

## 功率电感耦合及在开关电源上的应用

陈 为 博士

chw@fzu.edu.cn

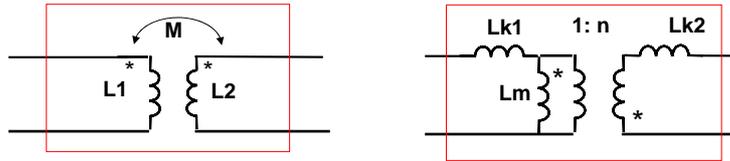
福州大学电气工程与自动化学院 教授，博导  
中国电源学会理事，变压器与电感器专委会 主任委员

第十届电源网技术交流大会  
上海 2009年7月11日

## 主要内容

- 耦合电感的基本模型
- 耦合电感的结构和参数
- 耦合电感的参数测量
- 正激多路输出变换器的耦合电感
- 倍流整流电路的耦合电感
- Cuk电路的耦合电感
- VRM电路的耦合电感

## 电感耦合的电气模型



互感模型



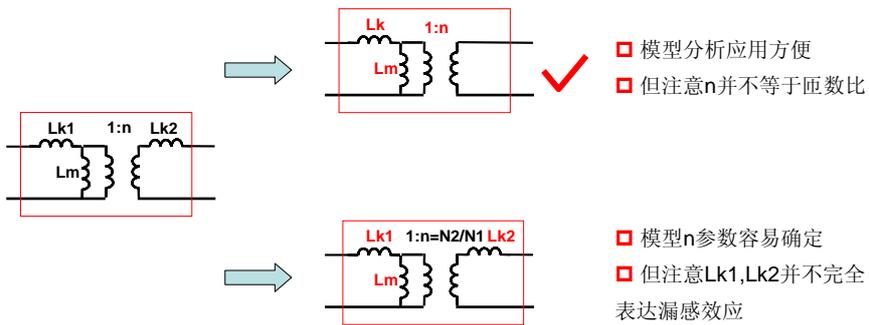
变压器T模型

$$L_1 = L_{k1} + L_m$$

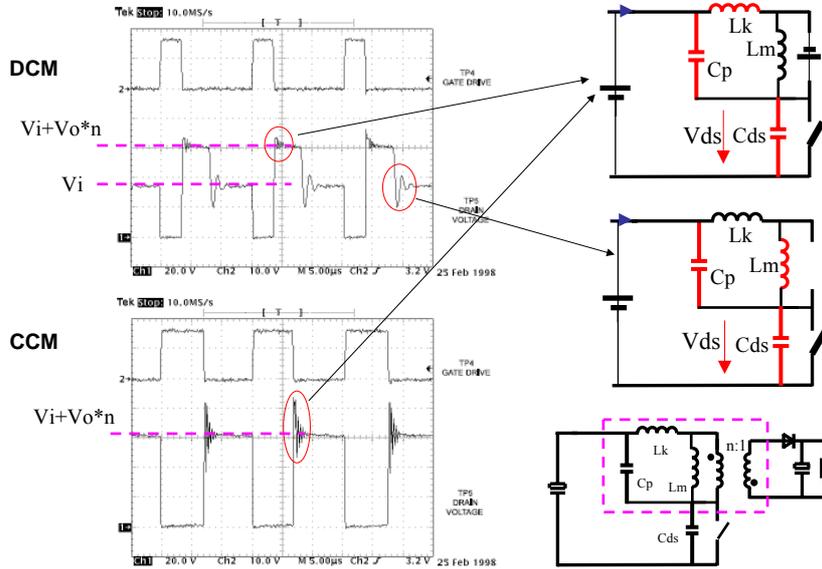
$$L_2 = L_{k2} + L_m \cdot n^2$$

$$M = L_m \cdot n$$

## 变压器T模型的变形



## 变压器T模型的应用

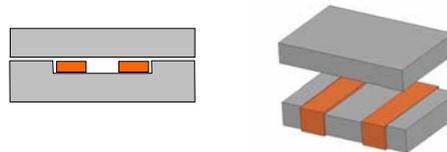


## 耦合电感的基本结构

E形结构



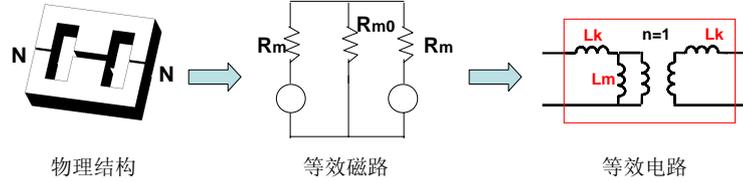
平面结构



环型结构



## 耦合电感的参数计算



副边短路:

$$\frac{L_m \cdot L_k}{L_m + L_k} + L_k = \frac{N^2}{R_{m0} + R_m}$$

副边开路:

