

电源设计研讨会

跨电感稳压器 (TLVR) 简介

作者

Matthew Schurmann 和 Mohamed Ahmed

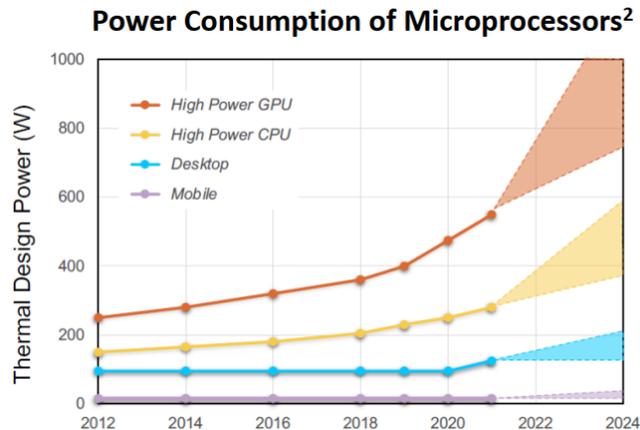
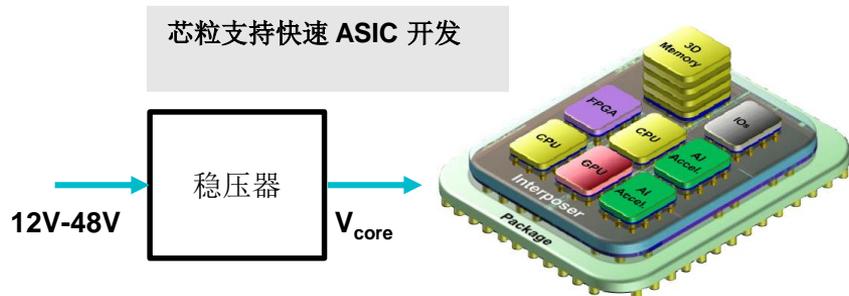


议程/概述

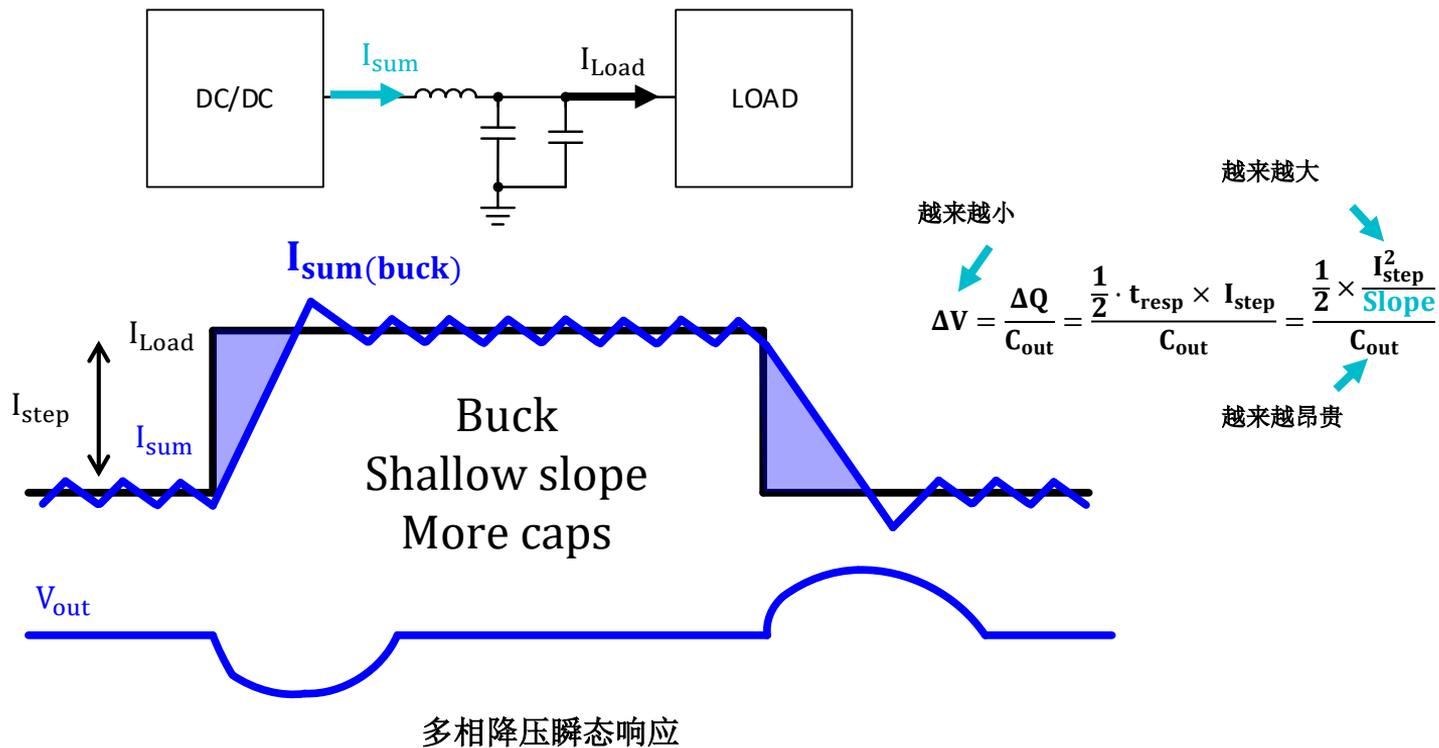
- 背景和动机
- 跨电感稳压器 (TLVR) 拓扑简介
- 实用注意事项
- 结语

稳压器设计难题

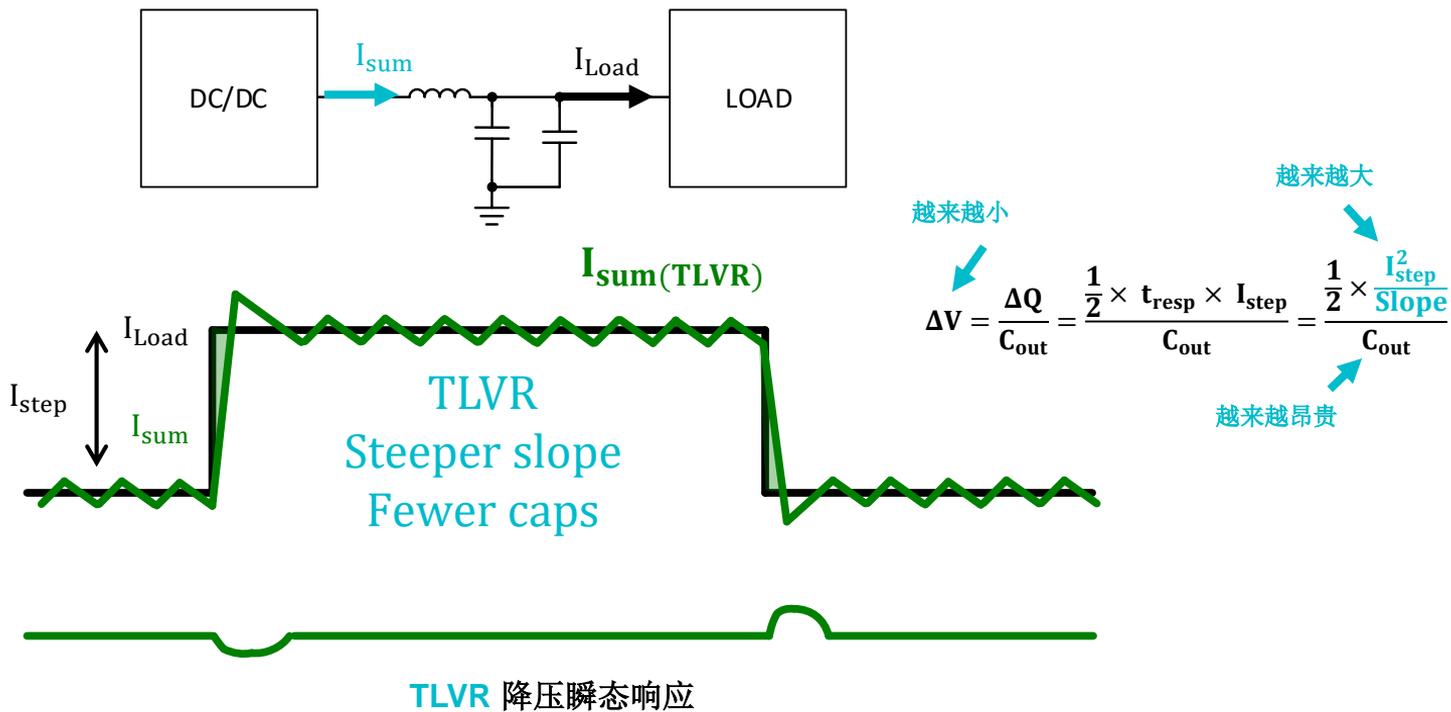
- 芯片技术持续缩小（但速度正在放缓）
3nm 数字器件 → 更低
- 专用集成电路 (ASIC) 工作电压 保持在 0.7V 至 1.0V（最高 1.8V）
- 高内核数设计和芯粒革命推动工作电流 大于 **1,000A** 的设计快速增加
- 极端负载瞬态要求 $1,000A/\mu s$ ， $\pm 3\%$



