

如何拥有系统化开发能力（第二部分）

课程回放：
请微信扫描二维码，
获取课程观看链接



AHEAD OF WHAT'S POSSIBLE™

ADI 智库

一站式电子技术宝库

第四讲：Energy Harvesting 能量采 集系统电路的设计



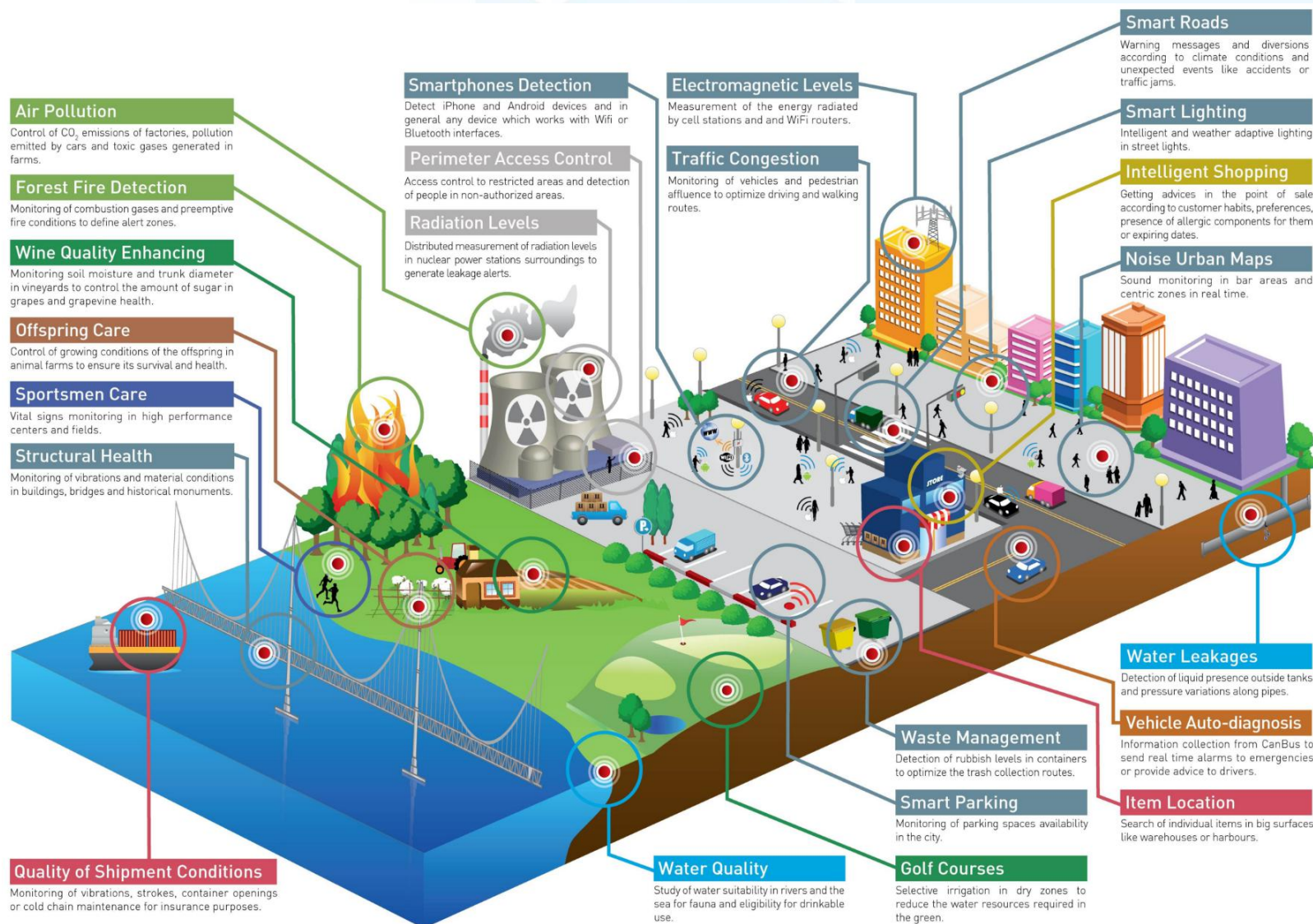
微信扫描二维码
获取课程观看链接

IOT的未来形态-终身免维护系统

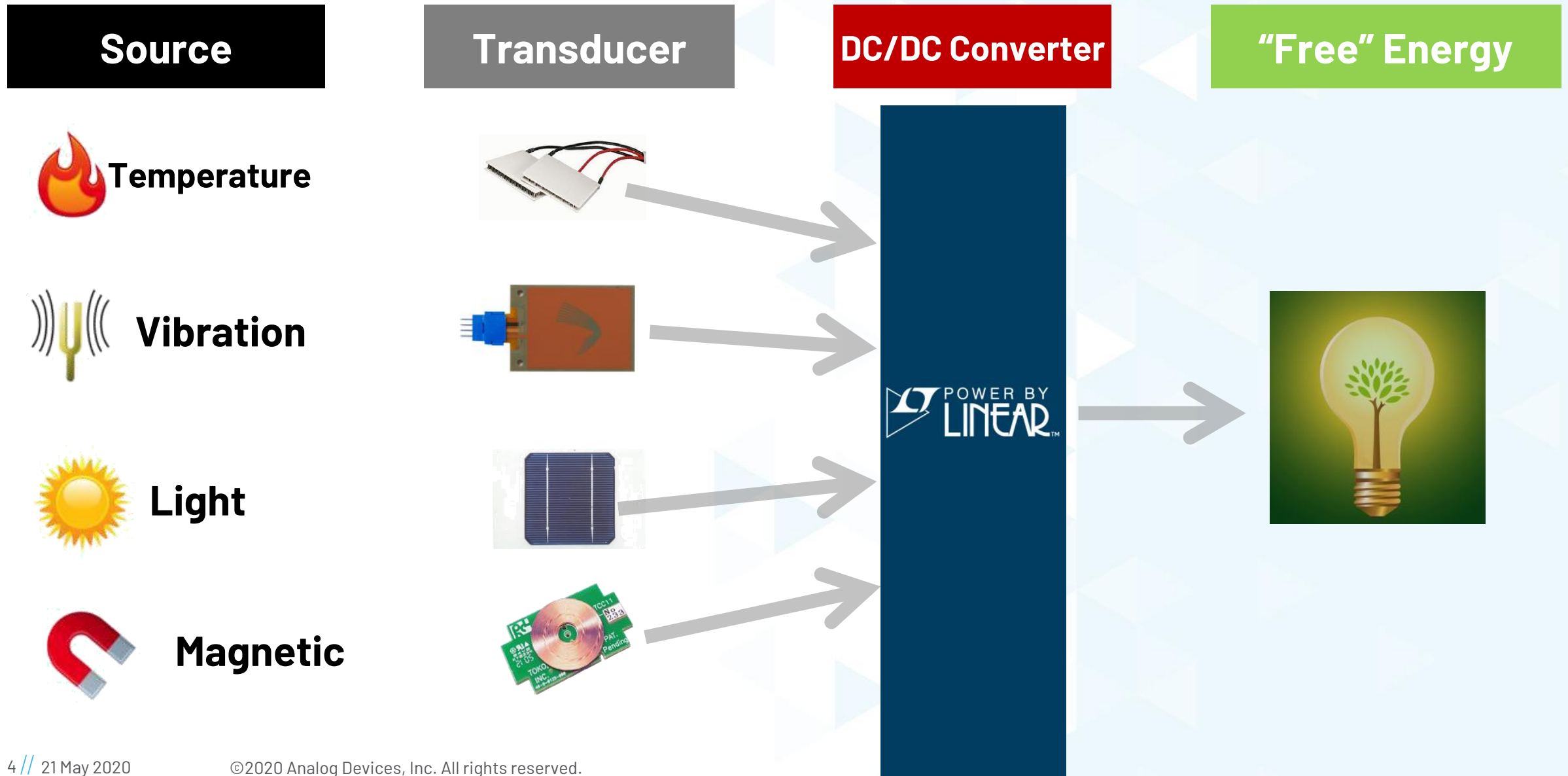
IOT 物联网的未来

节点众多
低功耗
互联
可靠性
长期在线

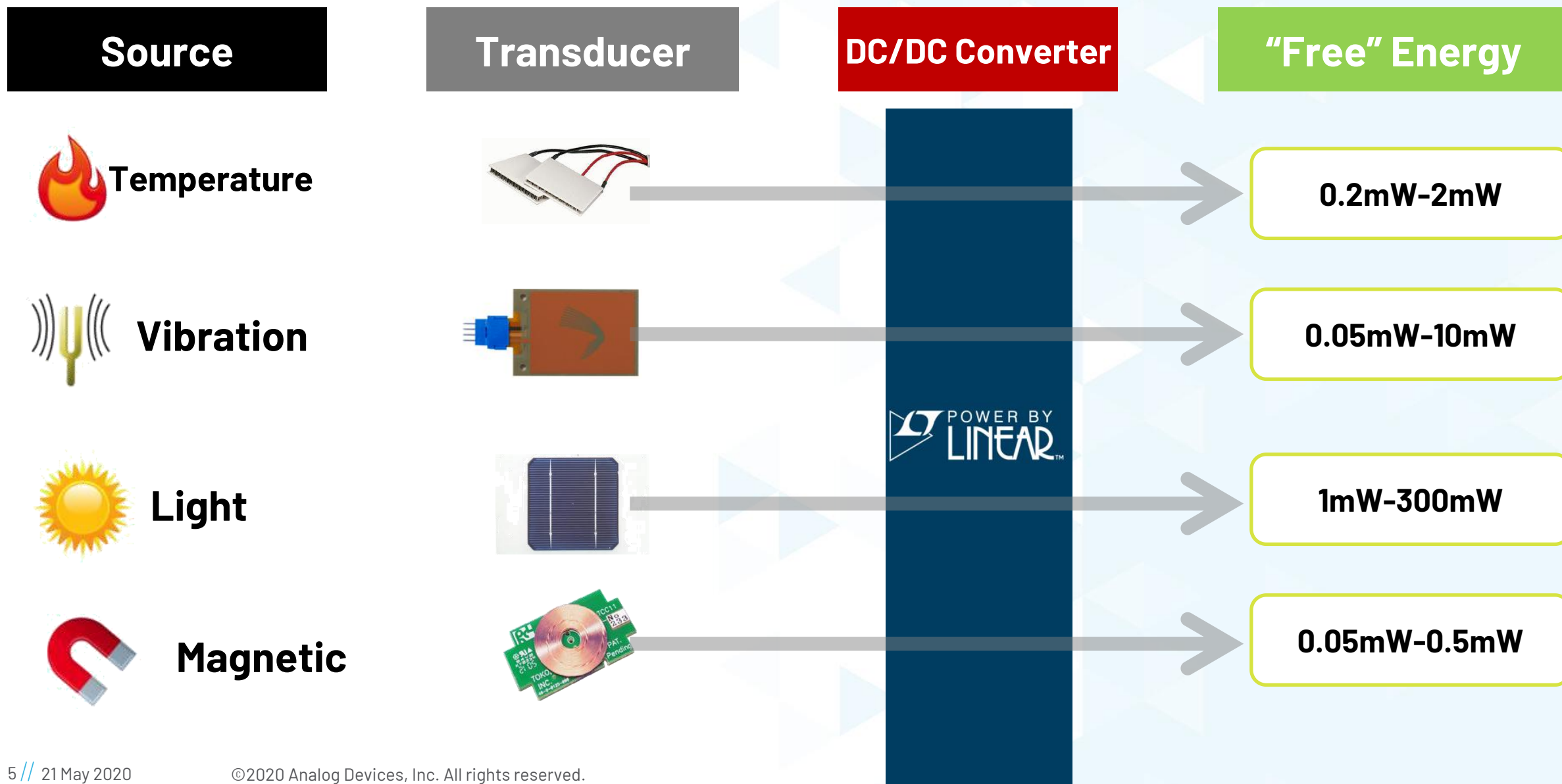
施工问题
维护难题
供电问题



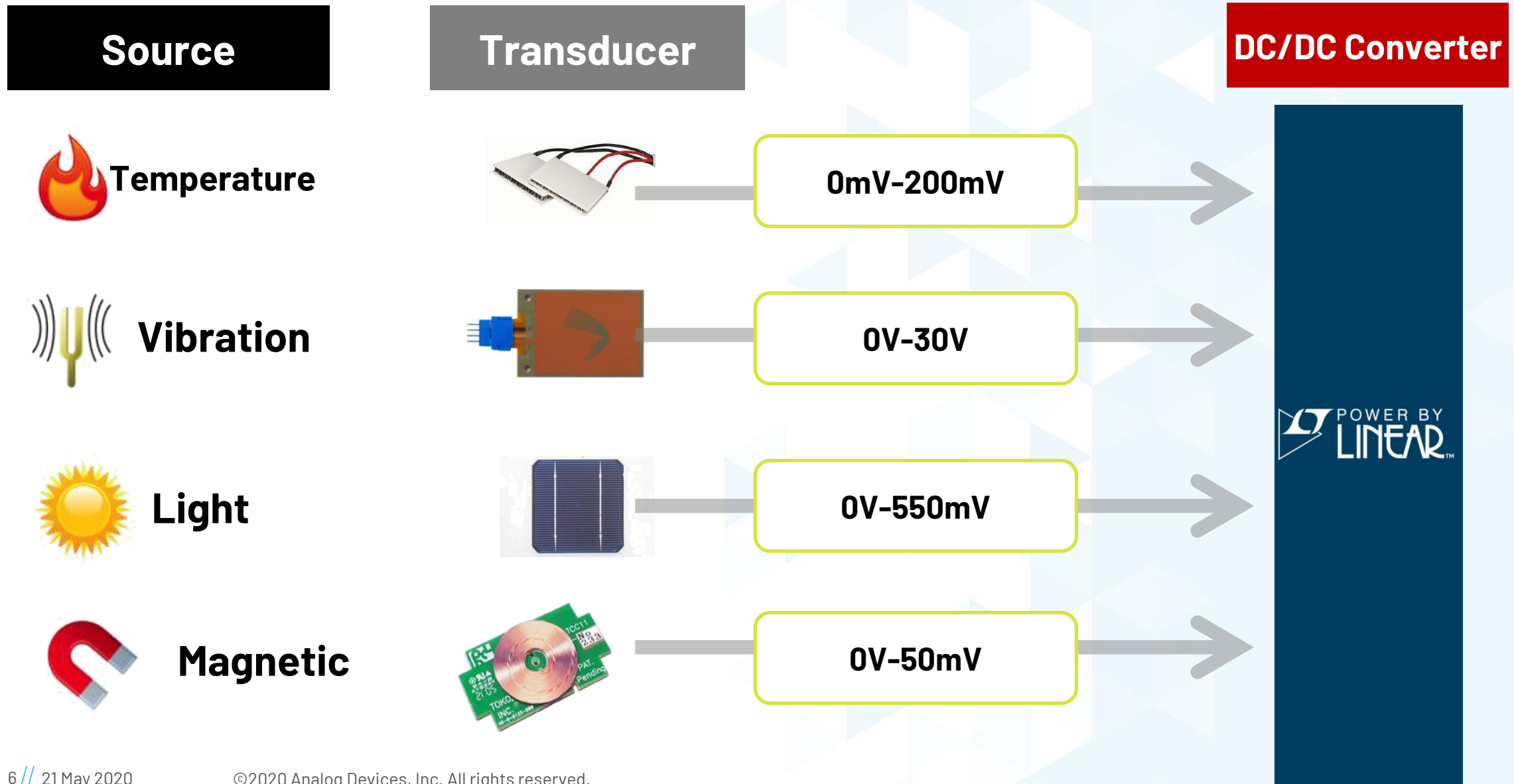
什么是能量采集



多少能量可以供我们使用



能量采集的挑战



能量采集系统优化关注点

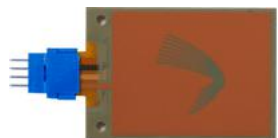


Temperature

0mV-200mV



需要温差，转换效率，启动电压



Vibration

0V-40V



需要震动，转换效率，高动态范围



Light

0V-550mV

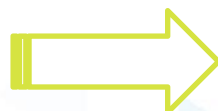


需要阳光，转换效率，最大功率点MPPT



Magnetic

0V-50mV



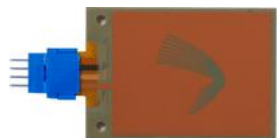
磁场方向性，转换效率，体积问题，启动电压

DC/DC Converter 的挑战



Temperature

0mV-200mV



Vibration

0V-30V



Light

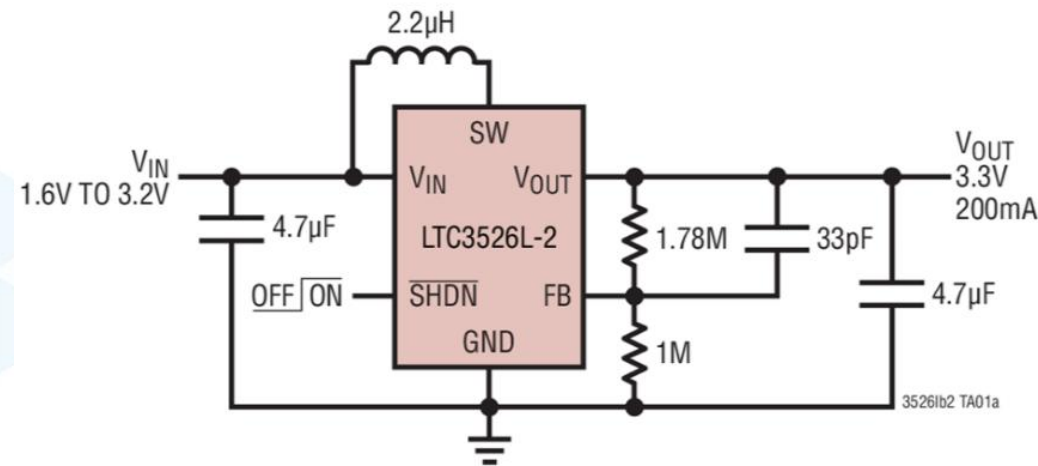
0V-550mV



Magnetic

0V-50mV

**DC/DC ???
Boost
To 3.3V or 5V**



LTC3526L-2

概览

评估套件

文档

工具及仿真模型

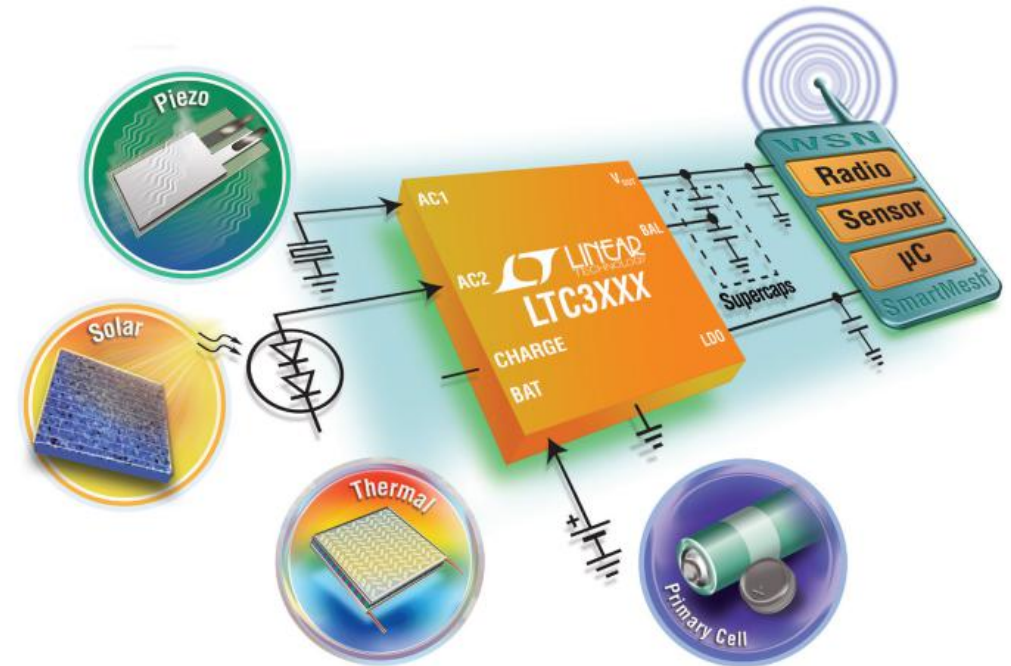
配套

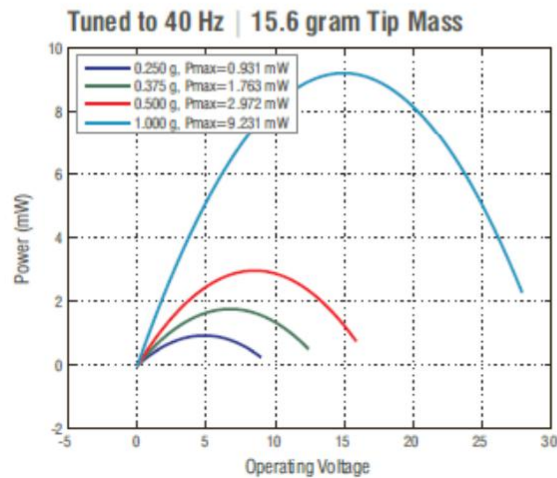
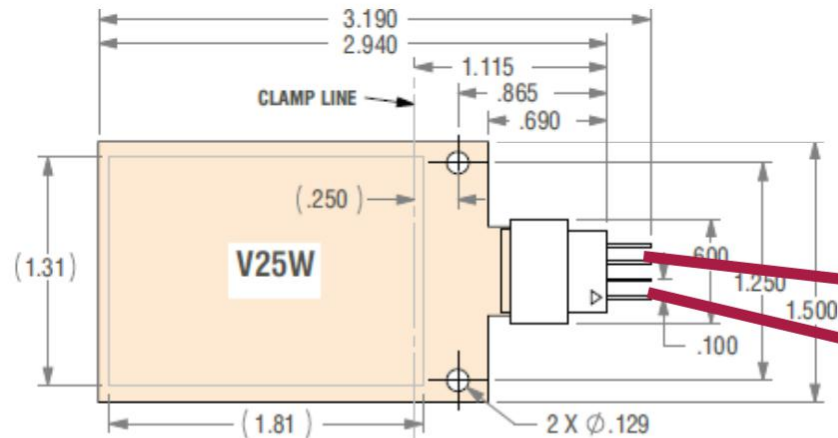
优势和特点 | 产品详情

- 可从单节碱性 / NiMH 电池提供 3.3V/100mA 输出,
- V_{IN} 启动电压: 680mV
- V_{OUT} 范围: 1.5V 至 5.25V
- 效率高达 94%

Power innovation : Energy Harvest

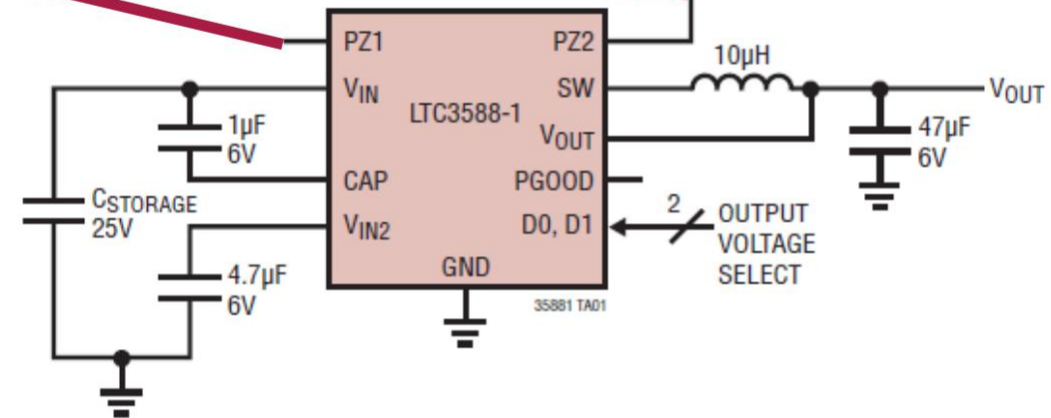
Part Number	Energy Source	Description
LTC®3105	🔥 ☀️	400mA boost converter with MPP control and 250mV start-up
LTC3106	🔥 ☀️	300mA buck-boost converter and power manager with MPPC
LTC3107	🔥 ☀️	Ultralow voltage converter and primary battery life extender
LTC3108	🔥 ☀️	Ultralow voltage boost converter and system manager
LTC3109	🔥 ☀️	Auto-polarity version of LTC3108
LTC3330/31	🔥 ☀️ 📡 🔋	Energy harvesting DC/DC converter with battery life extender
LTC3588	📡 🔋	Piezoelectric energy harvesting power supply
LT®3652/HV	☀️	Power tracking 2A solar battery charger
LTC4070/71	🔥 ☀️ 📡 🔋	Nanoamp operating current shunt Li-Ion battery charger





LTC3588

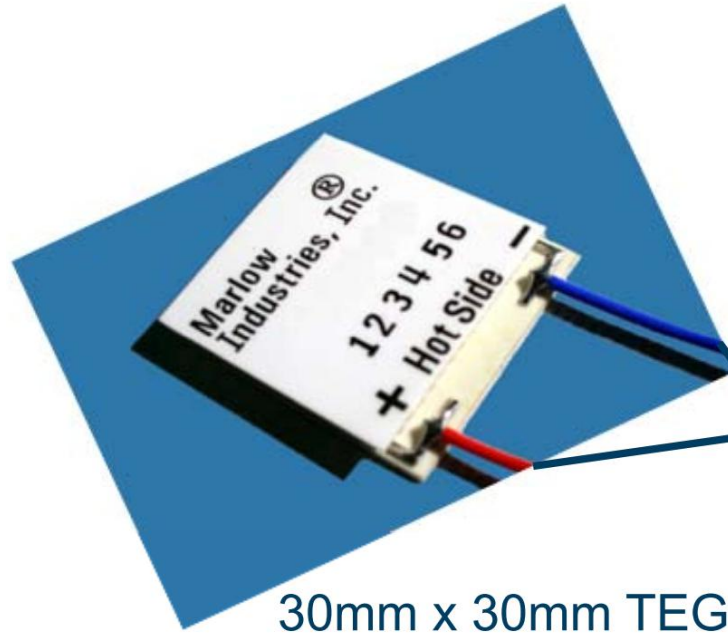
Piezoelectric Energy Harvesting
Power Supply
($I_{CC} = 900\text{nA}$)