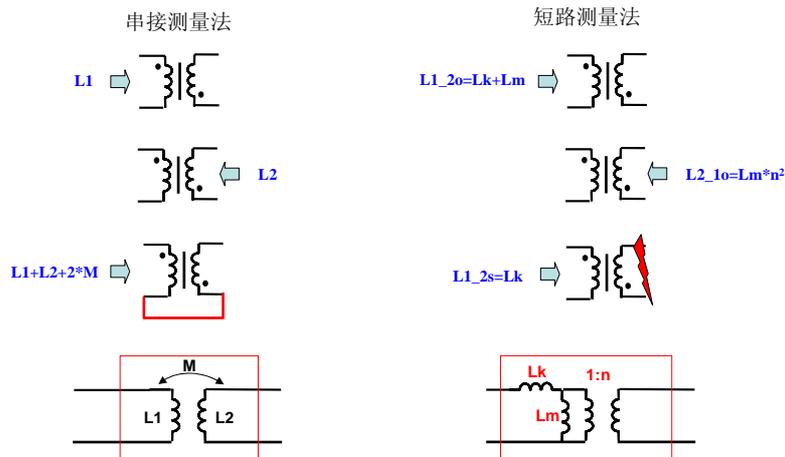
$$L_m + L_k = N^2 \left( \frac{R_{m0} \cdot R_m}{R_{m0} + R_m} + R_m \right)$$

$$L_m = \frac{N^2 R_{m0}}{R_m} \cdot \left( \frac{1}{2R_{m0} + R_m} \right)$$

$$L_k = \frac{N^2}{2 \cdot R_{m0} + R_m}$$

$$k = \frac{L_m}{L_m + L_k} = \frac{R_{m0}}{R_{m0} + R_m}$$

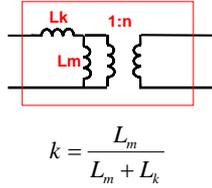
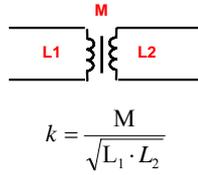
## 耦合电感的参数测量