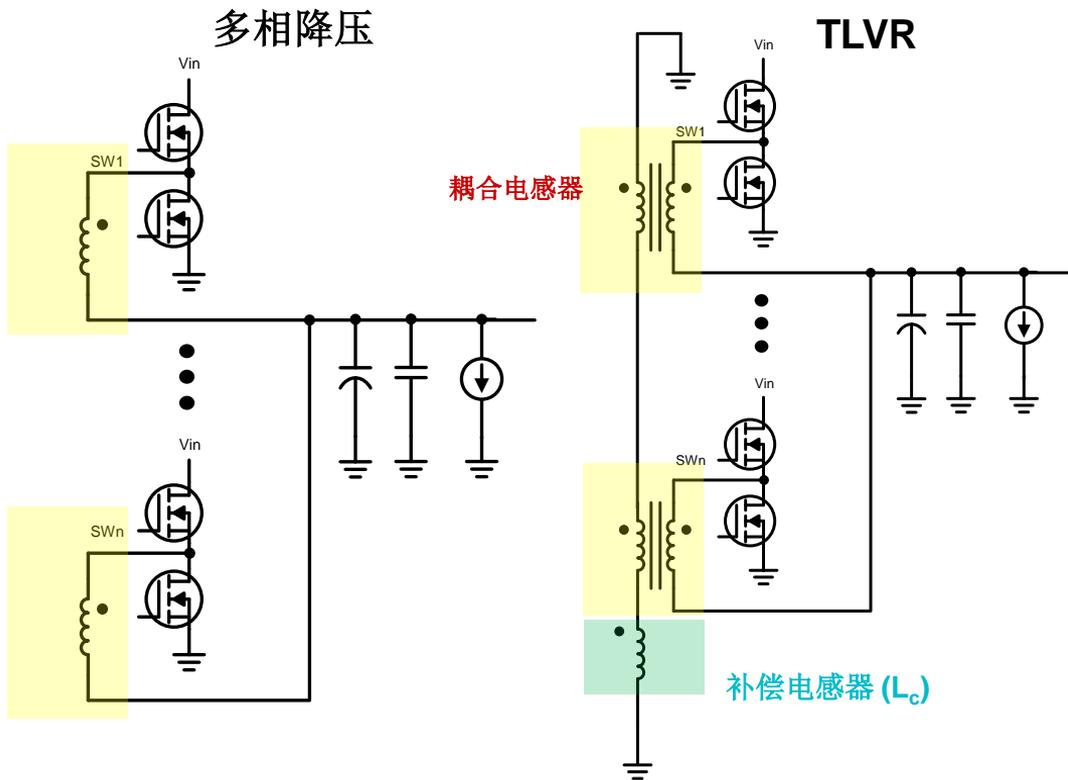
TLVR 的驱动因素：改善瞬态响应



TLVR 的驱动因素：改善瞬态响应



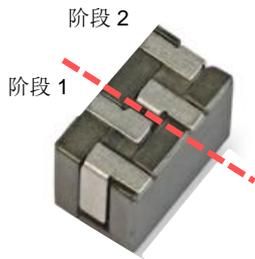
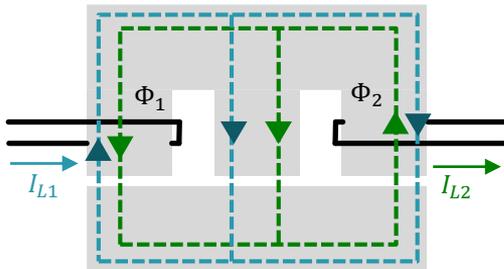
降压转换器与 TLVR 拓扑



- 经优化可实现快速瞬态响应的降压衍生拓扑
- TLVR 是耦合电感器降压转换器的新变化
- 当它有意义时：
 - 高相位数（多于六个相位）
 - 高 di/dt 负载瞬态
 - 中等电压纹波

传统耦合电感器

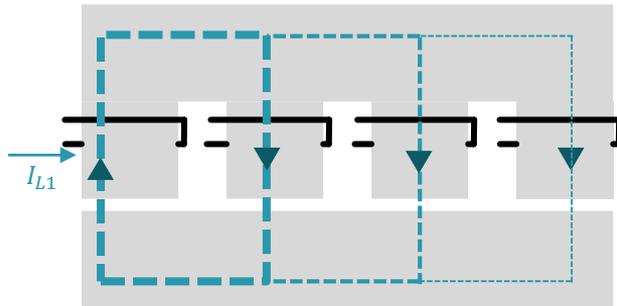
传统耦合电感器（两相）



两相耦合电感器

来源: Eaton

难以扩展至更高相位



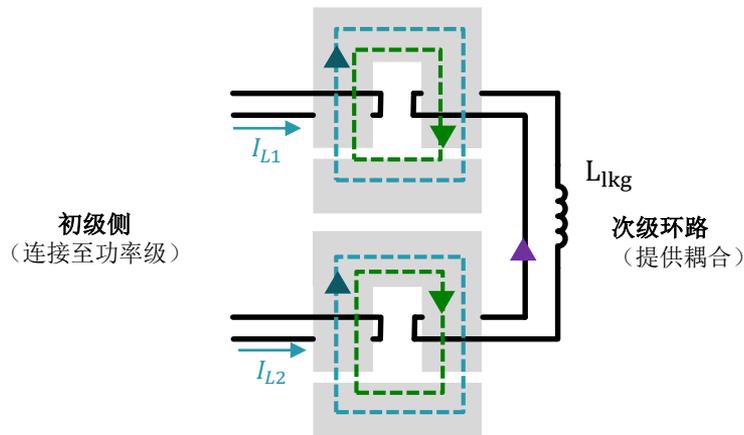
- 多个绕组共用一个磁芯
- 典型的耦合系数: ≈ 0.5 至 0.7
- 功率密度更高
- 相数/布局的定制设计

- **挑战:** 在各个相位之间实现相等的耦合需要具有对称性
- **挑战:** 在更高的相位数下保持对称性需要复杂的几何形状

耦合允许高稳态电感（低纹波）和低瞬态电感（快速瞬态）

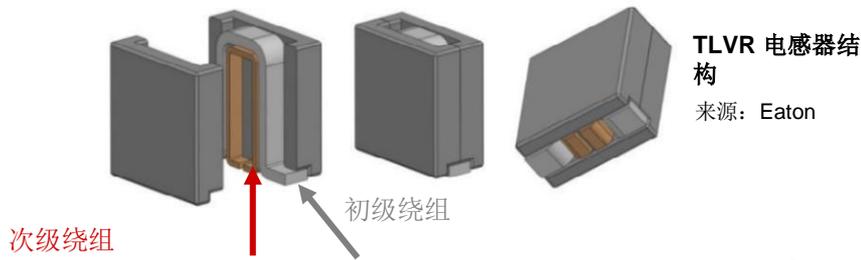
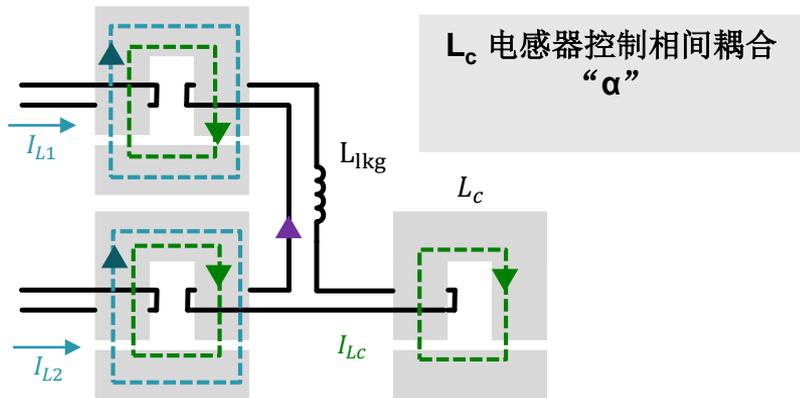
间接耦合电感器

间接耦合电感器（两相）



- 各相对称耦合，无需共用一个磁芯
- 简单的磁芯几何形状，可扩展解决方案
- 控制耦合具有挑战性

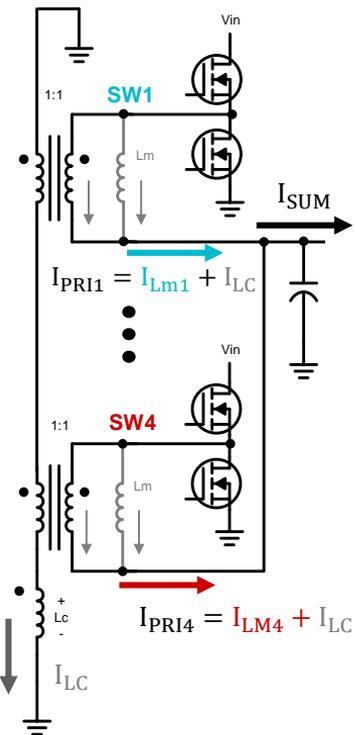
TLVR：间接耦合和补偿电感器 (L_c)



