

## 功率变换器的计算机仿真与设计

## 第一章 绪论

- (1) EDA与电路仿真的概念;
- (2) 计算机仿真过程: 建模和实验;
- (3) 电力电子装置设计流程;
- (4) 常用仿真工具;

## EDA的概念

- **Electronic Design Automatic**, 电子设计自动化。是在电子CAD基础上发展起来的通用软件系统, (辅助) 进行电子产品的自动设计。
- EDA设计分为系统级、电路级和物理实现级 (IC版图级), 主要解决IC设计、PCB绘制、电路仿真等方面的问题。

## 仿真的概念

- 仿真概念:
  - 利用模型再现实际系统中发生的**本质**过程, 并利用模型对已存在的或计划中的系统系统进行研究。
- 分类:
  - 物理仿真
  - **数学 (软件) 仿真;**
- 应用领域:
  - 虚拟现实领域
  - **计算机辅助设计**与制造领域

## 软件仿真的概念

- **软件仿真**概念:
  - 在计算机上进行试验的数字化技术;
  - 根据被研究的真实的数学模型, 利用计算机建立仿真模型, 然后依仿真模型在计算机上计算、分析、研究, 获得真实系统的定量关系。通过仿真, 加深对真实系统的理解, 为系统设计、调试或管理提供所需信息。
  - 系统、模型和计算机为其三个基本要素。

## 仿真过程: 建模

- 建模的概念:
  - 写出描述物理系统基本规律的数学方程的过程;
  - 对系统**某方面**的本质属性的抽象描述。
- **系统仿真基础:**
  - **相似性原理:** 系统可以利用模型在某种意义上对其加以近似。 (P4)
  - 任何一个动态系统, 均可以用微分方程组 (状态方程) 加以描述。

### 相似性原理

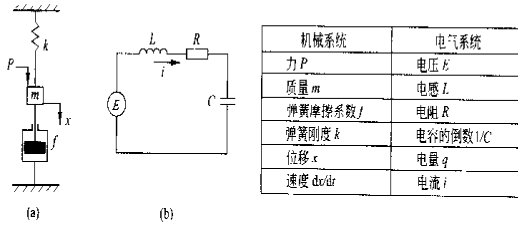


图 1-1 机械系统和电气系统的相似性

### 第一章 绪论

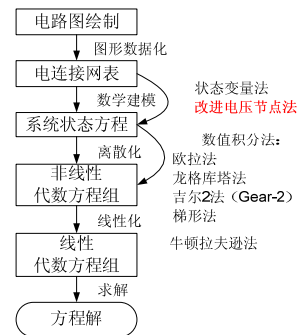
- (1) EDA与电路仿真的概念;
- (2) 计算机仿真过程: **建模和实验**;
- (3) 电力电子装置设计流程;
- (4) 常用仿真工具;

### 计算机仿真过程: 建模

- 仿真模型分类
  - 形象模型
  - 模拟(类比)模型
  - 符号模型(P.4)
    - 系统分解: 抽取本质
    - 数学建模: 系统本质属性的数学描述
    - 模型转换: 数学描述 → 计算机程序
    - 参数估计: 完成某些参数设计
    - 可信度检验: 对比验证

### 计算机仿真过程: 实验

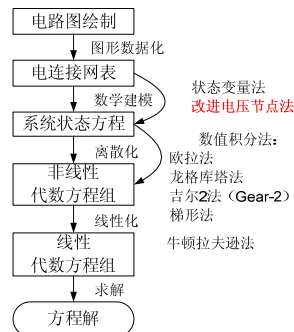
- 实验
  - 利用模型在**给定条件下**对系统方程进行求解。
  - 模拟仿真
  - 数字仿真
    - 时域分析的一般流程



### 计算机仿真过程: 实验

#### (1) 原理图输入方式

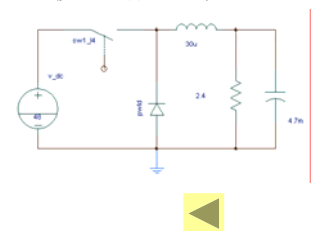
- 电路网表文件输入;
- 电路原理图输入。
- GUI技术的发展使得可用电路原理图直接输入, 由计算机程序生成电路网表文件。



### 电路输入方式

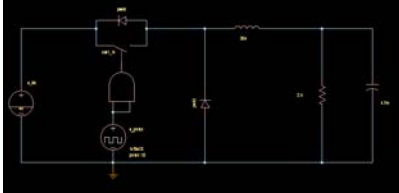
#### ■ 电路网表输入方式

- 标号 起始节点 末节点 (模型名称) 量值
- L1 2 3 30u
- R1 3 0 2.4
- C1 3 0 4.7m
- D1 2 0 pwld
- V\_dc 1 0 V\_dc 48
- S1 1 2 sw1\_14



### 电路输入方式

- 电路原理图输入

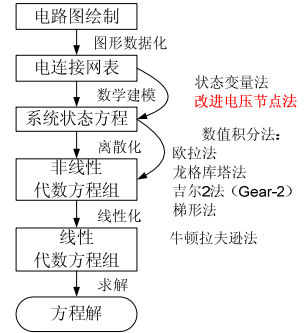


- 电路网表输入

### 计算机仿真过程：实验

- (2) 数学建模  
(网络分析的概念)

- 拓扑法 (支路电流法、网孔电流法、回路电流法)
- 状态方程法
- 改进节点法



### 电路方程的建立与求解

- 网络分析的基本概念
  - 三条基本定律：KCL、KVL、元件特性；
  - 电路方程的建立：拓扑法（支路电流法、网孔方程法、回路电流法）**（改进的）节点电压法、状态变量法。**
  - 通常在电路中独立节点数比支路数少**2~3**倍，因此按照节点法建立的方程组维数低，运算方便；
  - 列写方程的方式也比较简单，易于编程，在EDA软件中获得广泛应用。

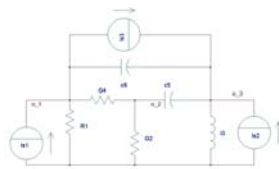
### 节点电压法

- 以节点电压为变量，所有支路电流均可表示为节点电压的函数，根据KCL，即可列写方程组。
  - $K$ 为独立节点；
  - $U_k$ 为节点电压向量；
  - $Y_k$ 为节点导纳矩阵；
  - $I_{sk}$ 为节点电流向量。

$$Y_k U_k = I_{sk}$$

### 节点电压法

$$Y_k U_k = I_{sk}$$



$$\begin{bmatrix} \frac{1}{R1} + G4 + sC6 & -G4 & -sC6 \\ -G4 & G2 + G4 + sC5 & -sC5 \\ -sC6 & -sC5 & sC5 + sC6 + \frac{1}{sL3} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} U1 \\ U2 \\ U3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Is1 - Is3 \\ 0 \\ Is2 + Is3 \end{bmatrix}$$

### 节点电压法的局限

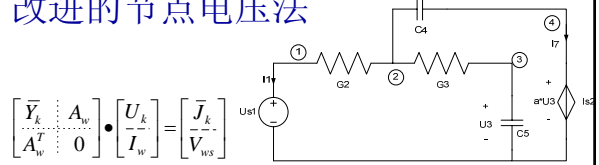
- 如将上图中的 $I_{s1}$ 改为电压源 $V_{s1}$ ，如何写节点电压方程？
- 节点电压法的局限
  - 当含有独立电压源、零值阻抗元件等支路导纳为无穷大的支路时，无法用节点电压法直接处理。
  - VCVS、CCVS、CCCS等受控源支路也无法直接处理；
  - 支路电流变量不能直接作为节点电压方程组的未知变量。

### 改进的节点电压法

- 改进的节点电压法增加零阻抗支路的支路电流作为附加变量。
- 注入电流向量:  $I'_k = -A_w I_w$
- 考虑附加注入电流的节点电压方程:  $\bar{Y}_k U_k = \bar{I}_{sk} + I'_n$
- 附加方程:  $A_w^T U_k = U_{ws}$
- 改进的节点电压方程:

$$\begin{bmatrix} \bar{Y}_k & A_w \\ A_w^T & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} U_k \\ I_w \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{J}_k \\ V_{ws} \end{bmatrix}$$

### 改进的节点电压法

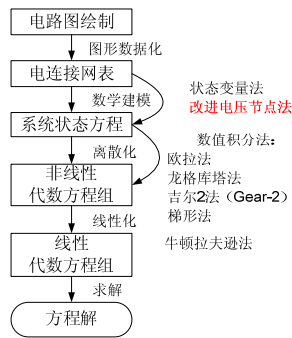


$$\begin{bmatrix} G2 & -G2 & 0 & 0 & | & 1 & 0 \\ -G2 & G2+G3+sC4 & -G3 & -sC4 & | & 0 & 0 \\ 0 & -G3 & G3+sC5 & 0 & | & 0 & 0 \\ 0 & -sC4 & 0 & sC4 & | & 0 & 1 \\ \hline 1 & 0 & 0 & 0 & | & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & | & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U1 \\ U2 \\ U3 \\ U4 \\ I1 \\ I7 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ U_{s1} \\ a \cdot U3 \end{bmatrix}$$

### 计算机仿真过程：实验

#### (3) 系统状态方程的离散化 (数值积分: 线性化)

- 电路的非线性本质
- 欧拉法
- 龙格库塔法
- 在初值附近展开泰勒级数



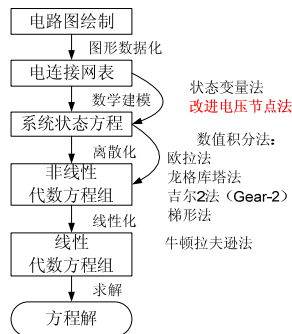
### 数值积分的局限性

- 病态方程求解的稳定性
  - 小步长、定步长、自适应步长
- 算法收敛性
- 数值振荡与数值吸收电路
  - 理想开关模型与实际开关模型

### 计算机仿真过程：实验

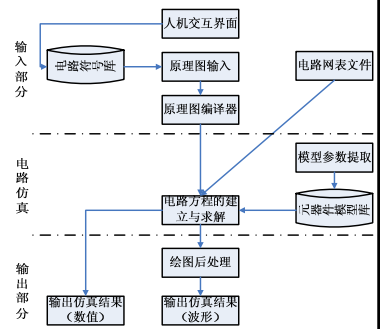
#### (4) 线性方程组求解

- 高斯消元法
- 通过一系列加减消元运算, 将线性代数方程化为上三角矩阵, 再逐一代求解出节点电压向量。
- LU分解法



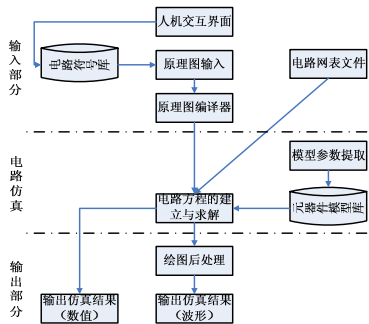
### 计算机仿真流程

- 人机交互界面
  - 是计算机、软件、用户之间的桥梁。
  - 菜单形式的命令集;
  - 交互式图形输入;
  - 多窗口、多进程作业方式;