□ 适用于耦合相对差的耦合电感或低频

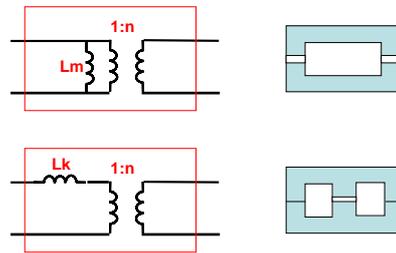
□ 适用于耦合较好的耦合电感及频率高

## 电感的耦合系数

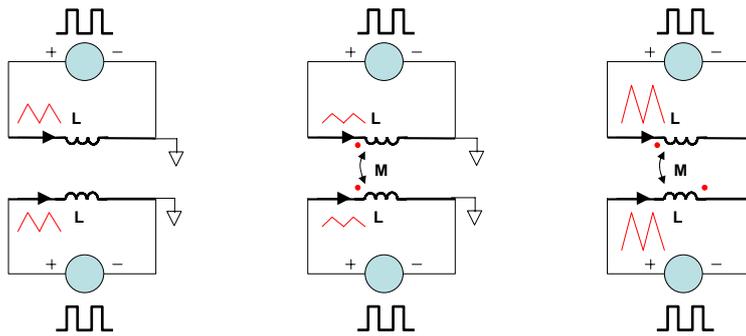


耦合系数  $K \rightarrow 1$

- $L_k \rightarrow 0$
- $L_m \rightarrow \text{无穷大}$



## 电感耦合后的效应



当两绕组励磁电压同相位时



正耦合：绕组电流纹波减低  
反耦合：绕组电流纹波增大

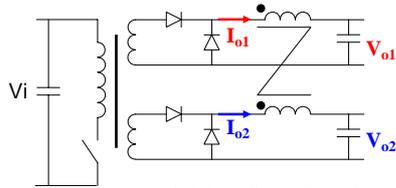
当两绕组励磁电压差180°时



正耦合：绕组电流纹波增大  
反耦合：绕组电流纹波减小

## 多路输出正激电路的耦合电感

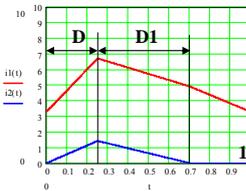
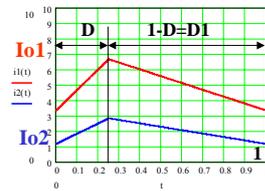
在开关电源中，常常用到耦合电感。如正激多路输出功率变换器，就需要将每路的输出电感正耦合起来，以保证多路输出的负载调整率。



正激多路输出变换器正耦合电感

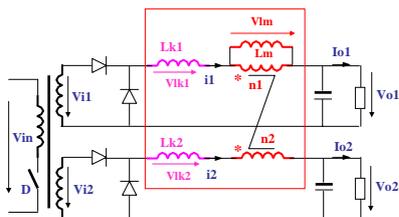
影响交叉调整率的因素：

- 1、输出回路电阻（包括电感绕组电阻）；
- 2、二极管的压降；
- 3、变压器副边各绕组的耦合；
- 4、各路的电流工作模式，CCM或DCB。



耦合后将使得各路电流的纹波降低，从而降低了进入DCM的负载电流

## 多路输出正激电路耦合电感分析



During D

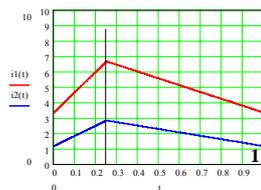
$$\begin{aligned} V_{lk1} + V_{lm} &= V_{i1} - V_{o1} \\ V_{lk2} + V_{lm} \cdot n &= V_{i2} - V_{o2} \\ \frac{V_{lm}}{L_m} &= \frac{V_{lk1}}{L_{k1}} + \frac{V_{lk2}}{L_{k2}} \cdot n \end{aligned}$$

During D<sub>1</sub>

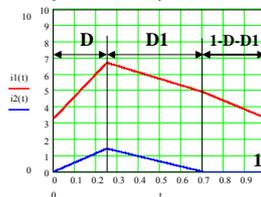
$$\begin{aligned} V_{lk1} + V_{lm} &= 0 - V_{o1} \\ V_{lk2} + V_{lm} \cdot n &= 0 - V_{o2} \\ \frac{V_{lm}}{L_m} &= \frac{V_{lk1}}{L_{k1}} + \frac{V_{lk2}}{L_{k2}} \cdot n \end{aligned}$$

During 1-D-D<sub>1</sub>

$$\begin{aligned} V_{lk1} + V_{lm} &= 0 - V_{o1} \\ \frac{V_{lm}}{L_m} &= \frac{V_{lk1}}{L_{k1}} \end{aligned}$$



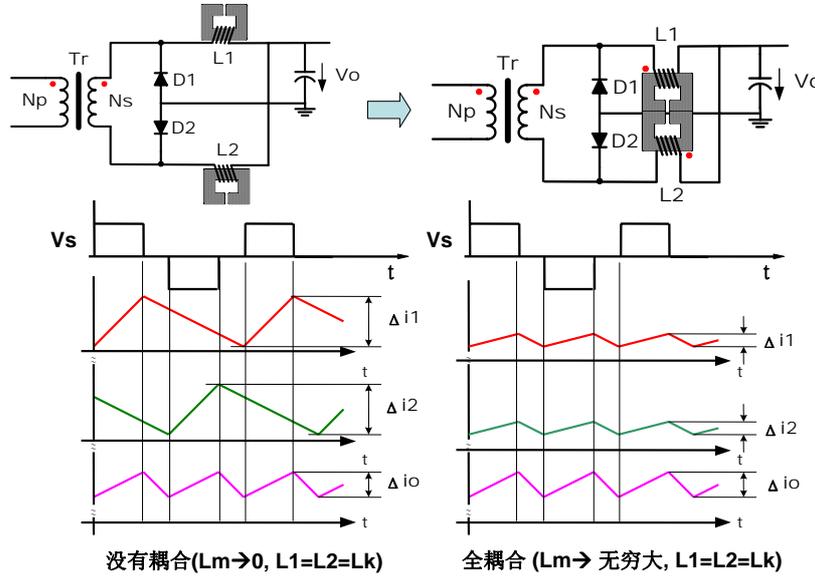
Vi1=24, Vi2=12, fs=100KHz  
Io1=5, Io2=2  
Vo1=6  
n=n2/n1=0.5  
Lk1=1uH, Lk2=1uH, Lm=10uH  
D=0.25, Vo2=3



