

UCC25640x 具有超低可闻噪声和待机功耗的 LLC 谐振控制器

1 特性

- 经优化的低功耗模式和突发模式算法
 - 具有软启动和软关断周期的突发模式
 - 将空载和待机时的可闻噪声降至最低
 - 用于禁用突发模式的用户选项
 - 光耦合器低功耗运行
 - 效率性能超过 DoE VI 级和 EU CoC 2 级外部电源标准
- 混合迟滞控制 (HHC)
 - 同类最佳瞬态响应
 - 快速退出突发模式
- 稳健的自适应死区时间控制
- 集成式高压栅极驱动器，具有 0.6A 源电流和 1.2A 灌电流能力
- 稳健的电容区 (ZCS) 规避方案
- 过温、输出过压、输入欠压保护、三级过流保护
- 集成高电压启动功能
- X 电容器主动放电功能

2 应用

- 电视 SMPS 电源
- 照明
- 交流/直流适配器
- 电动工具
- 医疗电源
- 多功能打印机
- 企业和影院投影仪
- PC 电源
- 游戏机电源

3 说明

UCC25640x 是一款具有集成高电压栅极驱动器的全功能 LLC 控制器。UCC25640x 设计成与 PFC 控制器配对使用，以使用最少的外部元件提供完整的电源系统。由此实现的电源系统无需单独的待机功率转换器即可满足严格的待机功耗要求。

UCC25640x 提供了一种高效的突发模式，具有软开启和软关闭时段，可最大限度地减少待机操作时的可闻噪声。突发功率级别和迟滞是可编程的，从而简化了效率和突发模式运行的优化。通过引脚配置禁用突发模式。UCC25640x 利用混合迟滞控制来提供出色的线路和负载瞬态响应特性。

UCC25640x 具有一系列特性，可使 LLC 转换器的运行得到良好控制和保护。使用 UCC25640x 与 UCC28056 或 UCC28064A PFC 控制器，搭配 UCC24624 同步整流器控制器来提供完整的电源选项。

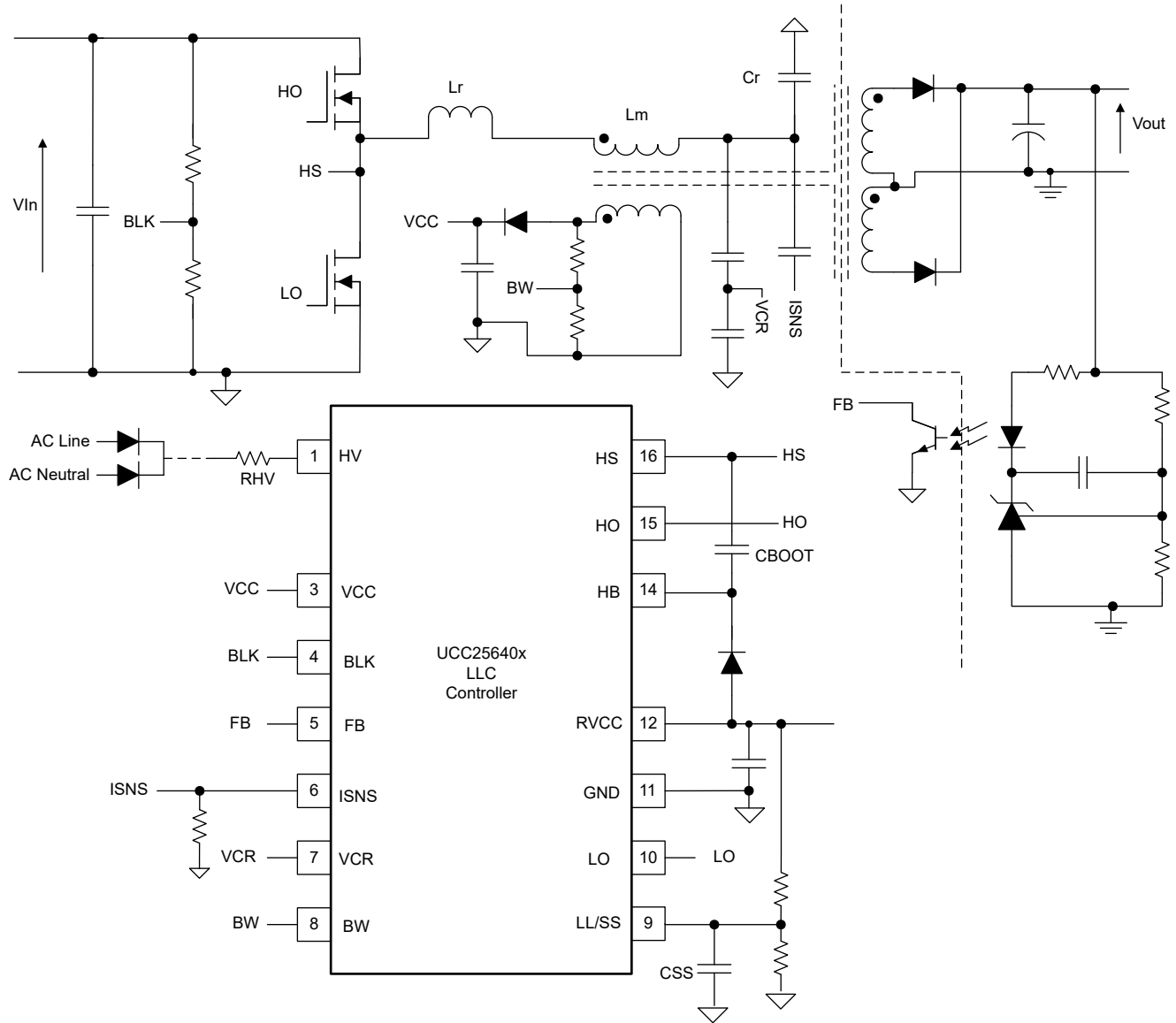
封装信息

器件型号	封装 ⁽¹⁾	封装尺寸 ⁽²⁾
UCC256402	SOIC	9.9mm × 3.9mm
UCC256403		
UCC256404		

(1) 如需了解所有可用封装，请参阅数据表末尾的可订购产品附录。

(2) 封装尺寸（长 × 宽）为标称值，并包括引脚（如适用）。





简化版原理图

内容

1 特性	1	7.3 特性说明	18
2 应用	1	7.4 器件功能模式	30
3 说明	1	8 应用和实施	42
4 器件比较表	4	8.1 应用信息	42
5 引脚配置和功能	5	8.2 典型应用	42
6 规格	6	8.3 电源相关建议	52
6.1 绝对最大额定值.....	6	8.4 布局	53
6.2 ESD 等级.....	6	9 器件和文档支持	56
6.3 建议运行条件.....	6	9.1 文档支持.....	56
6.4 热性能信息.....	7	9.2 接收文档更新通知.....	56
6.5 电气特性.....	7	9.3 支持资源.....	56
6.6 开关特性.....	11	9.4 商标.....	56
6.7 典型特性.....	12	9.5 静电放电警告.....	56
7 详细说明	16	9.6 术语表.....	56
7.1 概述.....	16	10 修订历史记录	56
7.2 功能方框图.....	17	11 机械、封装和可订购信息	56

4 器件比较表

器件	集成高电压启动	集成 X 电容器放电	需要外部辅助电源	突发软开和软关	BLK OVP	BW OVP 模式
UCC256402	是	否	否	否	否	重启
UCC256402A	是	否	否	否	是	重启
UCC256403	否	否	是	是	否	重启
UCC256403A	否	否	是	否	否	锁存
UCC256404	是	是	否	是	否	重启
UCC256404A	是	是	否	否	否	锁存
UCC256404B ⁽¹⁾	是	是	否	是	否	重启

(1) 该器件的 X 电容器放电特性未经认证机构测试，并根据现有 UCC25640x 认证的相似性进行了认证

5 引脚配置和功能

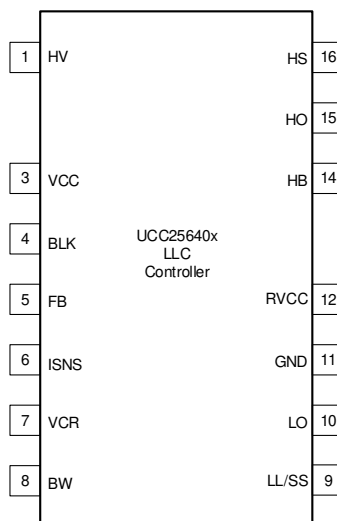


图 5-1. DDB 封装 16 引脚 SOIC (移除了引脚 2、13) 顶视图

引脚		类型 ⁽¹⁾	说明
名称	编号		
BLK	4	I	该引脚用于检测 LLC 级输入电压电平。在将信号施加到该引脚之前，应使用电阻分压器来衰减信号。该引脚上的电压电平将决定 LLC 转换器何时启动/停止开关。
BW	8	I	该引脚用于检测通过偏置绕组的输出电压。检测到的电压用于提供输出过压保护。在启动期间，该引脚还用于设定两个突发模式阈值 (BMT _L 和 BMT _H) 之间的比率。
FB	5	I	LLC 级控制反馈输入。从该引脚提供的电流将决定 LLC 输入功率级别。
GND	11	G	所有信号的接地基准。
HB	14	I	高侧栅极驱动器悬空电源电压。自举电容器连接在该引脚和 HS 引脚之间。应在 RVCC 和该引脚之间连接一个高压高速二极管，以便在低侧 MOSFET 导通期间为高侧栅极驱动器供电。
HO	15	O	高侧悬空栅极驱动输出。
HS	16	I	高侧栅极驱动悬空接地。高侧栅极驱动电流的电流回路。
HV	1	I	连接至内部 HV 启动 JFET。对于 UCC256402 和 UCC256404，该引脚为 PFC 和 LLC 级提供启动电源。该引脚还监测交流线路电压以实现 x 电容器放电功能。对于 UCC256403，该引脚需要接地。
ISNS	6	I	谐振电流检测。谐振电容器电压通过一阶滤波器进行差分，以测量谐振电流。
LL/SS	9	I	从该引脚连接到接地的电容值将影响软启动周期的持续时间。连接到该引脚的电阻分压器将定义施加在该引脚上用于启动的初始电压。系统启动后，该引脚用于对突发模式阈值进行编程。
LO	10	O	低侧栅极驱动输出。
已移除	2	不适用	功能性爬电距离和间隙
已移除	13	不适用	功能性爬电距离和间隙
RVCC	12	P	稳压 13V 电源。此引脚用于为栅极驱动器和 PFC 控制器供电。
VCC	3	P	电源输入。
VCR	7	I	谐振电容器电压检测。

(1) I = 输入，O = 输出，P = 电源，G = 接地

6 规格

6.1 绝对最大额定值

在自然通风工作温度范围内（除非另有说明），所有电压均以 GND 为基准，进入指定端子的电流为正电流，从指定端子流出的电流为负电流。⁽¹⁾

		最小值	最大值	单位
输入电压	HV, HB	-0.3	700	V
	BLK、LL/SS	-0.55	7.2	V
	VCR	-0.8	内部钳位	V
	VCC	-0.55	30	V
	BW、ISNS	-5	7.2	V
	HB - HS (适用于 UCC256402、UCC256402A、 UCC256403、UCC256403A、UCC256404、 UCC256404A)	-0.3	17	V
	HB - HS (适用于 UCC256404B)	-0.3	25	V
RVCC 输出电压	DC	-0.3	17	V
HO 输出电压	DC	HS - 0.3	HB + 0.3	V
	瞬态，小于 100ns	HS - 2	HB + 0.3	
LO 输出电压	DC	-0.3	RVCC + 0.3	V
	瞬态，小于 100ns	-2	RVCC + 0.3	
悬空接地压摆率	dV _{HS} /dt	-50	50	V/ns
HO、LO 脉冲电流	I _{OUT_PULSED}	-0.6	1.2	A
结温范围	T _J	-40	150	°C
存储温度范围， T _{stg}	T _{stg}	-65	150	
引线温度	焊接，10 秒		300	
	回流焊		260	

- (1) 超出绝对最大额定值运行可能会对器件造成永久损坏。绝对最大额定值并不表示器件在这些条件下或在建议运行条件以外的任何其他条件下能够正常运行。如果超出建议运行条件但在绝对最大额定值范围内使用，器件可能不会完全正常运行，这可能影响器件的可靠性、功能和性能并缩短器件寿命。

6.2 ESD 等级

			值	单位
V _(ESD)	静电放电	人体放电模型 (HBM)，符合 ANSI/ESDA/ JEDEC JS-001，HV、HO、HS、HB 引脚 ⁽¹⁾	±1000	V
		人体放电模型 (HBM)，符合 ANSI/ESDA/ JEDEC JS-001，其他所有引脚 ⁽¹⁾	±2000	
		充电器件模型 (CDM)，符合 JEDEC 规范 JESD22-C101，所有引脚 ⁽²⁾	±500	

- (1) JEDEC 文档 JEP155 指出：500V HBM 时能够在标准 ESD 控制流程下安全生产。
(2) JEDEC 文档 JEP157 指出：250V CDM 时能够在标准 ESD 控制流程下安全生产。

6.3 建议运行条件

所有电压均以 GND 为基准，-40°C < T_J = T_A < 125°C，进入指定端子的电流为正电流，从指定端子流出的电流为负电流，除非另有说明。

		最小值	标称值	最大值	单位
HV, HS	输入电压			600	V

6.3 建议运行条件（续）

所有电压均以 GND 为基准， $-40^{\circ}\text{C} < T_J = T_A < 125^{\circ}\text{C}$ ，进入指定端子的电流为正电流，从指定端子流出的电流为负电流，除非另有说明。

		最小值	标称值	最大值	单位
V _{CC}	电源电压	13	15	26	V
HB - HS	驱动器自举电压	10	12	16	V
C _B	从 HB 到 HS 的陶瓷旁路电容器	0.1		5	μF
C _{SS}	软启动引脚电容器	4.7		470	nF
C _{RVCC}	RVCC 引脚去耦电容器	4.7			μF
I _{RVCCMAX}	RVCC 最大输出电流 (1)			100	mA
T _A	工作环境温度	-40		125	°C

(1) 未经量产测试。根据特征确定

6.4 热性能信息

热指标 ⁽¹⁾		UCC25640x	单位
		D (SOIC)	
		14 引脚	
R _{θJA}	结至环境热阻	74.7	°C/W
R _{θJC(top)}	结至外壳（顶部）热阻	30.7	°C/W
R _{θJB}	结至电路板热阻	31.8	°C/W
Ψ _{JT}	结至顶部特征参数	4.4	°C/W
Ψ _{JB}	结至电路板特征参数	31.4	°C/W

(1) 有关新旧热指标的更多信息，请参阅 [半导体和 IC 封装热指标应用手册](#)。

6.5 电气特性

所有电压均以 GND 为基准， $-40^{\circ}\text{C} < T_J = T_A < 125^{\circ}\text{C}$ ，VCC = 15V，进入指定端子的电流为正电流，从指定端子流出的电流为负电流，除非另有说明。

参数		测试条件	最小值	典型值	最大值	单位
电源电压						
VCC _{Short}	低于该阈值时，使用减低启动电流	适用于 UCC256402、UCC256402A、UCC256404、UCC256404A、UCC256404B	0.3	0.5	0.8	V
VCC _{ReStartJfet}	低于该阈值时，重新启用 JFET。	适用于 UCC256402、UCC256402A、UCC256404、UCC256404A、UCC256404B	9.35	9.65	9.95	V
VCC _{StartSelf}	当 VCC 高于此水平时启动	适用于 UCC256402、UCC256402A、UCC256404、UCC256404A、UCC256404B	25	26	28	V
VCC _{StartSwitching}	当 VCC 高于此水平时启动	UCC256403、UCC256403A		10.9		V
VCC _{UVLOrising}	VCC 欠压锁定电压 (上升)		7.85	8.25	8.70	V
VCC _{UVLOHYS}	VCC 欠压锁定电压迟滞		0.15	0.25	0.35	V
电源电流						
I _{CCSleep}	突发关闭周期期间从 VCC 电压轨获取的电流		650	780	950	μA
I _{CCRun}	栅极开关时从 VCC 引脚获取的电流。不包括栅极电流	死区时间 = 1μs 最大死区时间	1.8	2.2	2.7	mA

6.5 电气特性 (续)

所有电压均以 GND 为基准, $-40^{\circ}\text{C} < T_J = T_A < 125^{\circ}\text{C}$, $V_{CC} = 15\text{V}$, 进入指定端子的电流为正电流, 从指定端子流出的电流为负电流, 除非另有说明。

参数		测试条件	最小值	典型值	最大值	单位
稳压电源						
V_{RVCC}	稳压电源电压	$V_{CC} = 15\text{V}$, 空载	12.7	13	13.45	V
	稳压电源电压	$V_{CC} = 15\text{V}$, 100mA 负载	12.4	13	13.45	V
	稳压电源电压	$V_{CC} = 13\text{V}$, 空载	12.7	12.98		V
	稳压电源电压	$V_{CC} = 13\text{V}$, 30mA 负载	12.4	12.6		V
$V_{RVCCUVLO}$	RVCC 欠压锁定电压		6.5	7	7.5	V
高压启动						
I_{HVLow}	降低的启动引脚电流	$V_{HV} = 20\text{V}$, $V_{CC} = 0\text{V}$	0.3	0.5	0.65	mA
I_{HVHigh}	全启动引脚电流	$V_{HV} = 20\text{V}$, $V_{CC} = 4\text{V}$	7.6	10.20	13.5	mA
I_{HVLeak}	HV 电流源漏电流	$V_{HV} = 600\text{V}$		1	4	μA
I_{HVZCD}	最高交流过零检测测试电流	对于 UCC256404B	1.0	1.3	1.6	mA
		UCC256404、UCC256404A	1.4	1.7	2.1	mA
$I_{HVZCDStep}$	交流过零检测测试电流步骤			0.38		mA
$I_{XCAPDischarge}$	X 电容放电电流		8.9	11.5	13.5	mA
$V_{zero-crossing}$	检测到过零的 HV 引脚电压阈值		8	9	11	V
$t_{XCAPZCD}$	第一个三测试电流级的交流过零检测窗口长度 ⁽¹⁾		10	12	14	ms
$t_{XCAPZCDLast}$	最后一个测试电流级的交流过零检测窗口长度 ⁽¹⁾		43	46	52	ms
$t_{XCAPIdle}$	交流过零检测空闲周期长度 ⁽¹⁾		635	700	772	ms
$t_{XCAPDischarge}$	X 电容放电电流处于活动状态的时间 ⁽¹⁾		327	360	390	ms
$t_{XCAPJFETON}$	JFETON 之后首次 X 电容检测的时间 ⁽¹⁾			12		ms
恒压电压感应						
$V_{BLKStart}$	允许 LLC 启动开关的 BLK 电压	适用于 UCC256402、UCC256402A、UCC256403、UCC256403A	2.94	3	3.06	V
		对于 UCC256404、UCC256404A、UCC256404B	0.98	1	1.02	V
$V_{BLKStop}$	强制 LLC 停止运行的 BLK 电压	适用于 UCC256402、UCC256402A、UCC256403、UCC256403A	2.15	2.2	2.25	V
		对于 UCC256404、UCC256404A、UCC256404B	0.88	0.9	0.925	V
$V_{BLKOVPRise}$	BLK 过压保护上升阈值	对于 UCC256402A	3.92	4.0	4.08	V
$V_{BLKOVPFall}$	BLK 过压保护下降阈值	对于 UCC256402A	3.72	3.8	3.88	V
反馈引脚						
$R_{FBInternal}$	内部下拉电阻器值		90	100	110	k Ω
I_{FB}	FB 内部电流源	适用于 UCC256402、UCC256402A、UCC256404、UCC256404A、UCC256404B	73	82	91	μA
		UCC256403、UCC256403A	147	164	182	μA
V_{FB}	当 FB 引脚灌电流处于 ($I_{FB} - 50\mu\text{A}$) 时的 FB 引脚电压			5.6		V
ΔV_{FB}	当 FB 引脚灌电流范围为 ($I_{FB} - 50\mu\text{A}$) 至 ($I_{FB} - 5\mu\text{A}$) 时的 FB 引脚电压变化			0.28		V

6.5 电气特性 (续)

所有电压均以 GND 为基准, $-40^{\circ}\text{C} < T_J = T_A < 125^{\circ}\text{C}$, $V_{CC} = 15\text{V}$, 进入指定端子的电流为正电流, 从指定端子流出的电流为负电流, 除非另有说明。

参数		测试条件	最小值	典型值	最大值	单位
ΔV_{clamp}	当 FB 引脚灌电流范围为 (IFB - 5μA) 至 (IFB + 5μA) 时的 FB 引脚电压变化		0.4			V
I _{FBclamp}	当 FB 被钳位时的最大 FB 内部电流源		82			μA
$\Delta V_{\text{FBclamp}}$	当 FB 引脚灌电流范围为 (IFB + 5μA) 至 (IFB + I _{FBclamp} - 5μA) 时的 FB 引脚电压变化		0.25			V
f _{-3dB}	反馈链 -3dB 截止频率 ⁽²⁾		1			MHz
谐振电流检测						
V _{ISNS_OCP1}	OCP1 阈值		3.9	4	4.1	V
V _{ISNS_OCP1_SS}	软启动期间的 OCP1 阈值		4.85	5	5.15	V
V _{ISNS_OCP2}	OCP2 阈值		0.57	0.6	0.63	V
V _{ISNS_OCP3}	OCP3 阈值		0.40	0.43	0.46	V
t _{ISNS_OCP2}	在触发 OCP2 之前，平均输入电流需要保持在 OCP2 阈值以上的时间 ⁽¹⁾		2			ms
t _{ISNS_OCP3}	在触发 OCP3 之前，平均输入电流需要保持在 OCP3 阈值以上的时间 ⁽¹⁾		50			ms
V _{IpolarityHyst}	谐振电流极性检测迟滞		16	30	44	mV
n _{OCP1}	触发 OCP1 故障前的 OCP1 周期数 ⁽¹⁾		4			
谐振电容器电压检测						
V _{CM}	内部共模电压		2.90	3	3.14	V
I _{RAMP}	频率补偿斜坡电流源值		1.84	2	2.16	mA
I _{Mismatch}	上拉和下拉斜坡电流源不匹配 ⁽³⁾		-1.25		1.25	%
栅极驱动器						
V _{LOL}	LO 输出低电压	I _{sink} = 20mA	0.02	0.05	0.12	V
V _{RVCC} - V _{LOH}	LO 输出高电压	I _{source} = 20mA	0.10	0.18	0.3	V
V _{HOL} - V _{HS}	HO 输出低电压	I _{sink} = 20mA	0.02	0.05	0.12	V
V _{HB} - V _{HOH}	HO 输出高电压	I _{source} = 20mA	0.10	0.18	0.3	V
V _{HB-HSUVLOFall}	高侧栅极驱动器 UVLO 下降阈值		6.6	7.25	7.75	V
V _{HB-HSUVLOHys}	高侧栅极驱动器 UVLO 阈值迟滞		0.78	0.9	1.05	V
I _{source_pk_HO}	HO 峰值拉电流 ⁽²⁾		-0.6			A
I _{source_pk_LO}	LO 峰值拉电流 ⁽²⁾		-0.6			A
I _{sink_pk_HO}	HO 峰值灌电流 ⁽²⁾		1.2			A
I _{sink_pk_LO}	LO 峰值灌电流 ⁽²⁾		1.2			A
自动加载						
I _{BOOT_QUIESC} ENT	(HB - HS) 静态电流	HB - HS = 12V	42	62	80	μA
I _{BOOT_LEAK}	HB 至 GND 漏电流	V _{HB} = 600V	0.40			5.40 μA
t _{ChargeBoot}	电荷引导状态的长度		230	265	300	μs
软启动和突发模式						
I _{SSUp}	SS 引脚的电流输出，用于为软启动电容器充电		26	36	45	μA

6.5 电气特性 (续)

所有电压均以 GND 为基准, $-40^{\circ}\text{C} < T_J = T_A < 125^{\circ}\text{C}$, $V_{CC} = 15\text{V}$, 进入指定端子的电流为正电流, 从指定端子流出的电流为负电流, 除非另有说明。

参数		测试条件	最小值	典型值	最大值	单位
R_{SSDown}	SS 引脚下拉电阻	ZCS 或 OCP1	300	370	450	Ω
$t_{SSInitVolPrgm}$	SS 初始电压编程时间 ⁽¹⁾		720	776	830	μs
R_{LL}	LL/SS 电压调节电阻值		92	98	106	$k\Omega$
N_{burst}	每个突发数据包中的最小脉冲数 (包括突发软开启/关闭脉冲)	适用于 UCC256402、UCC256402A、UCC256403A、UCC256404A		16		
		对于 UCC256403、UCC256404、UCC256404B		40		
$N_{softmax}$	突发软开启/关闭的最大脉冲数			7		
K_{soft}	突发软开启/关闭期间 $V_{comp}/V_{FBreplica}$ 的最小比率			0.33		
$V_{LLVolPrgm}$	突发模式退出阈值 (BMT_H) 编程期间的 LL 引脚电压			3.5		V
BMT_{Hmin}	最小突发模式退出阈值			0.2		V
BMT_{Lmin}	最小突发模式进入阈值			0.2		V
偏置绕组						
$V_{BWOVP_{Pos}}$	输出电压 OVP - 正阈值		3.86	4	4.12	V
$V_{BWOVP_{Neg}}$	输出电压 OVP - 负阈值		-4.12	-4	-3.86	V
n_{BWOV}	触发 BW OVP 故障前的 BW OVP 周期数 ⁽¹⁾			5		
I_{BWPrgm}	用于 BMT_L/BMT_H 编程的 BW 引脚拉电流		51	54	57	μA
t_{BWPrgm}	BMT_L/BMT_H 编程时间			2		ms
$K_{BMTL/BMTH1}$	BMT_L/BMT_H 比率选项 1			0.95		
$K_{BMTL/BMTH2}$	BMT_L/BMT_H 比率选项 2			1		
$K_{BMTL/BMTH3}$	BMT_L/BMT_H 比率选项 3			0.9		
$K_{BMTL/BMTH4}$	BMT_L/BMT_H 比率选项 4			0.8		
$K_{BMTL/BMTH5}$	BMT_L/BMT_H 比率选项 5			0.6		
$K_{BMTL/BMTH6}$	BMT_L/BMT_H 比率选项 6			0.6		
$K_{BMTL/BMTH7}$	BMT_L/BMT_H 比率选项 7 (突发模式禁用)			0.4		
$R_{BWPrgm1}$	用于选择 BMT_L/BMT_H 比率选项 1 的 BW 引脚等效电阻 ⁽²⁾		24730			Ω
$R_{BWPrgm2}$	用于选择 BMT_L/BMT_H 比率选项 2 的 BW 引脚等效电阻 ⁽²⁾		17125		19976	Ω
$R_{BWPrgm3}$	用于选择 BMT_L/BMT_H 比率选项 3 的 BW 引脚等效电阻 ⁽²⁾		12562		13624	Ω
$R_{BWPrgm4}$	用于选择 BMT_L/BMT_H 比率选项 4 的 BW 引脚等效电阻 ⁽²⁾		9018		9813	Ω
$R_{BWPrgm5}$	用于选择 BMT_L/BMT_H 比率选项 5 的 BW 引脚等效电阻 ⁽²⁾		6478		6849	Ω
$R_{BWPrgm6}$	用于选择 BMT_L/BMT_H 比率选项 6 的 BW 引脚等效电阻 ⁽²⁾		4450		4732	Ω
$R_{BWPrgm7}$	用于选择 BMT_L/BMT_H 比率选项 7 (突发模式禁用) 的 BW 引脚等效电阻 ⁽²⁾		2422		3038	Ω
自适应死区时间						