LTC3588 Output:

$$V_{OUT} = 3.3\text{V}$$

$$I_{OUT} = 200\mu\text{A} @ 0.25\text{g} / 40\text{Hz}$$



30mm x 30mm TEG

LTC3108 Output:

$$V_{OUT} = 3.3V$$

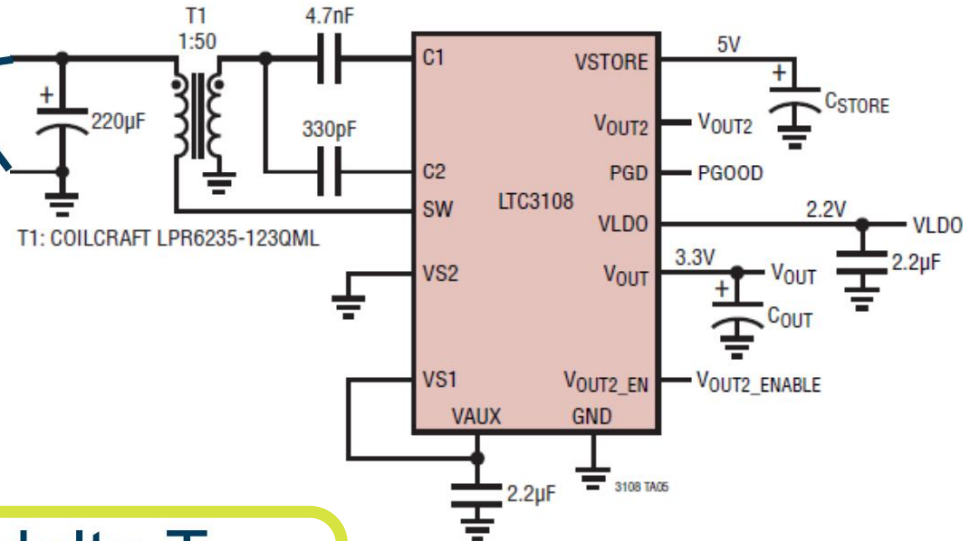
$$I_{OUT} = 60\mu A \quad @ 10^{\circ}C \text{ delta } T$$

$$I_{OUT} = 400\mu A \quad @ 30^{\circ}C \text{ delta } T$$

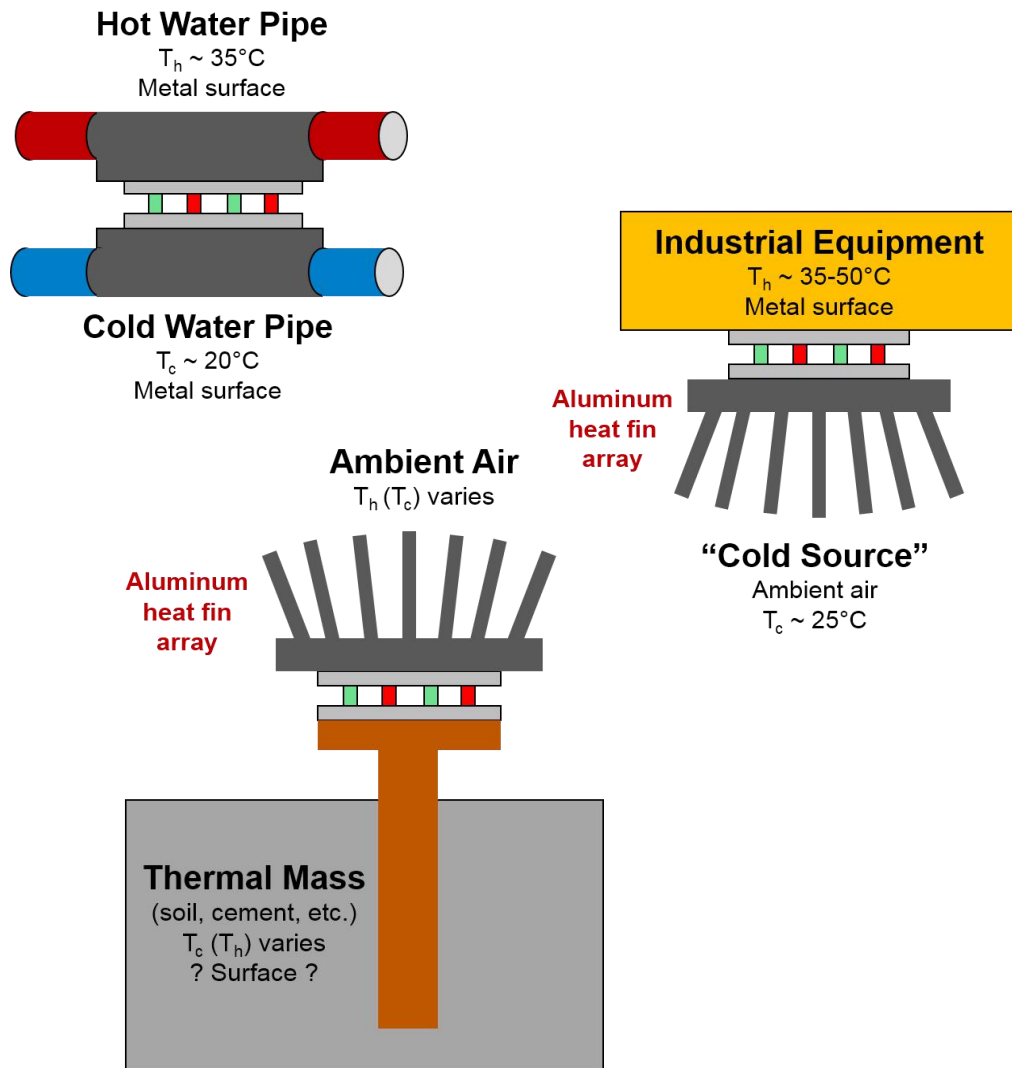
LTC3108

Ultralow Voltage Step-Up Converter
And Power Manager
(min $V_{IN} = 20mV$)

$$V_{IN} \sim 20mV - 500mV$$



温差发电安装方式



温差发电的系统及考虑

几何形状因素

- 散热器热源形状
- 可用面积
- 冷源可用面积

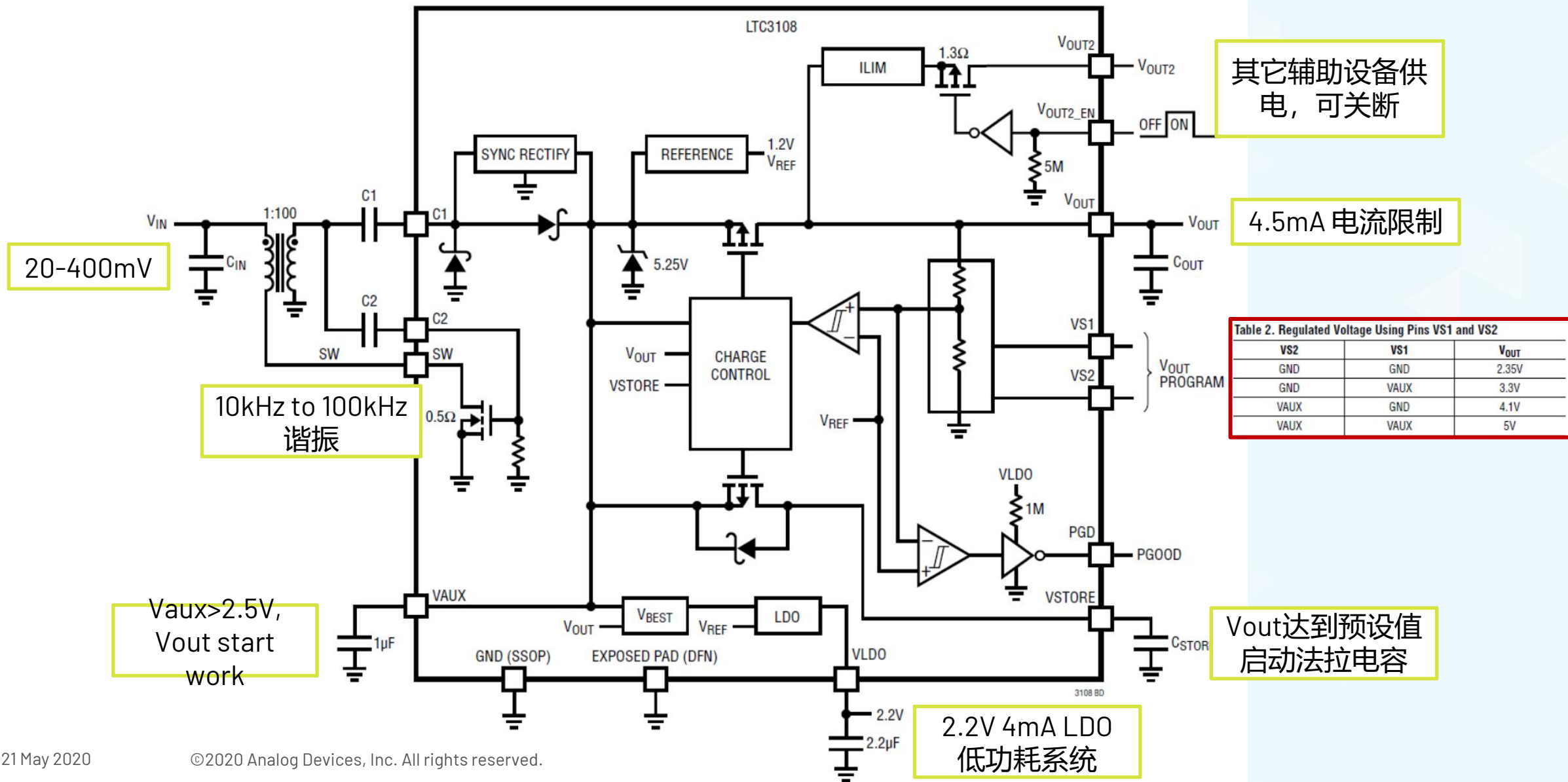
表面

- 热源表面材料(金属、磁性、陶瓷等)
 - 表面材料,
- 冷源对附着力的要求

热源

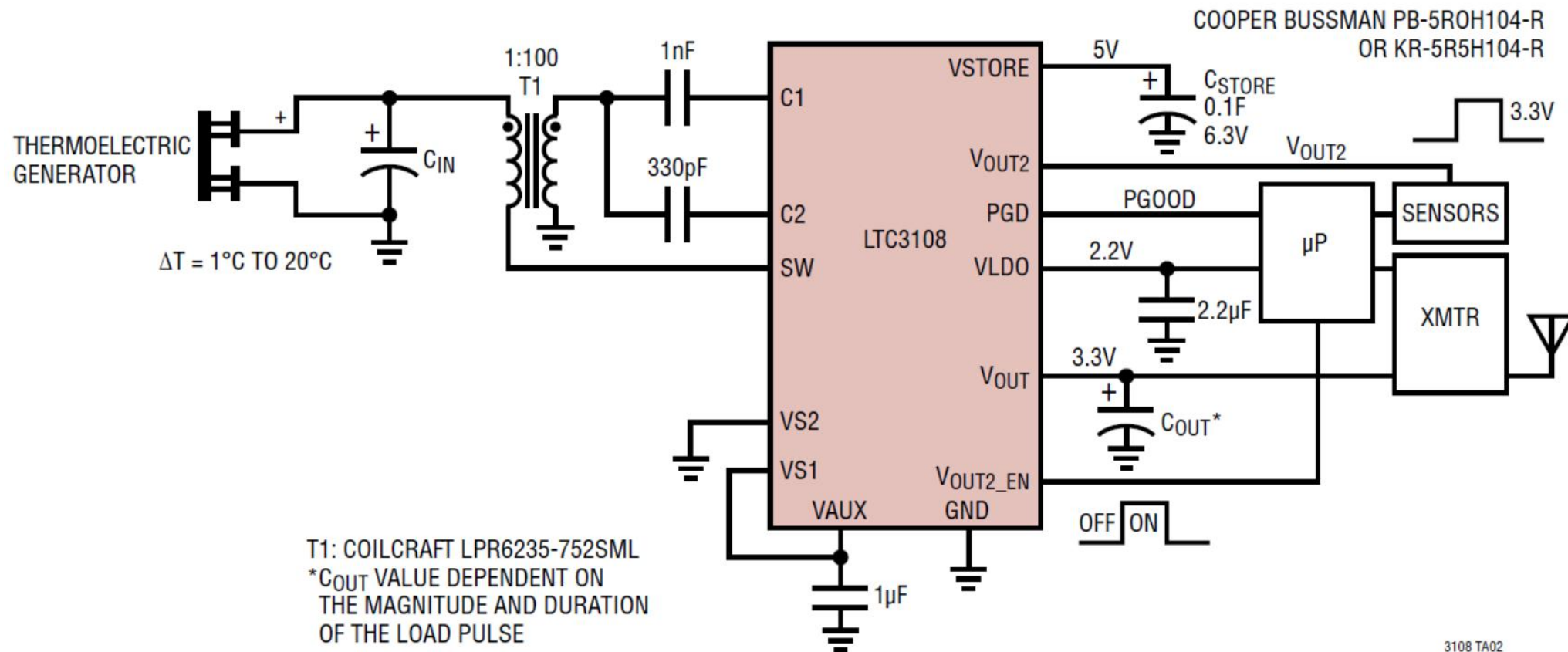
- 热源、冷源的典型温度
- 环境温度
- 空气流动条件

20mV升压电路工作原理分析-微弱电压的转换



温差发电在传感网络中的典型应用

Peltier-Powered Energy Harvester for Remote Sensor Applications



3108 TA02

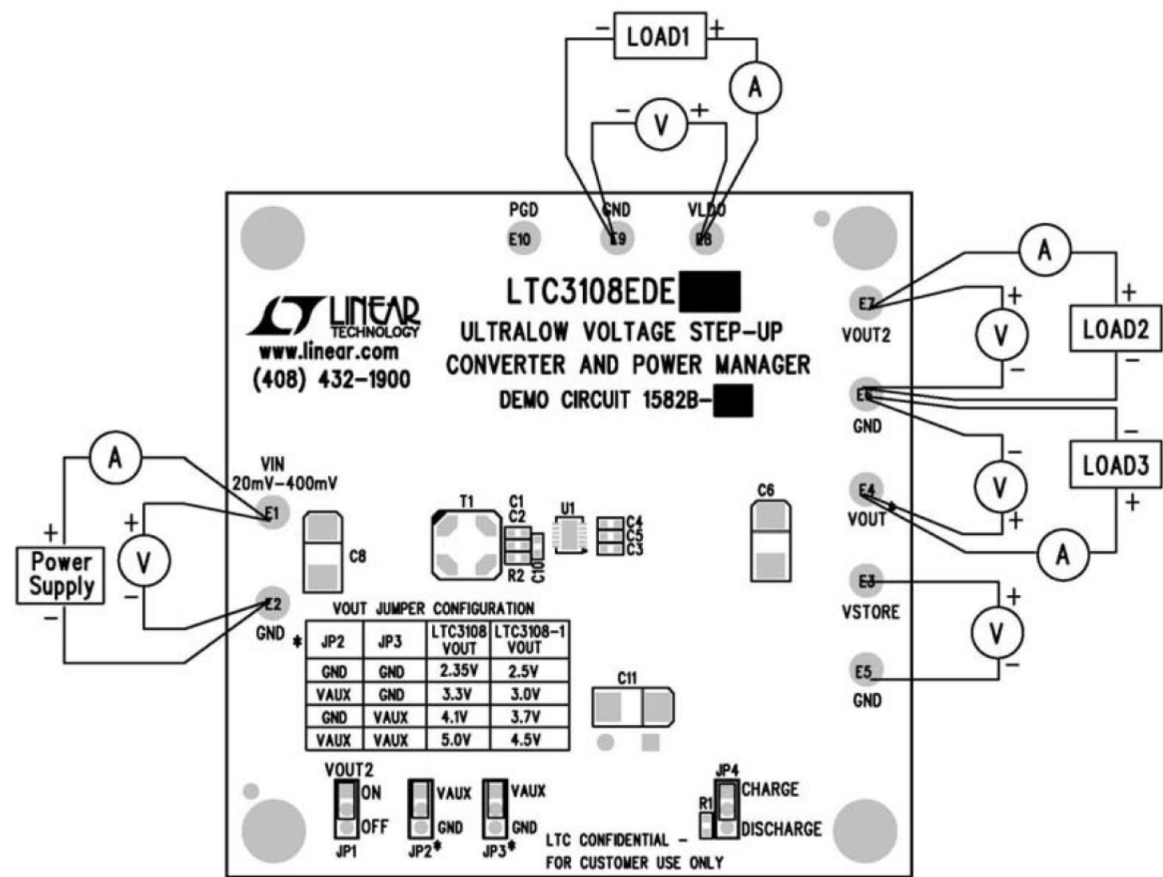
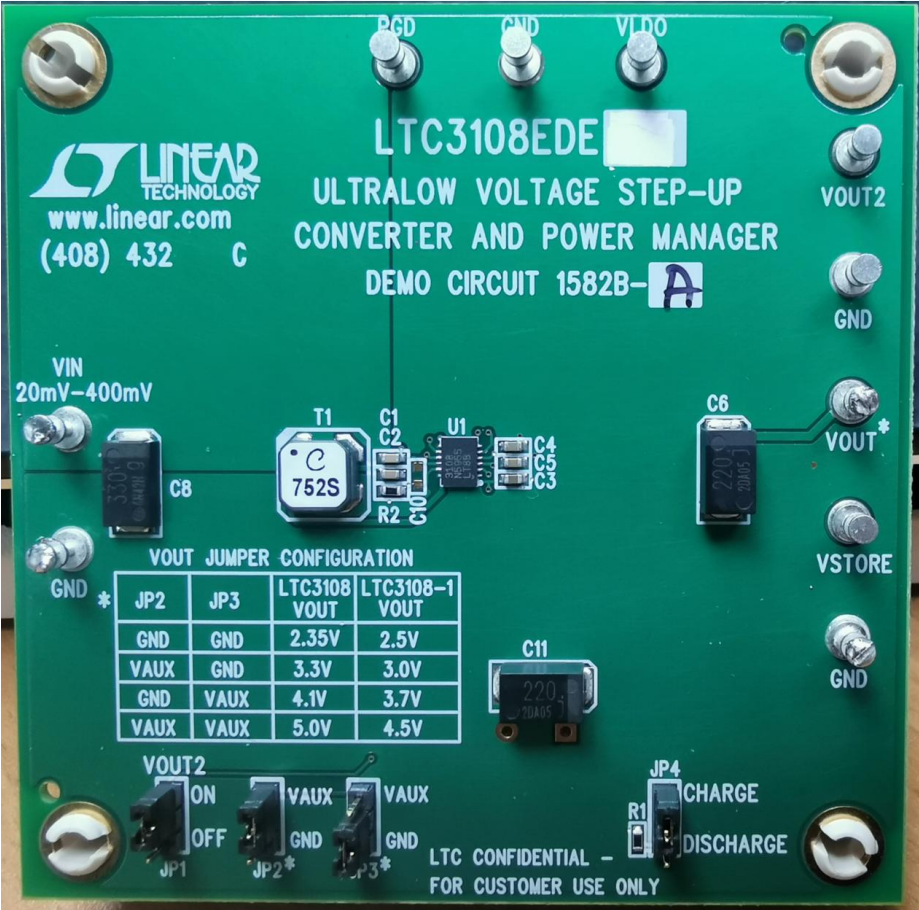
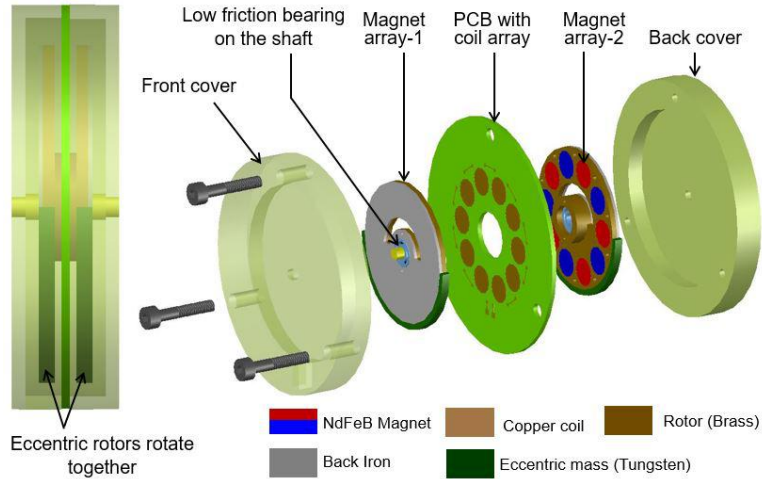