### 计算机仿真流程

- 绘图处理
  - 将电路仿真结果绘制成标准、直观的波形或曲线。



### 电路仿真的特点

- 必要性：
  - 电路规模的扩大；
  - 物理实现的复杂性、经济性及周期等；
- 可行性：
  - 仿真基础、计算机软硬件和计算技术的发展；
  - 图形用户界面的发展、元器件模型的建立、电路方程的建立与求解、绘图处理
- 局限性：
  - 目前可用的电力电子电路仿真软件均是在通用电路仿真软件的基础上扩展起来的，所建立电力电子器件模型和应用领域均受到一定的限制。

### 常用电路仿真软件

- 电子电路设计与仿真软件：
  - **Spice/PSpice (OrCAD10.5)** ；
  - **Synopsys (Saber 2006)** ；
  - EWB (Multisim8.0) ；
  - Proteus MCU；
  - Matlab Simulink。

### 第一章 绪论

- (1) EDA与电路仿真的概念；
- (2) 计算机仿真过程：建模和实验；
- (3) 电力电子装置设计流程；**
- (4) 常用仿真工具；

### 电力电子装置设计流程

- 自上而下 (top to down)的设计方法
  - 系统功能设计→系统电路设计（原理图、仿真分析）→系统硬件电路实现。
- 设计流程：P11
- 常用设计软件

### 第一章 绪论

- (1) EDA与电路仿真的概念；
- (2) 计算机仿真过程：建模和实验；
- (3) 电力电子装置设计流程；
- (4) 常用EDA工具；**

### 常用EDA软件

- 电子电路设计与仿真软件：
  - Spice/PSpice (OrCAD10.5)、Synopsys (Saber 2006)、EWB (Multisim8.0)、Proteus、Matlab Simulink
- PCB设计软件：
  - Protel (Protel DXP, Protel 99SE)、Cadence、Mentor Graphics

### 常用EDA软件

- IC设计软件：
  - IC设计包括设计输入，仿真，综合，布局布线，物理验证等
  - Cadence、Mentor Graphics、Synopsys
- PLD (Programmable Logic Device) 设计软件
  - PLD主要有CPLD和FPGA两大类
  - 软件有Altera公司的MAX+PLUS和Xilinx公司的ISE。

### 常用EDA软件

- 其他CAD软件
  - 热设计软件BETAsoft (动态软件分析公司的温度分析软件)
  - 电磁兼容仿真软件PADS公司的HYPERLYNX
  - 磁设计软件ansoft公司的HFSS、Maxwell 3D等

### 本课程的主要内容

- 主要内容：
  - 功率变换器的模型
  - 功率变换器的设计与仿真模型
- 教学目的：
  - 掌握功率变换器仿真的思路、方法。

### 小结

- 了解计算机仿真的概念
- 了解计算机仿真过程
- 复习：
  - 功率变换器的工作原理

## 第二章 双管正激电路的设计与仿真

## 双管正激电路的设计

- 一. 开环设计;
- 二. 开环仿真(瞬态)、分析与模型细化;
- 三. 闭环设计(状态空间平均模型)与仿真;
- 四. 闭环仿真;
- 五. 元件级设计与仿真。

## 一 双管正激电路的开环设计

- (1) 性能指标;
- (2) 双管正激电路的工作原理;
- (3) 双管正激电路的开环设计;

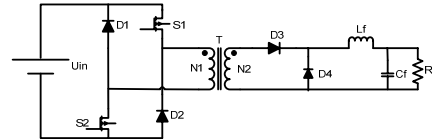
### (1) 性能指标

- DC-DC变换器性能指标:
- 输入电压: 240-300VDC (额定270V)
- 输出性能:
  - $V_{out}$  28VDC
  - $V_{out(p-p)} < 100mV$
  - $I_{out}$  20A
- 其他性能:
  - 效率  $> 85\%$
  - 开关频率 100kHz

### (2) 双管正激电路的工作原理

#### 主电路拓扑选择

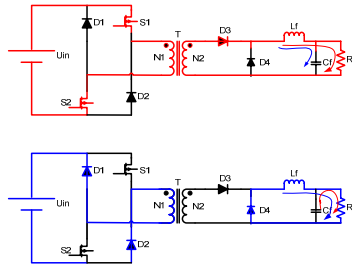
- 非隔离式拓扑 **X**
- 隔离式拓扑: 单端正激、单端反激、推挽、全桥、半桥、**双管正激**等;



### (2) 双管正激电路的工作原理

#### 工作原理分析

- S1、S2导通期间, 变压器励磁, 电源通过变压器向负载提供能量;
- S1、S2关断期间, D1、D2导通, 变压器去磁。



### (3) 双管正激电路的开环设计

#### 主电路参数设计

- (1) 占空比
- (2) 变压器匝比  $\rightarrow$  变压器设计
- (3) 滤波电感量  $\rightarrow$  滤波电感设计
- (4) 滤波电容
- (5) 功率器件电应力

$\frac{V_{in} D_{max}}{V_{out}} = \frac{300 * 0.42}{28} = 4.5$

### 占空比、匝比设计

(1) 占空比  
 拓扑限制:  $D_{max} < 0.5$ ;  
 控制芯片限制:  $D_{max} < 0.45 \rightarrow D_{max} = 0.42$

(2) 变压器匝比  $\rightarrow$  变压器设计  
 输入、输出关系:  

$$V_{out} = V_{in} * \left(\frac{1}{n}\right) * D$$

$$n = \frac{V_{in \min} D_{max}}{V_{out}} = \frac{240 * 0.42}{28} = 3.6$$

设经计算, 原副边匝比=24: 7=3.43 (注意匝数取整)

### 变压器设计

- 变压器设计: (选取磁芯、匝数、导线线径、校核)

$$SQ = \frac{P_o}{2f B_m \eta K_c K_u j} * 10^8$$

$$= \frac{28 * 20}{2 * 200 * 10^3 * 1500 * 0.95 * 0.3 * 400} * 10^8$$

$$= 0.82 \text{cm}^4$$

### 占空比、匝比设计

计算实际占空比:

$$D_{max} = \frac{n V_{out}}{V_{in \min}} = \frac{24}{7} * \frac{(28 + 0.85)}{240} = 0.412$$

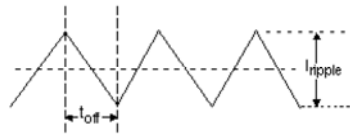
$$D_{min} = \frac{n V_{out}}{V_{in \max}} = \frac{24}{7} * \frac{(28 + 0.85)}{300} = 0.33$$

$$D_{nom} = \frac{n V_{out}}{V_{in \text{nom}}} = \frac{24}{7} * \frac{(28 + 0.85)}{270} = 0.366$$

$D_{max} < 0.5$

### 滤波电感设计

- 电感量, 设1/10负载时, 电感电流临界连续。

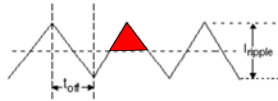


$$L \frac{\Delta I_L}{\Delta T} = U_L \rightarrow$$

$$L_{max} = \frac{U_L \Delta T_{max}}{\Delta I_L} = \frac{-28}{-4} (1 - 0.33) 10 \mu \approx 46.9 \mu H$$

### 滤波电容设计

- $I_f > I_o$  充电,  $I_f < I_o$  放电;



$$C_f = \frac{I_{ripple}}{8 f_s V_{out(p-p)}} = 50 \mu F$$

$$ESR_{max} = \frac{\Delta V}{\Delta I} = \frac{0.1}{4} = 0.025 \Omega$$

充电电荷  $\Delta Q = \text{充电电流} * \text{充电时间}$

$$= \frac{1}{4} I_{ripple} * \frac{1}{2} T_s = C_f * V_{out(p-p)}$$

### 双管正激电路的设计

- 一. 开环设计;
- 二. 开环仿真(瞬态)、分析与模型细化;
- 三. 闭环设计与仿真;
- 四. 闭环仿真;
- 五. 元件级仿真。

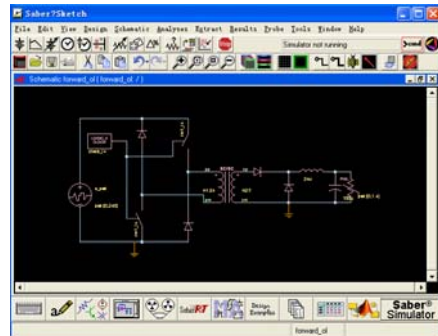


## 开环仿真（瞬态）、分析与模型细化

### (1) 原理图编辑

- (2) 仿真模拟
- (3) 仿真结果分析
- (4) 模型细化

## (1) 原理图编辑



## (1) 原理图编辑

- ① 启动SaberSketch
- ② 打开电路图编辑窗口
  - 创建新设计
  - 打开已有设计
- ③ 选择和放置电路元件
  - 查找元件
    - Search
    - Browse
  - 复制元件（含属性）
  - 元件的移动

## (1) 原理图编辑

- ④ 修改元器件属性
  - 理解所选择元器件的属性
  - 定义属性
  - 帮助文件的使用
- ⑤ 布线
  - 画线
  - 重新布线
  - 连线与电压节点命名
- ⑥ 保存

## 小结

- 掌握DC-DC电路参数设计方法；
- 掌握用SaberSketch输入电路原理图的方法。
- 作业：设计Buck变换器参数，并将原理图输入SaberSketch。