6.5 电气特性 (续)

所有电压均以 GND 为基准， $-40^{\circ}\text{C} < T_J = T_A < 125^{\circ}\text{C}$ ， $V_{CC} = 15\text{V}$ ，进入指定端子的电流为正电流，从指定端子流出的电流为负电流，除非另有说明。

参数		测试条件	最小值	典型值	最大值	单位
dV_{HS}/dt	可检测的压摆率 ⁽¹⁾		-0.1		-50	V/ns
故障恢复						
$t_{\text{PauseTimeOut}}$	暂停计时器 ⁽¹⁾			1		s
热关断						
T_{J_r}	热关断温度 ⁽¹⁾	温度上升	125	145		$^{\circ}\text{C}$
T_{J_H}	热关断迟滞 ⁽¹⁾			10		$^{\circ}\text{C}$

(1) 未经量产测试。根据特征确定

(2) 未经量产测试。根据设计确定

(3) I_{Mismatch} 的计算公式为

$$[I_{PU} - (I_{PD} + I_{PU})/2] / [(I_{PD} + I_{PU})/2] \quad (1)$$

6.6 开关特性

所有电压均以 GND 为基准， $-40^{\circ}\text{C} < T_J = T_A < 125^{\circ}\text{C}$ ， $V_{CC} = 15\text{V}$ ，进入指定端子的电流为正电流，从指定端子流出的电流为负电流，除非另有说明。

参数		测试条件	最小值	典型值	最大值	单位
$t_{r(LO)}$	上升时间	10% 至 90%，1nF 负载		30	50	ns
$t_{f(LO)}$	下降时间	10% 至 90%，1nF 负载		20	50	ns
$t_{r(HO)}$	上升时间	10% 至 90%，1nF 负载		30	50	ns
$t_{f(HO)}$	下降时间	10% 至 90%，1nF 负载		20	50	ns
$t_{DT(min)}$	最小死区时间 ⁽¹⁾			100		ns
$t_{DT(max)}$	最大死区时间 (死区时间故障) ⁽¹⁾	未检测到 ZCS 事件		1.1		μs
$t_{DT(max_ZCS)}$	最大死区时间 (死区时间故障) ⁽¹⁾	检测到 ZCS 事件		150		μs
$t_{ON(min)}$	最小栅极打开时间 ⁽¹⁾			250		ns
$t_{ON(max)}$	最大栅极打开时间 ⁽¹⁾			16		μs

(1) 未经量产测试。根据设计确定

6.7 典型特性

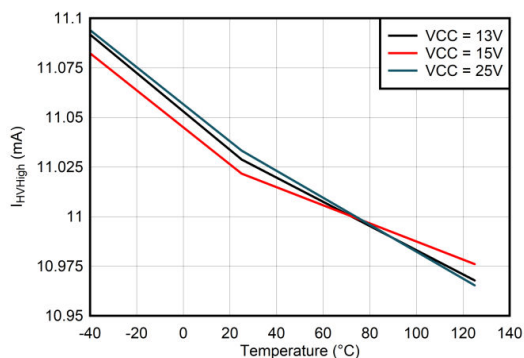


图 6-1. I_{HVHigh} 与温度间的关系

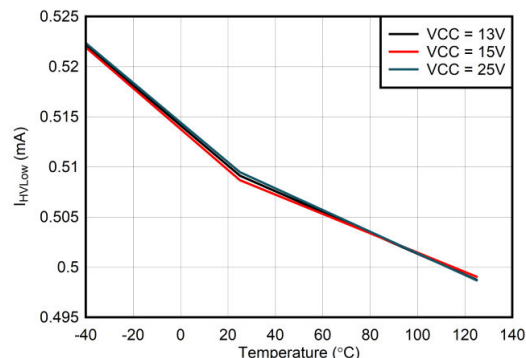


图 6-2. I_{HVLow} 与温度间的关系

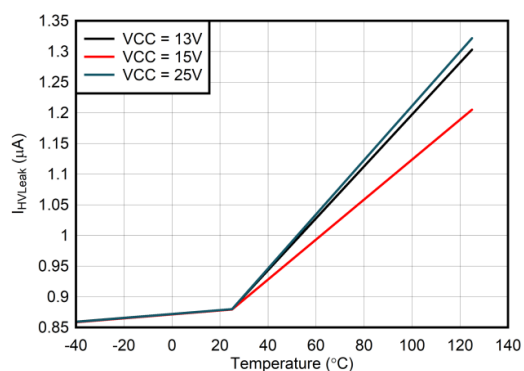


图 6-3. I_{HVLeak} 与温度间的关系

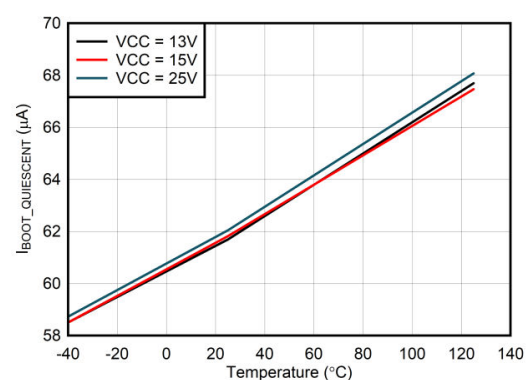


图 6-4. $I_{BOOT_QUIESCENT}$ 与温度间的关系

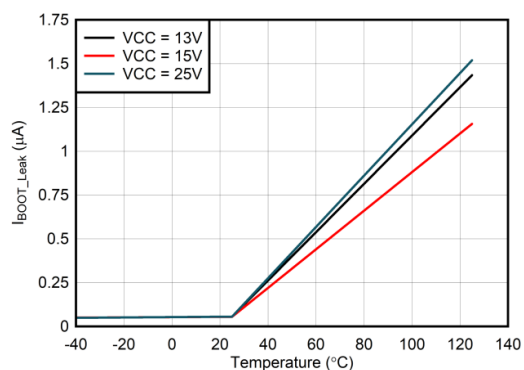


图 6-5. I_{BOOT_LEAK} 与温度间的关系

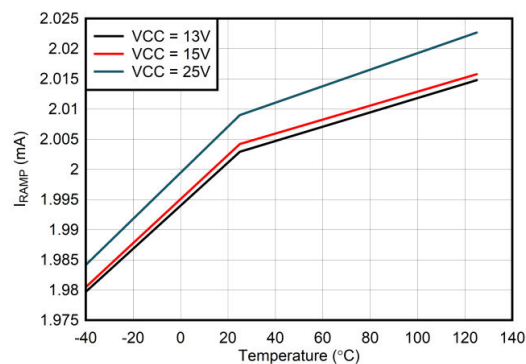


图 6-6. I_{RAMP} 与温度间的关系

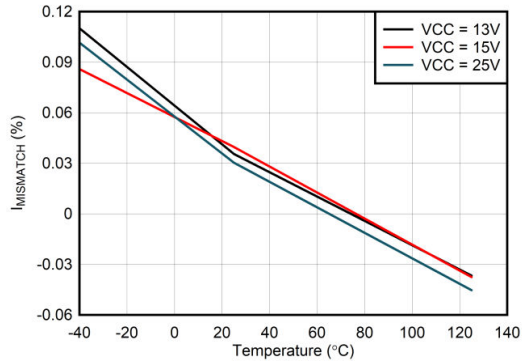


图 6-7. I_{MISMATCH} 与温度间的关系

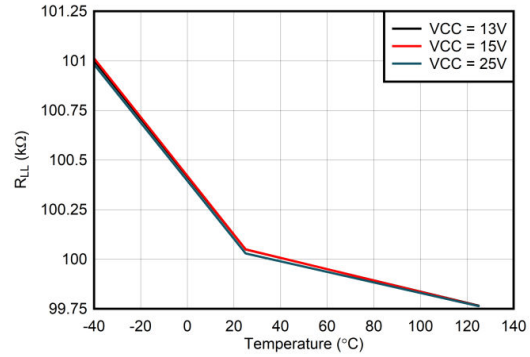


图 6-8. R_{LL} 与温度间的关系

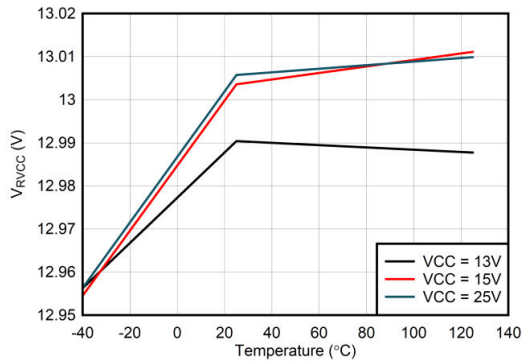


图 6-9. V_{RVCC} (无负载) 与温度间的关系

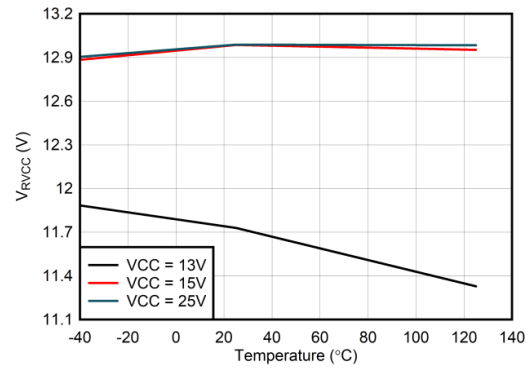


图 6-10. V_{RVCC} (100mA 负载) 与温度间的关系

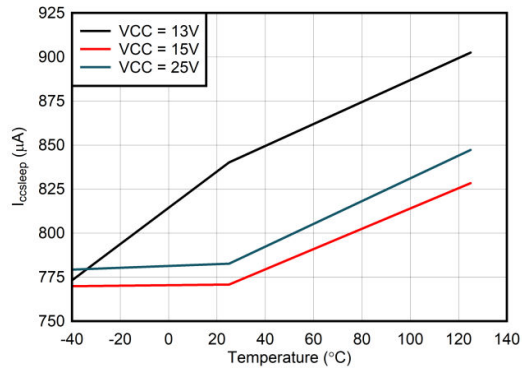


图 6-11. I_{CCSleep} 与温度间的关系

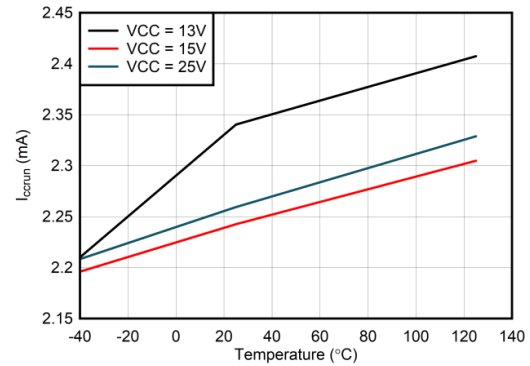


图 6-12. I_{CCRun} 与温度间的关系

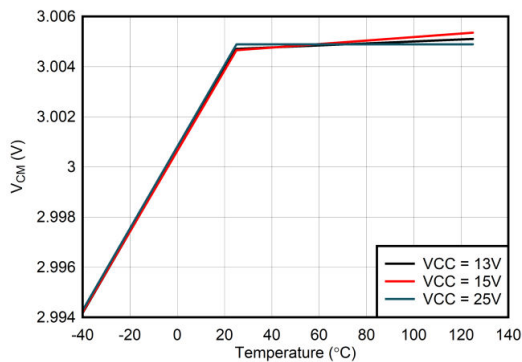


图 6-13. V_{CM} 与温度间的关系

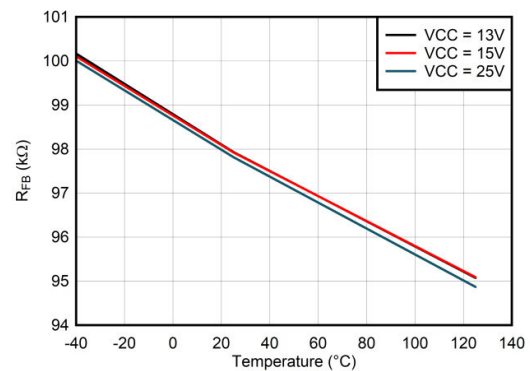


图 6-14. R_{FB} 与温度间的关系

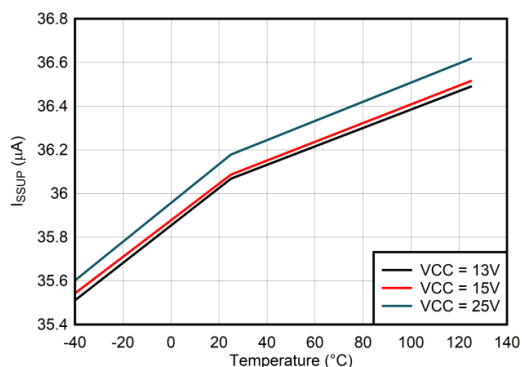


图 6-15. I_{SSUP} 与温度间的关系

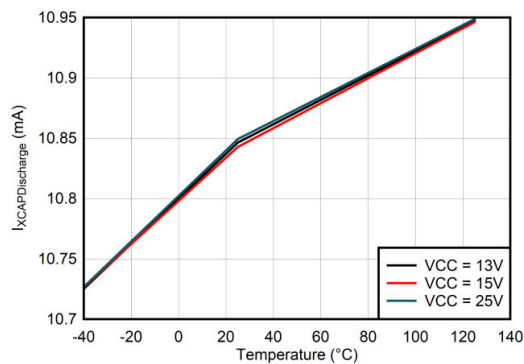


图 6-16. $I_{XCAPDischarge}$ 与温度间的关系

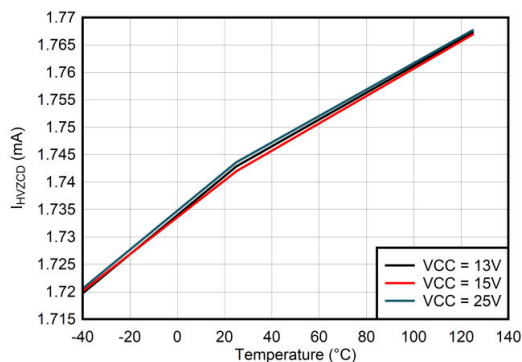


图 6-17. I_{HVZCD} 与温度间的关系

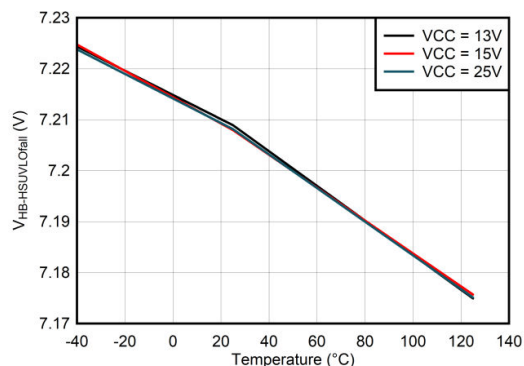


图 6-18. $V_{HB-HSUVLofail}$ 与温度间的关系

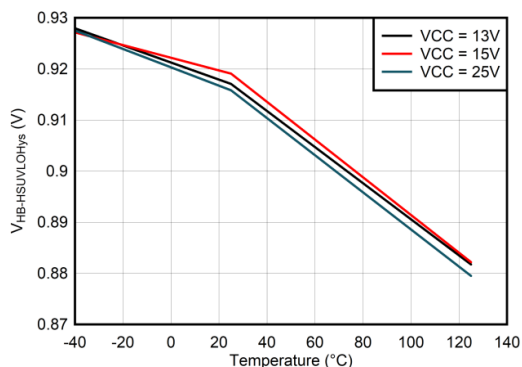


图 6-19. $V_{HB-HSUVLohys}$ 与温度间的关系

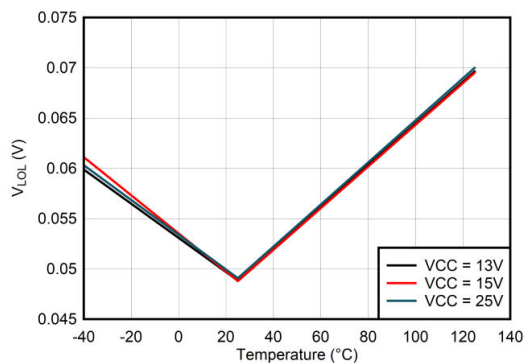


图 6-20. V_{LOL} 与温度间的关系

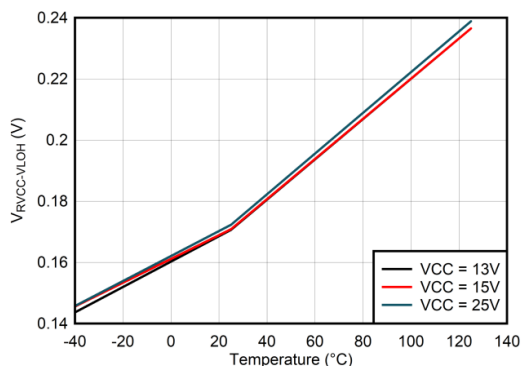


图 6-21. $V_{RVCC-VLOH}$ 与温度间的关系

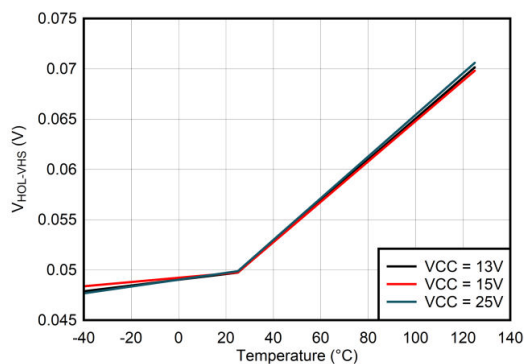


图 6-22. $V_{HOL-VHS}$ 与温度间的关系

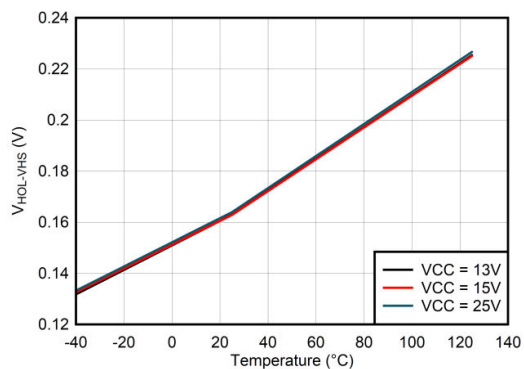


图 6-23. $V_{HB} - V_{HOH}$ 与温度间的关系

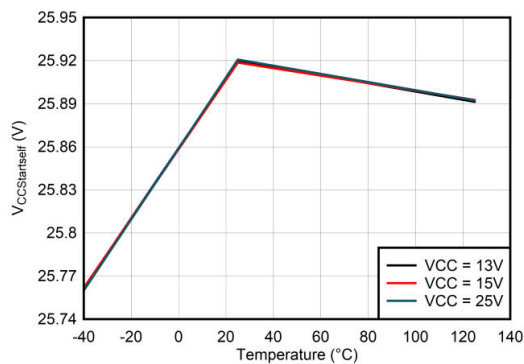


图 6-24. $V_{CCStartself}$ 与温度间的关系

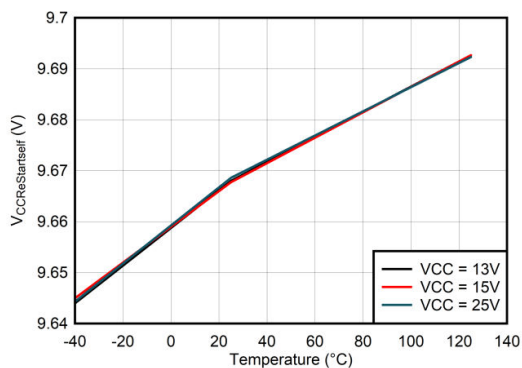


图 6-25. $V_{CCReStartJfet}$ 与温度间的关系

7 详细说明

7.1 概述

UCC25640x 是一款适用于交流/直流电源的全功能 LLC 谐振控制器。UCC25640x 的高集成度可以在不影响功能的情况下显著减少元件数量并减小选项尺寸。UCC25640x 使用优化的突发模式实现极低的待机功耗和低可闻噪声的待机运行。该器件采用新型控制方案，可提供出色的瞬态性能。

许多消费类应用都使用 PFC + LLC 电源，包括大屏幕电视、交流/直流适配器、工业电源和 LED 驱动器。此拓扑比 PFC 和反激式设计更受欢迎，因为它具有更高的效率和更小的尺寸。PFC 和 LLC 电源系统的一个缺点是，由于 LLC 级需要极小的循环电流来保持稳压，因此轻负载效率较差且空载功耗较高。为了满足轻负载效率和待机功耗要求，传统上使用了辅助反激式转换器。辅助反激式转换器持续运行，使主 PFC + LLC 电源系统在系统进入低功耗或待机模式时关断。UCC25640x 包含几个新特性，使其能够提供出色的轻负载效率和低空载功耗。因此，电源设计人员无需辅助反激式转换器，即可创建符合严格空载电源目标的系统。

UCC25640x 使用新型控制算法混合迟滞控制 (HHC) 来实现调节。在此控制算法中，谐振电容器电压定义了开关频率，该频率承载准确的输入电流信息。这使得控制器能够直接监测并校正输入电流。与传统的直接频率控制 (DFC) 相比，HHC 使系统在频率控制部分较小时接近一阶系统。这实现了出色的负载和线路瞬态响应。

UCC25640x 采用高级突发模式，以便满足对待机功耗和可闻噪声水平的严格要求。在低输出功率级别下，UCC25640x 会自动转换为轻负载突发模式。在突发模式下，UCC25640x 以固定数量的开关脉冲和一个关断周期重复地发送一个突发数据包。基于 FB 引脚电流的次级稳压器环路会终止突发数据包之间的关断时间段。突发开启周期期间的 LLC 等效负载电流电平是一个可编程值。对于每个突发数据包，开关频率在前几个开关周期缓慢斜降，在最后几个开关周期斜升，从而在突发运行期间缓慢斜升和斜降谐振电流。这种突发软启动和软关断有助于有效降低突发模式运行期间的可闻噪声。此外，UCC25640x 在突发模式期间以低功耗模式运行，具有极低的静态电流和以低电流进行偏置的光耦合器运行。

UCC25640x 可监控半桥开关节点以确定栅极信号所需的死区时间。通过这种方式，死区时间会自动调节，从而实现出色的效率和可靠的运行。UCC25640x 包含一个压摆率检测器，其开关节点电压对于自适应死区时间的灵敏度更高，因此与替代器件相比，其运行本质上是稳健的。

UCC25640x 包含高侧和低侧驱动器，可以在 LLC 功率级中直接驱动 N 沟道 MOSFET。这样，只需极少的元件即可实现功能齐全의完整电源系统。

UCC256402 和 UCC256404 包含一个高压启动 JFET，用于对 VCC 电容器进行初始充电，以提供启动 PFC 和 LLC 电源系统所需的能量。运行后，PFC 和 LLC 控制器的电源从 LLC 变压器上的偏置绕组获得。UCC256404 还包含有源 X 电容器放电功能，可在拔下交流输入后对 EMC 滤波器 X 电容器上的剩余电压进行放电。UCC256403 不包含高压启动及有源 X 电容器放电功能。它需要一个辅助电源为 VCC 供电。

UCC25640x 包含可避免零电流开关 (ZCS) 运行区域的可靠算法。检测到 ZCS 运行时，UCC25640x 会覆盖反馈信号并斜升开关频率，直到非电容运行恢复。之后，开关频率以软启动电容器确定的速率斜降，直到控制移交回电压控制环路。

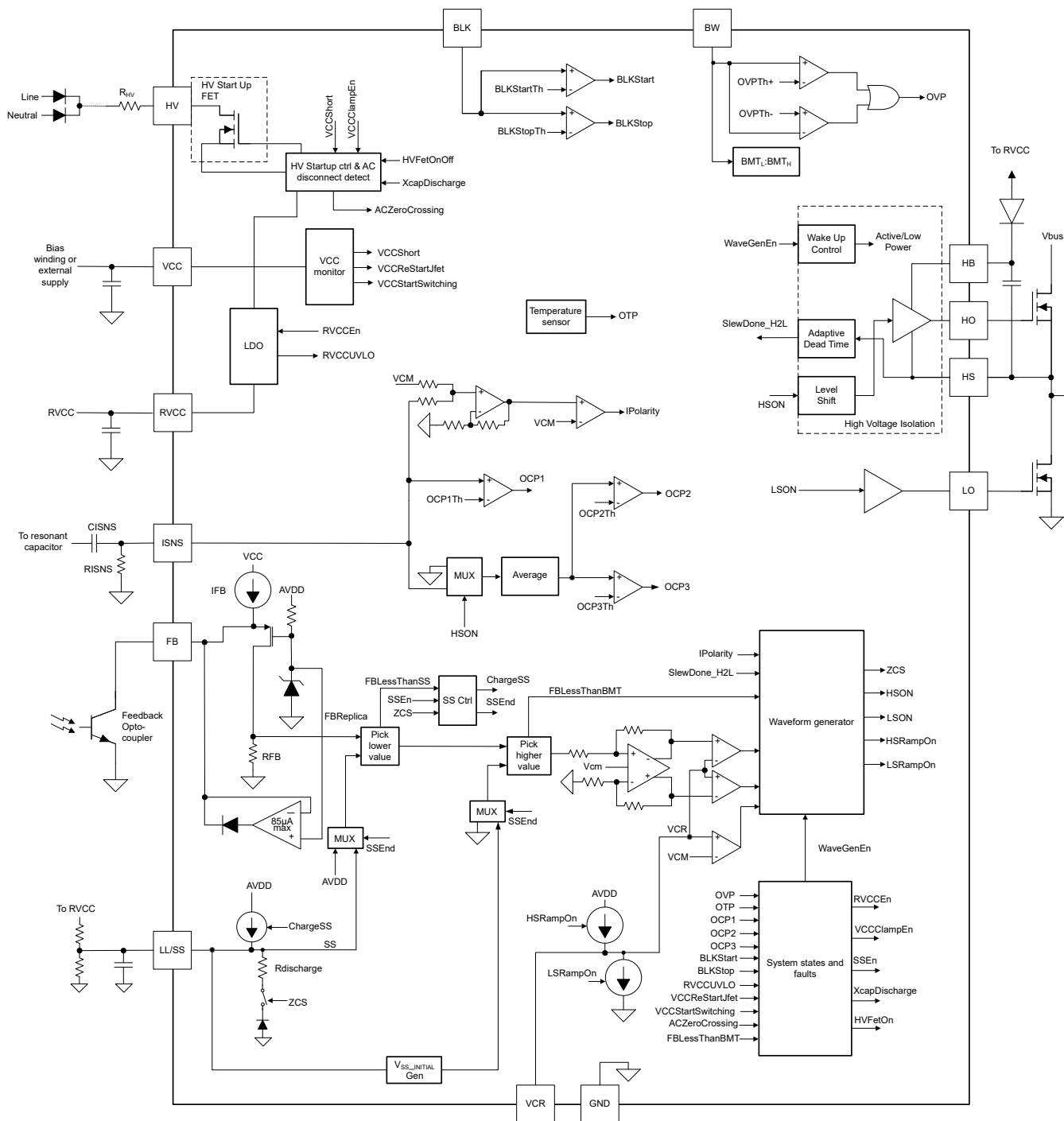
UCC25640x 的其他保护特性包括

- 三级过电流保护 (OCP)
- 输出过压保护 (OVP)
- 输入电压欠压保护 (UVP)
- 栅极驱动器欠压锁定 (UVLO) 保护
- 过热保护 (OTP)

