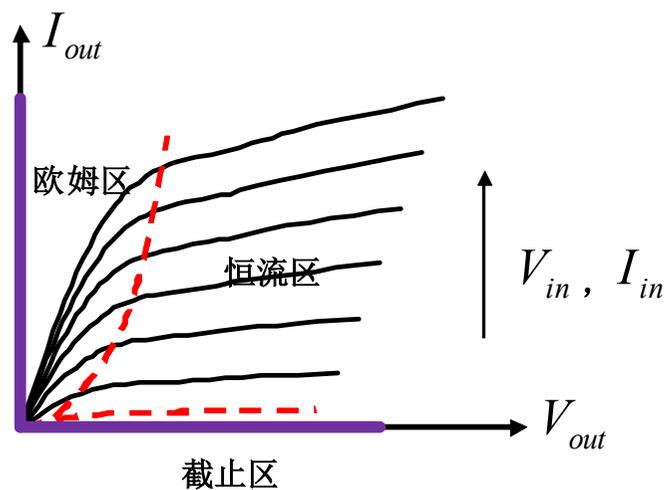


N-MOSFET



原理性模型: 受控源

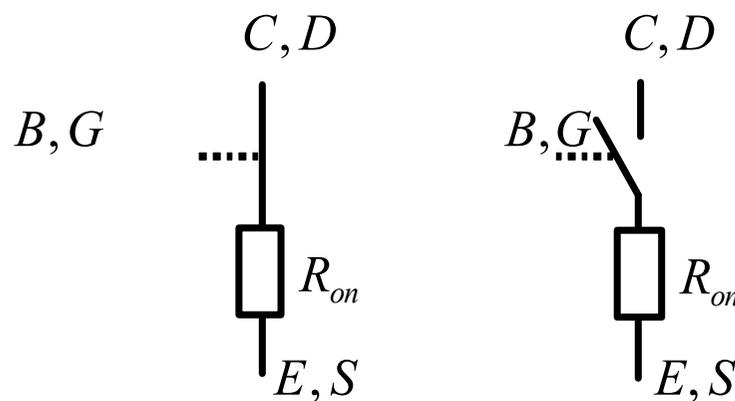
欧姆区和截止区 电路抽象



线性电阻区

截止区

原理性模型：开关



线性电阻区

截止区

晶体管抽象

- 晶体管在恒流区被抽象为受控电流源，因而可以实现放大、振荡等有源功能
- 晶体管在欧姆区和截止区被抽象为受控开关，因而可实现开关功能
 - 时变特性：变频（《通信电路》课程学习）
 - 无损特性：能量转换：交直流转换（二极管整流器、晶体管逆变器）
 - 二值逻辑状态：数字门电路（第7章内容）
- 当我们看到BJT或MOSFET的符号时，我们就有了它们的这些概念，这些概念的获得是因为我们运用了电路抽象
 - 受控源，开关
- 开关、受控源的抽象度远高于晶体管，前者是理想元件，后者是物理器件
 - 当我们看到晶体管符号时，还需要看和它配合的其他电路元件及其他设定
 - 当我们看到开关符号时，我们不在意它是用什么做的，只需知道它具有通断特性，我们只关注它的通断特性，其他特性不再关注
 - 抽象是否正确？：看是否满足限定性条件

三、分层抽象思想

- 通过端口抽象，可将电磁场分析转化为电路分析
- 电路器件的功能由其端口方程（元件约束条件）描述，多个器件连接后，它们通过端口间的相互作用，形成某种功能电路，这种功能电路也是通过整体的重新定义的对外端口的端口描述方程表现其功能