采用Buck电路完成如下变换器的主电路参数设计

- 输入电压：30-60VDC（额定48V）
- 输出性能：
  - $V_{out}$  24VDC
  - $V_{out(p-p)}$  <25mV
  - $I_{out}$  2A
  - $I_{out}=0.1A$ 时，电感电流临界连续。
- 其他性能：
  - 效率 >80%
  - 开关频率 200kHz

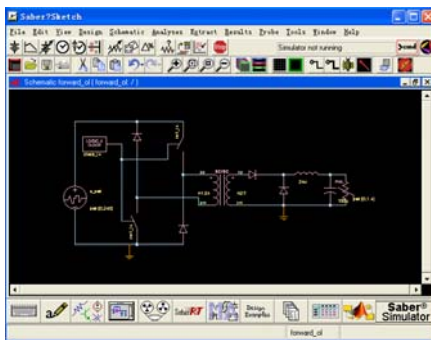
## 双管正激电路的设计

- 一. 开环设计;
- 二. 开环仿真(瞬态)、分析与模型细化;
- 三. 闭环设计与仿真;
- 四. 闭环仿真;
- 五. 元件级仿真。

## 开环仿真(瞬态)、分析与模型细化

- (1) 原理图编辑
- (2) 仿真模拟
- (3) 仿真结果分析
- (4) 模型细化

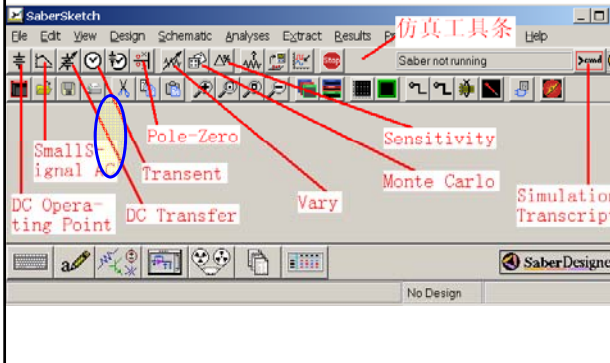
### (1) 原理图编辑



### (2) 仿真模拟

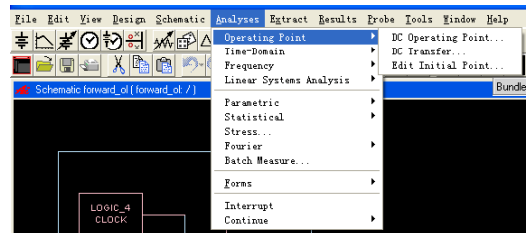
- ① 指定顶级电路
- ② 生成网表及设定网表器生成选项
  - 程序根据具体情况自动完成;
  - 默认设置

### (2) 仿真模拟



### (2) 仿真模拟

- ③ 验证设计功能
  - 分析类型(11种)



## (2) 仿真模拟

### ④ 查找、调试DC工作点(DC operating point)

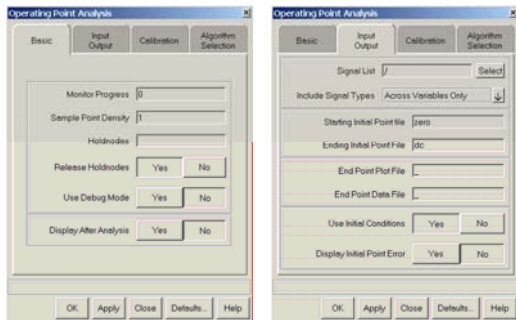
- **DC分析的概念与作用**
- 执行DC分析（主要设置）
- 评估工作点
- DC工作点调试方法

## (2) 仿真模拟

### ④ 查找、调试DC工作点(DC operating point)

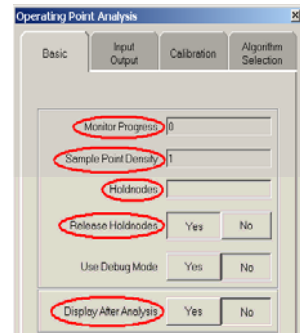
- **DC分析的概念与作用**
- **静态工作点**：电子线路中的一些非线性元件（如二极管、三极管），其运行特性取决于偏置点，称为静态工作点。为时域分析和交流小信号分析提供初始值。
- **t=0时**，所有时变参数为0情况下，分析电路的DC偏置点。（如电感为短路，电容为开路等）
- **作用**：求解系统的静态工作点，为其他分析提供计算初始点；提供快速检查。

Analyses > Operating Point > DC Operating Point :



仿真器主要参数：

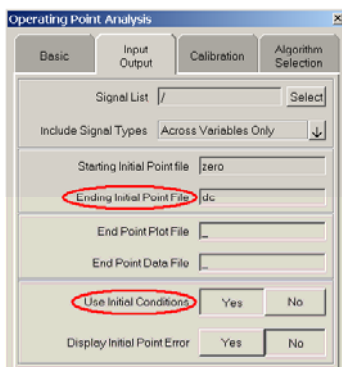
- Monitor Progress: 进度显示控制;
- Sample Point Density:
- Holdnodes: 保留点;
- Release Holdnodes: 释放保留点;
- Display After Analysis: 自动显示结果。



仿真器主要参数：

Ending Initial Point File: 结束文件;

Use Initial Conditions: 是否使用初始条件。



## (2) 仿真模拟

### ⑤ 时域分析 (transient)

- **时域分析的概念与作用**
- **瞬态分析**用于检验系统的时域特性，此分析通常从静态工作点（对于自激振荡电路应从零时刻开始）开始。**是功率变换器数字仿真中应用最广泛的分析类型。**
- 瞬态分析对话框

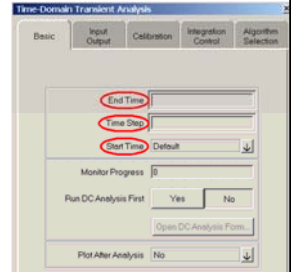
## (2) 仿真模拟

- 影响仿真精度与收敛性的几个设置：
  - Time step;
  - Sample point density;
  - Truncation error;
- 其他设置
  - 基本、输入输出、校准、数值积分、算法

### Analysis > Time Domain > Transient :

#### Basic

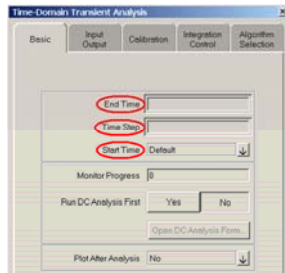
- End Time: 定义瞬态分析结束时间;
- Time Step: 步长;
  - 设计中有关时间常数的 1/10;
  - 驱动源最小的上升或下降沿;
  - 正弦驱动源输入周期的 1/100。
- Start Time: 开始时间;



### Analysis > Time Domain > Transient :

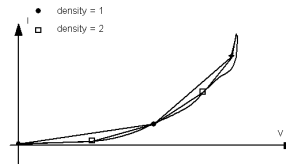
#### Basic

- Monitor progress
  - 0 执行时间
  - -1 执行概要和时间
  - 其他整数 总体信息、运算法则、CPU时间等
- DC analysis
- Plot after analysis



#### Sample Point Density:

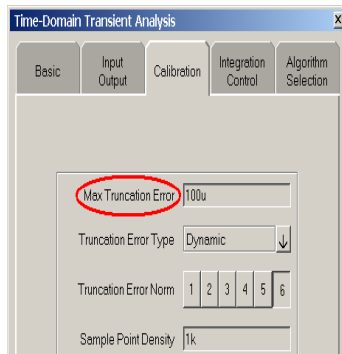
- 分段线性化算法;
- 取值越大, 仿真模拟精度越高;
- **DC分析中, 有助于找到直流工作点;**
- **有助于分析电压、电流尖峰;**
- 取值越大, 曲线越平滑, 越逼近真实波形;



主要参数:

Max Truncation Error  
: 最大截断误差。

仿真速度与收敛性能



### 开环仿真（瞬态）、分析与模型细化

- (1) 原理图编辑
- (2) 仿真模拟
- (3) **仿真结果分析**
- (4) 模型细化

### (3) 仿真结果分析

- 查看仿真波形
  - 图形文件的打开
  - 现有信号的查看
  - 信号的运算
- 测量分析结果
- 验证设计是否满足要求
  - 观测各种情形下关键点波形

### 小结

- 掌握瞬态仿真方法
- 掌握波形分析方法
- 作业：
  - 1: 完成Buck变换器的电路设计报告（含所有主电路参数设计，需要查阅相关手册，选取所有元器件）
  - 2: 完成双管正激电路设计报告（含变压器与电感器的设计）；（选做）

### 双管正激电路的设计

- 一. 开环设计；
- 二. 开环仿真（瞬态）、分析与模型细化；
- 三. 闭环设计与仿真；
- 四. 闭环仿真；
- 五. 元件级仿真。

### 开环仿真（瞬态）、分析与模型细化

- (1) 原理图编辑
- (2) 仿真模拟
- (3) 仿真结果分析
- (4) 模型细化

### (3) 仿真结果分析

- ① 输出电压纹波；
  - 电容电流波形
- ② 电感电流波形（DCM、CCM）；
  - 电感电压波形
- ③ 开关管电压、电流应力；
- ④ 原边二极管电压、电流应力；

### (3) 仿真结果分析

- ① 副边二极管电压、电流应力；
- ② 电源电流波形；
- ③ 不同供电电源电压分析
  - 电源电压与D的关系；
  - D变化情况下其他点波形的相应变化。

## 开环仿真（瞬态）、分析与模型细化

- (1) 原理图编辑
- (2) 仿真模拟
- (3) 仿真结果分析
- (4) 开环设计与模型细化（完善）

## (4) 模型细化（完善）

- ① 滤波电感——串联电阻→线路压降；（实际设计<需要查磁芯手册）  
[www.dianyuan.com](http://www.dianyuan.com)
- ② 滤波电容—串联电阻→输出电压纹波； $\tan$
- ③ 变压器（实际设计）
  - a. 励磁电感→励磁电流<负载电流的5%；
  - b. 漏电感→良好耦合情况下为<0.2% $L_m$ ；

## (4) 模型细化（完善）

- ① 开关管——应力计算、选取及实际器件选取；
  - [Get part](#) → [parametric search](#) → .....
- ② 二极管——应力计算、选取及实际器件选取；

