

## 设计范例报告

标题	使用InnoSwitch™ 3-AQ INN3949CQ设计的适用于汽车800V系统的13W双路输出电源
规格	30V <sub>DC</sub> - 1000V <sub>DC</sub> 输入； 18V/555mA; 9V/333mA输出
应用	牵引逆变器门极驱动或应急电源
作者	汽车系统工程部
文档编号	DER-956Q
日期	2024年5月15日
修订版本	2.1

### 特色概述

- 适用于800V纯电动汽车应用的超紧凑设计
- 元件数量少（仅62个电气元件<sup>1</sup>）
- 30V<sub>DC</sub>至1000V<sub>DC</sub>的宽范围输入，满足启动和工作要求
- 1000V加强绝缘变压器（符合IEC-60664-1和IEC-60664-4标准）
- 效率≥80%（450V<sub>DC</sub>至1000V<sub>DC</sub>）
- 次级侧调整输出
- 工作环境温度：-40°C至105°C
- 完善的故障保护包括输出电流限制和短路保护
- 使用符合AEC-Q标准的车规级贴片式(SMD)元件<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 不包括连接器。

<sup>2</sup> AEC-Q200 变压器和输入共模扼流圈的认证属于最终设计。

## 目录

1	简介 .....	4
2	设计规格 .....	7
2.1	电气规格 .....	7
2.2	绝缘要求 .....	8
2.3	环境规格 .....	8
3	电路原理图 .....	9
4	电路描述 .....	10
4.1	输入滤波器 .....	10
4.2	高压电路 .....	10
4.3	低压电路 .....	11
5	PCB布局 .....	13
6	物料清单(BOM) .....	16
7	变压器规格 .....	18
7.1	电气原理图 .....	18
7.2	电气规格 .....	18
7.3	变压器结构图 .....	19
7.4	材料列表 .....	19
7.5	绕制图示 .....	20
8	变压器设计表格 .....	27
9	性能数据 .....	30
9.1	空载输入功率 .....	32
9.2	效率 .....	33
9.2.1	输入电压效率 .....	33
9.2.2	负载效率 .....	34
9.3	负载调整率 .....	46
9.3.1	30V <sub>DC</sub> 输入 .....	46
9.3.2	60V <sub>DC</sub> 输入 .....	50
9.3.3	800V <sub>DC</sub> 输入 .....	54
9.3.4	1000V <sub>DC</sub> 输入 .....	58
9.4	输入电压调整率 .....	62
9.4.1	负载条件: 18V = 最大值 / 9V = 最大值 .....	62
9.4.2	负载条件: 18V = 最大值 / 9V = 最小值 .....	64
9.4.3	负载条件: 18V = 最小值 / 9V = 最大值 .....	66
10	温升性能 .....	68
10.1	105°C环境温度下的温升数据 .....	68
10.2	25°C环境温度下的温升数据 .....	71
11	波形 .....	74
11.1	启机波形 .....	74
11.1.1	25°C环境温度 .....	74
11.1.2	-40°C环境温度 .....	78



11.2	稳态应力波形 .....	82
11.2.1	在105°C环境温度下的开关波形 .....	82
11.2.2	在25°C环境温度下的开关波形 .....	85
11.3	负载动态响应 .....	88
11.3.1	在105°C环境温度下的负载动态响应 .....	88
11.3.2	在25°C环境温度下的负载动态响应 .....	90
11.4	输出电压纹波测量 .....	92
11.4.1	输出电压纹波测量技术 .....	92
11.4.2	输出电压纹波波形 .....	93
11.4.3	输出电压纹波相对于负载的变化 .....	96
12	输出过载 .....	112
12.1	18V输出过载能力 .....	112
12.1.1	30V <sub>DC</sub> 输入 .....	112
12.1.2	60V <sub>DC</sub> 输入 .....	113
12.1.3	800V <sub>DC</sub> 输入 .....	114
12.1.4	1000V <sub>DC</sub> 输入 .....	115
13	版本历史 .....	116

### 免责声明:

我们认为本文所含的声明、技术信息和建议截至本文发布之日均准确无误。技术信息中包含的参数、数字、值和其他技术数据均已根据相关技术规范（如有）尽我们所知进行计算和确定。它们可能基于一般情况下不一定适用的假设或操作条件。我们不对本文所含声明、技术信息和建议的准确性或完整性作出任何明示或暗示的陈述或保证。

对于所传达的任何声明、技术信息、建议或意见的准确性或充分性，我们不承担任何责任，并且明确表示不对任何人因此而遭受的任何直接、间接或后果性损失或损害承担任何责任。



## 1 简介

本工程报告介绍了一款13W双路输出汽车电源。它适用于800V电池供电的电动汽车，支持30V<sub>DC</sub>至1000V<sub>DC</sub>的超宽输入范围。本设计采用InnoSwitch3-AQ系列中额定耐用为1700V的INN3949CQ器件。

在典型配置中，9V输出为主牵引逆变器的电源控制提供应急备用电源（功能安全要求在失去12V电压时能继续工作），18V输出提供栅极电源。

本设计遵循IEC 60664第1和第4部分规定的爬电距离和电气间隙要求，为高压直流(HVDC)输入以及18V和9V输出提供加强绝缘。在18V和9V输出之间提供基本绝缘。

本文档包括电源设计规格、电路原理图、物料清单(BOM)、磁性元件文档、印刷电路板(PCB)布局及性能数据。

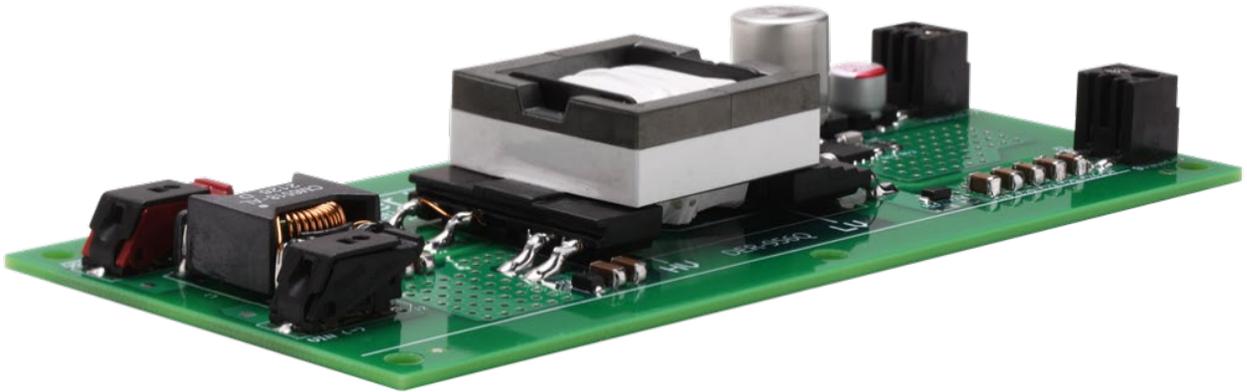
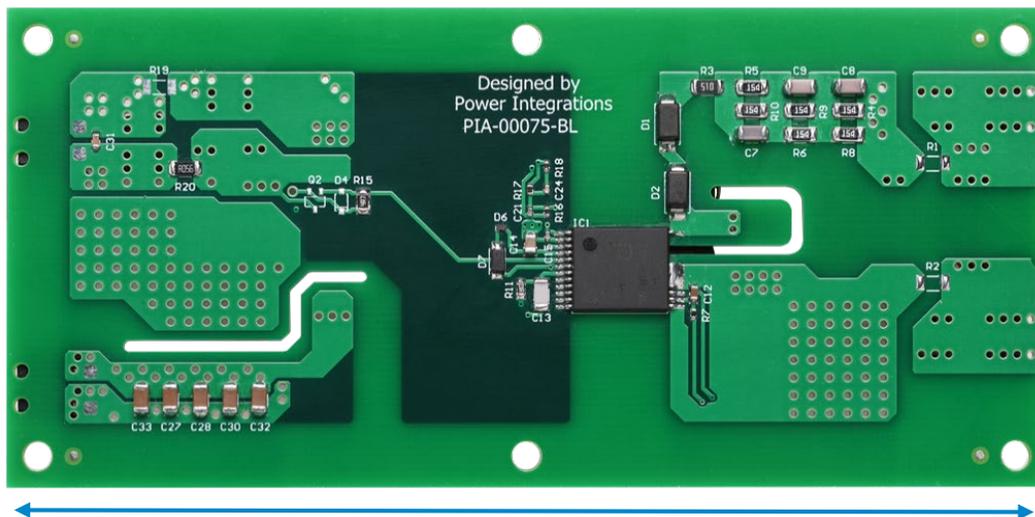


图1 - 装配后的电路板图片，整体装配



图2 - 装配后的电路板，顶视图



116mm 板长

54mm  
板宽

图3 - 装配后的电路板，底视图



17mm  
板高

图4 - 装配后的电路板，侧视图



18V 稳压输出可在 60V<sub>DC</sub> 至 1000V<sub>DC</sub> 的输入电压范围内连续提供 10W 输出功率，可用于为当前一代 SiC MOSFET 提供栅极功率。

在 30V<sub>DC</sub> 输入时，18V 输出的功率能力降低至 4W，足以支持在逆变器未被驱动的情况下进行启动。交叉调整的 9V 输出可以在 30V<sub>DC</sub> 到 1000V<sub>DC</sub> 的输入电压范围内提供 3W 输出功率，在 12V 系统发生故障时提供备用电源以维持逆变器工作（功能安全要求）。

InnoSwitch3-AQ 可直接检测输出电压，并通过 FluxLink™ 磁感耦合向初级侧提供快速、准确的反馈，从而维持调整。次级侧控制还可简化同步整流的实现，提高整体效率（相较于二极管整流），从而节省空间并省去散热片。



## 2 设计规格

下表所列为设计的最低可接受性能。该设计的实际性能列于结果部分。

### 2.1 电气规格

描述	符号	最小值	典型值	最大值	单位
<b>输入参数</b>					
以HV-为参考点的正直流母线输入电压	<b>HV+</b>	30	800	1000	V <sub>DC</sub>
工作开关频率	<b>f<sub>sw</sub></b>	25	33	56	kHz
<b>输出参数</b>					
<b>18V输出</b>					
输出电压	<b>V<sub>OUT (18 V)</sub></b>	17.1	18	18.9	V <sub>DC</sub>
负载和输入电压调整率	<b>V<sub>REG (18 V)</sub></b>	-5		+5	%
在电路板上测得的输出电压纹波	<b>V<sub>RIPPLE (18 V)</sub></b>		500		mV
输出过冲/下冲	<b>Δ V<sub>OUT (18 V)</sub></b>		±5		%
输出电流	<b>I<sub>OUT (18 V)</sub></b>	166	555	610	mA
连续输出功率	<b>P<sub>OUT(18 V)</sub></b>	3	10		W
<b>9V输出</b>					
输出电压	<b>V<sub>OUT (9 V)</sub></b>	7.5	9	11	V <sub>DC</sub>
负载和输入电压调整率	<b>V<sub>REG (9 V)</sub></b>	-17		+22	%
在电路板上测得的输出电压纹波	<b>V<sub>RIPPLE (9 V)</sub></b>		850		mV
输出过冲/下冲	<b>Δ V<sub>OUT (9 V)</sub></b>	-20		+7	%
输出电流	<b>I<sub>OUT (9 V)</sub></b>	22		333	mA
连续输出功率	<b>P<sub>OUT(9 V)</sub></b>	0.2		3	W
<b>总输出功率降额</b>					
连续输出功率, 30V <sub>DC</sub> 输入	<b>P<sub>OUT</sub></b>			7	W
连续输出功率, 60V <sub>DC</sub> 至1000V <sub>DC</sub> 输入				13	W

表1 - 电气要求



## 2.2 绝缘要求

描述	符号	最小值	典型值	最大值	单位
INN3949CQ的最大耐压	<b>BV<sub>DSS</sub></b>			1700	V
系统电压	<b>V<sub>SYSTEM</sub></b>			1200	V
工作电压	<b>V<sub>WORKING</sub></b>			1000	V
污染等级	<b>PD</b>			2	
FR4的CTI	<b>CTI</b>	175		399	
额定脉冲电压	<b>V<sub>IMPULSE</sub></b>			2.5	kV
h <sub>a</sub> 海拔校正因子	<b>Ch<sub>a</sub></b>			1.59	
技术洁净度要求				0.6	mm
基本电气间隙要求	<b>CLR<sub>BASIC</sub></b>	3.0			mm
加强电气间隙要求	<b>CLR<sub>REINFORCED</sub></b>	5.4			mm
PCB基本爬电距离要求	<b>CPG<sub>BASIC(PCB)</sub></b>	5.6			mm
PCB加强爬电距离要求	<b>CPG<sub>REINFORCED(PCB)</sub></b>	10.6			mm
初级侧和次级侧之间60秒绝缘测试电压	<b>V<sub>ISO</sub></b>	5000			V <sub>PK</sub>
局部放电测试电压	<b>V<sub>PD_TEST</sub></b>	1800			V <sub>PK</sub>

表2 - 绝缘要求<sup>3</sup>

## 2.3 环境规格

描述	符号	最小值	典型值	最大值	单位
环境温度	<b>T<sub>a</sub></b>	-40		105	°C
工作高度	<b>h<sub>a</sub></b>			5500	m
相对湿度	<b>RH</b>			85	%

表3 - 环境要求

<sup>3</sup>电子间隙和爬电距离要求来自 IEC 60664-1 和 IEC 60664-4 标准。

### 3 电路原理图

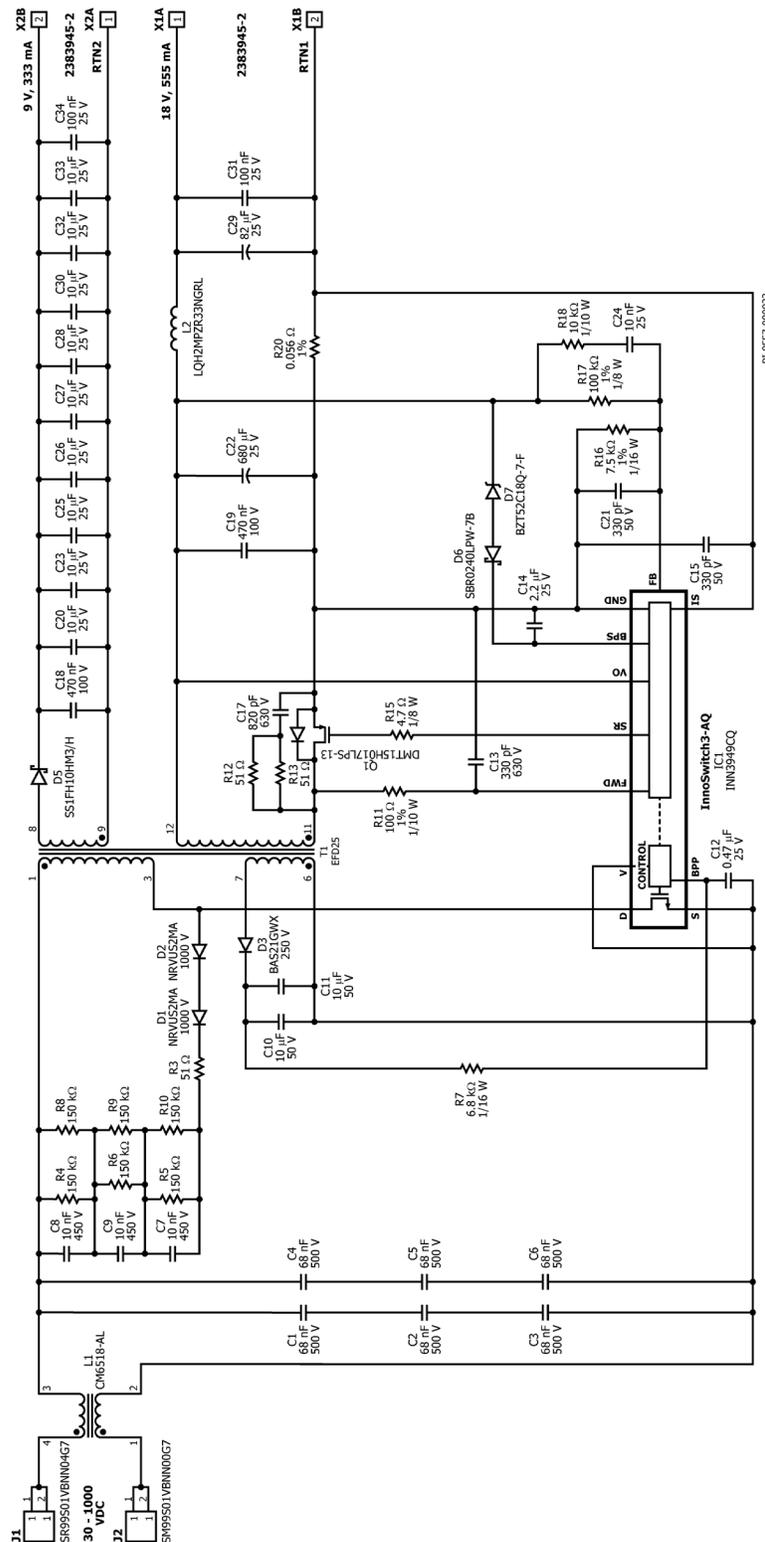


图5 - DER-956Q电路原理图



## 4 电路描述

### 4.1 输入滤波器

汽车逆变器环境恶劣，功率模块的开关动作会产生高 $dv/dt$ 和 $di/dt$ 。电源的安规隔离带上会产生较大的共模电流，这会干扰电源和其他逆变器模块的工作，并影响信号测量的完整性。输入共模扼流圈L1和旁路电容C1至C6有助于过滤不必要的噪声，防止噪声影响设计的整体性能。

选择共模电感L1是为了使参考板能够承受Power Integrations内部的高压网络纹波电阻测试。该测试向高压输入端注入高频纹波，以模拟牵引逆变器中的实际直流母线电容纹波。L1的最终值将取决于应用要求。如果噪声较高，则需要增加L1的电感值。应考虑直流电阻(DCR)，它会随着电感量的增加而增加，并会影响设计的整体效率。图6显示了共模扼流圈的DCR对参考板整体效率的影响。

选择旁路电容C1至C6时应确保不超过其电压额定值的65%，并支持足够的焊盘间距，以满足爬电距离和电气间隙要求。

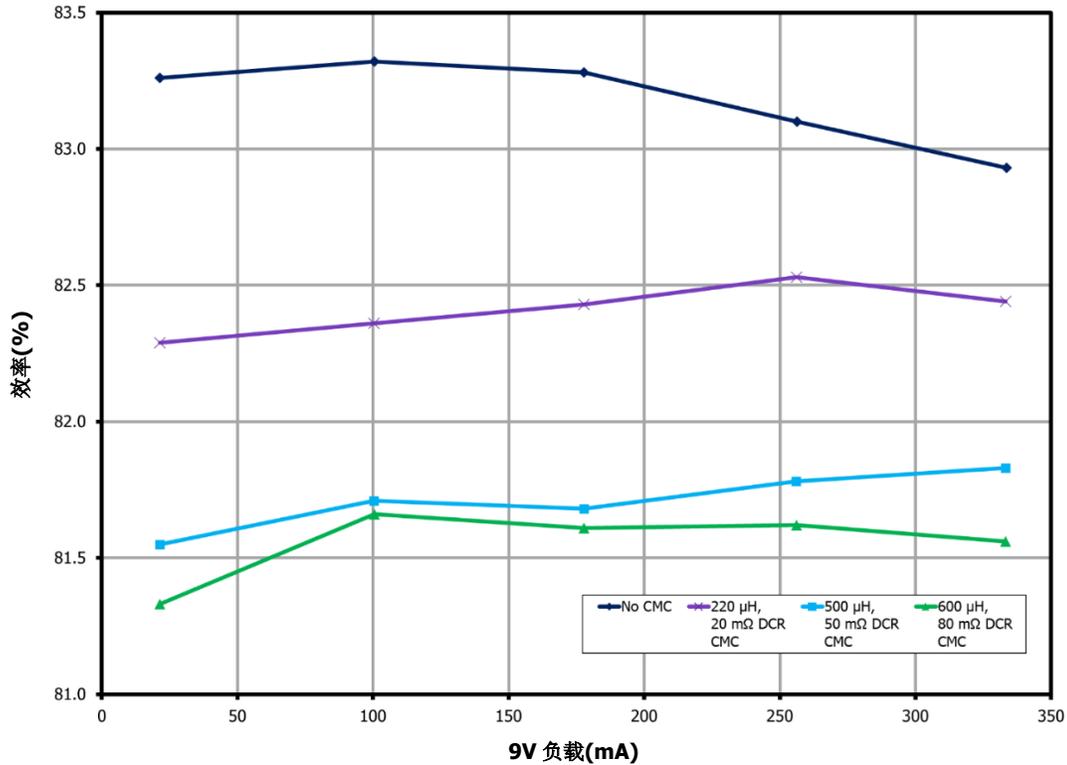


图6 - 在1000V<sub>DC</sub>输入（无输入噪声）和18V最大负载条件下DCR对效率的影响

### 4.2 高压电路

该设计使用反激式变换器，可从高压输入提供两个隔离的低压输出。反激式变压器T1初级绕组的一端连接到高压直流母线，另一端连接到INN3949CQ IC1内集成的1700V功率MOSFET的漏极端子。

初级钳位电路由二极管D1、D2、电阻R4、R5、R6、R8、R9、R10以及电容C7、C8、C9组成，可在IC1内的开关关断的一瞬间立即对IC1的峰值漏源极电压进行钳位控制。相较于传统的RCD钳位，使用了两个串联的符合AEC-Q标准的贴片式二极管，以满足爬电距离和电气间隙要求，并确保每个二极管两端的电压不超过其额定值的70%。电阻网络有助于耗散存储在变压器T1的漏感中的能量。选择缓冲电阻时应确保电压不超过额定值的80%，同时保持功率耗散低于50%。此外，还考虑了缓冲电阻的散热面积，以确保电阻的温度处于可接受的水平。

IC具有自启动功能，当首次直流输入电压上电时，它使用内部高压电流源对BPP引脚电容C12进行充电。INN3949CQ的启动电压通常低于30V的规范要求。

在正常工作期间，初级侧控制器由变压器T1的辅助绕组供电。辅助（或偏置）绕组的输出端由二极管D3进行整流，并由电容C10和C11进行滤波。电阻R7将IC1的BPP引脚电流限定为足以保证正常工作的值，且不会产生过多的损耗。

在本设计中，通过将V引脚连接到源极引脚，可以禁止输入初级欠压和过压功能。当电压<40VDC且输出负载电流较高时，输出电压调整可能会增加，从而导致输出上升但无法达到稳压（打嗝）。时序由自动重新启动(AR)功能决定，提供50ms的启动尝试，然后是2秒的关断时间。

如果此输出响应不可接受，则可以实现欠压功能。有关推荐电路的信息，请参阅InnoSwitch3-AQ数据手册和设计指南。

### 4.3 低压电路

INN3949CQ IC的次级侧18V稳压输出为次级MOSFET提供输出电压、输出电流检测和栅极驱动，从而提供同步整流(SR)。变压器T1的18V绕组两端的电压由MOSFET Q1整流，并由电容C19和C22滤波。由电阻R12、R13和电容C17组成的RC缓冲器可减少开关期间的高频振铃。Q1的开关由IC1内的次级侧控制器进行控制。控制则基于FWD引脚通过电阻R11检测到绕组电压实现。电容C13可降低FWD引脚上的电压尖峰，确保该引脚上的电压不会超过150V的最大额定值。