TLVR 拓扑概述

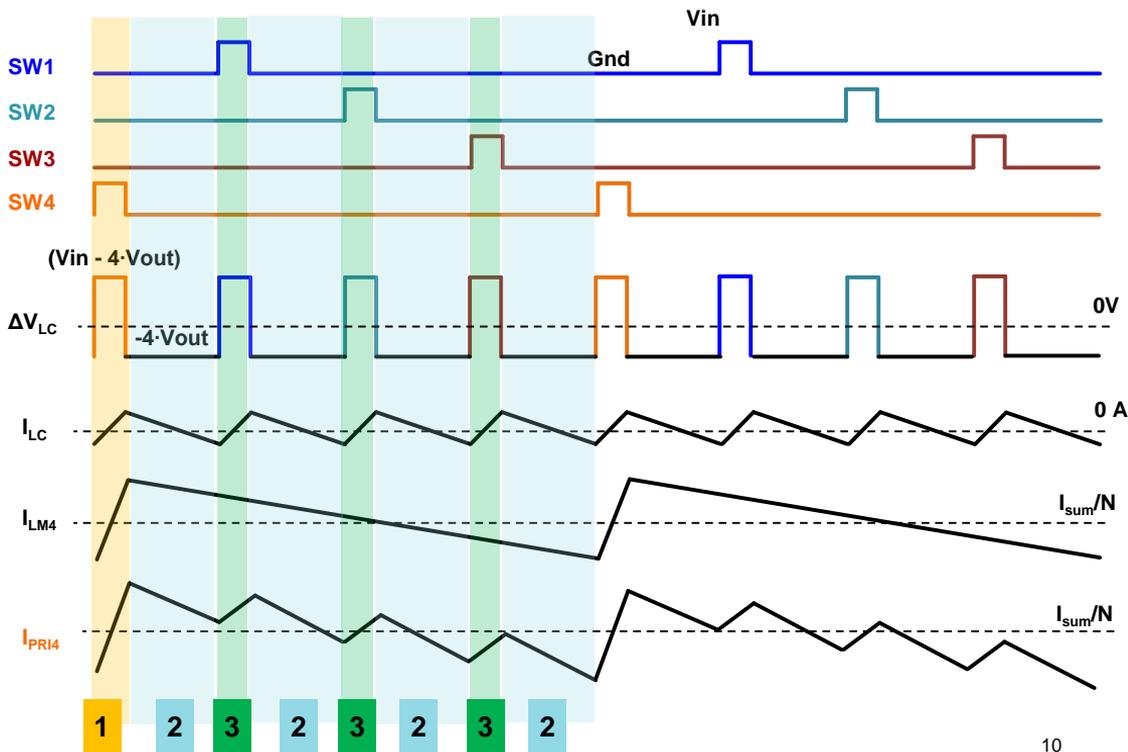
TLVR 工作原理：稳态

TLVR 稳态运行（四相示例，无重叠）

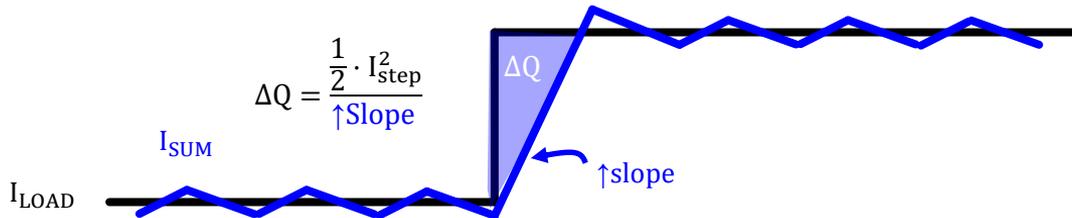
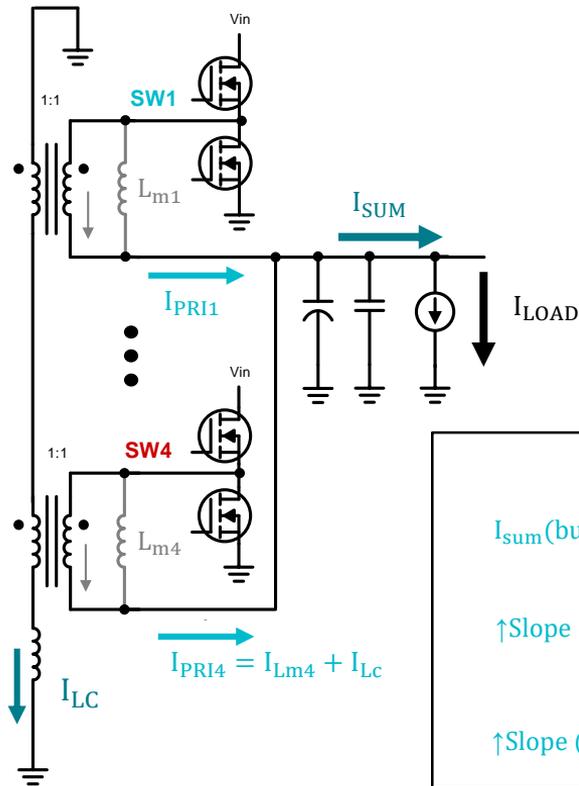


相电流说明 (I_{PRI4})

1. 该相位 (SW4) 导通；
所有其他相位都关断
 I_{LM4} 增大 I_{LC} 增大
2. 所有相位都关断
 I_{LM4} 减小 I_{LC} 减小
3. 该相位 (SW4) 关断，
但其他相位导通
 I_{LM} 减小 I_{LC} 增大



TLVR 工作原理：瞬态升压



控制器导通多个相位以进行响应。

N_{ON} 相位导通, N_{OFF} 相位关断

多相降压

$$I_{sum(buck)} = I_{L1} + I_{L2} + \dots$$

$$\uparrow Slope(buck) = \frac{\Delta V_{L1}}{L} + \frac{\Delta V_{L2}}{L} + \dots$$

$$\uparrow Slope(buck) \approx N_{on} \left(\frac{V_{in} - V_{out}}{L} \right) - N_{off} \left(\frac{V_{out}}{L} \right)$$

TLVR

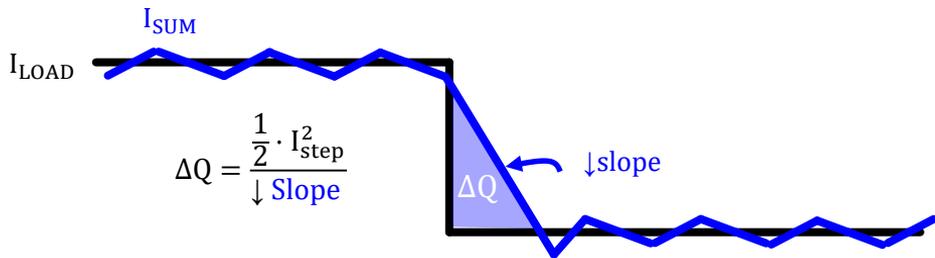
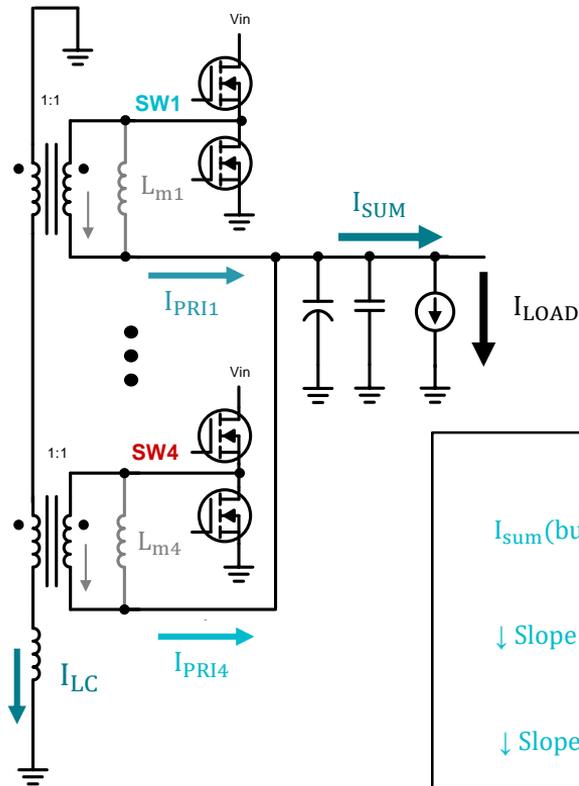
$$I_{sum(TLVR)} = I_{pri1} + I_{pri2} + \dots$$

$$I_{sum(TLVR)} = (I_{Lm1} + I_{Lc}) + (I_{Lm2} + I_{Lc}) + \dots$$

$$\uparrow Slope(TLVR) = \left(\frac{\Delta V_{L1}}{L_m} + \frac{\Delta V_{Lc}}{L_c} \right) + \left(\frac{\Delta V_{L2}}{L_m} + \frac{\Delta V_{Lc}}{L_c} \right) + \dots$$

$$\uparrow Slope(TLVR) \approx \uparrow Slope(buck) + N_{total} \left[\frac{N_{on} \cdot V_{in} - N_{total} \times V_{out}}{L_c} \right]$$

TLVR 工作原理：瞬态降压



$$\Delta Q = \frac{1}{2} \cdot \frac{I_{\text{step}}^2}{\downarrow \text{Slope}}$$

