

06__par__diferencial

June 19, 2026

1 Tema 4 - Par Diferencial

Electronica General - 2o GIERM

El par diferencial es el bloque fundamental de los amplificadores operacionales y de la mayoría de circuitos analogicos integrados. Permite amplificar la diferencia entre dos senales rechazando las componentes comunes (ruido, interferencias).

1.1 Indice

1. Introduccion y motivacion
2. Circuito basico del par diferencial MOS
3. Analisis de gran senal: curva de transferencia
4. Analisis de pequena senal
5. Ganancia modo comun y CMRR
6. Carga activa: espejo de corriente
7. CMRR en frecuencia
8. Ejercicios resueltos
9. Catalogo de problemas tipo
10. Resumen final

1.2 1. Introduccion y motivacion

En cualquier sistema electronico necesitamos amplificar senales debiles en presencia de ruido. El **par diferencial** resuelve esto:

Propiedad	Descripcion
Amplifica $v_{id} = v_1 - v_2$	La senal util (diferencia)
Rechaza $v_{cm} = (v_1 + v_2)/2$	Ruido, offsets, interferencias
CMRR alto	Razon de rechazo al modo comun

Este notebook cubre el par diferencial MOS (NMOS) y menciona las diferencias con BJT cuando es relevante.

1.3 2. Circuito basico del par diferencial MOS

El par diferencial NMOS basico consta de: - Dos transistores M1, M2 emparejados (mismos W/L , V_{th} , k_n) - Una fuente de corriente I_{SS} en la cola (source comun) - Resistencias de drenador R_D iguales (carga pasiva)

La corriente de cola se reparte entre M1 y M2 segun la diferencia v_{id} .

1.3.1 Definiciones de senales

Tension diferencial de entrada:

$$v_{id} = v_{G1} - v_{G2}$$

Tension de modo comun de entrada:

$$v_{cm} = \frac{v_{G1} + v_{G2}}{2}$$

De estas se obtiene:

$$v_{G1} = v_{cm} + \frac{v_{id}}{2}, \quad v_{G2} = v_{cm} - \frac{v_{id}}{2}$$

1.4 3. Analisis de gran senal: curva de transferencia

Para NMOS en saturacion con $I_D = \frac{k_n}{2}(V_{GS} - V_{th})^2$, el reparto de corriente es:

$$I_{D1} = \frac{I_{SS}}{2} + \frac{k_n}{2}v_{id}\sqrt{\frac{I_{SS}}{k_n} - \frac{v_{id}^2}{4}}$$

$$I_{D2} = I_{SS} - I_{D1}$$

La corriente se satura en I_{SS} cuando $|v_{id}| \geq \sqrt{2I_{SS}/k_n}$.

1.5 4. Analisis de pequena senal

Cuando v_{id} es pequeno, el par diferencial se comporta como un amplificador lineal.

1.5.1 Medio circuito diferencial

Por simetria, si aplicamos solo senal diferencial ($v_{cm} = 0$), el nodo comun (source) es un **tierra virtual**. Cada mitad se analiza como un amplificador source comun:

$$A_d = \frac{v_{o1} - v_{o2}}{v_{id}} = -g_m \cdot R_D$$

Donde $g_m = \sqrt{2k_n I_{SS}} = \frac{2I_D}{V_{OV}}$ es la transconductancia de cada transistor con $I_D = I_{SS}/2$.

1.5.2 Resumen de ganancias de pequena senal

Parametro	Formula (carga pasiva R_D)	Unidad
g_m	$\sqrt{2k_n I_{SS}}$	A/V
A_d (diferencial)	$-g_m R_D$	V/V
A_{cm} (modo comun)	$-\frac{g_m R_D}{1+2g_m R_{SS}}$	V/V
A_{cm} (aprox.)	$\approx -\frac{R_D}{2R_{SS}}$ si $g_m R_{SS} \gg 1$	V/V

Parametro	Formula (carga pasiva R_D)	Unidad
CMRR	$1 + 2g_m R_{SS} \approx 2g_m R_{SS}$	-

1.6 5. Ganancia modo comun y CMRR

Cuando ambas entradas tienen la misma senal ($v_{id} = 0$, $v_{cm} \neq 0$), el nodo source NO es tierra virtual. La corriente por R_{SS} cambia y produce una salida no deseada.

$$A_{cm} = \frac{-g_m R_D}{1 + 2g_m R_{SS}} \approx \frac{-R_D}{2R_{SS}}$$

El **CMRR** (Common Mode Rejection Ratio) mide cuanto mejor amplificamos la senal diferencial frente al modo comun:

$$\text{CMRR} = \left| \frac{A_d}{A_{cm}} \right| = 1 + 2g_m R_{SS} \approx 2g_m R_{SS}$$

En dB: $\text{CMRR}_{dB} = 20 \log_{10}(\text{CMRR})$

1.7 6. Carga activa: espejo de corriente

Sustituir las resistencias R_D por un **espejo de corriente PMOS** (M3-M4) como carga activa mejora drasticamente la ganancia:

- El espejo fuerza $I_{D3} = I_{D4}$
- La salida es **single-ended** (un solo nodo)
- La ganancia diferencial pasa a depender de r_o :

$$A_d = g_m(r_{o2} \parallel r_{o4})$$

Donde r_{o2} y r_{o4} son las resistencias de salida de M2 y M4 respectivamente.

Esto da ganancias de **cientos a miles** de V/V en circuitos integrados.