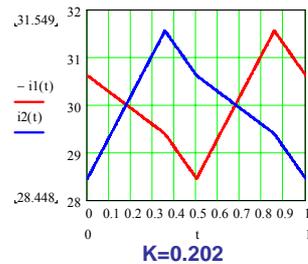
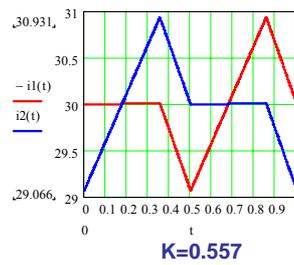
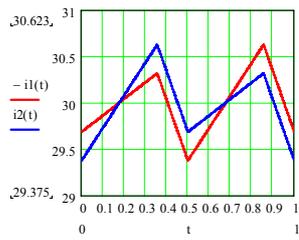
Vi1=24, Vi2=12, fs=100KHz  
Io1=5, Io2=0.5  
Vo1=6  
n=n2/n1=0.5  
Lk1=1uH, Lk2=1uH, Lm=10uH  
D=0.25, D1=0.45, Vo2=3.117

在总纹波电流一定的情况下，漏感Lk1和Lk2的大小决定了各路电流纹波的分配，因此对交叉调整率有关键影响。

## 倍流整流电路的耦合电感

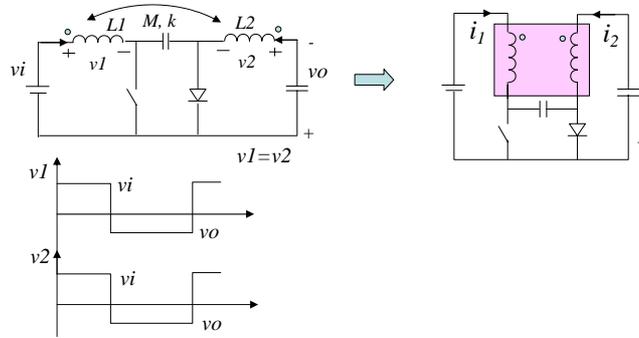


## 耦合系数k对电流纹波的影响



- 电流纹波与耦合系数有很大关系。
- 耦合系数越大，纹波越小。
- 但耦合系数越高，承受直流偏磁的能力越差。

## Cuk电路中的耦合电感

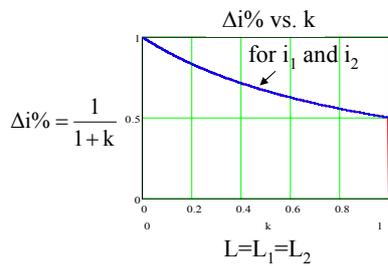


$$\begin{cases} v_1 = L_1 \cdot \frac{di_1}{dt} + M \cdot \frac{di_2}{dt} \\ v_2 = L_2 \cdot \frac{di_2}{dt} + M \cdot \frac{di_1}{dt} \\ v_2 = v_1 = v_L \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} \frac{di_1}{dt} = \frac{v_L}{L_{1eq}} \\ \frac{di_2}{dt} = \frac{v_L}{L_{2eq}} \end{cases} \quad \begin{cases} L_{1eq} = L_1 \cdot (1+k) \cdot \frac{1-k}{1-k \cdot \sqrt{L_1/L_2}} \\ L_{2eq} = L_2 \cdot (1+k) \cdot \frac{1-k}{1-k \cdot \sqrt{L_2/L_1}} \end{cases}$$

## Cuk电路耦合电感的电流纹波

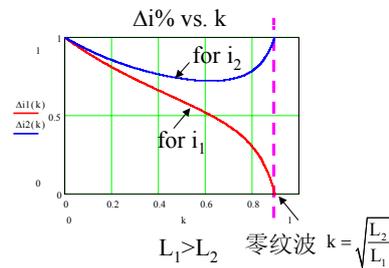
$$L_{1eq} = L_1 \cdot (1+k) \cdot \frac{1-k}{1-k \cdot \sqrt{L_1/L_2}}$$