控制器关断所有相位以进行响应

N_{TOTAL} 相位关断

多相降压

$$I_{\text{sum(buck)}} = I_{L1} + I_{L2} + \dots$$

$$\downarrow \text{Slope (buck)} = \frac{\Delta V_{L1}}{L} + \frac{\Delta V_{L2}}{L} + \dots$$

$$\downarrow \text{Slope(buck)} \approx -N_{\text{total}} \left(\frac{V_{\text{out}}}{L} \right)$$

TLVR

$$I_{\text{sum(TLVR)}} = I_{\text{pri1}} + I_{\text{pri2}} + \dots$$

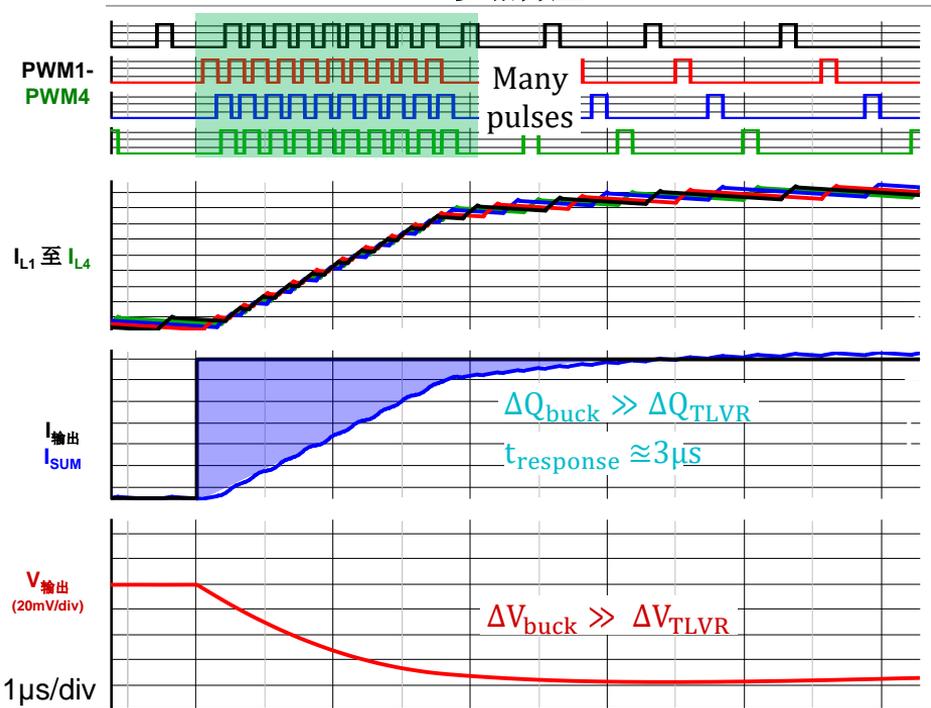
$$I_{\text{sum(TLVR)}} = (I_{Lm1} + I_{Lc}) + (I_{Lm2} + I_{Lc}) + \dots$$

$$\downarrow \text{Slope (TLVR)} = \left(\frac{\Delta V_{L1}}{L_m} + \frac{\Delta V_{Lc}}{L_c} \right) + \left(\frac{\Delta V_{L2}}{L_m} + \frac{\Delta V_{Lc}}{L_c} \right) + \dots$$

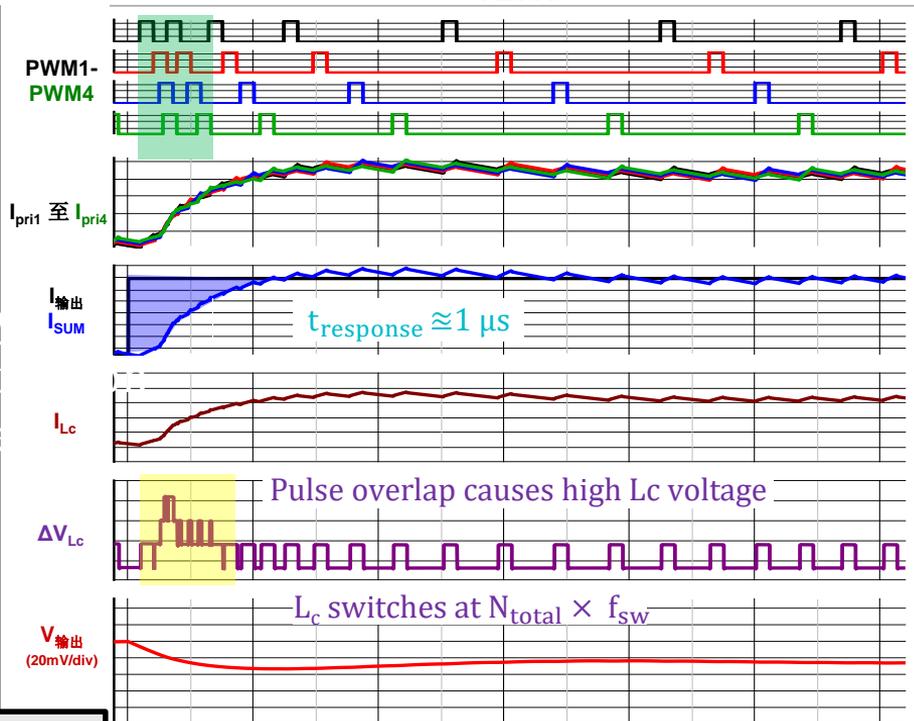
$$\downarrow \text{Slope (TLVR)} \approx \downarrow \text{Slope(buck)} - N_{\text{total}} \left[\frac{N_{\text{total}} \times V_{\text{OUT}}}{L_c} \right]$$

并排比较：负载升压

多相降压



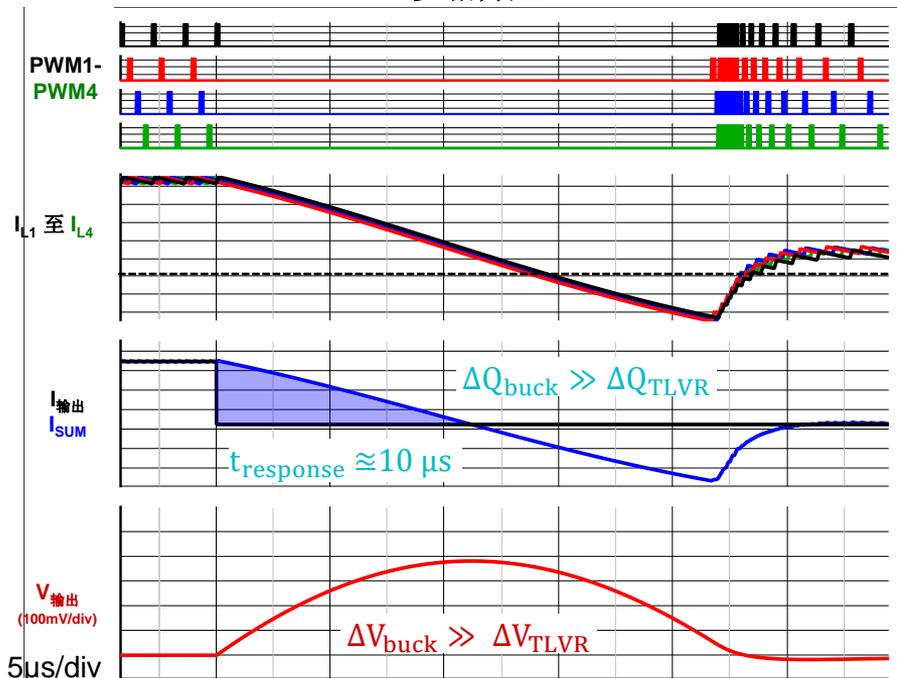
TLVR



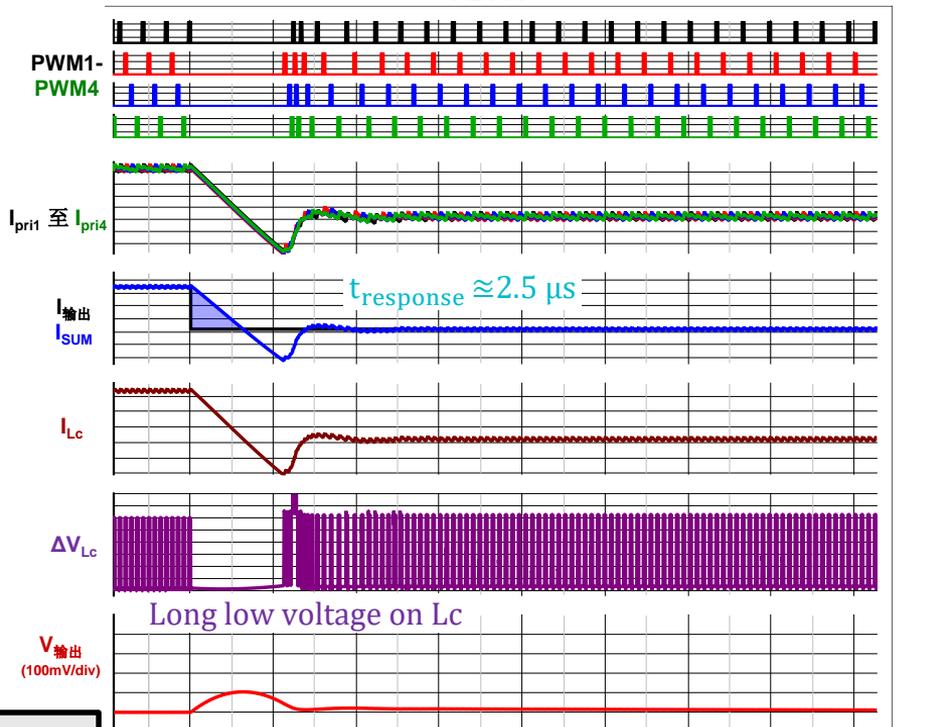
- $V_{IN} = 12V$
- $V_{OUT} = 0.8V$
- $F_{sw} = 600kHz$, 四相
- $I_{OUT} = 25A-325A$, 瞬时
- 降压: $L_{buck} = 150nH$
- TLVR: $L_m = 150nH$, $L_c = 180nH$
- $C_{OUT} = 5mF$