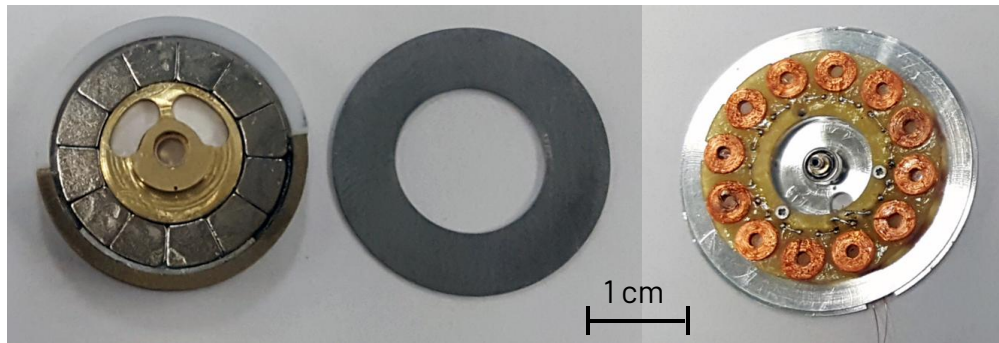
Figure 1. Connection Diagram



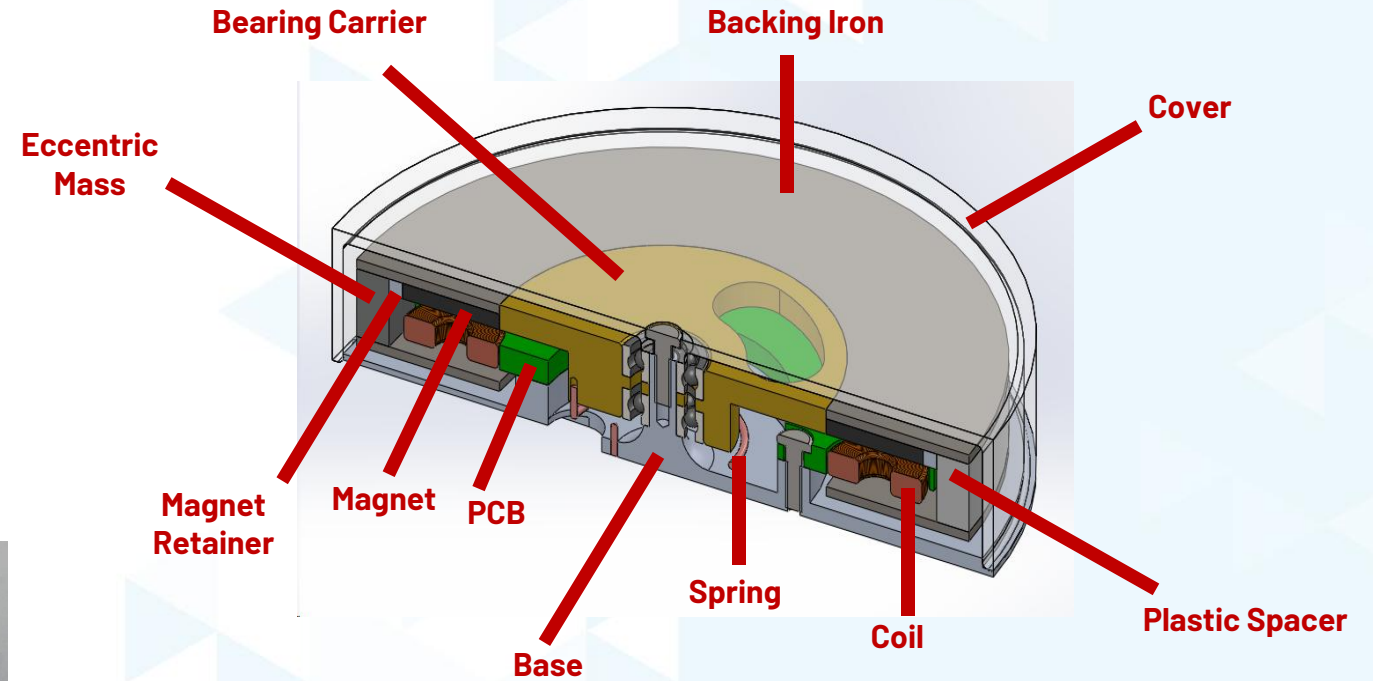
电磁原型



电磁能量的分配

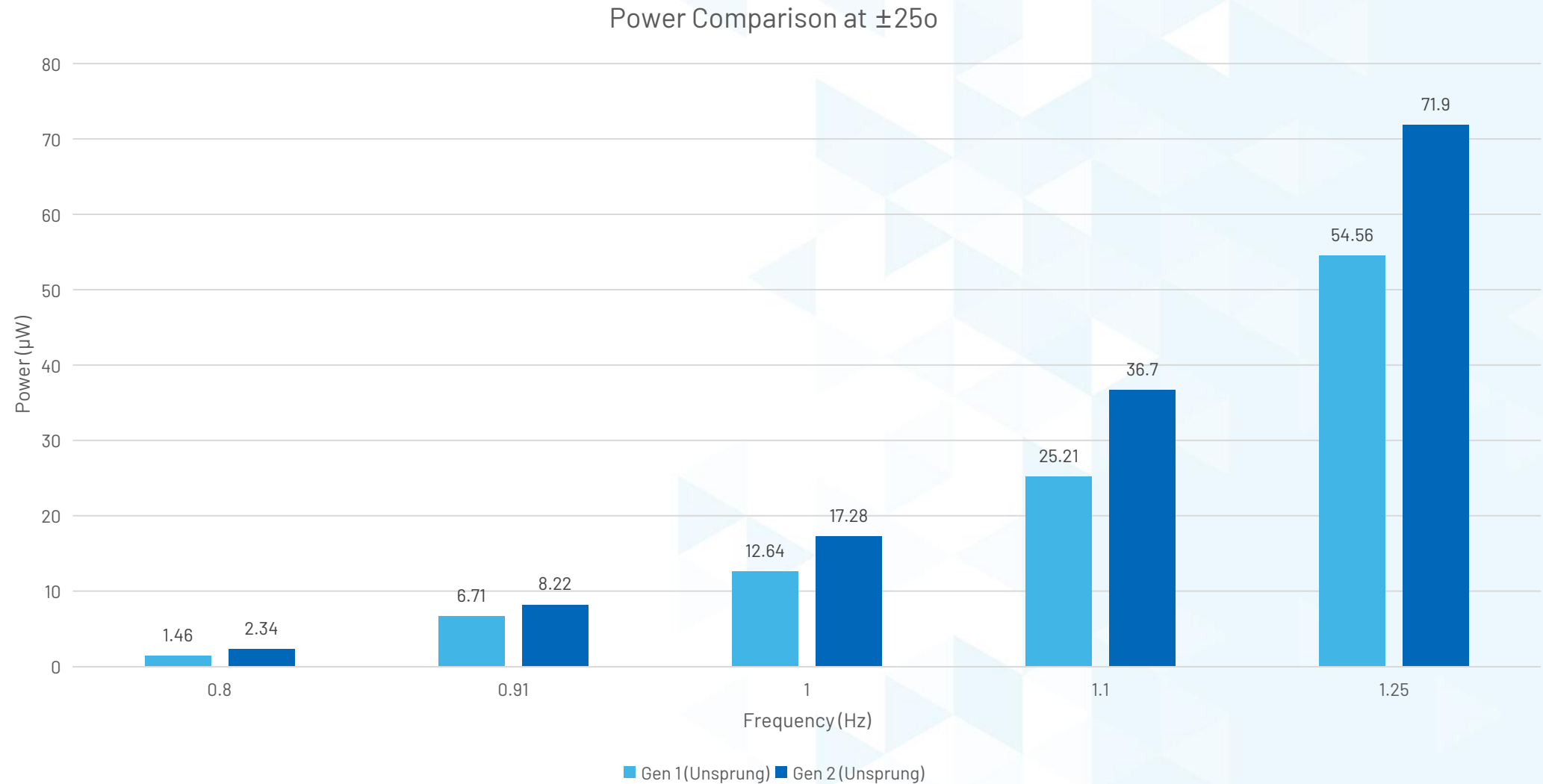


电磁样机的部件



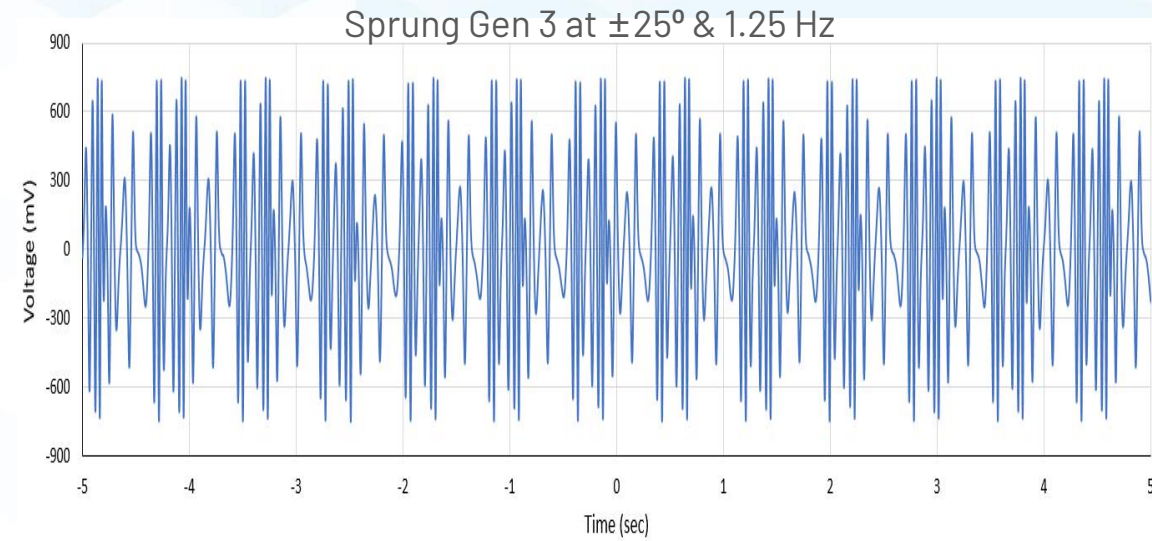
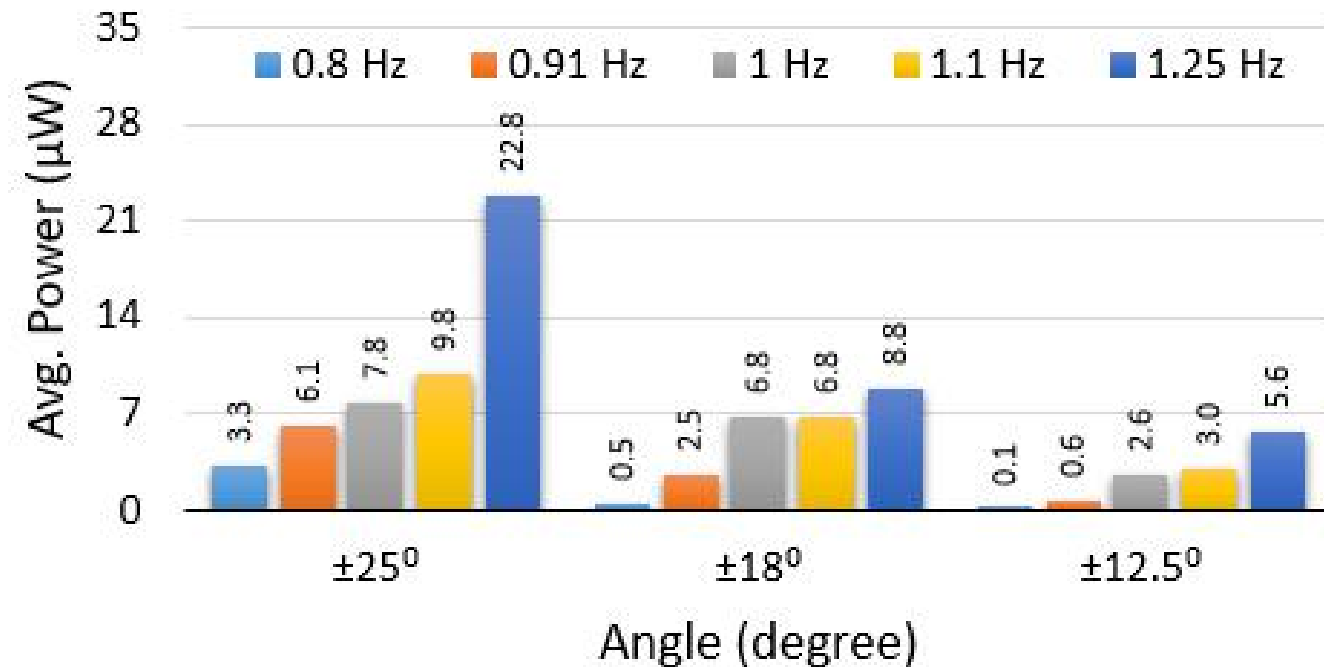
- 和背铁通过旋转改变磁通
- 近恒定磁场 (~0.5T)

第1代和第2代的功率比较



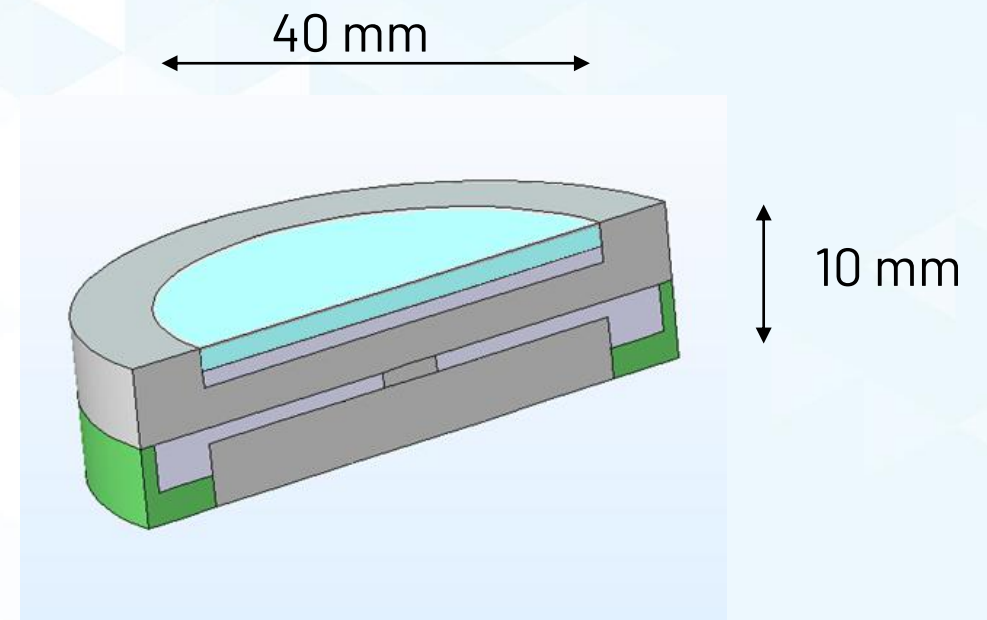
新一代运动发电的测试结果

Average Power (to 1.3 k Ω)

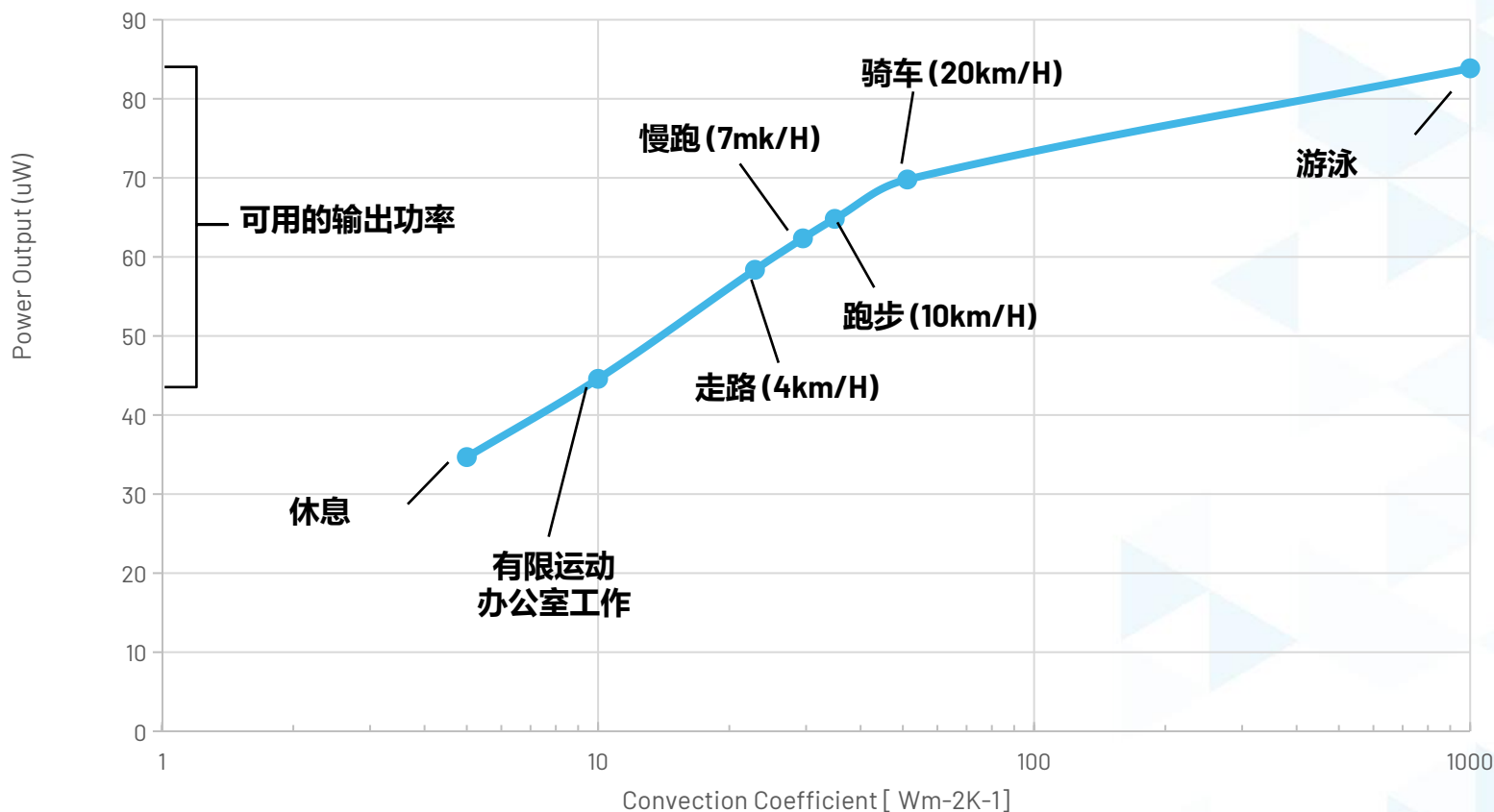


Voltage waveform from Gen 3

一个切实可行的模拟环境



不同的运动模式的输出功率级别



测试模型

环境温度 22 °C

皮肤温度 30 °C

不同的运动模式

未来的目标

温差发电的最佳几何形状是什么？

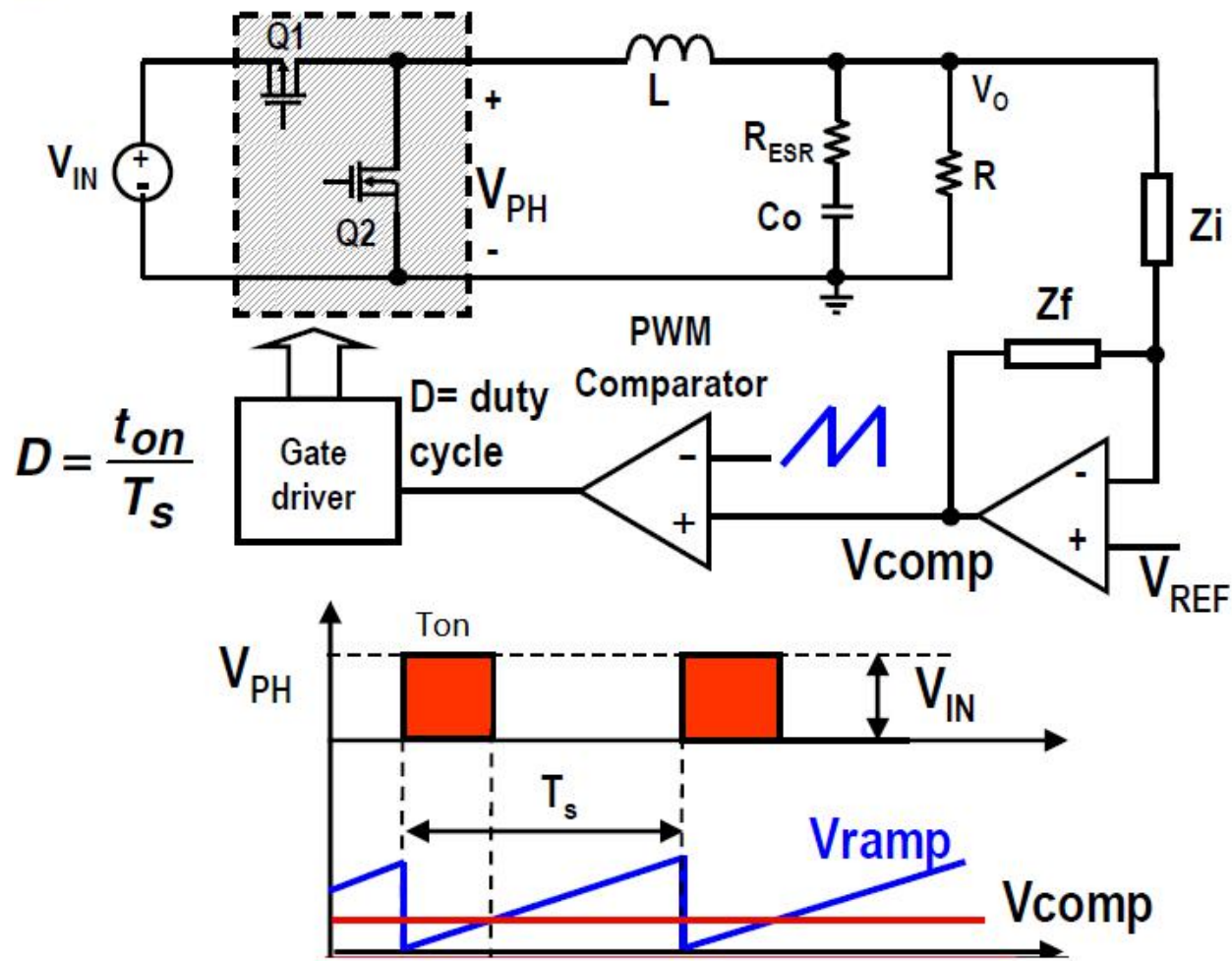
如何达到预期的输出功率？

第五讲：电压电流 控制模式



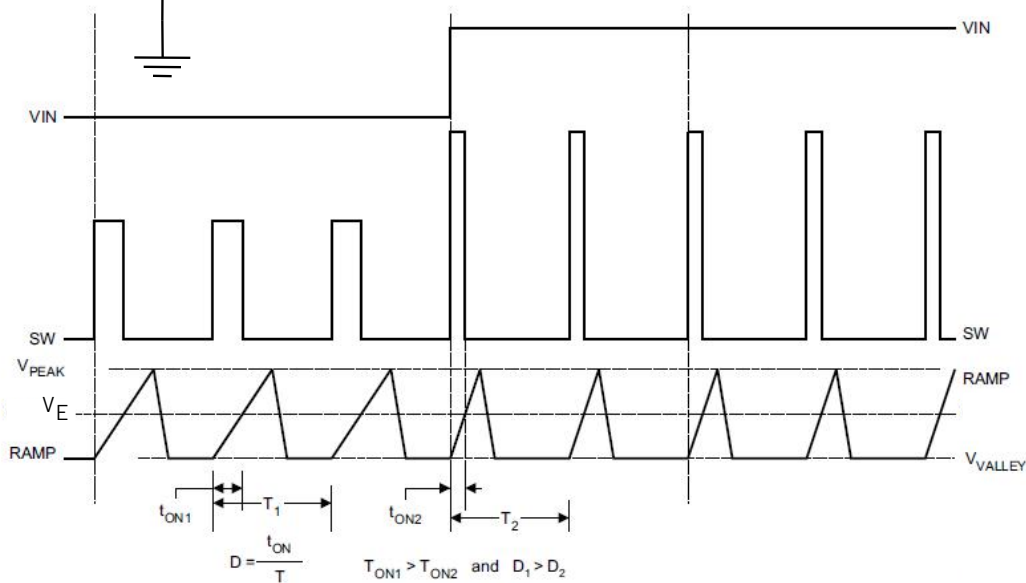
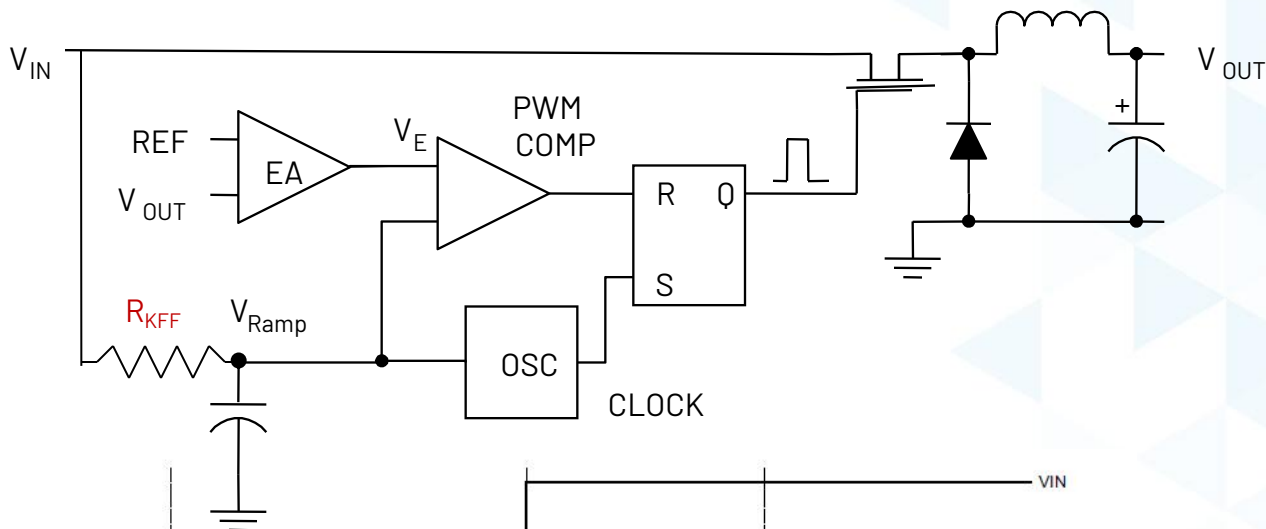
微信扫描二维码
获取课程观看链接

普通电压控制模式



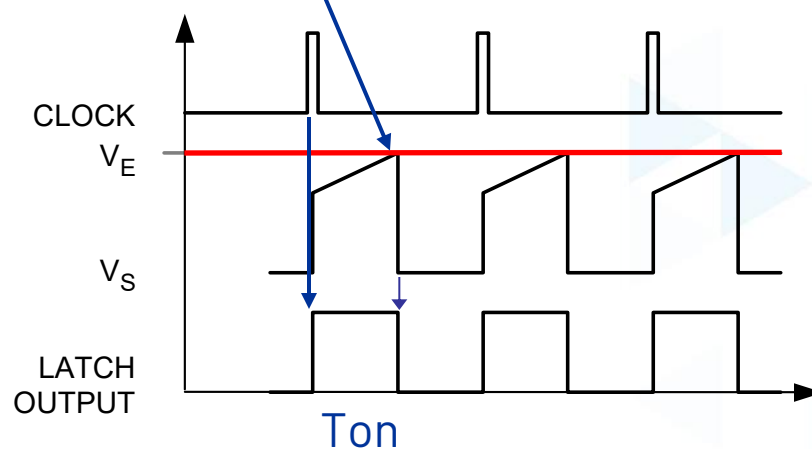
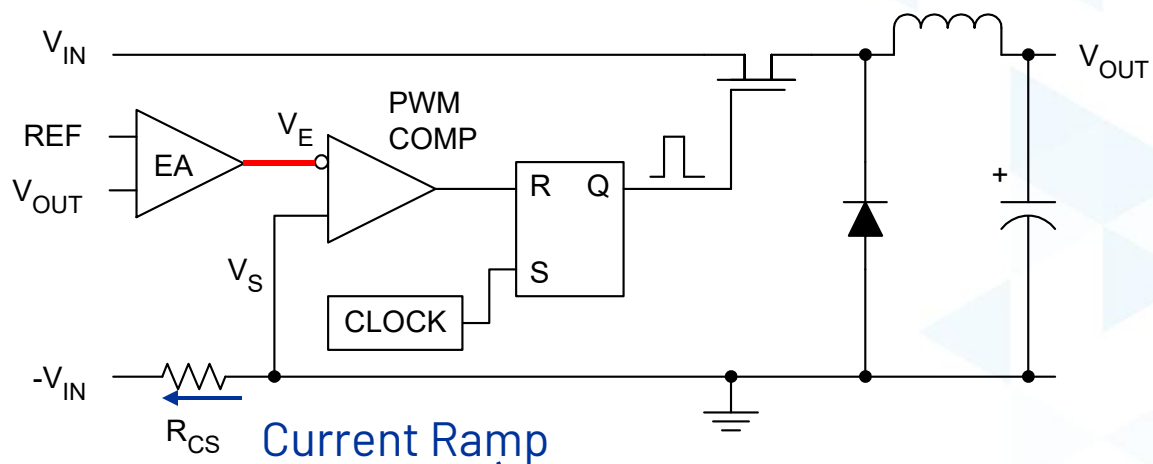
单反馈环路
高噪声抑制比
双极点补偿
 V_{in} 影响环路增益
无电流保护
不容易均流

前馈电压控制模式



Ramp不在是一个固定的
Ramp的斜率和 V_{IN} 成正比
快速的输入瞬态响应（不依赖于环路）
当输入电压加倍，占空比减半
双极点补偿
无电流保护
不容易均流

电流控制模式



优点

- 宽带宽，动态特性好
- 主功率级是一阶系统，容易补偿
- 自带逐周限流
- 自带电压前馈
- 容易实现多相，多芯片之间的均流

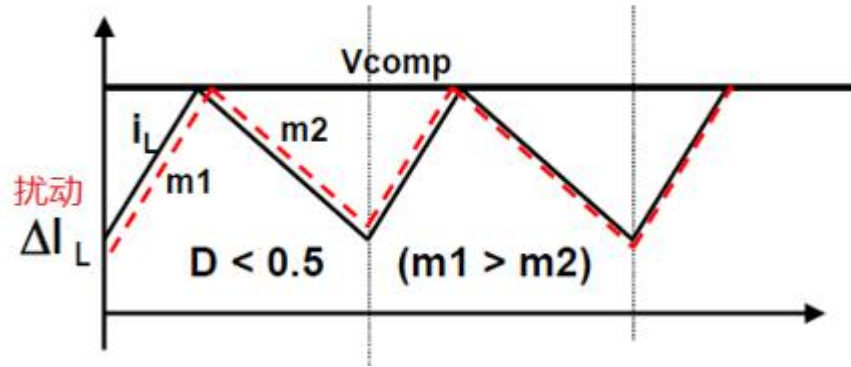
缺点

- 噪声敏感，更大的jitter
- 需要斜率补偿
- 需要blank time，极小占空比需要注意

电流模式问题1：斜坡补偿

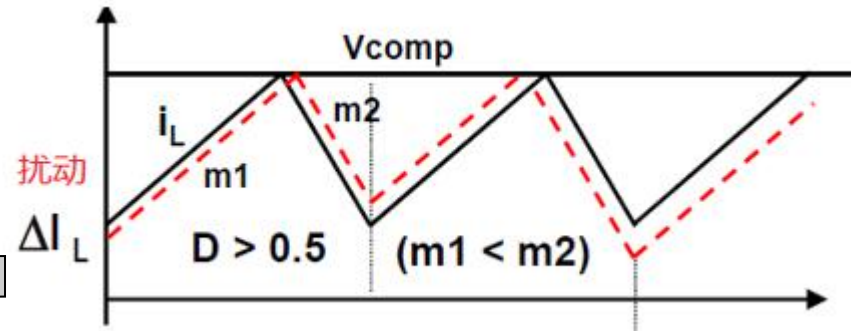
当系统出现扰动，在电流信号出现扰动，看扰动变化情况

$D < 0.5$



扰动变小

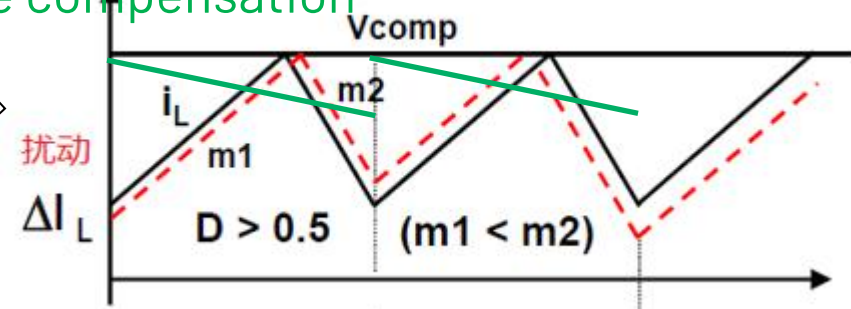
$D > 0.5$



扰动变大
占空比忽大忽小

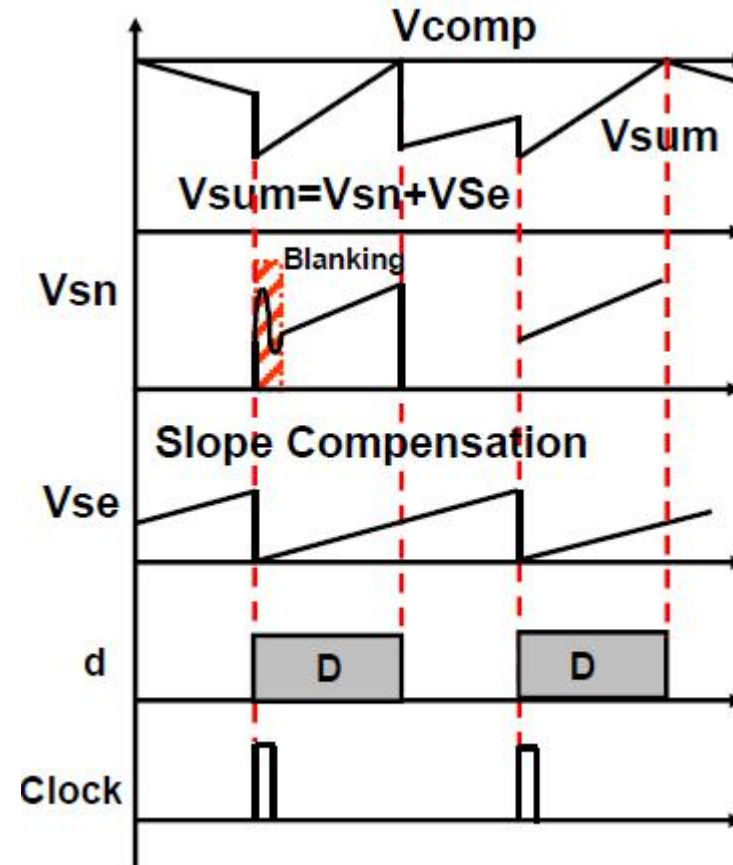
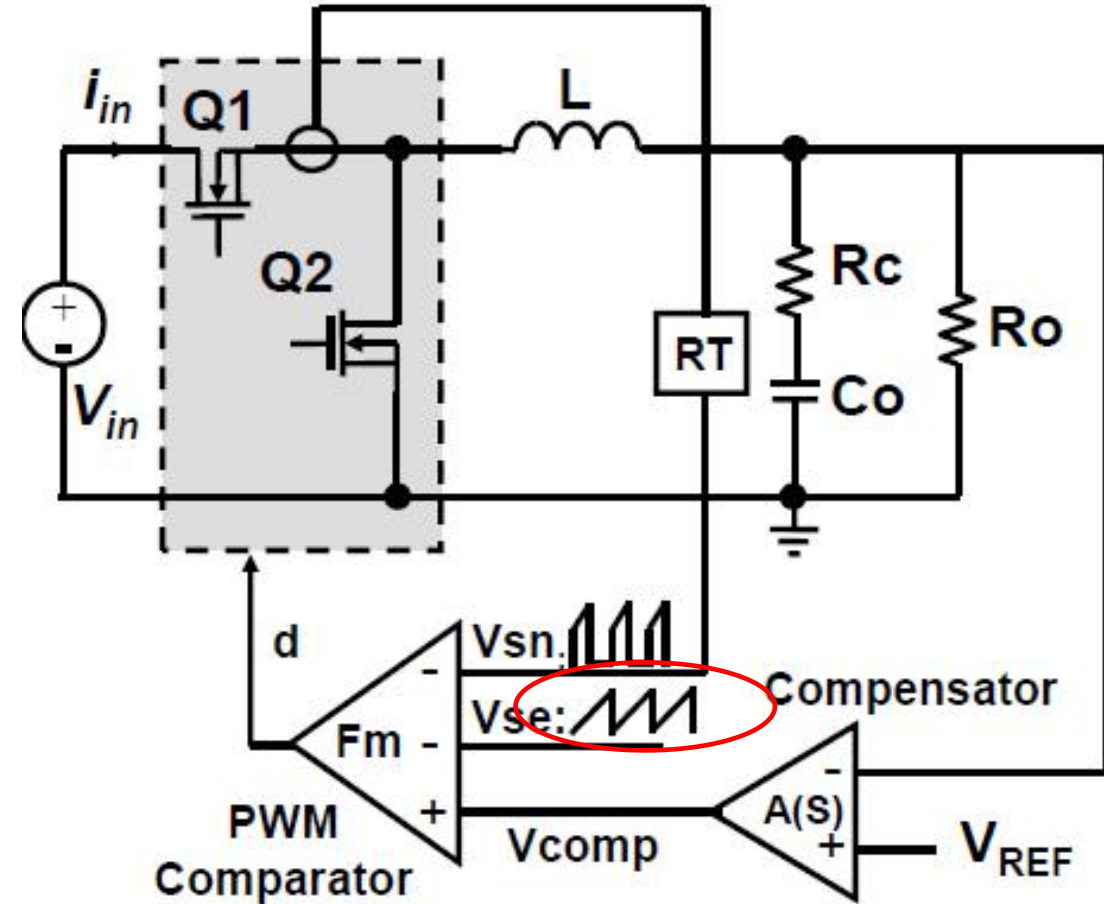
$D > 0.5$