分层抽象思想

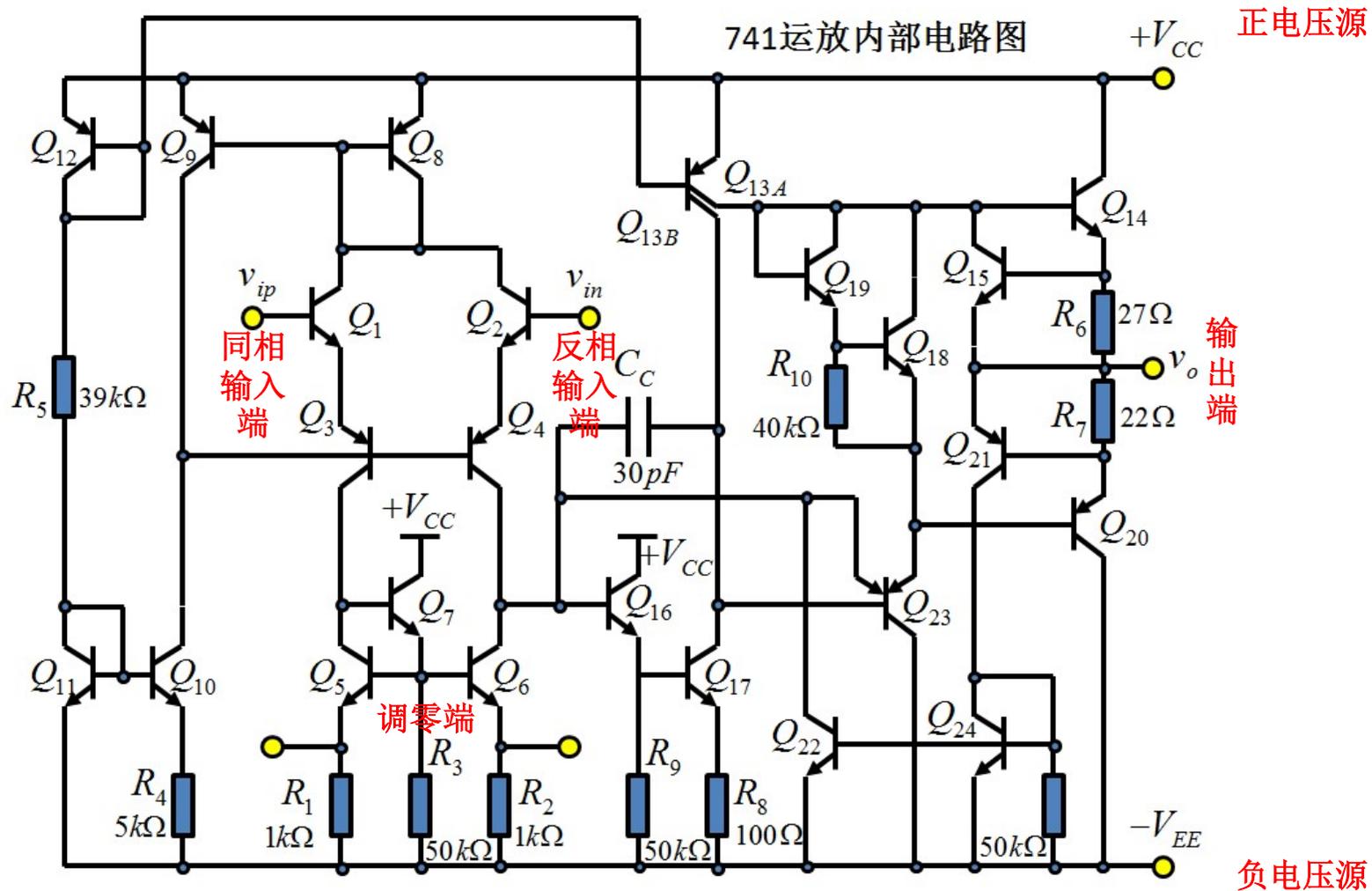
- 构造更大的电路系统时，可采用分层设计思想
 - 在高层次定义功能模块的端口，并对功能模块端口提出要求
 - 对上一层次的应用者而言，他只需知道电子系统或电路网络的端口特性即可
 - 系统对应用者而言，可以是只有明确界面定义（端口定义）的黑匣子
 - 系统的功能通过端口（界面）得以体现，其内部如何工作对应用者而言可能并不关心

复杂系统构造

- 可以通过分层设计实现复杂系统设计
 - 实体物质和场物质相互作用形成基本器件
 - 基本器件相互连接形成功能电路
 - 功能电路相互连接形成子系统
 - 子系统相互连接形成大系统，进而再连接，形成更大的系统
- 每一层的基本器件、基本功能电路、子系统、大系统，它们都可以从端口伏安特性上描述或表现其功能
 - 高层设计者只关注端口特性，或者只关注其功能，而不必关注内部实现方式