在连续导通模式下，初级侧功率开关在次级侧向初级侧控制器请求新开关周期指令之前即会关断。在断续模式下，SR MOSFET会在其两端的电压降低至 $V_{SR(TH)}$ 以下时关断。由次级侧来控制初级侧的功率开关可防止交越导通，确保提供可靠的同步整流工作。

IC的次级侧可由次级绕组正向电压（通过R11和FWD引脚）或输出电压（通过V引脚）进行自供电。在这两种情况下，能量都用于通过内部稳压器对去耦电容C14充电。

电阻R16和R17组成分压器网络，为FB引脚提供模拟输出电压。INN3949CQ IC的FB引脚上有一个1.265V的内部参考电压。调整电源输出电压，直至检测网络的中点电压达到该值。电容C21可对高频噪声进行去耦。C24和R18组成前馈网络，以加快响应速度并降低输出纹波。



输出电流测量是通过监测电阻R20两端的电压降来完成的。由此产生的电流信息经去耦电容C15滤波，并由参考GND引脚的IS引脚进行监测。使用35mV的低内部电流检测阈值，以尽量减少损耗。一旦超过阈值，INN3949CQ IC1将进入自动重新启动（打嗝）状态，直到负载电流降至目标阈值以下。

同样，变压器T1的9V交叉调整绕组两端的电压由续流二极管D5整流，并由电容C18、C20、C23、C25、C26、C27、C28、C30、C32和C33滤波。9V输出的调整取决于与18V输出的良好耦合（低漏感），这在变压器设计中得到解决。



## 5 PCB布局

层数: 六(6)层 (牵引逆变器控制板的典型层数)  
板材: FR4  
板厚: 1.6mm  
铜重: 2盎司

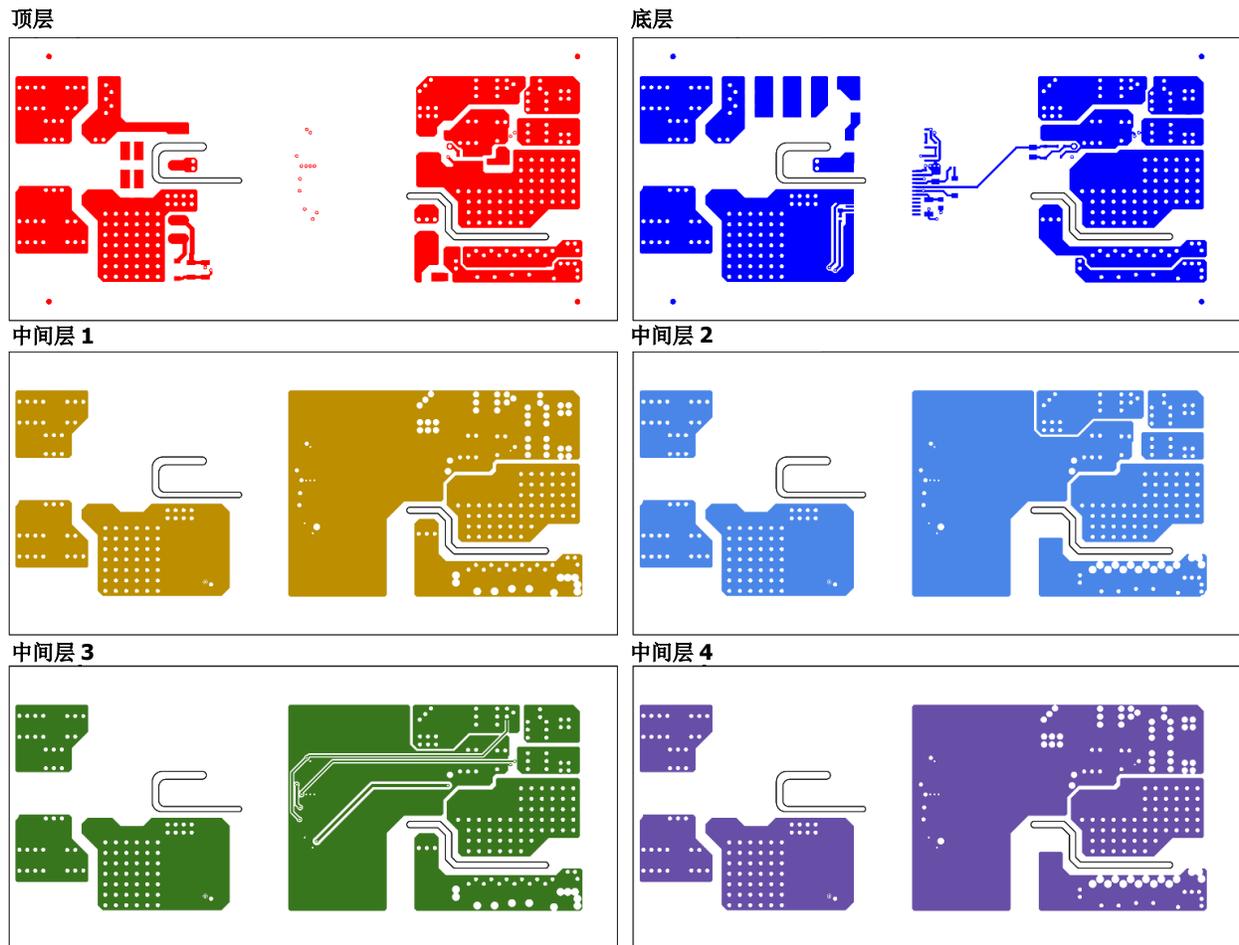


图7 - DER-956Q电路板布局

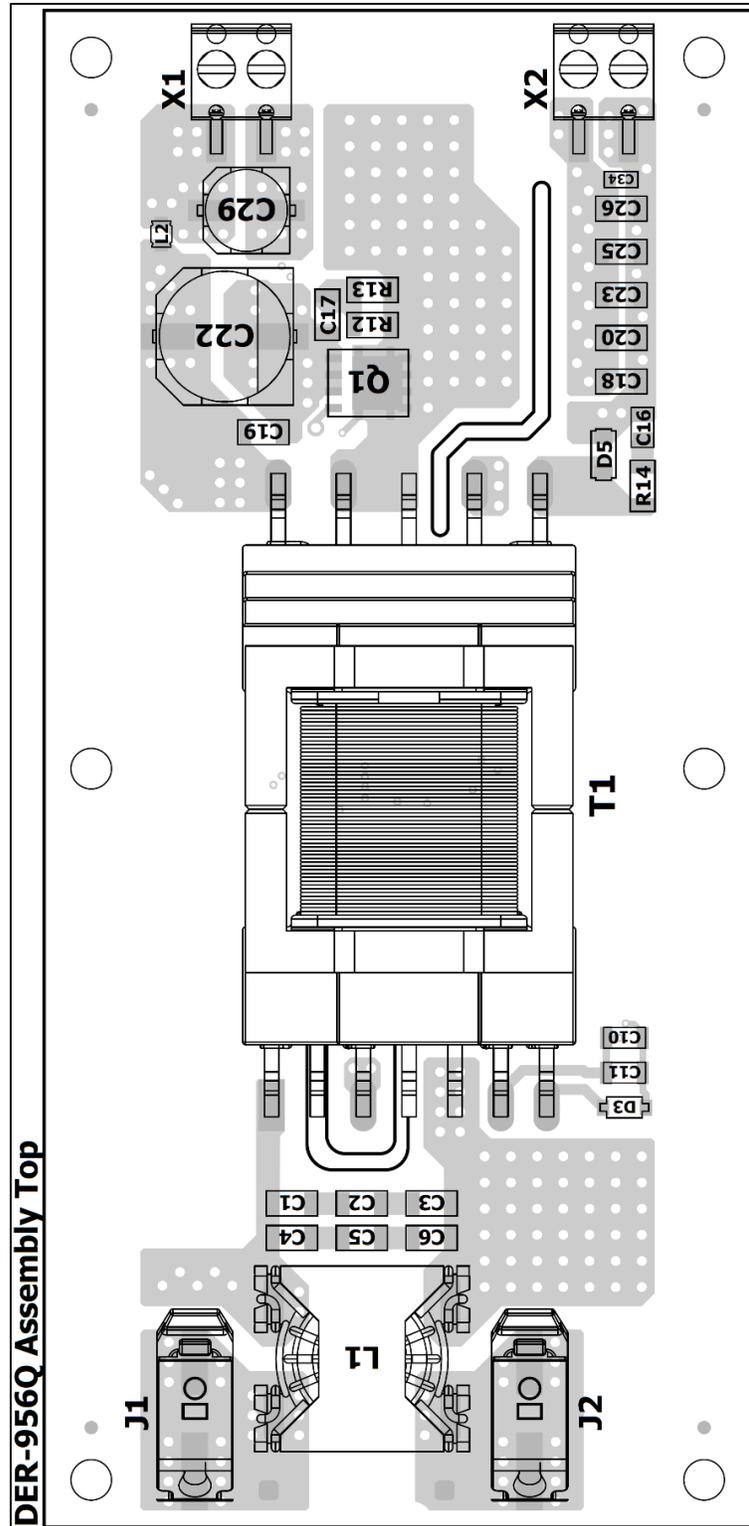


图8 - DER-956Q电路板装配 (顶视图)



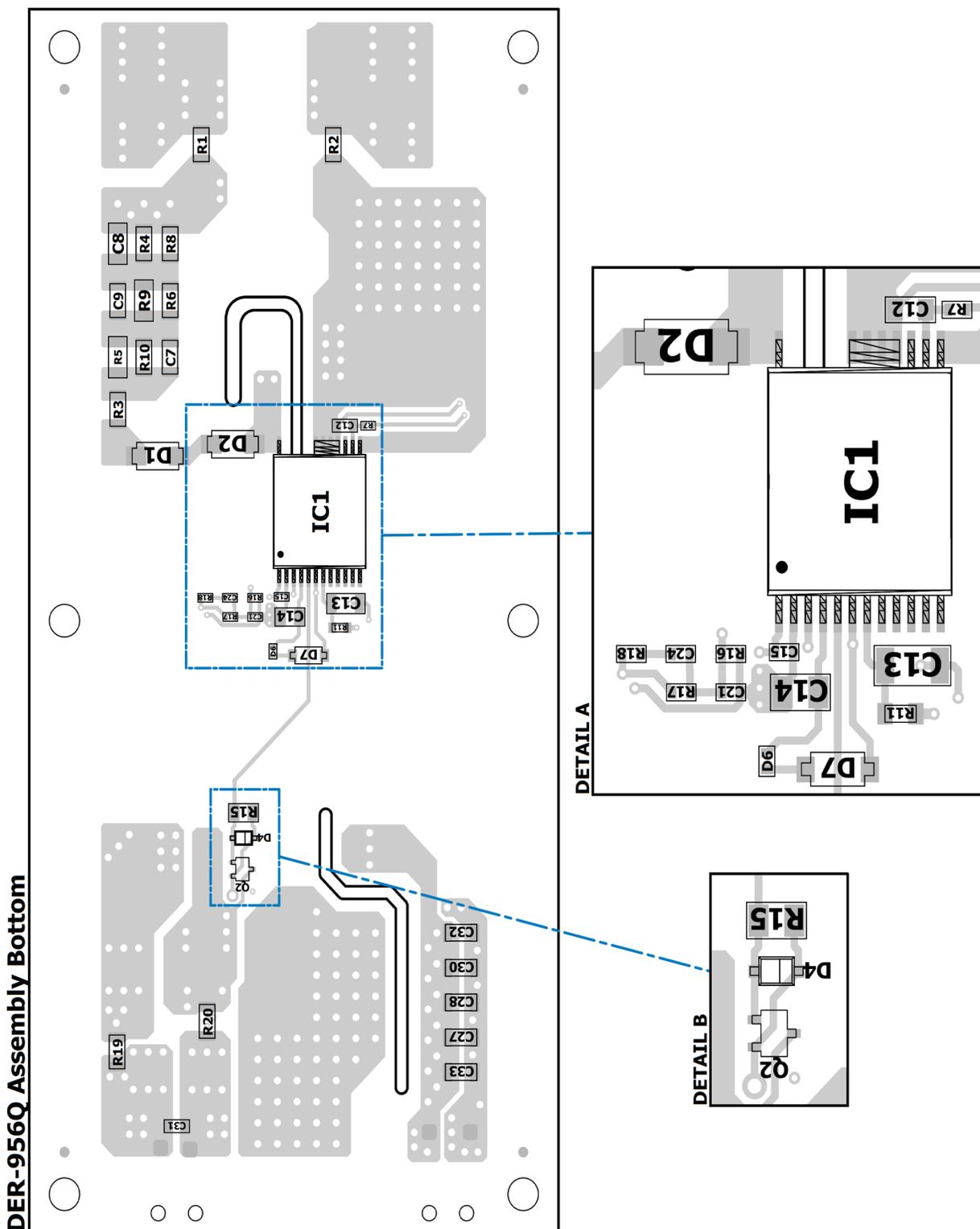


图9 - DER-956Q电路板装配（底视图）



## 6 物料清单(BOM)

项	数量	标号	描述	生产厂商型号	生产厂商
1	6	C1、C2、C3、C4、C5、C6	多层陶瓷电容MLCC - SMD/SMT 500V 0.068μF X7R 1206 10% AEC-Q200	C1206C683KCRACAUTO	KEMET
2	3	C7、C8、C9	多层陶瓷电容MLCC - SMD/SMT CGA 1206 450V 0.01μF C0G 5% AEC-Q200	CGA5L4C0G2W103J160AA	TDK
3	2	C10、C11	多层陶瓷电容MLCC - SMD/SMT 1206 50VDC 10μF 10% X7R AEC-Q200	CGA5L1X7R1H106K160AE	TDK
4	1	C12	多层陶瓷电容MLCC - SMD/SMT CGA 0603 25V 0.47μF X7R 10% AEC-Q200	CGA3E3X7R1E474K080AB	TDK
5	1	C13	多层陶瓷电容MLCC - SMD/SMT CGA 1206 630V 330pF C0G 5% AEC-Q200	CGA5C4C0G2J331J060AA	TDK
6	2	C15、C21	多层陶瓷电容MLCC - SMD/SMT 50V 330pF C0G 0402 5% AEC-Q200	AC0402JRNPO9BN331	YAGEO
7	1	C17	多层陶瓷电容MLCC - SMD/SMT 1206 630V 820pF 5% C0G AEC-Q200	C1206C821JBGACAUTO	KEMET
8	0	C16	多层陶瓷电容MLCC - SMD/SMT 0805 450V 470pF 5% SOFT C0G AEC-Q200	CGA4C4C0G2W471J060AE	TDK
9	1	C14	多层陶瓷电容MLCC - SMD/SMT 0805 25VDC 2.2μF 10% X7R AEC-Q200	TMK212B7225KGHT	Taiyo Yuden
10	1	C22	铝有机聚合物电容	EEH-ZS1E681UP	Panasonic
11	1	C24	多层陶瓷电容MLCC - SMD/SMT CGA 0402 25V 0.01μF X7R 10% AEC-Q200	CGA2B2X7R1E103K050BA	TDK
12	1	C29	铝有机聚合物电容	A768EB826M1ELAS036	KEMET
13	2	C31、C34	多层陶瓷电容MLCC - SMD/SMT CGA 0603 25V 0.1μF X7R 10% AEC-Q200	CGA3E2X7R1E104K080AA	TDK
14	2	C18、C19	多层陶瓷电容MLCC - SMD/SMT 1206 100VDC 0.47μF 10% X7R AEC-Q200	HMK316B7474KLHT	Taiyo Yuden
15	9	C20、C23、C25、C26、C27、C28、C30、C32、C33	多层陶瓷电容MLCC - SMD/SMT 1206 25VDC 10μF 10% X7R AEC-Q200	CGA5L1X7R1E106K160AC	TDK
16	2	D1、D2	整流管 - 1000V 1.5A高效整流管	NRVUS2MA	ON Semi
17	1	D3	二极管, 通用, 功率, 开关, DIODE-GP功率开关	BAS21GWX	Nexperia
18	0	D4	肖特基二极管和整流管5μA 20V, 15A IFSM	SD103CWS-E3-08	Vishay
19	1	D5	肖特基二极管和整流管 (如果1A Vrrm 100V)	SS1FH10HM3/H	Vishay
20	1	D6	肖特基二极管和整流管, SBR二极管 X1-DFN1006-2/SWP T&R 10K	SBR0240LPW-7B	Diodes, Inc.
21	1	D7	齐纳稳压管 SOD123 T&R 3K	BZT52C18Q-7-F	Diodes, Inc.
22	1	IC1	适合汽车应用的集成1700V开关和FluxLink反馈技术的恒压/恒流准谐振反激式开关IC	INN3949CQ	Power Integrations
23	1	J1	接线端子 1POS 侧入口 SMD 红色	SR99S01VBNN04G7	METZ连接
24	1	J2	接线端子 1POS 侧入口 SMD 黑色	SM99S01VBNN00G7	METZ连接
25	1	L1	输入共模扼流圈	CM6518-AL	Coilcraft
26	1	L2	固定电感 0806 0.33μH 30% 2200mA 0.18Ω	LQH2MPZR33NGRL	Murata
27	1	Q1	N通道MOSFET BVDSS: 150V 9.4A 17.5mΩ	DMT15H017LPS-13 <sup>4</sup>	Diodes, Inc.
28	0	Q2	P通道MOSFET BVDSS:	DMG1013UWQ-7	Diodes, Inc.
29	3	R3、R12、R13	厚膜电阻 - SMD 51Ω ¼W 1206 5% AEC-Q200	AC1206JR-0751RL	YAGEO
30	0	R14	厚膜电阻 - SMD 51Ω ¼W 1206 5% AEC-Q200	AC1206JR-0751RL	YAGEO
31	6	R4、R5、R6、R8、R9、R10	厚膜电阻 - SMD 1206 150kΩ 5% AEC-Q200	ERJ-8GEYJ154V	Panasonic
32	1	R7	厚膜电阻 - SMD 1/16W 6.8kΩ 5%	CRCW04026K80JNED	Vishay
33	1	R11	厚膜电阻 - SMD 100Ω 100mW 0603 1% AEC-Q200	AC0603FR-13100RL	YAGEO
34	1	R15	厚膜电阻 - SMD 4.7Ω 1/8mW 0805 5% AEC-Q200	AC0805JR-074R7L	YAGEO

<sup>4</sup> DMT15H017LPS-13 仅符合 AEC-Q101 可靠性测试, 但并不完全符合所有 AEC-Q 标准。

35	1	R16	厚膜电阻 - SMD 7.5kΩ 62.5mW 0402 1% AEC-Q200	AC0402FR-077K5L	YAGEO
36	1	R17	厚膜电阻 - SMD 0.125W 100kΩ 1% 200ppm 抗浪涌	SG73S1ETTP1003F	KOA
37	1	R18	厚膜电阻 - SMD 0402 5% 10kΩ 抗浪涌 AEC-Q200	ERJ-U02J103X	Panasonic
38	1	R20	电流检测电阻 - SMD 0.056Ω 1% 1/4W	RL1206FR-070R056L	YAGEO
39	2	R1、R2、R19	厚膜电阻 - SMD 0Ω 250mW (1/4W) 1206 1%	AF1206JR-070RL	YAGEO
40	1	T1	13W功率变压器		Power Integrations
41	1	T1磁芯	3C95铁氧体磁芯		Ferroxcube
42	1	T1骨架	定制骨架		Power Integrations
43	2	X1、X2	接线端子SMD安装 180_2P_3.81	2383945-2	TE
44	1	Z1	印刷电路板, PIA-00075-TL		Power Integrations

表4 - DER-956Q物料清单(BOM)<sup>5</sup><sup>5</sup> 除连接器 T1 和 L1 外, 所有元件均符合 AEC-Q 要求。

## 7 变压器规格

### 7.1 电气原理图

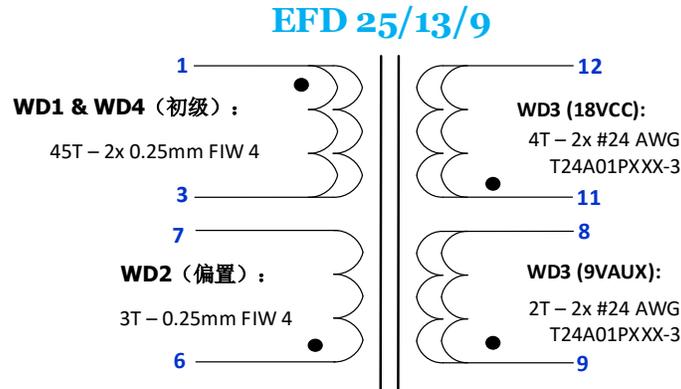


图10 - 变压器电气原理图

### 7.2 电气规格

参数	条件	最小值	典型值	最大值	单位
功率	次级侧输出功率			13	W
输入电压Vdc	反激拓扑结构	30	800	1000	V
开关频率	反激拓扑结构	25		56	kHz
占空比	反激拓扑结构	1.8		65.2	%
Np:Ns			11.25		
Rdc	WD1 (初级)			390	m
	WD2 (偏置)			170	
	WD3a (18VCC)			11	
	WD3b (9VAUX)			8	
	WD4 (初级)			460	
耦合电容	初级侧至偏置侧， 在温度为25°C时，在1V <sub>PK-PK</sub> 下以及引脚1至引脚7之间的频率为100kHz且引脚1-3短接及引脚6-7短接的情况下测得			20	pF
	初级侧至18VCC (次级1) 侧 在温度为25°C时，在1V <sub>PK-PK</sub> 下以及引脚1至引脚12之间的频率为100kHz且引脚1-3短接及引脚11-12短接的情况下测得			35	
	初级侧至9VAUX (次级2) 侧 在温度为25°C时，在1V <sub>PK-PK</sub> 下以及引脚1至引脚8之间的频率为100kHz且引脚1-3短接及引脚8-9短接的情况下测得			20	
初级电感量	在温度为25°C时，在1V <sub>PK-PK</sub> 下以及引脚1至引脚3之间的频率为100kHz且所有其他绕组均开路的情况下测得		445		μH
元件间的公差	初级电感量公差	-5.0		5.0	%
初级漏感	在1V <sub>PK-PK</sub> 下以及引脚1至引脚3之间的频率为100kHz且所有其他绕组均短接的情况下测得。			7.5	μH