Slope compensation



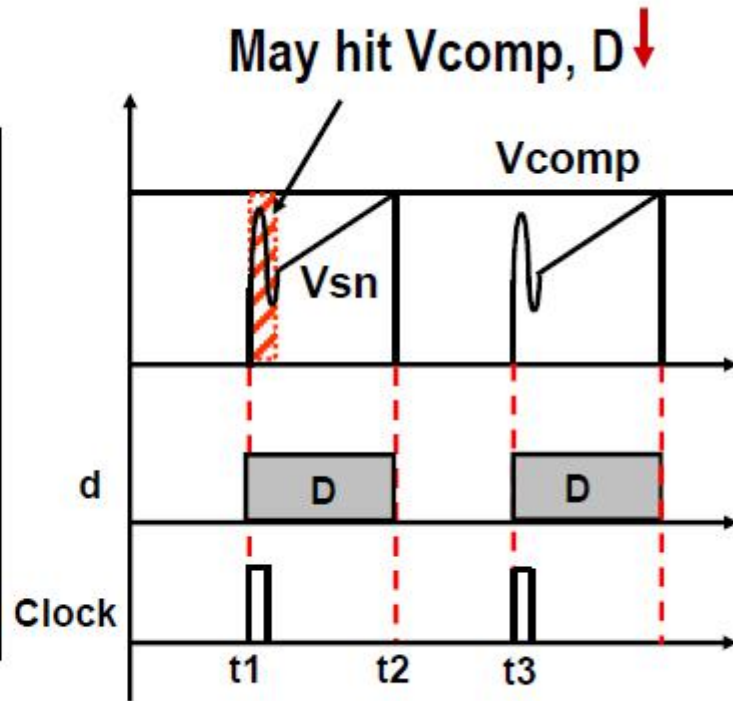
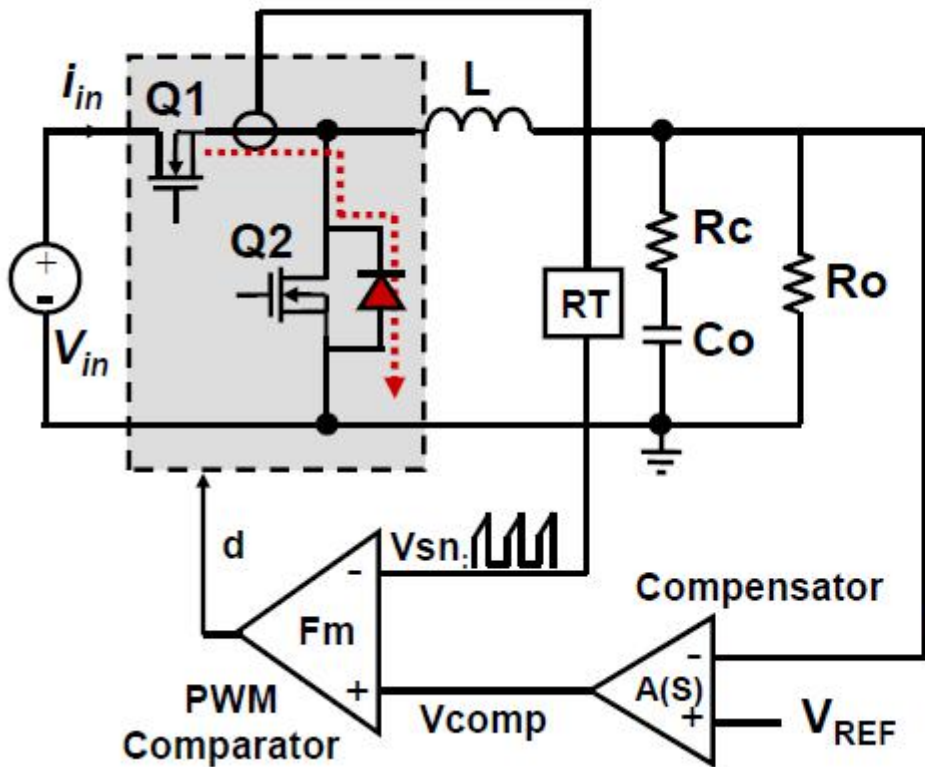
等效的 $m1 > m2$

电流模式问题1：斜坡补偿



Typically $S_e/S_n = 0.2 - 1$
 $S_e \gg S_n$: Voltage Mode
 $S_e \ll S_n$: Pure Current Mode

电流模式问题2：电流采样前沿尖峰



前沿尖峰产生原因：

Q2的体二极管

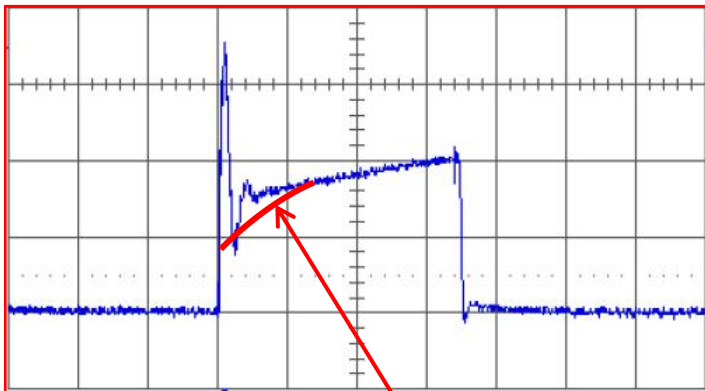
需要30-40ns的blank time

最小on-time受到影响

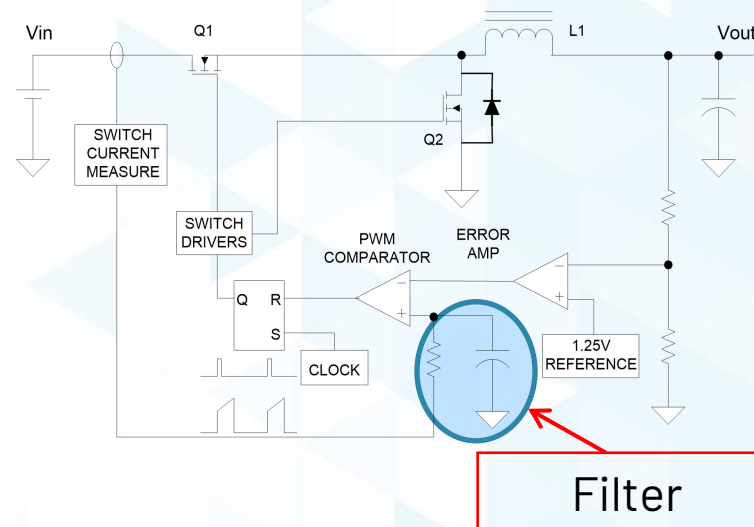
高频工作受到影响

电流模式问题2：前沿尖峰消除

通过RC滤波将前沿尖峰滤除

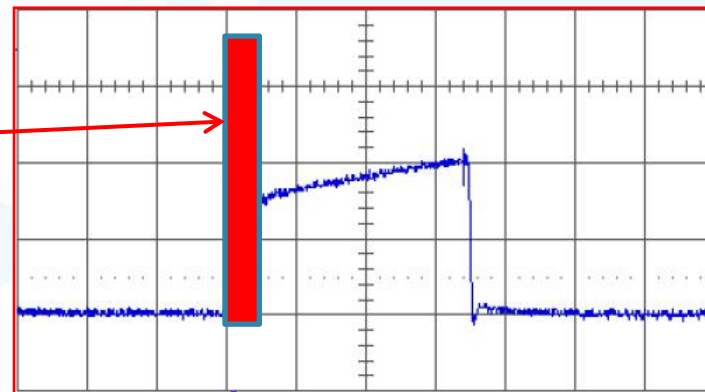


波形失真，对于极小占空比会是问题



使用前沿blanking

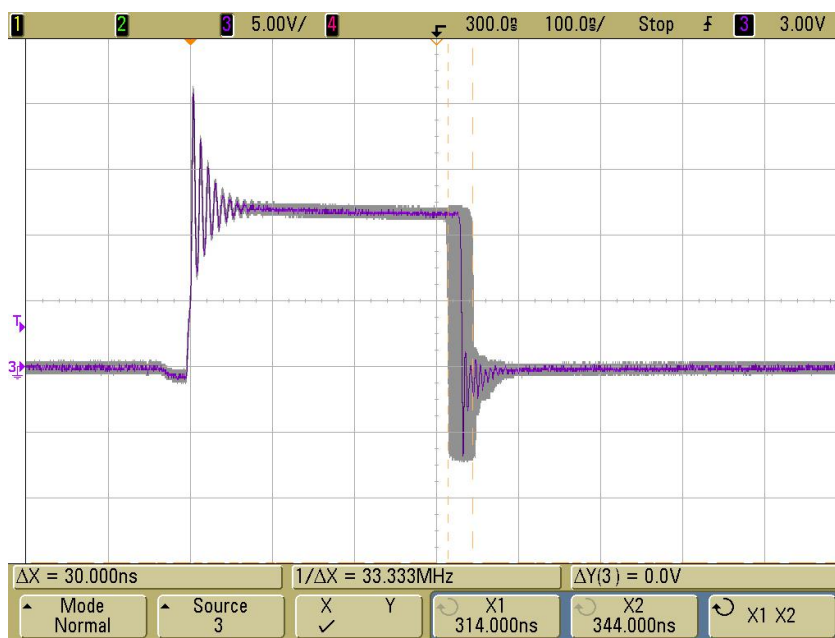
这部分小的占空比是不可用的
(high V_{in} to V_{out} ratios)



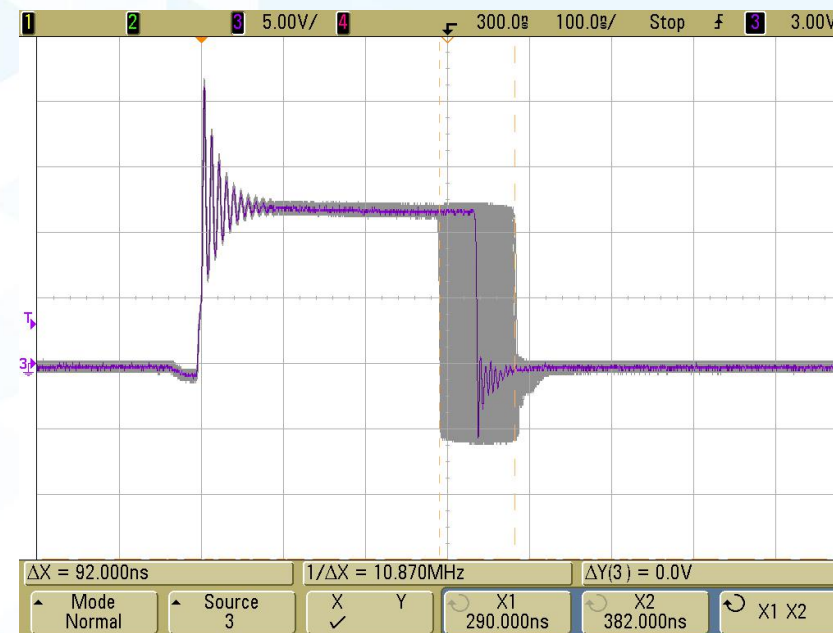
电流模式问题3: Jittering

指导: 电感选择需要一定的纹波

Optimized L = 0.4uH



Too Large L = 1.5uH



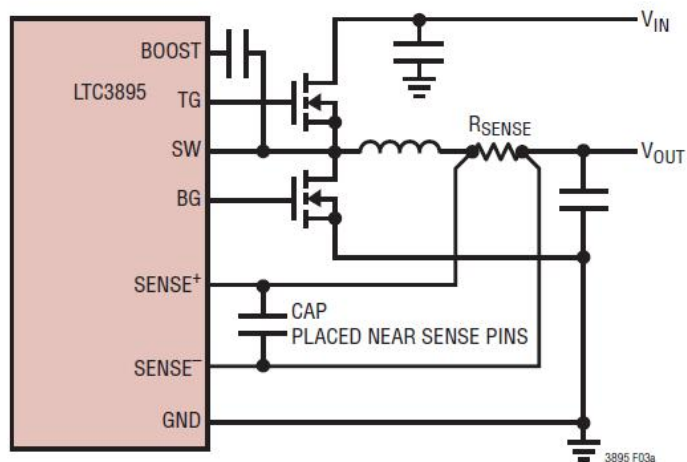
**Typically, $\geq 30\%$ (pk-pk / I_{o_max})
Inductor current ripple is desired**

电流模式电流采样

采样输出电感上的电流：没有前沿尖峰

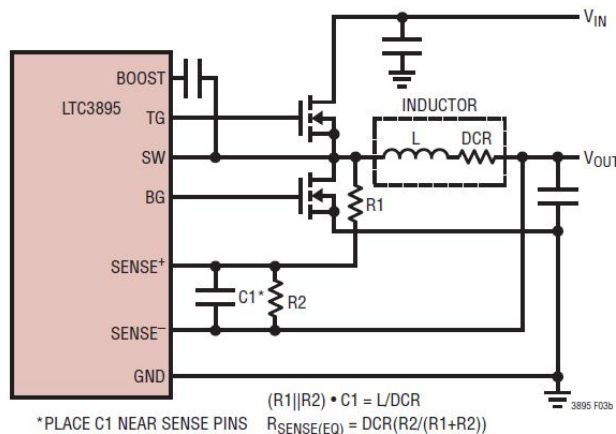
适用于控制器方案

电感DCR采样、串联电阻



(3a) Using a Resistor to Sense Current

电阻采样：
精度高
成本高
影响效率

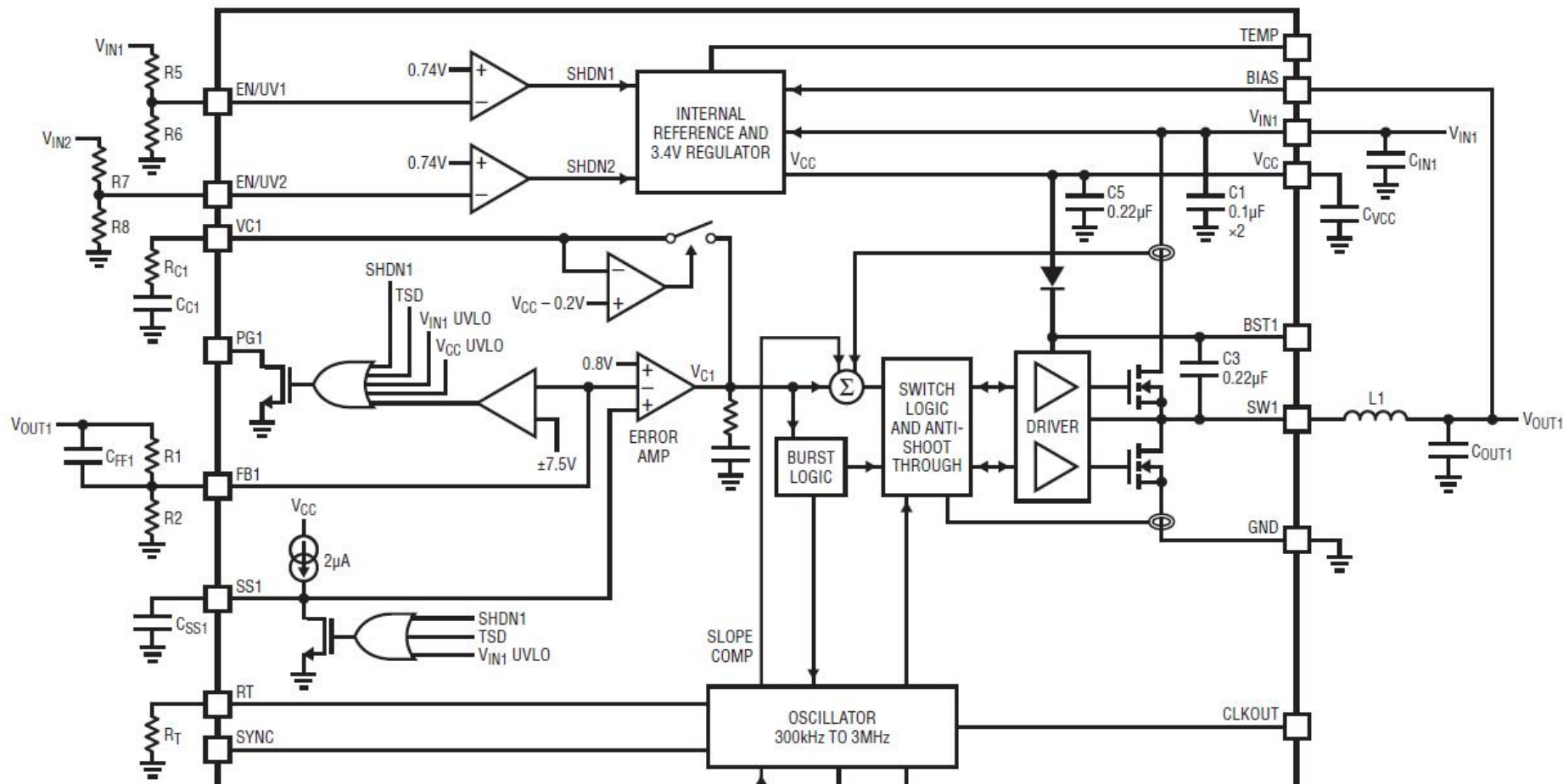


(3b) Using the Inductor DCR to Sense Current

电感DCR采样：
成本低
效率高
精度差

电流模式电流采样

采样开关管的电流：有前沿尖峰，适用于集成功率管方案

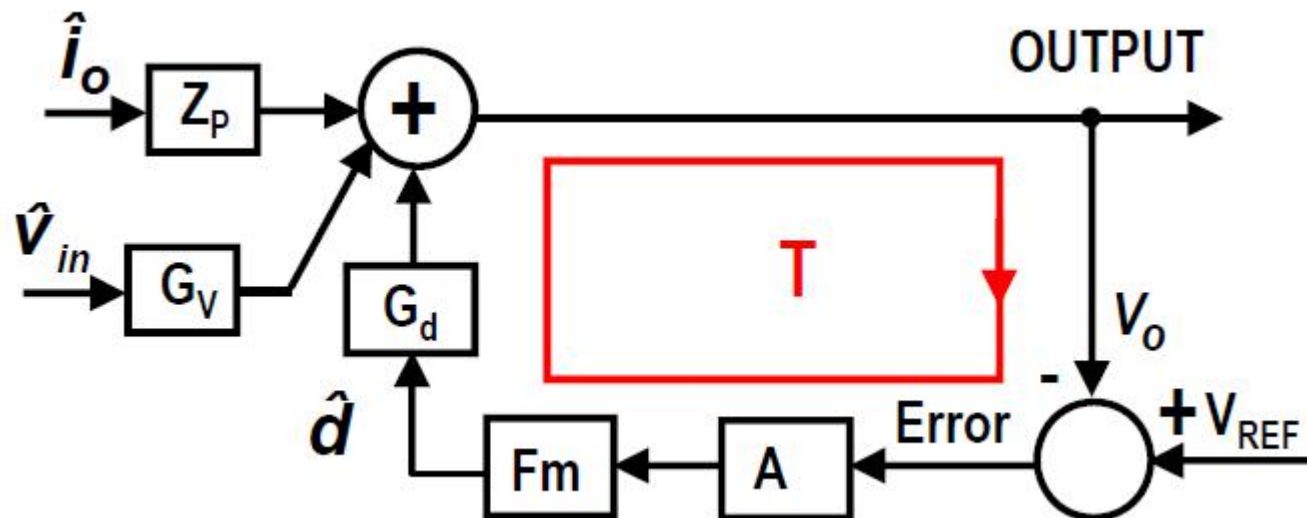


LT8650S 内部框图

$$\frac{\hat{v}_o}{\hat{i}_o} = \frac{Z_p}{1 + G_d F_m A} = \frac{Z_p}{1 + T}$$

$$\frac{\hat{v}_o}{\hat{v}_{in}} = \frac{G_v}{1 + G_d F_m A} = \frac{G_v}{1 + T}$$

Loop Gain: $T = F_m G_d A$



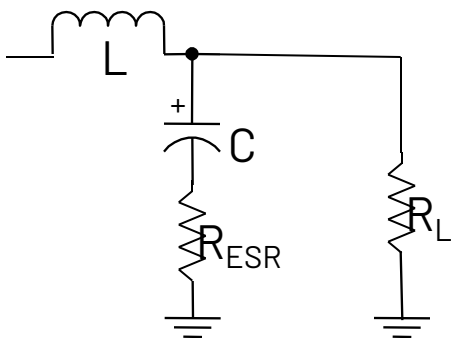
T不能等于-1 -20dB穿越, >45度相位裕度

利用对数波特图, 将乘除法变为加减法

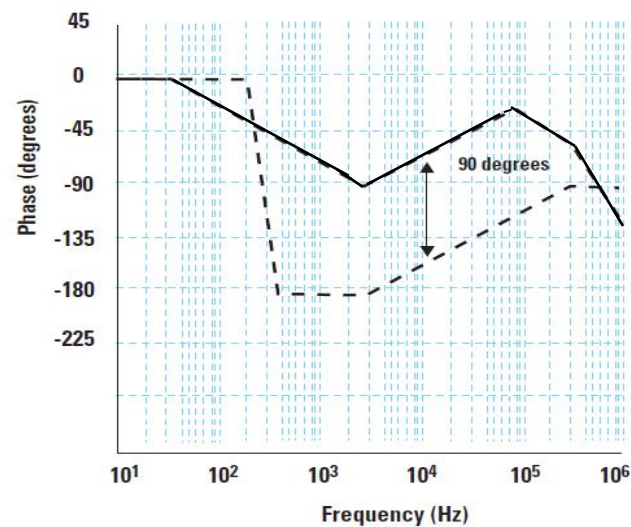
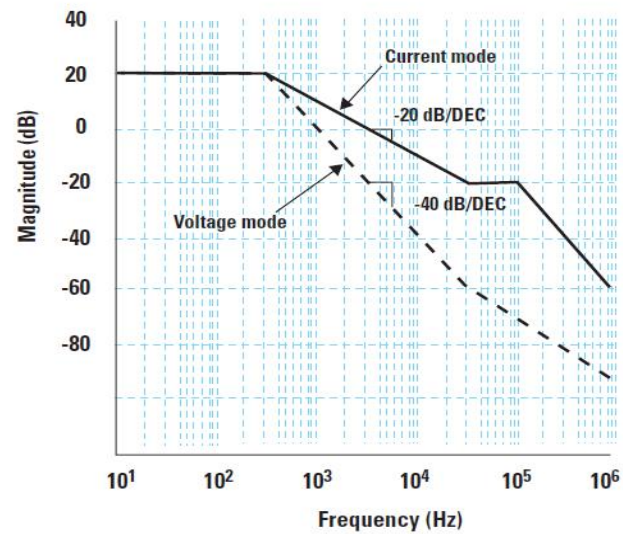
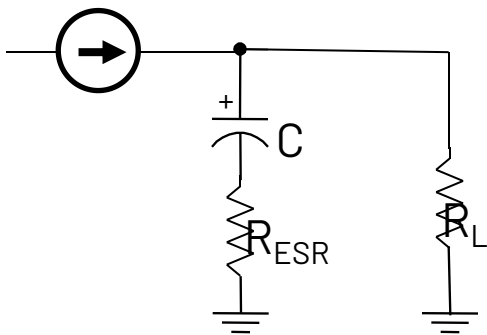
$$\log A + \log B = \log(A \times B) \quad \& \quad \log C - \log D = \log(C/D)$$