UCC25640x 的主要特性总结如下：

- 混合迟滞控制有助于实现出色的负载及线路瞬态响应
- 经过优化的轻负载突发模式可以实现低于 150mW 的待机功耗设计
- 突发软启动和软关断可以实现超静音待机运行
- 稳健的自适应死区时间控制

- ## 7.2 功能方框图



7.3 特性说明

7.3.1 混合迟滞控制

UCC25640x 使用新型控制方案混合迟滞控制 (HHC)，以实现同类最佳的线路和负载瞬态性能。控制方法使补偿器更加易于设计。此控制方法还使轻负载管理更简单、更高效。改善线路瞬态可降低大容量电容器和输出电容器值，从而降低系统成本。

HHC 是一种将传统频率控制和电荷控制相结合的控制方法。这是一种具有附加频率补偿斜坡的电荷控制。与传统的频率控制相比，它将功率级传递函数从二阶系统更改为一阶系统，从而使补偿网络设计更简单。控制力度与输入电流直接相关，因此可实现出色的线路和负载瞬态。与充电控制相比，混合迟滞控制通过添加频率补偿斜坡来避免不稳定。频率补偿可确立系统稳定性，并降低输出阻抗。较低的输出阻抗使瞬态性能优于充电控制。频率补偿还使得突发模式软启动和软关断的实现更加容易，因为更改控制工作量会直接影响开关频率。对于突发模式软启动和软关断，转换器开关频率会自行调节，以降低谐振电流。

总之，HHC 解决了以下问题：

- LLC 转换器可实现出色的负载瞬态及线路瞬态性能
- 将小信号传递函数更改为一阶系统，轻松实现非常高的带宽
- 通过频率补偿实现固有稳定
- 使突发模式控制更易于优化轻负载效率
- 使突发模式软启动和软关断的实现更加容易，从而降低可闻噪声

图 7-1 显示了 UCC25640x 中的 HHC 实现：一个电容器分压器 (C1 和 C2) 和两个匹配良好的受控电流源。谐振电容器电压被由 C1 和 C2 形成的电容器分压器分压。电流源通过栅极驱动信号控制。当高侧开关导通时，上部电流源向电容器分压器注入恒定电流；当低侧开关导通时，下部电流源从电容器分压器中拉出相同数量的恒定电流。这两个电流源为 VCR 节点增加了一个三角补偿斜坡。这些电流源由基准电压 AVDD 提供。AVDD 必须等于或大于共模电压 V_{CM} 的两倍。然后将分压谐振电容器电压和补偿斜坡电压相加，得到 VCR 节点电压。如果频率补偿斜坡处于主导地位，则 VCR 节点电压看起来像三角波形，控制类似于直接频率控制。如果谐振电容器电压占主导地位，VCR 节点电压的形状与实际谐振电容器电压相似，并且控制类似于电荷控制。这就是控制方法被称为“混合”的原因，补偿斜坡被称为频率补偿。

此设置具有固有的负反馈，以保持高侧和低侧导通时间平衡，并将 VCR 节点的共模电压保持在 V_{CM} 处。

新的控制方案需要两个输入信号：VCR 和 V_{COMP}。VCR 是谐振电容器电压按比例降低的值与频率补偿斜坡之和。V_{COMP} 是电压环路补偿器输出。下面的波形显示了如何根据 VCR 和 V_{COMP} 来控制高侧和低侧开关。VCR 的共模电压为 V_{CM}。

根据 V_{COMP} 和 V_{CM} (3V)，有两个阈值：创建了 V_{TH} 和 V_{TL}。

$$V_{TH} = V_{CM} + \frac{V_{comp}}{2} \quad (2)$$

$$V_{TL} = V_{CM} - \frac{V_{comp}}{2} \quad (3)$$

将 VCR 电压与两个阈值进行比较。当 VCR > V_{TH} 时，高压侧开关关闭；当 VCR < V_{TL} 时，低压侧开关关闭。HO 和 LO 导通边沿由自适应死区时间电路控制。

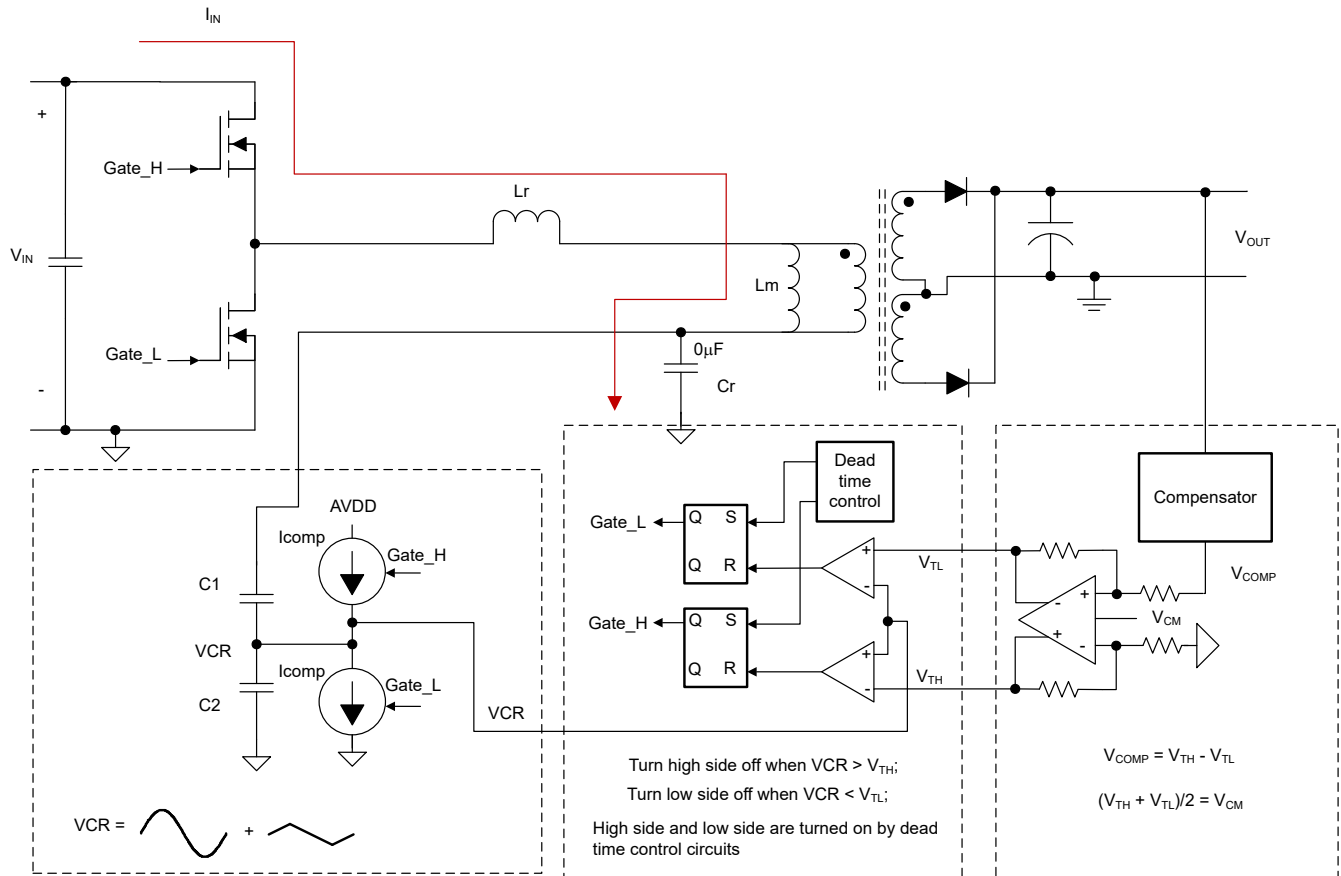


图 7-1. UCC25640x HHC 实施

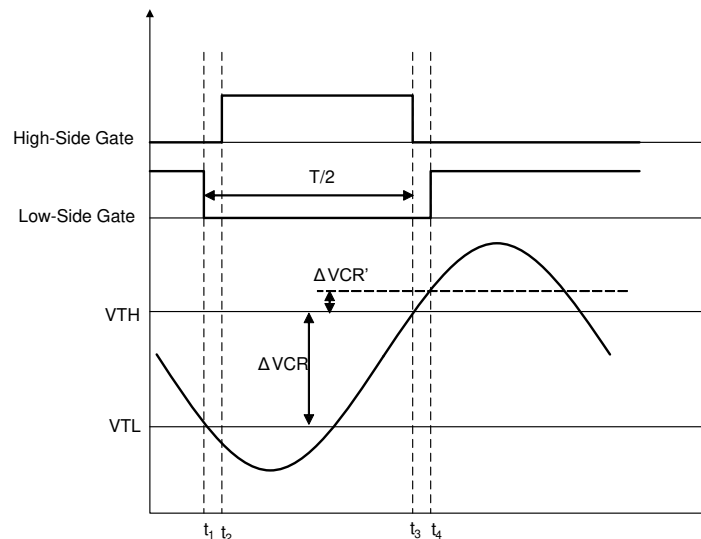


图 7-2. HHC 栅极开/关控制原则

7.3.2 稳压 13V 电源

RVCC 引脚是稳压 13V 电源。该稳压轨用于为 PFC 和 LLC 提供偏置电源。RVCC 具有欠压锁定 (UVLO) 功能。在正常运行期间，如果 RVCC 电压低于 RVCC_{UVLO} 阈值，系统将进入 FAULT 状态。节 7.3.9 部分包含有关 FAULT 处理的详细信息。

7.3.3 反馈链

输出电压控制由位于隔离栅次级侧的电压稳压器电路提供。来自次级稳压器电路的需求信号使用光耦合器通过隔离栅传输，并馈送到 UCC25640x 上的 FB 引脚。本部分介绍整个反馈链。图 7-3 展示了 FB 链的方框图，图 7-4 展示了时序图，即正常软启动、ZCS 事件、负载步骤进入突发模式、然后退出突发模式的典型。

反馈链具有以下功能：

- 光耦合器反馈信号输入和偏置
- FB 电压钳位
- 通过“取较低值”块选择软启动功能
- 通过“取较高值”块选择突发模式
- 将单端反馈需求转换为两个阈值 V_{TH} 和 V_{TL} ；以及与阈值和共模电压 V_{CM} 的 VCR 比较

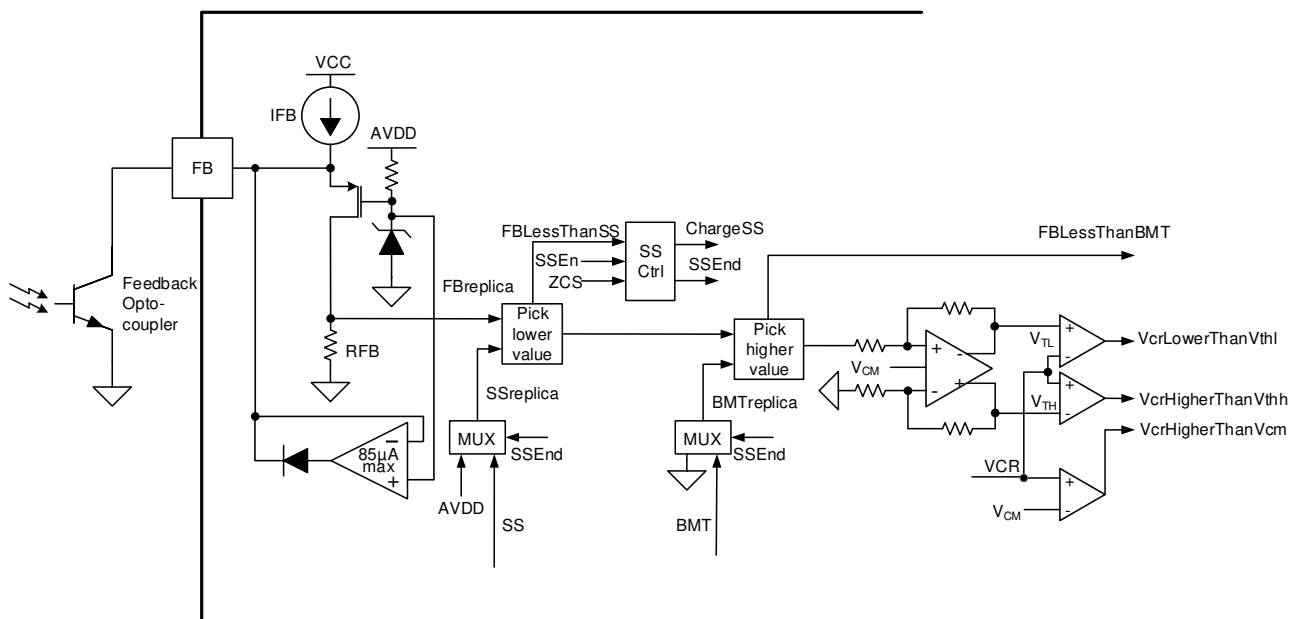


图 7-3. 反馈链方框图

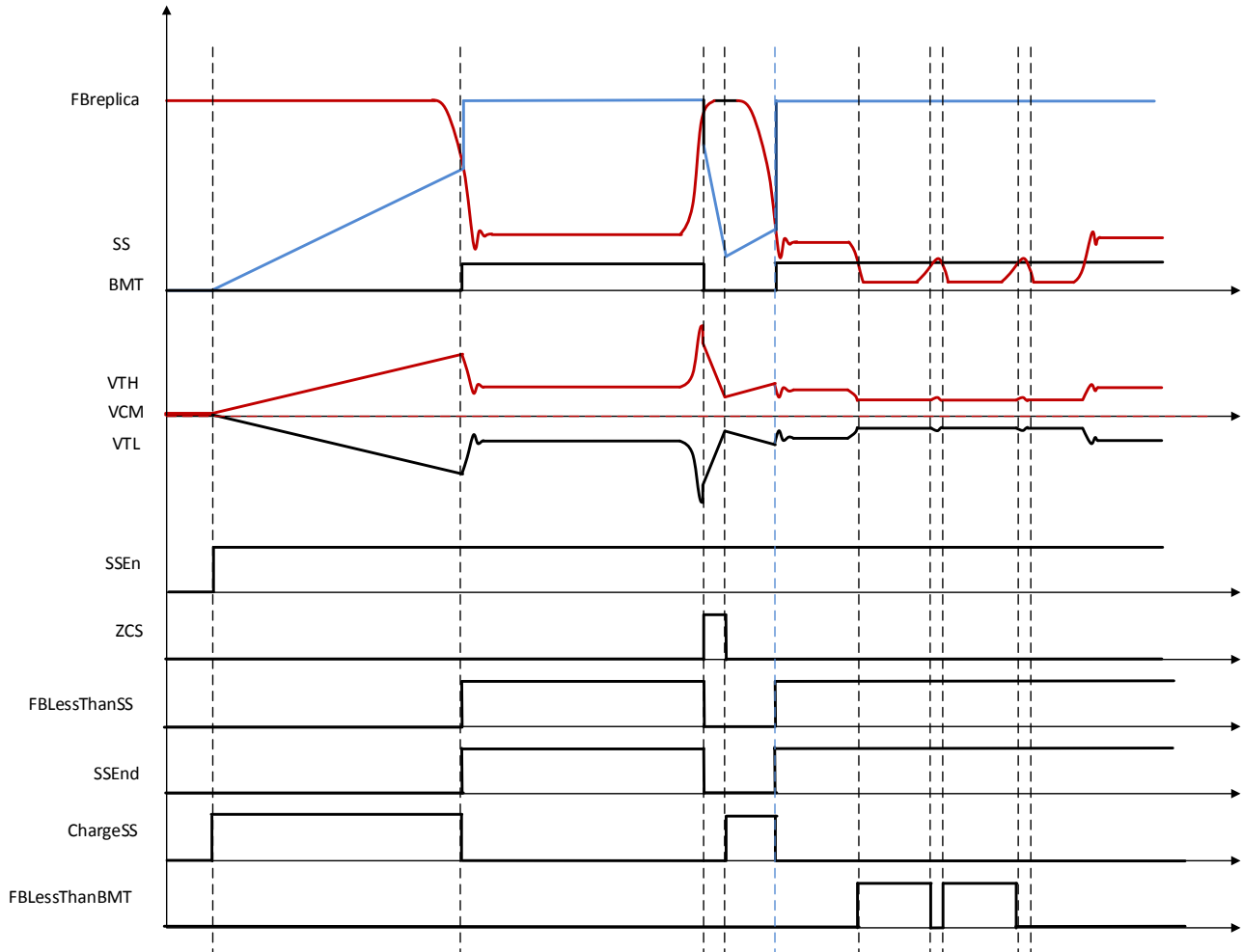


图 7-4. 反馈链计时示意图

7.3.3.1 光耦合器反馈信号输入和偏置

次级稳压器电路和光耦合器反馈电路都会直接增加系统的待机功耗。为了实现极低的待机功耗，需要在低电流模式下驱动光耦合器。

如图 7-3 中所示，VCC 电压产生一个恒定电流源 I_{FB} ，并连接到 FB 引脚。电阻 R_{FB} 也会与 PMOS 串联连接到此电流源。在正常运行期间，PMOS 始终导通，因此 FB 引脚电压等于齐纳二极管基准电压加上 PMOS 源极至栅极上的压降。

$$I_{FB} = I_{opto} + I_{RFB} \quad (4)$$

通过此公式可以得出，当 I_{opto} 增加时， I_{RFB} 会降低，从而降低 $FB_{replica}$ 。这样，控制效果就会反转。偏置光耦合器的一种传统方法是在光耦合器输出的集电极上使用上拉电阻器。为了降低功耗，上拉电阻器必须很大，这会限制环路带宽。对于 UCC25640x 中使用的偏置电流方法，FB 引脚电压保持恒定，以便光耦合器的寄生电容不会向系统引入额外的极点，随后会限制环路带宽。

7.3.3.2 FB 引脚电压钳位

如节 7.3.3.1 部分所示，随着 I_{opto} 的增加， $FB_{replica}$ 会减小。当 I_{opto} 达到 I_{FB} 的值时，由于没有电流流过 PMOS，FB 引脚电压开始下降。FB 引脚拉低会影响系统瞬态响应，这是由于对光耦合器的寄生电容器充电以拉高 FB 引脚电压时，会引入额外延迟。FB 引脚电压钳位电路可用于防止这种情况。当 FB 引脚电压降至 FB 引脚

钳位电压阈值以下时，会导通一个额外电流源，对 FB 电压进行钳位。钳位强度为 $I_{FBclamp}$ 。从轻负载变为重负载时，FB 引脚钳位电路可提高系统瞬态性能。

7.3.3.3 “取较低值”块和软启动多路复用器

电路的这一部分由 3 个元件组成：

- 取较低值块
- 一个 MUX，用于选择 AVDD 或 SS 信号作为取较低值块的第二个输入
- SS 控制块，用于在 ZCS 故障的情况下处理 SS 电容器的充电和放电

取较低值块有两个输入。第一个输入是 FBreplica。第二个输入在 AVDD 和 LL/SS 引脚电压之间选择。块输出是两个输入中的较低者。

MUX 在 SS 和 AVDD 之间进行选择。该选择基于 SSEnd (软启动结束) 信号，该信号是 SS Ctrl 块的输出。当 SS 高于 FBreplica 时，SSEnd 为高电平，并且状态机已启动软启动过程，同时没有 ZCS 情况。软启动结束后切换到 AVDD 有助于确保在非软启动或非 ZCS 故障情况下，FBreplica 信号始终通过取较低值块发送。它还释放 LL/SS 引脚以执行轻负载阈值编程。

SS 控制块负责在 ZCS 故障的情况下处理 SS 电容器的充电及放电。当发生 ZCS 时，它会复位 SSEnd 信号，因此下拉 LL/SS 引脚以增加开关频率的影响可能会通过取较低值块。

7.3.3.4 取较高值块和突发模式多路复用器

取较低值块的输出进入取较高值块，从而选择取较低值块输出和突发模式阈值设置中的较高者。

突发模式多路复用器在突发模式阈值 (BMT) 和接地之间进行选择。在软启动期间，多路复用器选择接地。启动过程为开环，由软启动斜坡控制。在软启动阶段，突发模式不会启用。

软启动后，两个输入中的较高者被发送到差分放大器。该块的输出为 FBLessThanBMT。该输出被发送到波形发生器状态机以控制突发模式和系统外部关断。

7.3.3.5 VCR 比较器

取较高值块的输出被发送到差分放大器，以将信号转换为与 V_{CM} 对称的两个阈值。两个阈值之间的差值 V_{TH} 和 V_{TL} 等于输入振幅。然后将 VCR 引脚电压与 V_{TH} 、 V_{TL} 和 V_{CM} 进行比较。结果被发送到波形发生器。

7.3.4 谐振电容器电压检测

谐振电容器电压检测引脚通过电容器分压器检测谐振电容器电压。在该器件内部，两个匹配良好的受控电流源连接到 VCR 引脚，用于生成频率补偿斜坡。两个电流源的开/关控制信号来自波形发生器块。

在波形发生器 IDLE 状态期间或启动之前，VCR 节点钳位到 V_{CM} 。此操作有助于降低启动峰值电流，并帮助 VCR 电压在突发模式期间快速稳定下来。

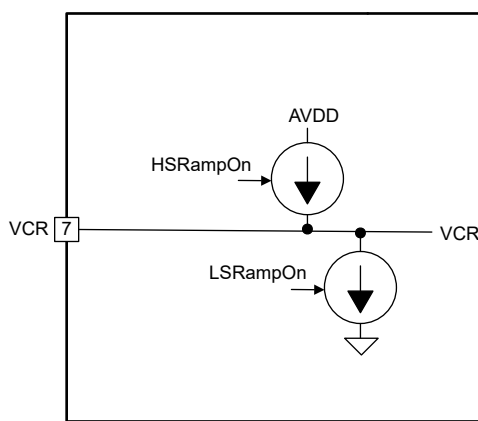


图 7-5. VCR 方框图

图 7-6 展示了斜坡电流开/关序列。斜坡电流始终开启。它会在高侧导通或低侧导通信号的下降沿改变方向。

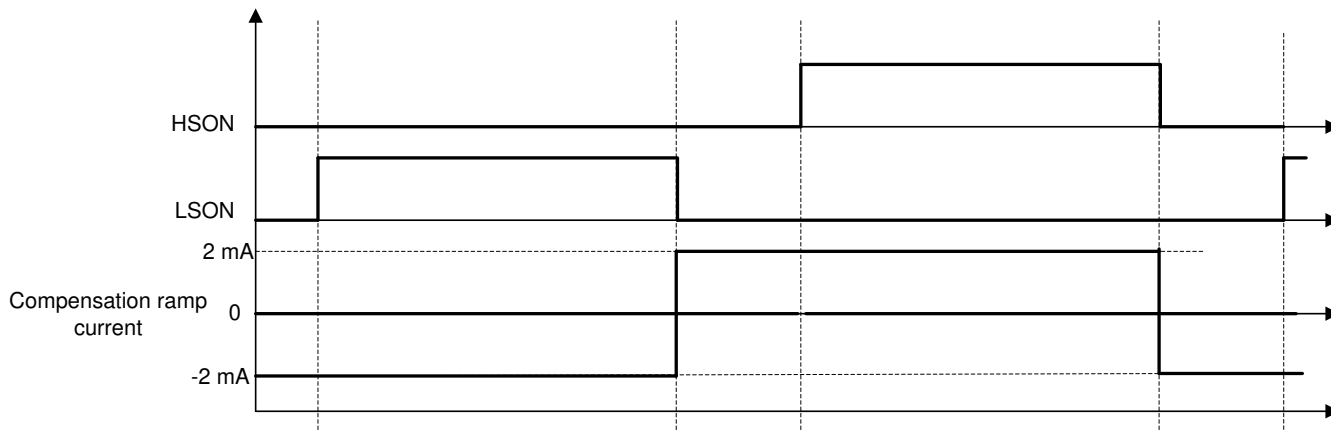


图 7-6. VCR 补偿斜坡电流开启/关闭

在 VCR 引脚上，使用电容器分压器来组合谐振电容器波形和补偿斜坡波形。调整外部电容器的尺寸可以改变电荷控制和直接频率控制的作用。假设电容分压器对谐振电容电压的分压版本为 V_{div} ，补偿斜坡电流 VCR 引脚上产生的电压为 V_{ramp} 。如果 V_{div} 远大于 V_{ramp} ，则控制方法类似于电荷控制，其中控制力度与一个开关周期的输入电荷成正比。如果 V_{ramp} 远大于 V_{div} ，则控制方法类似于直接频率控制，其中控制量与开关频率成正比。调整 V_{div} 和 V_{ramp} 之间的比率以实现出色瞬态响应。

7.3.5 谐振电流检测

ISNS 引脚通过高压电容器连接到谐振电容器。电容器 CISNS 和电阻器 RISNS 构成微分器。对谐振电容器电压进行差分以获得谐振电流。差分信号为交流信号，并且既有正也有负。为了感应过零，使用运算放大器加法器对信号进行电平转换。IPolarity 比较器可检测谐振电流的方向。在 LSON 和 HSON 下降沿进行 ZCS 保护的 IPolarity 检查，在节 7.3.9.1 部分中提供了更多详细信息。数字状态机在 IPolarity 上实现了消隐时间。考虑到开关节点转换引起的 ISNS 引脚上的噪声，死区时间的前 400ns 期间的 IPolarity 边沿会被忽略。

OCP2 和 OCP3 阈值基于平均输入电流。为了获得平均输入电流，微分器输出与高侧开关导通信号 HSON 进行多路复用。当 HSON 开启时，MUX 输出是微分器输出；当 HSON 关闭时，MUX 输出为 0。然后使用低通滤波器对 MUX 输出取平均值。滤波器的输出是检测到的平均输入电流。请注意，MUX 必须同时通过正负电压。OCP2 和 OCP3 故障分别具有 2ms 和 50ms 计时器。仅当 OCP2/OCP3 比较器输出高电平持续 2ms 或 50ms 时，故障才激活。

OCP1 阈值在峰值谐振电流上设置。ISNS 引脚上的电压会直接同 OCP1 阈值 OCP1Th 进行比较。每个周期在正半个周期检查一次峰值谐振电流。仅当连续检测到 4 个周期的 OCP1 事件时，OCP1 故障才会激活。在启动期间，前 15 个周期的 OCP1 比较器输出会被忽略。

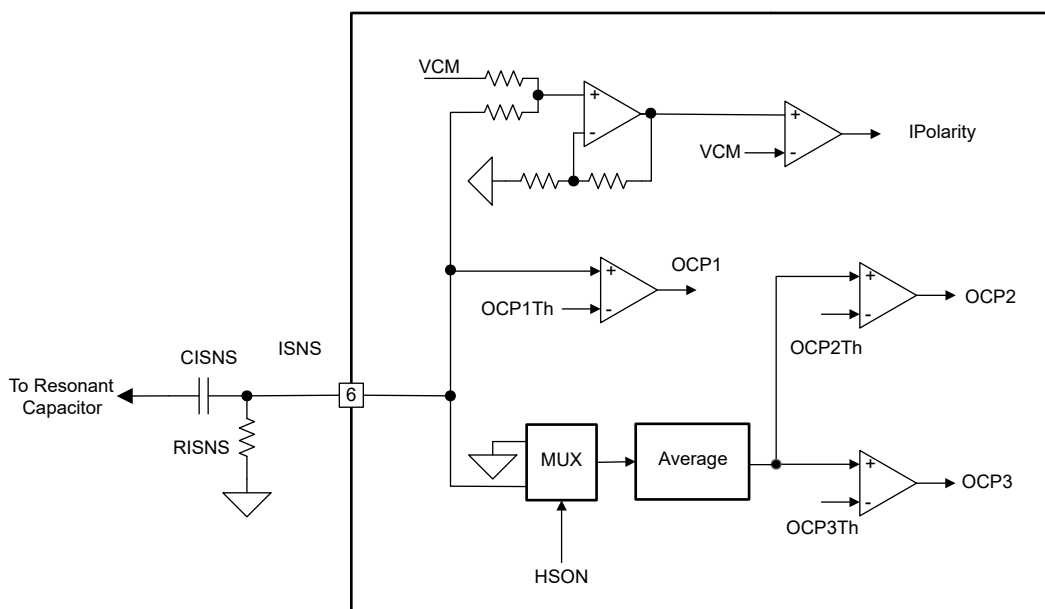


图 7-7. ISNS 方框图

7.3.6 体电压感测

BLK 引脚用于检测 LLC 直流输入电压 (体电压) 电平。BLK 引脚上的比较器具有以下两个阈值：

- LLC 开始开关时的体电压电平 - $V_{BLKStart}$
- LLC 停止开关时的体电压电平 - $V_{BLKStop}$

电阻分压器连接到该引脚以实现所需的系统输入范围。如果运行期间 BLK 引脚电压降至 $V_{BLKStop}$ 以下则会触发故障。有关输入欠压保护的详细操作，请参阅节 7.3.9.4。

