



Review of the Course

jwu@seu.edu.cn

2013-12-31

- 教学内容 – 知识点(概念), 考点, 专业基础;
- 直观观理念 – 分析放法 理解力、感悟力;
- 实际执行力 – 证明、推理、计算;
- 综合技能 – 灵活、联系, 抓重点, 排除干扰;
- 实战应用 – 牢固度、熟练度;

信号	Signals
元器件	Devices & Elements
电路	Circuits
系统	System

器件电路性能与信号相关；
器件、电路之间的信号传输
与激励涉及阻抗匹配问题；
信号源提供原始激励；受控
源构成各类放大器

Signals: 模拟信号(Analog)、采样信号(Sampling)、数字信号(digital)

Analog Signals:

大信号-小信号；线性-非线性信号；

DC直流信号-AC交流小信号；共模信号-差模信号；

Independent Signal Source: 电压源VS(低内阻)；电流源CS(高内阻)

Dependent signal Source: VCVS(V), VCCS(g_m), CCCS(I), CCVS(R)

无源器件 – 有源器件; 线性器件 – 非线性器件;
频率相关器件(高频) – 频率无关器件

电阻: 欧姆定律, 漂移电流, 根据因果关系不同

$V \rightarrow I$ 应用(偏置, 提供Q点); $I \rightarrow V$ 应用(负载)

交流小信号输出阻抗(输出导纳), DC-AC阻抗

MOS管压控非线性电阻;

电容: $Q=CV$ 电荷存储线性方程, $i=dQ/dt=CdV/dt$

$I(s)=CsV(s)$, $X_c(s)=V(s)/I(s)=1/sC$; 瞬态大信号延迟的根源;

交流相移, 增益随频率变化(环路增益频率特性)的根源。

利用与抑制电容效应的辩证统一。

PN/Diode:

DC: 单向导电, 稳压和箝位, 移位: AC: 低阻通路

机制: 扩散电流, I-V指数率, V-I对数率; 互逆

参数: $V_{BE} \approx 0.6V$, $g_m = I/V_T$; $r = 1/g_m = V_T/I$, $R_{on} = V_{BE}/I$

MOS Diode: 功能类比于PN Diode, 参数模型不同

BJT: β , g_m , V_{BE} , $V_T = kT/q = 26mV @ 300K$

$$\Delta V_{BE} = V_{BE1} - V_{BE2} = V_T \ln(J_1/J_2) = V_T \ln[(I_1/I_2)(S_2/S_1)]$$

$$I = V_{BE}/R, \quad I = \Delta V_{BE}/R, \quad \text{偏置}$$

DC: I-V Equation

V_{GS} : 三个区 (Off, Weak Inversion, Strong Inv.)

V_{DS} : 两/三个区 (Linear R, mix, Constant current)

分区的条件: $V_{GS} \sim V_{TH}$, $V_{GD} \leq V_{TH}$ ($V_{DS} \geq \Delta$)

AC: g_m , g_d 与工作区域有关, 相对大小, Gain: g_m/g_d

与静态工作点偏置关系, 显式常数要求

等效电路描述与应用

Operation mode:

V_{GS} 恒定: 有源负载: 电阻/高阻恒流源)

V_{GS} 变化: 放大器 (CS, CG, CD)

$V_{GD}=0$, MOS Diode (低阻恒压源)

CS Gain: 电压反相放大, $-g_m/g_{d,tot}$, $p=1/(r_o C_o)$;
输入高阻-输出高阻; 低频极点;
源电阻 R_s 的影响: 阻抗倍增、 G_m 退化

CG Gain: 电压同相放大, $(g_m+g_d)/g_{d,tot}$, $p=1/(r_o C_o)$
输入低阻 (三种情况, 与有源负载有关)
输出高阻, 低频极点

CD Gain: 电压跟随(交流小信号)/电平移位(DC大信号)
 $g_m/(g_m+g_{d,tot})$, 输出低阻 $1/(g_m+g_{d,tot})$
输出高频极点 $p=(g_m+g_{d,tot})/C_o$

结构拓展: Push-Pull (**PP**), 双管放大;

$$g_m \rightarrow g_{mn} + g_{mp}, \text{ 如 DP/OTA}$$

模式拓展: Class A(全波) \rightarrow Class B(半波)

\rightarrow Class AB(低失真, 高效);

结构模式结合: PP-Class AB, 两个半波组成全波

等效电路法, 阻抗分析

理想电压源激励: 输入极点无穷大;

CS-CS: 2级增益, 靠近的2个极点; CM点匹配;

CS-CG: 2级增益, 分离的2个极点; 2种算法;

CS-CD: 单级增益, 原离的两个极点; MOS/BJT;