## 小结

- 在波形分析的基础上，完善电路仿真模型。
- 掌握根据帮助文件（或模版）选取器件的方法
- 作业：
  - 1: 完成Buck变换器的电路设计报告（含所有主电路参数设计，需要查阅相关手册，选取所有元器件）
  - 2: 完成双管正激电路设计报告（含变压器与电感器的设计）；（选做）

## 作业内容

- 1: 完成Buck变换器的电路设计报告（含所有主电路参数设计，需要查阅相关手册，选取所有元器件）
  - 主电路设计（开关管、二极管、滤波电感、滤波电容）；
  - 仿真分析（1，采用理想元器件分析性能指标的满足情况；2，评估所选元器件的合理性；3，理想元器件与实际元器件模型带来的性能指标差异性分析）

## 作业内容

- 2: 完成双管正激电路设计报告（含变压器与电感器的设计）；（选做）
  - 主电路设计（变压器、开关管、二极管、滤波电感、滤波电容）；
  - 仿真分析（1，采用理想元器件分析性能指标的满足情况；2，评估所选元器件的合理性；3，理想元器件与实际元器件模型带来的性能指标差异性分析）

## 双管正激电路的设计与仿真

- 一. 开环设计;
- 二. 开环仿真(瞬态)、分析与模型细化;
- 三. 闭环设计与仿真;
- 四. 元件级仿真。

## 三、闭环设计与仿真

- ① 闭环控制的基本概念
- ② PWM型DC-DC变换器控制框图
- ③ PWM型DC-DC变换器的低频小信号模型
- ④ 闭环控制系统的设计
- ⑤ 闭环控制系统仿真

### ① 闭环控制的基本概念

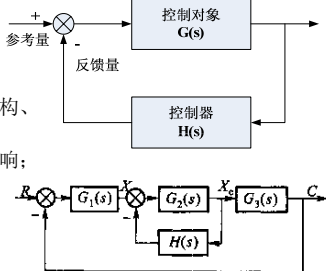
- 自动控制系统的校正
- 反馈控制系统框图
- 稳定性与稳定裕度
- 常用补偿环节

### 自动控制系统的校正

- 在系统的基本部分(控制对象、执行机构和测量元件等)确定的条件下,设计**校正装置(环节)**的传递函数,使系统的**动态性能指标**满足一定的要求。
- **反馈校正**、**串联校正**、**前置校正**、**干扰补偿**等4种校正方式;

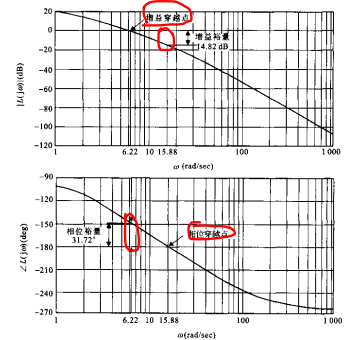
### 反馈控制系统

- 构成
- 作用
  - 利用反馈改变局部结构、参数;
  - 削弱非线性因素的影响;
  - 抑制干扰



### 稳定性与稳定裕度

- 开环增益穿越频率(截止频率)
- 开环相位穿越频率
- 相角裕度
- 幅值裕度

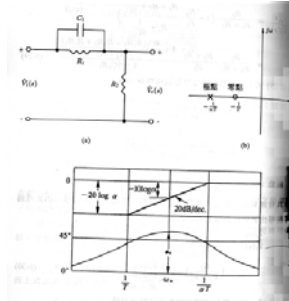


### 常用补偿环节（超前补偿）

- 增加系统带宽（提高响应速度，但易受干扰）
- 本质为高通滤波器，增加相位裕度；
- 对稳态性能改善有限。

$$\frac{\hat{V}_c(s)}{\hat{V}_1(s)} = \alpha \frac{1+Ts}{1+\alpha Ts}$$

$$\alpha = \frac{R_2}{R_1 + R_2}, T = C_1 R_1$$

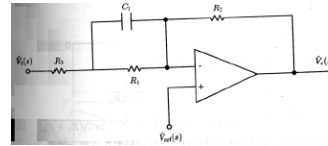


### 常用补偿环节（超前补偿）

- 增加系统带宽（提高响应速度，但易受干扰）
- 本质为高通滤波器，增加相位裕度；
- 对稳态性能改善有限。

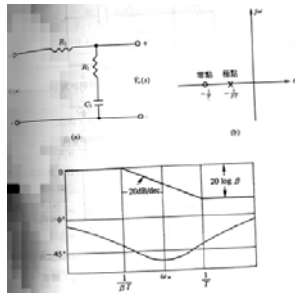
$$\frac{\hat{V}_c(s)}{\hat{V}_1(s)} = \frac{R_2}{R_3 + (\frac{1}{sC_1} // R_1)}$$

$$= \left(\frac{R_2}{R_3 + R_1}\right) \cdot \frac{1 + sC_1 R_1}{1 + s \frac{C_1 R_1 R_2}{R_3 + R_1}}$$



### 常用补偿环节（滞后补偿）

- 改善稳态性能（如减小稳态误差等）；
- 降低带宽，响应速度慢，抑制干扰能力强；
- 本质为一低通滤波器。

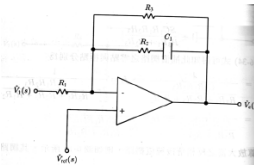


### 常用补偿环节（滞后补偿）

- 改善稳态性能（如减小稳态误差等）；
- 降低带宽，响应速度慢，抑制干扰能力强；
- 本质为一低通滤波器。

$$\frac{\hat{V}_c(s)}{\hat{V}_1(s)} = \frac{R_2 + \frac{1}{sC_1}}{R_1}$$

$$= \frac{1 + sC_1 R_2}{sC_1 R_1}$$

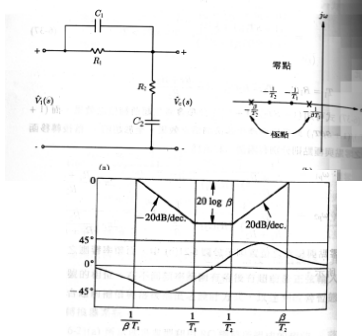


$$\frac{\hat{V}_c(s)}{\hat{V}_1(s)} = \frac{R_2 // (R_1 + \frac{1}{sC_1})}{R_1}$$

$$= \frac{R_2}{R_1} \cdot \frac{1 + sC_1 R_2}{1 + sC_1 (R_2 + R_1)}$$

### 常用补偿环节（超前-滞后补偿）

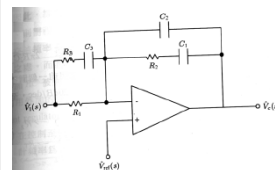
- 同时达到改善暂态与稳态性能的目标



### 常用补偿环节（超前-滞后补偿）

$$\frac{\hat{V}_c(s)}{\hat{V}_1(s)} = \frac{\frac{1}{sC_2} + R_2}{R_3 + (\frac{1}{sC_1} // R_1)}$$

$$= \frac{(1 + sC_2 R_2)(1 + sC_1 R_1)}{(sC_2 R_1)(1 + sC_1 R_3)}$$



$$\frac{\hat{V}_c(s)}{\hat{V}_1(s)} = \frac{(\frac{1}{sC_2} // (R_2 + \frac{1}{sC_1}))}{(R_3) // (R_1 + \frac{1}{sC_1})}$$

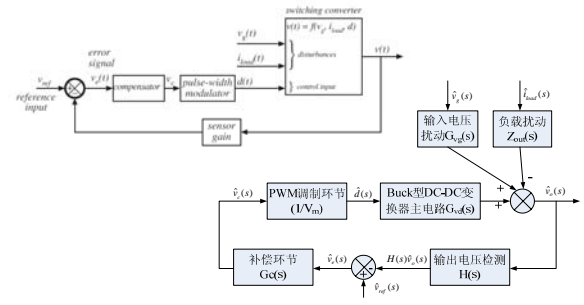
$$= \frac{(1 + sC_2 R_2)(1 + sC_1 R_1)}{[sR_1(C_1 + C_2)](1 + s \frac{R_1 C_1 C_2}{C_1 + C_2} + sR_3 C_2)}$$



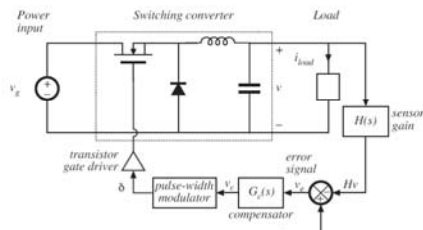
### 三、闭环设计与仿真

- ① 闭环控制的基本概念
- ② **PWM型DC-DC变换器控制框图**
- ③ PWM型DC-DC变换器的低频小信号模型
- ④ 闭环控制系统的设计
- ⑤ 闭环控制系统仿真

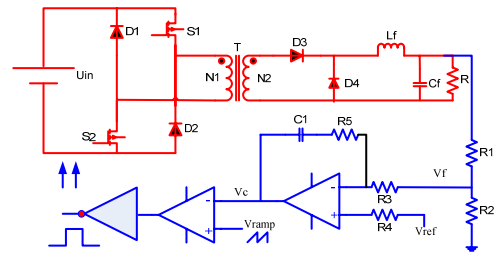
### ② PWM型DC-DC变换器控制框图



### 控制框图（例1）



### 控制框图（例2）



### 三、闭环设计与仿真

- ① 闭环控制的基本概念
- ② PWM型DC-DC变换器控制框图
- ③ PWM型DC-DC变换器的低频小信号模型
- ④ 闭环控制系统的设计
- ⑤ **闭环控制系统仿真**

### 闭环控制系统仿真

- 闭环仿真模型
  - 建立滞后补偿模型
- 闭环仿真及分析
  - 时域瞬态分析
  - 小信号仿真（裕量设计）
- 建立超前-滞后补偿模型

### 小结

- 闭环控制的基本概念。
- 用分立元件搭建闭环控制仿真模型
  
- 作业:
- 1: 完成Buck变换器的电路设计报告（含所有主电路参数设计，需要查阅相关手册，选取所有元器件）
- 2: 完成双管正激电路设计报告（含变压器与电感器的设计）；（选做）