并排比较：负载降压

多相降压



TLVR



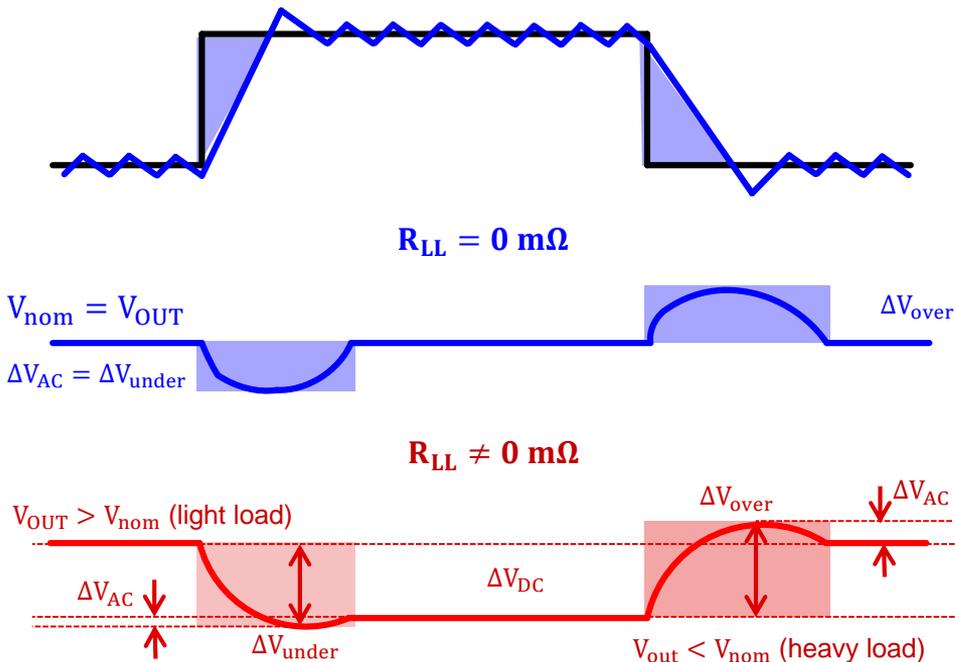
- $V_{\text{IN}} = 12\text{V}$
- $V_{\text{OUT}} = 0.8\text{V}$
- $F_{\text{sw}} = 600\text{kHz}$, 四相
- $I_{\text{OUT}} = 25\text{A}-325\text{A}$, 瞬时
- 降压: $L_{\text{buck}} = 150\text{nH}$
- TLVR: $L_{\text{m}} = 150\text{nH}$, $L_{\text{c}} = 180\text{nH}$
- $C_{\text{OUT}} = 5\text{mF}$

5 $\mu\text{s}/\text{div}$

14

直流负载线进一步减小输出电容

降压和 TLVR 设计具有相同的直流负载线 (DCLL) 行为



$$R_{DCLL} = \frac{\Delta V_{DC}}{\Delta I_{step}}$$

节省电容器

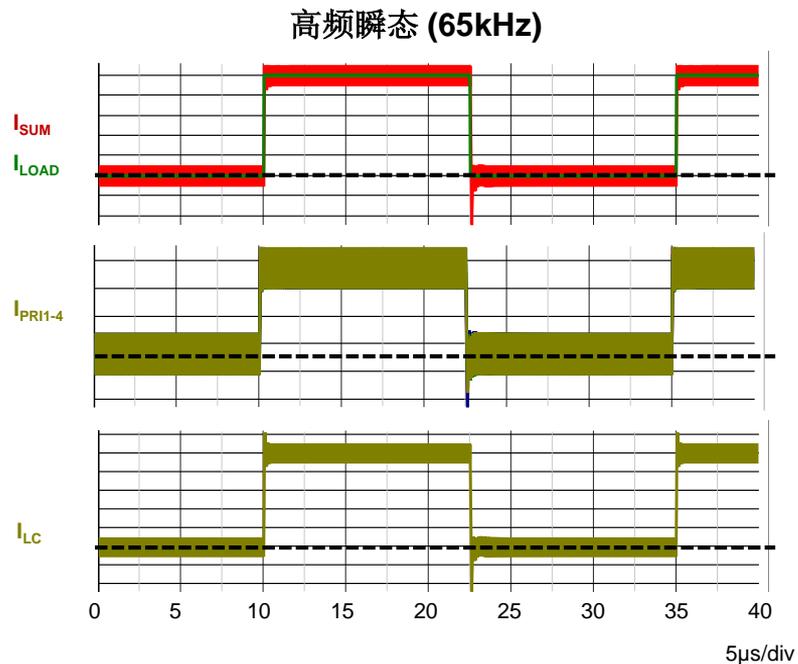
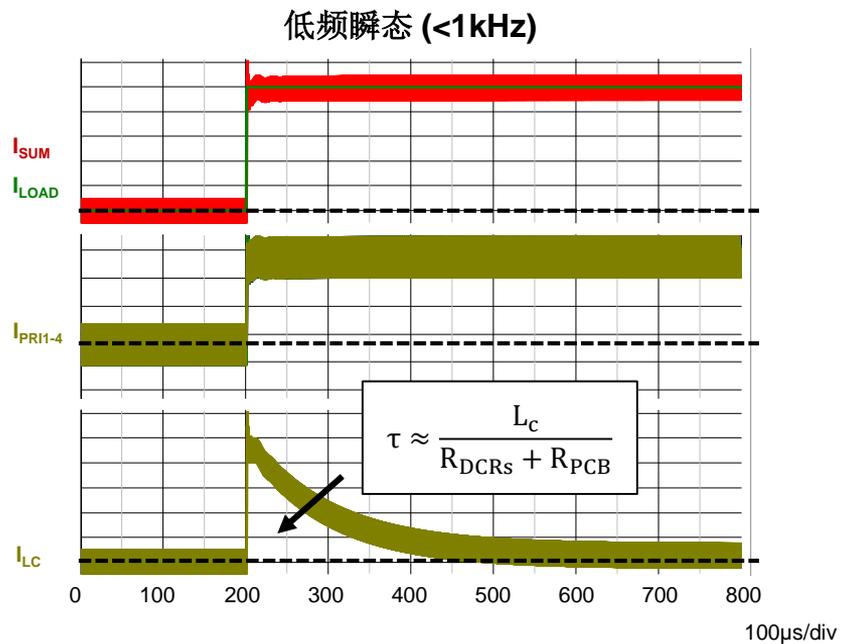
$$C_{out(\min, \text{step up})} = \frac{\Delta Q_{under}}{\Delta V_{under}} = \frac{\Delta Q_{under}}{\Delta V_{ac} + R_{LL} \times I_{step}}$$

$$C_{out(\min, \text{step down})} = \frac{\Delta Q_{over}}{\Delta V_{over}} = \frac{\Delta Q_{over}}{\Delta V_{ac} + R_{LL} \times I_{step}}$$

