

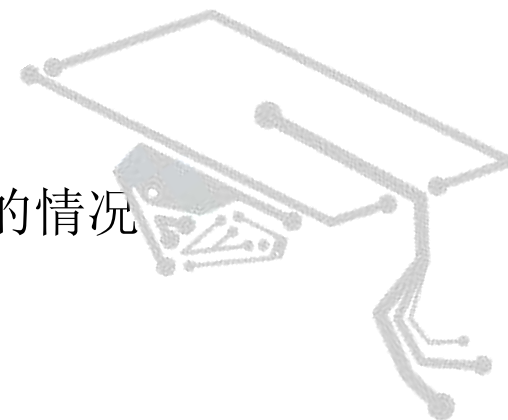
WEBENCH在电源仿真中的应用

图表分析和WEBENCH仿真——确定开关电源最恶劣的情况



Agenda

- 图表分析和WEBENCH仿真——确定开关电源最恶劣的情况
 - V_{in} 和占空比D的关系
 - ΔI 随 V_{in} 变化规律
 - 分析 ΔI 和D的变化关系
 - 电流直流分量分析(WEBENCH 仿真)
 - WEBENCH仿真验证
 - 总结
- WEBENCH仿真实战



图表分析和WEBENCH仿真——确定开关电源最恶劣的情况

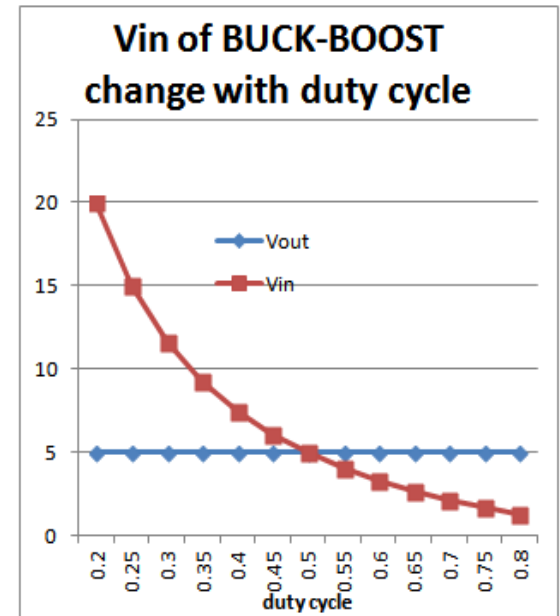
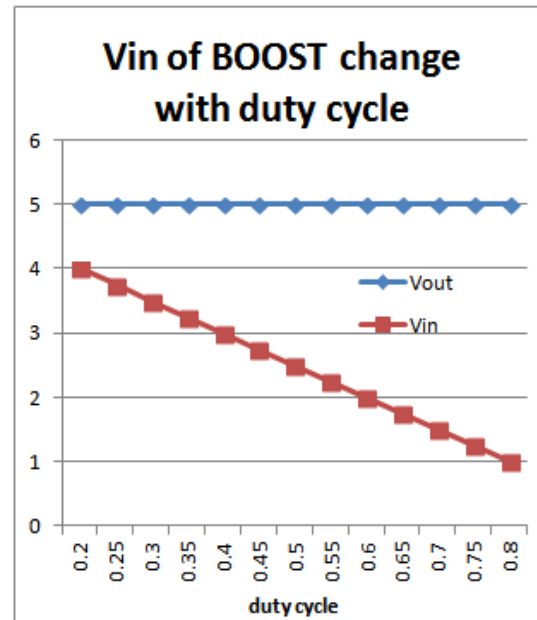
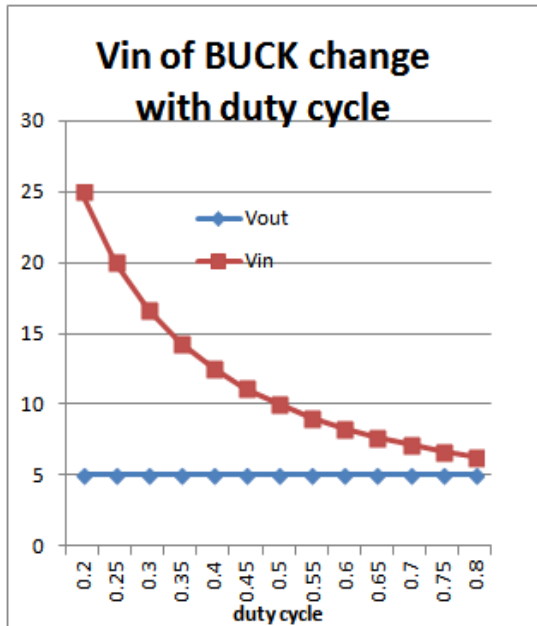
- 设计一个可以工作的开关电源也许不是一件难事，但是设计一个性能良好，可靠性高的开关电源不是一件容易的事情。我们知道开关电源里的电流是周期性变化的，电流的变化跟哪些变量有关，电流变化最恶劣的情况又是如何？在初学开关电源的时候，建议先把各个器件当做理想器件，暂不考虑器件的压降和损失的电流，搞清楚开关电源的规律后再将各种实际因素加入。
- 将电源看做一个黑盒，它的输入是 V_{in} ，开关频率是 f ，输出是 V_{out} ，输出电流是 $I_{load} = \frac{V_{out}}{R_{Load}}$ 。应用中由于电源的负反馈作用， V_{out} 可以保持不变（恒压源），这样分析电源的变化规律就方便一些。 V_{in} 和 f 的变化会引起电源内部的调节，以维持 V_{out} 和不变。所以理解 V_{in} 、 f 跟电源内部参数的变化规律至关重要。

图表分析和WEBENCH仿真——确定开关电源最恶劣的情况

Vin和占空比D的关系

类型	输出电压
BUCK	$V_o = V_{in} * D$
BOOST	$V_o = V_{in} / (1 - D)$
BUCK-BOOST	$V_o = V_{in} * D / (1 - D)$

- 从公式可以看出Vin只跟Vout和D有关，跟开关频率f无关。我们将这个关系绘制出曲线更为直接。用电子表格计算Vin的变化，然后将Vin作为Y轴，D作为X轴绘图