图 7-8 展示了 BLK 引脚的方框图。

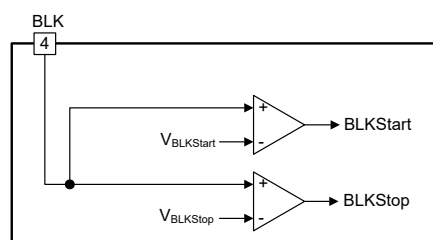


图 7-8. BLK 引脚方框图

BLK 电压还用于监控某些器件版本的输入过压故障，如节 4 中所列。有两个阈值：

- BLK 过压保护 (OVP) 上升阈值时的体电压电平 - $V_{BLKOVPRise}$
- BLK 过压保护 (OVP) 下降阈值时的体电压电平 - $V_{BLKOVPFall}$

当 BLK 电压高于 $V_{BLKOVPRise}$ 时，OVP 被触发；当 BLK 电压降至 $V_{BLKOVPFall}$ 以下时，OVP 被清除。

7.3.7 输出电压检测

通过偏置绕组 (BW) 电压检测引脚检测输出电压。当偏置绕组的一个端子连接到初级侧接地端时，另一个端子处的偏置绕组电压表示次级侧整流器二极管导通时的输出电压。通常使用电阻分压器将偏置绕组端子连接至 BW 引脚。BW 电压与正阈值和负阈值进行比较，从而产生输出 OVP 故障。在启动期间，BW 引脚进行多路复用，用于突发模式阈值编程。有关详细信息，请参阅节 7.4.3.1 部分。图 7-9 是偏置绕组电压检测块的方框图。

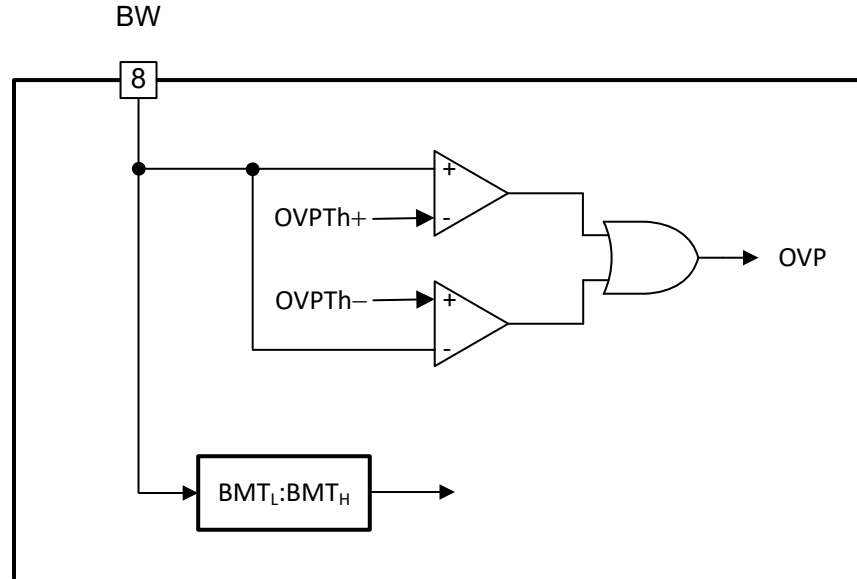


图 7-9. 偏置绕组检测方框图

如果 OVP 事件在连续 5 个开关周期内为高电平，则系统进入故障状态。节 7.3.9.3 介绍了 OVP 故障期间的操作。

7.3.8 高压栅极驱动器

LO 是低侧栅极驱动器输出。栅极驱动器由 13V RVCC 电源轨供电。

高侧驱动器模块包含三个物理器件引脚。HB 和 HS 分别形成高侧驱动器的正负偏置轨，而 HO 连接到上部半桥 MOSFET 的栅极。

在低半桥 MOSFET 导通的期间，HS 通过导通低侧 MOSFET 缩短至 GND。此时，高侧驱动器的电源通过高压二极管 DBOOT 从 RVCC 获得，电容器 CBOOT 充电到 RVCC，减去二极管上的正向压降。

在上半桥 MOSFET 导通期间，HS 连接到 LLC 输入电压轨。此时，HV 二极管反向偏置，高侧驱动器由 CBOOT 中存储的电荷供电。

高侧和低侧栅极驱动器都具有欠压锁定 (UVLO) 保护功能。低侧栅极驱动器 UVLO 在 RVCC 上实现；高侧栅极驱动器 UVLO 在 (HB - HS) 电压下实现。

在轻负载下运行时，UCC25640x 进入突发模式。在突发关闭周期期间，栅极驱动器会进入低功耗模式以降低功耗。

图 7-10 展示了栅极驱动器的方框图。

通过检查 HSON 或 LSON 下降沿的谐振电流极性，进行容性区域检测。如果谐振电流在 LSON 下降沿为正，或在 HSON 下降沿为负，则波形发生器中的 ZCS 信号会变为高电平。ZCS 信号保持高电平，直到 ZCS 在下一个 HSON 或 LSON 下降沿清除。

如果检测到 ZCS，则在下一个 IPolarity 翻转事件中，当谐振电流再次变为感性时，下一个栅极将导通。IPolarity 翻转表明电容工作周期已过去。谐振电流反向并且开始对开关节点放电。在这一级，体二极管不再导通，允许导通下一个栅极。如果检测到压摆完成事件，则表明相反的体二极管不得导通，并且下一个栅极也将导通。如果既未检测到 IPolarity 翻转事件也未检测到转换完成事件，则下一个栅极将在最大死区时间计时器到期时开启。在 ZCS 事件期间，最大死区时间会更改为 150μs。

LLC 在重负载条件下工作且开关频率过低时，通常会发生 ZCS。因此，当检测到 ZCS 时，LL/SS 引脚会通过二极管拉至低电平并接地，系统会进入“ZCS 软启动”过程。开关频率会被强制升高，系统才能从 ZCS 中恢复。节 7.4.3.1 部分详细介绍了“ZCS 软启动”。由于 ZCS 检测依赖于谐振电流极性检测，如果 LLC 在极轻负载条件下运行，则谐振电流的幅度可能非常小，并且谐振电流极性检测可能会因开关噪声而失真。为了防止在轻负载条件下出现麻烦的 ZCS 检测，会通过利用突发模式控制在轻负载条件下禁用 ZCS。节 7.4.3 部分会详细说明。

以下是电容区预防算法的流程图及 ZCS 事件的时序图：

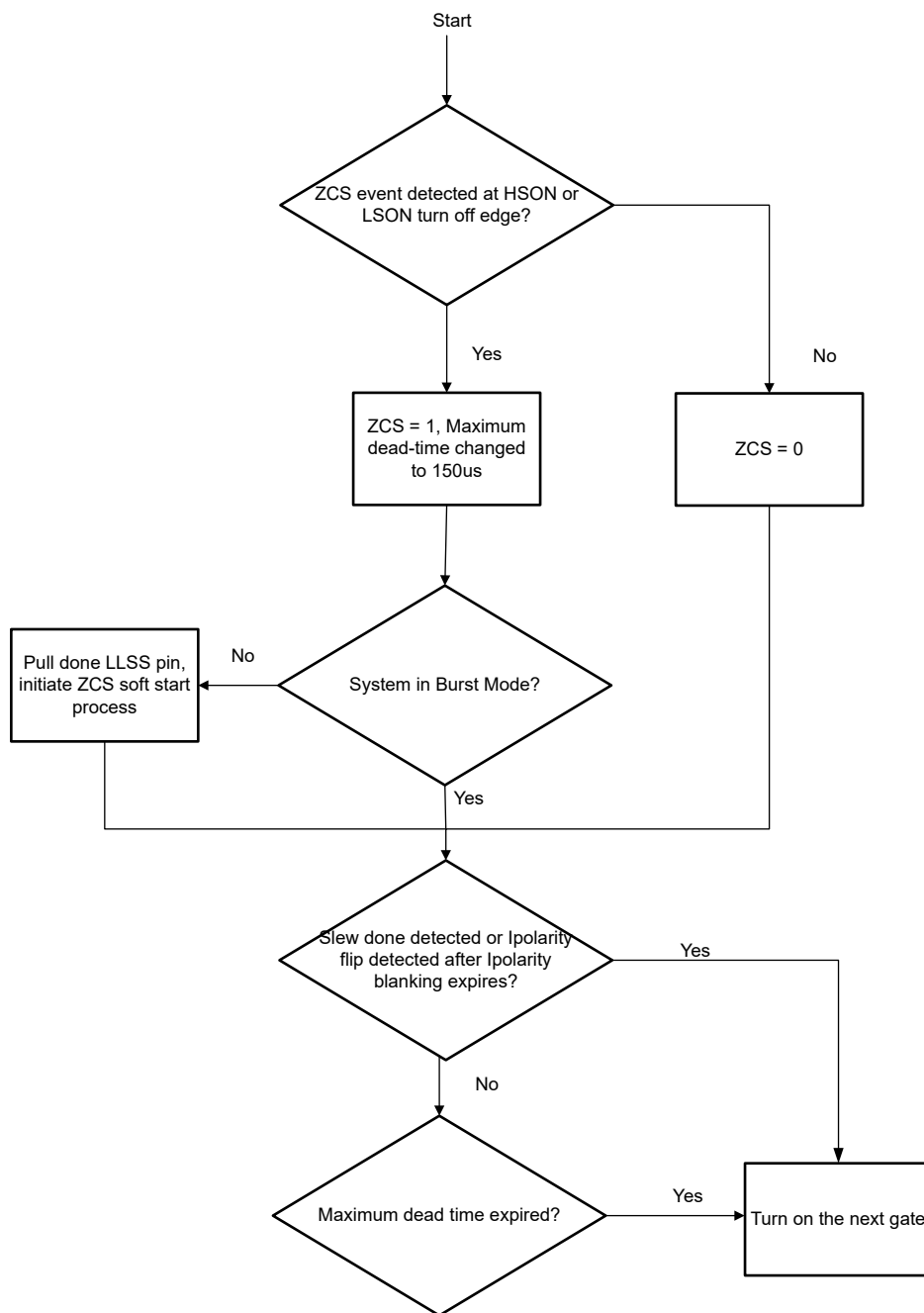


图 7-11. ZCS 预防算法流程图

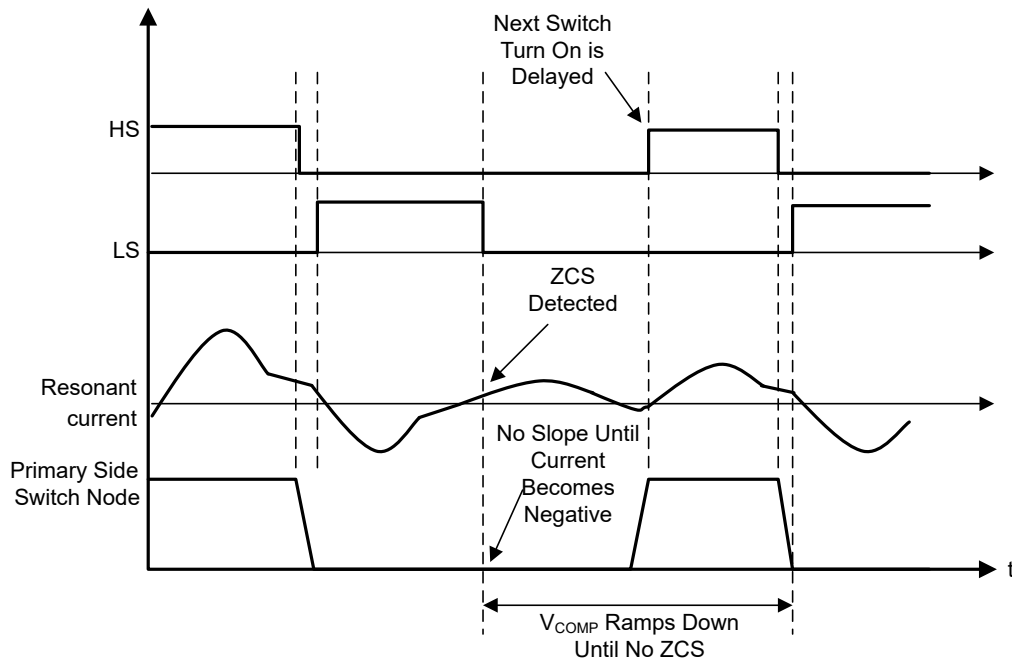


图 7-12. ZCS 事件的时序图

7.3.9.2 过流保护 (OCP)

OCP 有三个级别：

1. OCP1：峰值电流保护（最高阈值）
 - a. 故障操作：如果 $ISNS$ 在连续 4 个开关周期内高于 OCP1 阈值，则开关将停止。系统进入故障状态，等待 1s，然后重新进入启动状态。
2. OCP2：平均输入电流保护（高阈值）
 - a. 故障操作：如果检测到的 $ISNS$ 平均值高于阈值的时间达到 2ms，则开关停止。系统进入故障状态，等待 1s，然后重新进入启动状态。
3. OCP3：平均输入电流保护（低阈值）
 - a. 故障操作：如果检测到的 $ISNS$ 平均值高于阈值的时间达到 50ms，则开关停止。系统进入故障状态，等待 1s，然后重新进入启动状态。

节 7.3.5 提供了有关电路方框图的信息。

7.3.9.3 偏置绕组过压保护 (BWOVP)

当变压器具有偏置绕组时，这通常用于实现输出过压保护。可以通过配置 BW 引脚上的分压器来设置输出过压跳闸点。当 BW OVP 比较器在连续 5 个开关周期内处于高电平时，开关停止。系统进入故障状态，等待 1s，然后重新进入启动状态。

7.3.9.4 输入欠压保护 (VINUVLP)

这是输入欠压保护。可以通过配置 BLK 引脚上的分压器来设置跳闸点。如果 BLK 电压降至 $BLKStop$ 以下，开关将立即停止。系统进入故障状态，等待 1s，然后重新进入启动状态。

7.3.9.5 输入过压保护 (VINOVP)

这是输入过压保护。仅某些器件版本中存在此功能。如果 BLK 电压上升到 $V_{BLKOVPRise}$ 以上，开关将立即停止。系统进入故障状态，等待 1s，然后在 BLK 电压低于 $V_{BLKOVPRise}$ 时重新进入启动状态。

7.3.9.6 引导 UVLO

这就是高侧栅极驱动器 UVLO。当 (HB - HS) 电压低于阈值时，高侧栅极输出关闭。系统未进入 FAULT 状态。

7.3.9.7 RVCC UVLO

这是稳压 13V UVLO。当 RVCC 电压低于阈值时，高侧栅极输出和低侧栅极输出会立即关闭。系统进入故障状态，等待 1s，然后重新进入启动状态。

7.3.9.8 过热保护 (OTP)

这是器件过热保护。当超过 OTP 阈值时，开关停止。系统进入故障状态，等待 1s，然后在温度回到 OTP 阈值以下时重新进入启动状态。

7.4 器件功能模式

7.4.1 高压启动

UCC256402 和 UCC256404 使用自偏置启动方案，因此无需使用单独的辅助电源。当首次插入交流电源时，PFC 和 LLC 均关闭。HV 引脚上的内部 JFET 被启用，并开始从 HV 引脚连接到 VCC 电容器的源极提供电流。当 VCC 引脚电压低于 $V_{CCShort}$ 时，充电电流很小；然后当 VCC 引脚电压高于 $V_{CCShort}$ 时，充电电流会变大。一旦 VCC 引脚电压超过其 $V_{CCStartSwitching}$ 阈值，电流源将关断，并启用 RVCC 以导通 PFC。当 PFC 输出电压达到一定水平时，LLC 即被开启。当 LLC 正在运行且稳定在输出电压后，辅助绕组为 PFC 和 LLC 控制器器件提供电流。

UCC256403 不包含高压启动功能，需要一个外部辅助电源来为 IC 供电。使用 UCC256403 时将 HV 引脚接地。

7.4.2 X 电容器放电

二极管桥式整流器交流侧 EMC 滤波器中使用的 X 电容器必须能够通过一种方法在特定时间内放电至合理的电压。这是为了确认在从交流电源中物理移除交流插头后，电压不会无限期地保持在交流插头的引脚上。

通常，放电电阻器与 X 电容器并联来提供该放电路径，但只要电源连接到交流电源，这些电阻器就会产生固定的驻留功率损耗，这对于实现极低的待机功耗可能非常重要。

对于每个 100nF 的电容，并联一个 10M Ω 的最大泄放电阻器。对于典型电容为 330nF 的 60W 至 100W 典型电源，这需要 3m Ω 的放电电阻。在标称高压线路 230V 下，这些电阻器的长期功率损耗为 17.63mW。因此，有必要找到使用开关放电路径对 X 电容器进行放电的替代方法，以避免静态驻留损耗。

X 电容器放电有多种标准。IEC60950 和 IEC60065 要求放电时间常数小于 1s。IEC62368 要求在交流拔出 2 秒后，X 电容器上的剩余电压低于 60V (对于 300nF 或更大电容)。对于具有 X 电容器放电的器件型号，UCC25640x 使用有源放电方案支持高达 5 μ F X 电容的快速放电。

为了满足标准的要求，必须检测到交流断开事件。UCC25640x 通过 HV 引脚监测交流过零，由此检测交流断开。当存在交流时，一个线路周期内有两个交流过零。当交流电源断开连接时，一段时间内没有过零。图 7-13 所示为整流后的交流波形。在该图中，在上半个交流周期的峰值时，交流断开。实际上，它可以在开关周期内的任何位置断开。

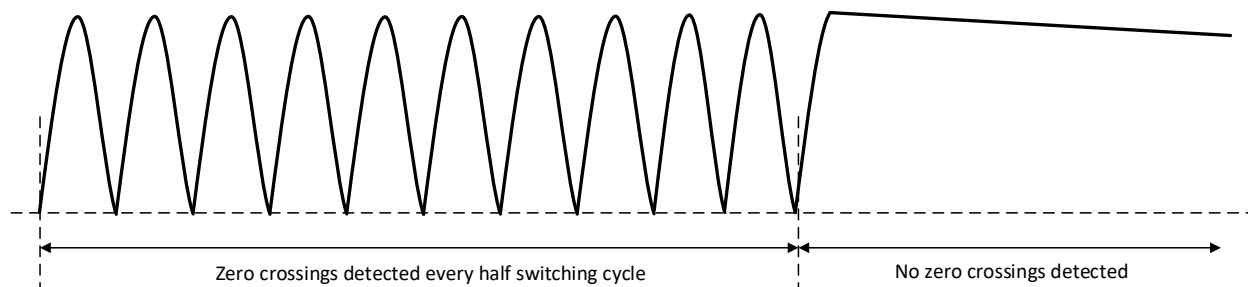


图 7-13. 交流断开波形

为了可靠地检测过零并节省功耗，每 700ms 会产生一次阶梯测试电流。当最高测试电流设置下连续缺失 4 个过零，则会确认交流断开并启用 $I_{XCapDischarge}$ 电流源。下面的波形显示了阶梯电流波形：

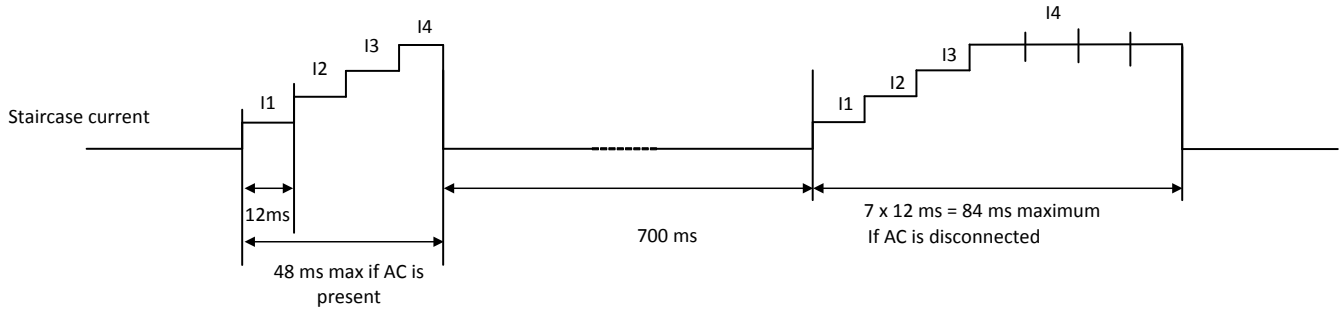


图 7-14. X 电容器放电的阶梯测试电流

测试电流是实现可靠交流过零检测所必需的。简而言之，这是因为交流桥式整流器二极管中的泄漏电流会影响极轻负载下的过零检测。HV 引脚上增加的测试电流会克服漏电流，并确保在 HV 引脚上检测到交流过零。如果在任何测试电流阶段检测到一次过零，则意味着交流未断开连接。测试电流立即关闭，系统进入 700ms 无测试电流阶段。

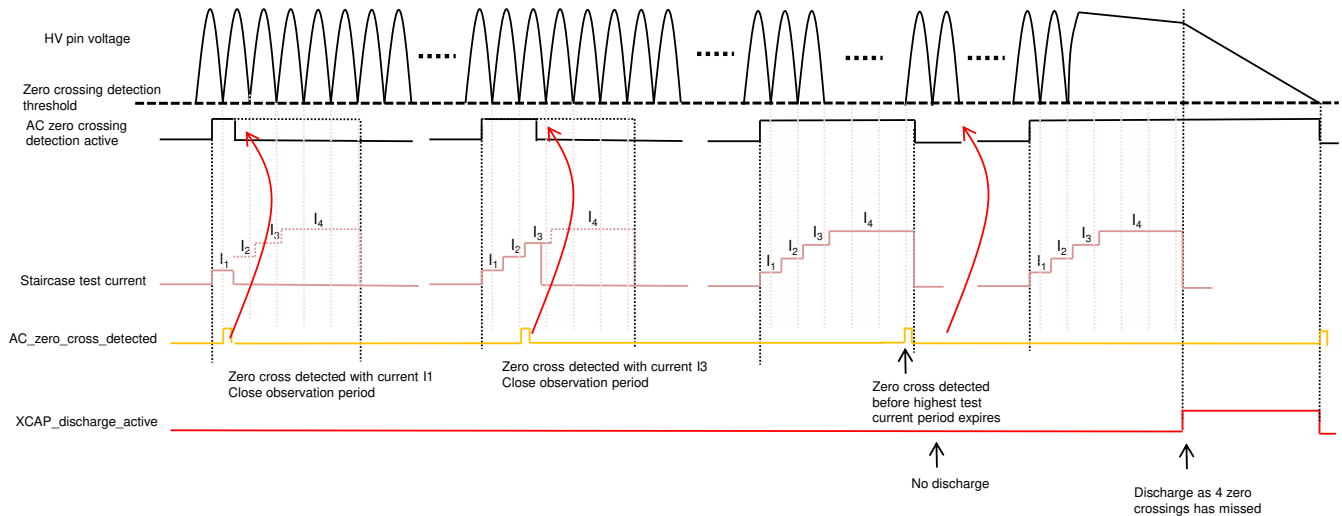


图 7-15. 不同的阶梯电流波形

图 7-15 显示了不同的阶梯电流波形。最后一个波形显示检测到交流断开并且启用了 X 电容器放电电流。X 电容器放电电流启用时间为 350ms。交流过零功能在所有运行模式下都可用并且始终可用。图 7-16 展示了交流过零检测和 X 电容器放电的流程图。过零测试在 HV 启动完成 12ms 后开始。放电电流 $I_{XCapDischarge}$ 是通过开启 JFET 并且启用从 JFET 源到 GND 的电流源来产生的。在故障重启过程中，HV 启动的优先级更高，因此 JFET 连接到 VCC。无论检测空闲计时器是否到期，都会在 HV 启动完成 12ms 后发出过零测试电流。

在某些器件型号中，X 电容器放电功能被禁用。

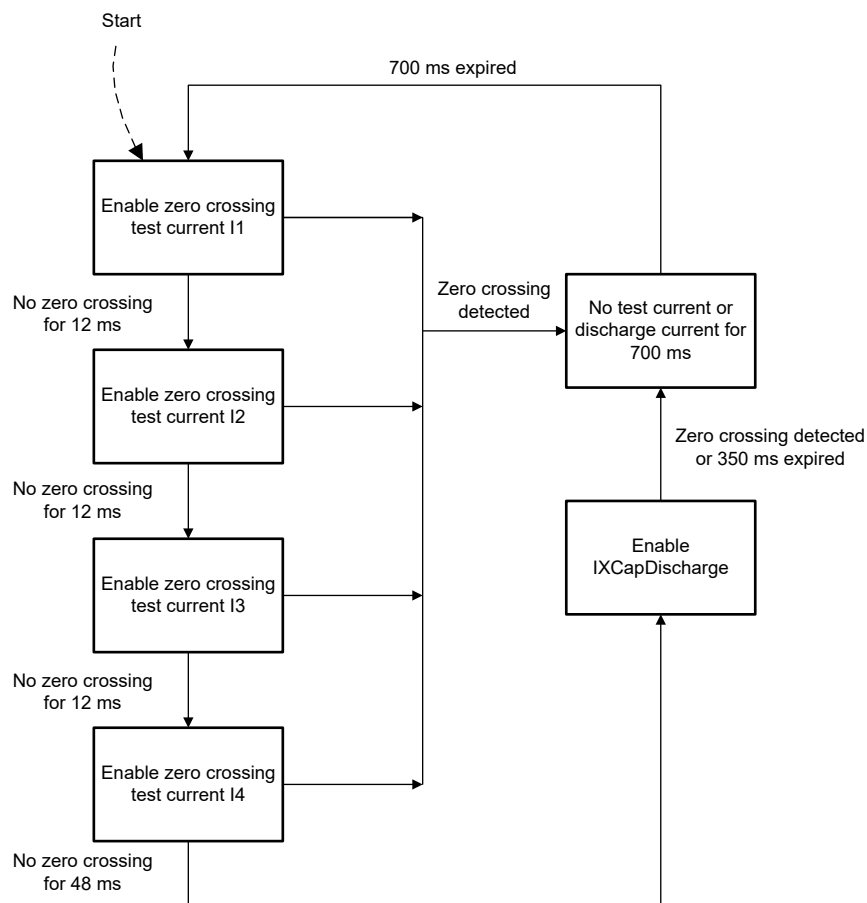


图 7-16. 交流 ZCD 和 X 电容器放电流程图

7.4.3 突发模式控制

LLC 转换器功率级的效率随着输出功率下降而快速下降。为了保持合理的轻负载效率，有必要以突发模式操作 LLC 转换器。在该模式中，LLC 转换器在一个短突发周期内以相对较高的功率运行，然后在一个周期内关闭开关。在突发周期中，过量的电荷转移并储存在输出电容器中。在突发关闭周期中，储存的电荷用来供应负载电流。突发模式运行对于满足严格的待机功耗要求至关重要。突发模式运行的一个问题是可闻噪声性能。由于需要在一段时间内停止开关，因此存在一种开关脉冲模式，其频率落在 20Hz 至 20kHz 的可听频率范围内。UCC25640x 的一些器件型号包括突发模式并在前几个和最后几个开关脉冲具有软启动和软关断周期，从而更大幅度地降低待机运行期间的可闻噪声。