$$L_{2eq} = L_2 \cdot (1+k) \cdot \frac{1-k}{1-k \cdot \sqrt{L_2/L_1}}$$



$$L_{1eq} = L_{2eq} = L \cdot (1+k)$$

输出和输入的电流纹波都减小



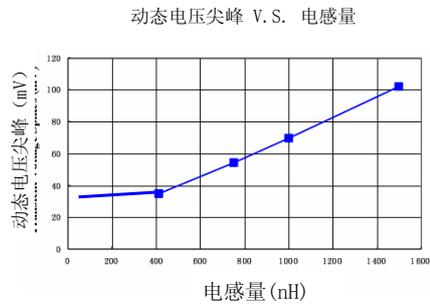
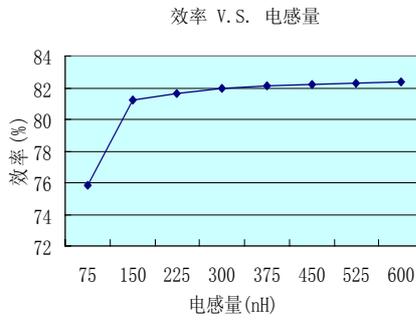
$$L_{1eq} \rightarrow \infty \quad 1-k\sqrt{L_1/L_2} = 0$$

输入的电流达到零电流纹波

$$L_{2eq} \rightarrow \infty \quad 1-k\sqrt{L_2/L_1} = 0$$

输出的电流达到零电流纹波

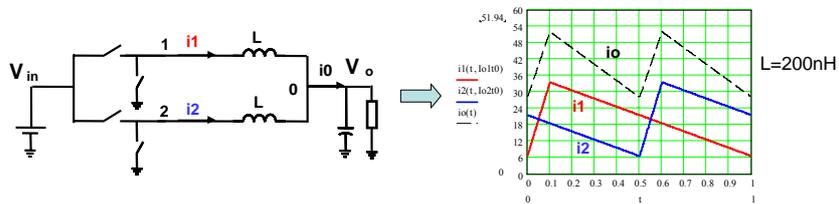
## 电感参数对VRM性能的影响



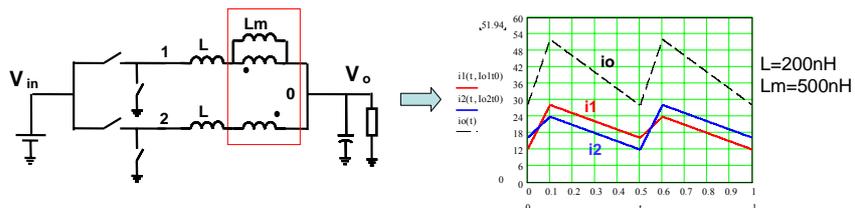
- ❑ 电感大 → 电流纹波小，效率高，但动态特性差；
- ❑ 电感小 → 电流纹波大，效率低，但动态特性好；
- ❑ 电感的参数选择和设计对VRM的动态和稳态性能都具有很关键的影响。

## VRM电路的耦合电感

- ❖ 独立电感
  - ❑ 电感大 → 电流纹波小，效率高，但动态特性差；
  - ❑ 电感小 → 电流纹波大，效率低，但动态特性好；
  - ❑ 电感的参数选择和设计对VRM的动态和稳态性能都具有很关键的影响。

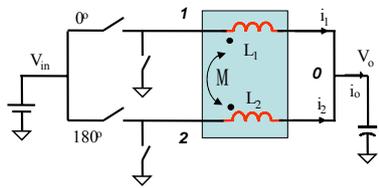


### ❖ 耦合电感



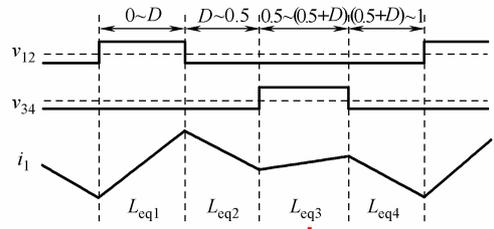


### VRM耦合电感的等效稳态与动态电感



$$V_{12} = L_1 \cdot \frac{di_1}{dt} + M \cdot \frac{di_2}{dt}$$

$$V_{34} = M \cdot \frac{di_1}{dt} + L_2 \cdot \frac{di_2}{dt}$$



$$L_{eq1} = \frac{L^2 - M^2}{L + \frac{D}{1-D}M}$$

$$L_{eq2} = L + M$$

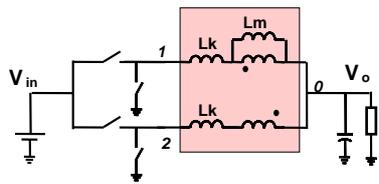
$$L_{eq3} = \frac{L^2 - M^2}{L + \frac{1-D}{D}M}$$