### 作业内容

- 1: 完成Buck变换器的电路设计报告（含所有主电路参数设计，需要查阅相关手册，选取所有元器件）
  - 主电路设计；
  - 仿真分析（1，采用理想元器件分析性能指标的满足情况；2，评估所选元器件的合理性；3，理想元器件与实际元器件模型带来的性能指标差异性分析）
  - 采用滞后补偿环节建立闭环仿真模型。

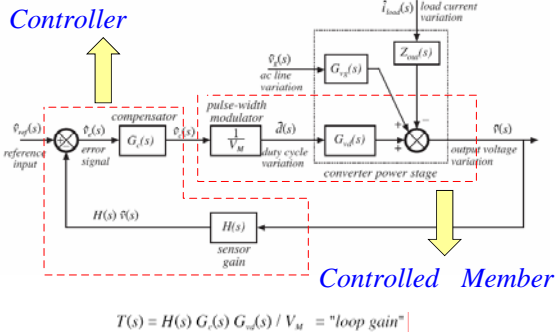
### 作业内容

- 2: 完成双管正激电路设计报告（含变压器与电感器的设计）；（选做）
  - 主电路设计（变压器、开关管、二极管、滤波电感、滤波电容）；
  - 仿真分析（1，采用理想元器件分析性能指标的满足情况；2，评估所选元器件的合理性；3，理想元器件与实际元器件模型带来的性能指标差异性分析）
  - 采用滞后补偿环节建立闭环仿真模型。

### 三、闭环设计与仿真

- ① 闭环控制的基本概念
- ② PWM型DC-DC变换器控制框图
- ③ PWM型DC-DC变换器的低频小信号模型
- ④ 闭环控制系统的设计
- ⑤ 闭环控制系统仿真

### PWM型DC-DC变换器小信号模型

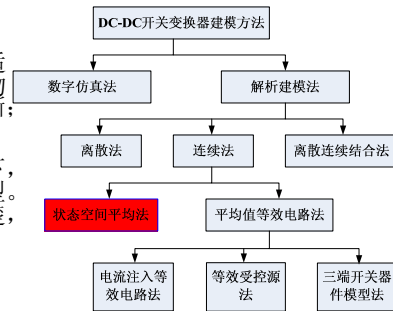


### ③ PWM型DC-DC变换器的低频小信号模型

- DC-DC变换器动态分析方法概述
- CCM下的低频小信号模型（采用状态空间平均法）

## DC-DC变换器动态分析方法

- 数字仿真法
  - 准确度高, 适用范围广, 物理概念不清晰;
- 解析建模法
  - 在某些假定下, 得到近似模型。物理概念清楚, 适用于低频、小信号场合。



## 状态空间平均法

- 从变换器不同工作模式下的状态空间方程出发, 经过平均、小信号扰动、线性化处理, 得到表达变换器稳态和动态小信号特性的数学模型。
- 适用于稳态与低频小信号扰动分析;

## 状态方程 (理想器件假定)

- 理想器件假定
- 一个工作在CCM下的DC-DC变换器, 可用两个线性时变电路来等效; 状态方程分别为:

$$\begin{aligned} \text{在 } 0 \leq t \leq dT_s \text{ 期间: } & \begin{cases} \dot{x} = A_1 x + b_1 v_s \\ y = C_1^T x \end{cases} \\ \text{在 } dT_s \leq t \leq T_s \text{ 期间: } & \begin{cases} \dot{x} = A_2 x + b_2 v_s \\ y = C_2^T x \end{cases} \end{aligned}$$

## (1)平均 (2个低频假定)

- 变换器低通滤波器转折频率 $f_c \ll$ 开关频率 $f_s$
- 扰动信号频率 $f_p \ll$ 开关频率 $f_s$

$$\begin{cases} \dot{\bar{x}}(t) = (dA_1 + d'A_2)\bar{x}(t) + (db_1 + d'b_2)v_s(t) \\ y(t) = (dC_1^T + d'C_2^T)x(t) \end{cases}$$

$$d' = 1 - d$$

- 变换器的基本状态空间平均方程

## (2)扰动

- 扰动在稳态量基础上进行, 稳态条件下:

$$\begin{aligned} 0 &= (DA_1 + D'A_2)X + (Db_1 + D'b_2)V_s \\ &= AX + bV_s \\ Y &= (DC_1^T + D'C_2^T)X = C^T X \end{aligned}$$

- 可解得:

$$\begin{cases} X = -A^{-1}bV_s \\ Y = -C^T A^{-1}bV_s \end{cases}$$

## (2)扰动

- 扰动

$$\begin{cases} \dot{\hat{x}}(t) = (dA_1 + d'A_2)\bar{x}(t) + (db_1 + d'b_2)v_s(t) \\ y(t) = (dC_1^T + d'C_2^T)x(t) \end{cases}$$

$$v_s = V_s + \hat{v}_s; \quad d = D + \hat{d}; \quad d' = D' - \hat{d}; \quad x = X + \hat{x}; \quad y = Y + \hat{y}$$

- 将扰动量代入基本状态变量方程, 并将稳态与动态量分离, 可得:

$$\begin{aligned} \frac{d\hat{x}}{dt} &= A\hat{x} + b\hat{v}_s + [(A_1 - A_2)X + (b_1 - b_2)V_s]d \\ &\quad + (A_1 - A_2)\hat{d}\hat{x} + (b_1 - b_2)\hat{d}\hat{v}_s \\ \hat{y} &= C^T \hat{x} + (C_1^T - C_2^T)X\hat{d} + (C_1^T - C_2^T)\hat{d}\hat{x} \end{aligned}$$

### (3) 线性化

- 小信号假定：扰动信号比稳态量小很多，由此可以忽略二阶微小量。

$$\frac{d\hat{x}}{dt} = A\hat{x} + b\hat{v}_s + [(A_1 - A_2)X + (b_1 - b_2)V_s]\hat{d}$$

$$\hat{y} = C^T \hat{x} + (C_1^T - C_2^T)X\hat{d}$$

- 描述变换器动态低频小信号行为的状态空间平均方程。可求得变换器的动态低频小信号特性，如输出对输入和输出对导通占空比的传递函数。

### (3) 线性化及求解

- 对应的S域形式为：
$$\frac{d\hat{x}}{dt} = A\hat{x} + b\hat{v}_s + [(A_1 - A_2)X + (b_1 - b_2)V_s]\hat{d}$$
$$\hat{y} = C^T \hat{x} + (C_1^T - C_2^T)X\hat{d}$$

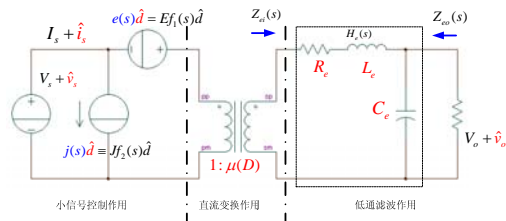
$$s\hat{x}(s) = A\hat{x}(s) + b\hat{v}_s(s) + [(A_1 - A_2)X + (b_1 - b_2)V_s]\hat{d}(s)$$

$$\hat{y}(s) = C^T \hat{x}(s) + (C_1^T - C_2^T)X\hat{d}(s)$$

$$\hat{x}(s) = (sI - A)^{-1}b\hat{v}_s(s) + (sI - A)^{-1}[(A_1 - A_2)X + (b_1 - b_2)V_s]\hat{d}(s)$$

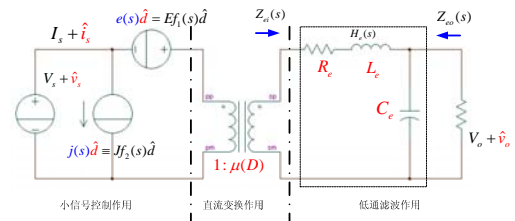
$$\hat{y}(s) = C^T (sI - A)^{-1}b\hat{v}_s(s) + \left\{ C^T (sI - A)^{-1}[(A_1 - A_2)X + (b_1 - b_2)V_s] + (C_1^T - C_2^T)X \right\} \hat{d}(s)$$

### (4) 稳态和低频小信号等效电路模型



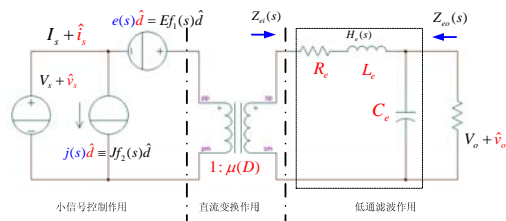
- 小信号控制作用：由两个与占空比扰动量  $\hat{d}(s)$  有关的受控源组成，表示占空比的小范围扰动对输出电压和输入电流的影响。

### (4) 稳态和低频小信号等效电路模型



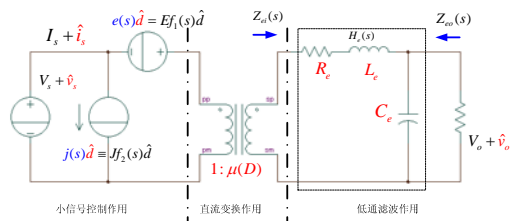
- 直流变换作用：理想变压器，表示不考虑寄生参数时变换器的理想稳态电压变比。

### (4) 稳态和低频小信号等效电路模型



- 低通滤波作用：滤波器的滤波作用，虚线框中的连接方式只是表示了一种低通滤波器的连接方式。

### (4) 稳态和低频小信号等效电路模型



- 等效电路可由  $e(s)$ 、 $j(s)$ 、 $\mu(D)$ 、 $H_o(s)$  四个参数来表征。

(4) 稳态和低频小信号等效电路模型

$$\hat{V}_o(s) = G_{vs} \hat{v}_s(s) + G_{vd} \hat{d}(s)$$

$$\hat{I}_s(s) = G_{is} \hat{v}_s(s) + G_{id} \hat{d}(s)$$

$$\hat{v}_o(s) = [\hat{v}_s(s) + e(s)\hat{d}] \mu(D) H_e(s) = \mu(D) H_e(s) \hat{v}_s(s) + e(s) \mu(D) H_e(s) \hat{d}$$

$$\hat{I}_s(s) = j(s)\hat{d} + [\hat{v}_s(s) + e(s)\hat{d}] \frac{\mu^2(D)}{Z_{ei}(s)} = \frac{\mu^2(D)}{Z_{ei}(s)} \hat{v}_s(s) + [j(s) + e(s) \frac{\mu^2(D)}{Z_{ei}(s)}] \hat{d}$$