图 7-17 描述了突发模式运行的时序图。这里使用两个突发模式阈值 (BMT_H 用于退出突发模式， BMT_L 用于进入突发模式)。节 7.4.3.1 部分详细介绍了如何对这两个阈值进行编程。将 FB 链的 $FB_{replica}$ 与这两个阈值进行比较，并决定突发模式的操作。

- 在 t_1 时， $FB_{replica}$ 低于 BMT_L 。系统进入突发模式并立即停止开关。在突发关闭期间，UCC25640x 会禁用一些内部块以节省功耗。
- 在 t_2 时， $FB_{replica}$ 高于 BMT_H 。系统再次开始开关，这个周期称为突发开启周期。在突发开启期间，发送到 VCR 比较器的控制作用 V_{comp} 是 $FB_{replica}$ 和 BMT_L 的较高值。对于系统进入突发模式后的第一种开关模式，不会出现突发软开启。
- 在 t_3 时， $FB_{replica}$ 再次降至 BMT_L 以下。切换不会停止，直到它达到突发数据包的预定义数量 (N_{burst})。 V_{comp} 仍会选择 $FB_{replica}$ 和 BMT_L 中较高的值。对于最后 7 个开关周期，应用软关断 (图 7-17 中仅介绍了 3 个软开/关步骤，以进行概念介绍)。 V_{comp} 是 $FB_{replica}$ 和 BMT_L 之间较高值的一部分。表 7-1 中介绍了不同切换周期的部分数。对于突发软关断，它从步骤 7 开始并斜降。达到步骤 1 后，软关断步骤完成，系统进入突发关断周期。这有助于实现 LLC 变压器电流的缓慢下降。对于突发软启动，它从步骤 1 开始反转方向，并在

步骤 7 结束。如果 FBreplica 在软关闭步骤完成之前大于 BMT_L ，则突发软关闭会立即结束，系统将转换为突发软打开。在这种情况下，软开启步骤从软关断结束的步骤开始，以确认软关断和软开启之间的平稳过渡。

- 在 t_4 时，FBreplica 大于 BMT_L 。系统进入突发开启周期，由于这不是第一个突发开启周期，因此在前 7 个开关周期有软开启周期。Vcomp 与 FBreplica 和 BMT_L 的较高值的比值也在表 7-1 中进行了描述。在突发软开启步骤完成后，Vcomp 使用 FBreplica 和 BMT_L 的较高值，直至达到突发软关闭周期。
- 在 t_5 时，FBreplica 在另一个突发关闭周期后再次大于 BMT_L 。这次的差异是，在 t_6 时 FBreplica 大于 BMT_H ，此时突发软开启步骤尚未完成。突发软开启会立即终止，因此 Vcomp 可以跟随 FBreplica，以便在从突发模式运行到突发外模式运行的负载瞬态期间确认快速系统响应。

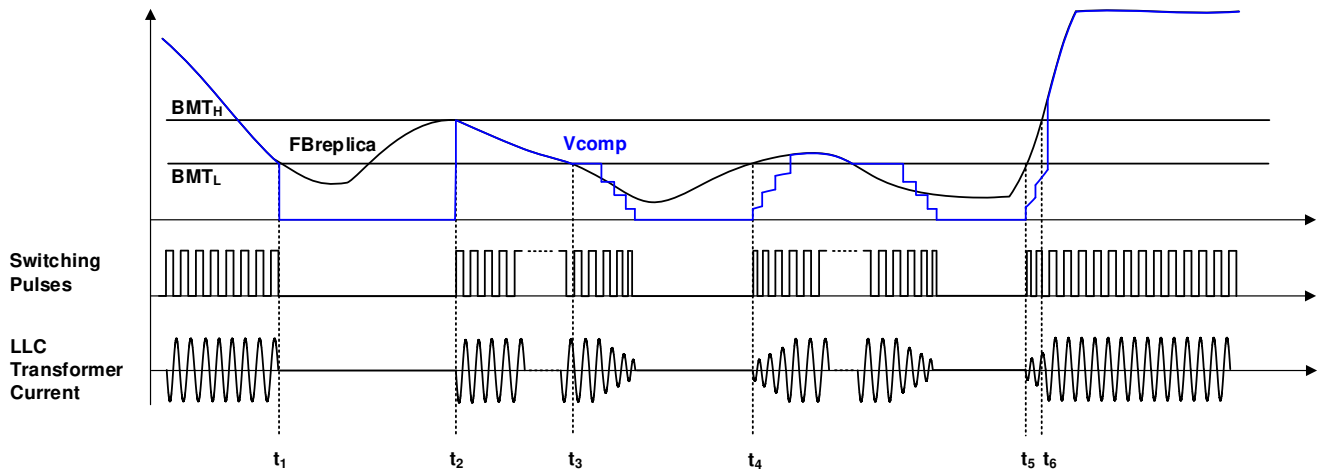


图 7-17. 突发模式开关模式

表 7-1. 突发模式软开启和软关断 Vcomp 控制

突发软开启和软关闭步骤	用于在软开启期间降低 Vcomp 的部分
1	1/3
2	9/21
3	11/21
4	13/21
5	15/21
6	17/21
7	19/21

HHC 控制使突发软开启和软关断的实现变得非常简单。由于 HHC 中存在频率控制部分，更改 Vcomp 可以直接影响 LLC 开关频率，从而在开关周期内控制谐振电流幅度。此外，当 VCR 节点电压等于共模电压 VCM 时，每个突发开启周期的最后一个脉冲也会关闭。在 HHC 控制中，这近似相当于谐振电容器电压等于 $V_{IN}/2$ 。此操作使谐振电容器电压在每个突发关断周期内保持接近 $V_{IN}/2$ ，从而使突发模式能够在突发开启周期期间尽快稳定。

如节 7.3.9.1 中所述，为避免在轻负载条件下出现麻烦的 ZCS 检测，在轻负载条件下会禁用 ZCS。这通过使用 BMT_H 阈值实现。当 FBreplica 低于 BMT_H （表示轻负载工作条件）时，ZCS 检测被禁用。当 FBreplica 高于 BMT_H 时，ZCS 检测将恢复。

一些器件型号会禁用突发软开启和软关闭功能，适用于对可闻噪声不太关心、但希望在突发模式期间降低输出纹波的应用。此外，还使用较小的突发数据包大小。有关禁用突发软开启和软关闭时突发模式操作的时序图，请参见图 7-18。

- 在 t_1 时，FBreplica 低于 BMT_L 。系统进入突发模式并立即停止开关。
- 在 t_2 时，FBreplica 高于 BMT_H 。系统再次开始开关，并进入突发开启周期。发送到 VCR 比较器的控制作用 Vcomp 是 FBreplica 和 BMT_L 中的较高值。

- 在 t_3 时, FBreplca 再次降至 BMT_L 以下。切换不会停止, 直到它达到突发数据包的预定义数量 (N_{burst})。如果开关在 FBreplca 再次低于 BMT_L 之前达到 N_{burst} , 系统将继续传送突发数据包, 直至 FBreplca 低于 BMT_L 。
- 在 t_4 时, FBreplca 大于 BMT_L 。系统在不进行软开启的情况下进入突发开启周期。因此控制作用 V_{comp} 是 FBreplca 和 BMT_L 中的较高值。
- 在 t_5 时, FBreplca 在另一个突发关闭周期后再次大于 BMT_L 。控制作用 V_{comp} 遵循 FBreplca。在 t_6 , FBreplca 变为高于 BMT_H , V_{comp} 仍遵照 FBreplca。如果 FBreplca 保持在 BMT_H 以上的时间超过 N_{burst} 开关周期, 系统将退出突发模式。

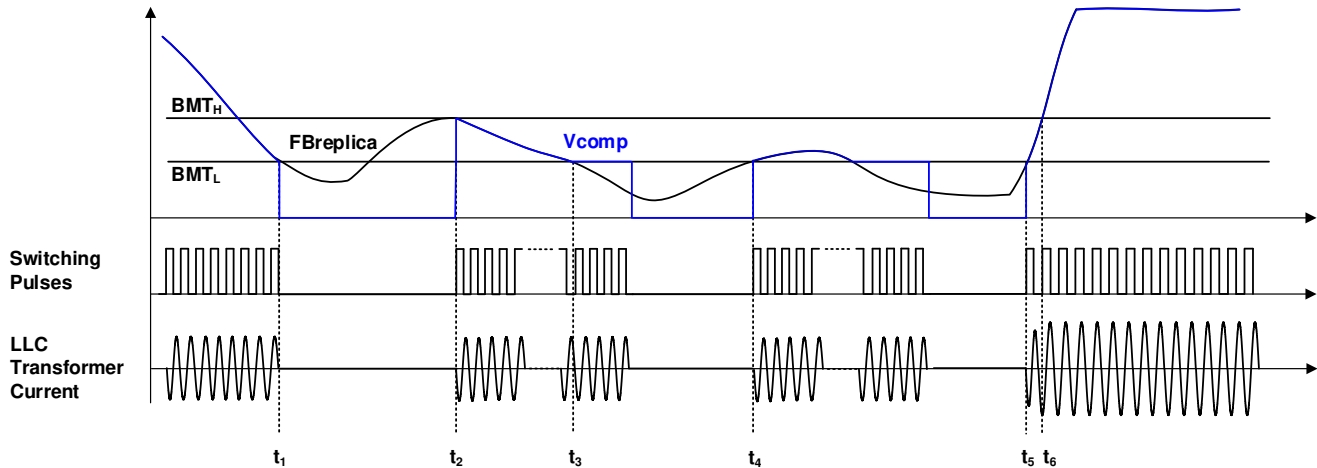


图 7-18. 禁用软开启和软关闭时的突发模式开关模式

UCC25640x 还可以通过更改 BW 引脚电阻来禁用突发模式, 如节 7.4.3.2 所述。当突发模式被禁用时, 即使 FBreplca 低于 BMT_L , 开关也不会停止。通过选择 BMT_L 和 FBreplca 中较高的值来控制 V_{comp} , 取较高值块仍然有效。在这种情况下, BMT_L 会限制 LLC 的最大开关频率。

禁用突发模式时, FBreplca 在稳态下必须高于 BMT_L 。否则, LLC 输出电压会失去稳压功能, 因为它继续提供比反馈中所需能量更多的能量。对于一个短暂的时期, 可以让 FBreplca 低于 BMT_L 。

7.4.3.1 软启动和突发模式阈值

软启动编程和突发模式阈值编程在 LL/SS 引脚上进行多路复用。此外, 当发生 ZCS 区运行时, 此引脚通过二极管下拉至接地端以增加开关频率。图 7-19 显示了引脚方框图。

图 7-20 显示了 LL/SS 引脚编程的时序图, 包括五个阶段:

- SS 拉低相 — LL/SS 引脚通过典型 $1.2k\Omega$ 接地电阻器在内部拉低。
- SS 初始电压编程阶段 — 内部拉低被释放。如图 7-19 所示, LL/SS 引脚通常通过一个电阻分压器从 RVCC 和一个电容器接地。当释放内部拉低电路时, 可以根据外部电阻器和电容器为 LL/SS 引脚电压充电。当充电启动阶段完成时, 此阶段结束, 它有一个固定的时间 $t_{SSInitVolPrgm}$ 。
- 软启动阶段 — 内部恒流源在充电启动阶段之后为软启动电容器充电, 并且在 FBreplca 低于 LL/SS 引脚电压时结束。在此阶段, LL/SS 引脚电压用作控制工作电压 V_{comp} 。LL/SS 引脚的缓慢斜升有助于 LLC 在启动期间尚未建立输出电压时, 以更高的开关频率运行。这可避免启动期间出现较大的浪涌电流。
- BMT_L 稳定阶段 — 软启动阶段完成时, LL/SS 引脚用于突发模式阈值编程。如节 7.4.3 中所述, 使用了两个突发模式阈值。在此阶段, 如果选择了 BW 选项 7, BMT_H 固定为 0.6V 或 1.2V。 BMT_L 也是固定的, 由 BMT_L/BMT_H 的编程比率决定。该阶段的典型持续时间为 600us。
- BMT_L 和 BMT_H 编程/设置阶段 — LL/SS 引脚在此阶段期间在 3.5V 下缓冲。根据连接到引脚的电阻器, LL/SS 引脚可以灌入或拉取电流。如果 LL/SS 引脚灌入电流, 电流会在内部镜像, 流过 R_{LL} , 而 R_{FB} 上的电压是 BMT_H 的编程电压。如果 LL/SS 引脚提供电流, 则 BMT_H 的已编程电压被设置为最小值。如果 BMT_H 的编程电压与初始电压不同, 则 BMT_H 会以每 200us 的刷新频率斜升至目标值。慢速刷新频率可以确保 BMT_H 不会因 LL/SS 引脚上的噪声而发生变化。 BMT_L 根据 BMT_L/BMT_H 的编程比率随着 BMT_H 的变化而变化。

SS 初始电压的可编程性可自由限制启动期间的最大开关频率。这有助于防止由于开关频率过高而导致的硬开关。对于在启动期间需要极高开关频率的应用，还提供了一个选项，用于禁用通过 BW 引脚进行 SS 初始电压编程，如节 7.4.3.2 中所述。如果选择此选项，LL/SS 引脚在 SS 初始电压编程阶段通过内部 $1.2\text{k}\Omega$ 电阻继续拉至低电平。

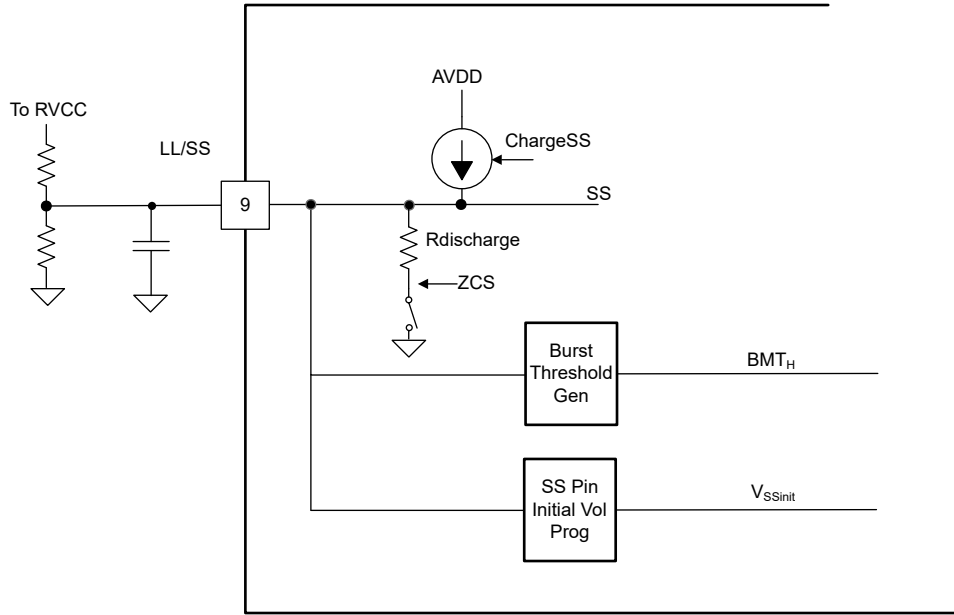


图 7-19. LL/SS 方框图

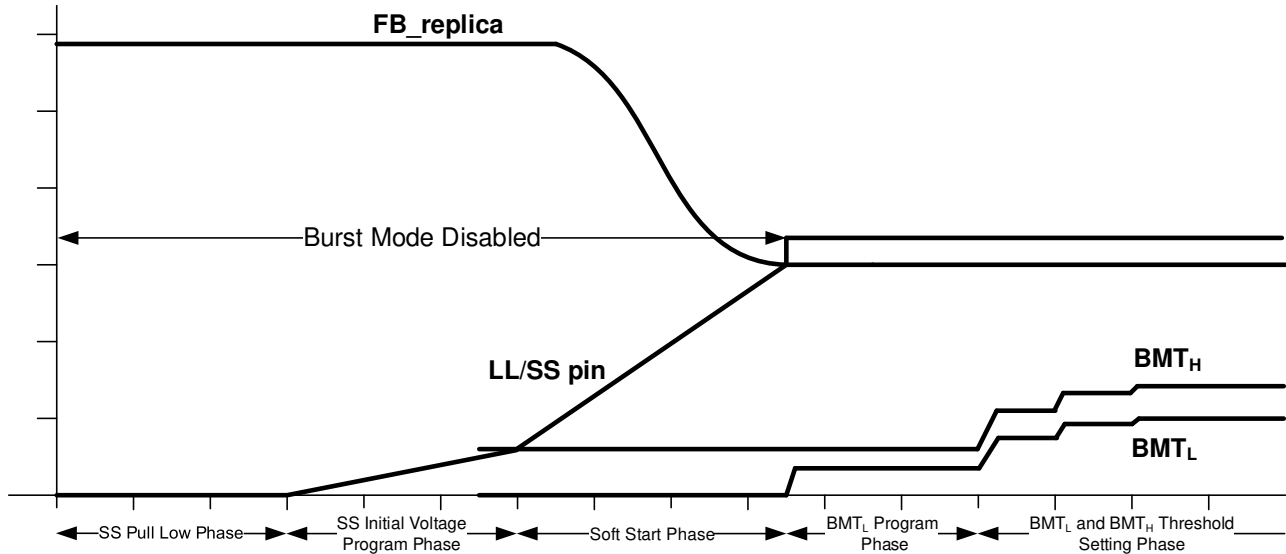


图 7-20. LL/SS 引脚编程时序图

7.4.3.2 BMT_L/BMT_H 比率编程

如节 7.3.7 中所述，BW 引脚为 BMT_L/BMT_H 比率编程进行多路复用。编程阶段仅在启动前发生一次。之后，BMT_L/BMT_H 比率将固定，直到系统在发生故障或电源重启后重新启动。编程阶段恰好发生在软启动开始之前。它提供恒定电流并测量引脚上的电压。根据测量的引脚电压，选择不同的 BMT_L/BMT_H 比率，如表 7-2 所示。节 6.5 列出了所需的 BW 等效电阻。

除了选择不同的 BMT_L/BMT_H 比率外，选项 5 还会在启动期间禁用 LL/SS 引脚初始电压程序阶段，选项 7 会禁用突发模式。

表 7-2. BMT_L/BMT_H 比率编程

选项	BMT_L/BMT_H
1	0.95
2	1
3	0.9
4	0.8
5	0.6 (禁用 LL/SS 引脚初始电压编程)
6	0.6
7	0.4 (突发模式已禁用)

7.4.4 系统状态机

下面概述了系统状态序列：

状态转换图从 UCC25640x 的未供电状态开始。对于具有 HV 启动功能的器件型号，一旦插入交流输入，HV 引脚的内部 JFET 就会启用并开始从 HV 引脚连接到 VCC 电容器的源提供电流。一旦 VCC 引脚电压超过其 $VCC_{StartSwitching}$ 阈值，系统状态就会更改为 JFETOFF。对于不具有 HV 启动功能的器件型号，不存在 JFETon 状态。一旦 VCC 超过其 $VCC_{StartSwitching}$ 阈值，系统状态将更改为 JFETOFF。当 PFC 输出电压达到一定水平时，LLC 即被开启。在 LLC 开始运行之前，LO 引脚保持高电平，以将 LLC 电桥的 HS 节点拉至低电平，从而允许 HB 和 HS 引脚之间的电容器通过自举二极管从 VCC 充电。UCC25640x 会保持 CHARGE_BOOT 状态一段时间，以确定自举电容器已充满电。当 LLC 输出电压达到一定水平时，PFC 和 LLC 控制器都从 LLC 变压器偏置绕组获得电源。当负载降至低于特定水平时，LLC 以突发模式运行。

UCC25640x 遇到的故障情况会导致正常运行停止或暂停一段时间，然后自动重新启动。这是为了确认，虽然存在持续故障情况，但 UCC25640x 控制器或电源转换器的温度不可能由于重复重新启动尝试而上升。

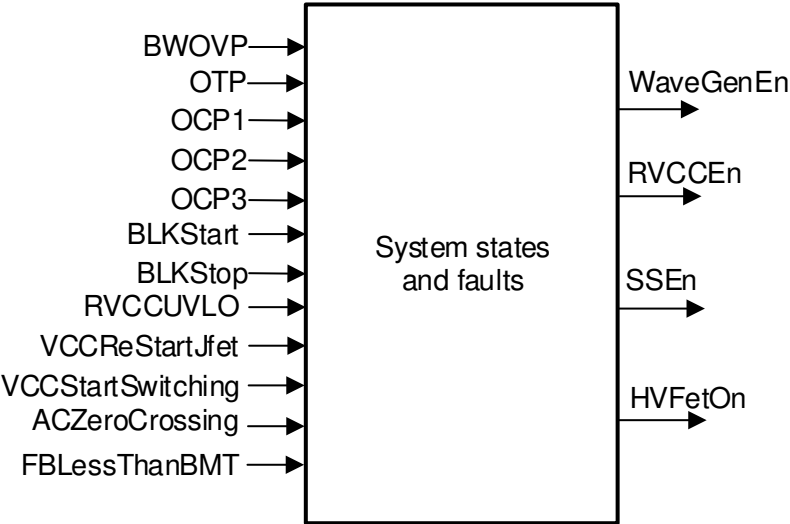


图 7-21. 系统状态机方框图

表 7-3 总结了图 7-21 的输入和输出。

表 7-3. 系统状态机块输入和输出

信号名称	I/O	说明
BWOVP	I	输出过压故障
OTP	I	过温故障

表 7-3. 系统状态机块输入和输出 (续)

信号名称	I/O	说明
OCP1	I	峰值电流故障
OCP2	I	具有 2ms 计时器的平均电流故障
OCP3	I	具有 50ms 计时器的平均电流故障
BLKStart	I	体电压高于启动阈值
BLKStop	I	体电压低于停止阈值
RVCCUVLO	I	RVCC UVLO 故障
VCCReStartJfet	I	VCC 低于重启阈值
VCCStartSwitching	I	VCC 高于启动开关阈值
ACZeroCrossing	I	检测到交流过零
WaveGenEn	O	波形发生器启用
RVCCEn	O	RVCC 使能
SSEn	O	软启动启用
HVFetOn	O	打开或关闭 JFET

图 7-22 展示了状态机以及状态的说明，而状态转换条件在下表中列出。

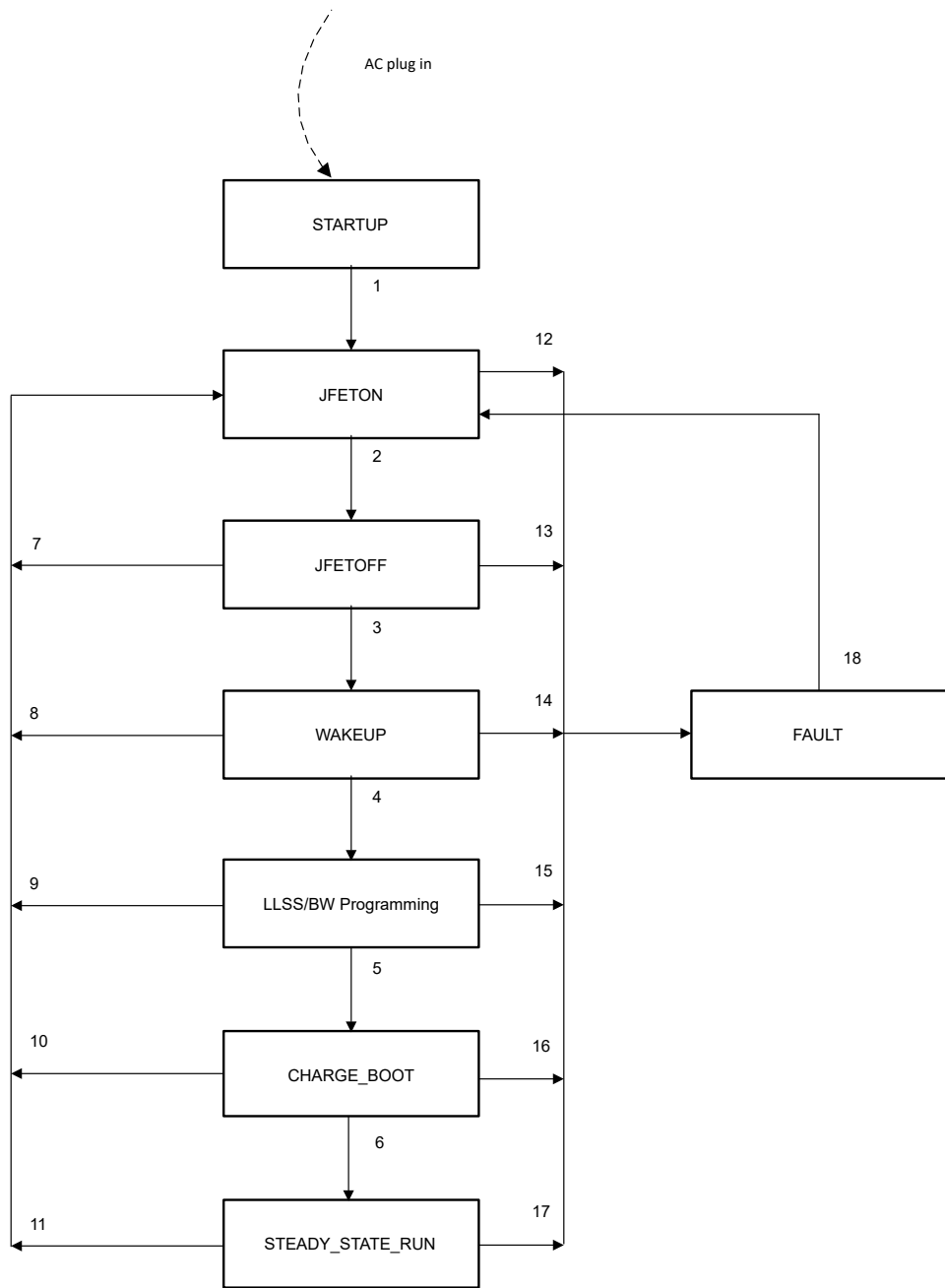


图 7-22. 系统状态机转换

表 7-4. 系统状态机中的状态

STATE	输出状态	说明
STARTUP	WaveGenEn = 0 RVCCEn = 0 SSEn = 0 HVFetOn = 0	这是为系统加载修整插入交流输入之后的第一种状态。
JFETON	WaveGenEn = 0 RVCCEn = 0 SSEn = 0 HVFetOn = 1	在此状态下，JFET 导通。VCC 由从 HV 引脚连接的电流源进行充电。对于不具有 HV 启动特性的器件型号，此状态不存在。

表 7-4. 系统状态机中的状态 (续)