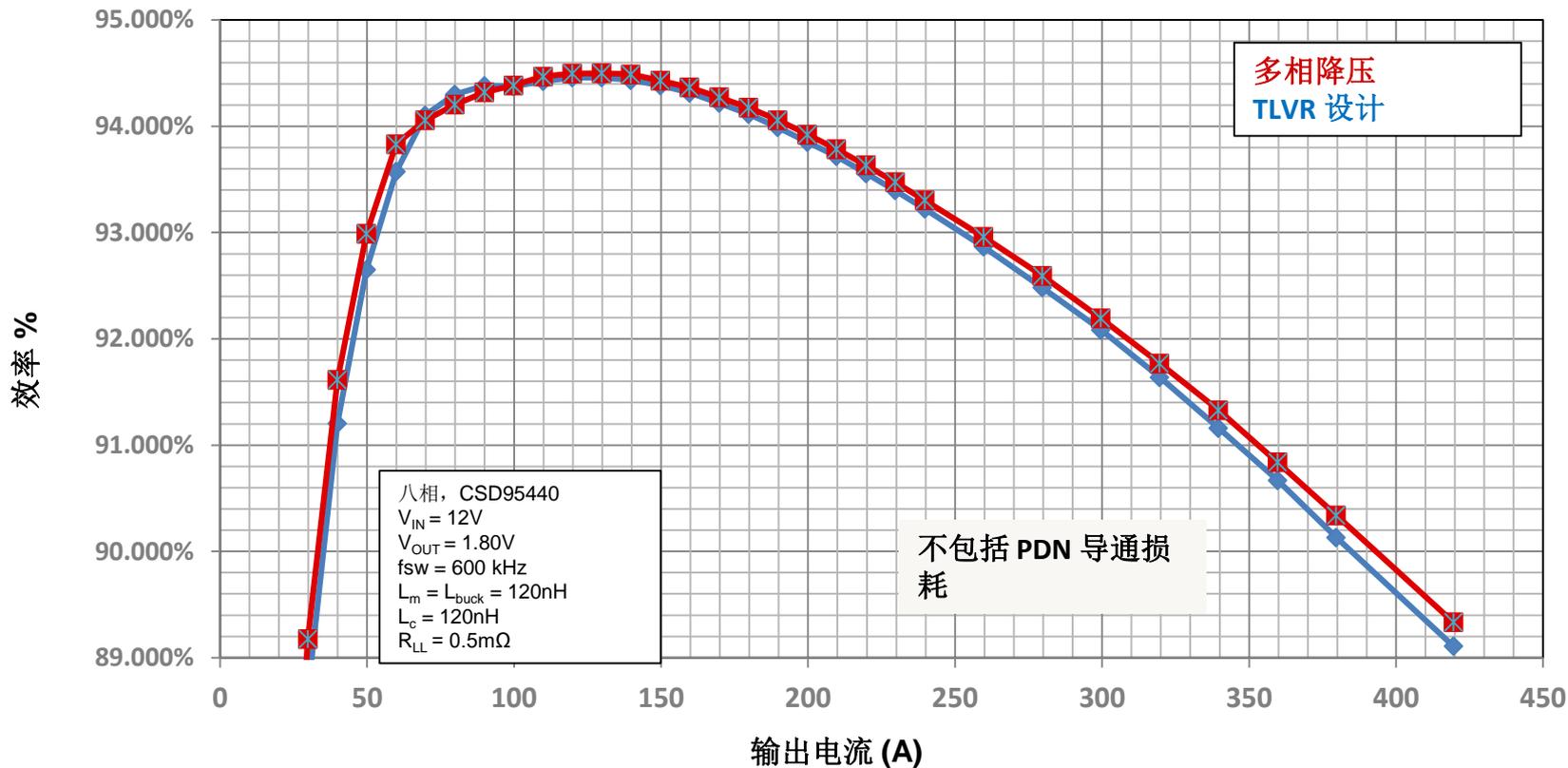
降低输出功率

$$P_{out} = I_{out} \times (V_{out} - R_{LL} \times I_{out})$$

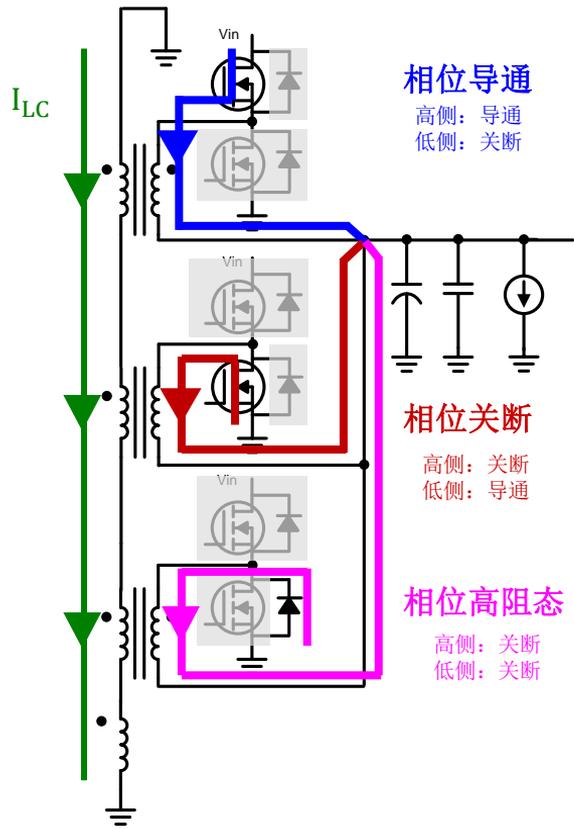
作为交流电感器的 L_c - 瞬态期间的 I_{LC}



VR 与 TLVR 效率比较 ($L_{BUCK} = L_M = L_C$)



动态切相

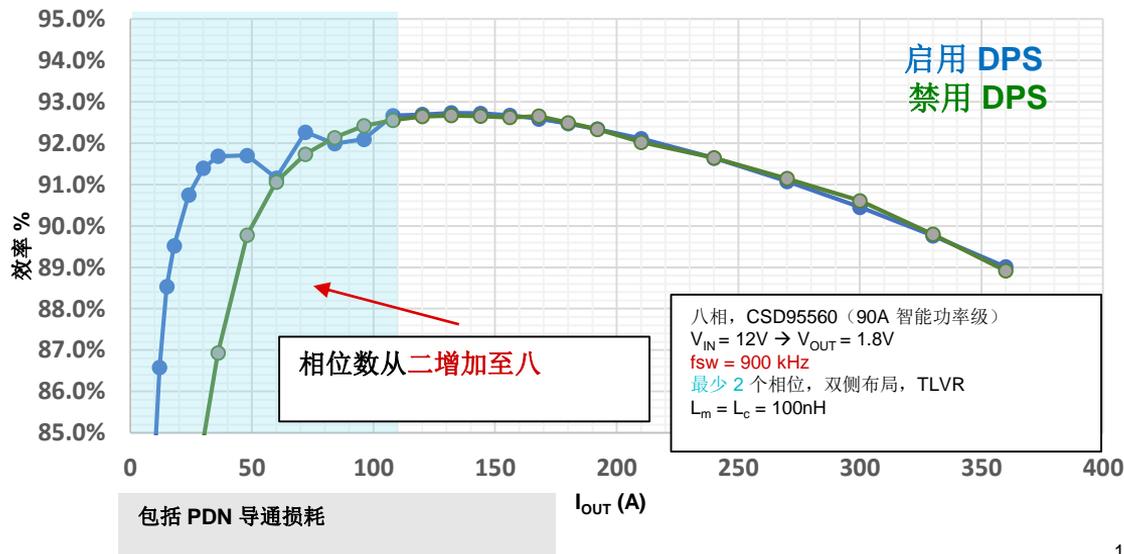


$$\Delta V_{Lc} = N_{on} \times (V_{IN} - V_{OUT}) + N_{off} \times (-V_{OUT}) + N_{HiZ} \times (V_{diode})$$

$$P_{cond,HiZ} \approx I_{rms(Lc)} \times V_{diode} \quad P_{cond,HiZ} \ll P_{switching}$$

当 DPS 关闭时为 0

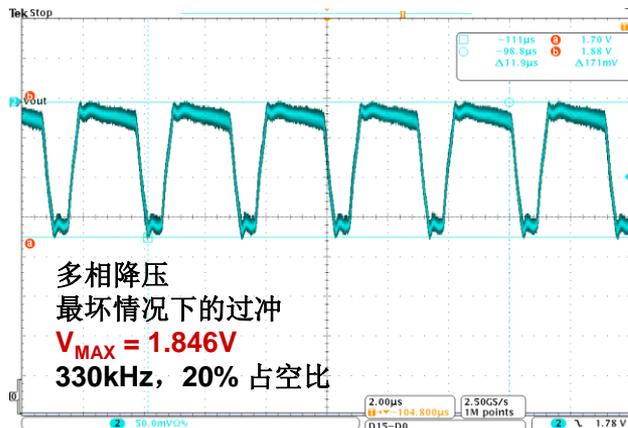
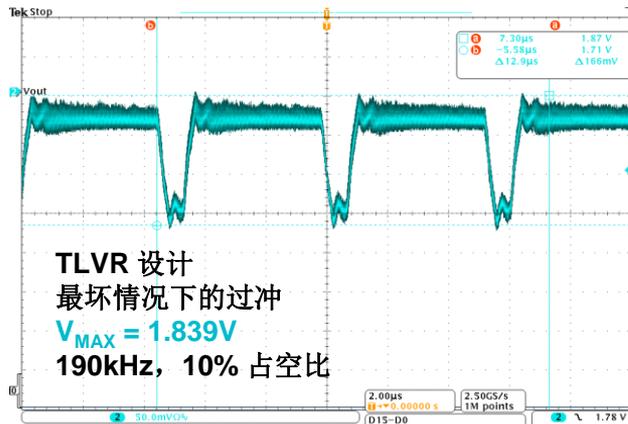
于动态切相 (DPS) 之间的效率比较 (包括供电网络 [PDN])



示例并联设计

参数	TLVR	多相降压
控制器/SPS	TPS53689、CSD95440	
V_{IN}	12V	
V_{OUT}	1.8 V	
相位数	八相	
开关频率	900 kHz	
负载阶跃	60A-430A, 1,000A/ μ s, 1kHz-1MHz	
负载线	0.5m Ω	
L_m/L_{buck}	150nH	70nH
L_c	100nH	-
C_{bulk} (聚合物)	0 \times 470 μ F	5 \times 470 μ F
多层陶瓷电容器	80 \times 22 μ F 0402	80 \times 22 μ F 0402
	56 \times 47 μ F 0603	45 \times 47 μ F 0805
	0 \times 100 μ F 0805	15 \times 100 μ F 0805
	8 \times 0.1 μ F 0402	8 \times 0.1 μ F 0402
总 C_{out}	4.4mF	7.7mF