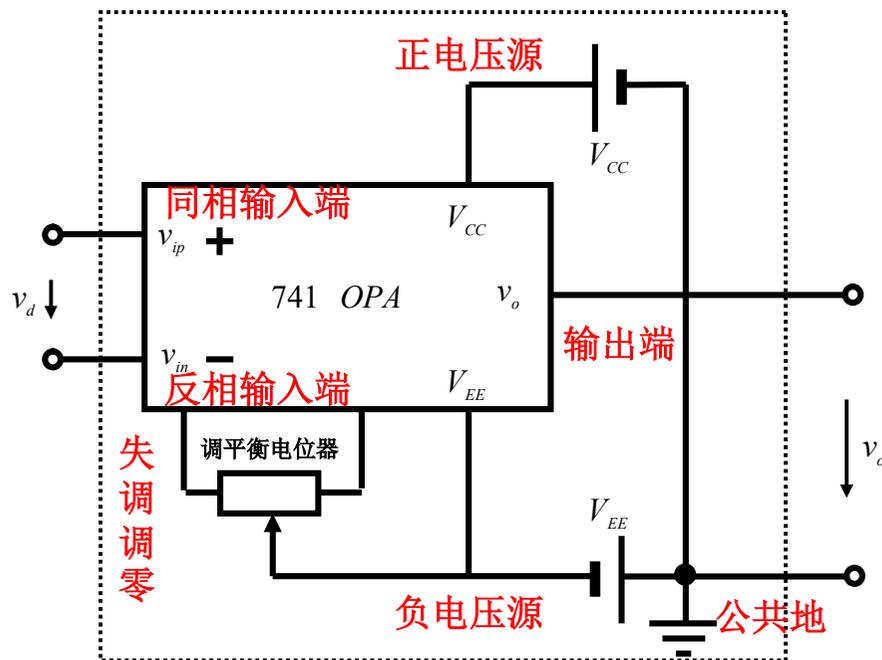
设计运放时，需要关注这些晶体管的性能、尺寸、版图结构等，对高层应用者而言，只关注对外引出的7个端点

741运放内部电路

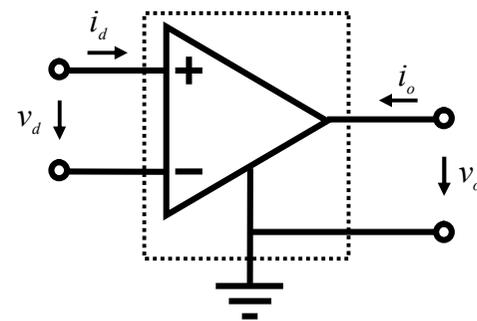


运放等效电路

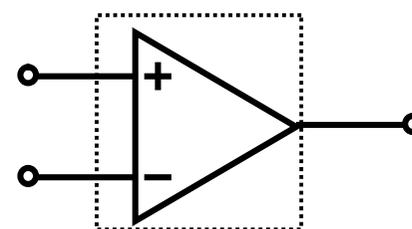
高层次应用：应用741实现其他功能电路时，无需关注741内部电路



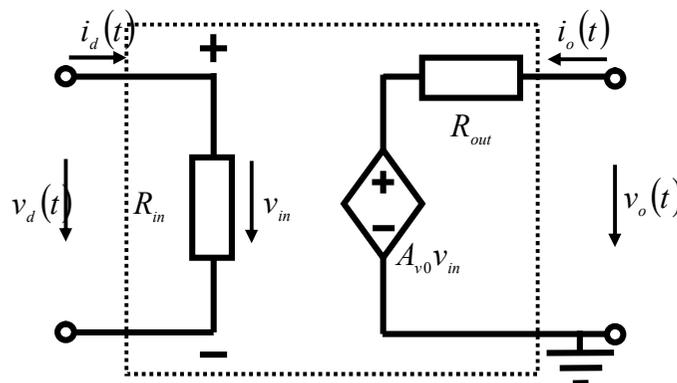
(a) 实际运放外部连接关系



(b) 运放符号：(带地)



(c) 运放符号：(默认带地)