STATE	输出状态	说明
JFETOFF	WaveGenEn = 0 RVCCEn = 1 SSEn = 0 HVFetOn = 0	当 VCC 高于 VCCStartSwitching 阈值时, JFET 关闭且系统进入 JFETOFF 状态。稳压 RVCC 开启。如果 RVCC 被提供给 PFC 电压电源引脚, 则 PFC 软启动开始。
WAKEUP	WaveGenEn = 0 RVCCEn = 1 SSEn = 0 HVFetOn = 0	当 BLK 电压达到 BLKStart 电平时, 系统进入 WAKEUP 状态并在短时间内保持 WAKEUP 状态, 以便模拟电路唤醒。
LLSS/BW 编程	WaveGenEn = 0 RVCCEn = 1 SSEn = 0 HVFetOn = 0	在这种状态下, 系统会经历 LL/SS 引脚和 BW 引脚编程阶段。
CHARGE_BOOT	WaveGenEn = 0 RVCCEn = 1 SSEn = 0 HVFetOn = 0	在这种状态下, 自举电容器通过导通低侧开关一段时间来充电。编程的初始电压被缓冲至 LL/SS 引脚。
STEADY_STATE_RUN	WaveGenEn = 1 RVCCEn = 1 SSEn = 1 HVFetOn = 0	在此状态下, 启用波形发生器。启用软启动模块。LLC 开始软启动。软启动完成后, 系统进入正常运行状态。
FAULT	WaveGenEn = 0 RVCCEn = 0 SSEn = 0 HVFetOn = 0	在故障状态下, 会禁用波形发生器以停止开关。在重新启动之前, 系统将保持 FAULT 状态 1s。1s 计时器使系统能够冷却并防止在持续故障情况下频繁重复启动。

表 7-5. 系统状态机转换条件

状态转换条件	说明
1	系统就绪 (修整加载完成)
2	VCCStartSwitching = 1 VCCReStartJfet = 0
3	BLKStart = 1 BLKStop = 0 RVCCUVLO = 0
4	BLKStart = 1 BLKStop = 0 RVCCUVLO = 0 FBLessThanBMT = 0
5	LLSS/BW 编程完成
6	充电引导完成
7	VCCReStartJfet = 1
8	VCCReStartJfet = 1
9	VCCReStartJfet = 1
10	VCCReStartJfet = 1
11	VCCReStartJfet = 1
12	OTP = 1
13	OTP = 1
14	OTP = 1
15	OTP = 1
16	OTP = 1
17	OTP = 1 或 BLKStop = 1 或 BWOVP = 1 或 OCP1 = 1 或 OCP2 = 1 或 OCP3 = 1 或 RVCCUVLO = 1

表 7-5. 系统状态机转换条件 (续)

状态转换条件	说明
18	1s 暂停超时

图 7-23 和图 7-24 显示了最常用的状态转换 (假设启动状态期间没有故障, 因此在时序图中捕获所有状态)。许多不同的状态转换方式可以根据状态机发生, 但本部分中未介绍。

在图 7-24 中, 显示了正常的启动过程。系统进入正常运行状态, 然后发生故障 (OCP、OVP 或 OTP)。

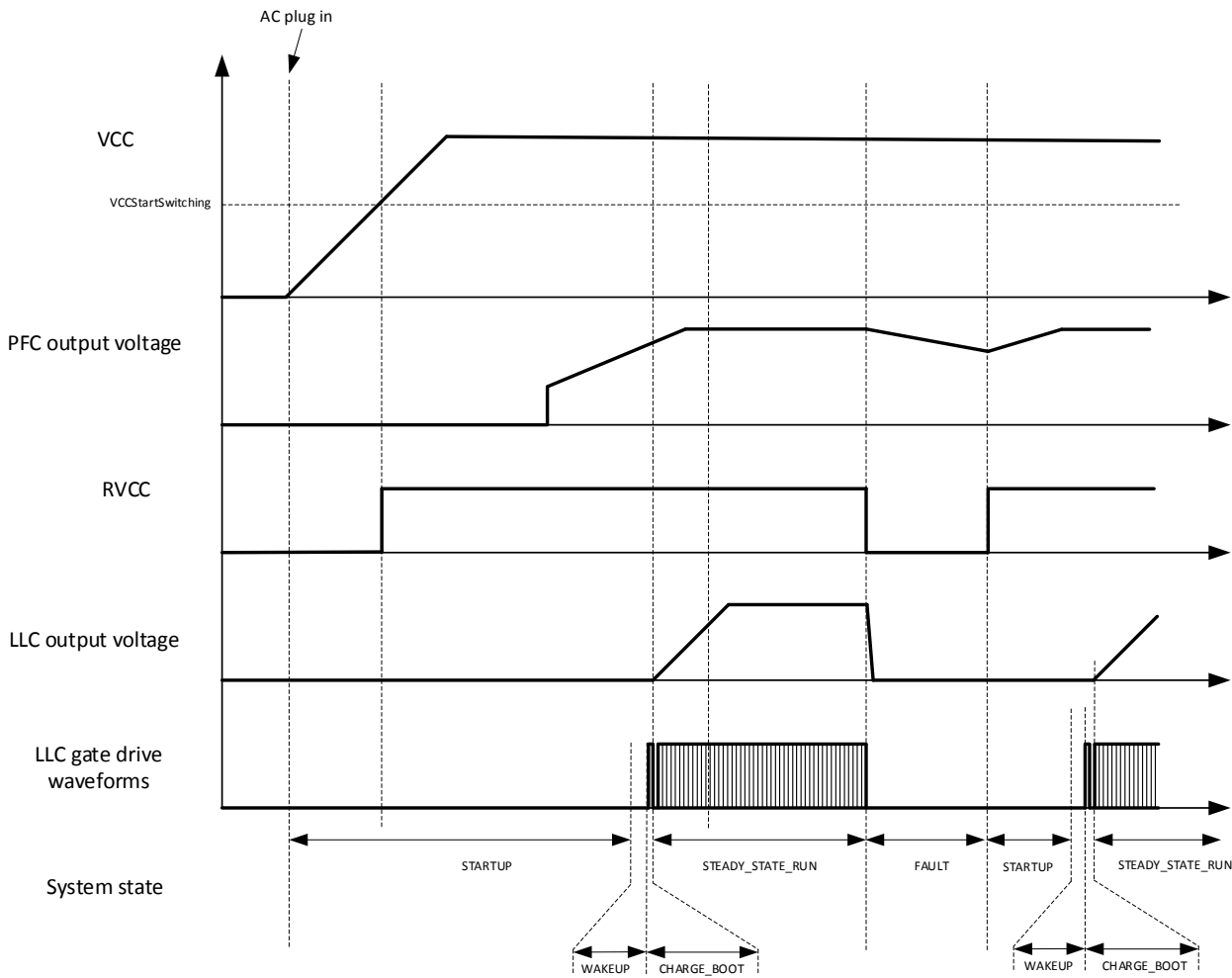


图 7-23. UCC256403 的系统状态机时序图

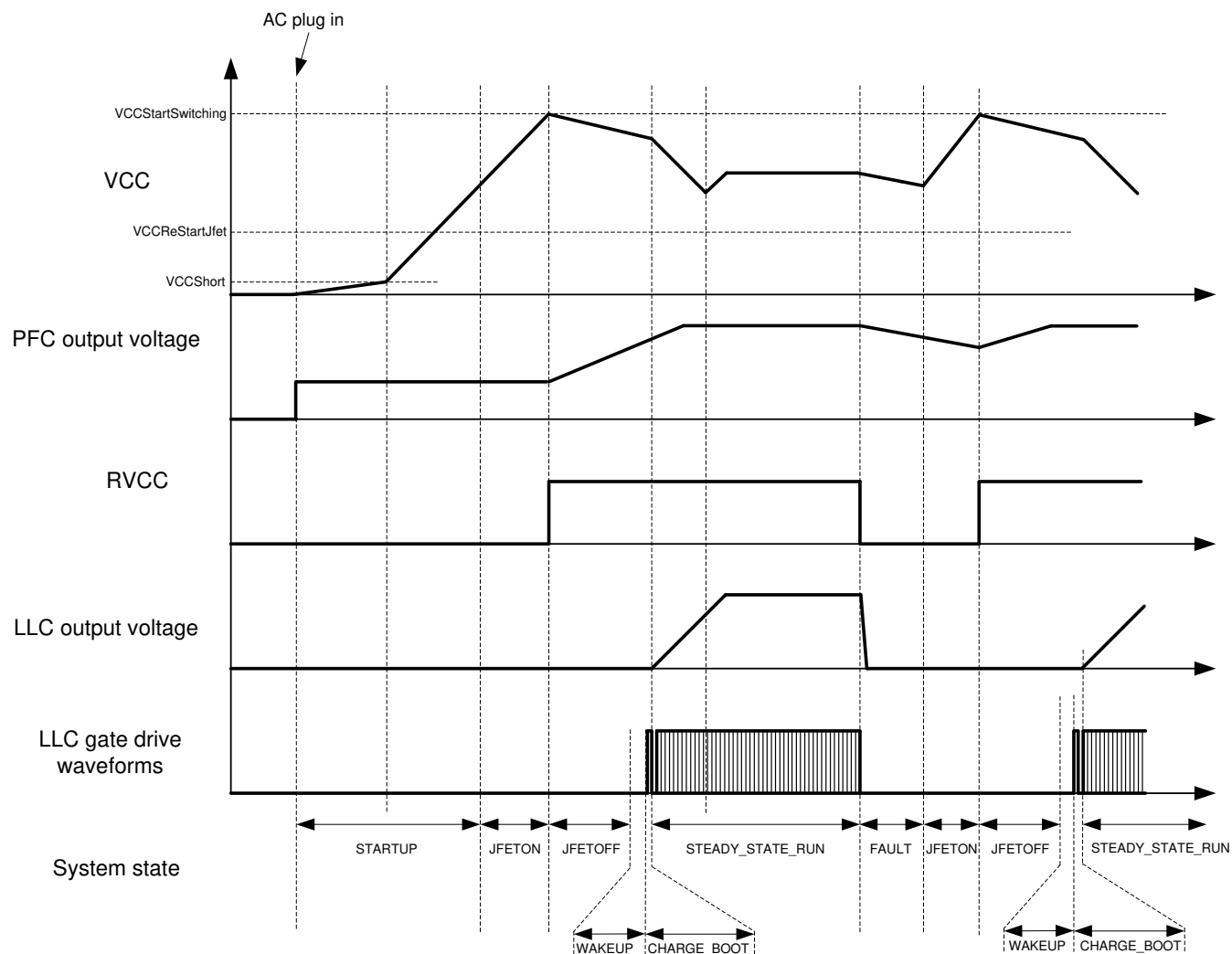


图 7-24. UCC256402 和 UCC256404 的系统状态机时序图

8 应用和实施

备注

以下应用部分中的信息不属于 TI 元件规格，TI 不担保其准确性和完整性。TI 的客户应负责确定各元件是否适用于其应用。客户应验证并测试其设计是否能够实现，以确保系统功能。

8.1 应用信息

可在实现 LLC 拓扑的各种应用中使用 UCC25640x。为使器件更易于使用，TI 准备了一份材料清单，用于演示器件的特性：

- 全功能 EVM 硬件
- Excel 设计计算器
- 仿真模型
- 混合迟滞控制理论应用手册

下部分说明了一个典型的设计示例。

8.2 典型应用

图 8-1 显示了使用 UCC25640x 作为控制器的典型半桥 LLC 应用。

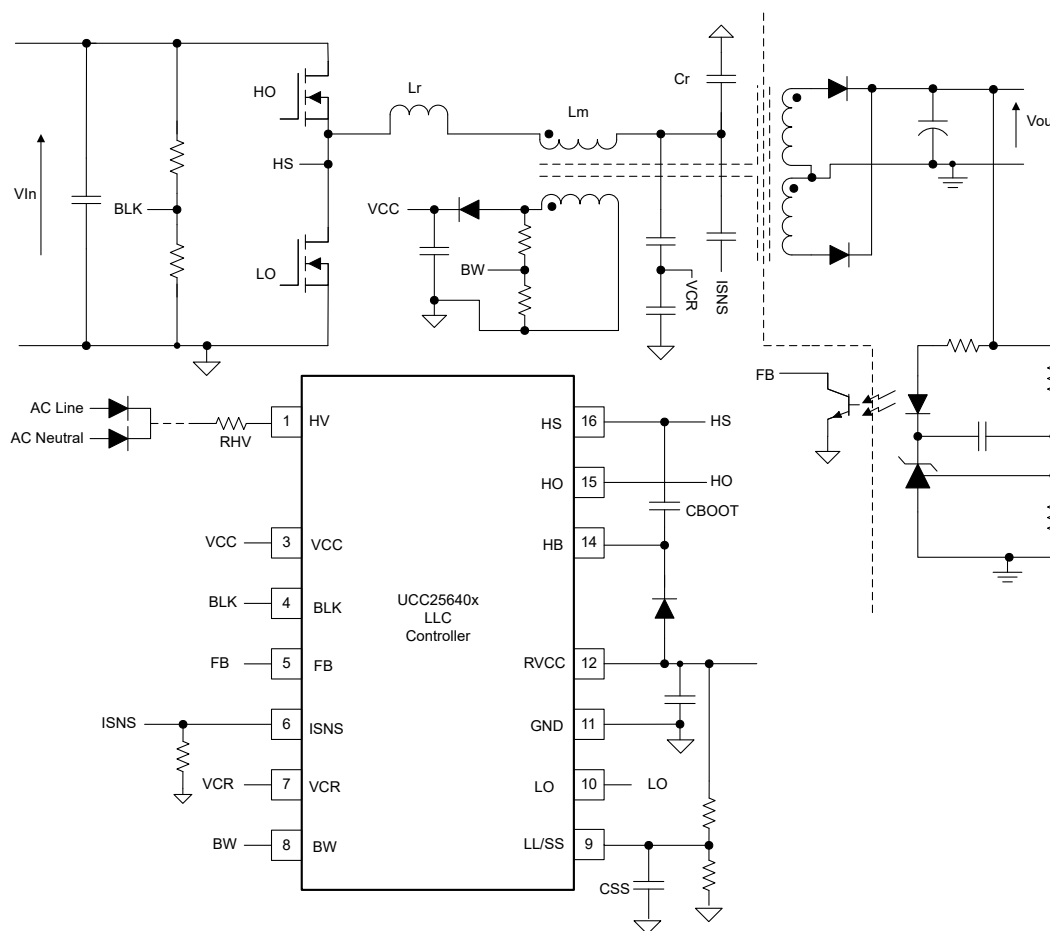


图 8-1. 使用 UCC25640x 的典型半桥 LLC 应用

8.2.1 设计要求

表 8-1 列出了设计规格。

表 8-1. 系统设计规格

参数	测试条件	最小值	典型值	最大值	单位
输入特性					
直流电压范围		365	390	410	VDC
交流电压范围		85		264	VAC
交流电压频率		47		63	Hz
输入直流 UVLO 导通			365		VDC
输入直流 UVLO 关断			315		VDC
输出特性					
输出电压, VOUT	无负载至满载		12		VDC
输出负载电流, IOUT	360VDC 至 410VDC			15	A
输出电压纹波	390VDC 且满载 = 10A		120		mVpp
系统特性					
谐振频率			100		kHz
峰值效率	390VDC		92		
工作温度	自然对流		25		°C

8.2.2 详细设计过程

8.2.2.1 LLC 功率级要求

开始设计时, 首先应确定 LLC 功率级元件值。此处概述的 LLC 功率级设计过程遵循 TI 技术文章[电源设计小贴士: 设计 LLC 谐振半桥电源转换器](#)。该技术文章包含对所用各个公式的来源的完整解释。下方的公式基于分析 LLC 拓扑时常用的一次谐波近似 (FHA) 方法。该方法是任何设计的一个良好起点, 但最终设计需要采用结合了 FHA 结果、电路模拟和硬件测试的迭代方法。TI 应用手册 [UCC29950 的 LLC 设计](#) 包括一种不同的设计方法。

8.2.2.2 LLC 增益范围

首先, 通过标称输入和输出电压确定变压器匝数比。

$$N_{PS} = \frac{V_{IN(nom)}/2}{V_{OUT(nom)}} = \frac{390/2}{12} = 16.25 \approx 16.5 \quad (5)$$

然后确定 LLC 增益范围 $M_{G(min)}$ 和 $M_{G(max)}$ 。假设整流器二极管压降为 0.5V (V_f), 并且因其他损耗额外产生 0.5V (V_{loss})。

$$M_{G(min)} = N_{PS} \times \frac{V_{OUT(min)} + V_f}{V_{IN(max)}/2} = 16.5 \times \frac{12 + 0.5}{410/2} = 1.006 \quad (6)$$

$$M_{G(max)} = N_{PS} \times \frac{V_{OUT(max)} + V_f + V_{loss}}{V_{IN(min)}/2} = 16.5 \times \frac{12 + 0.5 + 0.5}{365/2} = 1.175 \quad (7)$$

8.2.2.3 选择 L_n 和 Q_e

L_N 是磁化电感和谐振电感之比。

$$L_N = \frac{L_M}{L_R} \quad (8)$$

$$(9)$$

Q_E 是谐振回路的品质因数。

$$Q_E = \frac{\sqrt{L_R/C_R}}{R_E} \quad (10)$$

在该公式中， R_E 是等效负载电阻。

选择 L_N 和 Q_E 值应必须产生一个 LLC 增益曲线，该曲线将与 $M_{G(\min)}$ 和 $M_{G(\max)}$ 线迹相交。结果曲线的峰值增益必须大于 $M_{G(\max)}$ 。本文未讨论关于如何选择 L_N 和 Q_E 的详细信息。[UCC25640x 设计计算器](#)中提供了这些信息。

在本例中，所选择的 L_N 和 Q_E 值是：

$$L_N = 6 \quad (11)$$

$$Q_E = 0.3 \quad (12)$$

8.2.2.4 确定等效负载电阻

通过 [方程式 13](#) 确定等效负载电阻。

$$R_E = \frac{8 \times N_{PS}^2}{\pi^2} \times \frac{V_{OUT(nom)}}{I_{OUT(nom)}} = \frac{8 \times 16.5^2}{\pi^2} \times \frac{12}{15} = 176.5\Omega \quad (13)$$

8.2.2.5 确定 LLC 谐振电路的元件参数

确定谐振回路元件参数之前，选择标称开关频率（谐振频率）。在此设计中，100kHz 为谐振频率。

$$f_0 = 100\text{kHz} \quad (14)$$

按如下公式计算谐振储能电路参数：

$$C_R = \frac{1}{2\pi \times Q_E \times f_0 \times R_E} = \frac{1}{2\pi \times 0.3 \times 100\text{kHz} \times 176.5\Omega} = 30.0\text{nF} \quad (15)$$

$$L_R = \frac{1}{(2\pi \times f_0)^2 \times C_R} = \frac{1}{(2\pi \times 100\text{kHz})^2 \times 30.0\text{nF}} = 84.4\mu\text{H} \quad (16)$$

$$L_M = L_N \times L_R = 6 \times 84.4\mu\text{H} = 506.4\mu\text{H} \quad (17)$$

选择初步参数后，找到可用的最接近的实际元件值，使用选择的参数再次校验增益曲线，然后运行时间域仿真以验证电路运行。

以下谐振回路参数为：

$$C_R = 30\text{nF} \quad (18)$$

$$L_R = 85\mu\text{H} \quad (19)$$

$$L_M = 510\mu\text{H} \quad (20)$$

基于最终谐振回路参数，可以计算谐振频率：

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_R C_R}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{85\mu\text{H} \times 30\text{nF}}} = 99.7\text{kHz} \quad (21)$$

基于新的 LLC 增益曲线，最大及最小增益下的标准化开关频率通过以下公式得出：

$$f_{N(Mgmax)} = 0.7 \quad (22)$$

$$f_{N(Mgmin)} = 1.0 \quad (23)$$

最大和最小开关频率为：

$$f_{SW(Mgmax)} = 69.8\text{kHz} \quad (24)$$

$$f_{SW(Mgmin)} = 99.7\text{kHz} \quad (25)$$

8.2.2.6 LLC 初级侧电流

计算初级侧电流是为了选择元件。电流计算基于 110% 过载条件。

初级侧 RMS 负载电流为：

$$I_{OE} = \frac{\pi}{2\sqrt{2}} \times \frac{I_o}{n} = \frac{\pi}{2\sqrt{2}} \times \frac{1.1 \times 15\text{A}}{16.5} = 1.111\text{A} \quad (26)$$

最小开关频率下的 RMS 磁化电流为：

$$I_M = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} \times \frac{N_{PS}V_{OUT}}{\omega L_M} = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} \times \frac{16.5 \times 12}{2\pi \times 64.8\text{kHz} \times 510\mu\text{H}} = 0.797\text{A} \quad (27)$$

谐振回路总电流为：

$$I_R = \sqrt{I_M^2 + I_{OE}^2} = \sqrt{(1.111\text{A})^2 + (0.797\text{A})^2} = 1.367\text{A} \quad (28)$$

8.2.2.7 LLC 次级侧电流

总次级侧 RMS 负载电流是指从初级侧电流 (I_{OE}) 到次级侧的电流。

$$I_{OES} = N_{PS} \times I_{OE} = 16.5 \times 1.111\text{A} = 18.327\text{A} \quad (29)$$

在此设计中，变压器的次级侧具有中心抽头配置。使用以下公式计算每个次级变压器绕组的电流：

$$I_{WS} = \frac{\sqrt{2} \times I_{OES}}{2} = \frac{\sqrt{2} \times 18.327\text{A}}{2} = 12.959\text{A} \quad (30)$$

相应的半波平均电流为：

$$I_{SAV} = \frac{\sqrt{2} \times I_{OES}}{\pi} = \frac{\sqrt{2} \times 18.327\text{A}}{\pi} = 8.250\text{A} \quad (31)$$

8.2.2.8 LLC 变压器

使用 HV 自启动功能需要使用偏置绕组。建议对偏置绕组进行设计，使 VCC 电压大于 13V。

可以根据以下规格构建或购买变压器：

- 匝数比：初级：次级：偏置 = 33 : 2 : 3
- 初级端子电压：450V_{ac}
- 初级磁化电感：L_M = 510μH
- 初级侧绕组额定电流：I_R = 1.367A
- 次级端子电压：36V_{ac}
- 次级绕组额定电流：I_{WS} = 12.959A
- 最小开关频率：69.8kHz

- 最大开关频率：99.7kHz
- 初级侧和次级侧之间的绝缘：IEC60950 增强型绝缘

正常运行期间的最小运行频率计算如上。请注意，一些应用作为宽输入 LLC 运行，其中 PFC 可能会在待机模式下被关断，此时在重负载关断期间，工作频率可能要低很多，而 LLC 可以在恰好高于 ZCS 边界的较低频率下运行。谐振电路中的磁性元件，即变压器和谐振电感器，必须以此较低的频率作为额定工作频率。

8.2.2.9 LLC 谐振电感器

谐振电感器两端的交流电压是阻抗乘以电流：

$$V_{L_R} = \omega L_R I_R = 2\pi \times 69.8\text{kHz} \times 85\mu\text{H} \times 1.367\text{A} = 50.946\text{V} \quad (32)$$

可以根据以下规格制造或购买电感器：

- 电感： $L_R = 85\mu\text{H}$
- 额定电流： $I_R = 1.367\text{A}$
- 端子交流电压：50.946V
- 频率范围：69.8kHz 至 99.7kHz

请注意，有些设计可能会利用变压器的漏电感作为谐振电感，不需要外部谐振电感器。

8.2.2.10 LLC 谐振电容器

该电容器以开关频率承载全初级电流。使用低耗散因数电容器，以防止出现过热。

谐振电容器两端的交流电压是阻抗乘以电流。

$$V_{C_R} = \frac{I_R}{\omega C_R} = \frac{1}{2\pi \times 69.8\text{kHz} \times 30\text{nF}} = 104.0\text{V} \quad (33)$$

$$V_{C_R(\text{rms})} = \sqrt{\left[\frac{V_{\text{IN}(\text{max})}}{2}\right]^2 + V_{C_R}^2} = \sqrt{\left[\frac{410}{2}\right]^2 + 104.0^2} = 229.9\text{V} \quad (34)$$

峰值电压：

$$V_{C_R(\text{peak})} = \frac{V_{\text{IN}(\text{max})}}{2} + \sqrt{2}V_{C_R} = \frac{410}{2} + \sqrt{2} \times 104.0 = 352.0\text{V} \quad (35)$$

谷值电压：

$$V_{C_R(\text{valley})} = \frac{V_{\text{IN}(\text{max})}}{2} - \sqrt{2}V_{C_R} = \frac{410}{2} - \sqrt{2} \times 104.0 = 58.0\text{V} \quad (36)$$

额定电流：

$$I_R = 1.367\text{A} \quad (37)$$

8.2.2.11 LLC 初级侧 MOSFET

每个 MOSFET 将输入电压视为其最大施加电压。选择的 MOSFET 额定电压应为最大体电压的 1.5 倍：

$$V_{Q\text{LLC}(\text{peak})} = 1.5 \times V_{\text{IN}(\text{max})} = 615\text{V} \quad (38)$$

选择的 MOSFET 额定电流应为最大初级侧 RMS 电流的 1.1 倍：

$$I_{Q\text{LLC}} = 1.1 \times I_R = 1.504\text{A} \quad (39)$$

8.2.2.12 LLC 整流器二极管

输出二极管的额定电压为：

$$V_{DB} = 1.2 \times \frac{V_{IN(max)}}{N_{PS}} = 1.2 \times \frac{410}{16.5} = 29.82V \quad (40)$$

输出二极管的额定电流为：

$$I_{SAV} = \frac{\sqrt{2} \times I_{OES}}{\pi} = \frac{\sqrt{2} \times 18.329}{\pi} = 8.250A \quad (41)$$

8.2.2.13 LLC 输出电容器

LLC 转换器拓扑不需要输出滤波器，但一个小型二级滤波电感器可能有助于降低峰-峰值输出噪声。假设输出电容器承载整流器的全波输出电流，然后电容器额定纹波电流为：

$$I_{RECT} = \frac{\pi}{2\sqrt{2}} I_{OUT} = \frac{\pi}{2\sqrt{2}} \times 15 = 16.66A \quad (42)$$

对 12V 输出电压使用 20V 额定电压：

$$V_{LLCcap} = 20V \quad (43)$$

电容器的 RMS 额定电流为：

$$I_{C(out)} = \sqrt{\left(\frac{\pi}{2\sqrt{2}} \times I_{OUT}\right)^2 - I_{OUT}^2} = \sqrt{\left(\frac{\pi}{2\sqrt{2}} \times 15\right)^2 - 15^2} = 7.251A \quad (44)$$

$$(45)$$

采用导电聚合物技术的固态铝电容器具有较高的额定纹波电流，是一个不错的选择，尤其是对于需要在较低温度下运行的设计来说。一个电容器的额定纹波电流可能不足，因此经常并联多个电容器。

LLC 级输出的纹波电压是流经电容器的交流电流大小的函数。要估测此电压，假定所有电流（包括负载中的直流电流）均流经滤波电容器。

$$ESR_{max} = \frac{V_{OUT(pk-pk)}}{I_{RECT(pk)}} = \frac{0.12V}{\frac{\pi}{4} \times 15A} = 5.1m\Omega \quad (46)$$