1.7.1 Comparacion carga pasiva vs carga activa

Parametro	Carga pasiva (R_D)	Carga activa (espejo)
A_d	$g_m R_D$	$g_m(r_{o2} \parallel r_{o4})$
Salida	Diferencial	Single-ended
A_d tipico	10 - 50 V/V	200 - 2000 V/V
CMRR tipico	40 - 60 dB	80 - 120 dB
Consumo de area	Mayor (resistencias)	Menor (integrado)

1.8 7. CMRR en frecuencia

La fuente de corriente I_{SS} tiene una impedancia finita que disminuye con la frecuencia debido a capacidades parasitas. El CMRR no es constante:

$$\text{CMRR}(f) = \frac{A_d}{A_{cm}(f)} = 2g_m |Z_{SS}(f)|$$

Donde $Z_{SS}(f) = R_{SS} \parallel \frac{1}{j2\pi f C_{SS}}$ modela la capacidad parasita del nodo de cola.

A frecuencias altas, $|Z_{SS}|$ disminuye y el CMRR se degrada.

1.9 8. Ejercicios resueltos

A continuacion se presentan 4 ejercicios que cubren los conceptos fundamentales del par diferencial.

1.9.1 Ejercicio 1: Calculo basico de ganancias

Un par diferencial NMOS tiene $k_n = 1 \text{ mA/V}^2$, $I_{SS} = 0.2 \text{ mA}$, $R_D = 20 \text{ k}\Omega$, $R_{SS} = 100 \text{ k}\Omega$.

Calcular: g_m , A_d , A_{cm} , CMRR.

1.9.2 Ejercicio 2: Rango de entrada lineal MOS

Para el par diferencial del Ej. 1, determinar: - El rango de v_{id} para operacion lineal (ambos transistores en saturacion) - La tension diferencial de salida maxima

1.9.3 Ejercicio 3: Par diferencial con carga activa

Un par diferencial con espejo PMOS tiene $g_m = 1 \text{ mA/V}$, $r_{o,n} = 200 \text{ k}\Omega$, $r_{o,p} = 300 \text{ k}\Omega$.

Calcular la ganancia diferencial y compararla con carga pasiva $R_D = 10 \text{ k}\Omega$.

1.9.4 Ejercicio 4: CMRR con fuente de corriente real

Un par diferencial tiene $g_m = 2 \text{ mA/V}$, $R_D = 5 \text{ k}\Omega$. La fuente de corriente de cola tiene $R_{SS} = 500 \text{ k}\Omega$ y una capacidad parasita $C_{SS} = 1 \text{ pF}$.

Calcular CMRR a DC y a $f = 10 \text{ MHz}$.

1.10 9. Catalogo de problemas tipo

Referencia rapida de los 5 tipos de problemas mas comunes sobre el par diferencial.

#	Tipo de problema	Datos tipicos	Que calcular
1	Calculo basico de ganancias	k_n , I_{SS} , R_D , R_{SS}	g_m , A_d , A_{cm} , CMRR
2	Rango de entrada lineal	k_n , I_{SS}	$v_{id,max} = \sqrt{2I_{SS}/k_n}$
3	Carga activa (espejo)	g_m , $r_{o,n}$, $r_{o,p}$	$A_d = g_m(r_{o2} \parallel r_{o4})$

#	Tipo de problema	Datos típicos	Que calcular
4	CMRR en frecuencia	R_{SS}, C_{SS}, f	$Z_{SS}(f), \text{CMRR}(f)$
5	Diseño para especificación	CMRR min, A_d min	Elegir R_{SS}, k_n, I_{SS}

1.10.1 Pasos clave por tipo

Tipo 1 - Ganancias: Calcular $g_m = \sqrt{2k_n I_{SS}}$, luego $A_d = g_m R_D$, $A_{cm} = g_m R_D / (1 + 2g_m R_{SS})$, $\text{CMRR} = A_d / A_{cm}$.

Tipo 2 - Rango lineal: $v_{id,max} = V_{OV}\sqrt{2}$ con $V_{OV} = \sqrt{I_{SS}/k_n}$. Para BJT, rango $\approx \pm 4V_T \approx \pm 104$ mV.

Tipo 3 - Carga activa: Identificar r_o de cada transistor. $A_d = g_m(r_{o,NMOS} \| r_{o,PMOS})$. La salida es single-ended.

Tipo 4 - CMRR(f): Calcular polo $f_p = 1/(2\pi R_{SS} C_{SS})$. Para $f \gg f_p$: $|Z_{SS}| \approx 1/(2\pi f C_{SS})$ y CMRR cae.

Tipo 5 - Diseño: De la especificación $\text{CMRR} \geq X$, obtener $R_{SS} \geq \text{CMRR}/(2g_m)$. Iterar con A_d requerida.

1.11 10. Resumen final

1.11.1 Formulas fundamentales del par diferencial

1.11.2 Puntos clave para recordar

1. El par diferencial amplifica v_{id} y rechaza v_{cm} gracias a la simetría del circuito.
2. La fuente de corriente de cola I_{SS} es crítica: su impedancia determina el CMRR.
3. Con carga pasiva (R_D): ganancia moderada, salida diferencial.
4. Con carga activa (espejo): ganancia alta, salida single-ended, base del op-amp.
5. El rango lineal MOS es mayor que el BJT, pero el BJT tiene mayor g_m para la misma corriente.
6. A frecuencias altas, el CMRR se degrada por capacidades parasitas en el nodo de cola.