电压、电流模式功率级

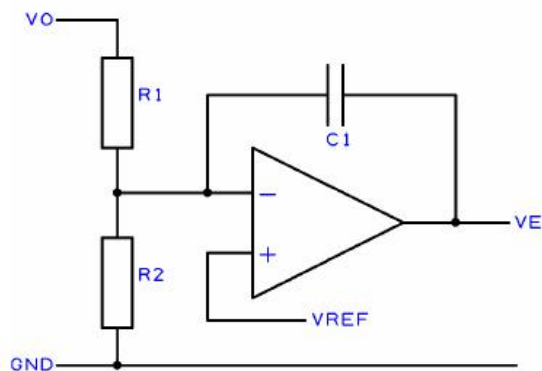
电压模式



电流模式



1型补偿



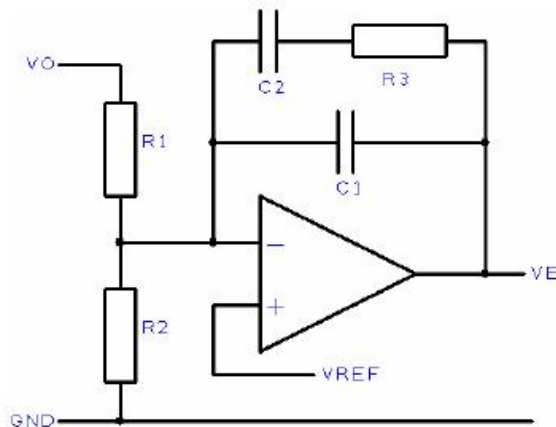
Type 1 Compensation

单极点补偿

最简单的补偿

较差的动态

将C1变大可以稳定系统



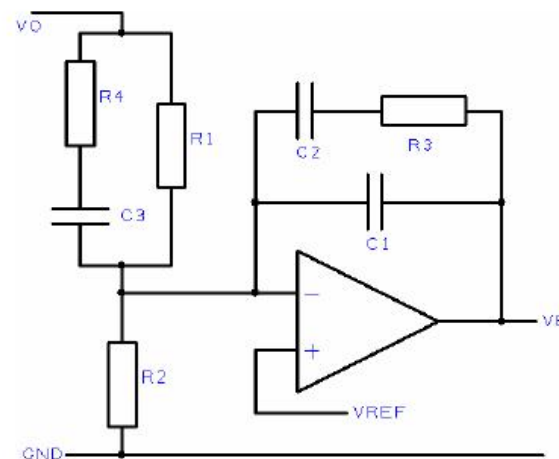
Type 2 Compensation

1零点, 2极点补偿

零点可以用来补偿功率极点

极点抵消ESR零点

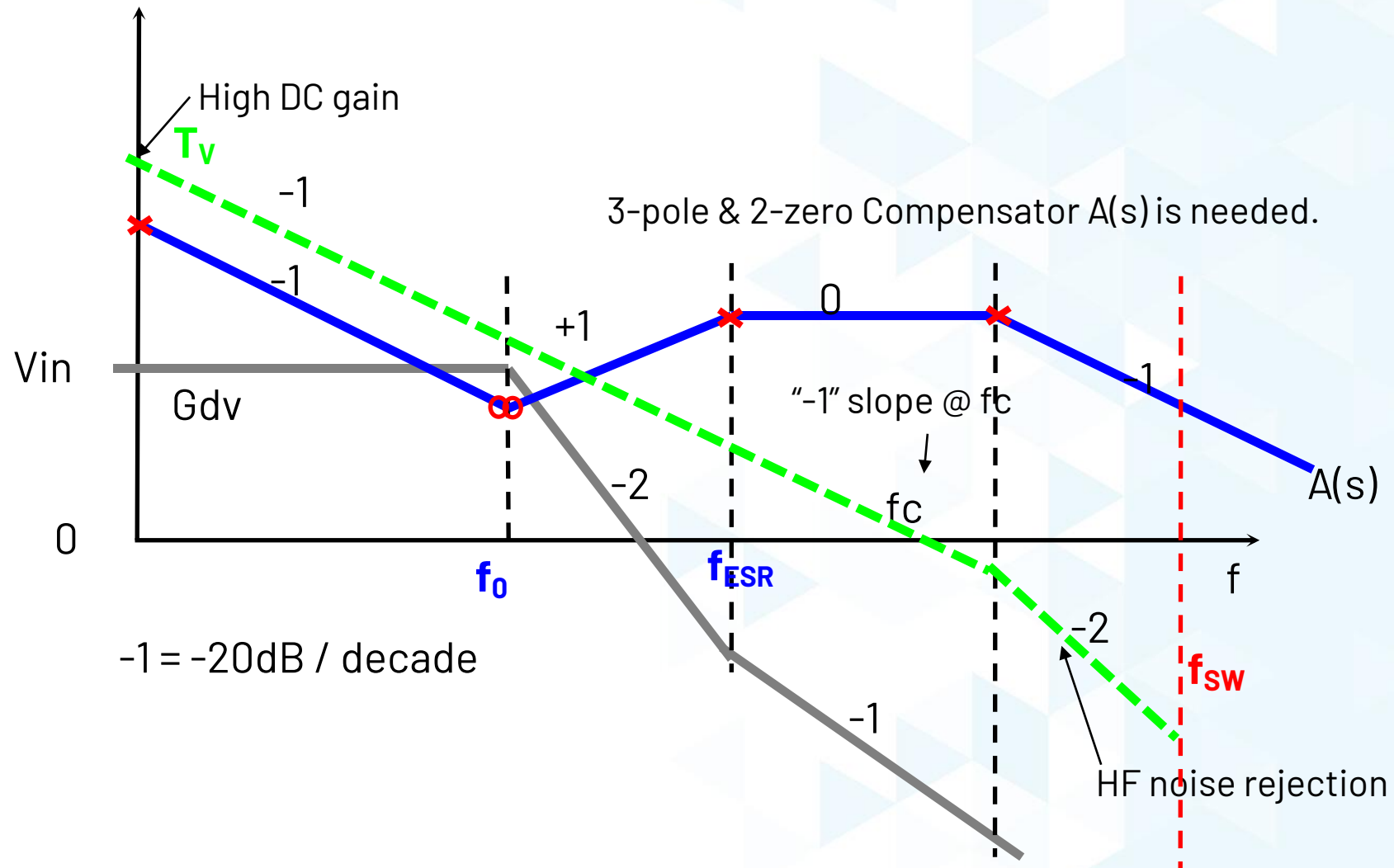
主要用于电流模式



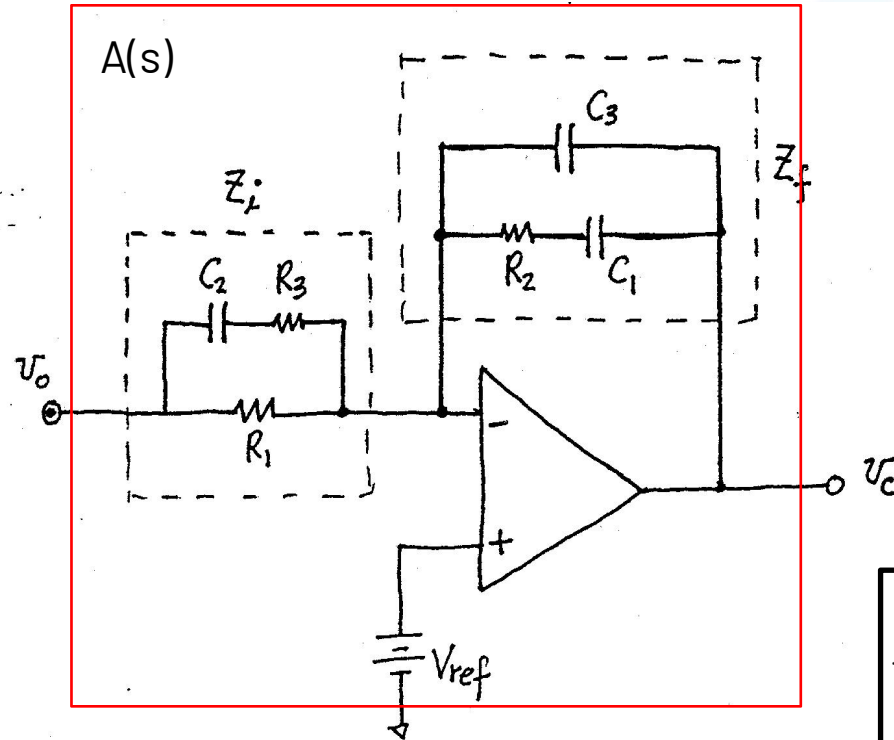
Type 3 Compensation

- 需要更多的外部器件
- 两零点、三级点补偿
- 适用于电压模式

电压控制模式



电压控制模式



$$\frac{\hat{v}_c}{\hat{v}_o} = -\frac{Z_f}{Z_i}$$

$$Z_i = R_1 \parallel \left(\frac{1}{sC_2} + R_3 \right)$$

$$Z_f = \frac{1}{sC_3} \parallel \left(\frac{1}{sC_1} + R_2 \right)$$

3-Pole, 2-Zero

$$\frac{\hat{v}_c}{\hat{v}_o} = -\frac{\omega_l (1 + s/\omega_{z1})(1 + s/\omega_{z2})}{s (1 + s/\omega_{p1})(1 + s/\omega_{p2})}$$

where:

$$\omega_{z1} = \frac{1}{R_2 C_1}, \quad \omega_{z2} = \frac{1}{C_2 (R_1 + R_3)}$$

$$\omega_l = \frac{1}{R_1 (C_1 + C_3)}$$

$$\omega_{p1} = \frac{1}{R_3 C_2}, \quad \omega_{p2} = \frac{1}{R_2 \cdot \frac{C_1 C_3}{C_1 + C_3}}$$

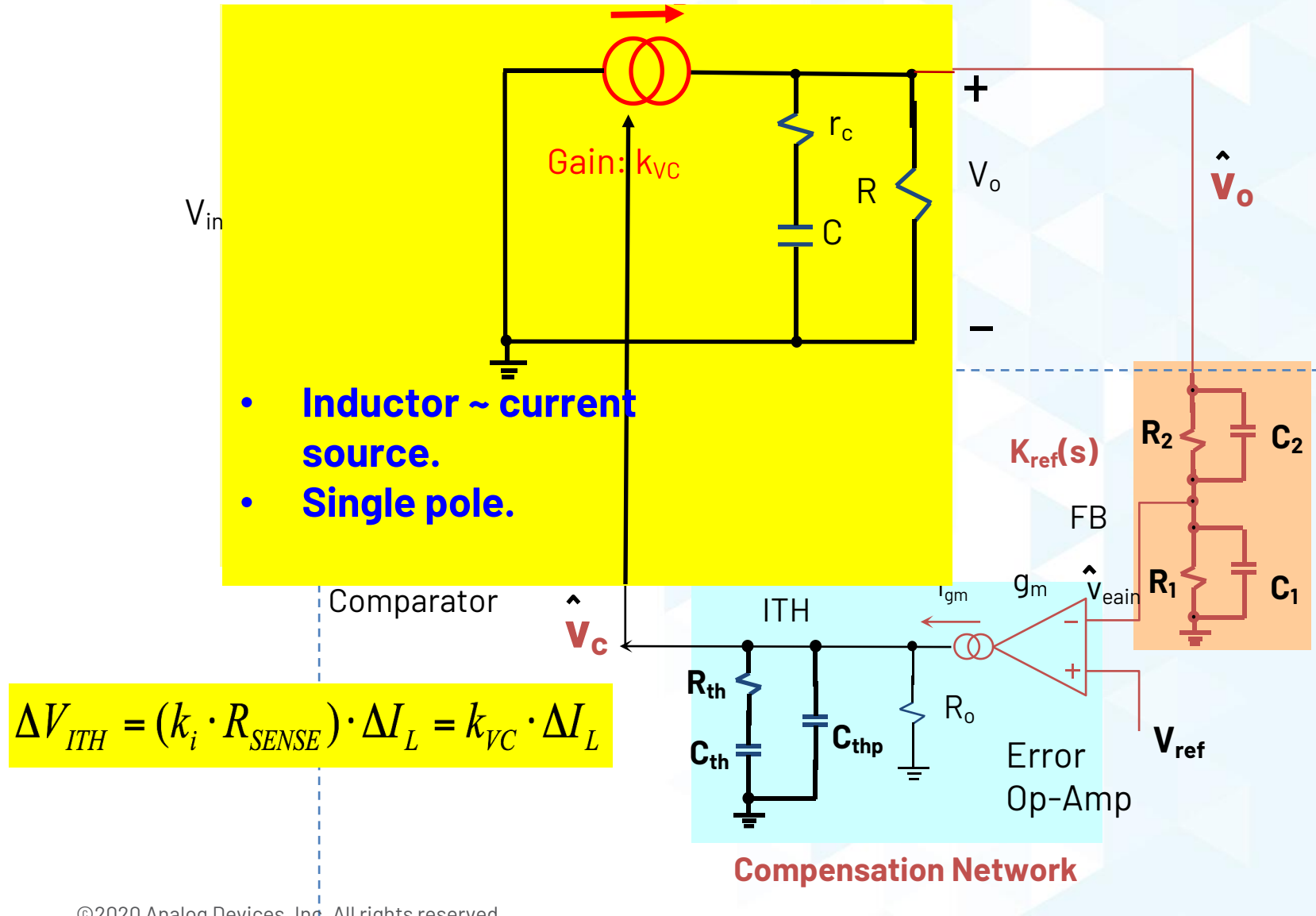
Complicated!

**ANALOG
DEVICES**

AHEAD OF WHAT'S POSSIBLE™



电压控制模式



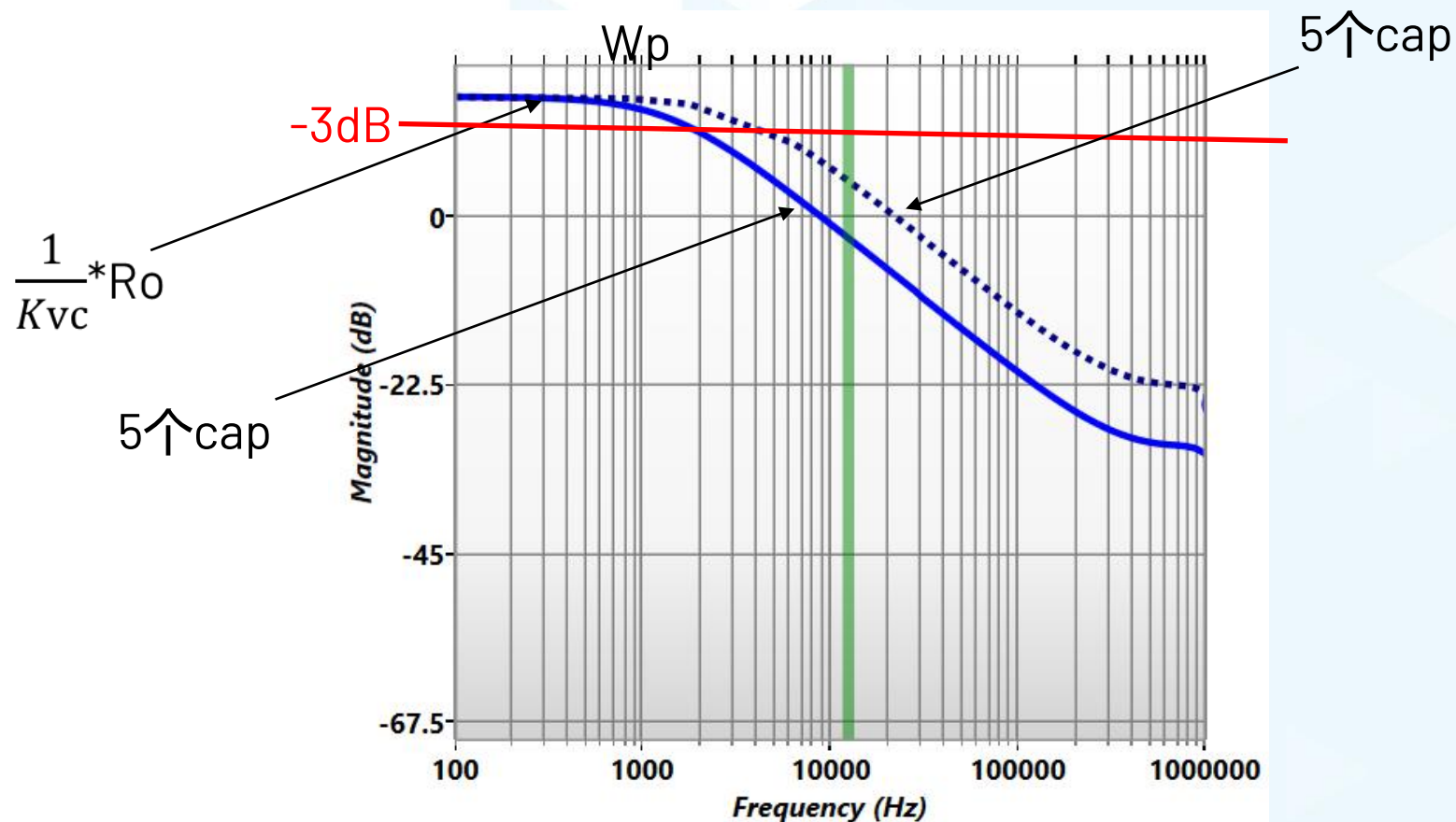
电流控制模式-主功率级函数

- 电感不参与，电感类似一个恒流源，一阶系统

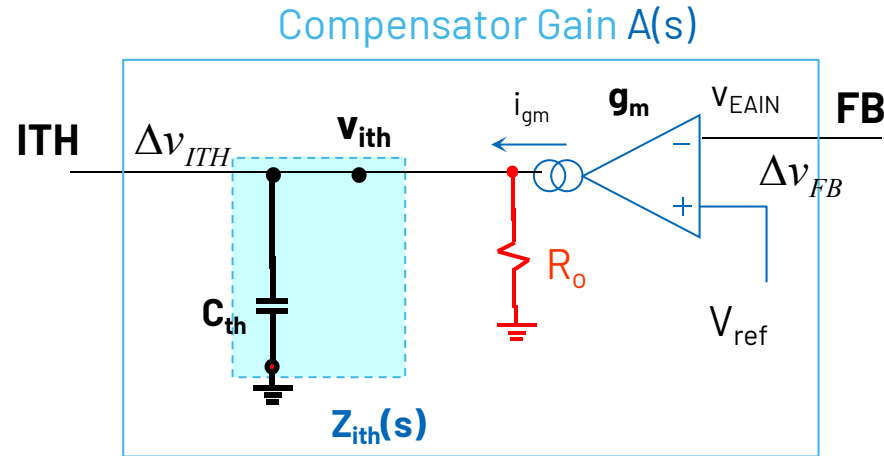
$$G_{dv} = \frac{1}{K_{vc}} * R_o * \frac{1+S/W_z}{1+S/W_p}$$

$$W_z = \frac{1}{ESR * C_{out}}$$

$$W_p = \frac{1}{R_o * C_{out}}$$

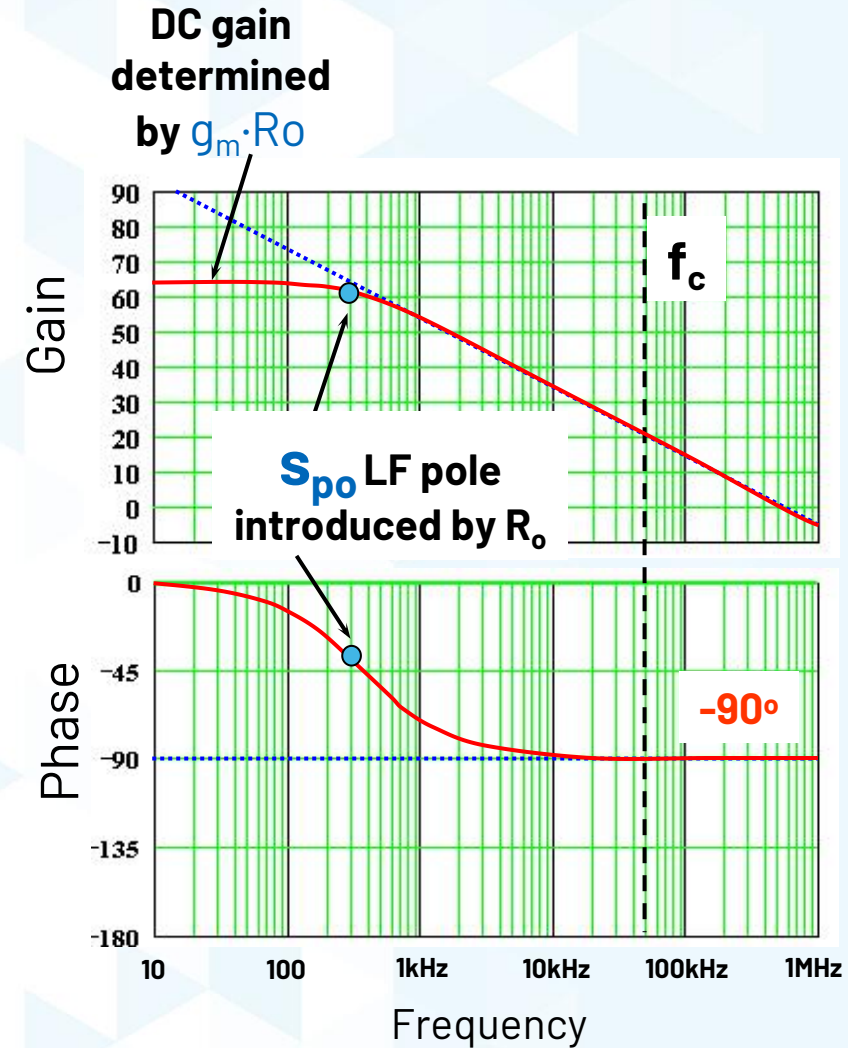


电流控制模式--ITH Compensation – LF Pole



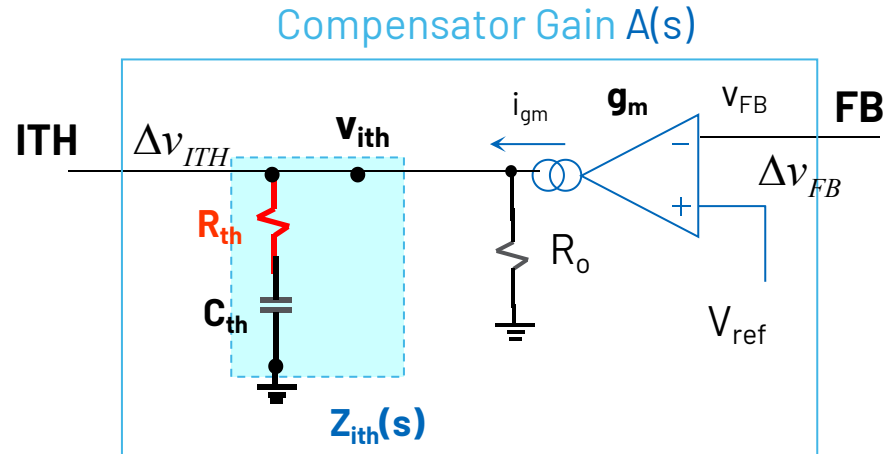
$$A(s) = -g_m \cdot R_o \cdot \frac{1}{\left(1 + \frac{s}{s_{po}}\right)} \quad s_{po} = \frac{1}{R_o \cdot C_{th}}$$

- g_m Op-Amp adds a low frequency pole
- Still -90° phase delay @ f_c



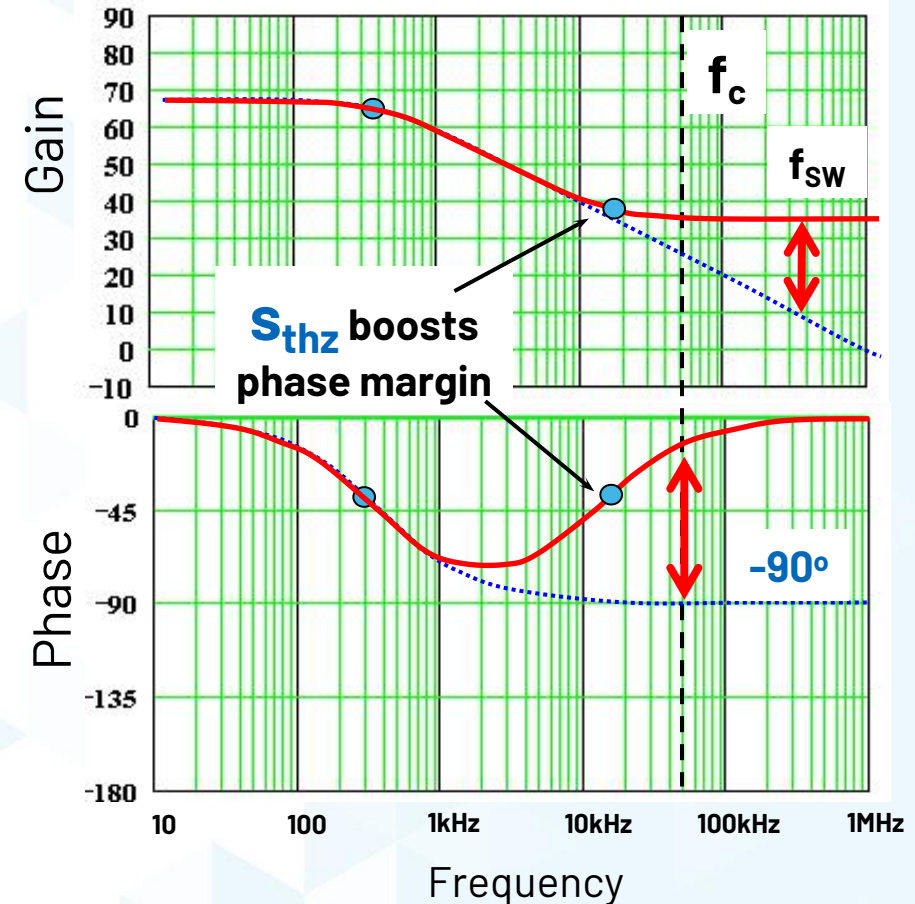
ITH Compensation – Add Zero for

Phase

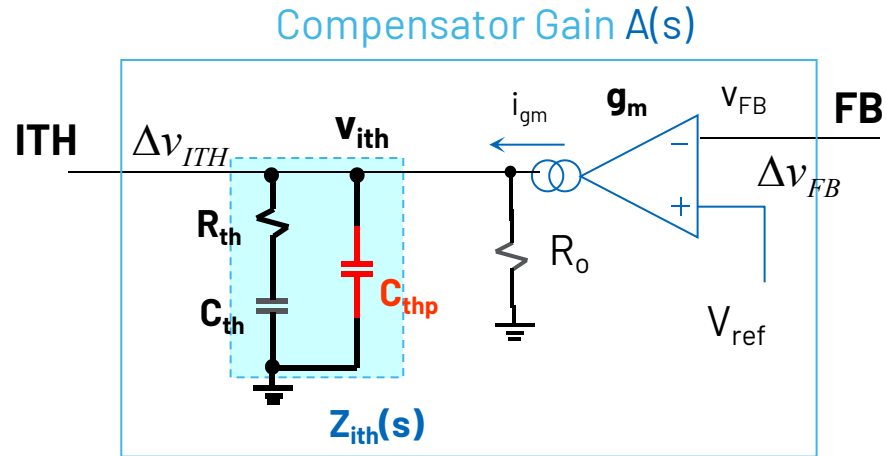


$$A(s) = -g_m \cdot R_o \cdot \frac{1 + \frac{s}{s_{thz}}}{\left(1 + \frac{s}{s_{po}}\right)} \quad s_{thz} = \frac{1}{R_{th} \cdot C_{th}}$$

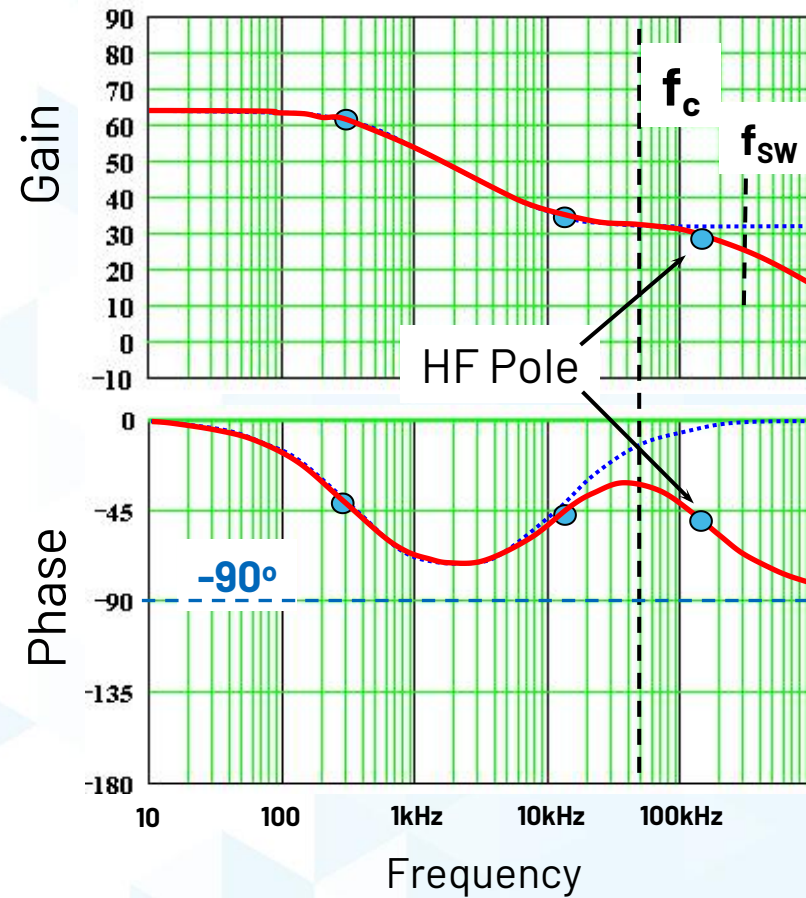
- Adds a zero before / around f_c to boost up phase
- Increased gain @ high frequency