基本理想变换器的统一等效电路模型参数

	$\mu(D)$	$E$	$f_1(s)$	$J$	$f_2(s)$	$L_c$	$C_c$	$H_e(s)$
Buck	$D$	$\frac{V_o}{D^2}$	1	$\frac{V_o}{R}$	1	$L$	$C$	$\frac{1}{L_c C s^2 + \frac{L_c}{R} s + 1}$
Boost	$\frac{1}{1-D}$	$V_o$	$1 - \frac{L_c}{R} s$	$\frac{V_o}{(1-D)^2 R}$	1	$\frac{L}{(1-D)^2}$	$C$	$\frac{1}{L_c C s^2 + \frac{L_c}{R} s + 1}$
Buck-boost	$-\frac{D}{1-D}$	$-\frac{V_o}{D^2}$	$1 - \frac{L_c}{R} D s$	$-\frac{V_o}{(1-D)^2 R}$	1	$\frac{L}{(1-D)^2}$	$C$	$\frac{1}{L_c C s^2 + \frac{L_c}{R} s + 1}$

Buck电路稳态和动态小信号模型

■ 稳态:  $M = \mu(D)$

■ 动态低频小信号传递函数

$$\left. \frac{\hat{v}_o(s)}{\hat{v}_s(s)} \right|_{\hat{d}(s)=0} = \mu(D) H_e(s) = \frac{D}{L_c C s^2 + \frac{L_c}{R} s + 1}$$

$$\left. \frac{\hat{v}_o(s)}{\hat{d}(s)} \right|_{\hat{v}_s(s)=0} = \mu(D) H_e(s) E f_1(s) = \frac{1}{L C s^2 + \frac{L}{R} s + 1} \frac{V_o}{D}$$

forward电路稳态和动态小信号模型

■ 稳态:  $M = \mu(D)$

■ 动态低频小信号传递函数

$$\left. \frac{\hat{v}_o(s)}{\hat{d}(s)} \right|_{\hat{v}_s(s)=0} = \frac{1}{L C s^2 + \frac{L}{R} s + 1} \frac{V_o}{D}$$

$$= \frac{1}{L C s^2 + \frac{L}{R} s + 1} \frac{V_s}{n}$$

三、闭环设计与仿真

- ① 闭环控制的基本概念
- ② PWM型DC-DC变换器控制框图
- ③ PWM型DC-DC变换器的低频小信号模型
- ④ 闭环控制系统的设计(1): 滞后校正环节
- ⑤ 闭环控制系统仿真

闭环控制系统的设计

- 推导变换器的小信号模型, 得出控制到输出的传递函数; (仿真实验—小信号分析)
- 得出系统开环传递函数, 给出Gc(s)=1时的Bode图;
- 选择合适的补偿环节;
- 根据一定的准则(要求)设计补偿环节参数;
- 验证
  - MathCAD绘制Bode图
  - 小信号分析
  - 时域仿真

### Buck电路稳态和动态小信号模型

稳态:  $M = \mu(D)$

动态低频小信号传递函数

$$\frac{\hat{v}_o(s)}{\hat{d}(s)} \Big|_{\hat{v}_i(s)=0} = \mu(D)H_c(s) = \frac{D}{L_c s^2 + \frac{L_c}{R}s + 1}$$

$$\frac{\hat{v}_o(s)}{\hat{d}(s)} \Big|_{\hat{v}_i(s)=0} = \mu(D)H_c(s)E_f(s) = \frac{1}{LCs^2 + \frac{L}{R}s + 1} \frac{V_o}{D}$$

### forward电路稳态和动态小信号模型

稳态:  $M = \mu(D)$

动态低频小信号传递函数

$$\frac{\hat{v}_o(s)}{\hat{d}(s)} \Big|_{\hat{v}_i(s)=0} = \frac{1}{LCs^2 + \frac{L}{R}s + 1} \frac{V_s}{n}$$

### 控制d到输出的幅相特性曲线

$G_{do} = \frac{V_s}{n} = 78.75V$

$f_o = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} = 3.287kHz$

$Q_o = R\sqrt{\frac{C}{L}} = 1.45 \rightarrow 3.2dB$

### Buck电路控制框图

$T(s) = G_c(s) \left(\frac{1}{V_M}\right) G_{vd}(s) H(s)$

$H(s) = \frac{2.5}{28}$

$V_M = 2.5$

$T_u(s) \Big|_{G_c(s)=1} = \frac{1}{28} G_{vd}(s)$

### 控制vc到输出的幅相特性曲线

$G_{ovoc}(0) = 2.81 \Rightarrow 8.98dB$

$Q_o = 1.45 \Rightarrow 3.2dB$

不含补偿环节的截止频率约为6.1kHz, 对应 P.M=27.4°

### 选择合适的补偿环节: 补偿原则

- 截止频率高;
- 相角裕度大于0度, 建议为45度。
- 截止频率处, 开环相移应小于360度;
- 截止频率段, 幅频特性曲线建议为-20dB/dec; (单极点)

Step Response for Second Order System

Unit step response

If  $f_c$  is 3kHz: 265us

If  $f_c$  is 1kHz: 796us

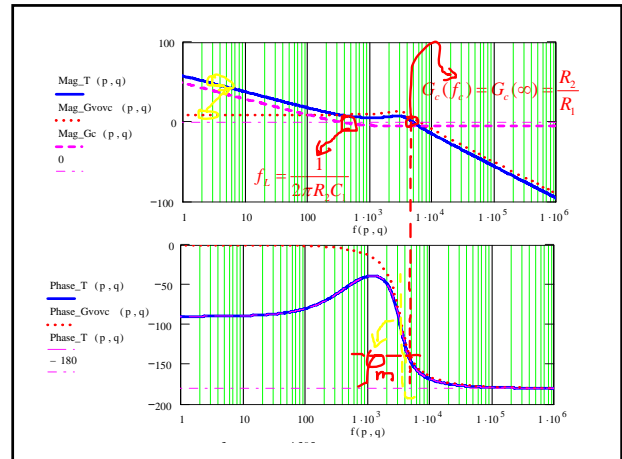
530us

1592us (slower response)

### 滞后环节闭环设计

$$G_c(s) = \frac{1+R_2C_1s}{R_1C_1s} \Rightarrow \text{零点: } f_L = \frac{1}{2\pi R_2C_1}$$

- (1)  $f_L \ll f_c \Rightarrow f_c$ 处补偿后的开环相角裕量不受影响;
- ↓
- $$G_c(f_c) = G_c(\infty) = \frac{R_2}{R_1}$$
- (2)  $f_L$ 前(低频段), 补偿环节对误差信号起到积分作用, 直流增益大幅度提高, 有助于减小稳态误差。 $\Rightarrow$  PI适用于单极点系统:  $T_u(s) = \frac{T_u(0)}{1+s/\omega_0}$



### 滞后环节闭环设计

$$T_u(s) = \frac{T_u(0)}{1+s/\omega_0}$$

补偿后:  $T(s) = T_u(s)G_c(s)$

$\Rightarrow$  高频段:  $|T(s)| = \frac{T_u(0)G_c(\infty)}{(f/f_0)}$

$f_c$ 处  $|T(s)| = 1 \Rightarrow f_c = T_u(0)G_c(\infty)f_0$

$$\frac{R_2}{R_1} = G_c(\infty) = \frac{f_c}{T_u(0)f_0}$$

$$f_L = \frac{1}{2\pi R_2 C_1}$$

$$f_c = (\frac{1}{20} \sim \frac{1}{5})f_s$$

$$f_L = \frac{1}{10}f_c$$

$R_2$   
 $C_1$   
 $f_c$ ; P.M.

### 几组设计数据 (MathCAD)

- $f_c = (1/20)f_s$ ;  $f_L = (1/10)f_c$ 
  - $f_c = (1/20)f_s = 5\text{kHz} \rightarrow G_c(\infty) = 0.54 \rightarrow R_2 = 5.4\text{k}$
  - $f_L = (1/10)f_c = 0.5\text{kHz} \rightarrow C_1 = 58.9\text{nF}$
  - $\rightarrow f_c = 4.8\text{kHz}, \text{P.M.} = 35.6^\circ$
- $f_c = (1/5)f_s$ ;  $f_L = (1/10)f_c$ 
  - $R_2 = 21.7\text{k}; C_1 = 3.67\text{nF}$
  - $\rightarrow f_c = 8.7\text{kHz}, \text{P.M.} = 4.0^\circ$
  - 本质上为滞后校正环节, 不易提高 $f_c$

### 几组设计数据 (MathCAD)

- 任取一组数据
  - $R_2 = 20\text{k}; C_1 = 10\text{nF} \rightarrow f_c = 8.3\text{kHz}, \text{P.M.} = 12.5^\circ$
- 通过时域仿真对比阶跃响应。
- 结论
  - 控制闭环参数对系统动态性能有较大影响;
  - PI调节器可用于单极点系统补偿;
  - P.M.对瞬态性能的影响;
  - 调节器参数不唯一。

### 闭环控制系统的设计

- 推导变换器的小信号模型, 得出控制到输出的传递函数; (仿真实验—小信号分析)
- 得出系统开环传递函数, 给出 $G_c(s)=1$ 时的Bode图;
- 选择合适的补偿环节;
- 根据一定的准则(要求)设计补偿环节参数;
- 验证
  - MathCAD绘制Bode图
  - 交流小信号分析
  - 时域仿真

### 作业内容

- 1: 完成Buck变换器的电路**设计报告**（含所有主电路参数设计，需要查阅相关手册，选取所有元器件）
  - 主电路设计；
  - 仿真分析（1，采用理想元器件分析性能指标的满足情况；2，评估所选元器件的合理性；3，理想元器件与实际元器件模型带来的性能指标差异性分析）
  - 采用滞后补偿环节建立闭环仿真模型。

### 作业内容

- 2: 完成双管正激电路设计报告（含变压器与电感器的设计）；（选做）
  - 主电路设计（**变压器**、开关管、二极管、滤波电感、滤波电容）；
  - 仿真分析（1，采用理想元器件分析性能指标的满足情况；2，评估所选元器件的合理性；3，理想元器件与实际元器件模型带来的性能指标差异性分析）
  - 采用滞后补偿环节建立闭环仿真模型。