表5 - 变压器电气规格



### 7.3 变压器结构图

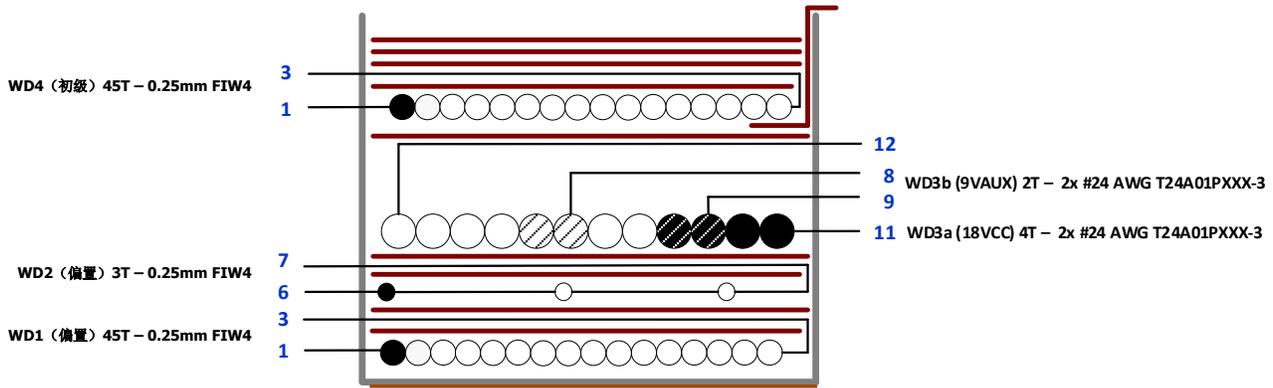


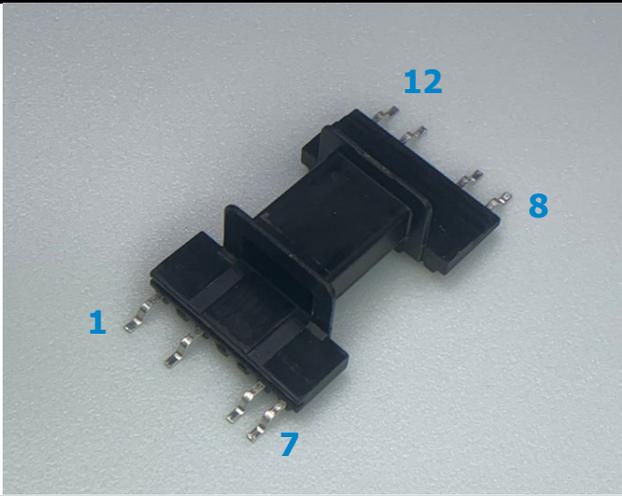
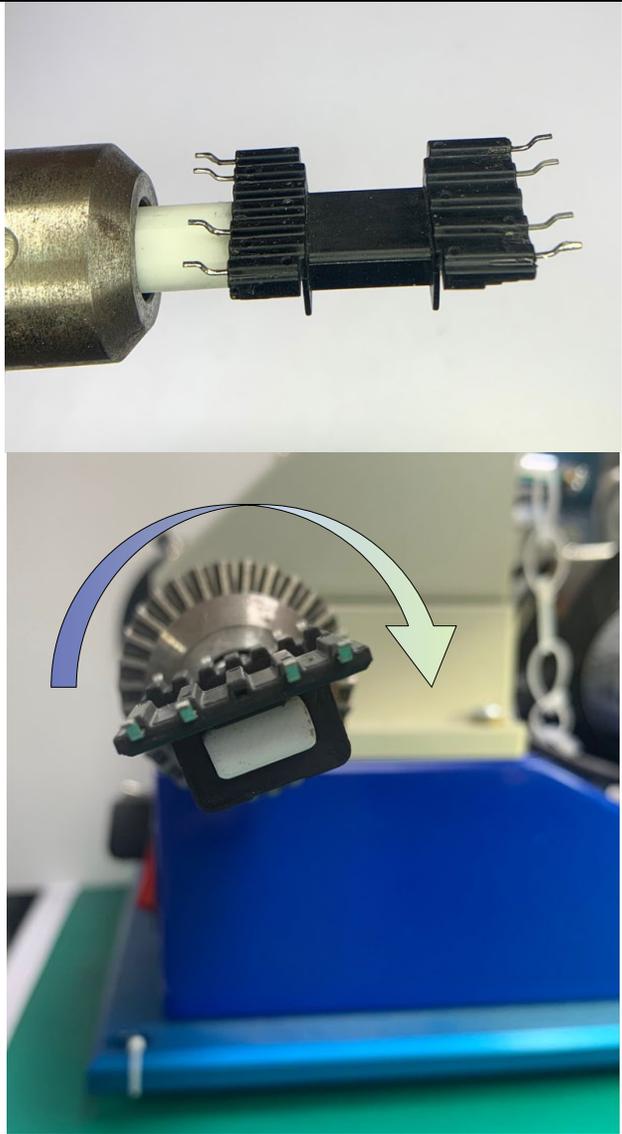
图11 - 变压器结构图

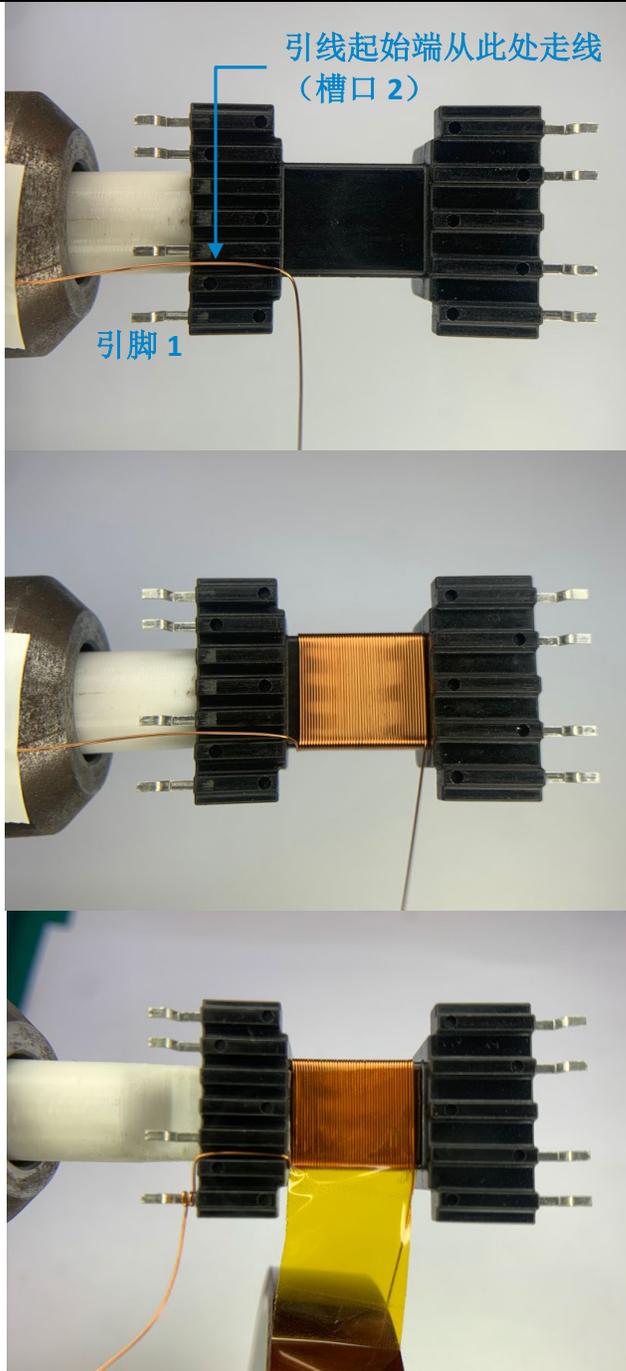
### 7.4 材料列表

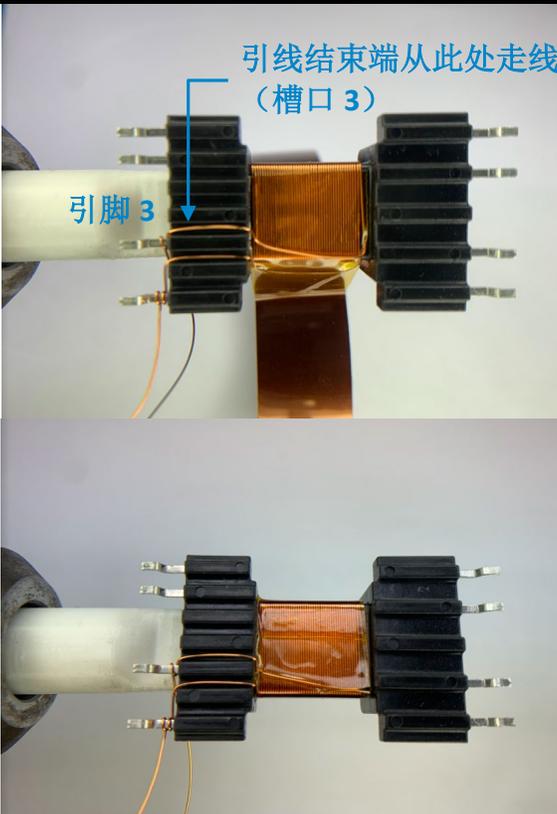
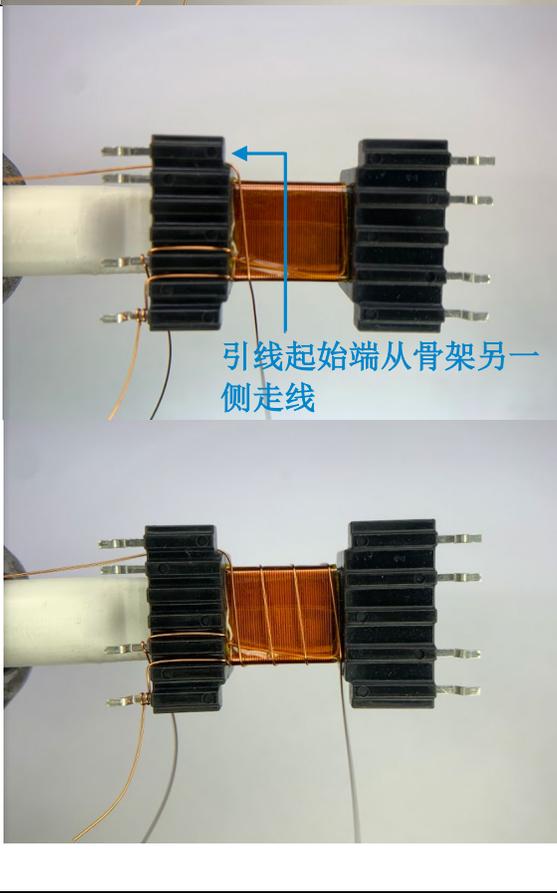
项	描述	数量	单位	材料	生产厂商
[1]	骨架: MCT-EFD25-N2 H7+5P	1	PC	酚醛树脂	MyCoilTech
[2]	磁芯: EFD 25/13/9	2	PCS	3C95 (或同类产品)	Ferroxcube
[3]	WD1 (初级): 0.25mm FIW 4, F类	2000	mm	铜线	Elektrisola
[4]	WD4 (初级): 0.25mm FIW 4, F类	2310	mm		Elektrisola
[5]	WD2 (偏置): 0.25mm FIW 4, F类	176	mm		Elektrisola
[6]	WD3a (18VCC): T24A01PXXX-3, AWG 24 PFA .003"	500	mm		Rubadue
[7]	WD3b (9VAUX): T24A01PXXX-3, AWG 24 PFA .003"	320	mm		Rubadue
[8]	3M Polyimide 5413 琥珀色, 宽: 0.625in (15.9mm)	360	mm	3M157181 (或同类产品)	3M
[9]	0.51mm特氟龙管, B类	30	mm	TFT20024 (或同类产品)	Alphawire

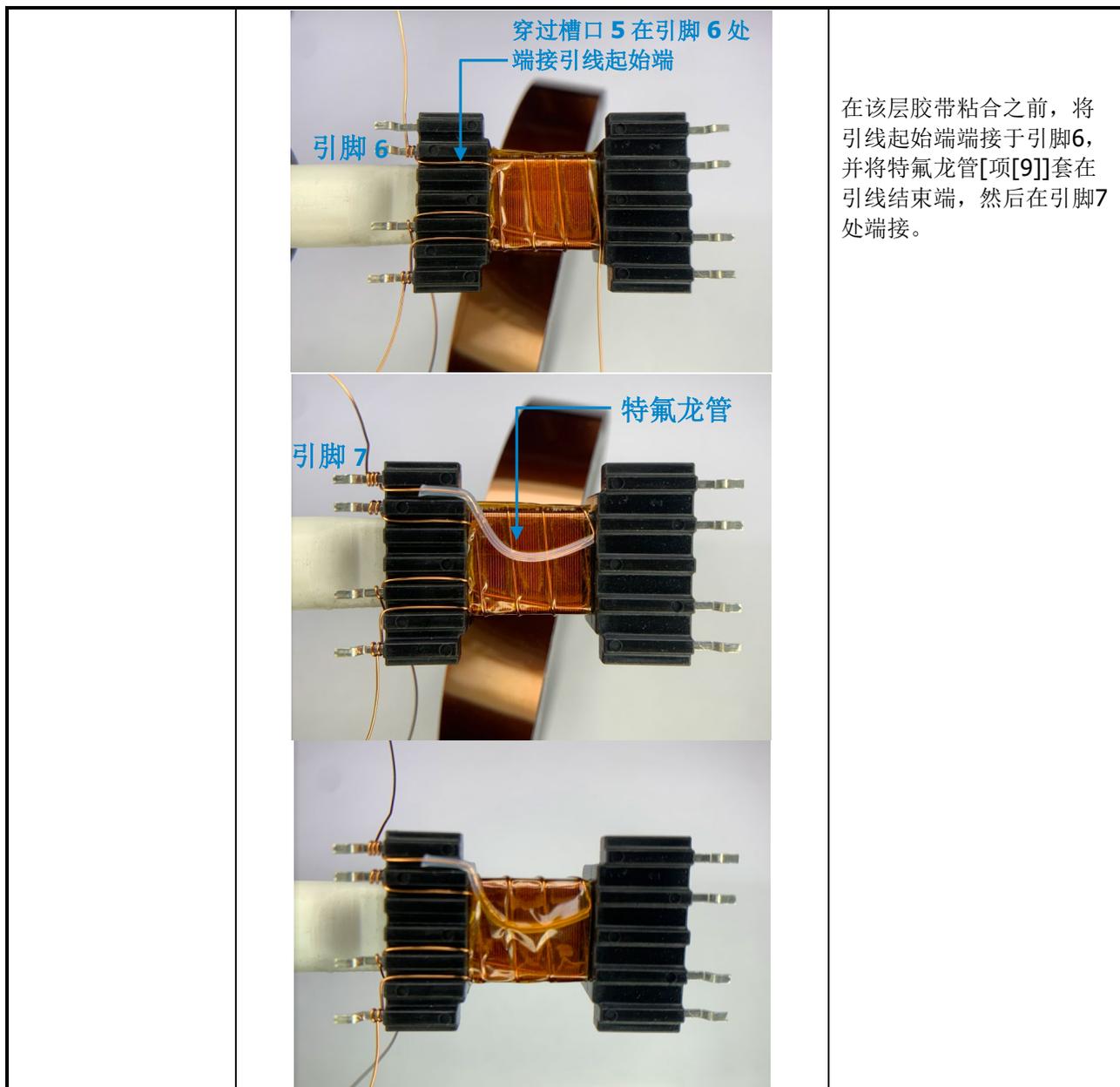
表6 - 变压器物料清单

### 7.5 绕制图示

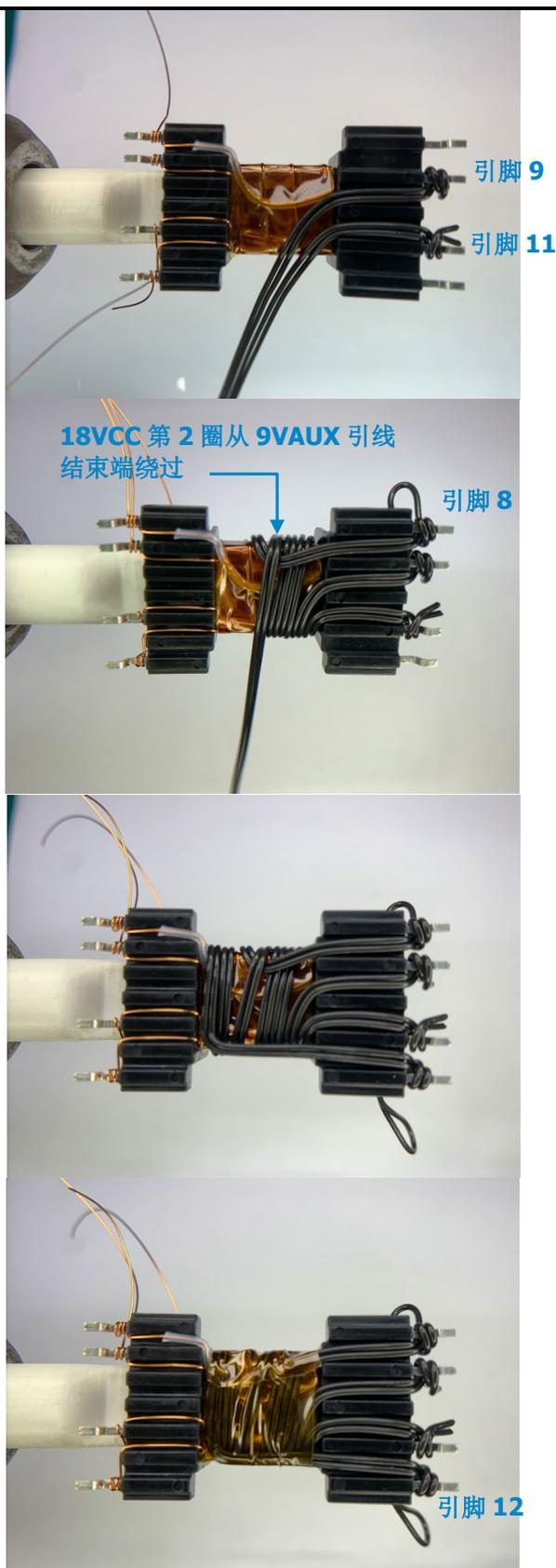
		<p>开始前先移除骨架中未使用的引脚2、4、5和10[项 [1]]</p>
<p>绕组准备</p>		<p>将骨架放在绕线轴上，使骨架的初级侧（引脚1-7）位于左侧。绕制方向为顺时针方向。</p>

<p><b>WD1: 初级</b></p>		<p>将引线起始端从引脚1穿过槽口2到达骨架，然后从左到右紧密缠绕45圈导线[项[3]]。使绕线均匀分布在整个骨架上。</p> <p>在绕组和引线结束端之间添加一层胶带[项[8]]，然后将引线结束端端接于引脚3。</p> <p>将引线结束端穿过槽口3连接到引脚3。</p>
-----------------------	---	--

		
<p><b>WD2: 偏置</b></p>		<p>为了使绕组平铺在整个骨架绕组区域，首先将引线起始端从骨架的另一侧引出。</p> <p>从左到右紧密缠绕3圈导线[项[5]]。使绕线均匀分布在骨架上。</p> <p>在绕组和结束引线之间添加一层胶带[项[8]]。</p>



**WD3: 18VCC及  
9VAUX**

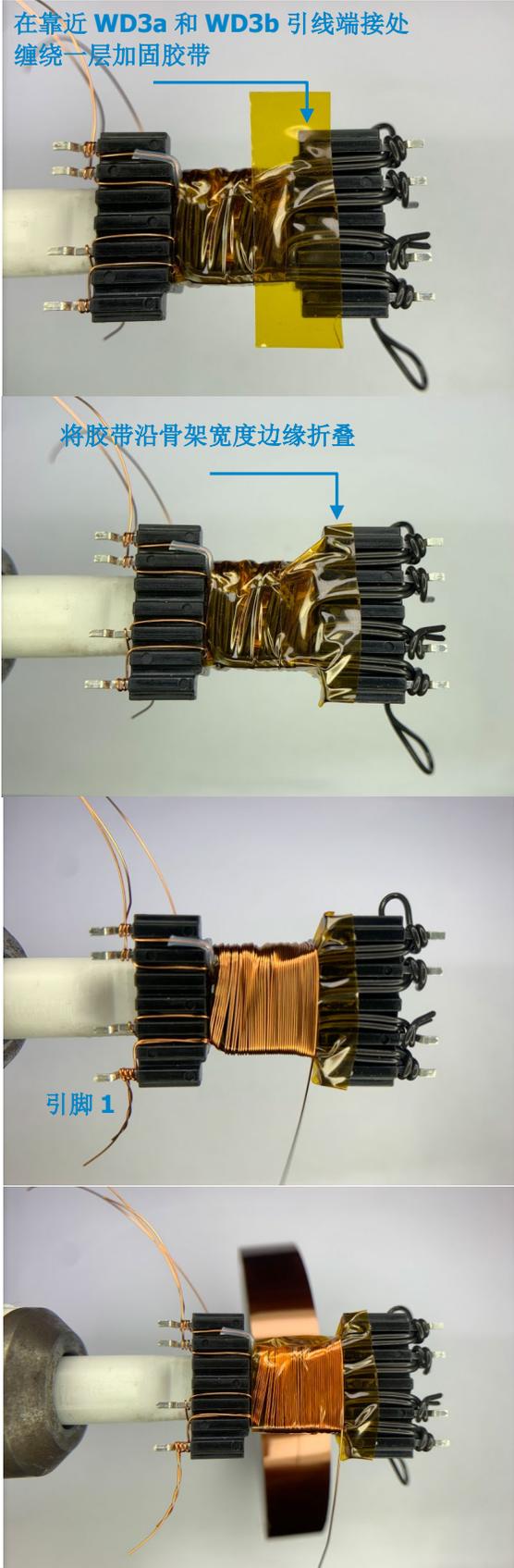


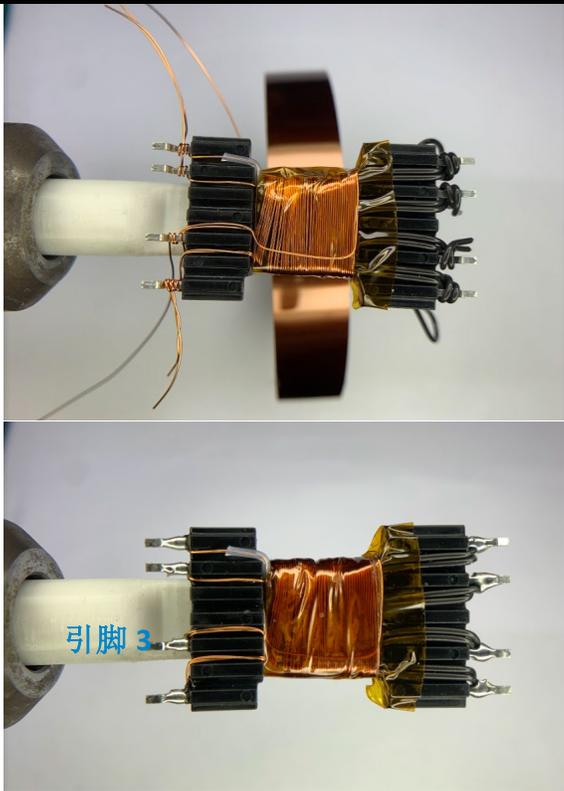
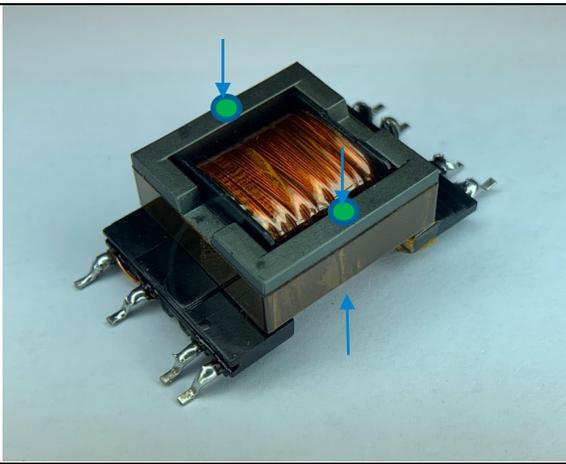
使用2股导线[项[7]]绕制9VAUX绕组，从引脚9开始。  
再使用2股导线[项[6]]绕制18VCC绕组，从引脚11开始。