电流控制模式--ITH Compensation – HF Pole

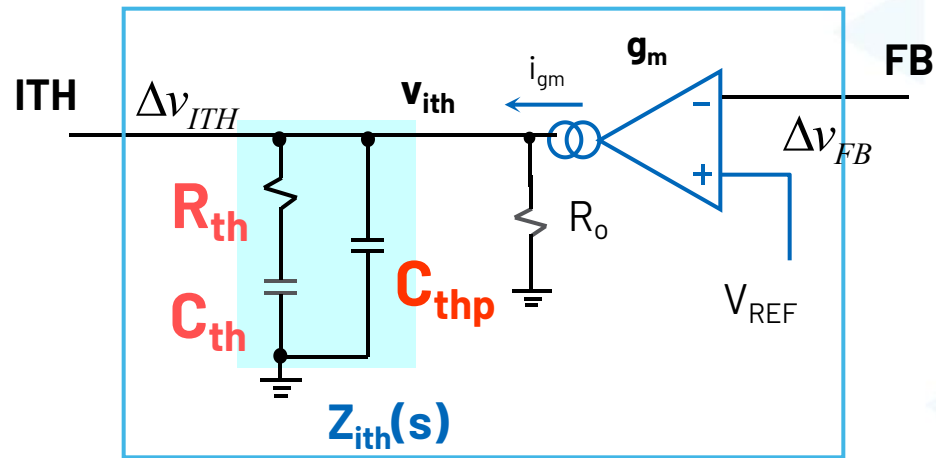


$$A(s) = -g_m \cdot R_o \cdot \frac{1 + \frac{s}{s_{thz}}}{\left(1 + \frac{s}{s_{po}}\right) \cdot \left(1 + \frac{s}{s_{thp}}\right)}$$



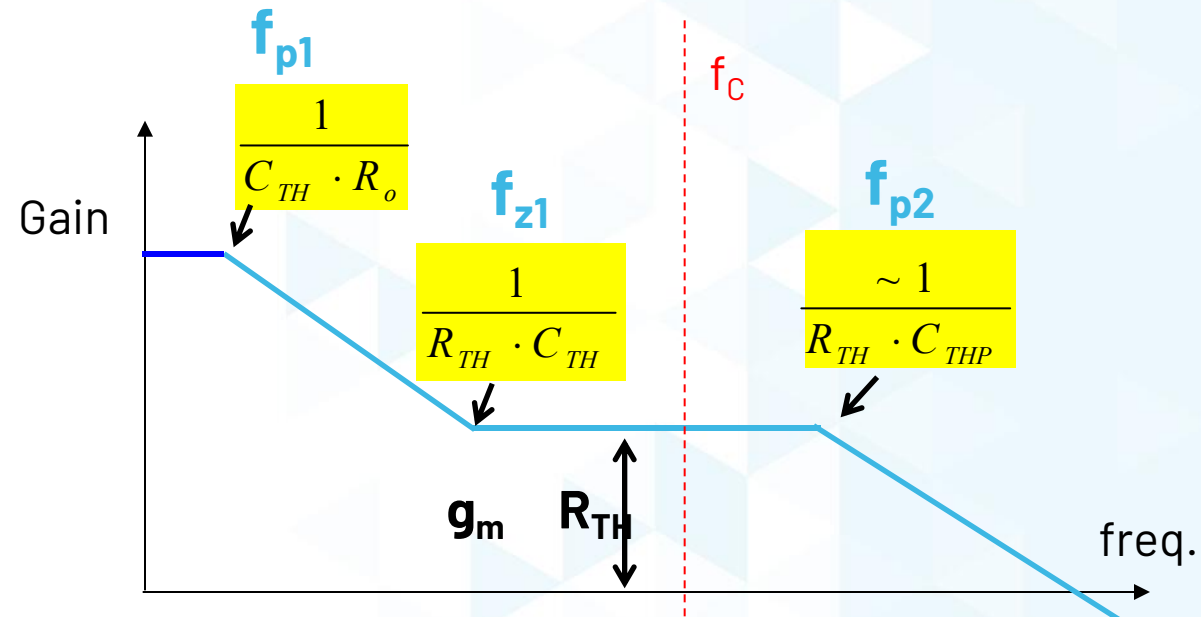
$$s_{thp} = \frac{C_{th} + C_{thp}}{R_{th} \cdot C_{th} \cdot C_{thp}} \approx \frac{1}{R_{th} \cdot C_{thp}}$$

Type II Compensation Summary



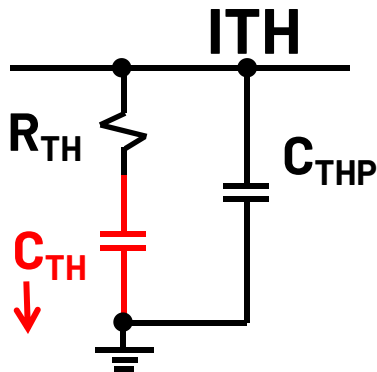
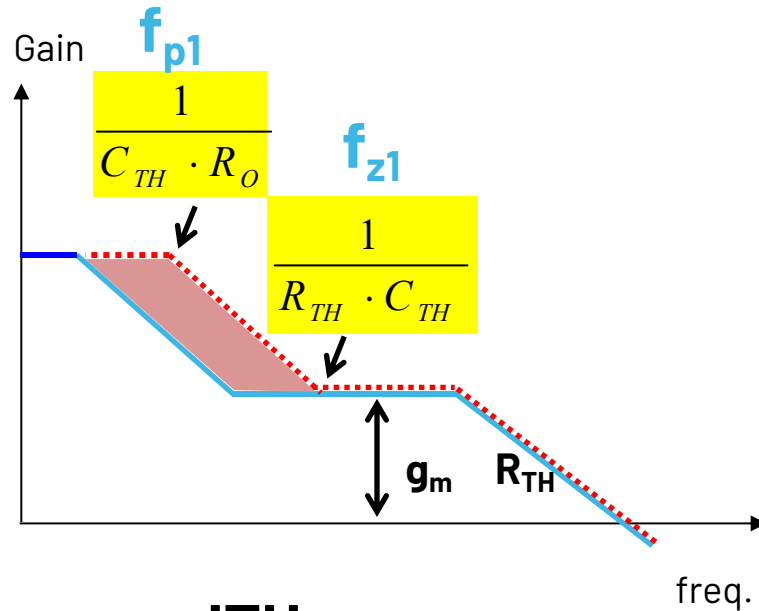
Type II Compensation

$$A(s) = -g_m \cdot R_o \cdot \frac{1 + \frac{s}{s_{thz}}}{\left(1 + \frac{s}{s_{po}}\right) \cdot \left(1 + \frac{s}{s_{thp}}\right)}$$

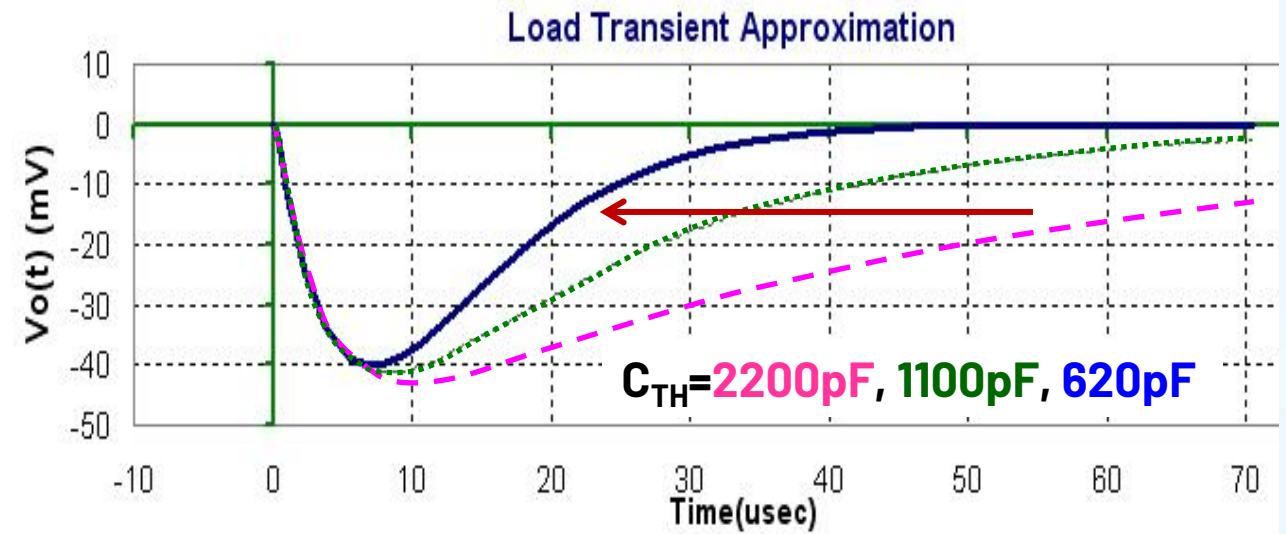


How about load step response?

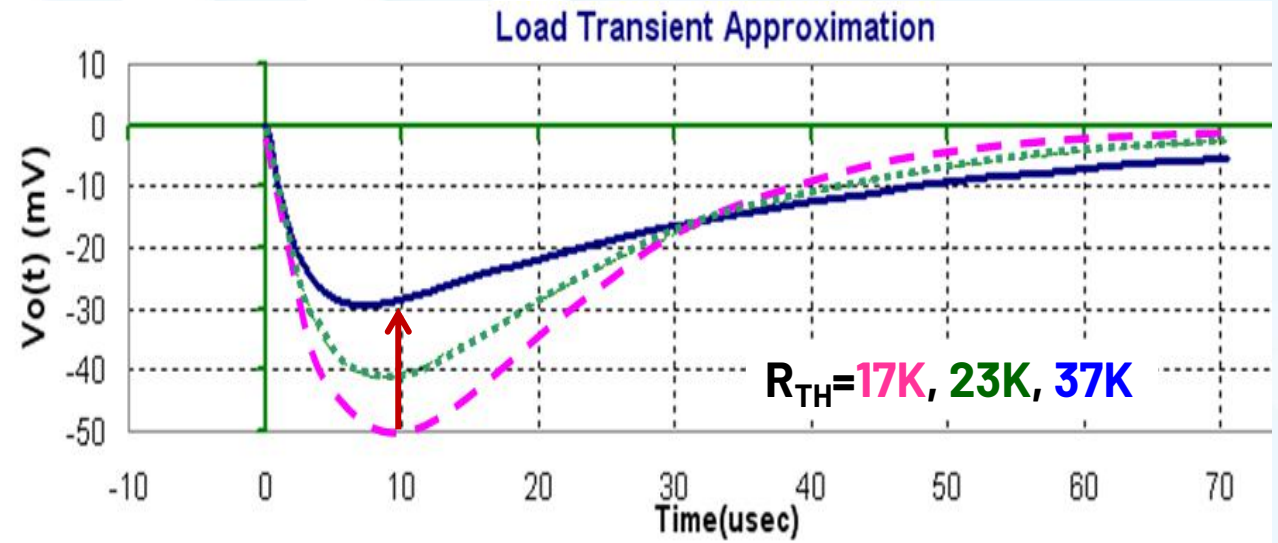
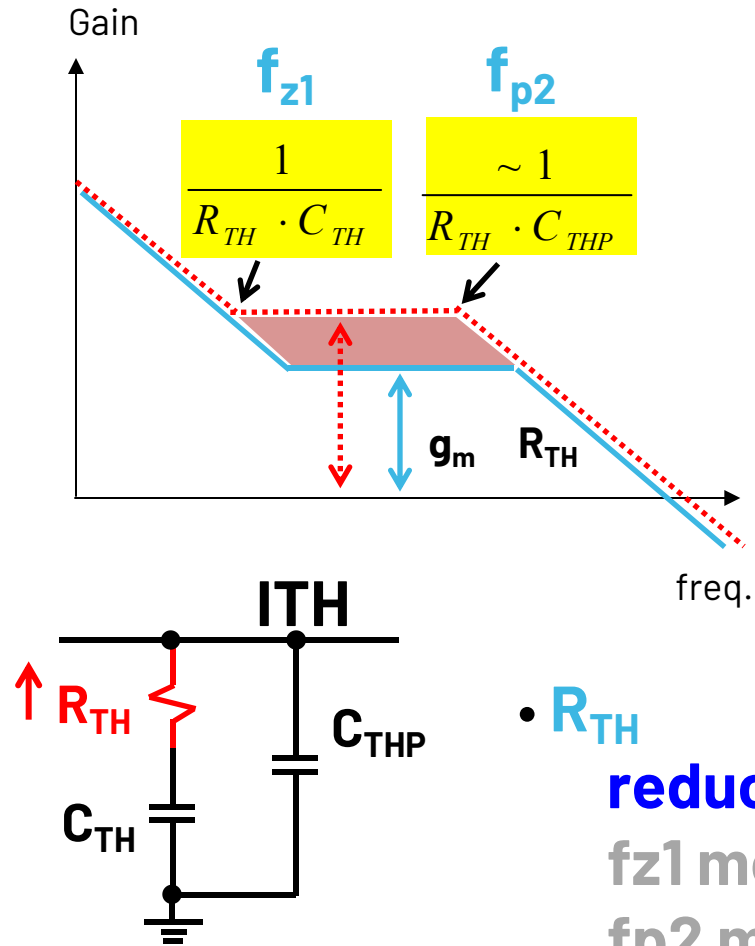
电流控制模式--Type II Compensation Summary



- C_{TH} LF gain
→ f_{z1} moves to HF. May hurt phase margin.
reduce V_o settling time. Less impact on ΔV_o .

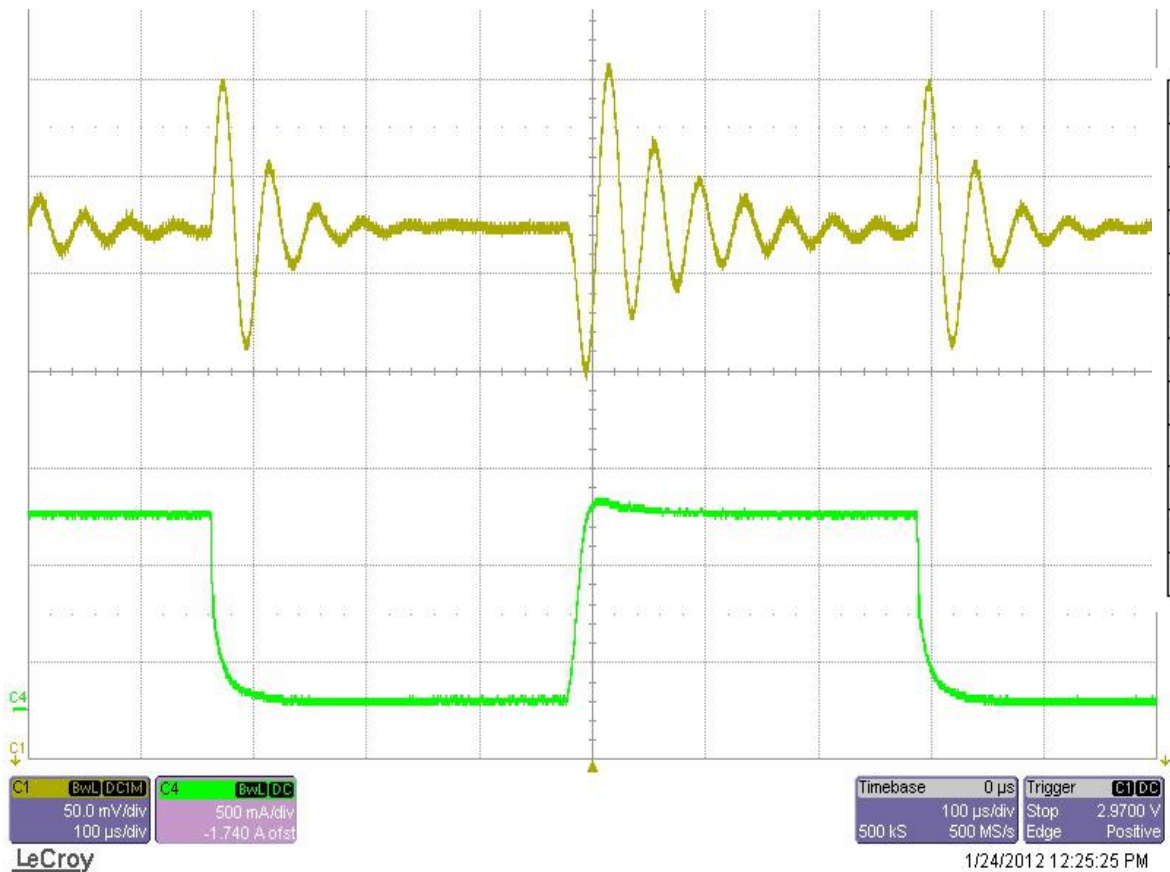


电流控制模式--Type II Compensation Summary



- R_{TH} gain (@ freq. ~ BW).
reduce V_o overshoot/undershoot (ΔV_o).
 f_{z1} moves to LF, more phase lead.
 f_{p2} moves to LF, hurts phase margin.

初略地评估环路



Phase Margin (Degrees)	Ringing (Bumps)
80.88	0
60.75	0
57.64	0
54.08	0
50.16	1
45.7	1.5
40.61	2
34.72	3
27.78	4
19.43	6
9.09	17

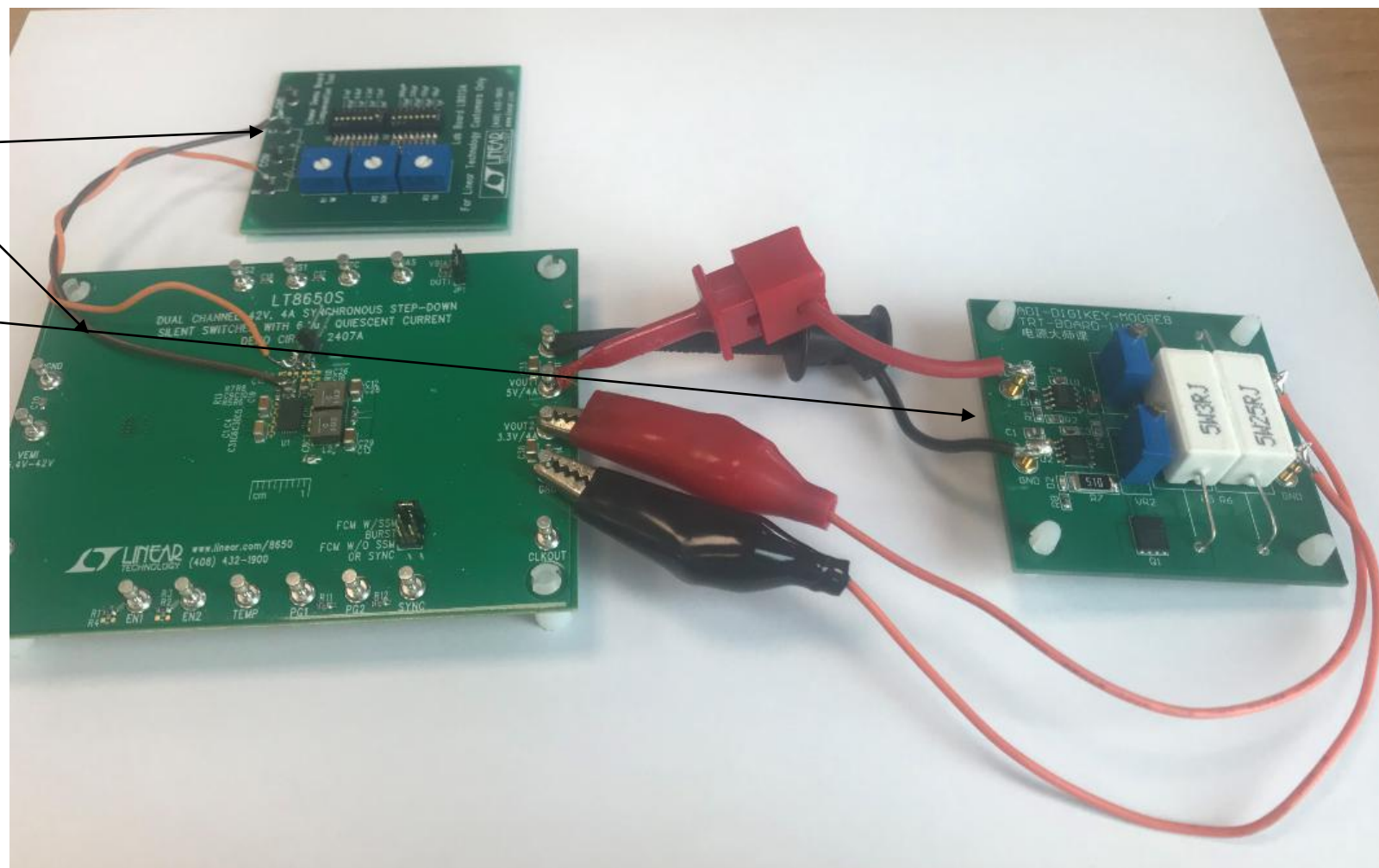
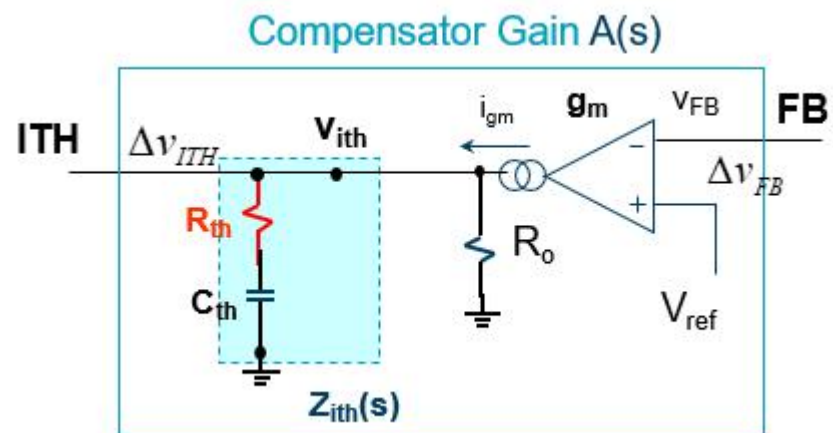
初略地评估环路

LT8650S Demo (电流型控制)

RC补偿网路

动态负载 (0A-1.7A)

改变 R_{th} 和 C_{th} 看对环路的影响



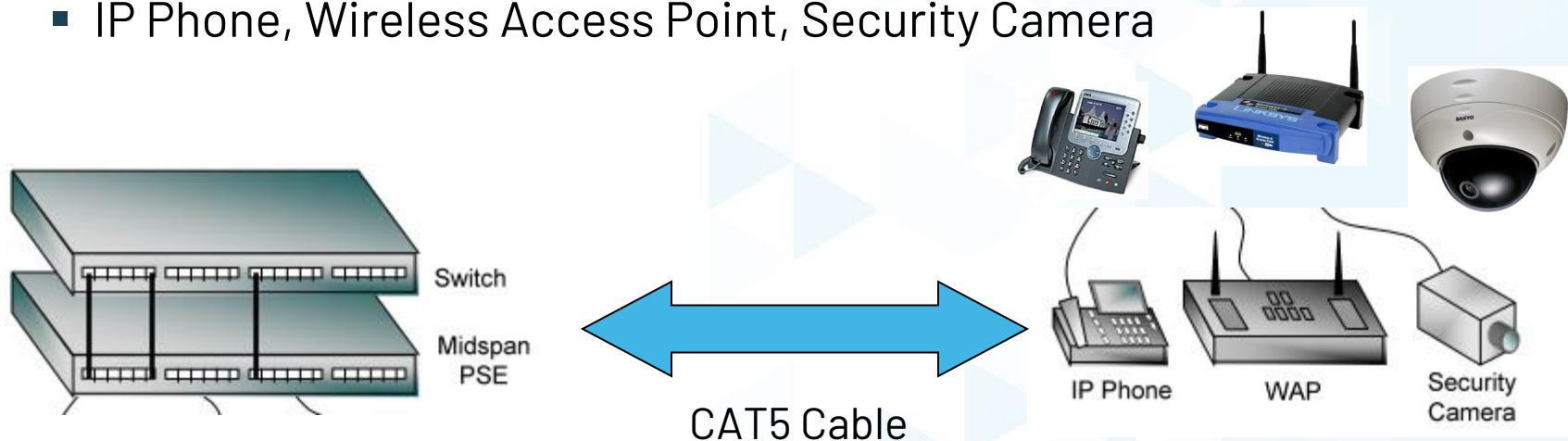
第六讲：POE基础 介绍



微信扫描二维码
获取课程观看链接

什么是POE?