图表分析和WEBENCH仿真——确定开关电源最恶劣的情况

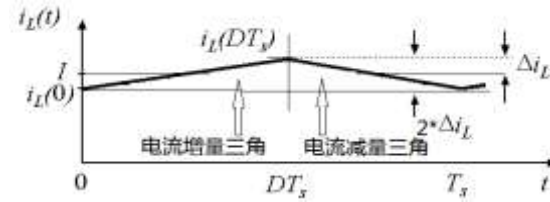
V_{in} 和占空比D的关系

- 从图中可以看出 V_{in} 跟D成反比，虽然变化的速率不同，但是变化的趋势是一致的。
- 对于BUCK电路，当 V_{in} 很高的时候需要电路能提供很小的D以维持 V_{out} 的恒定，所以对于BUCK电路芯片，如果允许的输入电压范围越宽，则芯片的占空比调节能力越强。输入电压范围同时跟芯片的最高耐压有关
- 对于BOOST电路，当 V_{in} 小于 V_{out} 较多时，需要电路提供较大的D才能满足升压需要。所以输入电压范围越宽，芯片占空比调节能力越大。
- 对于BUCK-BOOST电路，在 $D=0.5$ 时， $V_{in}=V_{out}$ 。D大于0.5则工作在升压，D小于0.5则工作在降压。

图表分析和WEBENCH仿真——确定开关电源最恶劣的情况

ΔI随Vin变化规律

- 根据电感的伏秒定理推导ΔI和Vin的关系

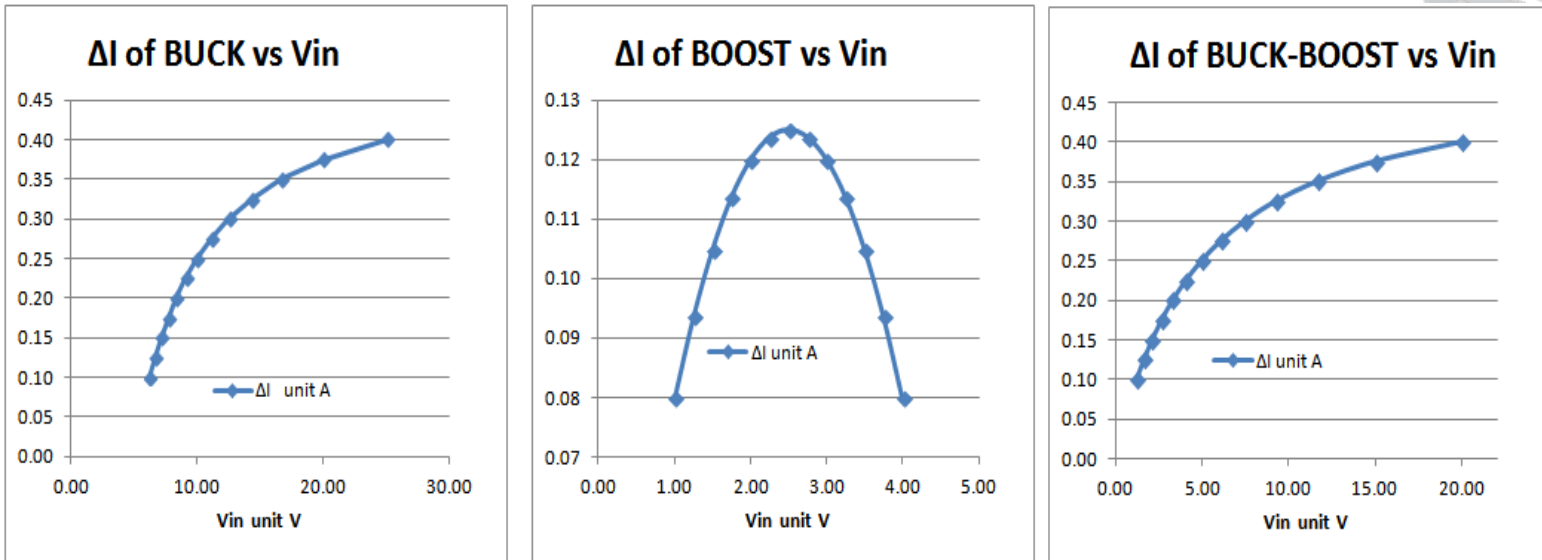


ΔI 求解表格(ΔI 和 Vin 的关系)			
Topology	BUCK	BOOST	BUCK-BOOST
Circuit			
充电周期电感电流斜率	$\frac{V_{in} - V_{out}}{L}$	$\frac{V_{in}}{L}$	$\frac{V_{in}}{L}$
放电周期电感电流斜率	$\frac{V_{out}}{L}$	$\frac{V_{out} - V_{in}}{L}$	$\frac{V_{out}}{L}$
充电时间	$D \times 1/f$	$D \times 1/f$	$D \times 1/f$
放电时间	$(1-D) \times 1/f$	$(1-D) \times 1/f$	$(1-D) \times 1/f$
ΔI = 0.5 × 充电斜率 × 充电时间	$\Delta I = 0.5 * \frac{V_{in} - V_{out}}{L} * D \times 1/f$	$\Delta I = 0.5 * \frac{V_{in}}{L} * D \times 1/f$	$\Delta I = 0.5 * \frac{V_{in}}{L} * D \times 1/f$
伏秒原理	$V_{out} = V_{in} * D$	$V_{out} = V_{in} / (1-D)$	$V_{out} = V_{in} * D / (1-D)$
用伏秒原理消去 ΔI 中的 D	$\Delta I = 0.5 * \frac{V_{in} - V_{out}}{L} * \frac{V_{out}}{V_{in}} \times 1/f$	$\Delta I = 0.5 * \frac{V_{in}}{L} * \frac{V_{out} - V_{in}}{V_{out}} \times 1/f$	$\Delta I = 0.5 * \frac{V_{in}}{L} * \frac{V_{out}}{V_{in} + V_{out}} \times 1/f$

(注：从ΔI的公式可以看出，f在分母上，当其他变量不变化时，增大f可以减小ΔI，也就是提高开关频率可以使输出电压纹波变小)

图表分析和WEBENCH仿真——确定开关电源最恶劣的情况

ΔI 随 V_{in} 变化规律

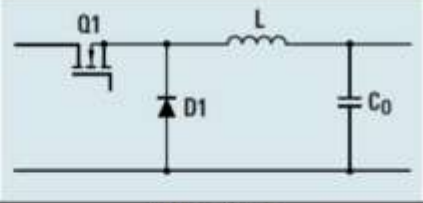
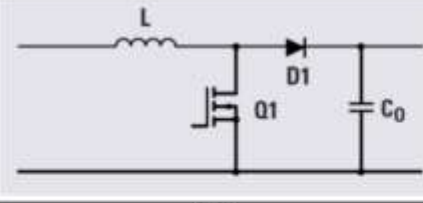
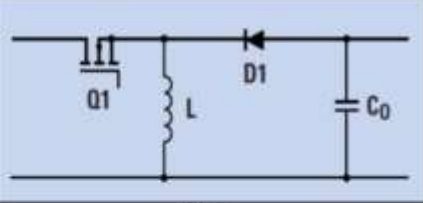