增益的计算、阻抗/极零点的计算

零极点的形成机制: $V_o(s)=i_o(s)z_o(s)$

- 电流激励: 负载串(零点)并联(极点)谐振法;
- 输出零电流形成零点(差分负载电流镜, Miller电容)
- 频率特性: Bode图, 幅频和相频特性

电路收敛和稳定的概念; PM和GM的概念

Pole/Zero: 数量, 性质(LHP/RHP), 大小对稳定性的影响

五管差分对经典结构三要素： 三方面的改进

1、差分对管； 2、负载； 3、尾电流；

两种结构： 1、全差分输出； 2、电流镜双转单输出

电路性能与对称性的关系： 单端/对称全差分

输出电流特性曲线； **Pole/zero**

尾电流作用： CM的问题, CM-DC/共模范围；

CM-AC: 工作点稳定/共模阻抗, 共模增益；

DP-DM: DC/动态范围； AC: 差模增益；

DP: CMRR改善, CM范围改善； 代价？

NDP/PDP共模范围:

N与P DP的差异;

差分与单端输出的差异;

单端输出DP:

差分增益无损失的原因在于Push-Pull特性;

电流镜负载引入Pole/zero coupled pair

DP I_{SS} 限流的代价:

引入显式非线性, 保留单级存在的隐式非线性

输出最大电流(压摆率)受限

DP失调: 系统失配(小); 工艺随机失调(V_{TH} , W/L , S 相关)

基本架构: DP + CS + (Buffer)

基本要求: 任何条件下满足“虚短”、“虚断”

基本参数: DC/静态功耗, 共模范围, 失调

AC: 低频增益、-3dB带宽, GBW, PM

OP设计: 架构 + 参数

参数: DC指标确定W/L, 电流分配参考AC约束

AC指标确定L, C_m , R_m , 修调W/L

闭环的优势和必要性：4点；

- 1、增益下降及可控；
- 2、线性范围扩展；
- 3、带宽扩展(开闭环极点不同)；
- 4、阻抗变换

闭环应用：PID信号处理与控

闭环带来的问题：系统稳定性，含义

- 1、首先必须收敛，满足LHP极点性质， $PM > 0$ ；
- 2、其次必须快速收敛， PM 范围($45 \sim 60^\circ$),
 $\zeta_{CL} \geq 1/\sqrt{2}$; GM
- 3、开环与闭环分析法，开环-闭环极点关系

闭环系统不稳根源:

存在RHP零点

开环极点 p_1, p_2 , --- 相互靠近而位于GBW内,

PM过小甚至 $PM < 0$

补偿策略: 开环极点分离, 压缩GBW, 扩展 p_2 次极点
将所有次极点移到GBW外2倍以上;

可行方法:

零-极相消; 并联电容补偿(压缩主极点及GBW)

Miller电容补偿原理: 压前级极点, 扩后级极点

Miller电容补偿的适用条件、优势、问题和解决方法。

类型 单路/双路/三路 要求: I_{bias} 的 V_{DD} 稳定(交直流信号)

- 单路 $R+R$ 型; $R+MOS$ Diode型
- 双路 V/R , $\Delta V/R$, 电流定义机制和稳定机制
- 三路 存在正、负反馈环路, 提高稳定性和PSRR

自偏置的原理与分析方法

x-y分析法: x(单路: 低阻+高阻配置)

y(双路: 线性电流镜+非线性电流镜耦合)

电阻的作用: 定义非线性电流镜、定义电流;

电流环路分析法: 两组电流镜特性曲线交点法

电压环路分析法: 两路正反馈, 环路增益 <1

三路: 负反馈环路增益 $>$ 正反馈环路增益(净的负反馈)

电流传输：输入电流以线性或非线性方式传输到输出支路

线性电流镜：构造条件- V_{GS} 相同，状态相同；

但 V_{DS} 等失配引入非线性失真，Cascode 改善；

了解普通和Cascode电流镜的构造方式

非线性电流镜：两种构造方式，多种特性

1、 V_{GS} 不同，则MOS管状态关系任意，显式；

2、 V_{GS} 相同，但MOS管状态不同，隐式；

NL-CM类型：传输放大单调饱和型、非饱和型、
最大峰值型、衰减型

多路自偏置结构中必然同时存在线性与非线性CM！

Cascode电流镜有两大优点(精度), 一点不足(范围):

- 1、输出高阻, Cascode阻抗倍增, PSRR高, 电流稳定;
- 2、存在 V_{DS} 匹配的线性电流镜成分, 线性传输系数恒定;
- 3、摆幅损失, V_{DD} 偏高, 需宽摆幅Cascode

CM的境界是电流稳定、传输无失真(线性), 总之精度高

Cascode N-CM构造方式与状态约束

- 1、普通式: 两个MOS Diode串联偏置; 下限范围;
- 2、宽摆幅式:
 - A、电阻串联偏置法, 电阻压降范围, 含义, 特点;
 - B、MOS Diode并联偏置法, W/L的设定, 特点

Cascode CM存在的各种可能的变化(结构\、状态和性能)