所需输出电容减少 45%，
瞬态裕度更大



实用注意事项

L_c 电感器选择

- 通常在 L_m 和 1.25 × L_m 之间选择 L_c
- 所需的最小均方根电流 (RMS)

$$I_{\text{rms}(L_c)} \approx \frac{\Delta I_{L_c}}{\sqrt{12}}$$

- 所需的高饱和电流

$$I_{\text{sat}} \gg t_{\text{resp}} \times \left[\frac{N_{\text{on(step)}} \times V_{\text{IN}} - N_{\text{total}} \times V_{\text{OUT}}}{L_c} \right]$$

- L_c 两端的电压可能 $\gg V_{\text{IN}}$

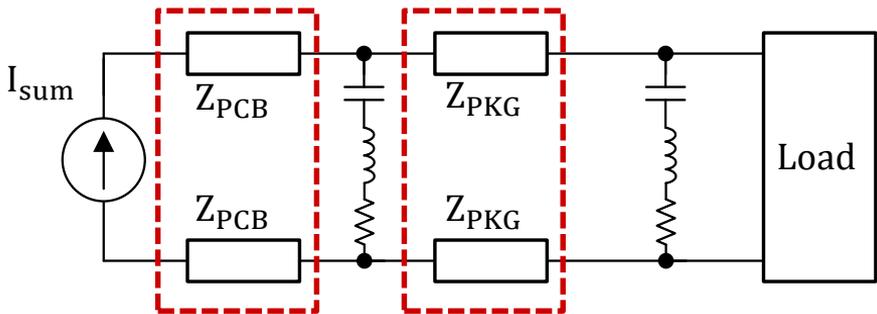
$$V_{L_c(\text{max})} = N_{\text{on(step)}} \times V_{\text{IN}} - N_{\text{total}} \times V_{\text{OUT}}$$

示例 L_c 选择

参数	值
V _{IN}	12V
V _{输出}	0.8 V
F _{sw}	600 kHz
N _{total}	八相
L _m	150nH
L _c	180nH
负载瞬态	50-500A, 1,000A/μs
ΔI _{Lc}	5.0 A
F _{LC}	4.8 MHz
I _{RMS(Lc)}	2.8 A
I _{SAT} 的裕度	25%
I _{SAT(min)}	75 A
ΔV _{Lc(max)}	30V (N _{OVERLAP} = 3)

输出纹波消除

输出电压纹波（简单模型）

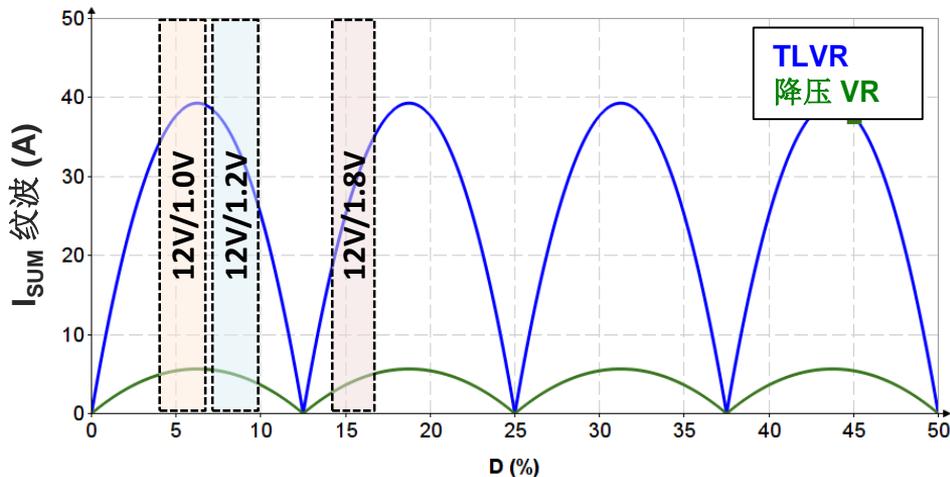


每个相移偏移处都会添加相同的 I_{Lc} 电流

$$I_{sum} = (I_{Lm1} + I_{Lc}) + (I_{Lm2} + I_{Lc}) + \dots$$

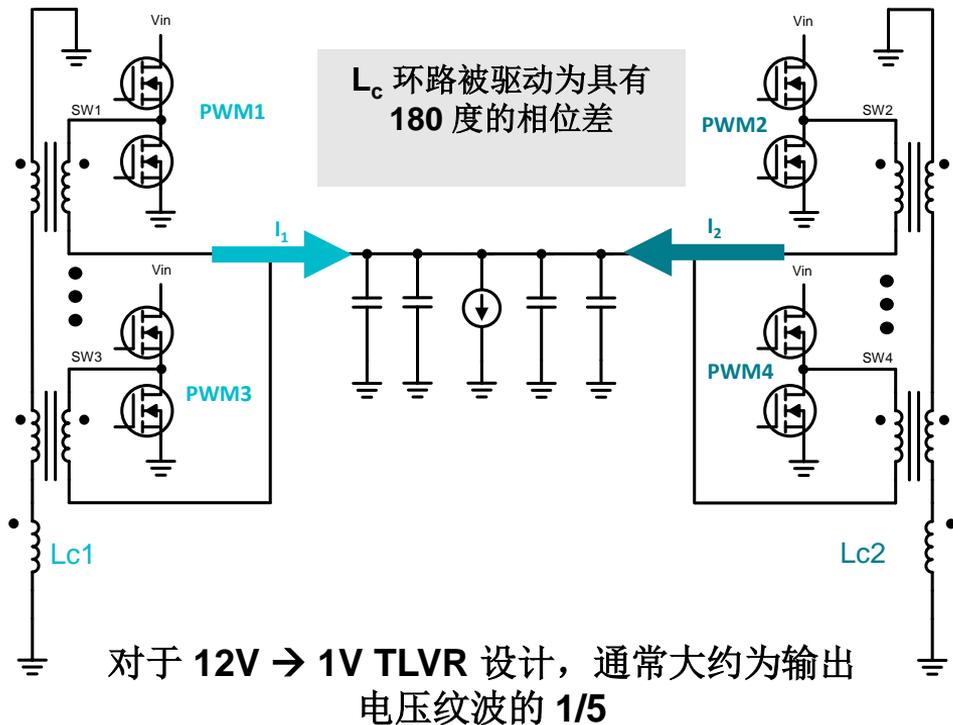
$0 \times \frac{360^\circ}{N} \text{ phase shift} \quad 1 \times \frac{360^\circ}{N} \text{ phase shift}$

示例：
TLVR 与多相降压 I_{OUT} 纹波与占空比之间的关系

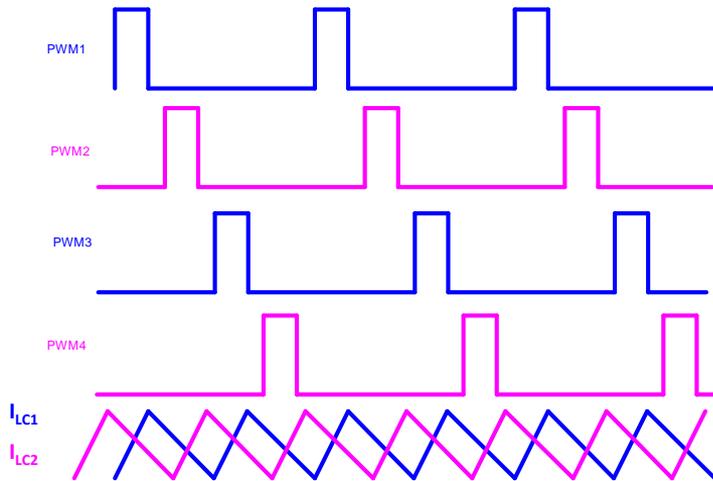


$V_{IN} = 12V$, $F_s = 700kHz$, $L_m = 150nH$,
 $L_c = 120nH$, $L_{VR} = L_{eq} = 125nH$, 八相