- 从图中可以看出 ΔI 随 V_{in} 的变化规律
- 对于BUCK和BUCK-BOOST电路， ΔI 随 V_{in} 的增加而增加。这说明 V_{in} 的增加会使电流波动增加。
- 对于BOOST电路， ΔI 随 V_{in} 的增加有从小到大再到小的过程，所以在 V_{in} 处于中间电压时（ $D=0.5$ ）电流波动最大

图表分析和WEBENCH仿真——确定开关电源最恶劣的情况

分析 ΔI 和D的变化关系

- 在求解 ΔI 的表格中，如果利用伏秒原理将 V_{in} 消去，就可以得到 ΔI 和D的关系

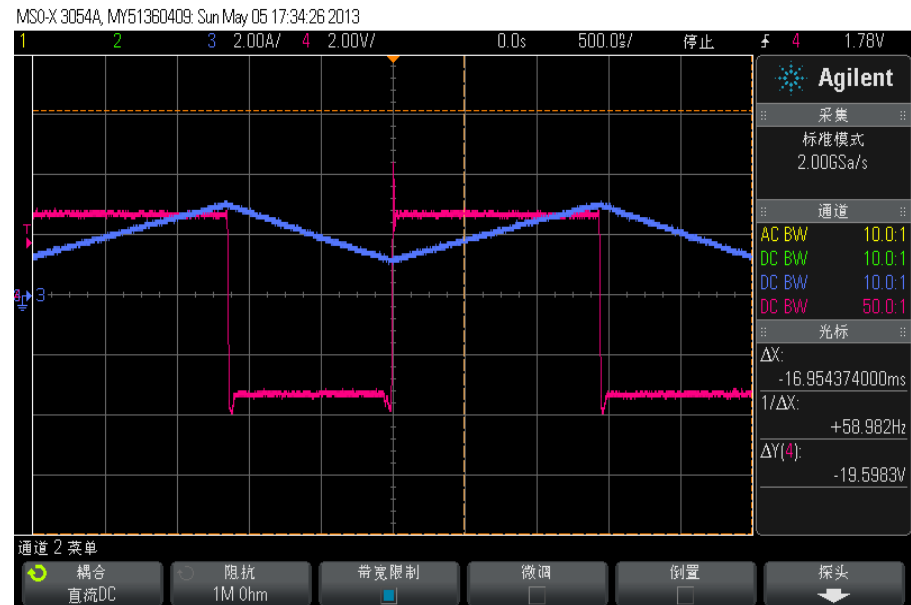
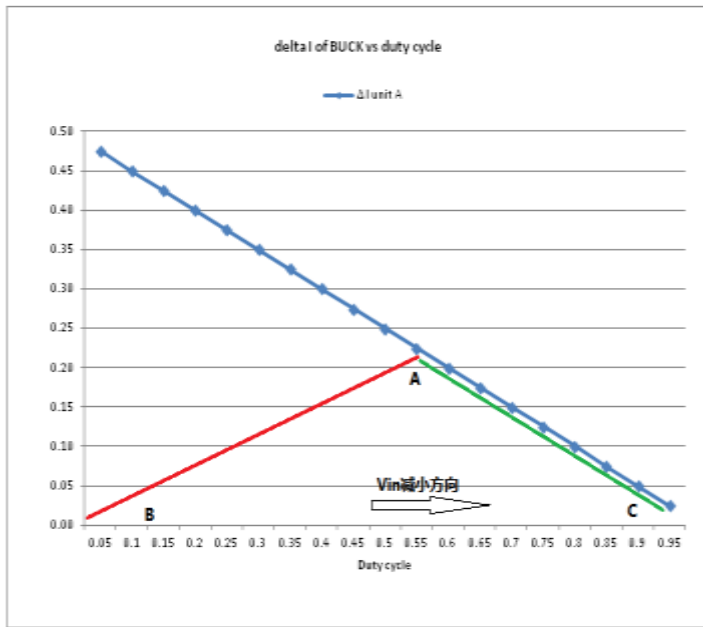
ΔI 求解表格 (ΔI 和占空比 D 的关系)			
Topology	BUCK	BOOST	BUCK-BOOST
Circuit			
充电周期电感电流斜率	$\frac{V_{in} - V_{out}}{L}$	$\frac{V_{in}}{L}$	$\frac{V_{in}}{L}$
放电周期电感电流斜率	$\frac{V_{out}}{L}$	$\frac{V_{out} - V_{in}}{L}$	$\frac{V_{out}}{L}$
充电时间	$D \times 1/f$	$D \times 1/f$	$D \times 1/f$
放电时间	$(1-D) \times 1/f$	$(1-D) \times 1/f$	$(1-D) \times 1/f$
$\Delta I = 0.5 \times$ 充电斜率 \times 充电时间	$\Delta I = 0.5 * \frac{V_{in} - V_{out}}{L} * D \times 1/f$	$\Delta I = 0.5 * \frac{V_{in}}{L} * D \times 1/f$	$\Delta I = 0.5 * \frac{V_{in}}{L} * D \times 1/f$
伏秒原理	$V_{out} = V_{in} * D$	$V_{out} = V_{in} / (1-D)$	$V_{out} = V_{in} * D / (1-D)$
用伏秒原理消去 ΔI 中的 V_{in}	$\Delta I = 0.5 * \frac{V_{out} * (1-D)}{L} \times 1/f$	$\Delta I = 0.5 * \frac{V_{out} * (1-D) * D}{L} \times 1/f$	$\Delta I = 0.5 * \frac{V_{out} * (1-D)}{L} \times 1/f$

- 分析 ΔI 和D之间的关系，有用的地方在于绘制曲线后的横坐标是D，占空比D*开关周期T就变换到时间，就相当于X轴是时间。这样Y轴电流I的变化量的斜率就是电感L的充电和放电速率（电流变化量=电流斜率*时间）