### 三、闭环设计与仿真

- ① 闭环控制的基本概念
- ② PWM型DC-DC变换器控制框图
- ③ PWM型DC-DC变换器的低频小信号模型
- ④ **闭环控制系统的设计（2）:small signal AC analysis**
- ⑤ 闭环控制系统仿真

### 闭环设计与仿真

- Saber中的状态空间平均模型（概念与模型）；
- 计算控制电压V<sub>c</sub>，验证模型正确性（开环仿真）；
- 平均模型的频域分析（控制到输出的幅相特性曲线）（开环仿真）；
- 设计闭环补偿环节（已完成）；
- 验证闭环频率响应；
- 验证系统参数（时域仿真）。

### 平均模型的频域分析:交流小信号分析

- 概念
  - 交流小信号分析是一种线性频域分析。程序首先计算电路的直流工作点，以确定电路中非线性器件的线性化模型参数，然后在用户指定的频率范围内，对此线性化电路施加小信号扰动，进行频率扫描分析，所以也称之为扫描分析。
  - 交流小信号分析能够计算出电路的幅频和相频响应特性。

### 计算控制电压V<sub>c</sub>并仿真验证

$$V_{out} = V_{in} \times \frac{1}{n} \times \frac{V_c}{V_{ramp}} - V_d$$

$$V_{out} = 28V, V_{in} = 270V, n = 24/7;$$

$$V_{ramp} = 2.5V, V_d = 0.85V$$

$$\Rightarrow V_c = 0.916V$$

- 建立仿真模型（状态空间平均模型）
- 仿真分析
  - 开环时域仿真（验证V<sub>c</sub>及开环可工作，观测电感电流→消除了开关过程影响）。



## 平均模型的频域分析：执行仿真

- **Executing an AC Analysis**
  - Basic: Start Frequency, End Frequency, Increment Type, sample point density; number of points;
  - Input/output: Initial Point File field.
- **Viewing the Small Signal Analysis Results**
  - select and plot the signals
- **Measuring AC Analysis Results**
- **Executing the average models with different capacitor ESR (open loop).**

## 闭环设计与仿真

- Saber中的状态空间平均模型（概念与模型）；
- 计算控制电压 $V_c$ ，验证模型正确性（开环仿真）；
- 平均模型的频域分析（控制到输出的幅相特性曲线）（开环仿真）；
- 设计闭环补偿环节（已完成）；
- 验证闭环频率响应（ $V_{out}$ ， $V_c$ ）；
- 验证系统参数（时域仿真）。

## 设计闭环补偿环节（已完成）；

- **闭环补偿环节设计**
- **compensation network.**

## 闭环设计与仿真

- Saber中的状态空间平均模型（概念与模型）；
- 计算控制电压 $V_c$ ，验证模型正确性（开环仿真）；
- 平均模型的频域分析（控制到输出的幅相特性曲线）（开环仿真）；
- 设计闭环补偿环节（已完成）；
- 开环与闭环频率响应仿真（交流小信号模型）；
- 验证系统参数（时域仿真）。

## 验证系统参数（时域仿真）

- Saber中的状态空间平均模型（概念与模型）；
- 计算控制电压 $V_c$ ，验证模型正确性（开环仿真）；
- 平均模型的频域分析（控制到输出的幅相特性曲线）（开环仿真）；
- 设计闭环补偿环节（已完成）；
- 开环与闭环频率响应仿真（交流小信号模型）；
- 验证系统参数（时域仿真）。

## 三、闭环设计与仿真

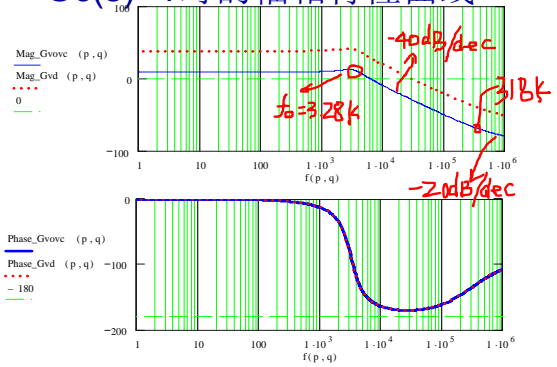
- ① 闭环控制的基本概念
- ② PWM型DC-DC变换器控制框图
- ③ PWM型DC-DC变换器的低频小信号模型
- ④ **闭环控制系统的设计（3）:例2**
- ⑤ 闭环控制系统仿真

### 超前-滞后环节闭环设计

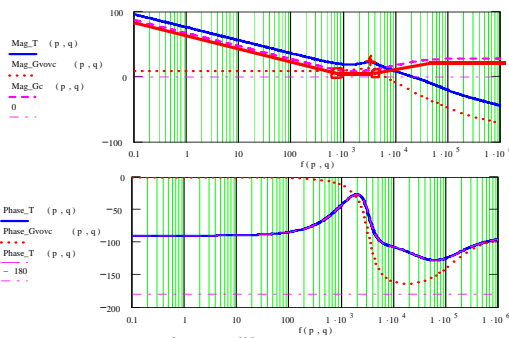
- Buck变换器的滤波电容ESR带来一个零点;
- 交流小信号模型验证。
- 以超前-滞后环节为例设计闭环参数;

$$G_{vd}(p, q) := \frac{G_{d0} \left( 1 + \frac{s(p, q)}{wz0} \right)}{1 + \left( \frac{s(p, q)}{wp0} \right)^2 + \frac{s(p, q)}{Q \cdot wp0}}$$

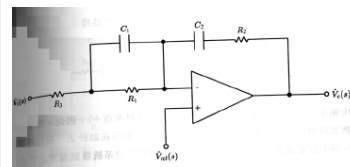
### Gc(s)=1时的幅相特性曲线



### 超前-滞后环节闭环设计



### 超前-滞后环节闭环设计：原则



$$G_c(s) = \frac{1}{sC_2} + \frac{R_2}{R_3 + (\frac{1}{sC_1} // R_1)} = \frac{(1 + sR_1C_1)(1 + sR_2C_2)}{sR_1C_2(1 + sR_3C_1)}$$

- 补偿环节的两个零点以补偿两个极点，零点频率为滤波器谐振频率的1/2。R1C1; R2C2
- 补偿环节需要一个极点补偿ESR带来的零点，该极点频率大于5倍谐振频率，以消除该零点造成的相位滞后。
- 截止频率fc处于fz2与fp之间。
- fc处-20dB/dec (单极点)

### 超前-滞后环节闭环设计：步骤

- 取截止频率fc=20kHz;
- Gc(s)=1时，20log[Tu(fc)]=-22.1dB。因此，补偿环节在fc处的增益应为：22.1dB，以使补偿后的 |T(fc)| = |Tu(fc)| |Gc(fc)| = 1
- 取fp0 << fc, 以减小该极点带来的相位滞后。此处取fp=10fp0=10\*3.287=32.87kHz

### 超前-滞后环节闭环设计

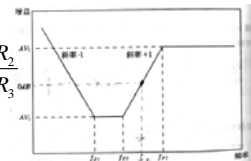
$$20 \log G_c(f_p) - 20 \log G_c(f_c) = 20 \log f_p - 20 \log f_c$$

$$20 \log G_c(f_p) = 20 \log G_c(f_c) + 20 \log \left( \frac{f_p}{f_c} \right)$$

$$= 22.1 + 20 \log \left( \frac{32.87k}{20k} \right) = 26.4dB$$

$$\Rightarrow G_c(\infty) = 10^{\frac{26.4}{20}} = 20.9 \Rightarrow G_c(\infty) = \frac{R_2}{R_3}$$

$$R_2 = 50k \Rightarrow R_3 = 2.4k$$



### 超前-滞后环节闭环设计

$$G_c(s) = \frac{\frac{1}{sC_2} + R_2}{R_3 + (\frac{1}{sC_1} // R_1)} \Rightarrow G_c(f_z) \approx \frac{R_2}{R_3 + R_1}$$

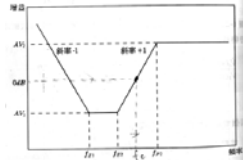
$$20 \log G_c(f_c) - 20 \log G_c(f_z) = 20 \log f_c - 20 \log f_z$$

$$20 \log G_c(f_z) = 20 \log G_c(f_c) - 20 \log \left(\frac{f_c}{f_z}\right)$$

$$= 22.1 - 20 \log \left(\frac{20k}{1.643k}\right) = 0.39dB$$

$$\Rightarrow G_c(f_z) = 10^{\frac{0.39}{20}} = 1.04$$

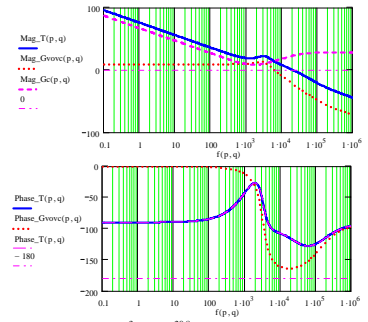
$$R_1 = 45.4k$$



### 超前-滞后环节闭环设计

d. 根据零点频率，  
可得：C1=2.1n，  
C2=1.9n。

e. fc=18.2k，  
P.M.=65°



### 时域仿真验证

- 超前-滞后校正环节（PID）与滞后校正环节（PI）时域响应仿真对比。

### 元件级设计与仿真

- 一. 开环设计；
- 二. 开环仿真（瞬态）、分析与模型细化；
- 三. 闭环设计与仿真；
- 四. 元件级设计与仿真。

## 四、元件级设计与仿真

- ① 主电路的元件级设计
- ② 控制电路的设计（补偿环节、调制环节原理与设计，PWM控制芯片）
- ③ 驱动电路的设计（放大与隔离）
- ④ 其他辅助电路设计（吸收电路等）
- ⑤ 闭环控制系统的元件级仿真