- ▶ 定义
 - 通过现有的数据线提供供电
 - IEEE 802.3at 通用标准
- ▶ Power Sourcing Equipment (PSE)
 - Ethernet Router, Switch, Hub
- ▶ Powered Device (PD)
 - IP Phone, Wireless Access Point, Security Camera



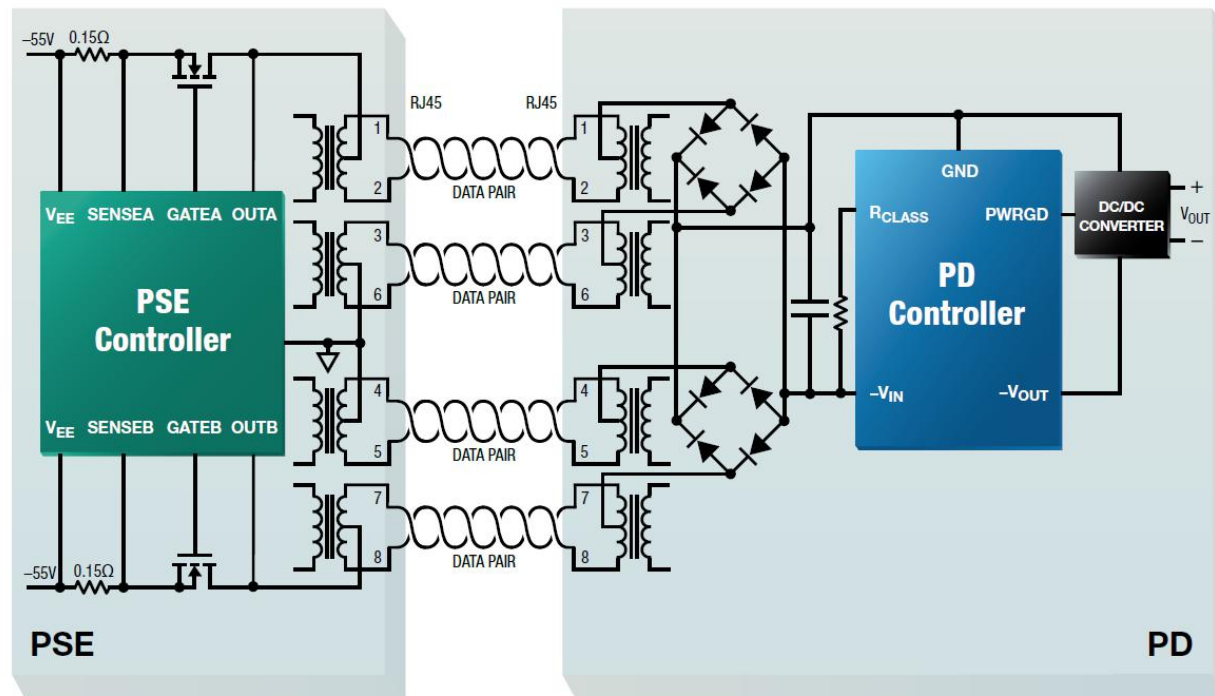
Power Over Ethernet (PoE) 概述

PSE

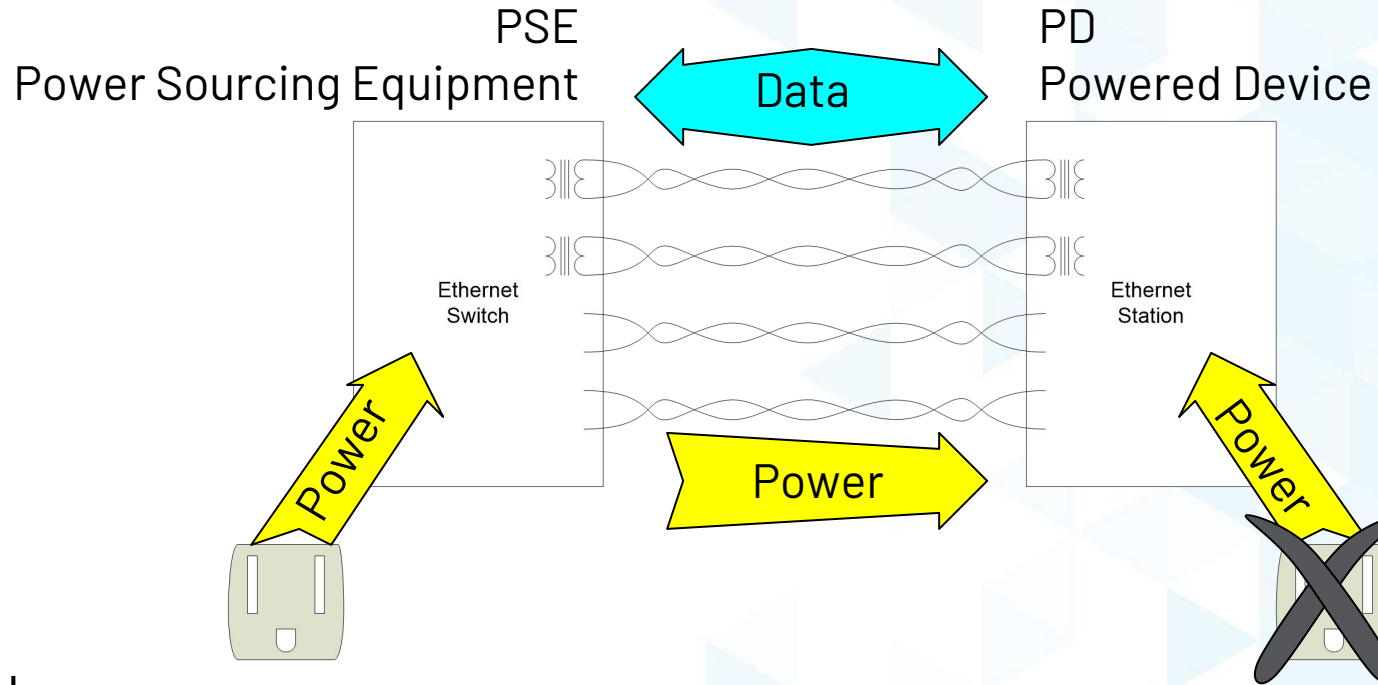
- ▶ PSE = **P**ower **S**ourcing **E**quipment
- ▶ 提供功率前必须要检测到25K的电阻
- ▶ 通过数据线或空闲线提供功率
- ▶ 提供短路检测，过流检测欠压等保护

PD

- ▶ PD = **P**owered **D**evice
- ▶ 提供25K电阻
- ▶ 从RJ45线上接受功率



PoE 概念和优势



优势

- 低成本
 - 功率和数据共享一组线
- 更灵活
 - 网路设备能够随意安装和改装
- 更可靠
 - 能够对功率进行管理
 - 安全

PoE标准发展历程

PoE 标准的演进是受功率需求不断变大驱使!

IEEE 802.3 af
-Class 3 adds power
PSE=15.4W
PD=13W
Type 1

2003

IEEE 802.3 at
PSE=30W
PD=25.5W
Type 2

2009

长达10年的时间里，大于25.5W的需求都怎么办？

ADI的POE++填补这一空白！

IEEE 802.3 bt
PSE=90W
PD=71W
Type 3-4

2019.2

802.3 af VS. 802.3 at Standard

Items	802.3 af (PoE)	802.3 at (PoE+)
Classification	0~3	0~4
Max Current	350mA	600mA
Max DC pair loop resistance	20ohm	12.5ohm
PSE output voltage	44~57V DC	50~57V DC
PSE output power	<=15.4W	<=30W
PD input voltage	36~57V DC	36~57V DC
PD Max input power	12.95W	25.5W
Cable	Unstructured	CAT-5e or better
Pairs of Cable	2	2

- **Non IEEE Architectures...**

- uPOE = Cisco Proprietary architecture for >25 Watts (Universal PoE)**

- POE++ = Linear Tech Proprietary architecture for > 25 Watts**

802.3 规定了什么?

- 功率

PSE最大输出功率 af:15.4W, at:30W, bt:90W, POE++:90W

PD最大得到的功率 af:12.95W, at:25.5W, bt:71W, POE++:71W

- 检测、分级电平

检测: 1.5V-10V, 25K检测电阻

分级电平: 高-15.5V-20.5V 低-5.6V-10V

分级电流: class0-0mA class1- 10mA class2- 20mA class3-30mA class4-40mA

- 欠压点

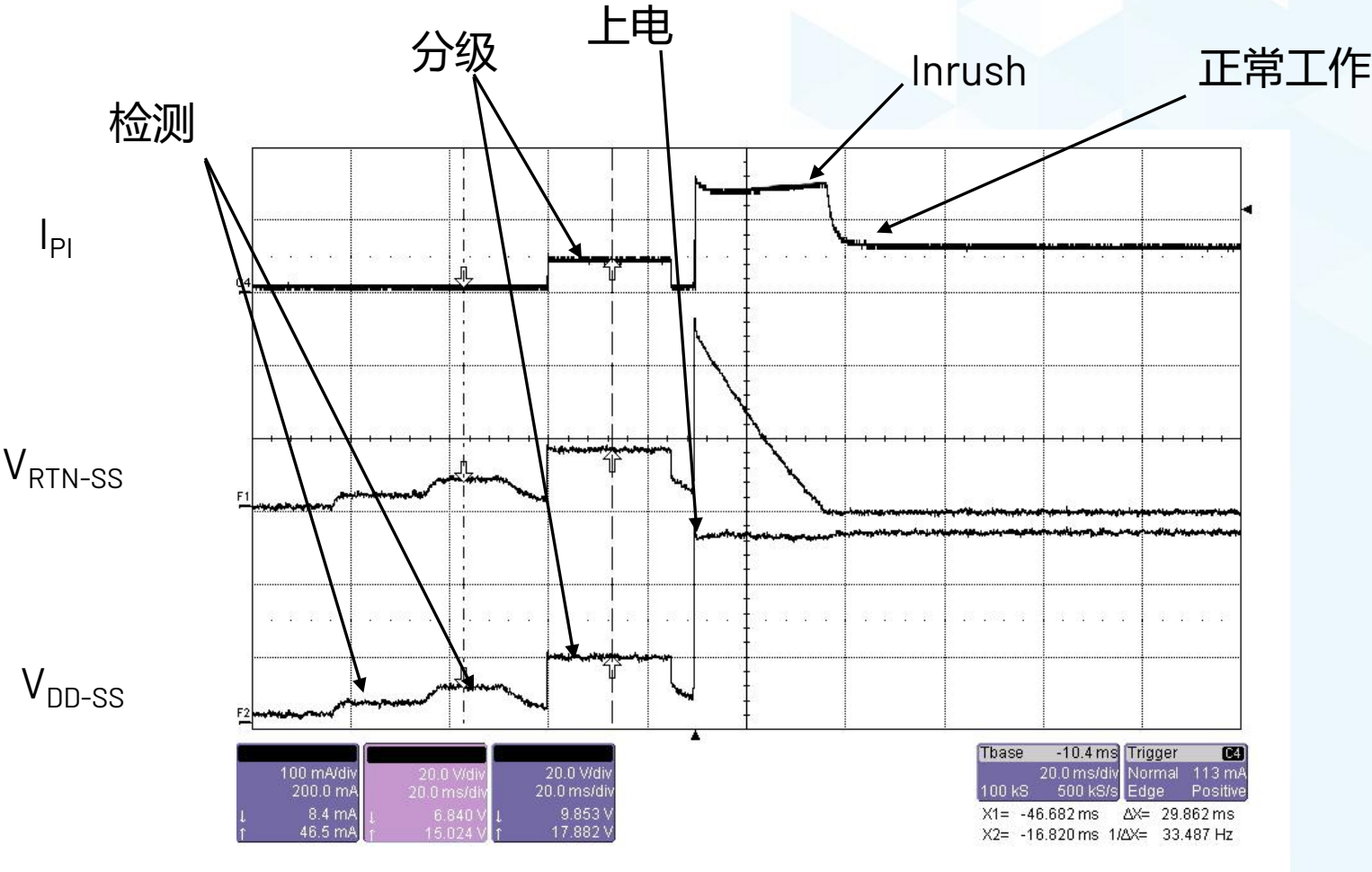
- 各种电流门限 (过流、inrush、MPS电流)

- 各种时间门限 (过流允许时间、断开时间等)

PoE 的工作过程

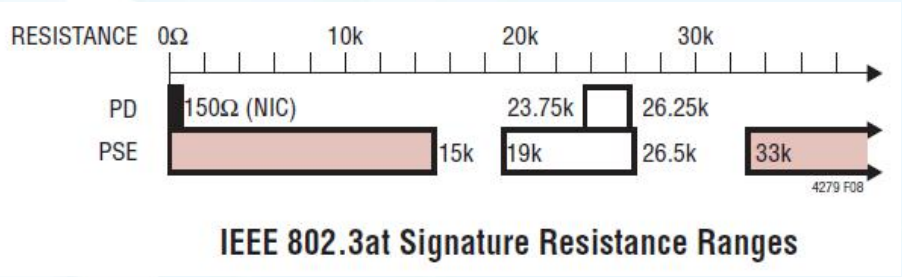
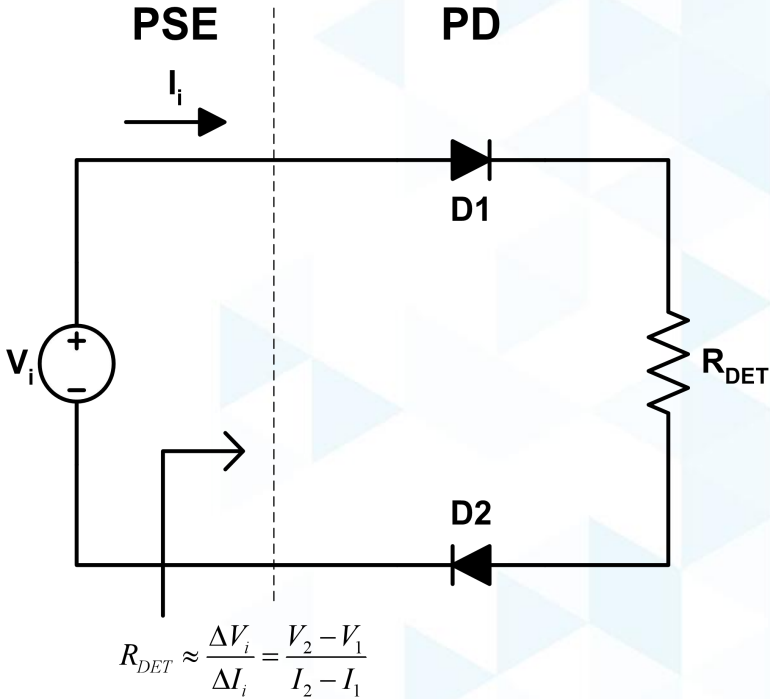
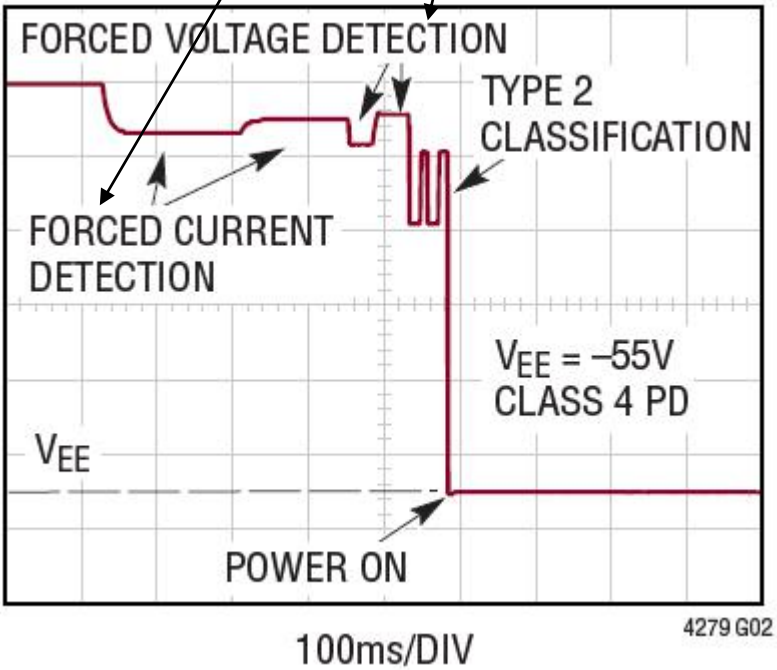
- ▶ 检测
 - PSE通过发出2.8V~10V信号到电源线上，来寻找有效PD.
 - 有效PD感测到此电压，在PD端加23.75k~26.25k的电阻，PSE一旦感测到产生的电流，认为此时有一有效的PD在请求电源。
- ▶ PD端设备的功率分类
 - 当检测到受电端设备PD之后，PSE设备会通过发出14.5V~20.5V的电压为PD设备进行分类，并且评估设备所需的功率损耗。
 - 为PD设备提供四个或五个（at 标准）等级的功率请求。
- ▶ 开始供电
 - 在一个可配置时间(一般小于15 μ s)的启动期内,PSE设备开始从低电压向PD设备供电,直至提供48V的直流电源。
- ▶ 供电
 - 为PD设备提供稳定可靠48V的直流电,满足PD设备不越过 25.5W的功率消耗。
- ▶ 断电
 - 若PD设备从网络上断开时,PSE就会快速地(一般在300 ~ 400ms之内)停止为PD设备供电,并重复检测过程以检测线缆的终端是否连接PD设备

典型的POE上电过程



802.3-detection (4点detection)

- PSE发出两个弱电流信号 (0.24mA和0.16mA)给PD;
- PSE发出两个低电压信号 (8V和4V) 给PD;
- PSE会根据以上两步去计算 R_{DET} ;
- R_{DET} 要在19K-26.5K之间, 才会进入分级。



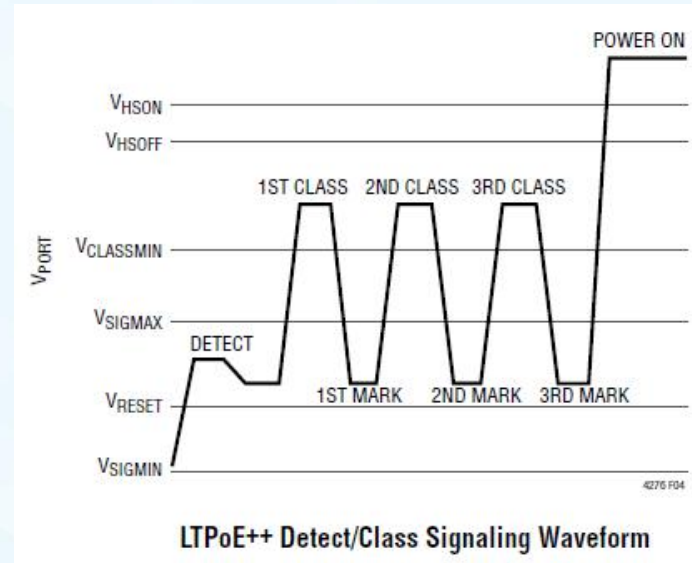
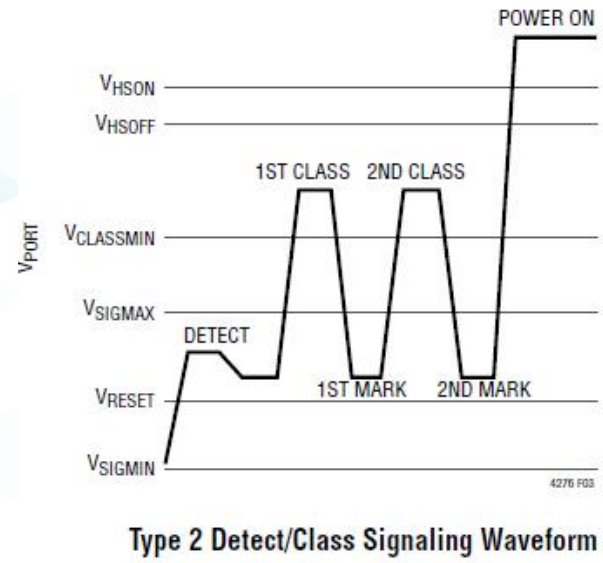
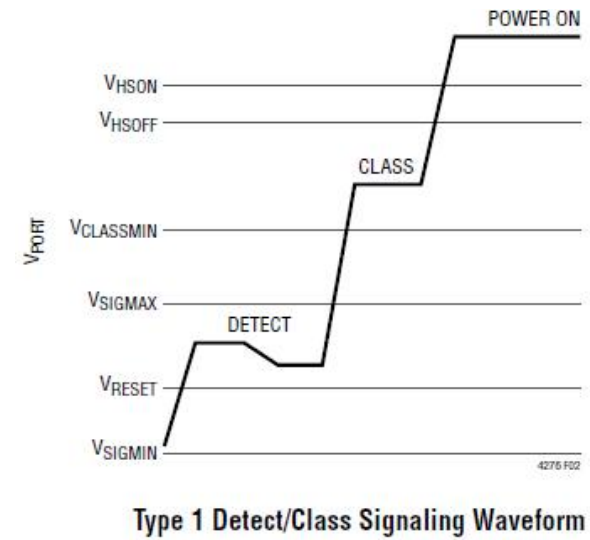
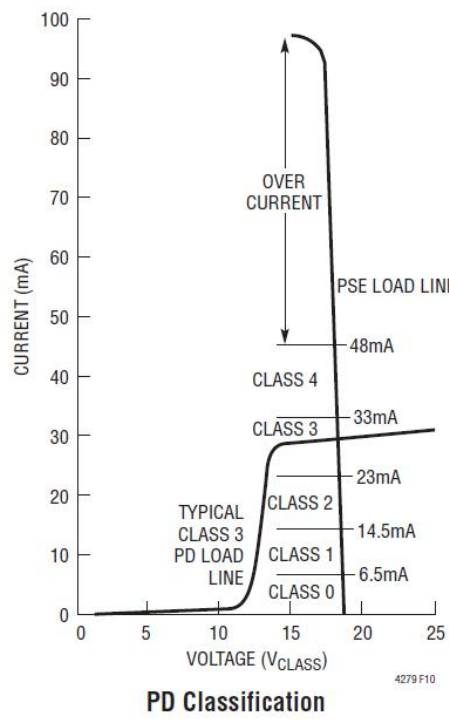
MEASURED PD SIGNATURE (TYPICAL)	DETECTION RESULT
Incomplete or Not Yet Tested	Detect Status Unknown
< 2.4k	Short-Circuit
Capacitance > 2.7μF	C _{PD} too High
2.4k < R _{PD} < 17k	R _{SIG} too Low
17k < R _{PD} < 29k	Detect Good
> 29k	R _{SIG} too High
> 50k	Open Circuit
Voltage > 10V	Port Voltage Outside Detect Range

端口电容也是有要求的, 不能大于2.7uF。

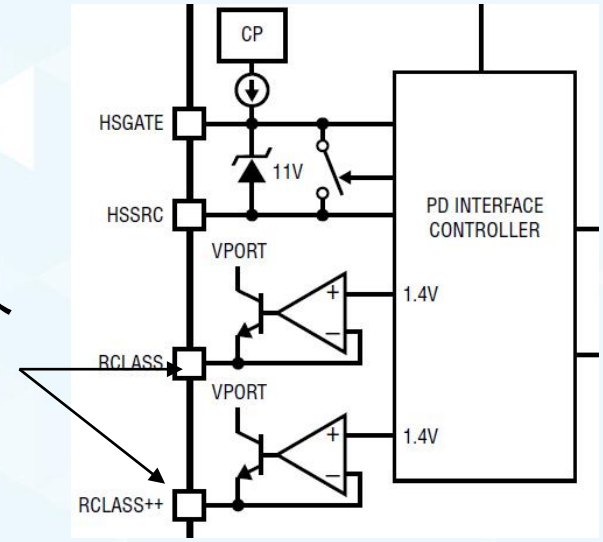
非标PD: 端口可能大于2.7uF

802.3 -分级

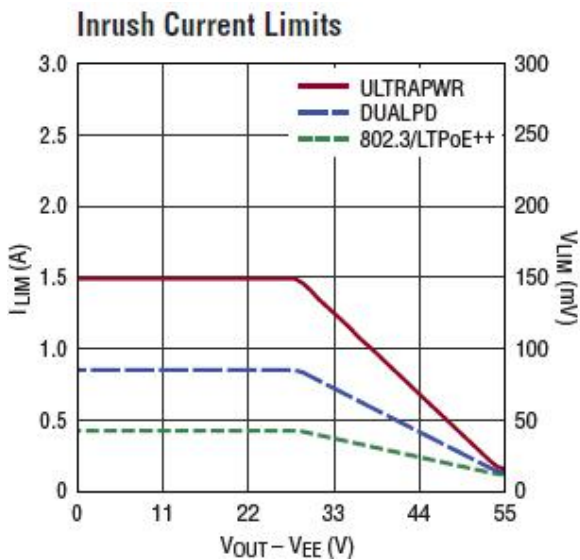
- 为什么要分级？
- 分级可以让PSE清楚知道PD需要多大功率；
- 通过分级PSE可以告诉PD能提供多少功率；



分别接一个电阻到地



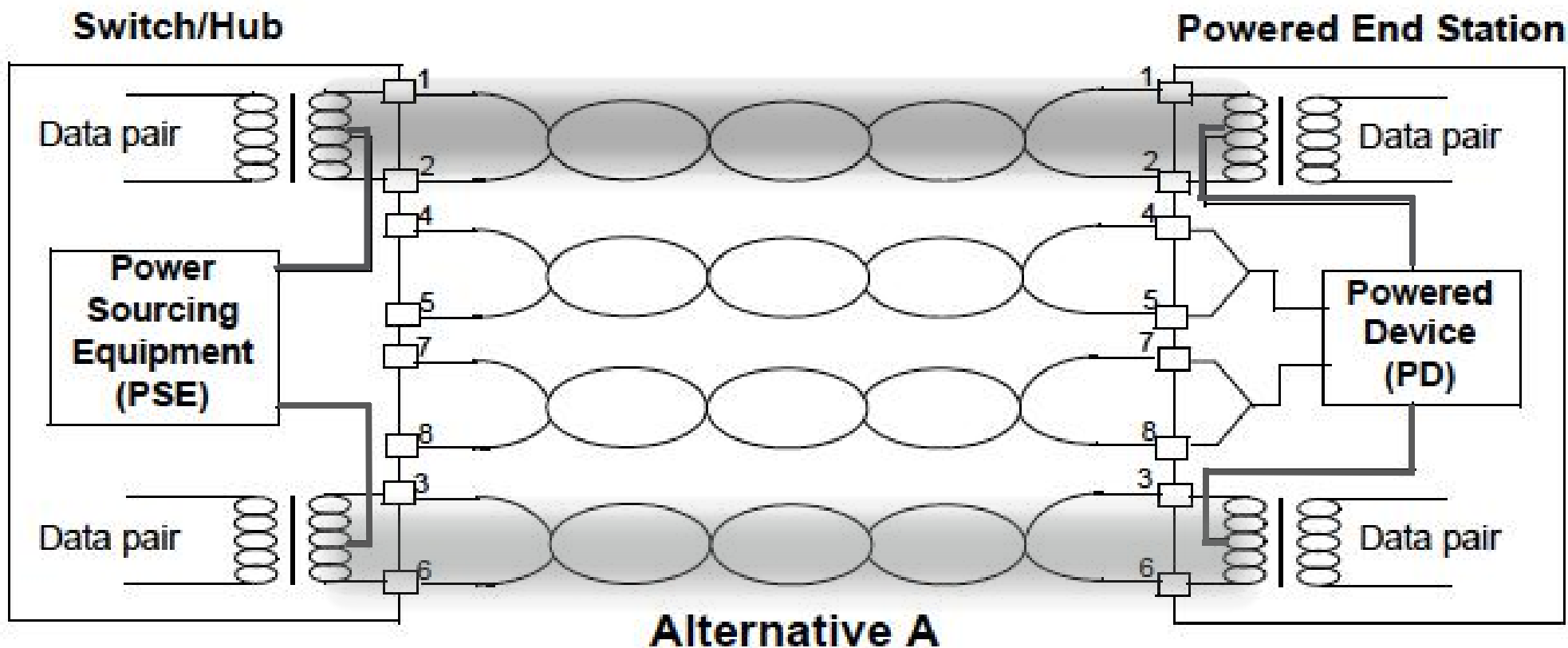
- 电流信息通过PSE侧0.1欧姆电阻上的电压信息获得;
- 对于检测分级的电流非常微弱, 需要注意电流采样布线, 采样Kelvin接法;
- 根据不同的分级结果, 设定不同的限流值;
- Inrush电流取决于不同模式和MOSFET压差。



SYMBOL	PARAMETER	CONDITIONS	MIN	TYP	MAX	UNITS
Current Sense						
V _{CUT}	Overcurrent Sense	SENSE – VSSK				
		Class 0, Class 3	● 35.6	37.5	39.6	mV
		Class 1	● 10.0	11.2	12.0	mV
		Class 2	● 19.6	20.8	22.0	mV
		Class 4	● 60.8	63.6	67.2	mV
		LTPoE++ 38.7W	● 89.0	91.9	95.0	mV
		LTPoE++ 52.7W, Dual-Signature PD	● 130	135	140	mV
		LTPoE++ 70W	● 160	165	170	mV
V _{LIM}	Active Current Limit	LTPoE++ 90W	● 225	232	240	mV
		SENSE – VSSK, V _{EE} ≤ OUT ≤ V _{EE} + 10V				
		Class 0 to 3	● 40.8	42.5	44.2	mV
		Class 4	● 81.6	85.0	88.4	mV
		LTPoE++ 38.7W	● 120	127	135	mV
		LTPoE++ 52.7W, Dual-Signature PD	● 140	148	160	mV
		LTPoE++ 70W	● 180	191	200	mV
		LTPoE++ 90W	● 240	255	270	mV
	Inrush Active Current Limit	UltraPWR	● 280	295	310	mV
		SENSE – VSSK, V _{EE} ≤ OUT ≤ AGND – 29V,				
		Class 0 to 4, LTPoE++	● 40.8	42.5	44.2	mV
		Dual-Signature PD	● 81.6	85.0	88.4	mV
V _{MIN}	DC Disconnect Sense Voltage	UltraPWR	● 140	148	160	mV
		SENSE – VSSK (Note 10)	● 0.5	0.75	1	mV
	Classification Threshold Voltage	SENSE – VSSK				
		Class 0 to 1	● 0.5	0.65	0.8	mV
		Class 1 to 2	● 1.3	1.45	1.6	mV
		Class 2 to 3	● 2.1	2.3	2.5	mV
		Class 3 to 4	● 3.1	3.3	3.5	mV
		Class 4 to Overcurrent	● 4.5	4.8	5.1	mV