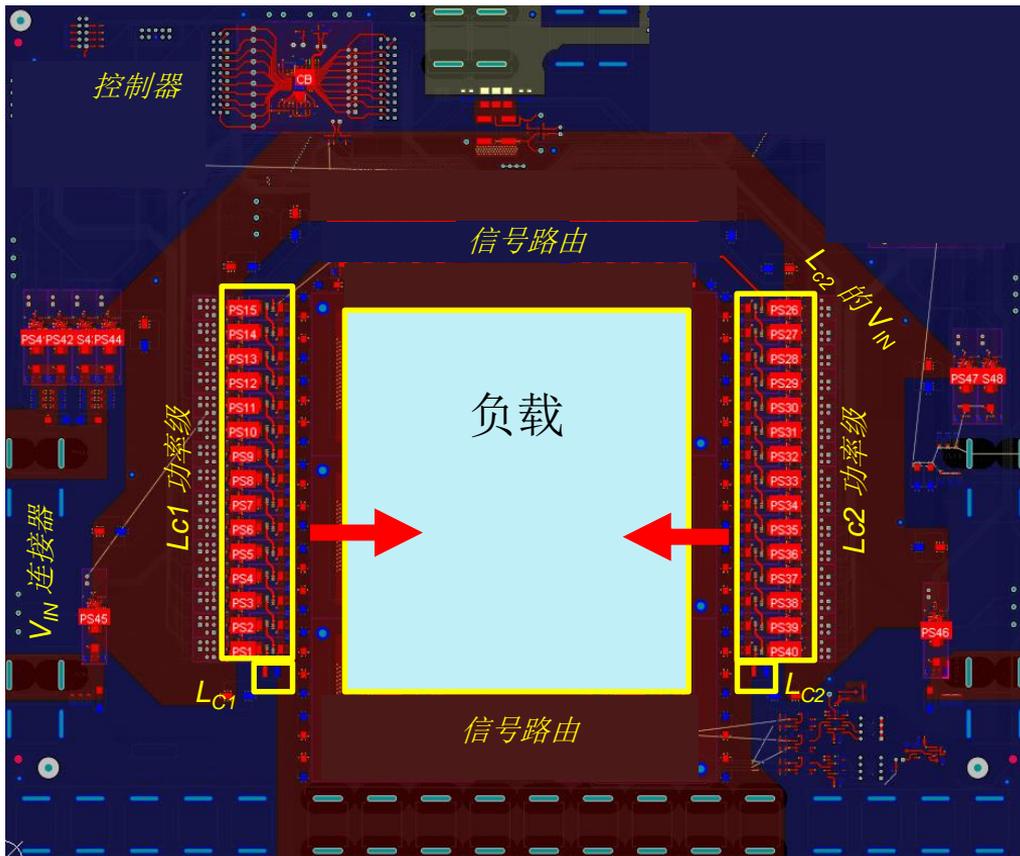
纹波电压更小：交错式 TLVR



- 对于高相位数 (>十二相) 设计, 创建两个 (或更多) L_c 环路可实现交错
- 也可能有利于解决布局 and 电磁干扰 (EMI) 问题 (L_c 频率更低, 最大 L_c 电压更小)



印刷电路板布局布线：多侧电力输送



示例：

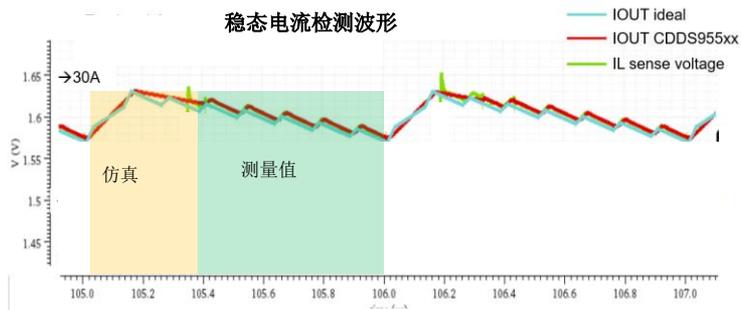
- 三十二相设计
- 双 L_c 交错式设计

建议：

- 对称动力总成和 L_c 布局
- 输入引线上的去耦和电流电阻 (IR) 压降
- PWM 引脚引线电容
 - 控制器 PWM 驱动强度
- 电流检测引线电容
 - 电流监测 (I_{mon}) 信号的低通滤波器效应

TLVR 优化型控制器和功率级

TLVR 优化型功率级

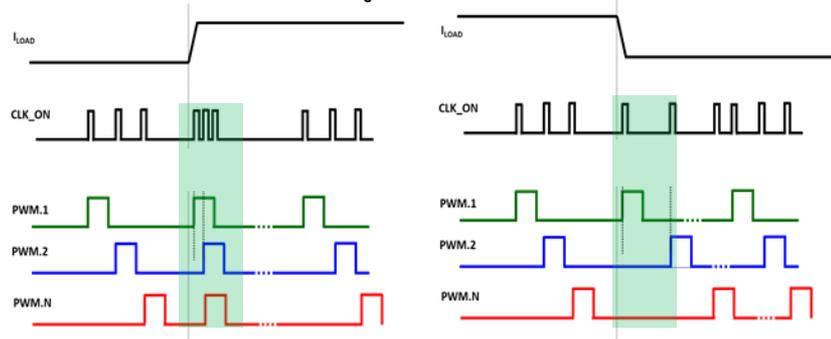


高带宽实际电流信息报告

器件型号	电流额定值	封装/特性
CSD95440	80A 峰值, 40A RMS	5mm × 6mm (电压 Imon)
CSD95510	90A 峰值, 50A RMS	4mm × 6mm (电压 Imon)
CSD95560	90A 峰值, 50A RMS	4mm × 6mm (电流 Imon)
CSD95520	60A 峰值, 30A RMS	4mm × 5mm (电压 Imon)
CSD95570	60A 峰值, 30A RMS	4mm × 5mm (电流 Imon)

TLVR 优化型控制器

基于 PWM 的 L_c 电流仿真 (正在申请专利)



基于 PWM 时序的负载瞬态检测

器件型号	阶段	封装/特性
TPS53685	8	5mm × 5mm AMD 接口
TPS536C5	12	6mm × 6mm AMD 接口
TPS53689T	8	5mm × 5mm Intel 接口
TPS536C9T	12	6mm × 6mm Intel 接口

结语

概要

- 介绍了 TLVR 拓扑
 - 降压衍生拓扑类似于用于高相位数设计的耦合电感器
 - 由于电感器不共用一个磁芯，因此 TLVR 具有更好的模块性和重用性
 - 考虑到耦合电感器的行为，可显著节省输出电容器
- TLVR 设计的实用注意事项
 - 与降压相比，TLVR 设计通常具有更高的纹波电流和电压
 - 交错以实现高相位数设计
 - TLVR 设计的印刷电路板布局布线与降压类似，但添加了 L_c 环路
- TLVR 优化型器件
 - 优化 TLVR 设计所需的高带宽和系统级优化

参考文献

- "Fast multi-phase trans-inductor voltage regulator." Technical Disclosure Commons. May 2019. https://www.tdcommons.org/cgi/viewcontent.cgi?article=3261&context=dpubs_series
- Radhakrishnan, K., and J. Douglas. "Microprocessor Power Delivery Challenges." APEC 2022, March 2022.
- Parisi, C. "多相降压设计大全（第 1 部分）。" <https://www.ti.com/cn/lit/an/slva882b/slva882b.pdf>
- Dong, Y. "Investigation of Multiphase Coupled-Inductor Buck Converters in Point-of-Load Applications." Ph.D. thesis, Virginia Tech, 2009. https://vtechworks.lib.vt.edu/bitstream/handle/10919/28469/ETD_final_Rev2.pdf
- Qiu, Y. "Coupled inductors for power supplies: advantages and compromises." June 2007. EETimes. <https://www.eetimes.com/coupled-inductors-for-power-supplies-advantages-and-compromises>
- Lu, Z., and W. Chen. "Multi-Phase Inductor Coupling Scheme with Balancing Winding in VRM Applications." APEC 2007, March 2007.
- Zhu, F. "Transient Analysis of Multi-Phase Voltage Regulator with Nonlinear Indirect-coupled Inductor." CPES PMC Review, June 2021.
- Jiang, S., X. Li, M. Yazdani, and C. Chung. "Driving 48V Technology Innovations Forward – Hybrid Converters and Trans-Inductor Voltage Regulator (TLVR)." APEC 2020.
- Erickson, R., and D. Maksimovic. "Fundamentals of Power Electronics." Springer AG, Third Edition. 2020.



© Copyright 2024 Texas Instruments Incorporated. All rights reserved.

This material is provided strictly “as-is,” for informational purposes only, and without any warranty.
Use of this material is subject to TI’s **Terms of Use**, viewable at [TI.com](https://www.ti.com)

重要声明和免责声明

TI“按原样”提供技术和可靠性数据（包括数据表）、设计资源（包括参考设计）、应用或其他设计建议、网络工具、安全信息和其他资源，不保证没有瑕疵且不做任何明示或暗示的担保，包括但不限于对适销性、某特定用途方面的适用性或不侵犯任何第三方知识产权的暗示担保。

这些资源可供使用 TI 产品进行设计的熟练开发人员使用。您将自行承担以下全部责任：(1) 针对您的应用选择合适的 TI 产品，(2) 设计、验证并测试您的应用，(3) 确保您的应用满足相应标准以及任何其他功能安全、信息安全、监管或其他要求。

这些资源如有变更，恕不另行通知。TI 授权您仅可将这些资源用于研发本资源所述的 TI 产品的应用。严禁对这些资源进行其他复制或展示。您无权使用任何其他 TI 知识产权或任何第三方知识产权。您应全额赔偿因在这些资源的使用中对 TI 及其代表造成的任何索赔、损害、成本、损失和债务，TI 对此概不负责。

TI 提供的产品受 [TI 的销售条款](#) 或 [ti.com](#) 上其他适用条款/TI 产品随附的其他适用条款的约束。TI 提供这些资源并不会扩展或以其他方式更改 TI 针对 TI 产品发布的适用的担保或担保免责声明。

TI 反对并拒绝您可能提出的任何其他或不同的条款。

邮寄地址：Texas Instruments, Post Office Box 655303, Dallas, Texas 75265
Copyright © 2024，德州仪器 (TI) 公司