图表分析和WEBENCH仿真——确定开关电源最恶劣的情况

分析 ΔI 和D的变化关系

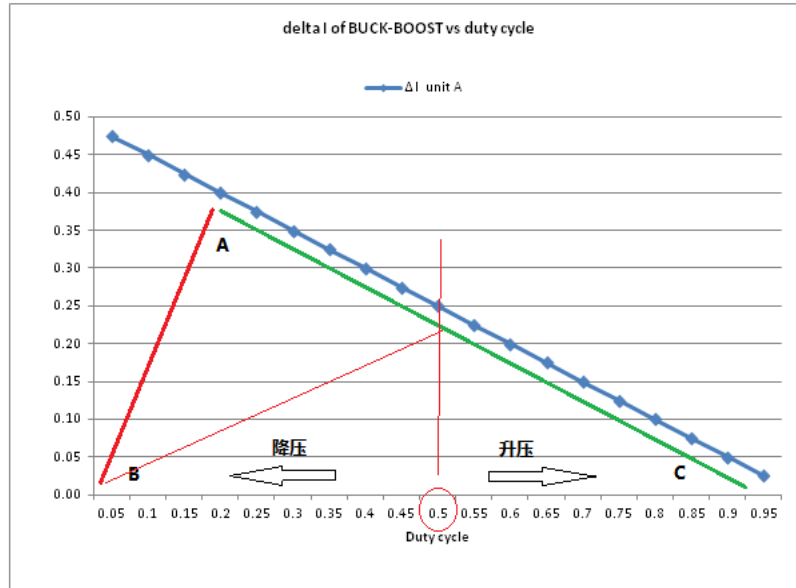
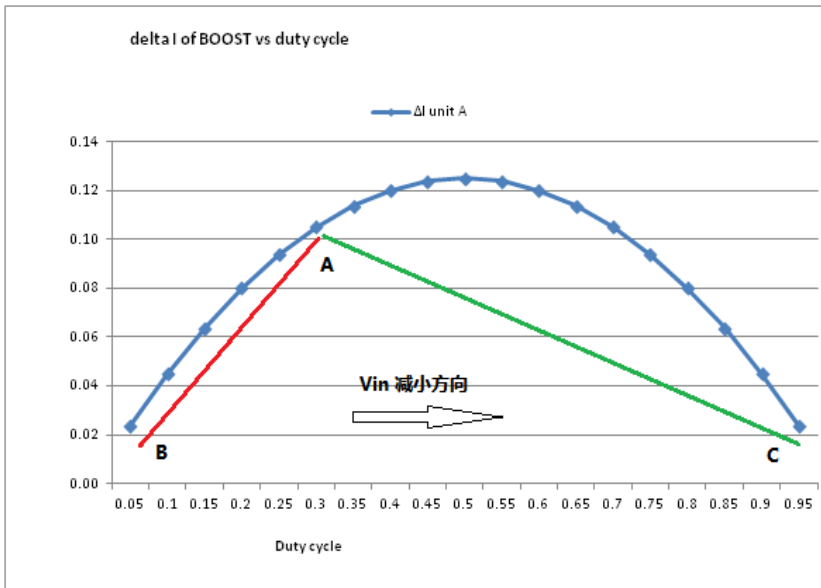
- BUCK电源的 ΔI 和D曲线。AB段对应X轴的D，AC段对应(1-D)，AB段就是L的充电速率，AC段就是L的放电速率，可以看出AC段的斜率是不变的，也就是 V_{out} 恒定（BUCK放电速率 $=\frac{V_{out}}{L}$ ， $V_{out}=\text{放电斜率} \cdot L$ ）。AB段随着A点位置变化（也就是D变化），AB段的斜率从大到小变化。结合前面 V_{in} 和D的曲线图可以看到： **V_{in} 和 V_{out} 越接近，充电斜率越小，并且 ΔI 越小。**
- 这个曲线的另一个有用之处在于，它上面画出的折线跟用示波器测试电感电流的交流分量是一致的，反应的就是 ΔI 随时间的变化。一副BUCK电源的电感电流实测图如下，方波是MOSFET的 V_{ds} 电压，用于标明占空比D，三角形的是电感电流波形，其中的直流分量是



图表分析和WEBENCH仿真——确定开关电源最恶劣的情况

分析 ΔI 和D的变化关系

- BOOST和BUCK-BOOST的 ΔI 和D关系曲线

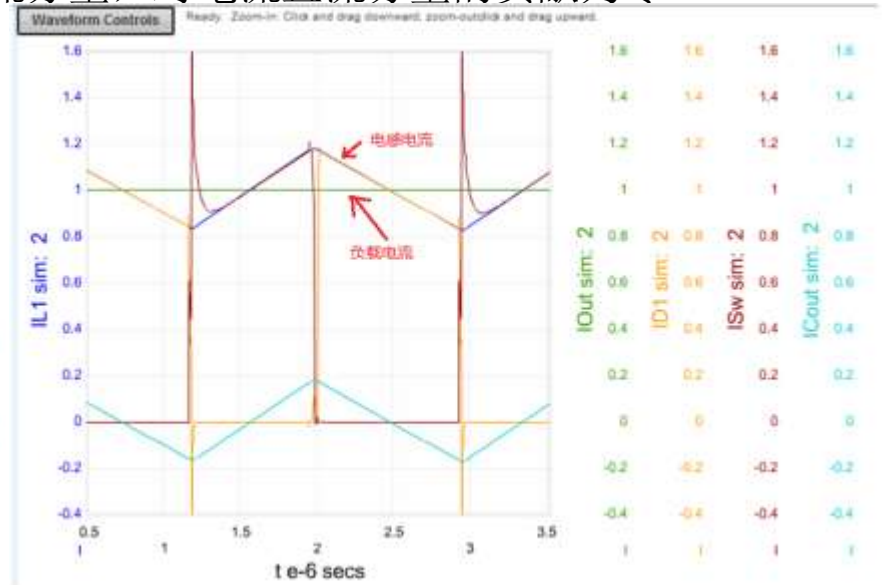
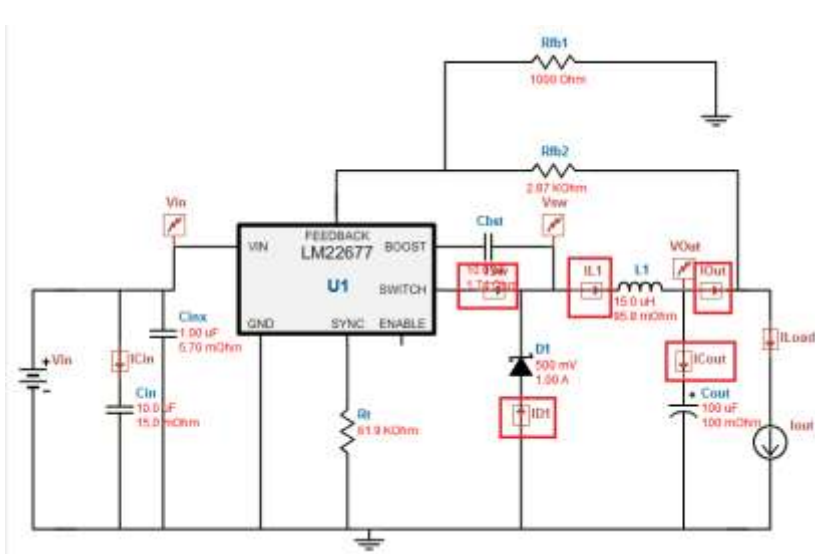