从右到左将所有导线一同紧密缠绕。

缠绕2圈后，将9VAUX并绕双线的末端向右折叠，然后将其端接于引脚8，并继续将18VCC双线并绕2圈。

缠绕一层胶带[项[8]]结束WD3绕制。

<p><b>WD4: 初级</b></p>	 <p>在靠近 WD3a 和 WD3b 引线端接处缠绕一层加固胶带</p> <p>将胶带沿骨架宽度边缘折叠</p> <p>引脚 1</p>	<p>在绕制WD4前，先在WD3的端接处添加一层胶带[项[8]]，以加强绝缘效果，如图所示。</p> <p>剪切加固胶带，并将其沿骨架宽度边缘平折，如图所示。</p> <p>从引脚1开始，从左到右紧密缠绕45圈导线[项[4]]。使绕线均匀分布在骨架上。</p> <p>在绕组和引线结束端之间添加一层胶带[项[8]]，然后将引线结束端端接于引脚3。</p> <p>添加3层胶带[项[8]]完成绕制。</p>
-----------------------	--	--

		<p>焊接所有端接引脚（引脚 1、3、6、7、8、9、11和 12）。</p>
<p>完成</p>		<p>将两半磁芯中的其中一个 [项[2]]开气隙，并将磁芯紧紧固定，使引脚1和3之间的电感量达到<math>445\mu\text{H} \pm 5\%</math>。</p> <p>在固定磁芯时，建议使用胶水，而不是图示中的胶带（参见蓝色箭头了解建议的黏合点 - 顶面2点，底面2点。）</p>

## 8 变压器设计表格

1	DCDC_InnoSwitch3AQ_Flyback_012722; Rev.3.2; Copyright Power Integrations 2022	INPUT	INFO	OUTPUT	UNITS	InnoSwitch3-AQ Flyback Design Spreadsheet
2	<b>APPLICATION VARIABLES</b>					
3	VOUT	18.00		18.00	V	输出电压
4	<b>OPERATING CONDITION 1</b>					
5	VINDC1	1000.00		1000.00	V	输入直流电压1
6	IOUT1	0.722		0.722	A	输出电流1
7	POUT1			13.00	W	输出功率1
8	EFFICIENCY1			0.85		输出变换器效率1
9	Z_FACTOR1			0.50		输出Z因子1
11	<b>OPERATING CONDITION 2</b>					
12	VINDC2	450.00		450.00	V	输入直流电压2
13	IOUT2	0.722		0.722	A	输出电流2
14	POUT2			13.00	W	输出功率2
15	EFFICIENCY2			0.85		输出变换器效率2
16	Z_FACTOR2			0.50		输出Z因子2
69	<b>PRIMARY CONTROLLER SELECTION</b>					
70	ILIMIT_MODE	STANDARD		STANDARD		器件限流点模式
71	VDRAIN_BREAKDOWN			1700	V	器件击穿电压
72	DEVICE_GENERIC			INN39X9		器件选择
73	DEVICE_CODE	INN3949CQ		INN3949CQ		器件物料号
74	PDEVICE_MAX			70	W	器件最大功率能力
75	RDSON_25DEG			0.62	Ω	25°C时初级开关导通时间电阻
76	RDSON_125DEG			1.10	Ω	125°C时初级开关导通时间电阻
77	ILIMIT_MIN			1.767	A	初级开关最小限流点
78	ILIMIT_TYP			1.900	A	初级开关典型限流点
79	ILIMIT_MAX			2.033	A	初级开关最大限流点
80	VDRAIN_ON_PRSW			0.03	V	初级开关导通时间电压降
81	VDRAIN_OFF_PRSW			1230	V	关断期间初级开关的峰值漏极电压
85	<b>WORST CASE ELECTRICAL PARAMETERS</b>					
86	FSWITCHING_MAX	33000		33000	Hz	在满载及最小输入交流电压波谷时的最大开关频率
87	VOR	200.0		200.0	V	初级开关关断时, 初级绕组上的反射电压 (对应于设置点1)
88	KP			9.413		衡量连续/断续工作模式
89	MODE_OPERATION			DCM		工作模式
90	DUTYCYCLE			0.045		初级开关占空比
91	TIME_ON_MIN			0.60	us	初级开关最短导通时间
92	TIME_ON_MAX			1.56	us	初级开关最长导通时间
93	TIME_OFF			28.97	us	初级开关关断时间
94	LPRIMARY_MIN			422.5	uH	最小初级励磁电感
95	LPRIMARY_TYP			444.7	uH	典型初级励磁电感
96	LPRIMARY_TOL			5.0	%	初级励磁电感感量公差
97	LPRIMARY_MAX			467.0	uH	最大初级励磁电感
99	<b>PRIMARY CURRENT</b>					
100	Iavg_PRIMARY			1.540	A	初级开关平均电流
101	IPEAK_PRIMARY			1.540	A	初级开关峰值电流
102	IPEDESTAL_PRIMARY			0.031	A	初级开关电流基值
103	IRIPPLE_PRIMARY			1.540	A	初级开关纹波电流
104	IRMS_PRIMARY			0.180	A	初级开关有效值电流
108	<b>TRANSFORMER CONSTRUCTION PARAMETERS</b>					
109	<b>CORE SELECTION</b>					
110	CORE	CUSTOM		CUSTOM		磁芯选择



111	CORE NAME	EFD 25/13/9-3C95		EFD 25/13/9-3C95		磁芯物料号
112	AE	58.0		58.0	mm <sup>2</sup>	磁芯截面积
113	LE	57.0		57.0	mm	磁芯的磁路长度
114	AL	2660		2660	nH	每平方圈数的无气隙磁芯等效电感量
115	VE	3300		3300	mm <sup>3</sup>	磁芯体积
116	BOBBIN NAME	MCT-EFD25-N2 H7+5P		MCT-EFD25-N2 H7+5P		骨架名称
117	AW	38.5		38.5	mm <sup>2</sup>	骨架窗口面积
118	BW	16.20		16.20	mm	骨架宽度
119	MARGIN			0.0	mm	骨架安全挡墙
<b>121</b>	<b>PRIMARY WINDING</b>					
122	NPRIMARY			45		初级绕组圈数
123	BPEAK			3723	Gauss	峰值磁通密度
124	BMAX			2689	Gauss	最大磁通密度
125	BAC			1344	Gauss	交流磁通密度 (0.5 x 峰峰值)
126	ALG			220	nH	每平方圈数的典型开气隙后的磁芯等效电感量
127	LG			0.304	mm	磁芯气隙长度
<b>129</b>	<b>SECONDARY WINDING</b>					
130	NSECONDARY			4		次级绕组圈数
<b>132</b>	<b>BIAS WINDING</b>					
133	NBIAS			3		偏置绕组圈数
<b>137</b>	<b>PRIMARY COMPONENTS SELECTION</b>					
<b>138</b>	<b>LINE UNDERVOLTAGE/OVERVOLTAGE</b>					
139	UVOV Type	UV Only		UV Only		输入欠压/过压保护类型
140	UNDERVOLTAGE PARAMETERS					
141	BROWN-IN REQUIRED	30.00		30.00	V	所需直流母线缓升电压阈值
142	UNDERVOLTAGE ZENER DIODE	BZM55C9 V1		BZM55C9 V1		欠压保护齐纳稳压管
143	VZ			9.10	V	齐纳稳压管反向电压
144	VR			6.80	V	最大反向漏电流下的齐纳稳压管反向电压
145	ILKG			2.00	uA	齐纳稳压管最大反向漏电流
146	BROWN-IN ACTUAL			22.99 - 29.55	V	使用标准电阻情况下的实际缓升电压范围
147	BROWN-OUT ACTUAL			19.76 - 26.44	V	使用标准电阻情况下的实际跌落电压范围
148	OVERVOLTAGE PARAMETERS					
149	OVERVOLTAGE REQUIRED		Info		V	对于仅欠压设计, 过压特性被禁止
150	OVERVOLTAGE DIODE		Info			对于过压保护电路, 仅使用过压二极管
151	VF				V	过压二极管正向电压
152	VRRM				V	过压二极管反向电压
153	PIV				V	过压二极管峰值反向电压
154	LINE_OVERVOLTAGE				V	对于仅欠压设计, 输入过压特性被禁止
<b>155</b>	<b>DC BUS SENSE RESISTORS</b>					
156	RLS_H			0.70	M $\Omega$	将五个140kOhm直流母线上检测电阻连接到V引脚, 以获得所需的UV/OV阈值
157	RLS_L			261	k $\Omega$	直流母线下检测电阻连接到V引脚, 以获得所需的UV/OV阈值
<b>160</b>	<b>BIAS WINDING</b>					
161	VBIAS			9.00	V	整流偏置电压
162	VF_BIAS	1.00		1.00	V	偏置绕组二极管正向电压降
163	VREVERSE_BIASDIODE			75.67	V	偏置二极管反向电压 (不考虑寄生电压振荡)
164	CBIAS			22	uF	偏置绕组整流电容
165	CBPP			0.47	uF	BPP引脚电容
<b>169</b>	<b>SECONDARY COMPONENTS SELECTION</b>					
<b>170</b>	<b>FEEDBACK COMPONENTS</b>					
171	RFB_UPPER			100.00	k $\Omega$	上方反馈电阻 (连接到输出端子)



172	RFB_LOWER			7.50	k $\Omega$	下方反馈电阻
173	CFB_LOWER			330	pF	下方反馈电阻去耦电容
<b>177</b>	<b>MULTIPLE OUTPUT PARAMETERS</b>					
<b>178</b>	<b>OUTPUT 1</b>					
179	VOUT1			18.00	V	输出1电压
180	IOUT1	0.555		0.555	A	输出1电流
181	POUT1			9.99	W	输出1功率
182	IRMS_SECONDARY1			2.330	A	输出1次级电流的均根方值
183	IRIPPLE_CAP_OUTPUT1			2.263	A	输出1次级波形的电流纹波
184	NSECONDARY1			4		输出1的圈数
185	VREVERSE_RECTIFIER1			106.89	V	输出1的SRFET反向电压（不考虑寄生电压振荡）
186	SRFET1	AUTO		DMT15H017LPS-13		输出1次级整流管（逻辑MOSFET）
187	VF_SRFET1			0.80	V	输出1的SRFET导通时间漏极电压
188	VBREAKDOWN_SRFET1			150	V	输出1的SRFET击穿电压
189	RDSON_SRFET1			26	m $\Omega$	输出1在25 $^{\circ}$ C和VGS=4.4V时的SRFET导通时间漏极阻抗
<b>191</b>	<b>OUTPUT 2</b>					
192	VOUT2	9.00		9.00	V	输出2电压
193	IOUT2	0.333		0.333	A	输出2电流
194	POUT2			3.00	W	输出2功率
195	IRMS_SECONDARY2			1.398	A	输出2次级电流的均根方值
196	IRIPPLE_CAP_OUTPUT2			1.358	A	输出2次级波形的电流纹波
197	NSECONDARY2			2		输出2的圈数
198	VREVERSE_RECTIFIER2			53.44	V	输出2的SRFET反向电压（不考虑寄生电压振荡）
199	SRFET2	AUTO		SQSA80ENW		输出2次级整流管（逻辑MOSFET）
200	VF_SRFET2			0.82	V	输出2的SRFET导通时间漏极电压
201	VBREAKDOWN_SRFET2			80	V	输出2的SRFET击穿电压
202	RDSON_SRFET2			27.0	m $\Omega$	输出2在25 $^{\circ}$ C和VGS=4.4V时的SRFET导通时间漏极阻抗
203						
217	PO_TOTAL			12.99	W	所有输出的总功率

表7 - DER-956Q PIXIs设计表格



## 9 性能数据

注： 1. 测量在高压(HV)室内的热处理室测试环境下进行，测量对象为电源。



图12 - 高压测试环境



图13 - 高压室内测试环境

2.将被测电源放置在热处理室内的壳体中，以消除任何气流的影响。

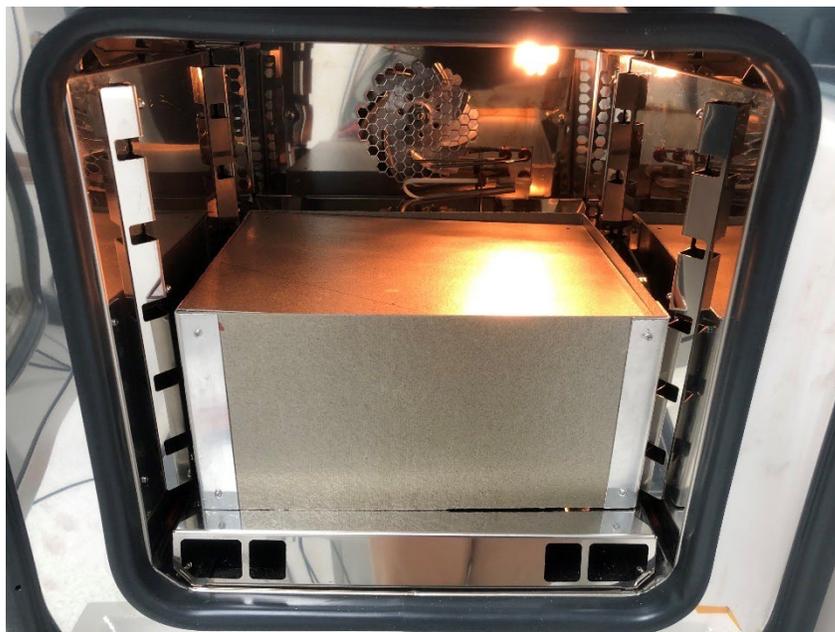


图14 - 被测电源放置在壳体内以消除气流影响

3.对于显示不同输入电压和输出负载条件下性能的数据点，在每个测试序列开始时，电源均需在满载条件下连续工作至少5分钟。对于每个负载点，在进行测量之前，电源均需带载超过20秒。

## 9.1 空载输入功率

图15所示为用于空载输入功率测量的测试电路。电压表位于电流表之前；这样做是为了防止电压表偏置电流影响输入电流测量。同时使用Chroma数字功率表66205测量电流和电压。

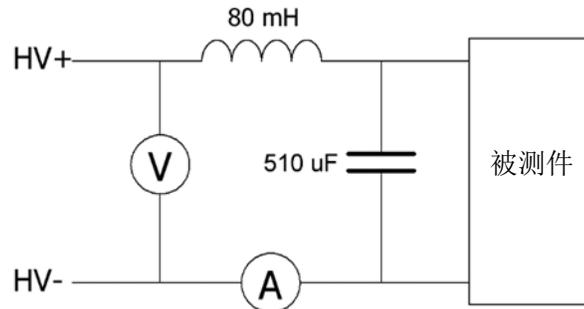


图15 - 空载输入功率测量电路配置

对于每个输入电压，在开始计算平均数据之前，电源均需连续工作十分钟。在测试之前还测量了直流母线电容的漏电流，并将该测量值从实测的空载输入电流值中减去。由于电感的DCR非常低(40mΩ)，因此电感两端的电压可忽略不计。另外，由于输入电流为直流，因此电感中的交流损耗也可忽略不计。