$$L_{eq4} = L_{eq2} = L + M$$

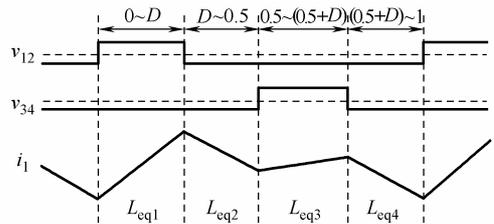
- Leq1 与电流纹波有关，定义为等效稳态电感
- Leq2 与动态响应有关，定义为等效动态电感
- 只有当M<0(反耦合时)，Leq1增加，而Leq2降低



### VRM耦合电感的等效稳态与动态电感



$$\begin{cases} L_{k1} \cdot \frac{di_1}{dt} + L_m \cdot \frac{d(i_1 - i_2)}{dt} = v_{12} \\ L_{k2} \cdot \frac{di_2}{dt} - L_m \cdot \frac{d(i_1 - i_2)}{dt} = v_{34} \end{cases}$$



$$L_{eq1} = \frac{L_k(L_k + 2L_m)}{L_k + L_m - \frac{D}{1-D}L_m}$$

$$L_{eq2} = L_k$$

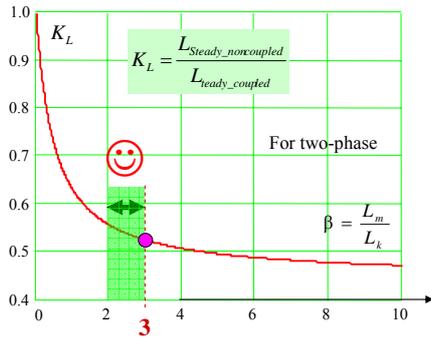
$$L_{eq3} = \frac{L_k(L_k + 2L_m)}{L_k + L_m - \frac{1-D}{D}L_m}$$

$$L_{eq4} = L_{eq2} = L_k$$

- 漏感决定了等效动态电感

## 等效稳态和动态电感比较

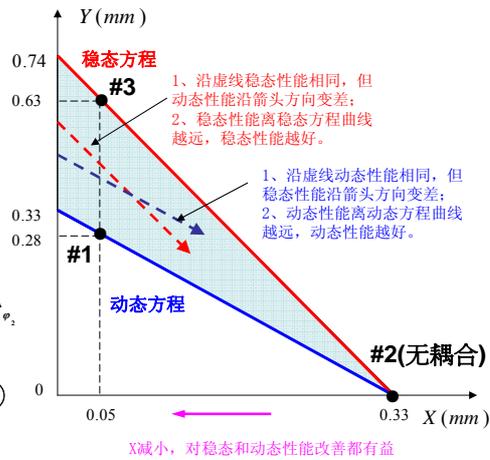
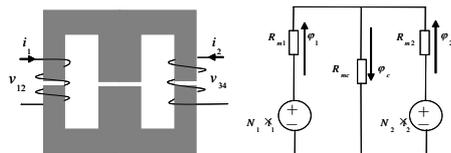
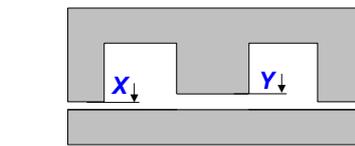
	互感模型	变压器T模型
稳态等效电感 $L_{steady}$	$L_{steady} = \frac{L^2 - M^2}{L - M \cdot \frac{D}{1-D}}$	$L_{steady} = \frac{L_k(L_k + 2L_m)}{L_k + L_m - \frac{D}{1-D}L_m}$
动态等效电感 $L_{transient}$	$L_{transient} = L - M$	$L_{transient} = L_k$



$L1=L2=L, \quad \beta = Lm/Lk$   
 $Lk1=Lk2=Lk$

- 保持漏感Lk不变，则耦合前后的动态电感不变，动态特性不变；
- 增加Lm，将增大稳态等效电感，从而提高效率；
- 电感耦合技术将有助于协调稳态和动态性能。

## VRM耦合电感的设计指导



谢谢！