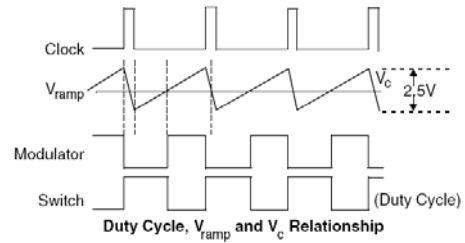
### ① 主电路的元件级设计与仿真

- 主电路元器件
  - 开关管、二极管、高频变压器、滤波电感、滤波电容
- 仿真分析
  - 电应力分析（电压尖峰、电流尖峰）

## ② 控制电路的设计

- 补偿环节
- 调制环节原理与设计
- PWM控制芯片（SG3525、UC1825等）

## 调制环节原理与设计



## 调制环节原理与设计

- 验证 $V_c$ ;
- 验证闭环设计（瞬态分析）

## ② 控制电路的设计

- 补偿环节
- 调制环节原理与设计
- PWM控制芯片（SG1525、UC1825等）

## ③ 驱动电路的设计

- 驱动信号的放大;
- 隔离方式;

## ④ 闭环电路仿真

- ① 理想器件模型主电路开环仿真
- ② SG3525
- ③ SG3525+理想器件模型主电路开环仿真
- ④ SG3525+理想器件模型主电路闭环仿真
- ⑤ 实际器件模型主电路开环仿真
- ⑥ SG3525+实际器件模型主电路开环仿真（VCVS）
- ⑦ SG3525+实际器件模型主电路闭环（VCVS）
- ⑧ SG3525+实际器件模型主电路闭环（变压器隔离）

## 常见错误提示及解决方案

## 错误提示类型

- Error → 仿真终止;
- Fatal Error → 仿真终止;
- Warning → 仿真可继续进行;

## 通用解决步骤

- 检查电路图
  - 连接关系
  - 元器件属性
  - Gnd0;
  - 分块调试

## 常见错误提示

- too many iterations;
  - 含义: Saber Simulator需要比所设置参数 (tniter, fniter) 更多的迭代次数才可收敛。
  - Tniter: Target Iterations (default is 3);
  - Fniter: maximum number of full Newton-Raphson iterations (default is 100);

## 常见错误提示

- Cannot find nonlinear system solution
  - 含义: Saber Simulator无法得到非线性解。
  - 未仿真分析即给出错误提示;
    - 先做直流工作点分析;
    - 减小激励信号源的斜率 (即减小di/dt和dv/dt);
  - 仿真未完成。
    - 已做的部分仿真是否看起来正确?
    - 提高采样密度 (2倍), 提高Tniter 4倍
    - 降低截断误差;

## 常见错误提示

- Cannot find nonlinear system solution
  - DC Analysis (dcanalysis) Solution
    - dcerr (非dc\_err) 文件;
    - 提高采样密度 (2倍), 提高Tniter 4倍
    - Algorithm Stepping set to No, First Algorithm set to Dynamic Ramp
    - Increase Settling Time

- The initial point “dc” is not found.
- 需要直流工作点的分析类型，未找到正确的直流工作点。可能的原因：
  - 直流工作点不明确;
  - 文件名不正确;
  - 直流工作点文件不存在;
- 解决方法：
  - 运行直流分析;
  - 指定正确的直流工作点;
  - Set the initial point file to “zero”.

## 作业内容

- 3: 采用单端正激电路设计如下规格DC-DC变换器，并完成仿真报告。
- 规格：200V+-20VDC输入，48VDC/1A输出，电压纹波50mv，电流纹波100mA;
- 电路设计报告（含变压器与电感器的设计）；
  - 主电路设计（**变压器**、开关管、二极管、滤波电感、滤波电容）；
  - 仿真分析（1，采用理想元器件分析性能指标的满足情况；2，评估所选元器件的合理性；3，理想元器件与实际元器件模型带来的性能指标差异性分析）
  - **采用滞后补偿环节建立闭环仿真模型。**

## 统计分析

## 统计分析

在模型参数值容差范围内随机取样（取样点数目由用户设定），利用取得的参数值进行多次特征分析，检验器件参数变化对**产品**性能的影响。

主要类型：

- monte carlo: 在用户设定的范围内随机变化参数
- vary: 按用户设定的规律变化参数
- sensitivity: 分析参数的百分比影响。

## 主要内容

- 主要内容
  - 定义电路参数
  - 设置仿真器参数
  - 执行仿真
  - 观测仿真结果
- 以Buck电路为例

## 定义电路参数

- 调用Buck电路模型
  - 验证直流工作点、瞬态分析、**交流小信号分析正确性**，并进行关键参数的测量
- 定义电路参数
  - uniform distribution（均匀分布）
  - normal (gaussian) distribution（正态分布）
  - piecewise linear（线性分布）
- 举例
  - r.1 : rnom = normal(1k, 0.1)
  - r.1 : rnom=1k, r\_tol=0.1
- 定义buck电路参数

## 设置仿真器参数

- 构建分析结构
- 设置各种分析参数
  - vary
  - dc
  - transient

Edit: 确定新加入的分析或嵌套在当前分析结构中的位置;

Add Loop: 添加嵌套;

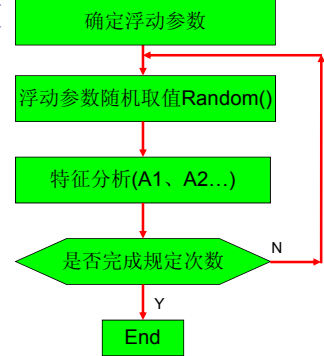
Add Analysis: 添加分析。

利用分析按钮右侧的下拉菜单也可以调整分析结构, 如将某个分析提前 (Move Up)、推后 (Move Down)、删除 (Delete) 等。

单击mc按钮即可调出蒙特卡罗分析仿真器。

## 设置仿真器参数

- 构建分析结构
- 设置各种分析参数
  - vary : /I.I5/ from 100u to 500u by 100u
  - dc: dc
  - transient: density 1k,monitor 100,pfile tr\_vary, tend 10m,terror 100u, tstep 10n



## 执行变参数分析仿真

- 查看分析波形 (滤波电感电流与输出电压纹波)
- 测量相关参数
  - 电流与电压纹波 vs. 电感量

## 执行灵敏度分析仿真

- 概念: 敏感度分析通过多次运行时域分析, 在用户定义的范围内改变特定参数, 并通过测量用户关心的性能指标, 给出特定参数与该性能指标的关系报告。
- 灵敏度分析中, 每个参数增加一个百分比 (可设定, **Perturbation**), 仿真器通过分析其变化前后对性能指标的影响, 计算灵敏度。

## 执行灵敏度分析仿真: 步骤

- ① 设置参数容差 (L、C、Rc)
- ② 设置灵敏度分析仿真器参数
  - A. Parameter List: (选取)
  - B. Perturbation: 0.01
  - C. Report after analysis: Yes
  - D. AddAnalysis

## 执行灵敏度分析仿真: 步骤

- D. AddAnalysis
  - a. dc
  - b. transient: density 1k,monitor 100,pfile tr\_sens, tend 10m,terror 100u, tstep 10n
  - c. Measure:peak-to-peak、Input Plot File: tr\_sens、Curve Name: vout
  - d. Curve Name:(i(I.I5))
- E. report

## 执行蒙特卡罗分析：概念

- Monte Carlo analysis 在容差范围内随机变化参数，仿真器得出在容差范围内的特性（曲线）、参数相关性和其他统计分析结果。

## 执行蒙特卡罗分析：步骤

- ① 设置参数容差（L、C、Rc）
- ② 设置mc分析仿真器参数
  - A. Runs（运行次数）：20
  - B. Seed（随机数获取方式）：Constant
  - C. Parameter List:（选取）
  - D. Parameter File: pars\_mc
  - E. Add Analysis

## 执行蒙特卡罗分析：步骤

### E. Add Analysis

- a. within loop
  - a) dc
  - b) transient: density 1k, monitor 100, pfile tr\_mc, tend 10m, terror 100u, tstep 10n
- b. After loop
  - a) Measure: peak-to-peak、Input Plot File: tr\_mc、Curve Name: vout、Output Plot File (Transform tab): pk2pk\_mc
  - b) Histogram: Curve Name: pk2pk (vout)、Input Plot File: pk2pk\_mc、Output Plot File: pk2pk\_hist
  - c) Curve Name: (i(l.I5))（上机练习）

## 执行蒙特卡罗分析：查看结果

- 特性分析
  - 查看柱状图（buck.pk2pk\_hist）
  - 波形图（buck.tr\_mc）
- 相关性分析(如变化对电感电流纹波的影响)
  - 计算器→buck.pk2pk\_mc →pk2pk (vout) →复制到计算器→buck.pars\_mc →Wave > f(x) →plot

## 应力分析与付立叶分析

## 应力分析

- 应力分析用来检验电路运行时的工作参数是否超过的元器件的承受能力。



## 应力分析

1. 收集器件信息：如器件规格、热阻等
2. 定义元器件定额；
3. 特定性能仿真（如瞬态分析）；
4. 执行应力分析；
5. 查看与分析“应力分析报告”
6. 后续工作

## 付立叶分析

- 付立叶分析以付立叶变换为数学基础，用于求解时域信号的频谱（直流分量、基波分量高次谐波分量的幅度和相位）。
- 傅立叶分析必须以瞬态分析为基础。

## 付立叶分析

1. 整流电路的瞬态分析；
2. 付立叶分析的仿真器设置；
3. 观测仿真分析结果、dB(y)；
4. THD。

## 功率变换器的计算机仿真与设计

## 课程主要内容及要求

- 理解EDA的基本概念
- 掌握Saber sketch的使用（原理图编辑、属性编辑、帮助文件的使用）
- 掌握常用DC-DC变换电路设计原则、方法；
  - 开环电路参数设计
  - 小信号模型及闭环控制器设计

## 课程主要内容及要求

- 掌握几种常用的仿真分析方法（仿真器设置、波形测试、仿真报告分析）
  - DC operating point
  - transient
  - Small signal AC
  - statistical
    - Vary
    - Sensitivity
    - Monte carlo
  - stress
  - Fourier

## 题型及复习要求

- 题型：两个大题（各50分）
  - 设计与基本概念30分
  - 仿真操作70分
- 要求：可独立完成常用DC-DC变换电路的设计与仿真(含所有常用分析类型)。
- 参考资料：
  - 课件、帮助文件saberuser、exampleuser
- 其他：考试分组及作业提交（Buck纸质版本与电子版、双管正激电子版）