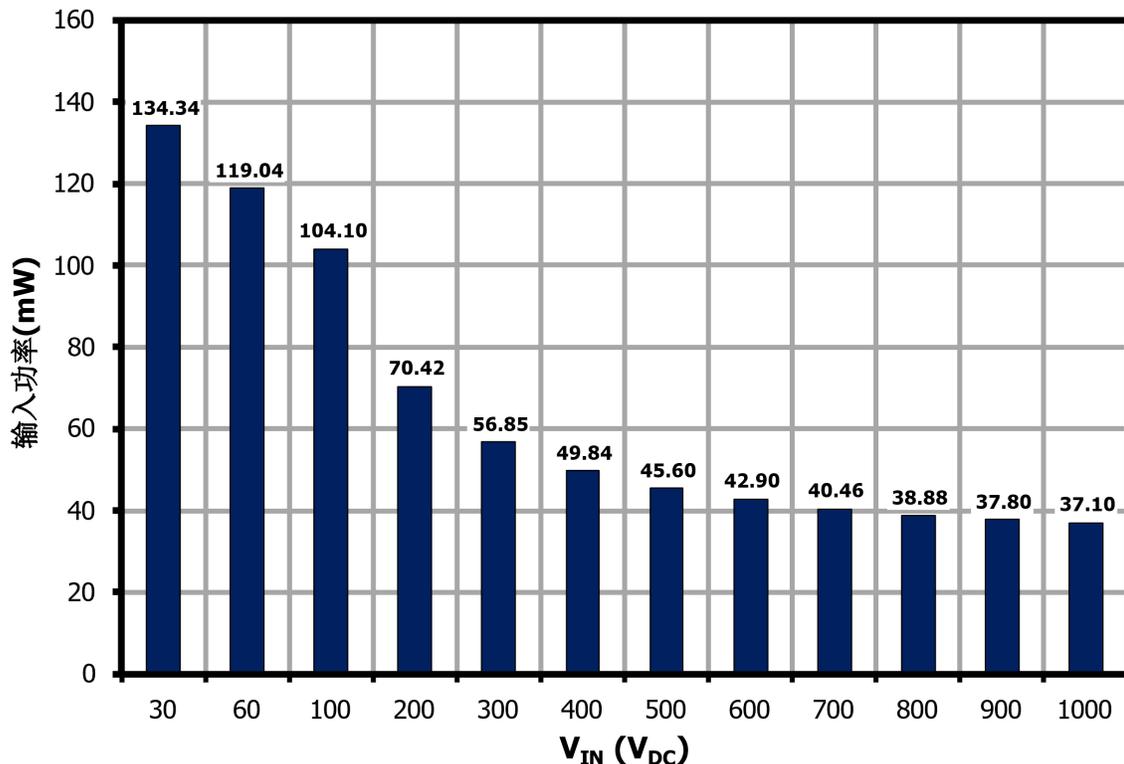


图16 - 空载输入功率相对于输入电压的变化

## 9.2 效率

### 9.2.1 输入电压效率

输入电压效率描述输入电压的变化如何影响电源的整体效率。

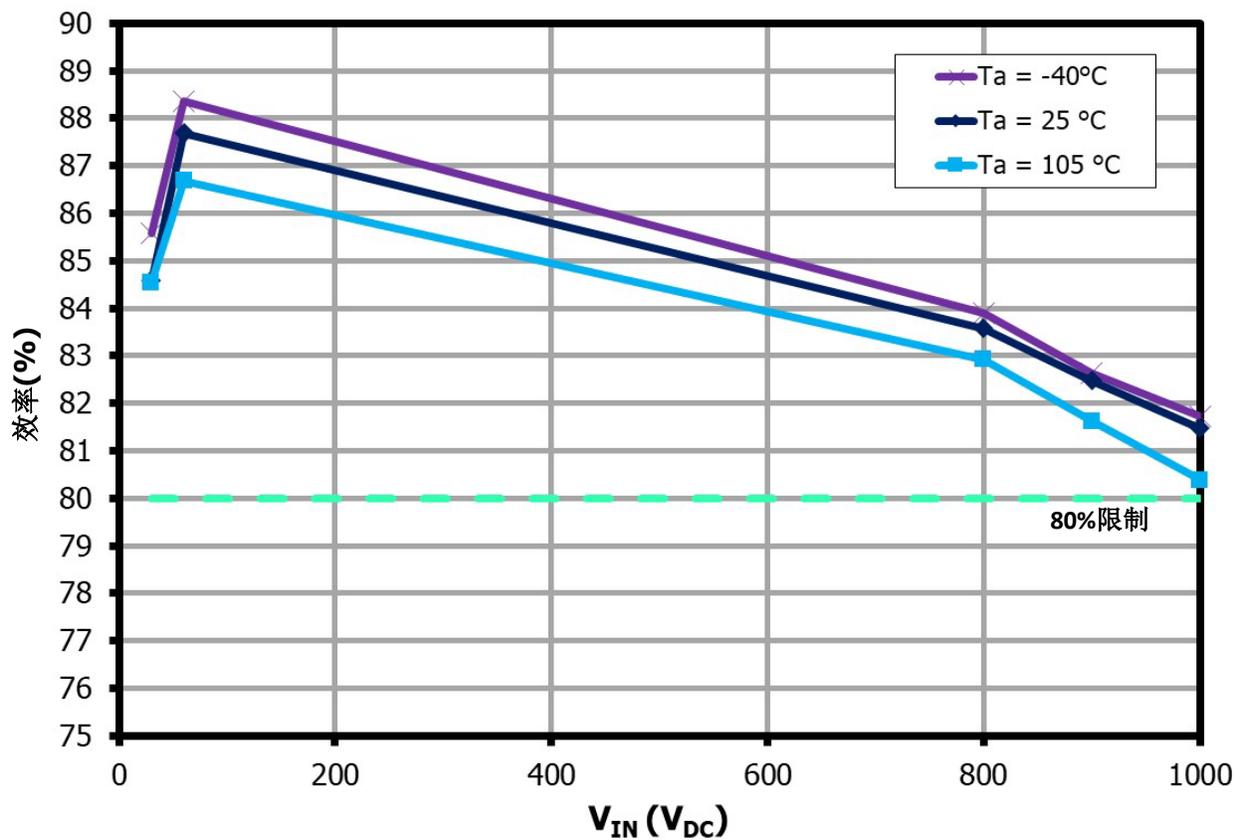


图17 - 满载效率相对于输入电压的变化

### 9.2.2 负载效率

负载效率描述输出负载如何影响电源的整体效率。

图表上的每条线代表当18V输出负载维持在一定百分比，而9V输出负载从其最小负载条件增加到最大负载条件时，被测电源的效率相对于总输出功率的变化情况。

#### 9.2.2.1 30V<sub>DC</sub>输入

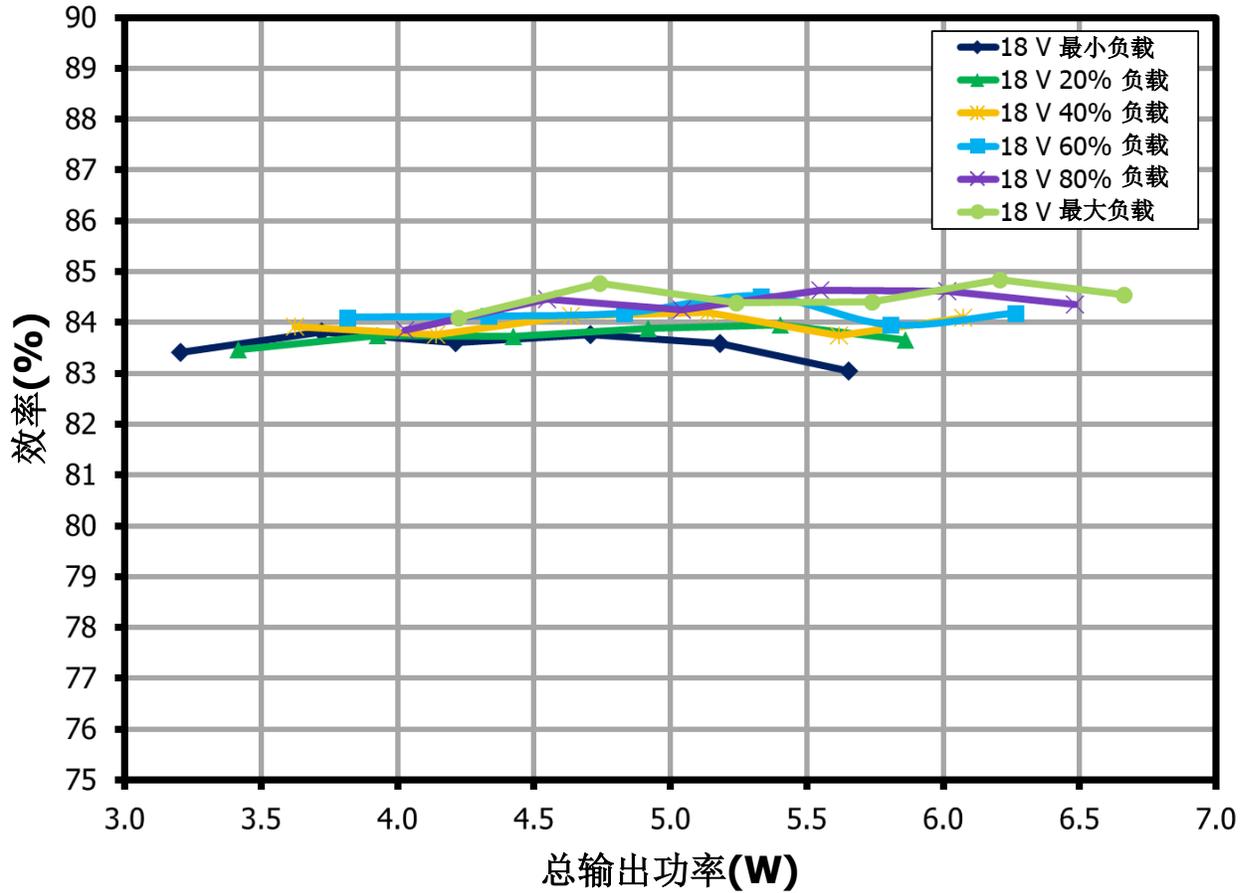


图18 - 在30V<sub>DC</sub>输入及105°C环境温度下效率相对于总输出功率的变化

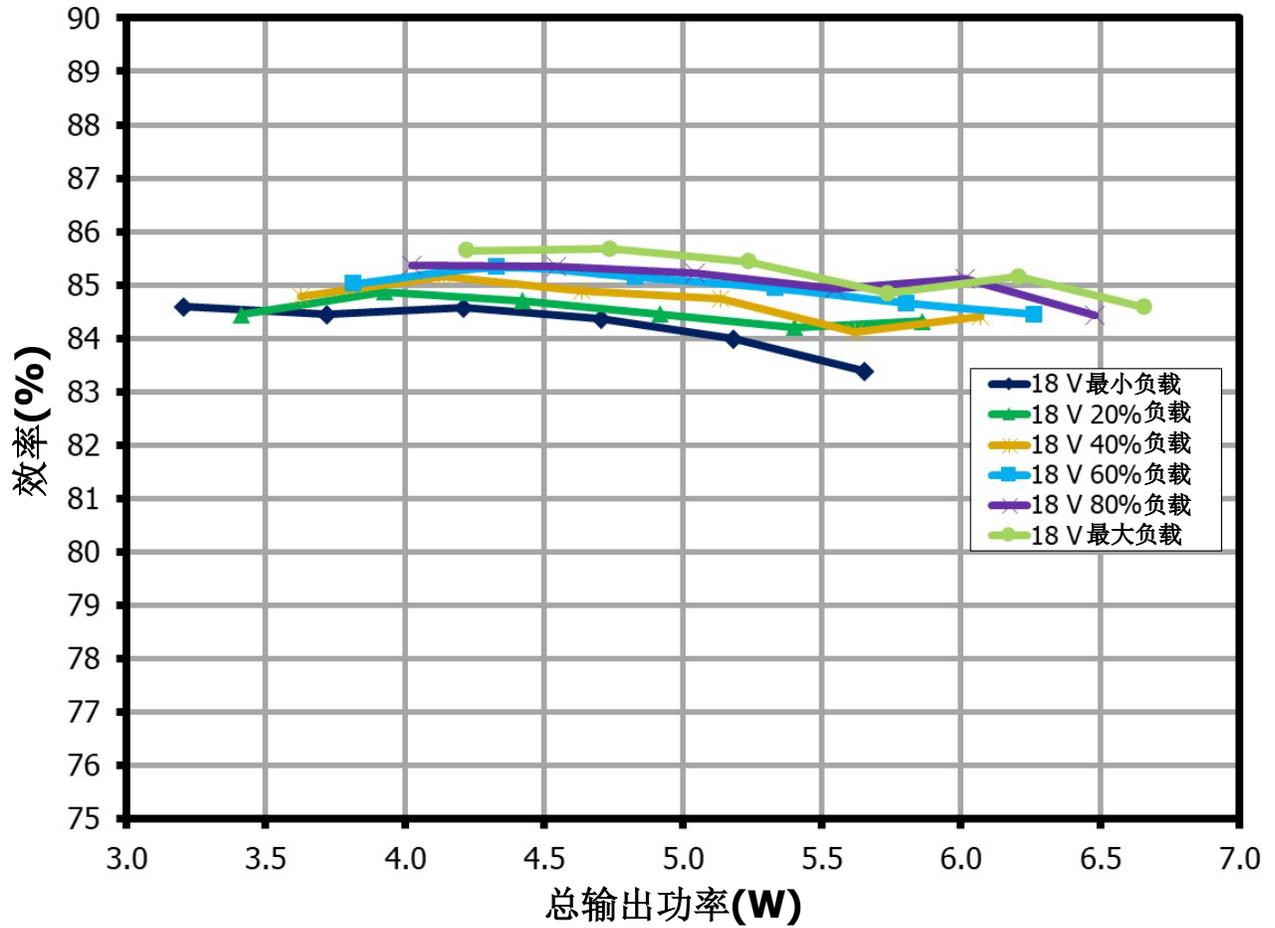


图19 - 在30V<sub>DC</sub>输入及25°C环境温度下效率相对于总输出功率的变化

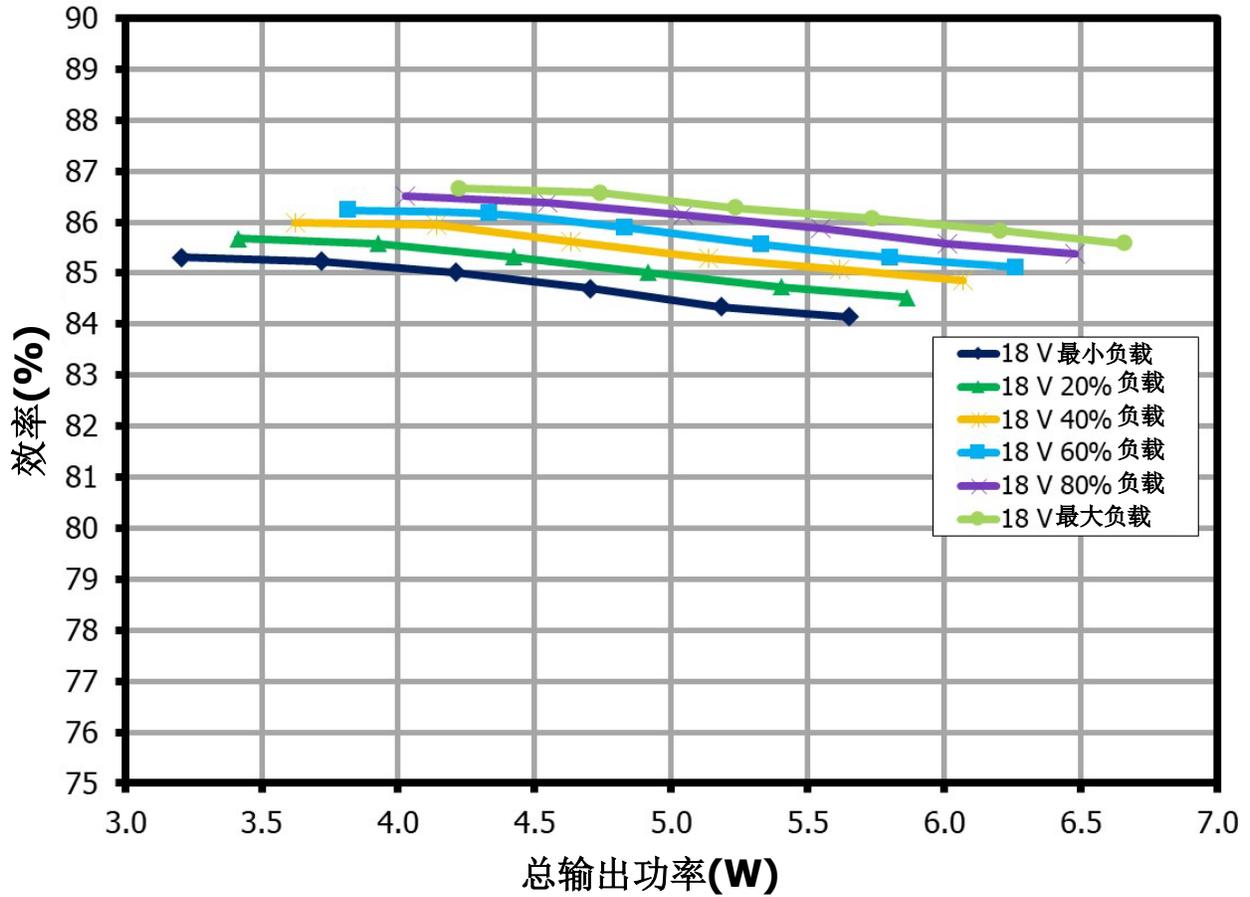


图20 - 在30V<sub>dc</sub>输入及-40°C环境温度下效率相对于总输出功率的变化



9.2.2.2 60V<sub>DC</sub>输入

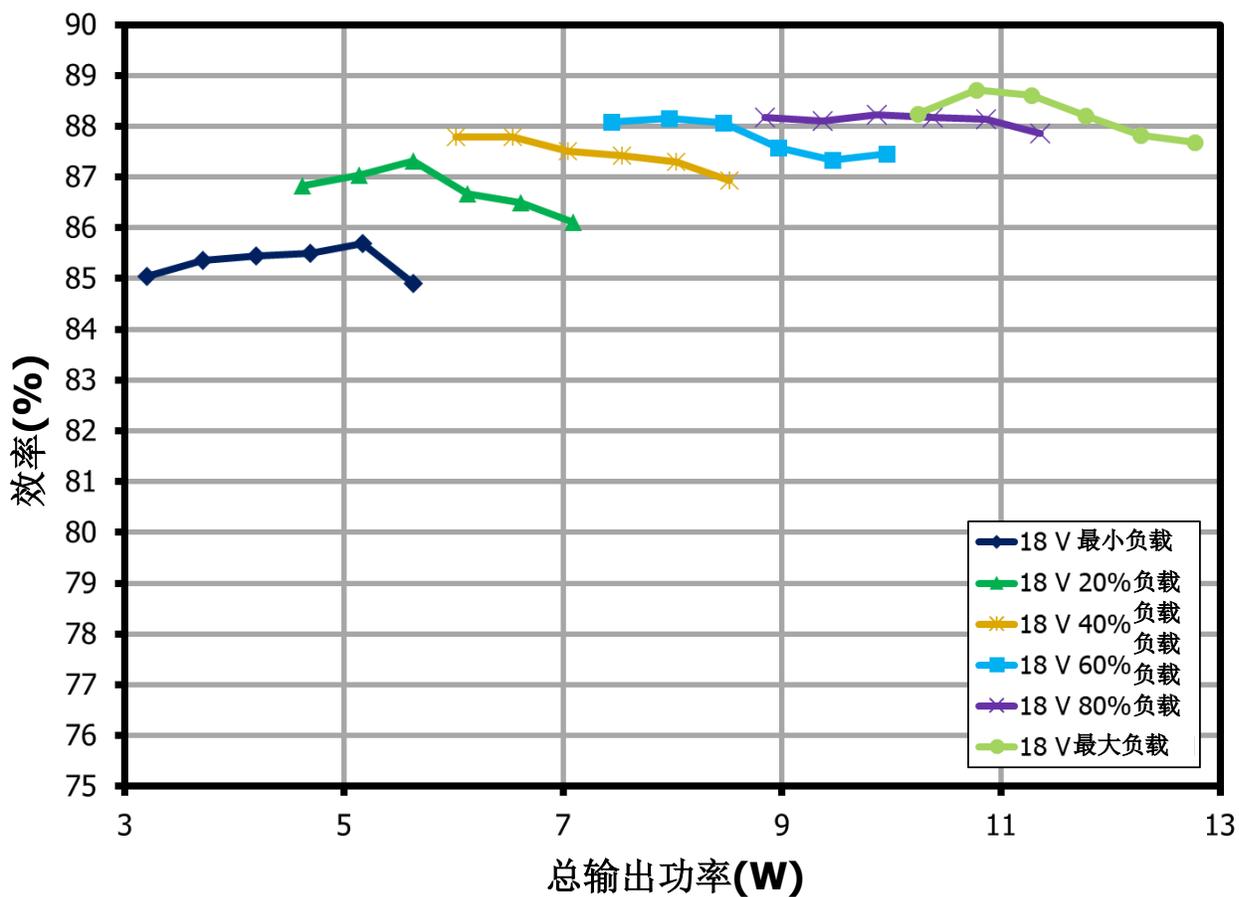


图21 - 在60V<sub>DC</sub>输入及105°C环境温度下效率相对于总输出功率的变化

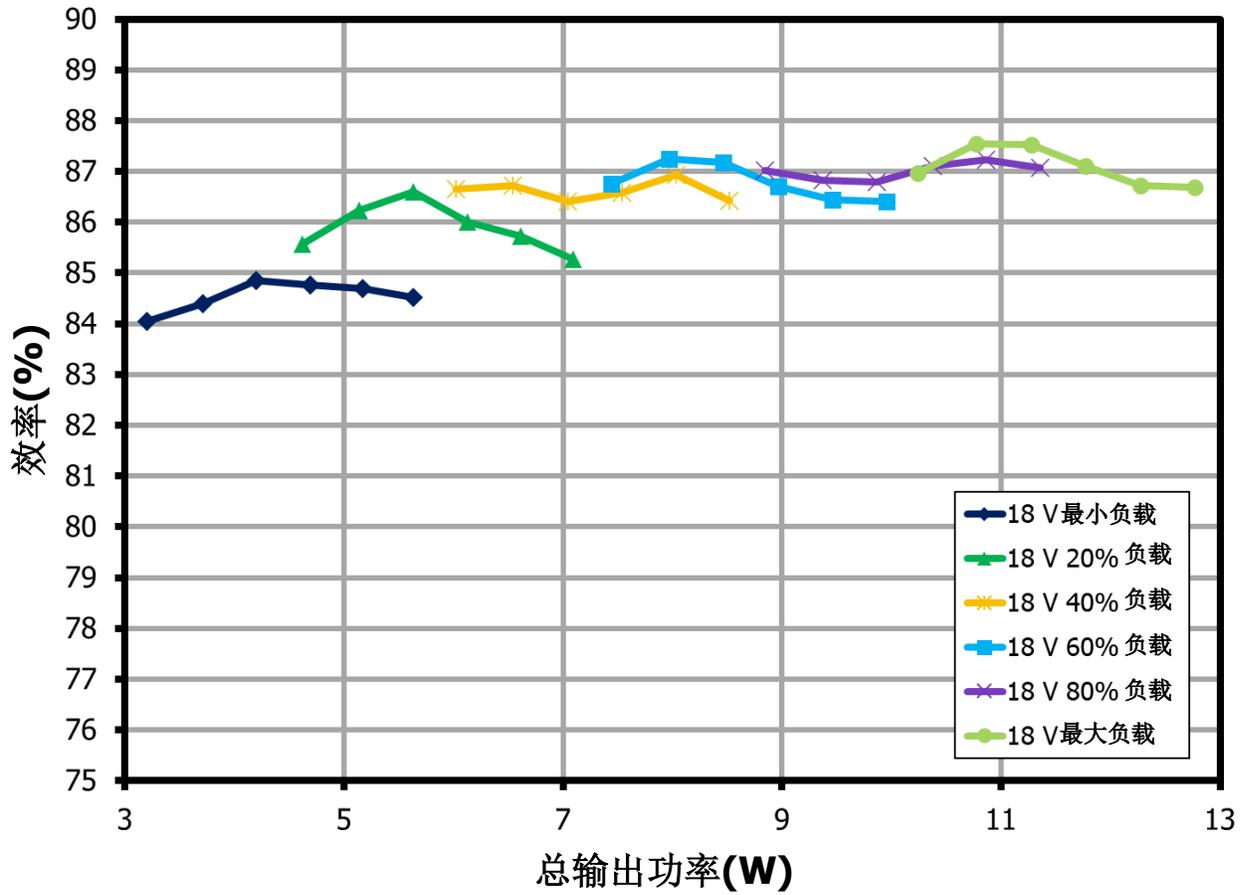