电容器规格为：

- 电压额定值：20V
- 额定纹波电流：7.251A
- ESR：< 5.1mΩ

8.2.2.14 HV 引脚串联电阻器

多个电阻器与 HV 引脚串联连接，以限制 UCC25640x 器件的功率耗散。HV 引脚串联电阻器建议为 5kΩ。

8.2.2.15 BLK 引脚分压器

BLK 引脚会检测 LLC 输入电压，并确定何时导通和关断 LLC 转换器。UCC25640x 的版本不同，其 BLK 阈值也不同。

选择 365V 的批量启动电压，如下计算 BLK 电阻分压器比率：

$$k_{BLK} = \frac{365V}{1V} = 365 \quad (47)$$

BLK 引脚电阻分压器的所需功耗是 $P_{BLKsns} = 10\text{mW}$ 。BLK 检测电阻器总值为：

$$R_{BLKsns} = \frac{V_{IN(nom)}^2}{P_{BLKsns}} = \frac{390^2}{0.01} = 15.21\text{M}\Omega \quad (48)$$

较低 BLK 分压器电阻值为：

$$R_{BLKlower} = \frac{R_{BLKsns}}{k_{BLK}} = \frac{15.21\text{M}\Omega}{365} = 41.67\text{k}\Omega \quad (49)$$

为 $R_{BLKlower}$ 选择标准值 $41.2\text{k}\Omega$ 。较高 BLK 分压器电阻值为：

$$R_{BLKupper} = R_{BLKsns} - R_{BLKlower} = 15.17\text{M}\Omega \quad (50)$$

对于 $R_{BLKupper}$ ，选择了系列中的标准值 $3 \times 4.99\text{M}\Omega$ 。计算实际体电压阈值为：

$$V_{BulkStart} = 365\text{V} \quad (51)$$

$$V_{BulkStart} = 365\text{V} \times \frac{0.9}{1} - 328.5\text{V} \quad (52)$$

8.2.2.16 ISNS 引脚微分器

ISNS 引脚可设置过流保护电平。OCP1 是峰值电流保护级别；OCP2 和 OCP3 是平均电流保护级别。典型阈值电压分别为 4.0V 、 0.6V 和 0.43V 。

将 OCP3 电平设置为满负载时的 130%。因此，满载时检测到的平均输入电流电平为：

$$V_{ISNSfullload} = \frac{0.43\text{V}}{130\%} = 0.331\text{V} \quad (53)$$

计算电流检测比：

$$k_{ISNS} = \frac{V_{ISNSfullload}}{\left(\frac{P_{OUT}}{\eta} \times \frac{1}{V_{bulknom}}\right)} = \frac{0.331\text{V}}{\left(\frac{180\text{W}}{0.92} \times \frac{1}{390\text{V}}\right)} = 0.66\Omega \quad (54)$$

先选择电流检测电容器，因为可选择的高压电容器比电阻器少：

$$C_{ISNS} = 150\text{pF} \quad (55)$$

然后计算所需的 ISNS 电阻器值：

$$R_{ISNS} = \frac{k_{ISNS} C_R}{C_{ISNS}} = \frac{0.66\Omega \times 30\text{nF}}{150\text{pF}} = 132\Omega \quad (56)$$

确定电流检测比后，计算满负载时的峰值 ISNS 引脚电压：

$$V_{ISNSpeak} = \sqrt{2} I_r \times k_{ISNS} = \sqrt{2} \times 1.367\text{A} \times 0.66\Omega = 1.29\text{V} \quad (57)$$

OCP1 级别峰值谐振电流为：

$$I_{respeakOCP1} = \frac{4\text{V} \times C_R}{R_{ISNS} \times C_{ISNS}} = \frac{4\text{V} \times 30\text{nF}}{133\Omega \times 150\text{pF}} = 6.02\text{A} \quad (58)$$

OCP1 水平下的峰值次级侧电流为：

$$I_{\text{secpeakOCP1}} = I_{\text{respeakOCP1}} \times N_{\text{PS}} = 6.02\text{A} \times 16.5 = 99.33\text{A} \quad (59)$$

8.2.2.17 VCR 引脚电容器分压器

VCR 引脚上的电容分压器设置了两个参数：(1) 谐振电容器电压的分压器分压比；(2) 要添加的频率补偿量。电容分压器必须满足的第一个标准是，在过载条件下，VCR 引脚上的峰值间电压为 6V 以内。建议调整 VCR 电容的大小，以便在满载时提供 3V 至 4.5V 的总峰值间电压，频率补偿斜坡为 VCR 总峰值间电压贡献 1V 至 2V。在此设计中，选择 VCR 引脚电容，以便在满载时提供大概 4.25V 的最大峰值间电压，而内部斜坡为总 VCR 波形提供 1.75V 的电压。

直接根据谐振电容器峰值间电压和最小预期开关频率来计算所需的 VCR 电容。

$$V_{\text{CR(pk-pk)}} = V_{\text{CR(peak)}} - V_{\text{CR(valley)}} = 352\text{V} - 58\text{V} = 294\text{V} \quad (60)$$

根据预期的峰值间谐振电容器电压，推导所需的电容器分压比：

$$k_{\text{CapDiv}} = \frac{V_{\text{CR(pk-pk)}}}{V_{\text{CRpin(pk-pk)}} - V_{\text{Ramp(pk-pk)}}} = \frac{294\text{V}}{4.25\text{V} - 1.75\text{V}} = 117.6 \quad (61)$$

根据预期的最小开关频率，推导出较低的 VCR 电容：

$$C_{\text{VCRlower}} = \frac{1}{V_{\text{Ramp(pk-pk)}}} \times \frac{I_{\text{Ramp}}}{2 \times F_{\text{SW_min}}} = \frac{1}{1.75\text{V}} \times \frac{2\text{mA}}{2 \times 69.8\text{kHz}} = 8.2\text{nF} \quad (62)$$

为下部 VCR 电容器选择了 8.2nF 的标准值。根据所选的较低 VCR 电容器和计算出的电容分压比，上部 VCR 电容为：

$$C_{\text{VCRupper}} = \frac{C_{\text{VCRlower}}}{k_{\text{CapDiv}} - 1} = \frac{8.2\text{nF}}{117.6 - 1} = 70.6\text{pF} \quad (63)$$

为上部 VCR 电容器选择了 68pF 的标准值。根据所选的上部和下部 VCR 电容器，计算 VCR 引脚上的实际峰值间电压：

$$k_{\text{CapDiv}} = \frac{C_{\text{VCRlower}}}{C_{\text{VCRupper}}} + 1 = \frac{8.2\text{nF}}{68\text{pF}} + 1 = 121.59 \quad (64)$$

$$\begin{aligned} V_{\text{CRpin(pk-pk)}} &= \frac{1}{C_{\text{VCRlower}}} \times \frac{I_{\text{Ramp}}}{2 \times F_{\text{SW(Mgmin)}}} + \frac{V_{\text{CR(pk-pk)}}}{k_{\text{CapDiv}}} \\ &= \frac{1}{8.2\text{nF}} \times \frac{2\text{mA}}{2 \times 69.8\text{kHz}} + \frac{294\text{V}}{121.59} = 4.17\text{V} \end{aligned} \quad (65)$$

8.2.2.18 BW 引脚分压器

BW 引脚对突发模式进入和退出阈值之间的比率进行编程，并通过偏置绕组检测输出电压并保护功率级免受过压影响。标称输出电压为 12V。偏置绕组为 3 匝，次级侧绕组为 2 匝。假设整流器二极管压降为 0.5V (V_f)，并且因其他损耗进一步下降 0.5V (V_{loss})，则偏置绕组的标称电压由以下公式得出：

$$V_{\text{BiasWindingNom}} = (12\text{V} + 0.5\text{V} + 0.5\text{V}) \times \frac{3}{2} = 19.5 \quad (66)$$

在此设计中，理想 OVP 阈值是标称值的 140%。UCC25640x 器件中的 OVP 阈值电平为 4V，因此标称 BW 引脚电压通过以下公式计算：

$$V_{\text{BWnom}} = \frac{4\text{V}}{140\%} = 2.86\text{V} \quad (67)$$

然后，所需的 BW 分压比由下式给出：

$$k_{BW} = \frac{V_{BiasWindingNom} \times \eta_{OVP}}{V_{BW OVP}} = \frac{19.5V \times 140\%}{4V} = 6.825 \quad (68)$$

在此设计中，突发模式阈值比选择为 0.6 (选项 6)。然后，目标编程电阻为：

$$R_{BMT_Program} = 4.59k\Omega \quad (69)$$

下部 BW 电阻器可通过以下公式计算：

$$R_{BWLower} = R_{BMT_Program} \times \left(1 + \frac{1}{k_{BW} - 1}\right) = 4.59k\Omega \times \left(1 + \frac{1}{6.825 - 1}\right) = 5.38k\Omega \quad (70)$$

为下部 BW 电阻器选择标准值 5.36kΩ。

计算上部电阻器：

$$\begin{aligned} R_{BWUpper} &= R_{BWLower} \times \left(\frac{V_{BiasWindingNom} - V_{BWNom}}{V_{BWNom}}\right) \\ &= 5.36k\Omega \times \left(\frac{19.5V - 2.86V}{2.86V}\right) = 31.32k\Omega \end{aligned} \quad (71)$$

为上部 BW 电阻器选择标准值 30.9kΩ。

8.2.2.19 软启动和突发模式编程

LL/SS 和 BW 引脚使设计人员能够选择突发模式阈值并且对进入和退出突发模式的迟滞进行编程。连接到 LL/SS 引脚的电阻分压器设置 BMT_H 阈值，而 BW 引脚设置 BMT_L 和 BMT_H 之间的比率。除了对突发模式阈值进行编程之外，LL/SS 引脚还提供了将初始电压编程到 LL/SS 引脚上的功能，以限制启动期间的最大开关频率。对于 LL/SS 元件的初始选择，建议在 0V 至 1V 范围内选择初始 LL/SS 引脚电压，并在 1V 至 2V 范围内选择突发模式阈值。LL/SS 引脚参数可稍后根据基准测量进行微调。

本设计选择 0.3V 的初始 LL/SS 引脚电压及 0.6V 的 BMT_H 阈值。软启动电容器设置软启动电容器上的电压上升速度。软启动时间随负载条件而变化。在满载或过载条件下，软启动时间最长。计算精确的软启动时间值并不容易。然而，可以估计，在满载条件下，尽可能长的软启动时间取决于软启动引脚电压上升至最大 VCR 峰值间电压的速度。对于 7.5ms 的启动时间，软启动电容器的大小如下：

$$C_{LL/SS} = I_{SS} \times \frac{T_{SS_Max}}{V_{VCR(pk-pk)} - V_{LL/SS_precharge}} = 37.5\mu A \times \frac{7.5ms}{4.17V - 0.3V} = 72.7nF \quad (72)$$

为软启动电容器选择了标准值 68nF。为了正确选择 LL/SS 上的电阻，首先将 R_{TH} 定义为 LL/SS 引脚上的等效电阻，将 V_{TH} 定义为 LL/SS 引脚上的等效电压源。

$$R_{TH} = R_{LL/SS_Upper} \parallel R_{LL/SS_Lower} \quad (73)$$

$$V_{TH} = \frac{R_{TH} \times RVCC}{R_{LL/SS_Upper}} \quad (74)$$

在 SS 拉低阶段，LL/SS 引脚上的电压通过 1.2kΩ 电阻器在内部下拉。在 SS 初始编程阶段，内部下拉被释放，并且允许软启动电容器从 RVCC 自然充电。使用以下公式计算 LL/SS 软启动电容器上的总电压失调。

$$V_{ssinit} = \frac{1.2k\Omega \times RVCC}{R_{LL/SS_Upper}} + V_{TH} \left[1 - e^{\left(\frac{-t_{SSInitPrgm}}{C_{SS}}\right)}\right] \quad (75)$$

代入 $RVCC/R_{LL/SS_Upper}$ 并对指数项使用线性近似，该公式可简化为如下。

$$V_{ssinit} = \frac{1.2k\Omega \times V_{TH}}{R_{TH}} + \frac{V_{TH} \times t_{SSInitVolPrm}}{R_{TH} \times C_{SS}} \quad (76)$$

LL/SS 引脚用于编程 BMT_H 的电流 I_{BMT} 具有以下关系。可以根据所需的 BMT_H 阈值直接求解 I_{BMT} 。

$$I_{BMT} = \frac{BMT_H}{R_{LL}} = \frac{0.6V}{98k\Omega} = 6.12\mu A \quad (77)$$

$$I_{BMT} = \frac{V_{TH} - 3.5V}{R_{TH}} \quad (78)$$

重新排列 [方程式 76](#)，计算 V_{TH} 和 R_{TH} 。

$$\begin{aligned} V_{TH} &= \frac{3.5V}{1 - \frac{I_{BMT}}{V_{ssinit}} \left(1.2k\Omega + \frac{t_{SSInitVolPrm}}{C_{SS}} \right)} \\ &= \frac{3.5V}{1 - \frac{6.12\mu A}{0.3V} \left(1.2k\Omega + \frac{776\mu s}{68nF} \right)} = 4.71V \end{aligned} \quad (79)$$

$$R_{TH} = \frac{4.71V - 3.5V}{I_{BMT}} = 197k\Omega \quad (80)$$

根据 V_{TH} 和 R_{TH} 确定 R_{LL/SS_Upper} 和 R_{LL/SS_Lower} 的值。

$$R_{LL/SS_Upper} = \frac{R_{TH} \times R_{VCC}}{V_{TH}} = \frac{197k\Omega \times 13V}{4.71V} = 544k\Omega \quad (81)$$

对于 R_{LL/SS_Upper} ，选择了标准值 549k Ω 。

$$R_{LL/SS_Lower} = \frac{R_{TH} \times R_{LL/SS_Upper}}{R_{LL/SS_Upper} - R_{TH}} = \frac{197k\Omega \times 549k\Omega}{549k\Omega - 197k\Omega} = 307k\Omega \quad (82)$$

对于 R_{LL/SS_Lower} ，选择了标准值 316k Ω 。

8.2.3 应用曲线

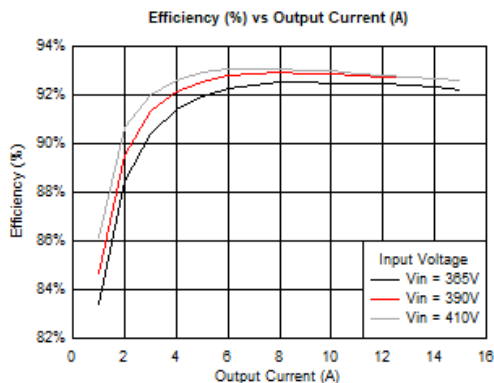


图 8-2. 效率

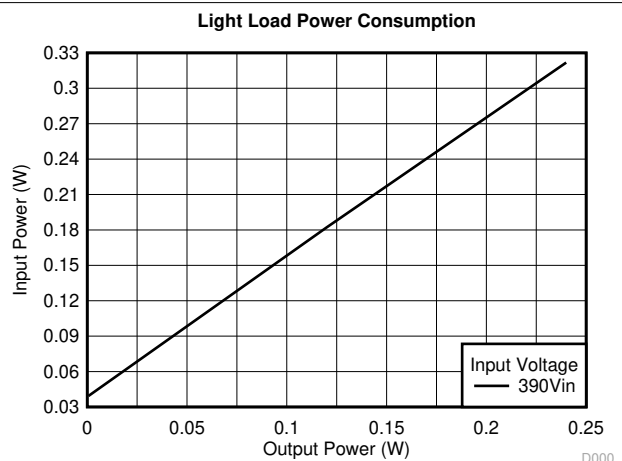


图 8-3. 轻载功耗

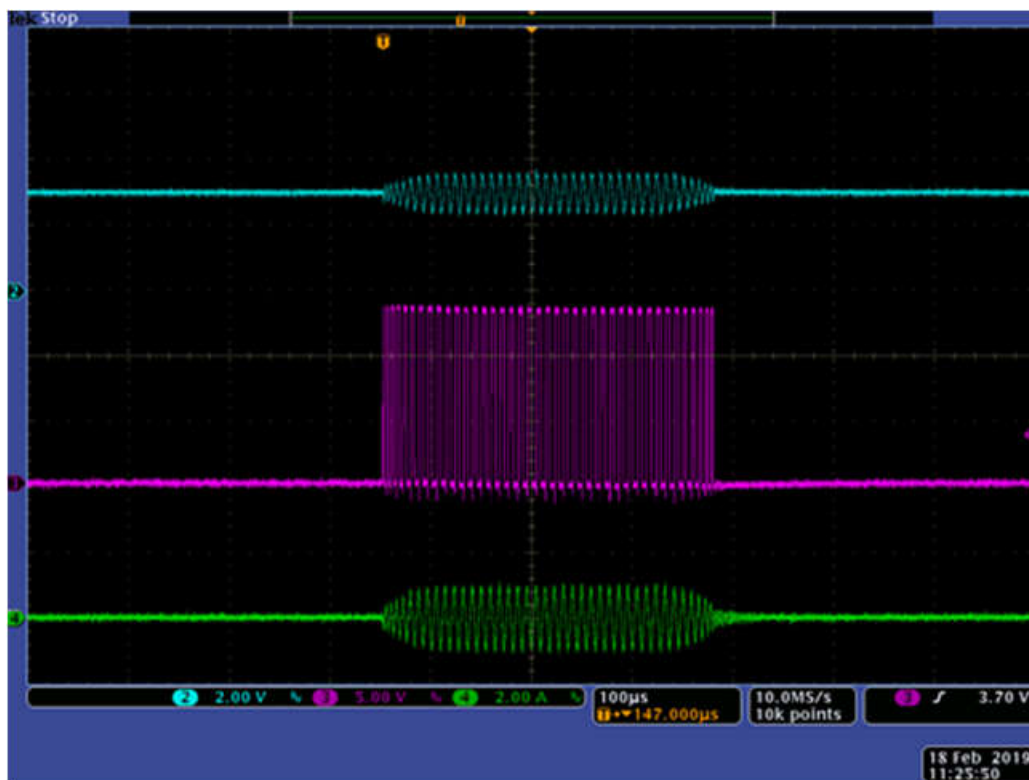


图 8-4. 软开/关的突发模式 (Ch2 = VCR、Ch3 = LO、Ch4 = 谐振电流)

8.3 电源相关建议

8.3.1 VCC 引脚电容器

根据系统所需的总启动电荷来确定 VCC 电容器的大小。启动电荷主要由栅极驱动器电路消耗。因此，可以通过启动开关频率、MOSFET 栅极电荷和软启动时间来估算总启动电荷。

假设系统所需的总启动电荷如方程式 83 所示

$$Q_{\text{tot}} = 1.6\text{mC} \quad (83)$$

在 PFC 和 LLC 启动阶段，允许的最大 VCC 压降为

$$V_{\text{ccd} \text{ dropmax}} = 26\text{V} - 9.65\text{V} = 16.35\text{V} \quad (84)$$

所需的最小 VCC 电容器：

$$C_{\text{VCC}} = \frac{Q_{\text{tot}}}{V_{\text{ccd} \text{ dropmax}}} = 97.86\mu\text{F} \quad (85)$$

至少选择 100µF 电容器或电容器组合。

8.3.2 自举电容器

在突发关断周期内，HB 引脚的高侧栅极驱动器消耗的功率必须从 C_{BOOT} 获得，导致电压衰减。在下一个突发周期开始时，C_{BOOT} 上必须剩余足够的电压，以便为高侧栅极驱动器供电，直到 LO 的导电周期使之通过 C_{RVCC} 获得补充。因此，在此突发关断周期内，高侧驱动器消耗的功率直接影响着必须连接到 HB 和 RVCC 的电容器大小和成本。

假设系统的最大突发关断周期为 150ms，自举二极管的正向压降为 1V。最小自举电压应定为 8V，以避免出现 UVLO 故障。自举电容器上的最大允许压降为：

$$V_{\text{bootmaxdrop}} = V_{\text{RVCC}} - V_{\text{bootforwarddrop}} - 8V = 13V - 1V - 8V = 4V \quad (86)$$

确定自举电容的容量：

$$C_{\text{boot}} = \frac{I_{\text{BOOT_QUIESCENT}} \times t_{\text{maxoff}}}{V_{\text{bootforwarddrop}}} = \frac{62\mu A \times 150ms}{4V} = 2.32\mu F \quad (87)$$

8.3.3 RVCC 引脚电容器

RVCC 电容器必须至少为自举电容器的五倍。此外，RVCC 电容器的大小取决于 RVCC LDO 的稳定性。如果 RVCC 上的负载较轻，则可以使用较小的电容器。负载越大，所需的电容器就越大。在典型系统中，RVCC LDO 为 PFC 和 LLC 栅极驱动器供电。

8.4 布局

8.4.1 布局指南

- 除了储能电解电容器以外，还应在 VCC 引脚上放置一个 2.2μF 陶瓷电容器。将 2.2μF 陶瓷电容器放置在尽可能靠近 VCC 引脚的位置。
- RVCC 引脚必须具有一个 4.7μF 或更高的旁路电容器。建议除 4.7μF 之外添加一个 0.1μF 陶瓷电容器。将电容器尽可能靠近 RVCC 引脚放置。建议 RVCC 电容器的大小至少为自举电容器的五倍。
- 最小自举电容器 C_{BOOT} 建议为 0.1μF。必须根据最小突发频率确定自举电容器的最小值。自举电容器必须足够大，以便在最低突发频率期间保持自举电压。请参阅电气表中的引导漏电流。
- 信号接地和电源接地必须单点连接。建议将电源接地连接到 LLC 输入大容量电容器的负端子。
- 将 ISNS 和 BLK 的滤波电容器尽可能靠近引脚放置。
- 将 VCR 的底部电容器尽可能靠近 VCR 引脚放置。
- FB 布线必须尽量短
- 将软启动电容器尽可能靠近 LL/SS 引脚放置
- 为 VCR 分压器和 ISNS 电容器使用薄膜电容器或 C0G、NP0 陶瓷电容器，以实现低失真
- 在 BW 引脚上增加必要的滤波电容器，以过滤掉偏置绕组波形上的高峰值。滤除高尖峰至关重要，因为在内部会检测到信号峰值，然后在低侧关断沿进行采样。
- 保持必要的高电压间隙和爬电距离。
- 如果 HV 引脚上需要 2kV HBM ESD 等级，则可在 HV 引脚到接地之间放置一个 100pF 电容器，用于传递高达 2kV 的 HBM ESD。

8.4.2 布局示例

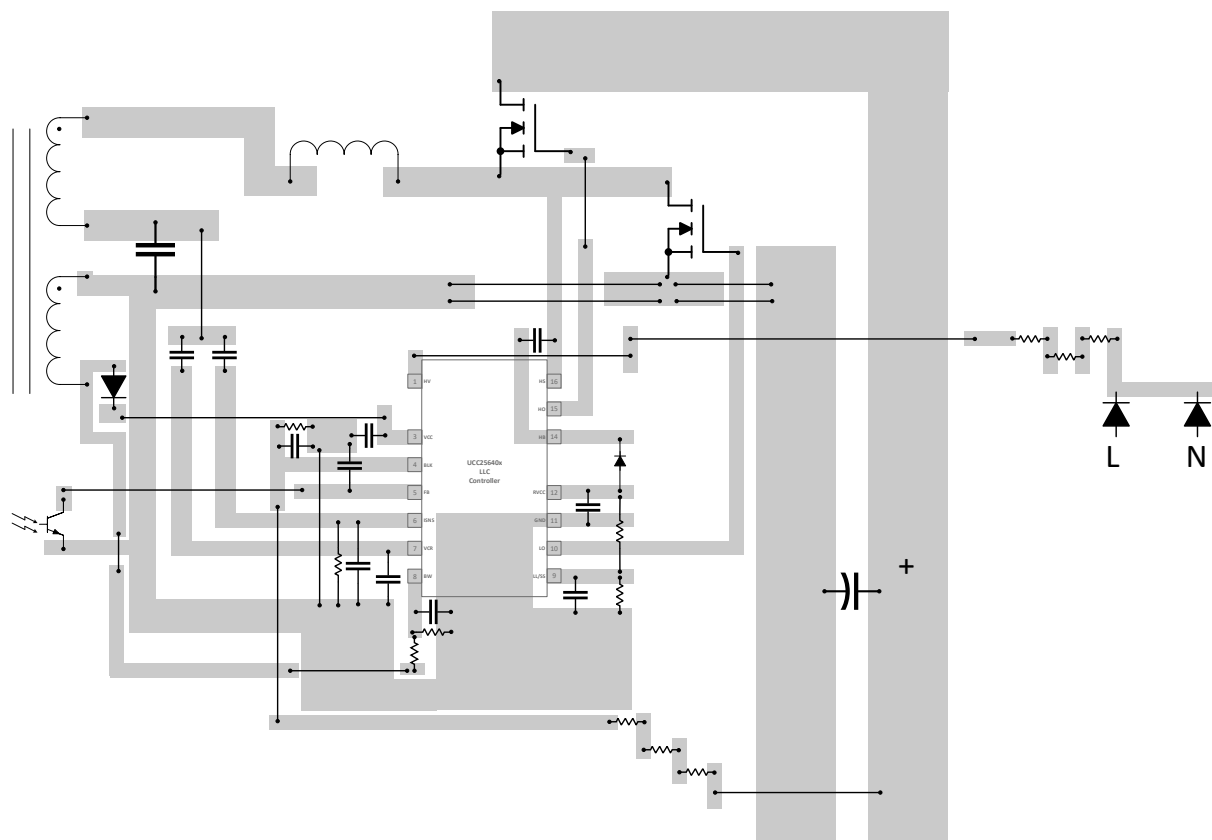


图 8-5. 单层 PCB 的布局示例

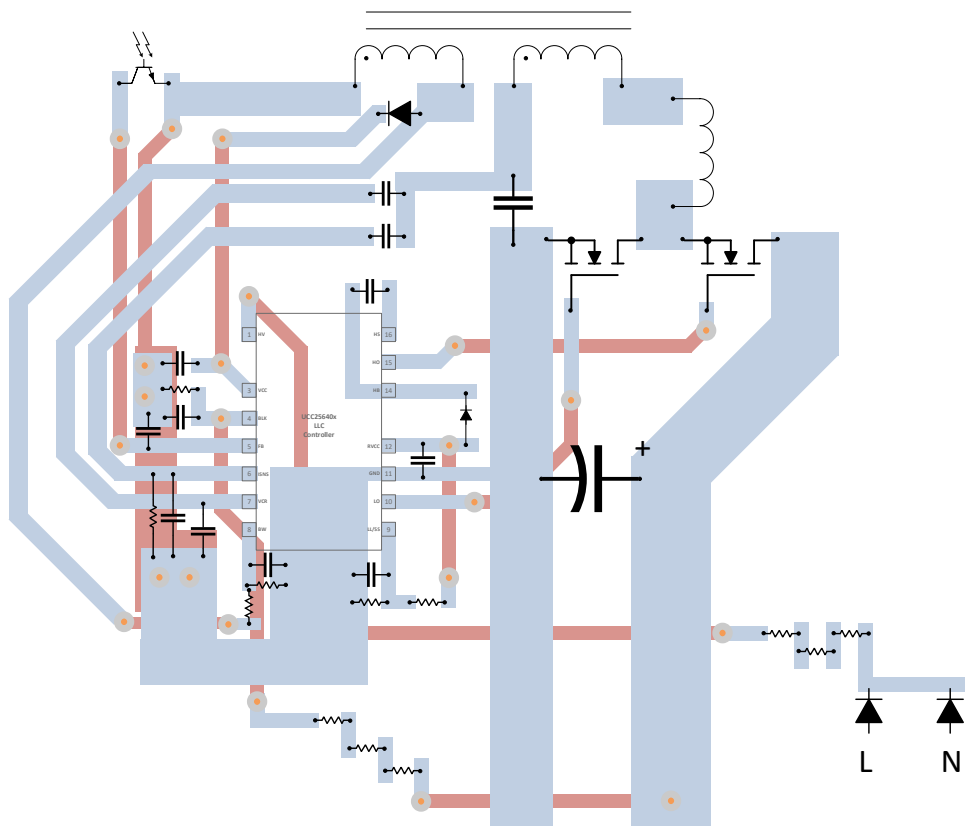


图 8-6. 双层 PCB 的布局示例

9 器件和文档支持

9.1 文档支持

9.1.1 相关文档

请参阅以下相关文档：

- 设计电子表格，[UCC25640x 设计计算器](#)
- 用户指南，[使用 UCC25640EVM-020](#)

9.2 接收文档更新通知

要接收文档更新通知，请导航至 [ti.com.cn](#) 上的器件产品文件夹。点击右上角的 [提醒我](#) 进行注册，即可每周接收产品信息更改摘要。有关更改的详细信息，请查看任何已修订文档中包含的修订历史记录。

9.3 支持资源

[TI E2E™ 中文支持论坛](#) 是工程师的重要参考资料，可直接从专家处获得快速、经过验证的解答和设计帮助。搜索现有解答或提出自己的问题，获得所需的快速设计帮助。

链接的内容由各个贡献者“按原样”提供。这些内容并不构成 TI 技术规范，并且不一定反映 TI 的观点；请参阅 TI 的[使用条款](#)。

9.4 商标

TI E2E™ is a trademark of Texas Instruments.