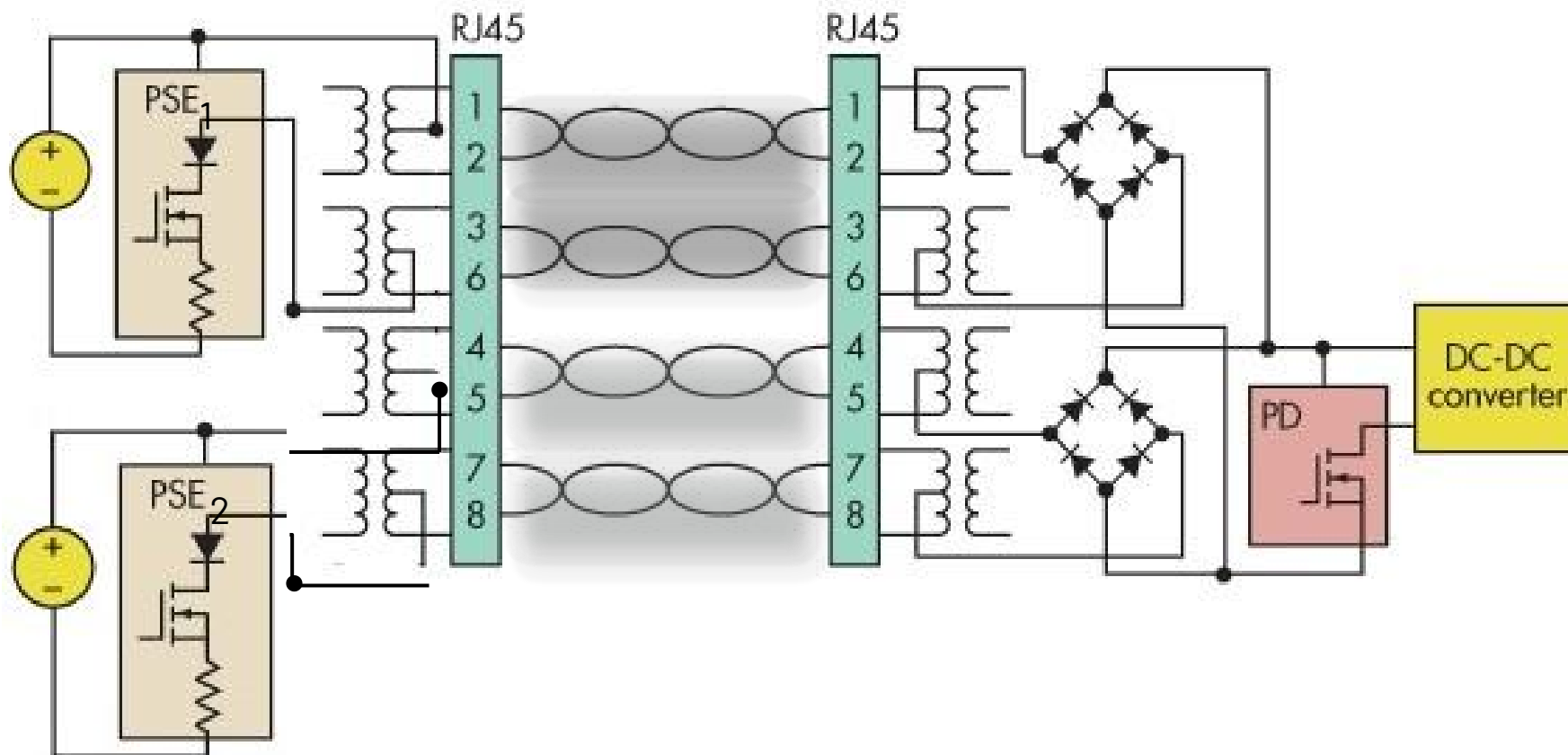
小功率POE (802.3at)功率传输

- 功率由PSE通过数据变压器的中心抽头注入到数据线对或空闲对；
- 功率由PD通过数据变压器的中心抽头将功率取出。

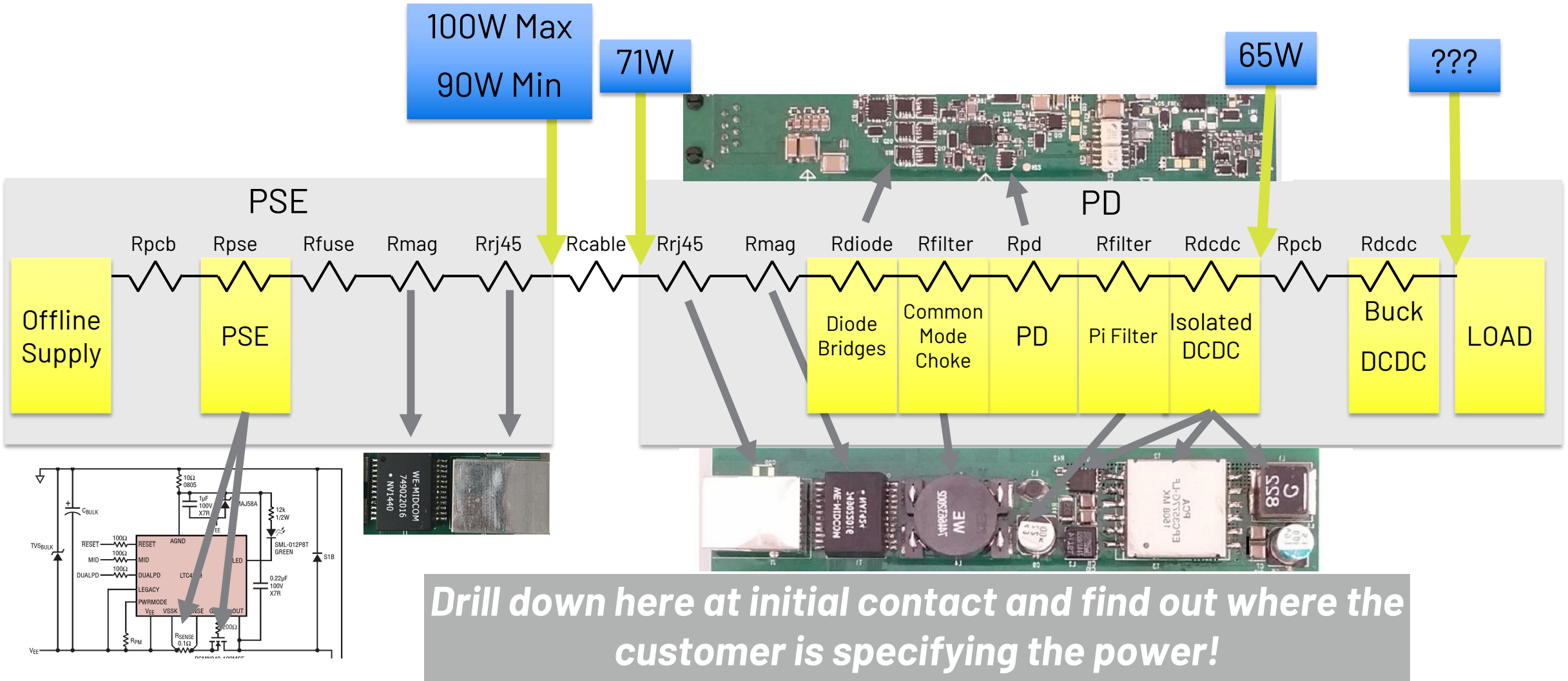


大功率POE (802.3bt -POE++)功率传输

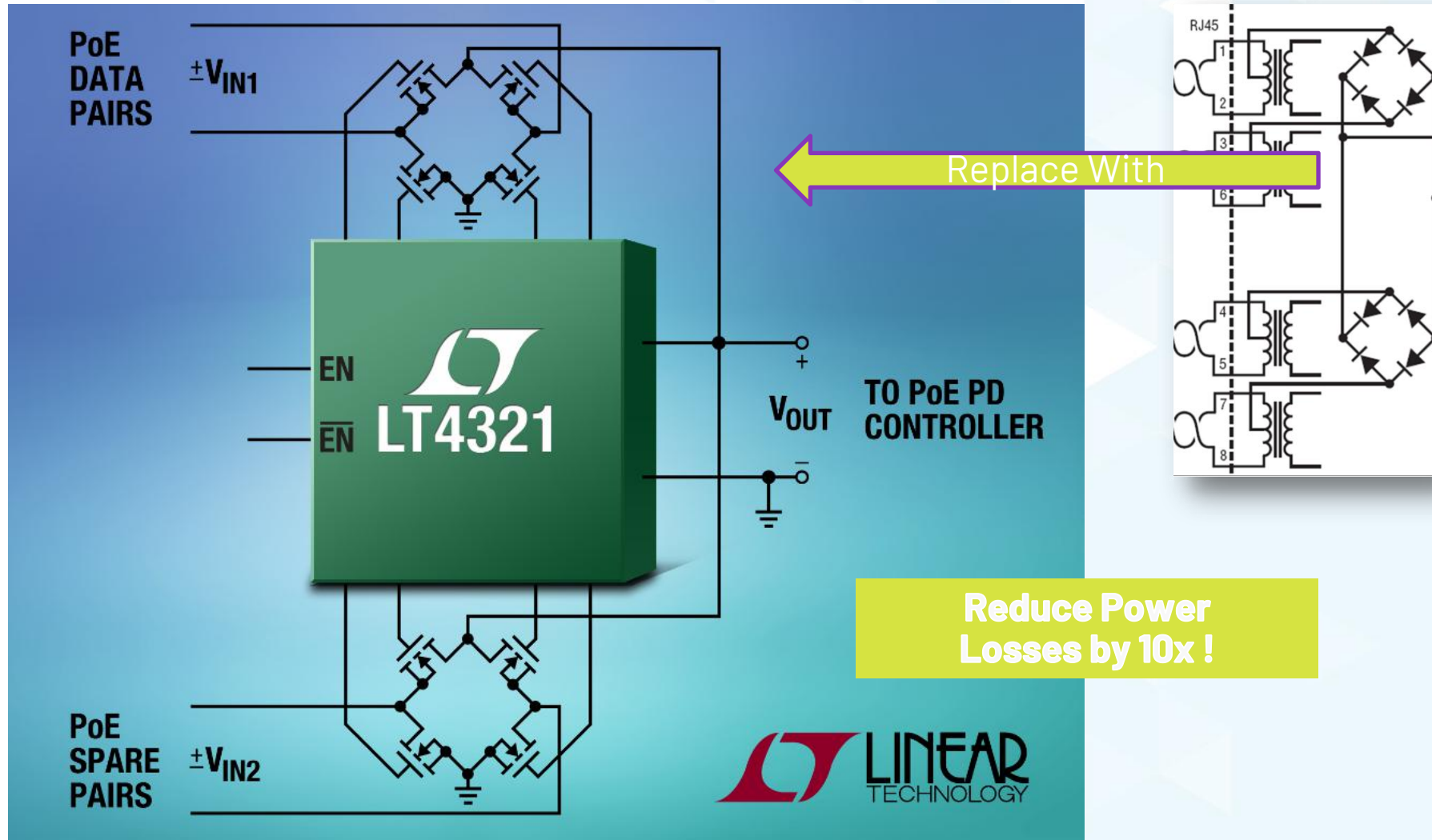
- 为了降低网线损耗，所有4对线全部参与功率传输；
- 802.3bt规定由2个PSE口供电；
- POE++规定由1个PSE口供电；



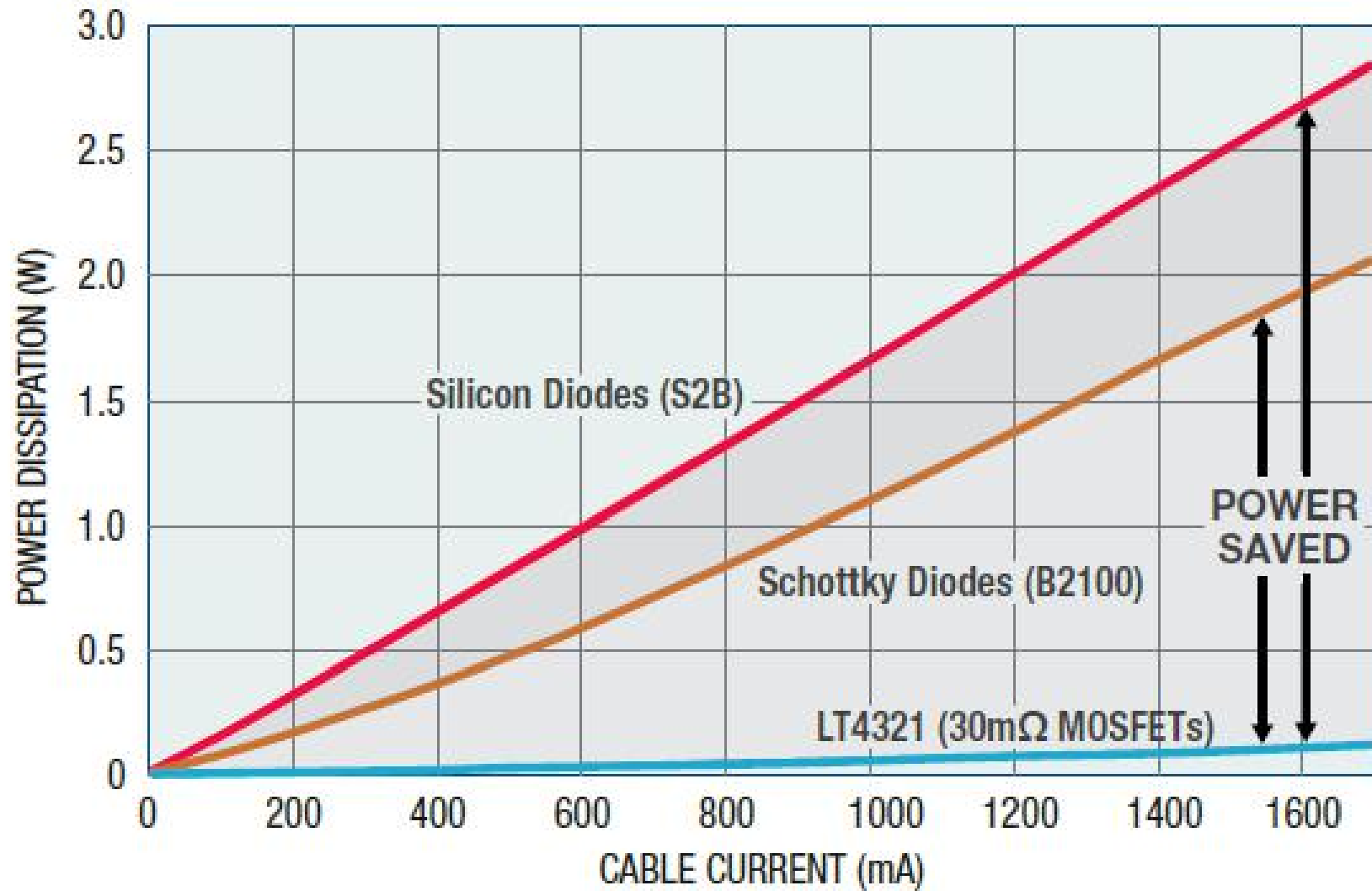
注意功率分布以及功率点位置需求



大功率POE如何降低整流二极管的损耗



LT4321 vs. Diode 功耗节省



DC Source

Current Probe
Voltage Probe

PSE

LTC4279

POE++

DC Load

CAT5 Cable

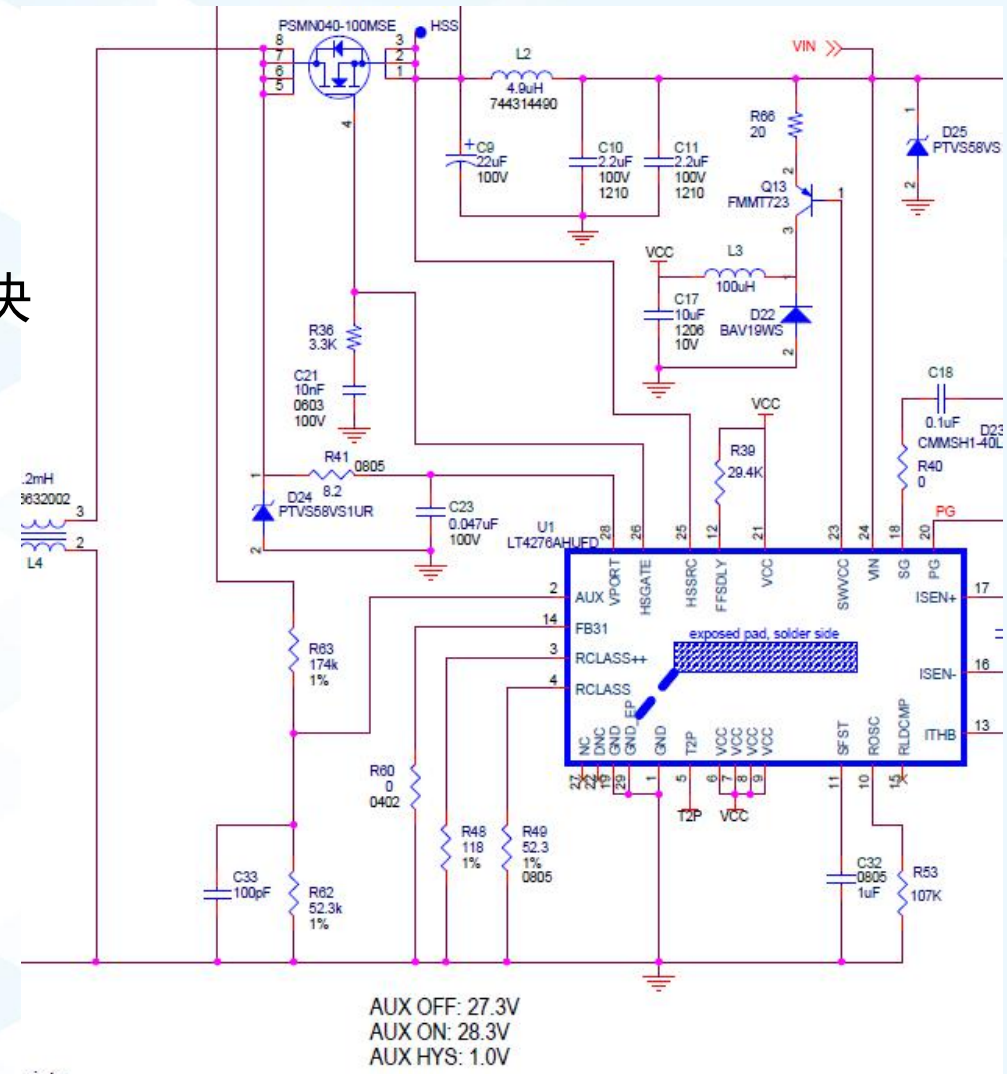
PD

LT4276A

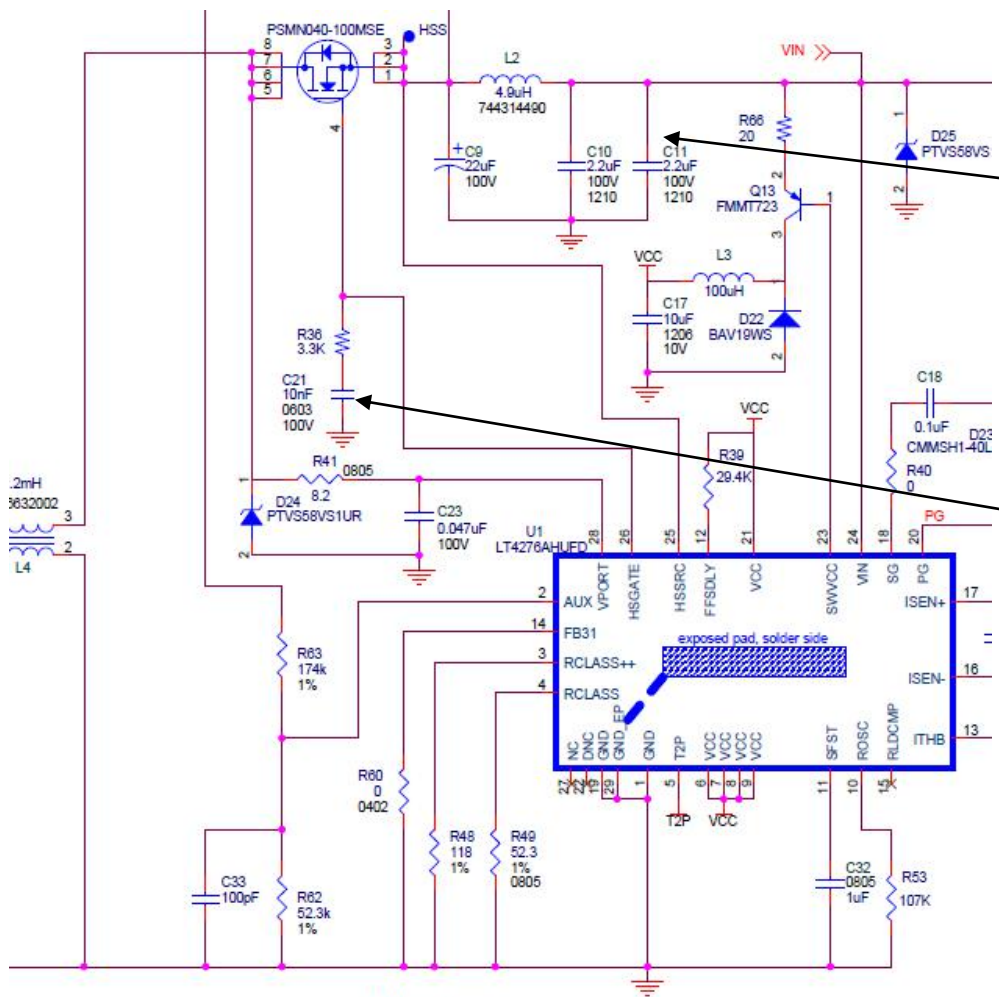
POE++



- ▶ 1.detection测试 (小电阻、大电容)
- ▶ 2.分级测试 (不同的分级电流、分级过流等)
- ▶ 3.并一个470uF电解在C9上, 验证启动inrush失效, 并解决
- ▶ 4.不同模式过流测试 (af、at、POE++)



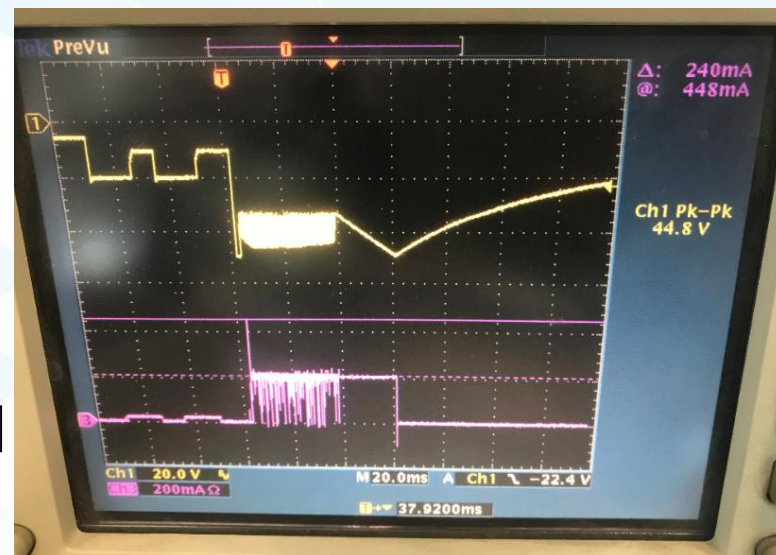
实验3-Inrush失效测试



AUX OFF: 27.3V
AUX ON: 28.3V
AUX HYS: 1.0V

并联470uF电解

加大Gate电容

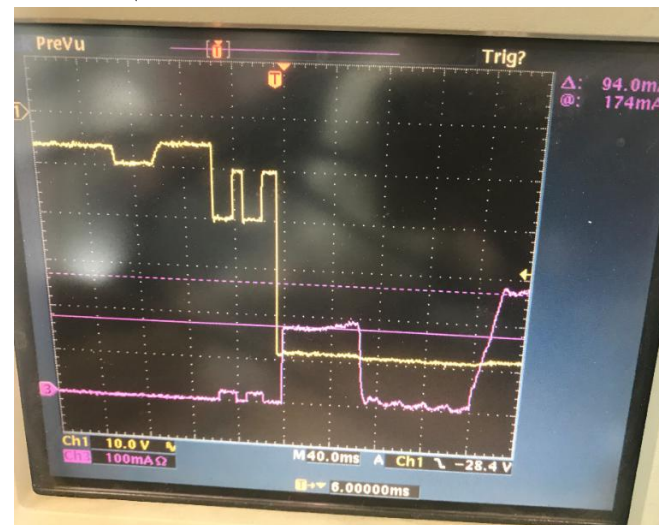
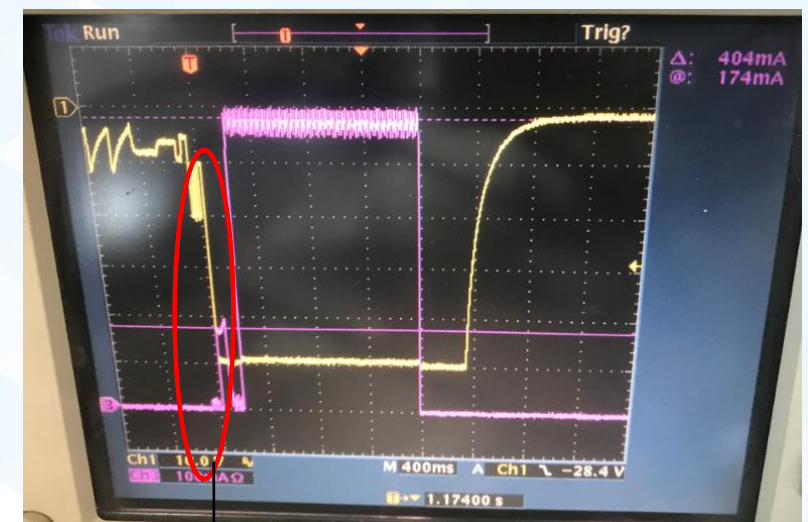


AF AT POE++上下电

802.3 af实验 12V/0.3A

802.3 at实验 12V/1.3A

POE++实验 12V/4A



关于ADI智库

ADI智库是ADI公司面向中国工程师打造的一站式资源分享平台，除了汇聚ADI官网的海量技术资料、视频外，还有大量首发的、免费的培训课程、视频直播等。九大领域、十项技术，加入ADI智库，您可以尽情的浏览收藏、下载相关资源。此外，您还可一键报名线上线下会议活动，更有参会提醒等贴心服务。





微信扫描二维码，获取《如何解决设计难点（第二部分）》观看链接