Topology	BOOST	BUCK-BOOST
Circuit		
充电周期电感电流斜率	$\frac{V_{in}}{L}$	$\frac{V_{in}}{L}$
放电周期电感电流斜率	$\frac{V_{out} - V_{in}}{L}$	$\frac{V_{out}}{L}$

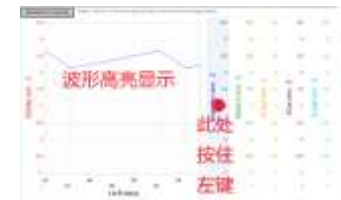
图表分析和WEBENCH仿真——确定开关电源最恶劣的情况

电流直流分量 I_{DC} 分析(WEBENCH 仿真)

- 分析完了交流分量 ΔI ，再来看看直流分量。直流分量 I_{dc} 十分重要，因为可以得到电流的峰值。
- 输出电容 C_{out} 的影响。由于 V_{out} 恒定，所以 C_{out} 流入的电流和流出的电流相同，也就是说 C_{out} 提供的电流只影响输出电流的交流分量，对电流直流分量的贡献为零



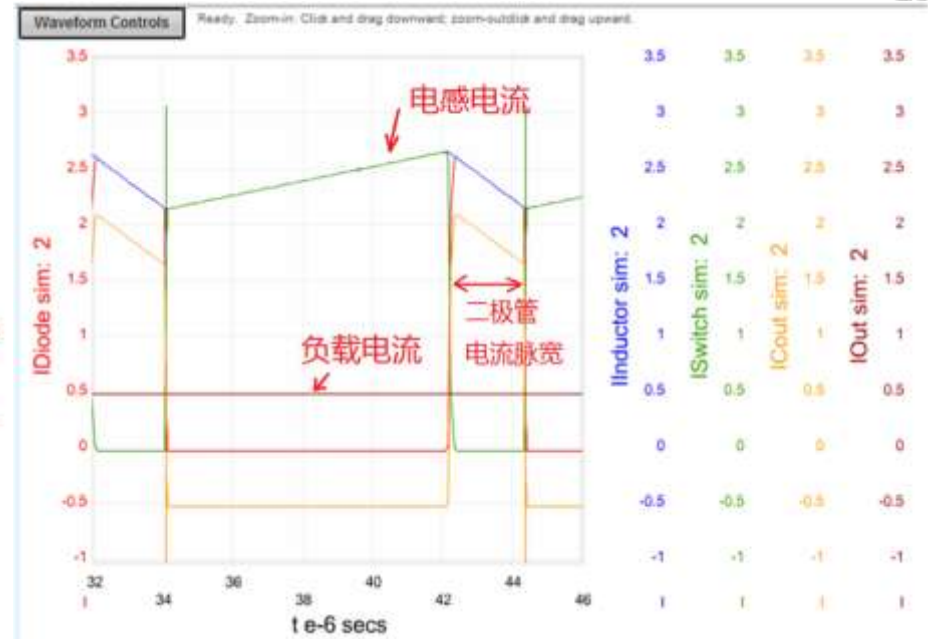
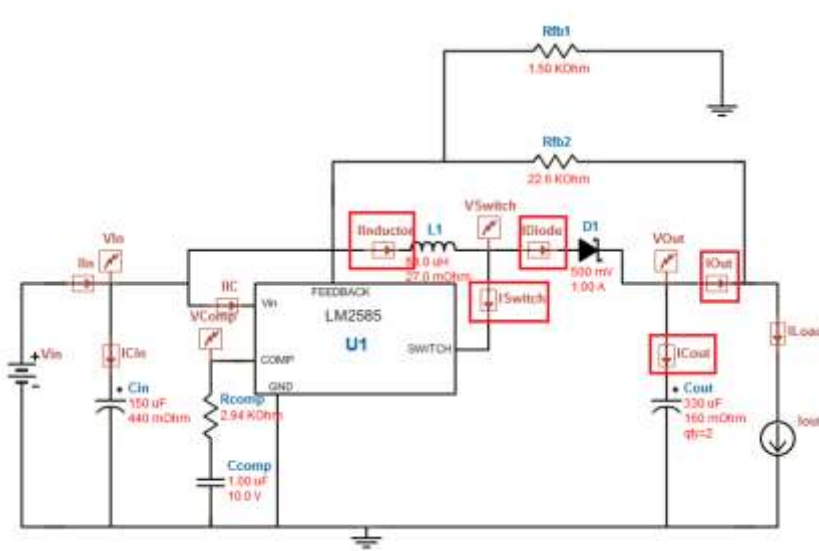
负载电流 I_{out} = 电感的直流分量 I_{DC}



图表分析和WEBENCH仿真——确定开关电源最恶劣的情况

电流直流分量 I_{DC} 分析(WEBENCH 仿真)

- 再看一下BOOST电路中的电流情况。LM2585是一款典型的BOOST电路，内部集成了MOSFET，外部接电感、电容和二极管就可以工作。进行稳态仿真后，同样将下图方框中的电流测试点加入波形显示