补偿原理：正负温度系数补偿，对温度系数的要求

VM-BGR：原理、系统架构，对补偿系数的要求

$\Delta V_{BE}/R_1$ 偏置+电流传输+ R_2 的I-V转换+与 V_{BE} 叠加

关键参数 $V_T \ln N/R_1$ ， M ， R_2/R_1 ， V_{BE}

失调电压的影响与减小策略：增加 $\ln N$ 以抑制 $M(R_2/R_1)$

两类VM-BGR：CM与OP控制型(反馈)，

关键：虚短(定义电流)，电流匹配传输；输出叠加；

VM-BGR带载能力的提高：取消核心电流镜传输电流；

漏驱动变为源驱动；增加Buffer缓冲，环路分析

CM-BGR：原理，结构，与VM-BGR的关联和区别

电流基准：基于电流叠加补偿，基于V-I转换的两类方法

功能: 比较两个模拟信号的相对大小, 其中一个为参考信号
同相比较器与反相比较器, 产生输出数字信号;

参数: 精度(翻转位置, 共模)、分辨率(V_{id} , 差模, AC增益)、
延迟时间(单级延迟: 功耗与增益、级数): 速度

结构: 差分OP结构, 无需频率补偿, 交叉耦合对, INV驱动;
单端INV反相比较器, 翻转位置W/L关系定义, 范围

迟滞比较器: $V_{ref+} > V_{ref-}$, 形成迟滞窗口

实现: 输出以不同方式参与两个 V_{ref} 的定义与切换

应用: 常规比较迟滞控制, 迟滞振荡器

原理：三个条件 极零点相移适合小信号线性系统分析

起振：环路正反馈，环路增益 $T>1$ ； 非线性

平衡：环路正反馈时环路增益 $T=1$ ；

稳定： T 随幅度、相移随频率的一阶导数 <0 ，负反馈；

结构：RC、LC、晶振 三角波振荡器，频率单一？

无源选频网络提供相移满足正反馈，幅度大小调节增益；

采用OP或Amp: 起振提供高增益，反馈构成闭环；

OP构成负反馈，附加移相 180° ，至少3级RC；

OP构成正反馈，附加移相 0° 或 360° ，LC或混合RC；

低通RC需要6级

晶振等效LC振荡器，Q值大，选频特性更好。

脉冲信号振荡器：包含基波及其各次谐波分量，且谐波成份逐步衰减。

环振与小信号线性系统振荡原理相同

奇数级环振： $n \geq 3$ ，每级移相 $180^\circ/n$ ， n 越大，
频率越低，周期越大， $T=2nt_d$ ；

谐振频率下因共模点的变化等效极点频率增大；

偶数级环振： $n \geq 6$ ，每级移相 $360^\circ/n$ ， n 越大
频率越低，周期越大， $T=nt_d$ ；奇偶比较

迟滞振荡器：利用迟滞比较器定义电容电压恒流充放电的周期性变化范围，确定周期和振荡频率
基于电容大信号时域瞬态特性控制的振荡电路。

模-数转换(采样保持与量化)与数模转换(基本单位叠加或分解)

参数: 精度- 位数 n (量化误差), 最小分辨率1LSB, INL, DNL;

速度-采样率, 信号频率

总噪声=量化噪声+非线性(随机失配)误差 \rightarrow 信噪比SNR

$SNR = (6.02N_{eff} + 1.76)dB$; 有效位数 $N_{eff} = (SNR - 1.76)/6.02$

ADC 结构及特点: Flash ADC, 2-step和subrange ADC;

内插-折叠式ADC, 循环ADC, Pipeline ADC, 双积分ADC,

SAR逐次逼近ADC, Σ - Δ ADC(过采样-噪声整形-负反馈)

DAC结构及特点: 二进制码与温度计码DAC (权重, 面积, 精度)

R、电容、电流镜、R-2R电流(电压)叠加型DAC 分段混合

电阻、电容分压+选通输出(开关或译码)分解型DAC

计算能力- DC-AC重要参数的计算

MOS管的参数: 与MOS状态和信号有关

DC: I-V方程, 静态工作点计算, W/L计算, Δ

AC: g_m , g_d , r_d , (V_A, λ)

电路参数: A_v , GBW, pole, zero; INV翻转点

关键: 电路输入和输出阻抗计算

系统参数: 闭环极点带宽与开环对应参数的关系

两路偏置结构(2类多种)

Cascode电流镜结构(2类偏置)

电压模带隙基准及其演化

电流镜控制；OP控制；带载驱动改进

单级放大器(有源负载): CS, CG, CD

两级放大器: CS-CD, CS-CG

DP & OP: 5管经典差分对, 2级OP经典结构

差分比较器, 单端比较器, 环振

以闭环系统稳定性为核心的电路和系统分析能力

零点、极点的产生与变化机理

零极点对电路在 $1(t)$ 激励下输出瞬态响应特性的影响

系统收敛的性质与要求，系统稳定的要求，两者关系

频率补偿原理与方法

前馈与反馈

Miller补偿结构，以及补偿后的电路性能参数

扎实的基础知识

清晰的物理图像和概念，数学和等效电路的分析功底

考虑问题的深度：多视角、多层次分析与考虑
电路结构的演变

考虑问题的广度：级间组合、结构兼容、
阻抗+信号的级间匹配分析技术

考虑问题的灵活性、全局(联系)性

考试：基础+重要知识点，基本能力，有熟练度要求

END

SE
NANJING

End of Review