图22 - 在60V<sub>dc</sub>输入及25°C环境温度下效率相对于总输出功率的变化

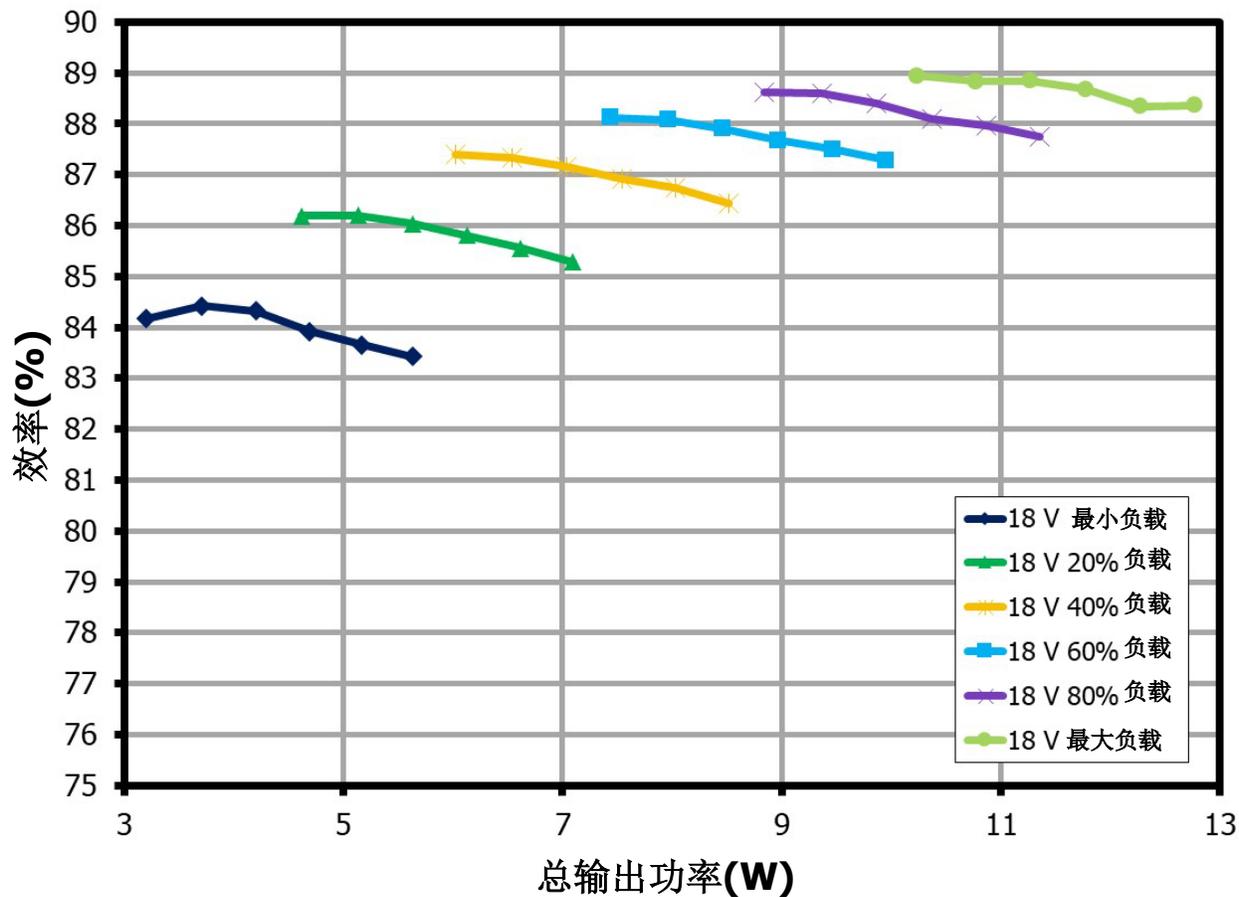


图23 - 在60V<sub>dc</sub>输入及-40°C环境温度下效率相对于总输出功率的变化

### 9.2.2.3 800V<sub>DC</sub>输入

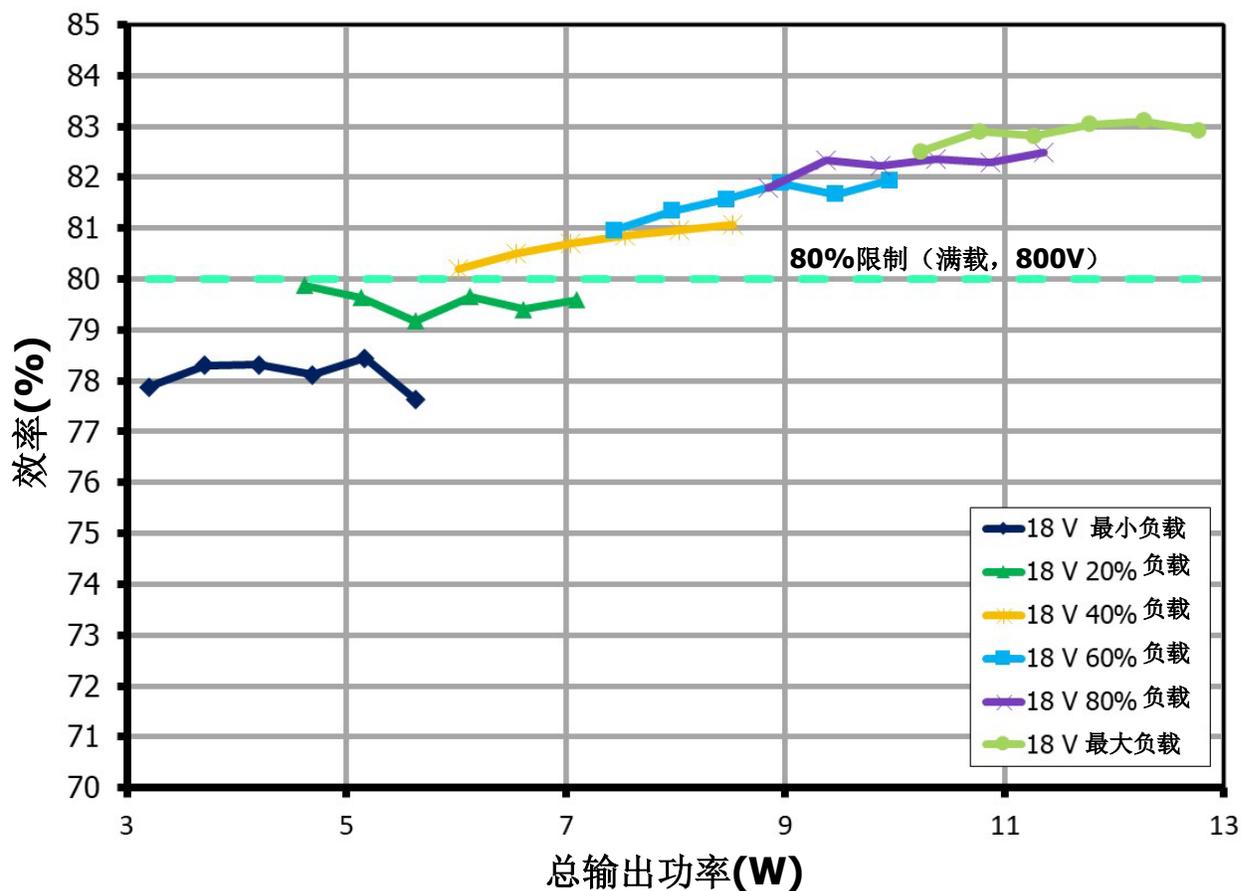


图24 - 在800V<sub>DC</sub>输入及105°C环境温度下效率相对于总输出功率的变化

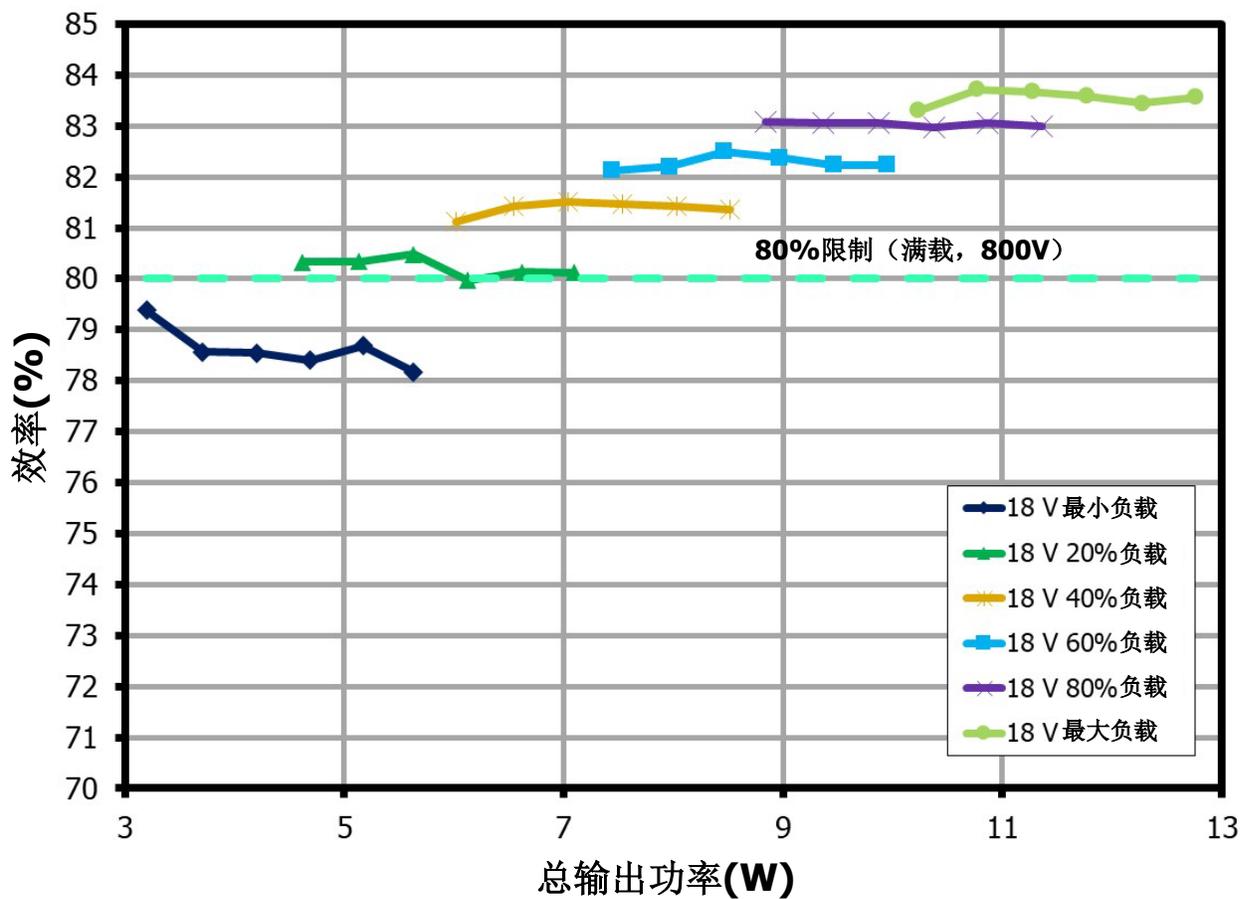


图25 - 在800V<sub>DC</sub>输入及25°C环境温度下效率相对于总输出功率的变化

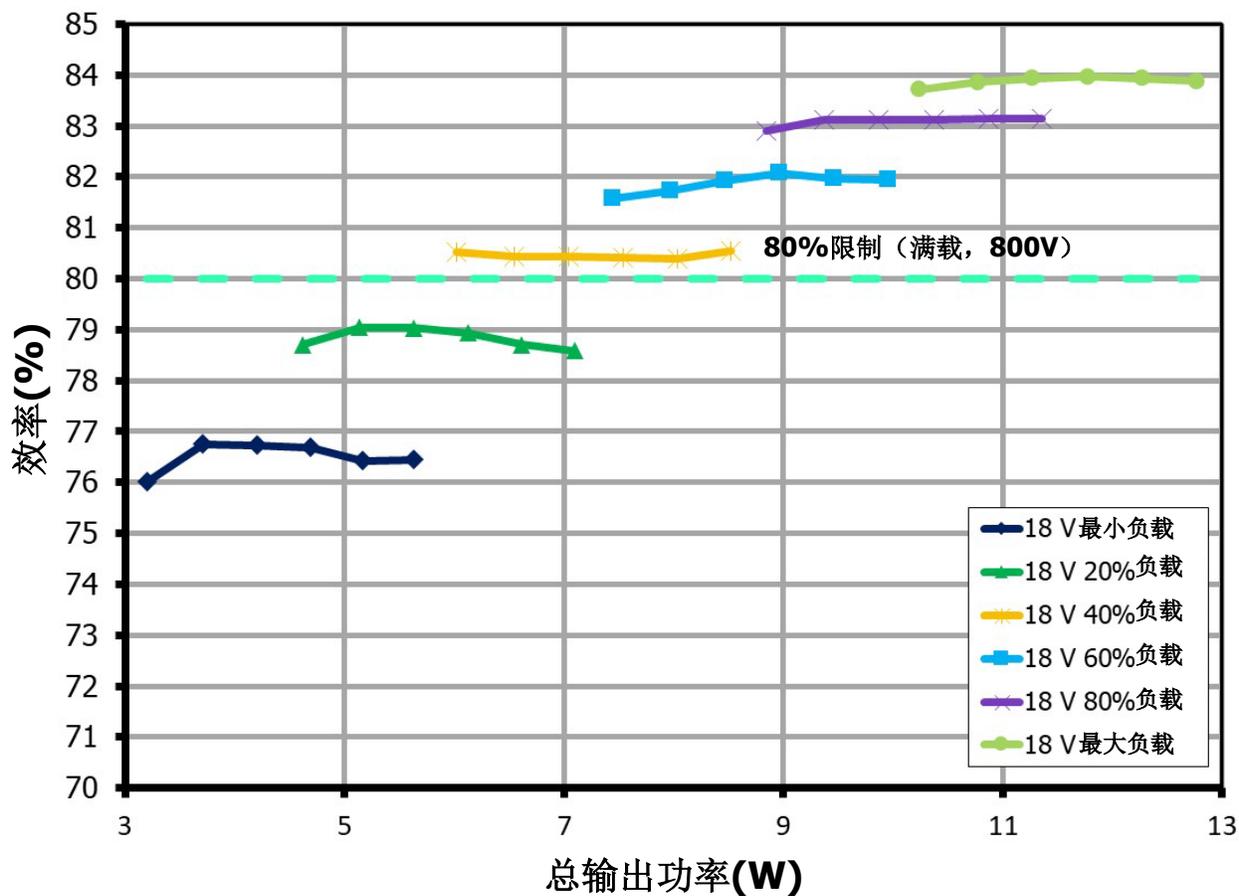


图26 - 在800V<sub>DC</sub>输入及-40°C环境温度下效率相对于总输出功率的变化

9.2.2.4 1000V<sub>DC</sub>输入

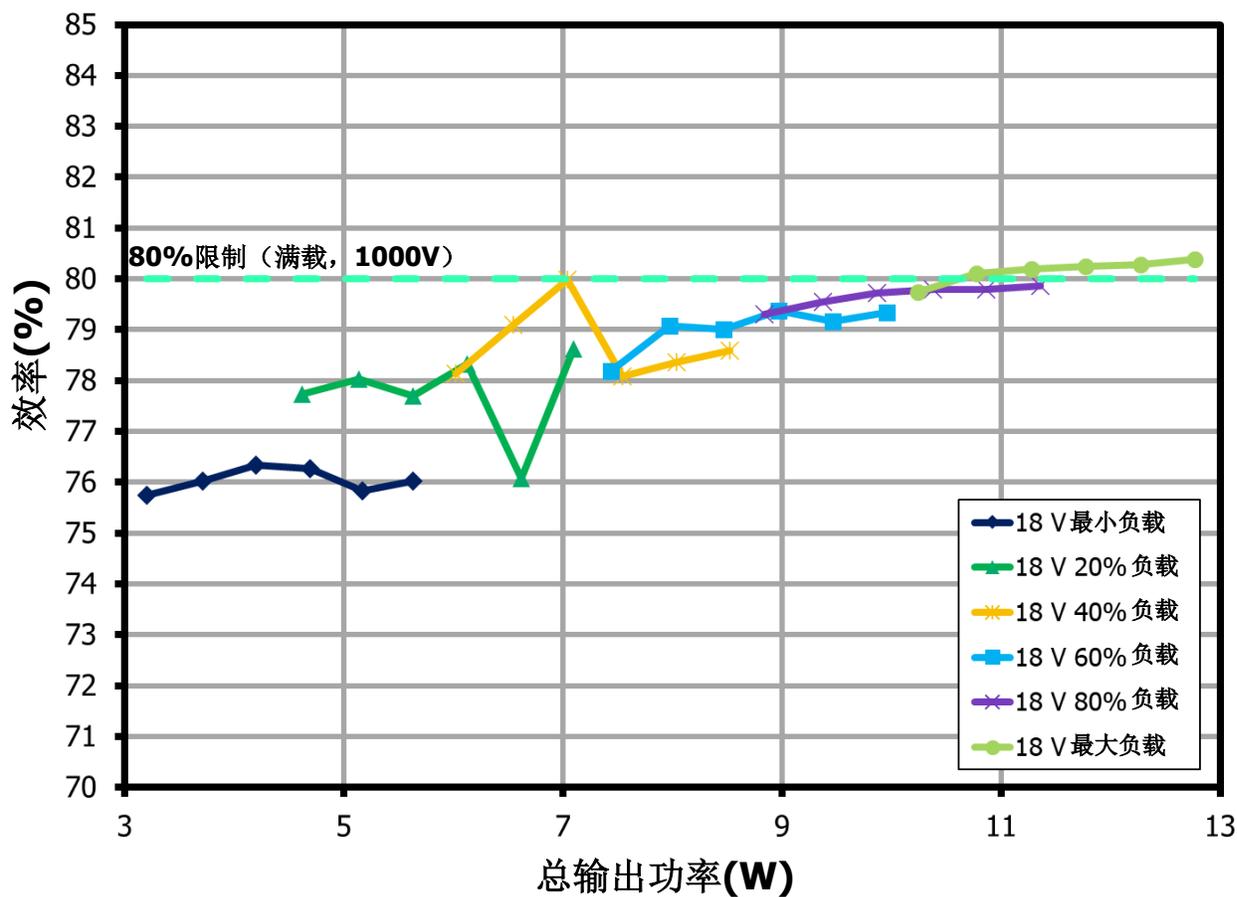


图27 - 在1000V<sub>DC</sub>输入及105°C环境温度下效率相对于总输出功率的变化

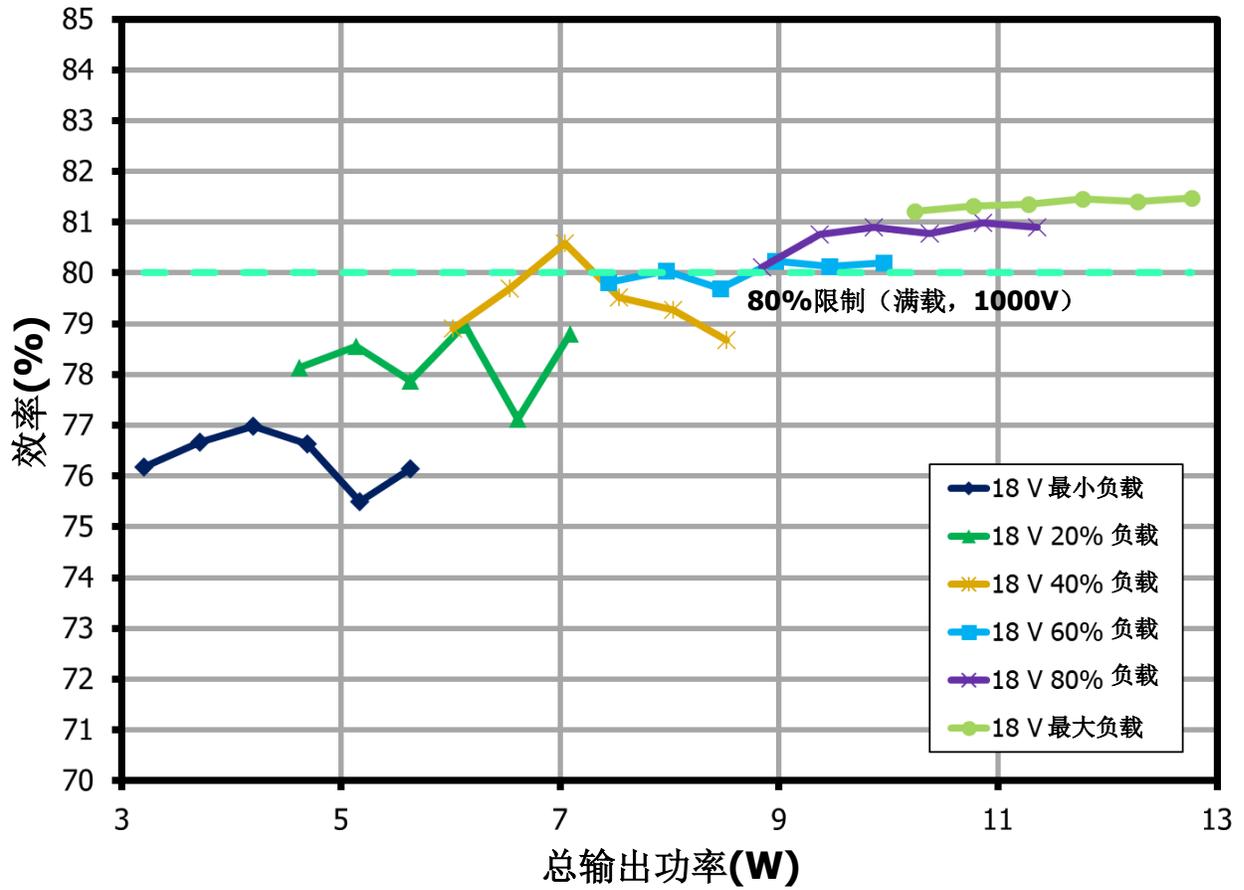


图28 - 在1000V<sub>dc</sub>输入及25°C环境温度下效率相对于总输出功率的变化

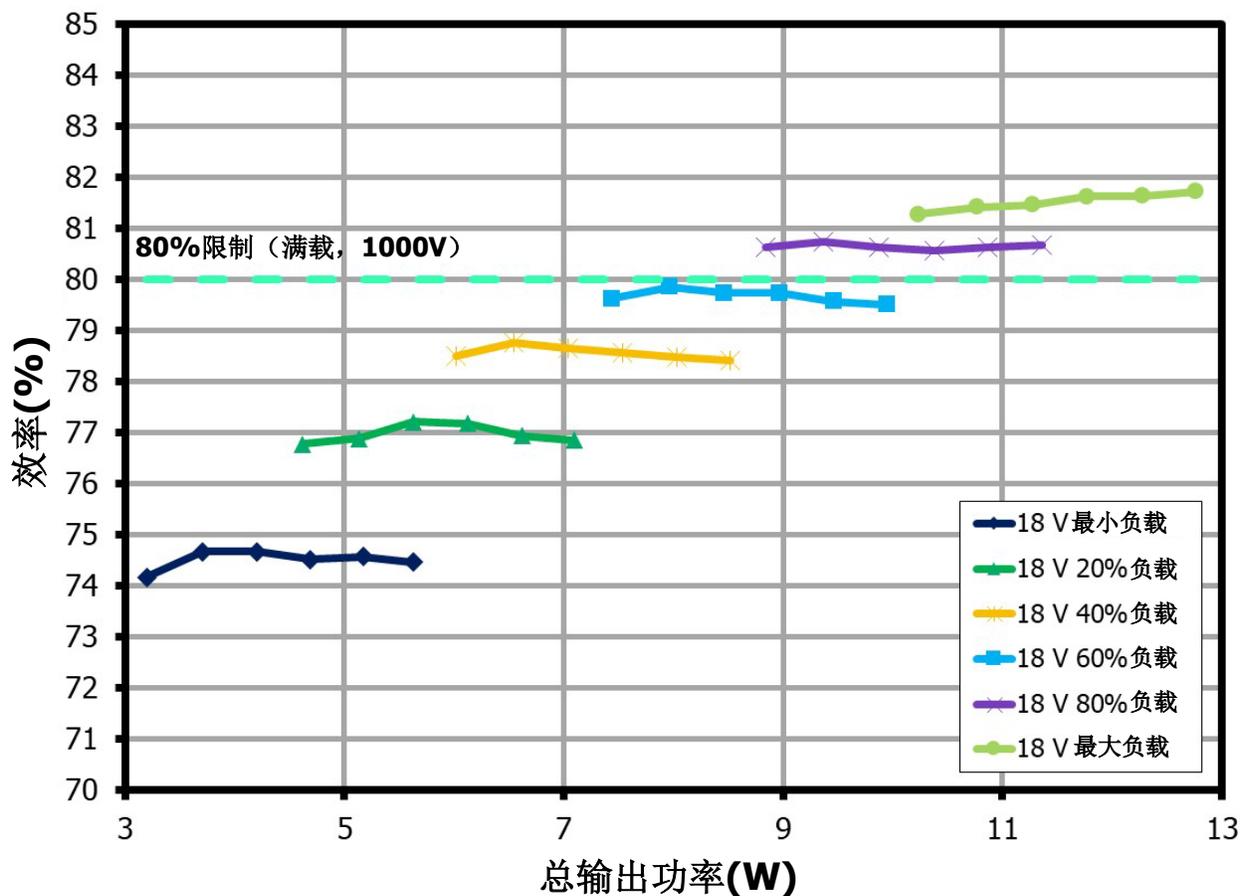


图29 - 在1000V<sub>DC</sub>输入及-40°C环境温度下效率相对于总输出功率的变化