二极管的脉冲电流面积跟 I_{out} 面积相等可以得出

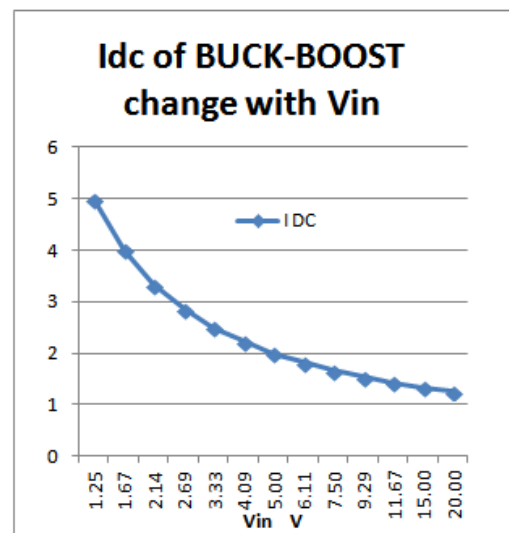
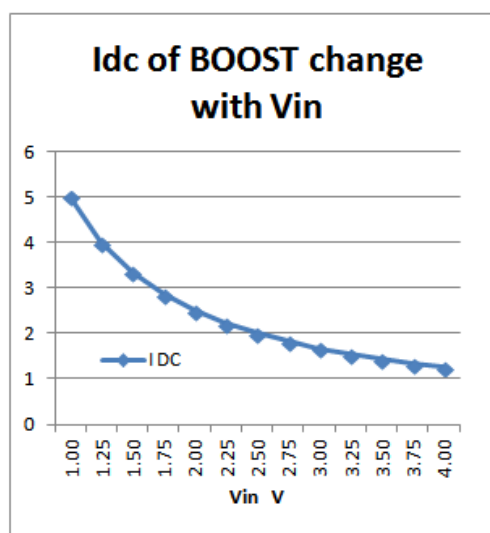
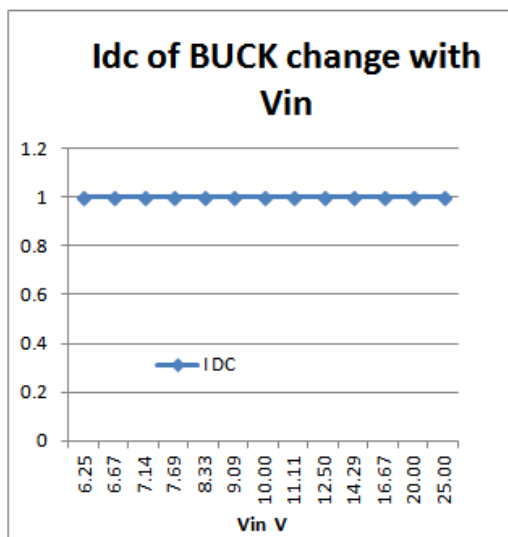
$$I_{out} = (1 - D) * I_{DC}$$

图表分析和WEBENCH仿真——确定开关电源最恶劣的情况

电流直流分量 I_{DC} 分析(WEBENCH 仿真)

通过上面的分析，我们直观的了解了 I_{DC} 的变化规律。将 I_{DC} 和 I_{out} 的关系汇总在表格中

类型	I_{DC} 和 I_{out} 的关系
BUCK	$I_{out} = I_{DC}$
BOOST	$I_{out} = (1 - D) * I_{DC}$
BUCK-BOOST	$I_{out} = (1 - D) * I_{DC}$

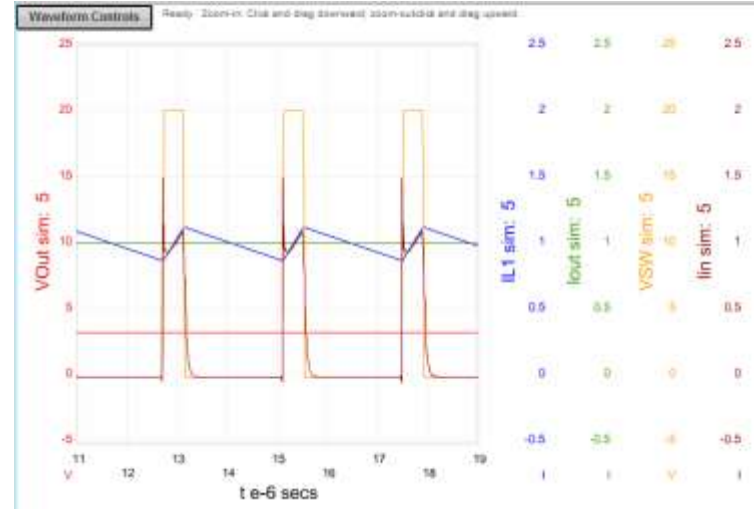
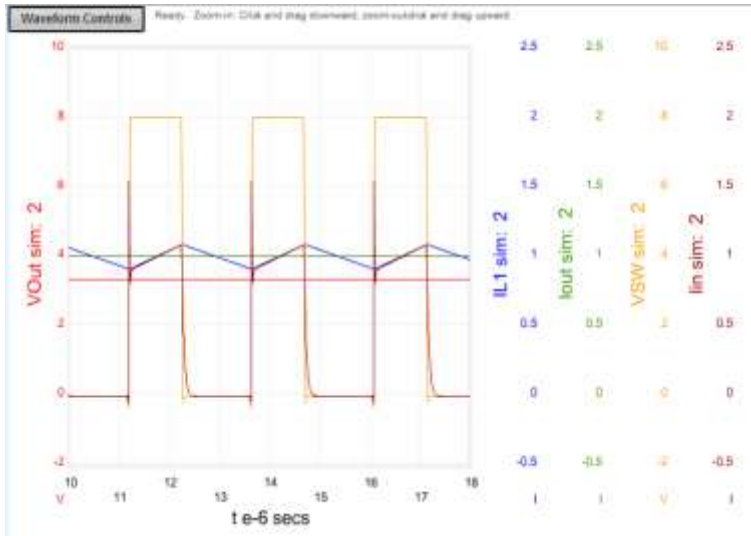


从图中可以看到 BUCK 电路中， I_{DC} 不随 V_{in} 变化。BOOST 和 BUCK-BOOST 中的 I_{DC} 随 V_{in} 增大而减小

图表分析和WEBENCH仿真——确定开关电源最恶劣的情况

WEBENCH仿真实验

- 用WEBENCH仿真工具来看一下随 V_{in} 的变化情况，对前面的分析做一下验证。考虑到BUCK-BOOST跟BOOST的情况类似，这里用BUCK和BOOST电路来仿真。