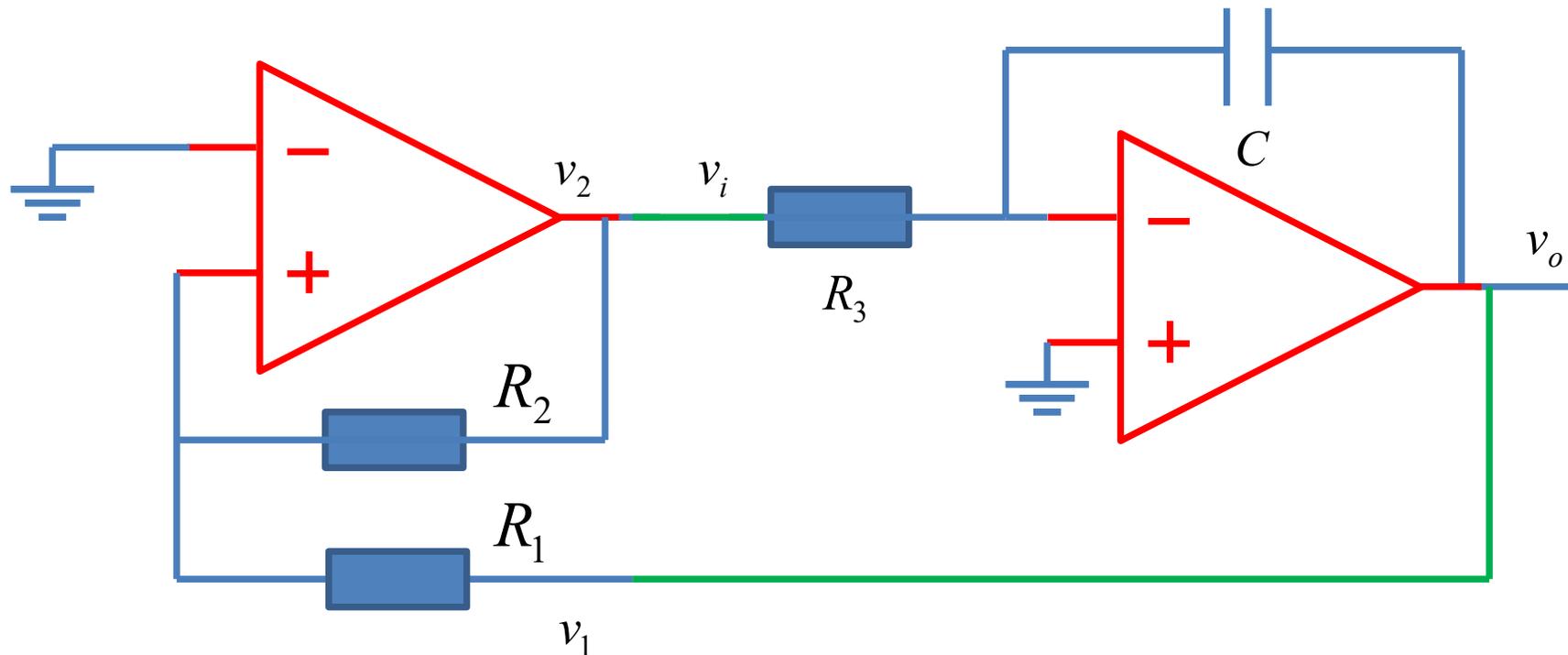


线性区运放电路模型

(d) 运放二端口等效电路

由于输入电阻很大，电压增益很大，可以进一步抽象，用虚短虚断进行电路分析：很复杂的内部构成，分层抽象后，可以变得很简单

运放电路分析：只需运放端口模型

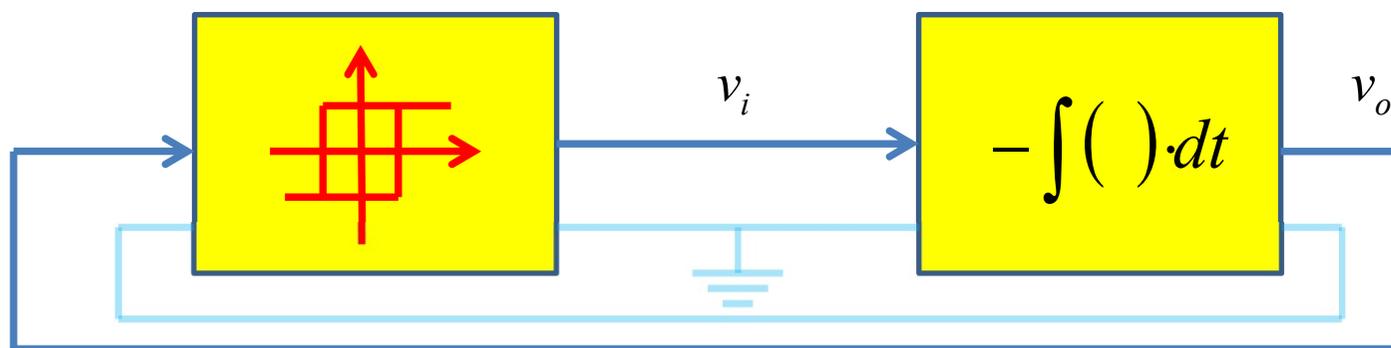
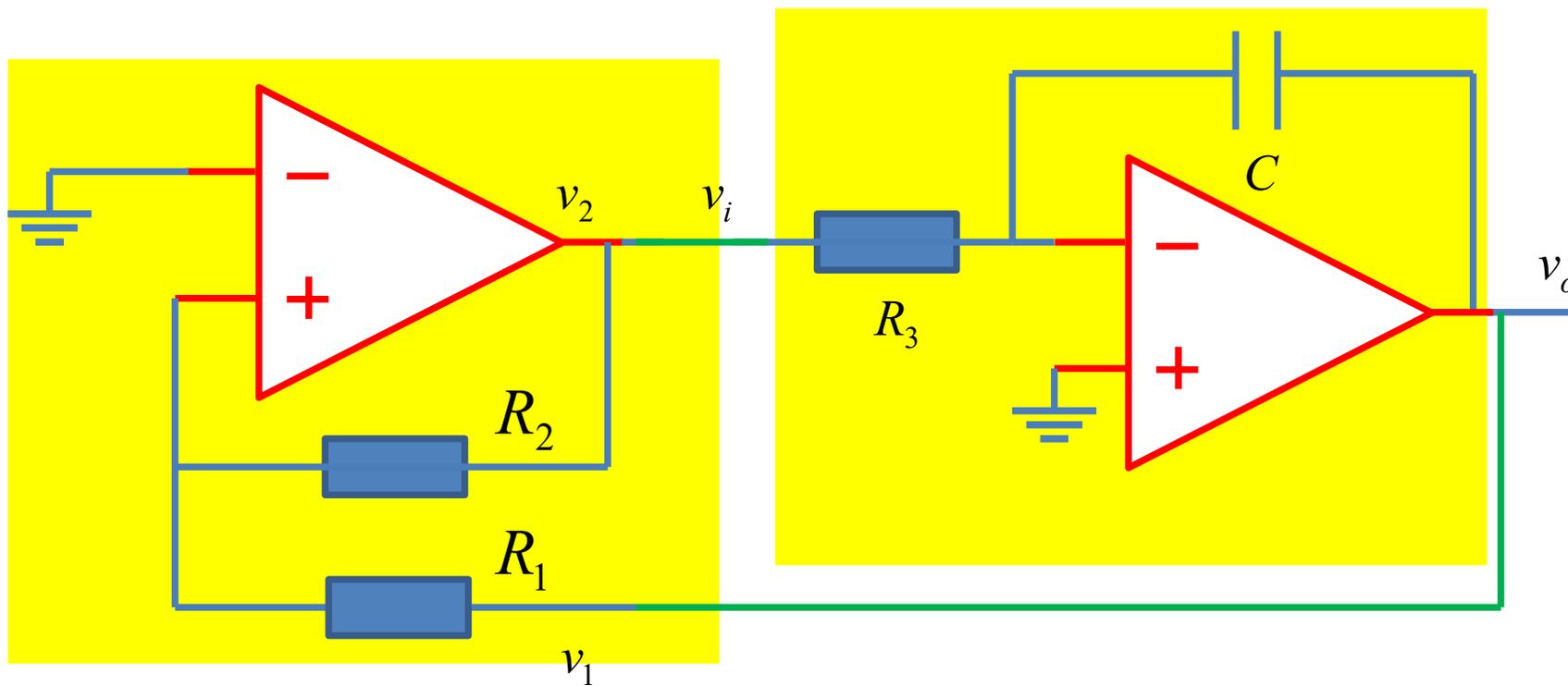


电阻 R_1 、 R_2 和运放构成一个施密特触发器
运放工作在线性区，需要用非线性区电路模型进行分析，分析表明该电路输出有两个状态，两个状态间的转换和之前的经历有关

电阻 R_3 、电容 C 和运放构成一个积分器
运放工作在线性区，可以用虚短、虚断进行分析，分析结果表明输出电压是输入电压的积分运算

施密特触发器和积分器构成闭环后，形成张弛振荡器，无需任何外加激励，自行产生周期信号输出，在 v_o 位置的波形为三角波，而 v_i 位置的波形为方波

层层抽象



分层设计可以构造复杂系统

- 分层设计可以构造出功能复杂的电子系统
 - 上层设计者只需给出下层模块的各种规范，下层设计者可以采用任何结构、任何方法实现这个模块的功能，只要满足要求的规范就可以了
 - 规范除了功能要求外，还可能包括尺寸、功耗、接口等
 - 只要符合规范，模块则可相互替换，具有可移植性，系统维护和升级都很方便
 - 在每个抽象层次上，人们都可以考虑是否采用现有的成熟电路或已有产品，从而以最短的时间构造出符合要求的具有特定功能的电子系统