### 9.3 负载调整率

负载调整率描述负载条件（最小值 - 最大值）如何影响输出电压。

#### 9.3.1 30V<sub>DC</sub>输入

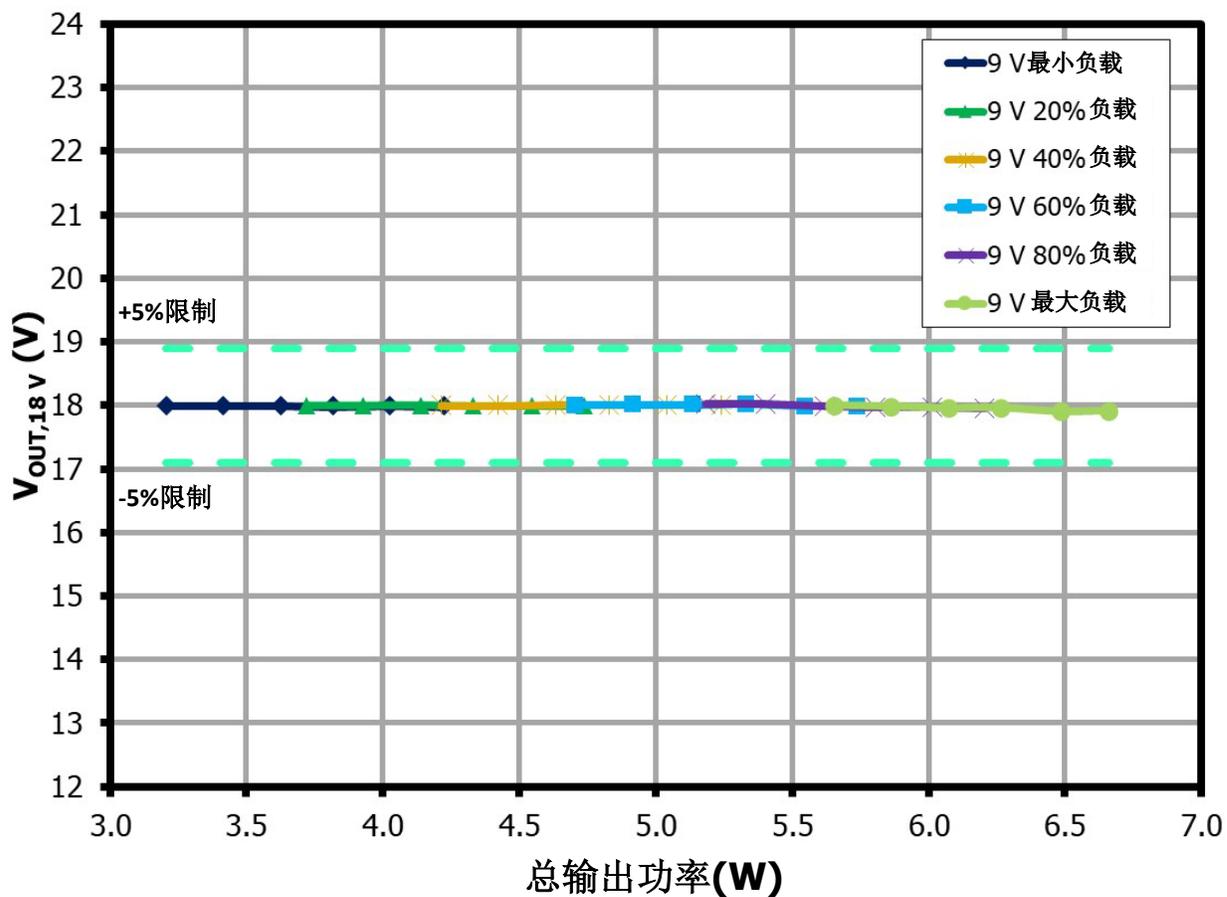


图30 - 在30V<sub>DC</sub>输入及105°C环境温度下18V输出电压相对于总输出功率的变化

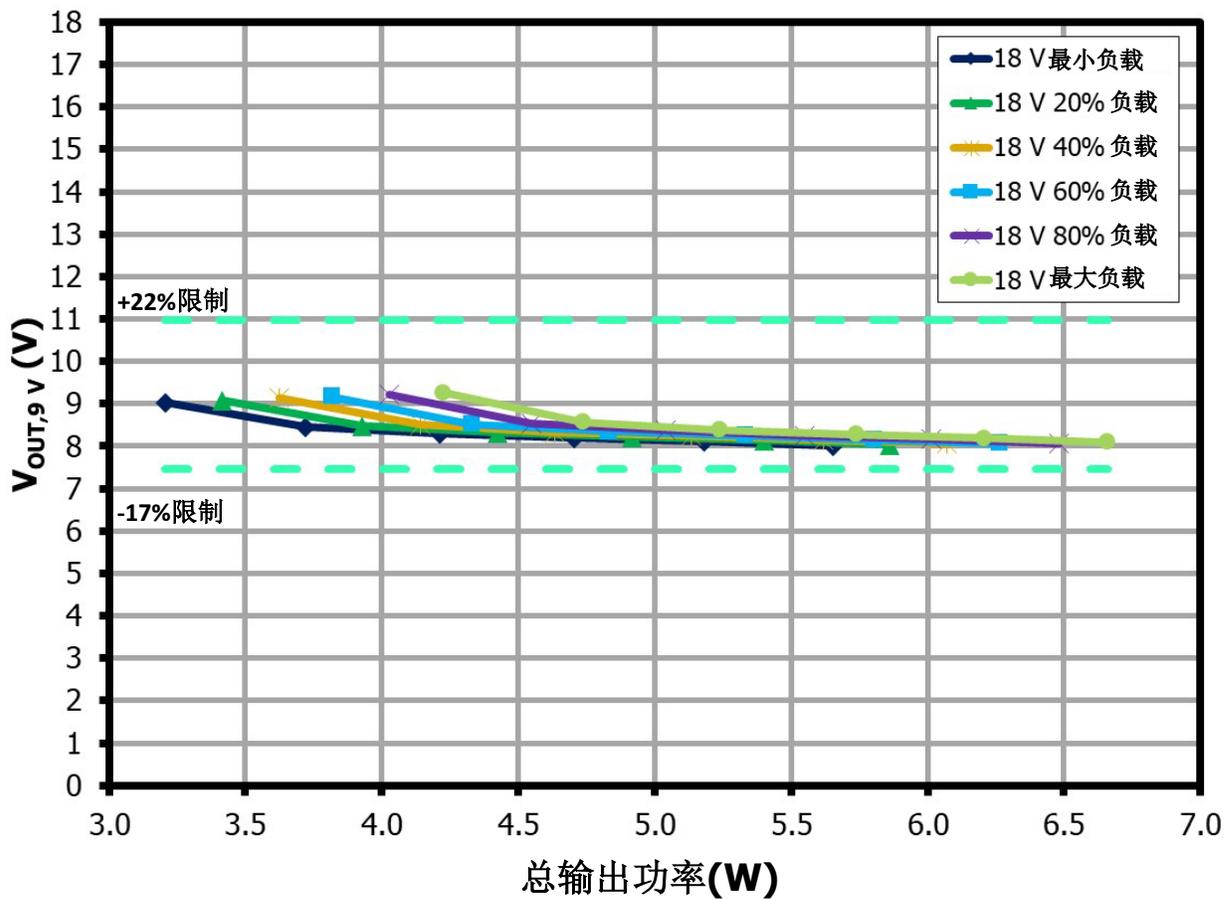


图31 - 在30V<sub>DC</sub>输入及105°C环境温度下9V输出电压相对于总输出功率的变化

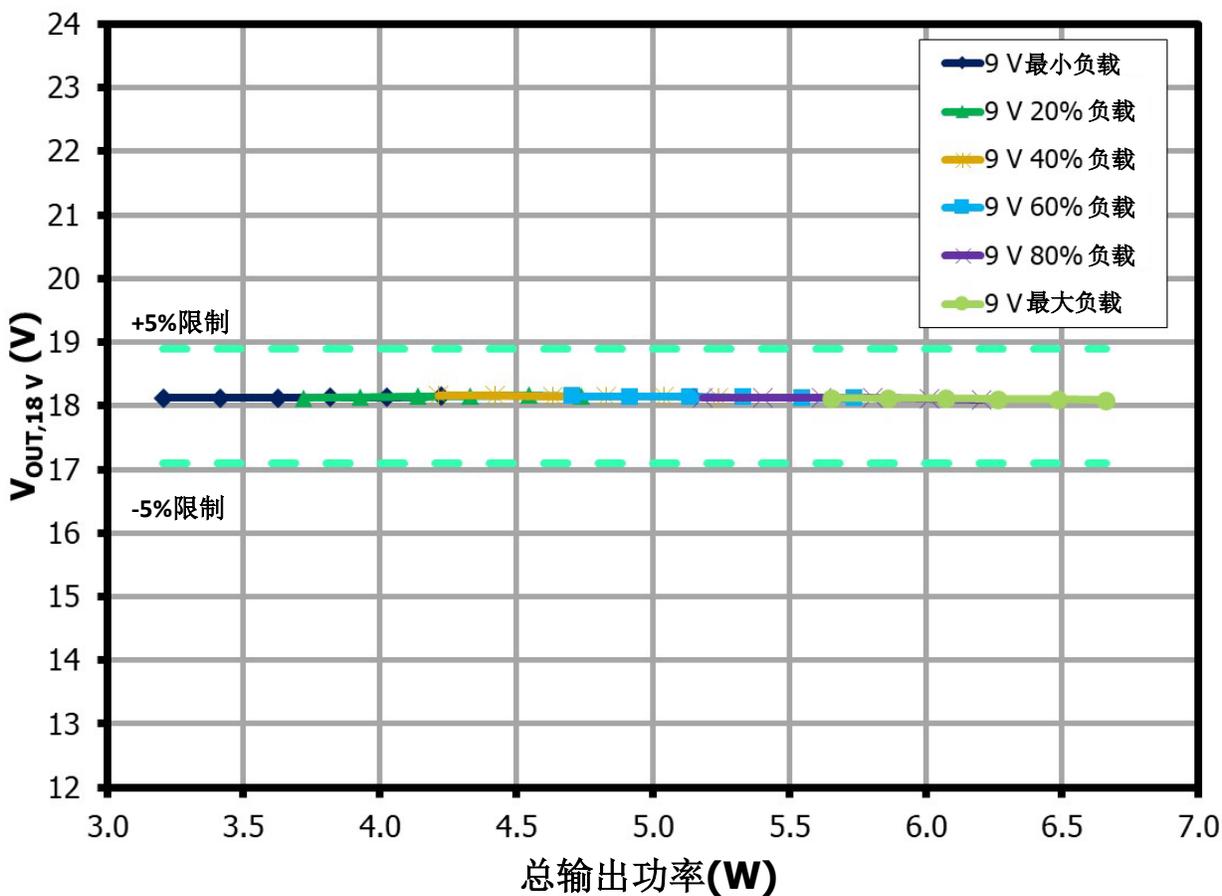


图32 - 在30V<sub>DC</sub>输入及-40°C环境温度下18V输出电压相对于总输出功率的变化

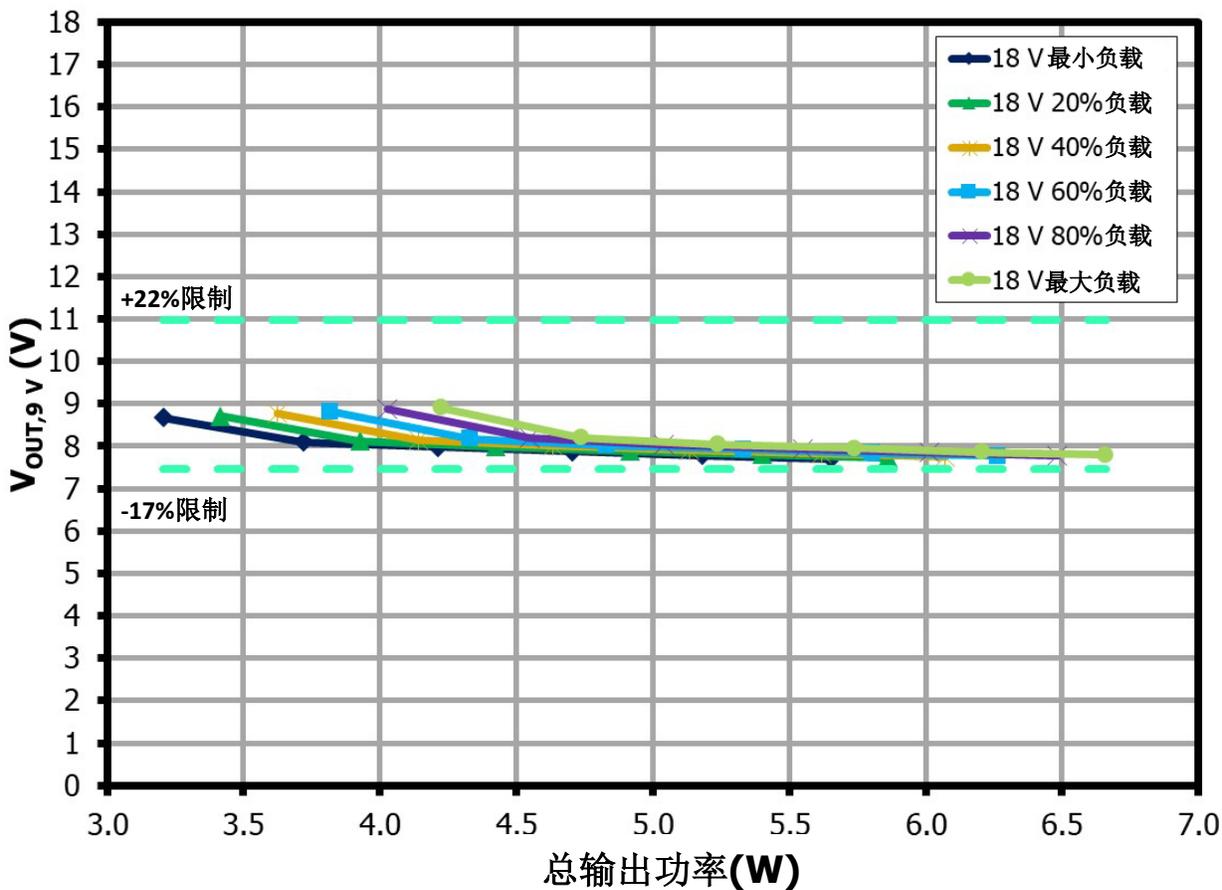


图33 - 在30V<sub>DC</sub>输入及-40°C环境温度下9V输出电压相对于总输出功率的变化

### 9.3.2 60V<sub>DC</sub>输入

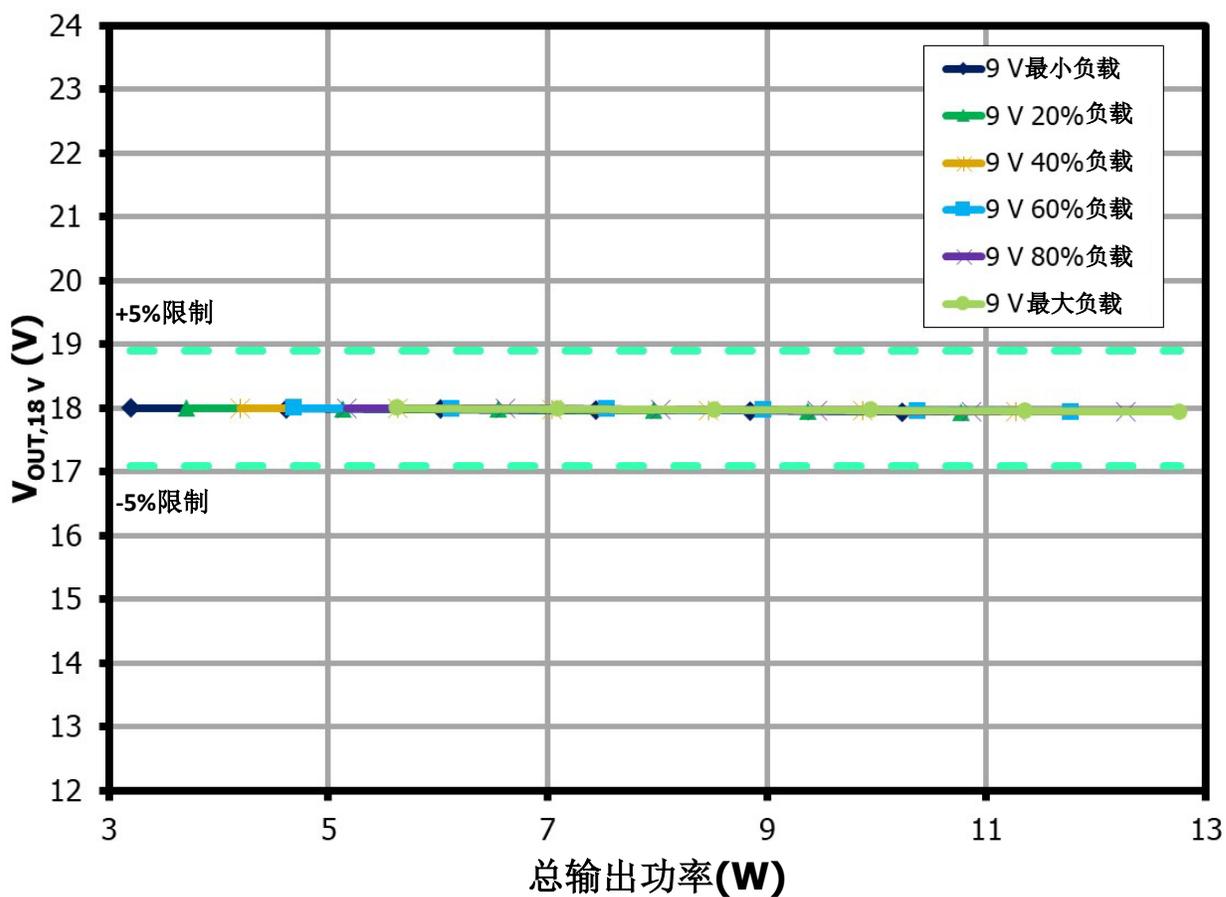


图34 - 在60V<sub>DC</sub>输入及105°C环境温度下18V输出电压相对于总输出功率的变化

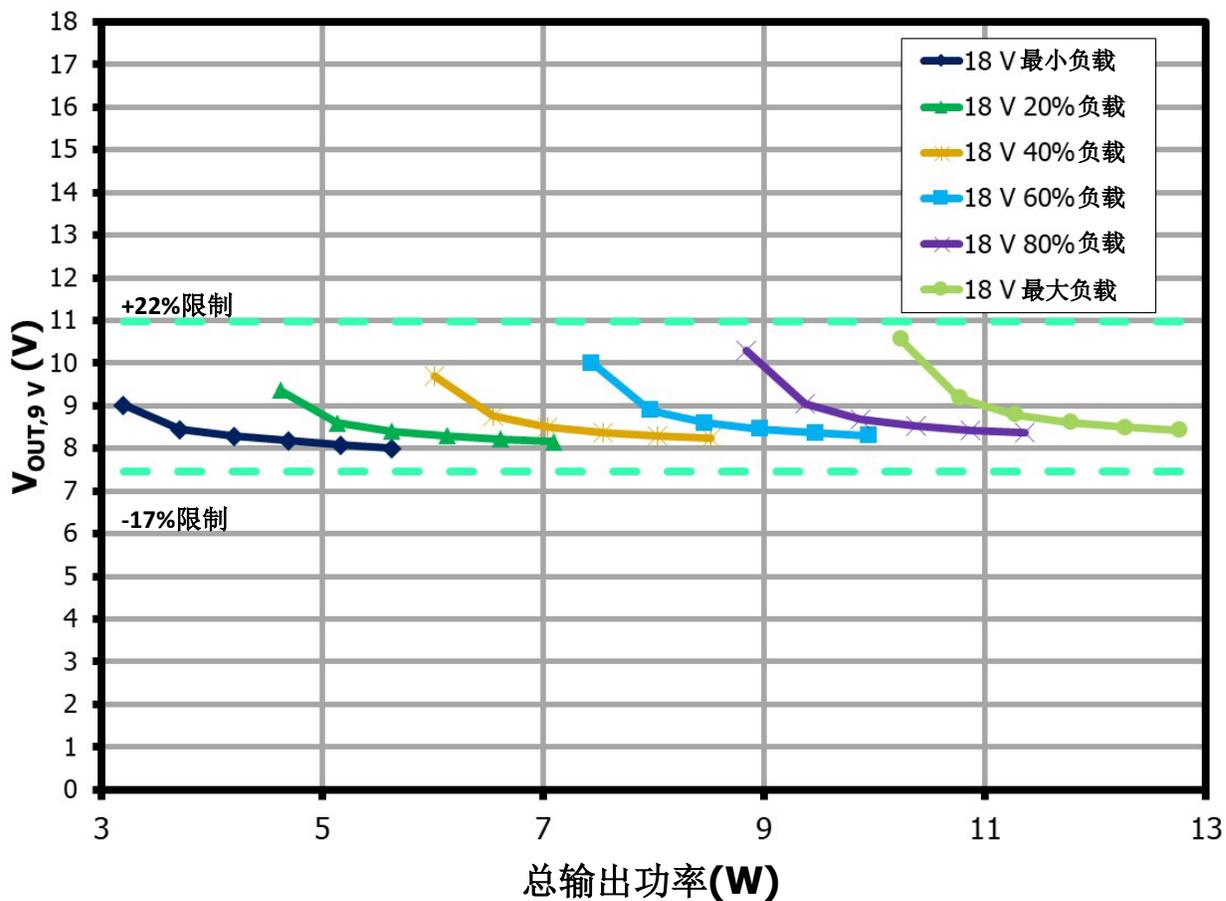


图35 - 在60V<sub>DC</sub>输入及105°C环境温度下9V输出电压相对于总输出功率的变化

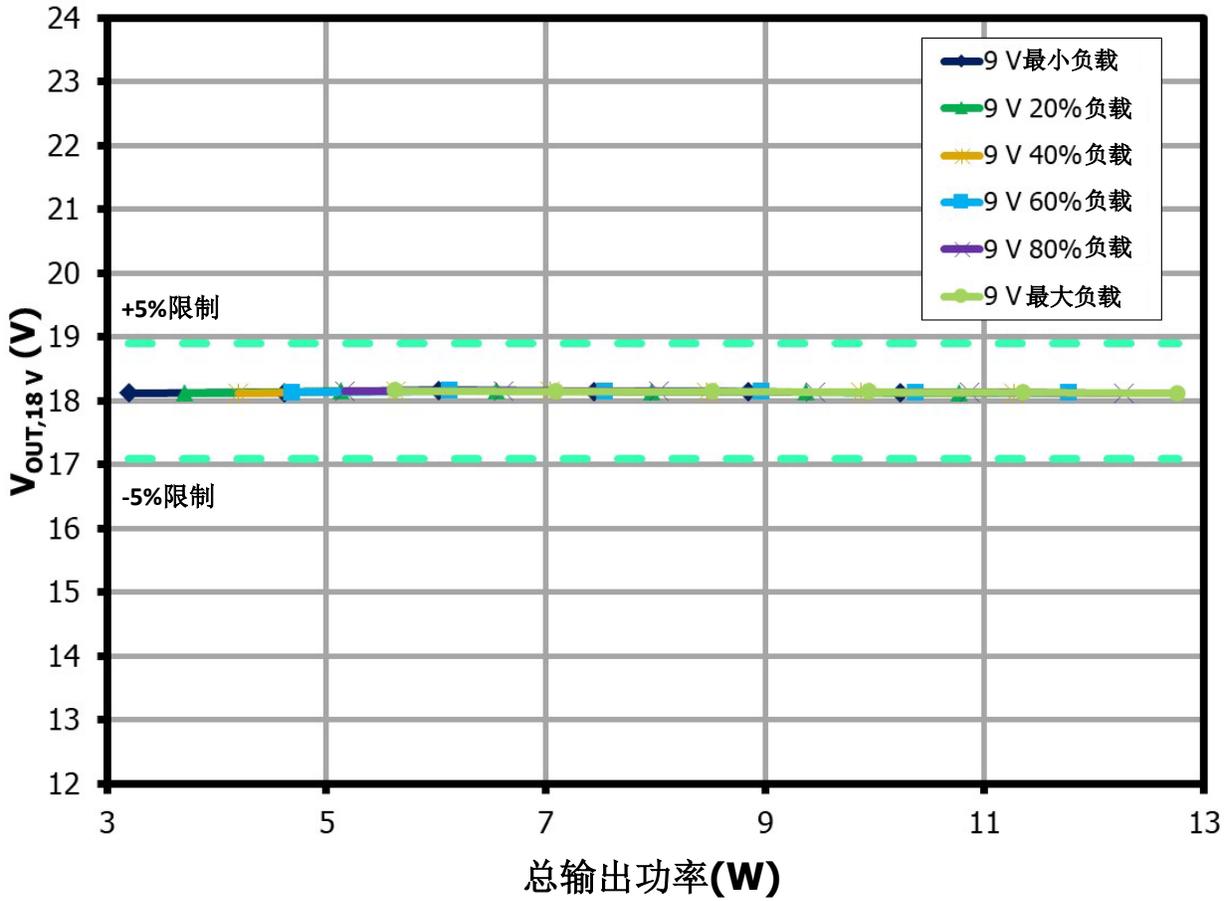


图36 - 在60V<sub>DC</sub>输入及-40°C环境温度下18V输出电压相对于总输出功率的变化