用BUCK电路仿真

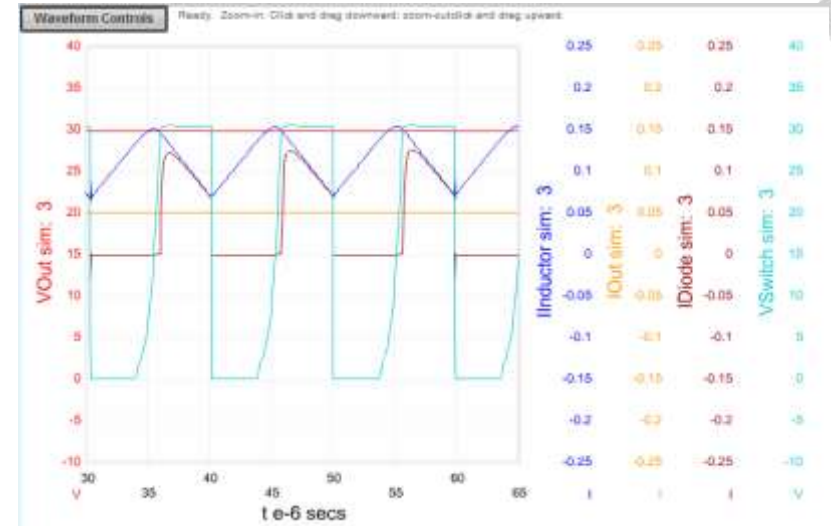
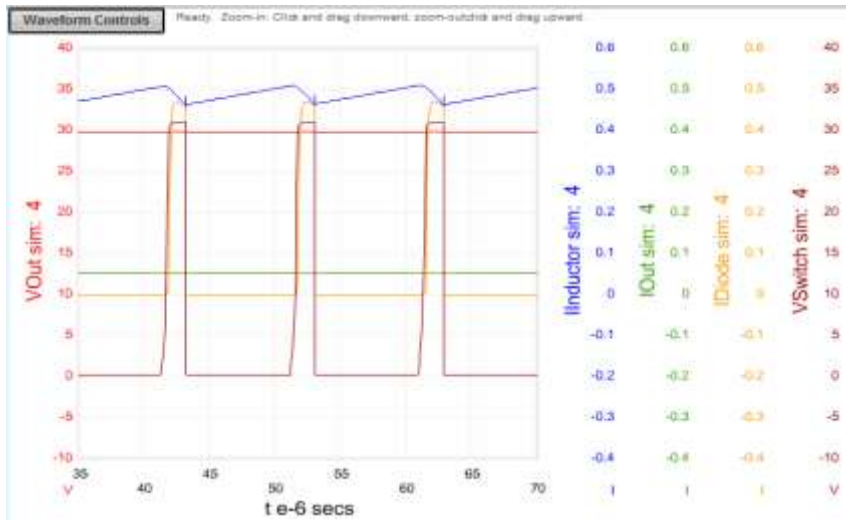
	V_{in}	V_{out}	L uH	F kHz	ΔI A	I_{DC} A	I_{out} A
左图	8	3.3	27	324	0.171	1	1
右图	20	3.3	27	324	0.247	1	1

可以看到 v_{in} 变化后 I_{DC} 不变，但是 ΔI 变大，这跟之前的分析一致。

图表分析和WEBENCH仿真——确定开关电源最恶劣的情况

WEBENCH仿真实验

- 用WEBENCH仿真工具来看一下随 V_{in} 的变化情况，对前面的分析做一下验证。考虑到BUCK-BOOST跟BOOST的情况类似，这里用BUCK和BOOST电路来仿真。



用BOOST电路仿真

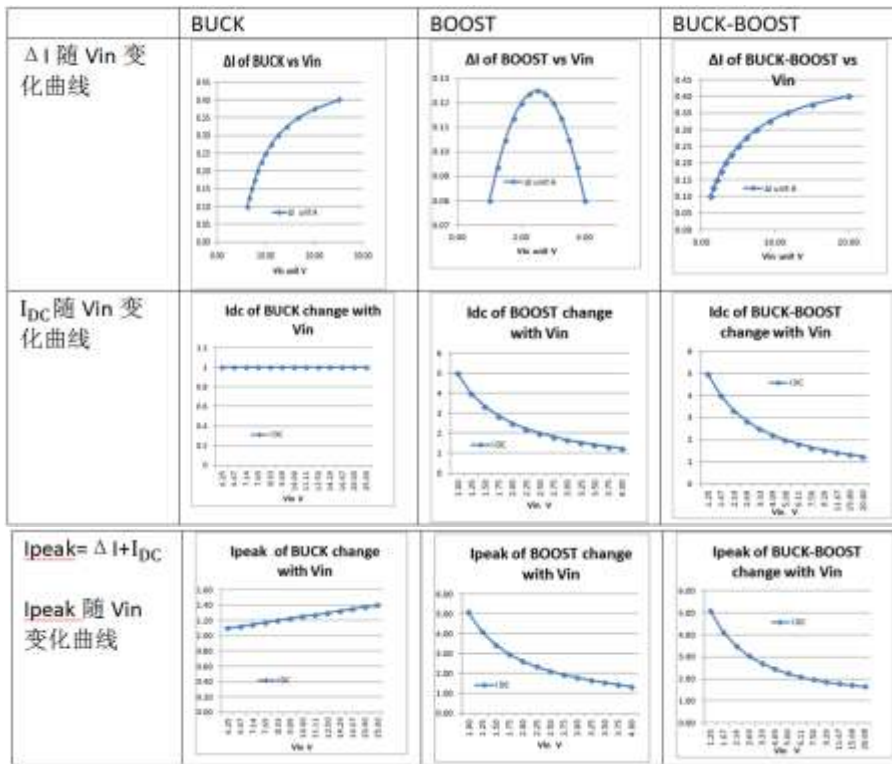
	V_{in}	V_{out}	L uH	F kHz	ΔI A	I_{DC} A	I_{out} A
左图	5	30	820	100	0.044	0.48	0.05
右图	15	30	820	100	0.086	0.12	0.05

可以看到 v_{in} 变大后 I_{DC} 减小， ΔI 变大（ $V_{in}=15V$ 时 $D=0.5$ ， ΔI 最大），这跟之前的分析一致。

图表分析和WEBENCH仿真——确定开关电源最恶劣的情况

总结

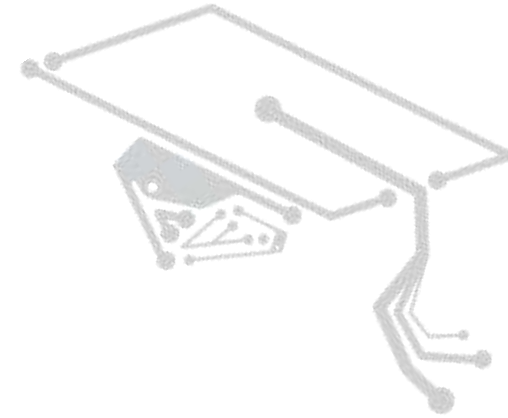
- 通过前面的分析，读者可以看到图表的重要性，更能帮助工程师找到电源参数变化的规律。并且结合仿真工具WEBENCH，对电源的学习起到事半功倍的效果。下面将 ΔI 和随 V_{in} 变化图放在一起，图片缩小，只需要看到变化趋势即可



- 从 I_{peak} 随 V_{in} 变化的曲线可以看出
- 设计BUCK电路时要按照最大输入电压设计，在最大输入电压时条件最苛刻。
- 设计BOOST和BUCK-BOOST时要按照最小输入电压设计，在最小输入电压时条件最苛刻。

WEBENCH在线仿真

- WEBENCH 仿真实战
- <http://webench.ti.com>



The screenshot displays the WEBENCH online simulation interface, which is divided into several panels:

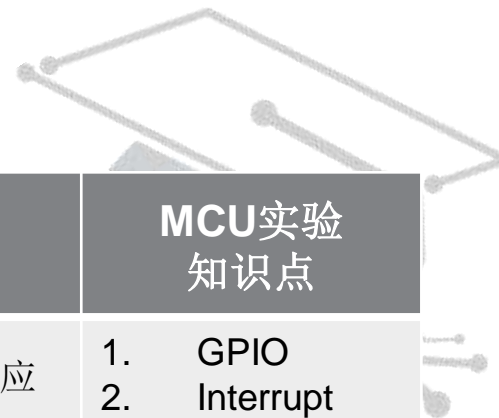
- Optimization Tuning:** Shows a target icon with a needle pointing to the center. It lists optimization goals: Lowest BOM Cost, Smallest Footprint, and Highest Efficiency. Below this, it shows the current design's values: Footprint: 628, BOM Cost: \$9.77, and Efficiency: 41.
- Charts:** Displays a graph of Efficiency (%) versus Current (A). The x-axis ranges from 0.74 to 1.91 A, and the y-axis ranges from 10.00 to 80.00%. Two curves are shown, representing different design iterations.
- Schematic:** Shows a circuit schematic diagram with a gain of 0.3 and a 'FIT' button.
- Operating Values:** Lists key operating parameters for the design:
 - base_pn: TPS53353
 - VinMin: 6 V
 - VinMax: 6.5 V
 - Vout: 3.3 V
 - Iout: 2 A
 - Ta: 30 degC
- BOM of Materials:** Provides a detailed Bill of Materials table with columns for Part, Quantity, Description, and Status.
- WEBENCH Optimizer:** Shows a 'Design Complete - Best Design Selected' message and a 'Power Dissipation Chart' graph.
- Your Complete Design:** A red banner section with links for 'Product Folder', 'View My Orders', 'ORDER Evaluation Boards, Samples, ICs', 'WEBENCH Downloads', 'Design Documentation', 'Share this design', and 'Copy this Design'.

TIVA M4和高性能模拟实验箱介绍

- 增加学生对模拟知识的兴趣，增强学生的动手能力。实验箱由母版、模拟模块板和MCU板组成。模拟实验有不同的难度级别，适合各阶段的模拟教学实验。从高精度到高速度，学生可以学到模电的诸多知识点。



TIVA M4和性能模拟实验箱介绍



模块	TI模拟器件		模拟实验 知识点	MCU实验 知识点
	器件分类	器件型号		
(1) MCU模块 EK-TM4C123G	LDO线性稳压器	TPS73633	1. 线性稳压器的原理和应用	1. GPIO 2. Interrupt 3. USB
(2) DC-DC 升压模块	DC-DC转换器	TPS61165	1. 非隔离开关电源 2. Boost拓扑原理 3. 负压产生电路 4. 恒流LED串驱动 5. 高侧电流检测 6. 通过SS, FB, EN实现 输出电压/电流的调节 7. 高速功率电路的布局布线	1. PWM产生 2. ADC 3. GPIO
	电流并联检测器	INA213		
	零漂移运算放大器	OPA330		
(3) DC-DC 降压模块	双路同步BUCK	TPS54295	1. 同步与非同步的比较 2. Buck -> Buck-Boost 3. 高亮LED驱动 4. 可调恒压输出 5. DC-DC电源的布局布线	1. PWM产生 2. ADC 3. GPIO
	非同步BUCK	TPS54332		
	电流并联检测	INA213		

TIVA M4和性能模拟实验箱介绍

模块	TI模拟器件		模拟实验 知识点	MCU实验 知识点
	器件分类	器件型号		
(4) 电机 驱动模块	小功率电机驱动	DRV8833	<ol style="list-style-type: none"> 1. 直流电机驱动原理 2. 步进电机驱动原理 3. 低测电流检测 4. 高速功率电路的布局布线 	<ol style="list-style-type: none"> 1. PWM产生 2. ADC 3. GPIO
	零漂移运算放大器	OPA330		
(5) 频率与相位 检测模块	开漏输出比较器	TLC372	<ol style="list-style-type: none"> 1. 低通滤波器的设计 2. 比较器原理 3. 波形整形 4. 单电源运算放大器应用 	<ol style="list-style-type: none"> 1. PWM产生 2. 定时器捕获 3. DDS信号产生 4. 数字锁相环原理
	非门	SN74LVC1G14		
	轨到轨放大器	OPA2365		
(6) MDAC模块	电荷泵式负电源	TPS60400	<ol style="list-style-type: none"> 1. 电荷泵的原理与应用 2. 音频信号放大、滤波 3. R-2R型DAC应用：程控放大与衰减 4. D类功放的原理与应用 	<ol style="list-style-type: none"> 1. SPI 2. ADC 3. 音频信号解码 4. 音频信号回放
	双路R-2R DAC	DAC8802		
	CMOS RRIO 运放	LMV842		
	D类音频功放	TPA2005D1		

TIVA M4和性能模拟实验箱介绍

模块	TI模拟器件		模拟实验 知识点	MCU实验 知识点
	器件分类	器件型号		
(7)电阻测量 模块	CMOS RRO INA	INA333	<ol style="list-style-type: none"> 1. 共模抑制与差模放大 2. 差动与仪用放大器原理 3. 电桥测电阻原理 4. 恒流源原理 5. 单电源放大器应用 6. Δ-Σ型ADC原理与应用 7. 参考源的原理与应用 	<ol style="list-style-type: none"> 1. ADC 2. I2C
	零漂移运算放大器	OPA330		
	高精度参考源	REF3033		
	Δ - Σ 型ADC	ADS1110		
	电压基准源	LM385-2-5		
(8) 高速压控增益 放大模块	电荷泵	LM2662	<ol style="list-style-type: none"> 1. 电荷泵 2. VCA的原理与应用 3. RC振荡电路 4. 自动增益控制 5. R-String DAC应用 6. 轨到轨运放应用 7. 高速放大器的布局布线 	<ol style="list-style-type: none"> 1. SPI 2. ADC
	压控放大器	VCA810		
	VFB高速运放	OPA830		
	R-String DAC	DAC7311		
	I2V 轨到轨运放	LMP7701		
(9) LCD模块	—	—	<ol style="list-style-type: none"> 1. 滚轮模块 2. 蜂鸣器驱动 3. 128x64 LCD 4. SD卡 5. 按键 	<ol style="list-style-type: none"> 1. ADC 2. SPI 3. GPIO 4. SD卡读写

培训地点





Thanks