所有商标均为其各自所有者的财产。

9.5 静电放电警告



静电放电 (ESD) 会损坏这个集成电路。德州仪器 (TI) 建议通过适当的预防措施处理所有集成电路。如果不遵守正确的处理和安装程序，可能会损坏集成电路。

ESD 的损坏小至导致微小的性能降级，大至整个器件故障。精密的集成电路可能更容易受到损坏，这是因为非常细微的参数更改都可能会导致器件与其发布的规格不相符。

9.6 术语表

[TI 术语表](#) 本术语表列出并解释了术语、首字母缩略词和定义。

10 修订历史记录

注：以前版本的页码可能与当前版本的页码不同

Changes from Revision E (February 2021) to Revision F (August 2026)	Page
---	------

- | | |
|--------------------------------|---|
| • 更新了整个文档中的表格、图和交叉参考的编号格式..... | 1 |
|--------------------------------|---|

Changes from Revision D (September 2020) to Revision E (February 2021)	Page
--	------

- | | |
|--|---|
| • 将绝对最大额定值 HV、HB 输入电压从 640V 更新成 700V 最大值。..... | 6 |
|--|---|

11 机械、封装和可订购信息

以下页面包含机械、封装和可订购信息。这些信息是指定器件可用的最新数据。数据如有变更，恕不另行通知，且不会对此文档进行修订。如需获取此数据表的浏览器版本，请查阅左侧的导航栏。

PACKAGING INFORMATION

Orderable part number	Status (1)	Material type (2)	Package Pins	Package qty Carrier	RoHS (3)	Lead finish/ Ball material (4)	MSL rating/ Peak reflow (5)	Op temp (°C)	Part marking (6)
UCC256402ADDBR	Active	Production	SOIC (DDB) 14	2500 LARGE T&R	Yes	NIPDAU	Level-2-260C-1 YEAR	-40 to 125	UCC256402A
UCC256402ADDBR.B	Active	Production	SOIC (DDB) 14	2500 LARGE T&R	Yes	NIPDAU	Level-2-260C-1 YEAR	-40 to 125	UCC256402A
UCC256402ADDBT	Active	Production	SOIC (DDB) 14	250 SMALL T&R	Yes	NIPDAU	Level-2-260C-1 YEAR	-40 to 125	UCC256402A
UCC256402ADDBT.B	Active	Production	SOIC (DDB) 14	250 SMALL T&R	Yes	NIPDAU	Level-2-260C-1 YEAR	-40 to 125	UCC256402A
UCC256402DDBR	Active	Production	SOIC (DDB) 14	2500 LARGE T&R	Yes	NIPDAU	Level-2-260C-1 YEAR	-40 to 125	UCC256402
UCC256402DDBR.B	Active	Production	SOIC (DDB) 14	2500 LARGE T&R	Yes	NIPDAU	Level-2-260C-1 YEAR	-40 to 125	UCC256402
UCC256402DDBT	Active	Production	SOIC (DDB) 14	250 SMALL T&R	Yes	NIPDAU	Level-2-260C-1 YEAR	-40 to 125	UCC256402
UCC256402DDBT.B	Active	Production	SOIC (DDB) 14	250 SMALL T&R	Yes	NIPDAU	Level-2-260C-1 YEAR	-40 to 125	UCC256402
UCC256403ADDBR	Active	Production	SOIC (DDB) 14	2500 LARGE T&R	Yes	NIPDAU	Level-2-260C-1 YEAR	-40 to 125	UCC256403A
UCC256403ADDBR.B	Active	Production	SOIC (DDB) 14	2500 LARGE T&R	Yes	NIPDAU	Level-2-260C-1 YEAR	-40 to 125	UCC256403A
UCC256403DDBR	Active	Production	SOIC (DDB) 14	2500 LARGE T&R	Yes	NIPDAU	Level-2-260C-1 YEAR	-40 to 125	UCC256403
UCC256403DDBR.B	Active	Production	SOIC (DDB) 14	2500 LARGE T&R	Yes	NIPDAU	Level-2-260C-1 YEAR	-40 to 125	UCC256403
UCC256403DDBT	Active	Production	SOIC (DDB) 14	250 SMALL T&R	Yes	NIPDAU	Level-2-260C-1 YEAR	-40 to 125	UCC256403
UCC256403DDBT.B	Active	Production	SOIC (DDB) 14	250 SMALL T&R	Yes	NIPDAU	Level-2-260C-1 YEAR	-40 to 125	UCC256403
UCC256404ADDBR	Active	Production	SOIC (DDB) 14	2500 LARGE T&R	Yes	NIPDAU	Level-2-260C-1 YEAR	-40 to 125	UCC256404A
UCC256404ADDBR.B	Active	Production	SOIC (DDB) 14	2500 LARGE T&R	Yes	NIPDAU	Level-2-260C-1 YEAR	-40 to 125	UCC256404A
UCC256404ADDBT	Active	Production	SOIC (DDB) 14	250 SMALL T&R	Yes	NIPDAU	Level-2-260C-1 YEAR	-40 to 125	UCC256404A
UCC256404ADDBT.B	Active	Production	SOIC (DDB) 14	250 SMALL T&R	Yes	NIPDAU	Level-2-260C-1 YEAR	-40 to 125	UCC256404A
UCC256404BDBR	Active	Production	SOIC (DDB) 14	2500 LARGE T&R	Yes	NIPDAU	Level-2-260C-1 YEAR	-40 to 125	UCC256404B
UCC256404BDBR.B	Active	Production	SOIC (DDB) 14	2500 LARGE T&R	Yes	NIPDAU	Level-2-260C-1 YEAR	-40 to 125	UCC256404B
UCC256404DDBR	Active	Production	SOIC (DDB) 14	2500 LARGE T&R	Yes	NIPDAU	Level-2-260C-1 YEAR	-40 to 125	UCC256404
UCC256404DDBR.B	Active	Production	SOIC (DDB) 14	2500 LARGE T&R	Yes	NIPDAU	Level-2-260C-1 YEAR	-40 to 125	UCC256404
UCC256404DDBT	Active	Production	SOIC (DDB) 14	250 SMALL T&R	Yes	NIPDAU	Level-2-260C-1 YEAR	-40 to 125	UCC256404
UCC256404DDBT.B	Active	Production	SOIC (DDB) 14	250 SMALL T&R	Yes	NIPDAU	Level-2-260C-1 YEAR	-40 to 125	UCC256404

⁽¹⁾ **Status:** For more details on status, see our [product life cycle](#).

⁽²⁾ **Material type:** When designated, preproduction parts are prototypes/experimental devices, and are not yet approved or released for full production. Testing and final process, including without limitation quality assurance, reliability performance testing, and/or process qualification, may not yet be complete, and this item is subject to further changes or possible discontinuation. If available for ordering, purchases will be subject to an additional waiver at checkout, and are intended for early internal evaluation purposes only. These items are sold without warranties of any kind.

⁽³⁾ **RoHS values:** Yes, No, RoHS Exempt. See the [TI RoHS Statement](#) for additional information and value definition.

⁽⁴⁾ **Lead finish/Ball material:** Parts may have multiple material finish options. Finish options are separated by a vertical ruled line. Lead finish/Ball material values may wrap to two lines if the finish value exceeds the maximum column width.

⁽⁵⁾ **MSL rating/Peak reflow:** The moisture sensitivity level ratings and peak solder (reflow) temperatures. In the event that a part has multiple moisture sensitivity ratings, only the lowest level per JEDEC standards is shown. Refer to the shipping label for the actual reflow temperature that will be used to mount the part to the printed circuit board.

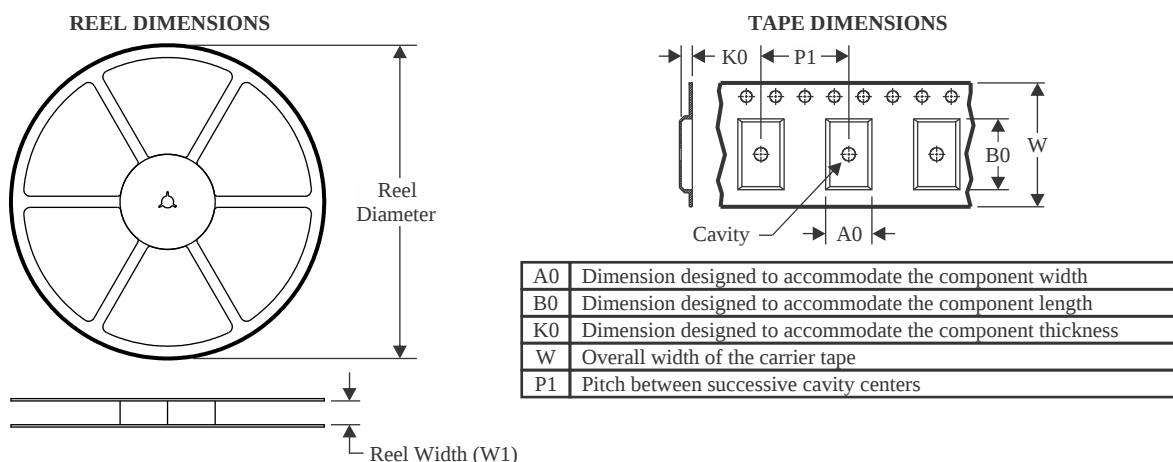
⁽⁶⁾ **Part marking:** There may be an additional marking, which relates to the logo, the lot trace code information, or the environmental category of the part.

Multiple part markings will be inside parentheses. Only one part marking contained in parentheses and separated by a "~" will appear on a part. If a line is indented then it is a continuation of the previous line and the two combined represent the entire part marking for that device.

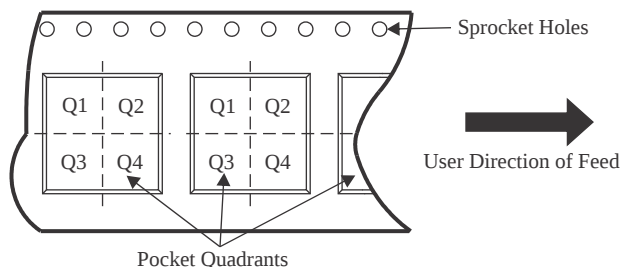
Important Information and Disclaimer:The information provided on this page represents TI's knowledge and belief as of the date that it is provided. TI bases its knowledge and belief on information provided by third parties, and makes no representation or warranty as to the accuracy of such information. Efforts are underway to better integrate information from third parties. TI has taken and continues to take reasonable steps to provide representative and accurate information but may not have conducted destructive testing or chemical analysis on incoming materials and chemicals. TI and TI suppliers consider certain information to be proprietary, and thus CAS numbers and other limited information may not be available for release.

In no event shall TI's liability arising out of such information exceed the total purchase price of the TI part(s) at issue in this document sold by TI to Customer on an annual basis.

TAPE AND REEL INFORMATION



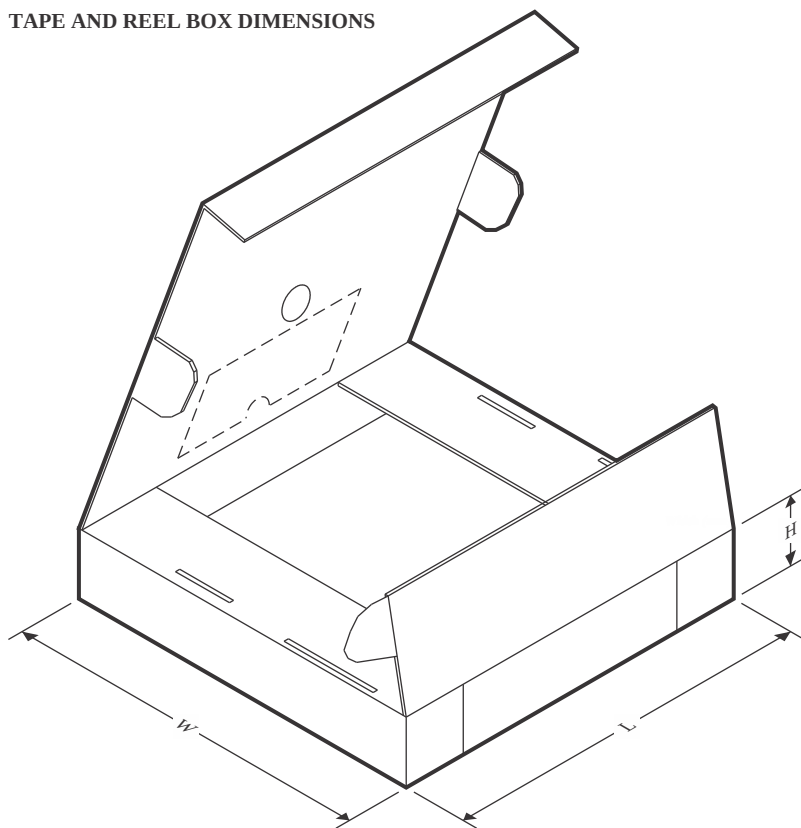
QUADRANT ASSIGNMENTS FOR PIN 1 ORIENTATION IN TAPE



*All dimensions are nominal

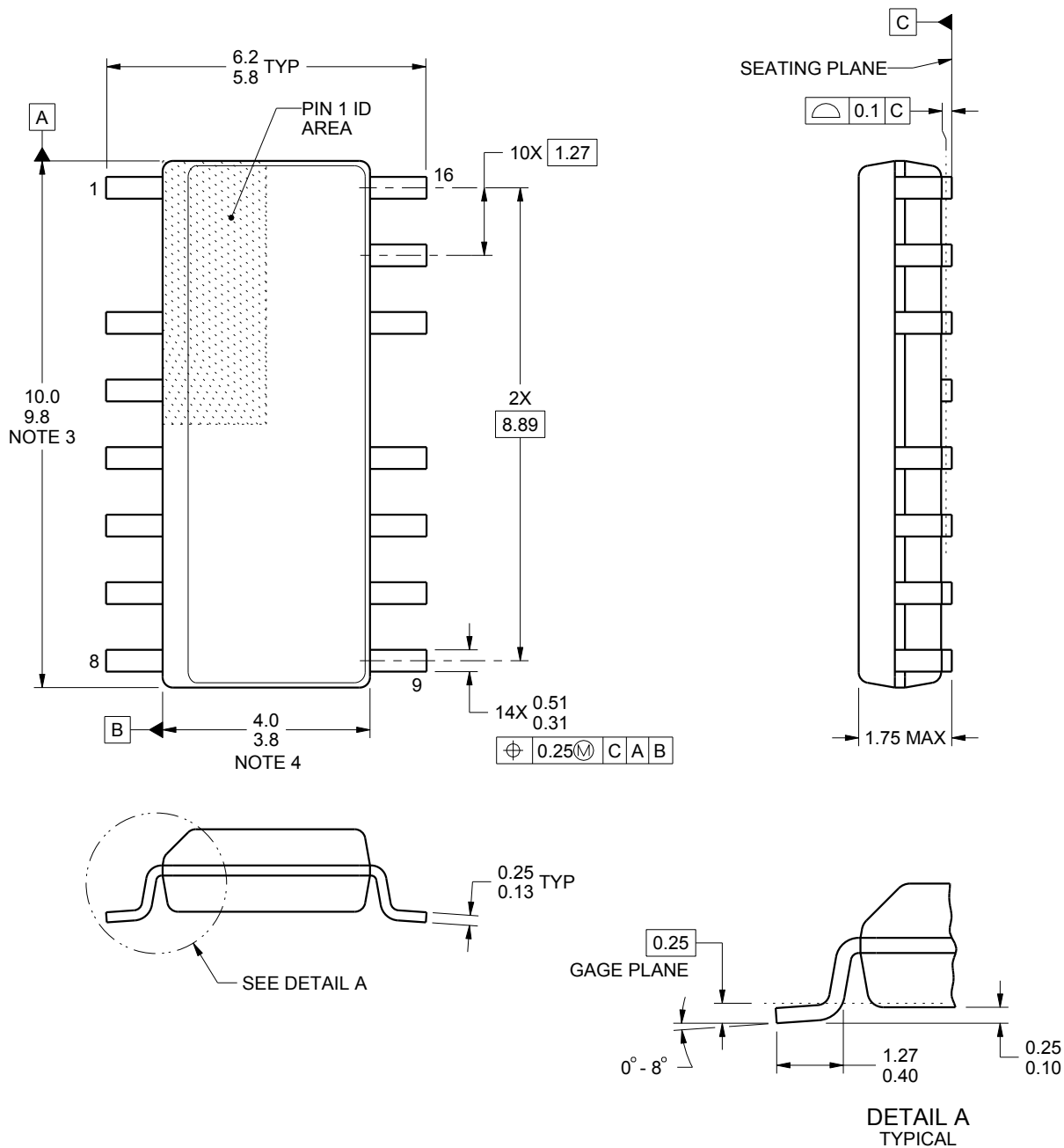
Device	Package Type	Package Drawing	Pins	SPQ	Reel Diameter (mm)	Reel Width W1 (mm)	A0 (mm)	B0 (mm)	K0 (mm)	P1 (mm)	W (mm)	Pin1 Quadrant
UCC256402ADDBR	SOIC	DDB	14	2500	330.0	16.4	6.5	10.3	2.1	8.0	16.0	Q1
UCC256402ADDBT	SOIC	DDB	14	250	180.0	16.4	6.5	10.3	2.1	8.0	16.0	Q1
UCC256402DDBR	SOIC	DDB	14	2500	330.0	16.4	6.5	10.3	2.1	8.0	16.0	Q1
UCC256402DDBT	SOIC	DDB	14	250	180.0	16.4	6.5	10.3	2.1	8.0	16.0	Q1
UCC256403ADDBR	SOIC	DDB	14	2500	330.0	16.4	6.5	10.3	2.1	8.0	16.0	Q1
UCC256403DDBR	SOIC	DDB	14	2500	330.0	16.4	6.5	10.3	2.1	8.0	16.0	Q1
UCC256403DDBT	SOIC	DDB	14	250	180.0	16.4	6.5	10.3	2.1	8.0	16.0	Q1
UCC256404ADDBR	SOIC	DDB	14	2500	330.0	16.4	6.5	10.3	2.1	8.0	16.0	Q1
UCC256404ADDBT	SOIC	DDB	14	250	180.0	16.4	6.5	10.3	2.1	8.0	16.0	Q1
UCC256404BDDBR	SOIC	DDB	14	2500	330.0	16.4	6.5	10.3	2.1	8.0	16.0	Q1
UCC256404DDBR	SOIC	DDB	14	2500	330.0	16.4	6.5	10.3	2.1	8.0	16.0	Q1
UCC256404DDBT	SOIC	DDB	14	250	180.0	16.4	6.5	10.3	2.1	8.0	16.0	Q1

TAPE AND REEL BOX DIMENSIONS



*All dimensions are nominal

Device	Package Type	Package Drawing	Pins	SPQ	Length (mm)	Width (mm)	Height (mm)
UCC256402ADDBR	SOIC	DDB	14	2500	353.0	353.0	32.0
UCC256402ADDBT	SOIC	DDB	14	250	213.0	191.0	35.0
UCC256402DDBR	SOIC	DDB	14	2500	353.0	353.0	32.0
UCC256402DDBT	SOIC	DDB	14	250	213.0	191.0	35.0
UCC256403ADDBR	SOIC	DDB	14	2500	353.0	353.0	32.0
UCC256403DDBR	SOIC	DDB	14	2500	353.0	353.0	32.0
UCC256403DDBT	SOIC	DDB	14	250	213.0	191.0	35.0
UCC256404ADDBR	SOIC	DDB	14	2500	353.0	353.0	32.0
UCC256404ADDBT	SOIC	DDB	14	250	213.0	191.0	35.0
UCC256404BDDBR	SOIC	DDB	14	2500	353.0	353.0	32.0
UCC256404DDBR	SOIC	DDB	14	2500	353.0	353.0	32.0
UCC256404DDBT	SOIC	DDB	14	250	213.0	191.0	35.0



4222925/A 04/2016

NOTES:

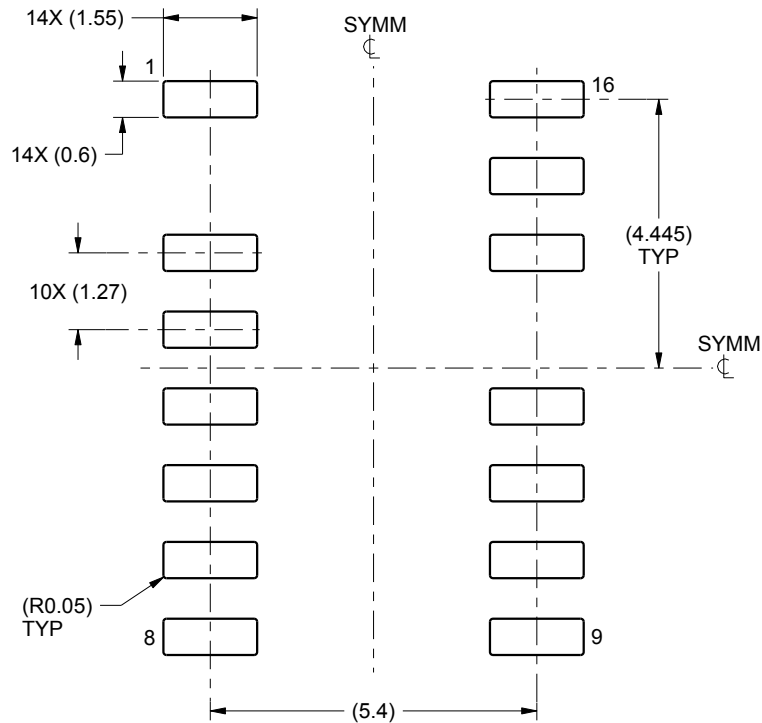
1. All linear dimensions are in millimeters. Dimensions in parenthesis are for reference only. Dimensioning and tolerancing per ASME Y14.5M.
2. This drawing is subject to change without notice.
3. This dimension does not include mold flash, protrusions, or gate burrs. Mold flash, protrusions, or gate burrs shall not exceed 0.15 mm per side.
4. This dimension does not include interlead flash. Interlead flash shall not exceed 0.43 mm per side.
5. Reference JEDEC registration MS-012, variation AC.

EXAMPLE BOARD LAYOUT

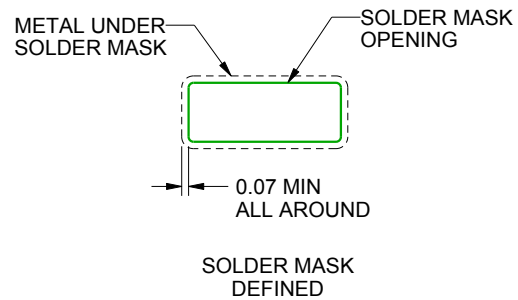
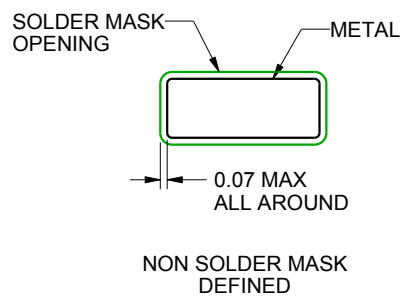
DDB0014A

SOIC - 1.75 mm max height

SOIC



LAND PATTERN EXAMPLE
SCALE:8X



SOLDER MASK DETAILS

4222925/A 04/2016

NOTES: (continued)

6. Publication IPC-7351 may have alternate designs.

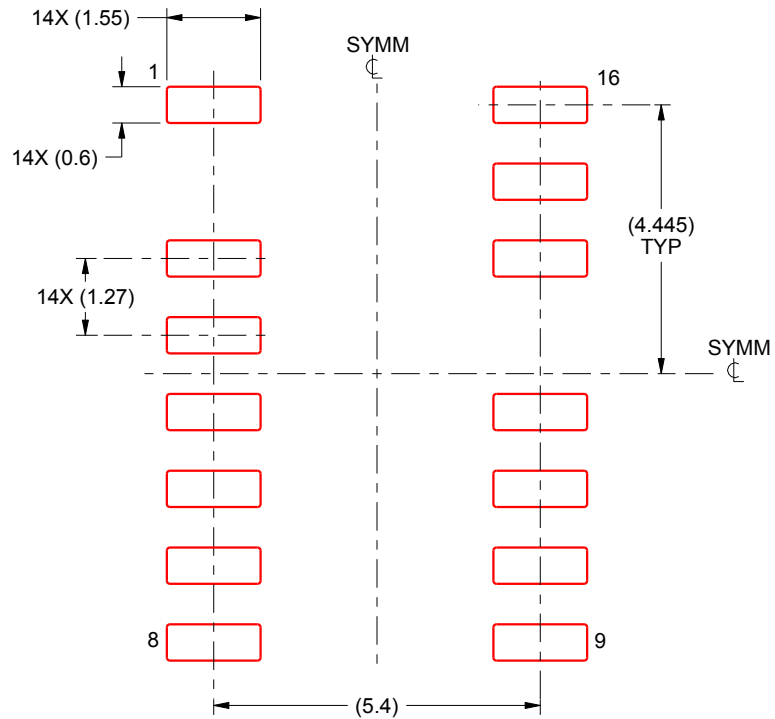
7. Solder mask tolerances between and around signal pads can vary based on board fabrication site.

EXAMPLE STENCIL DESIGN

DDB0014A

SOIC - 1.75 mm max height

SOIC



SOLDER PASTE EXAMPLE
BASED ON 0.125 mm THICK STENCIL
SCALE:8X

4222925/A 04/2016

NOTES: (continued)

8. Laser cutting apertures with trapezoidal walls and rounded corners may offer better paste release. IPC-7525 may have alternate design recommendations.
9. Board assembly site may have different recommendations for stencil design.

重要通知和免责声明

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、与某特定用途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安全、安保法规或其他要求。

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 产品的相关应用。严禁以其他方式对这些资源进行复制或展示。您无权使用任何其他 TI 知识产权或任何第三方知识产权。对于因您对这些资源的使用而对 TI 及其代表造成的任何索赔、损害、成本、损失和债务，您将全额赔偿，TI 对此概不负责。

TI 提供的产品受 [TI 销售条款](#)、[TI 通用质量指南](#) 或 [ti.com](#) 上其他适用条款或 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。除非德州仪器 (TI) 明确将某产品指定为定制产品或客户特定产品，否则其产品均为按确定价格收入目录的标准通用器件。

TI 反对并拒绝您可能提出的任何其他或不同的条款。

版权所有 © 2026，德州仪器 (TI) 公司

最后更新日期：2025 年 10 月