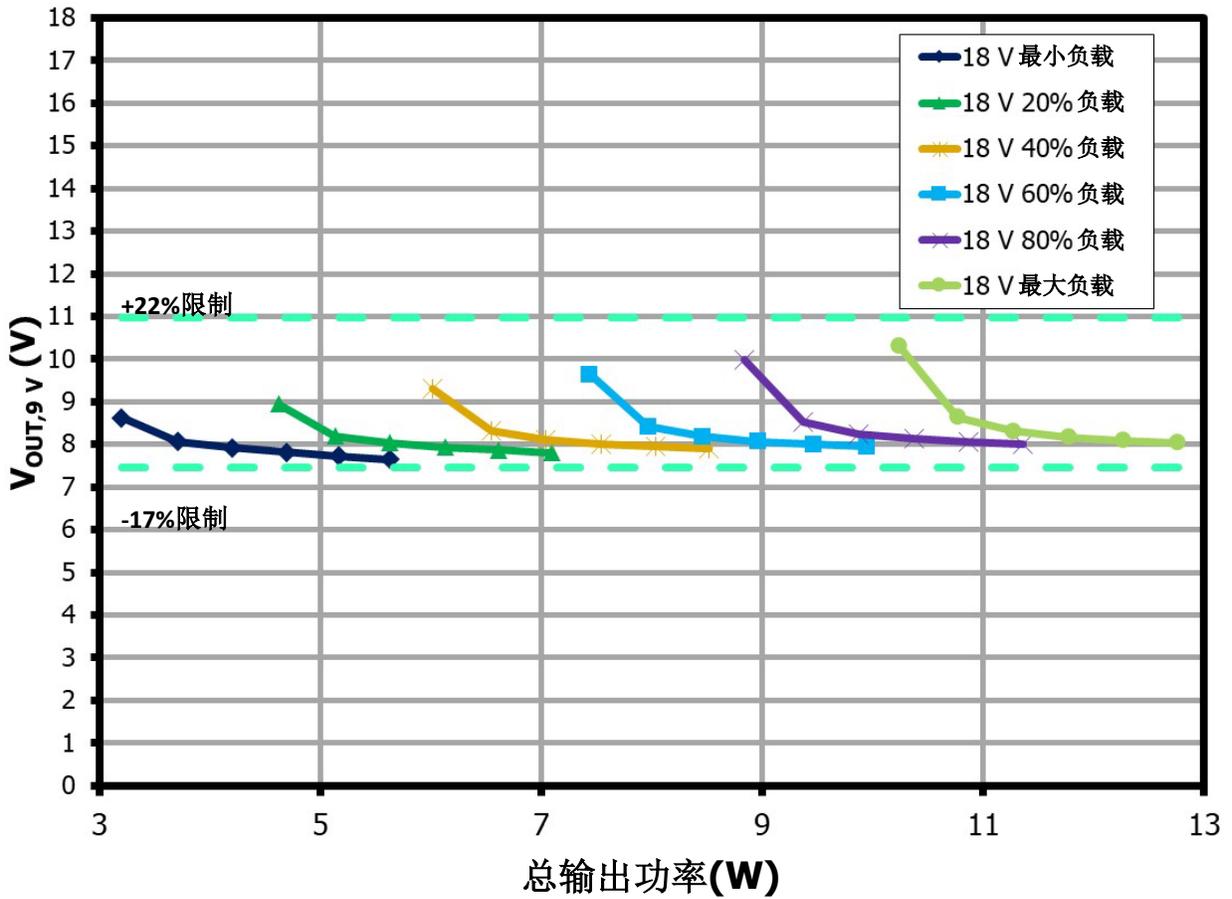


图37 - 在60V<sub>DC</sub>输入及-40°C环境温度下9V输出电压相对于总输出功率的变化

### 9.3.3 800V<sub>DC</sub>输入

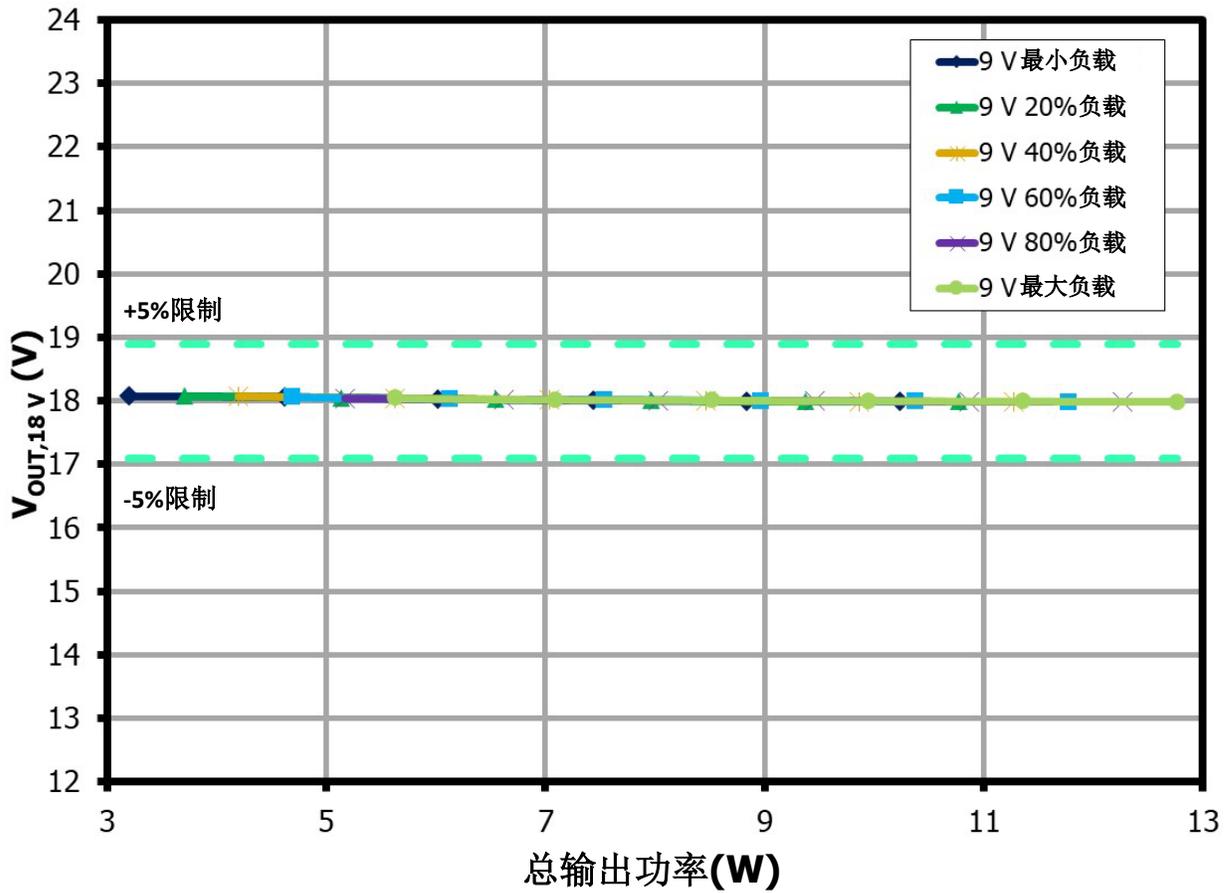


图38 - 在800V<sub>DC</sub>输入及105°C环境温度下18V输出电压相对于总输出功率的变化

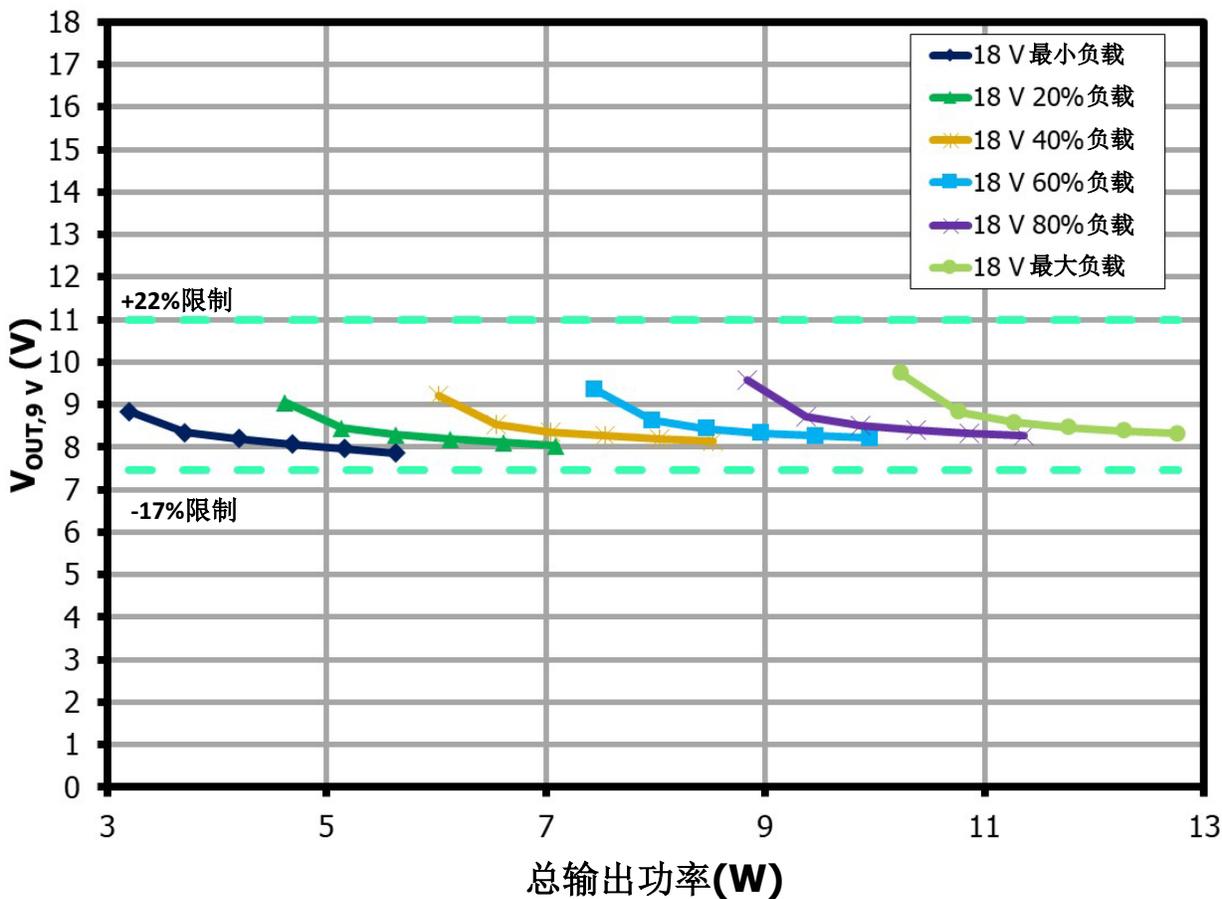


图39 - 在800V<sub>DC</sub>输入及105°C环境温度下9V输出电压相对于总输出功率的变化

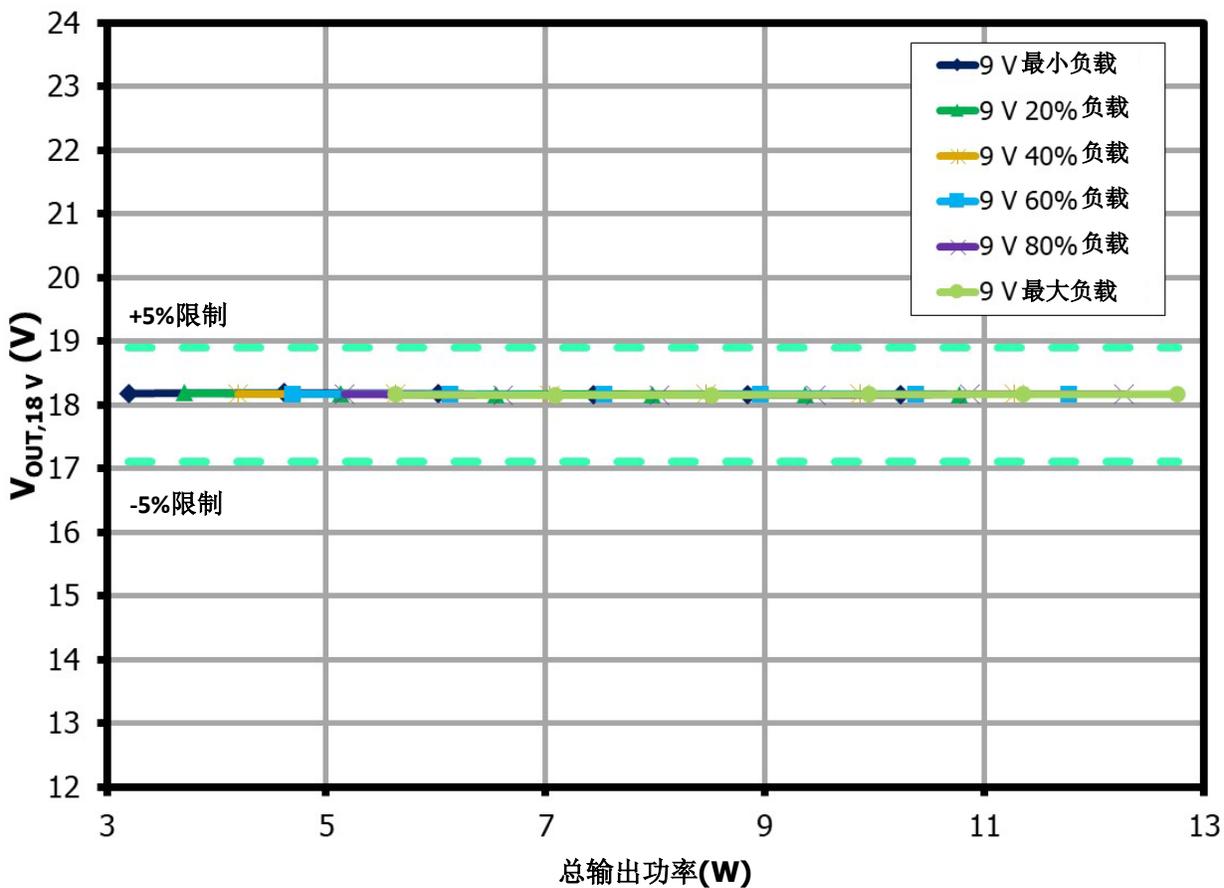


图40 - 在800V<sub>DC</sub>输入及-40°C环境温度下18V输出电压相对于总输出功率的变化

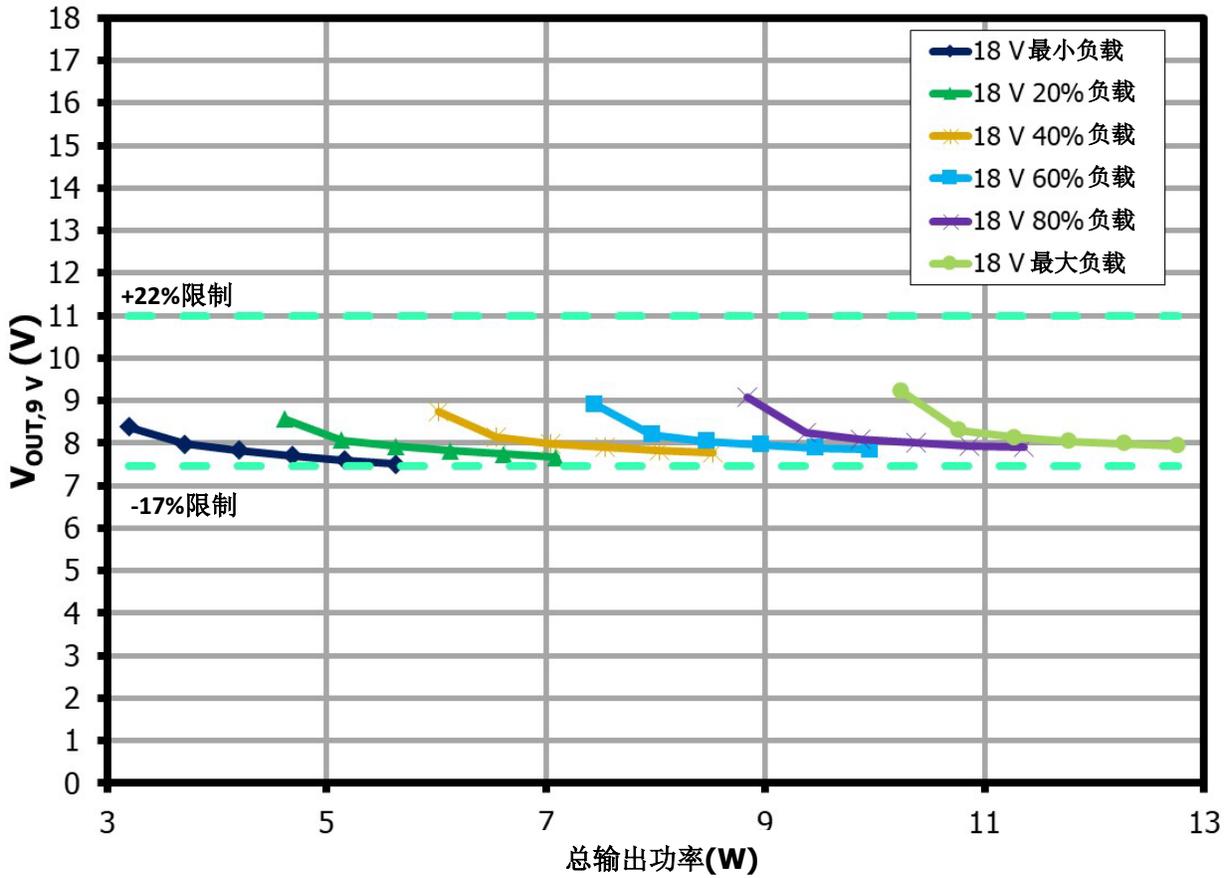


图41 - 在800V<sub>DC</sub>输入及-40°C环境温度下9V输出电压相对于总输出功率的变化

### 9.3.4 1000V<sub>DC</sub>输入

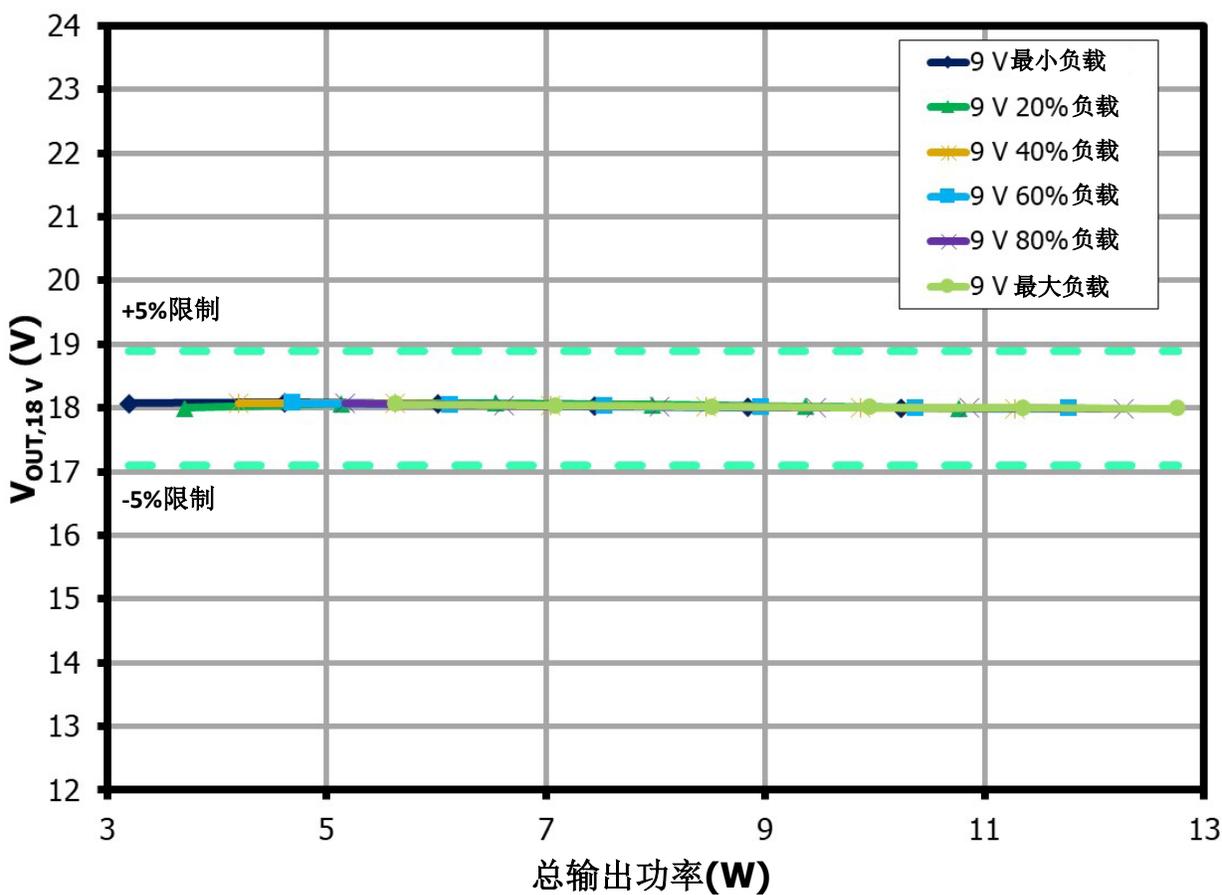


图42 - 在1000V<sub>DC</sub>输入及105°C环境温度下18V输出电压相对于总输出功率的变化

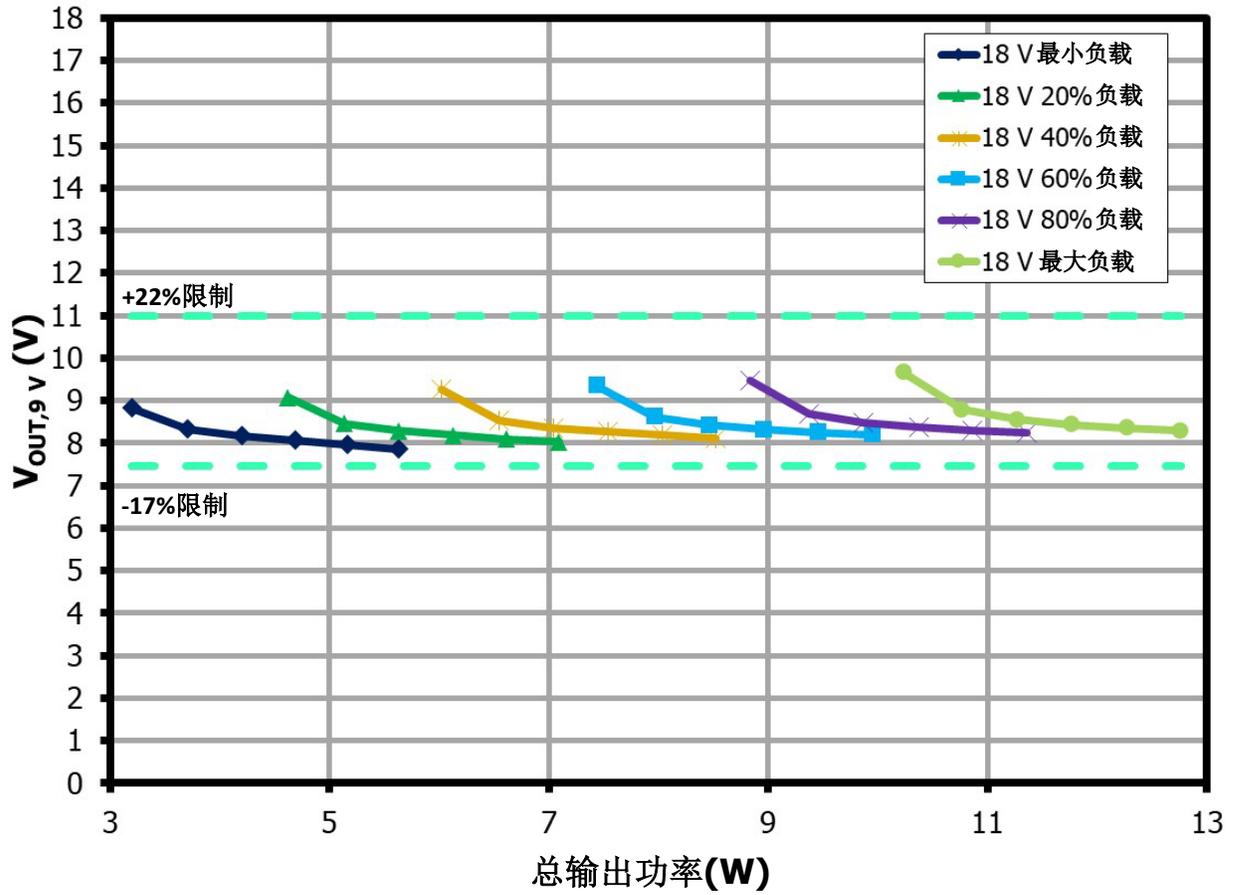


图43 - 在1000V<sub>DC</sub>输入及105°C环境温度下9V输出电压相对于总输出功率的变化

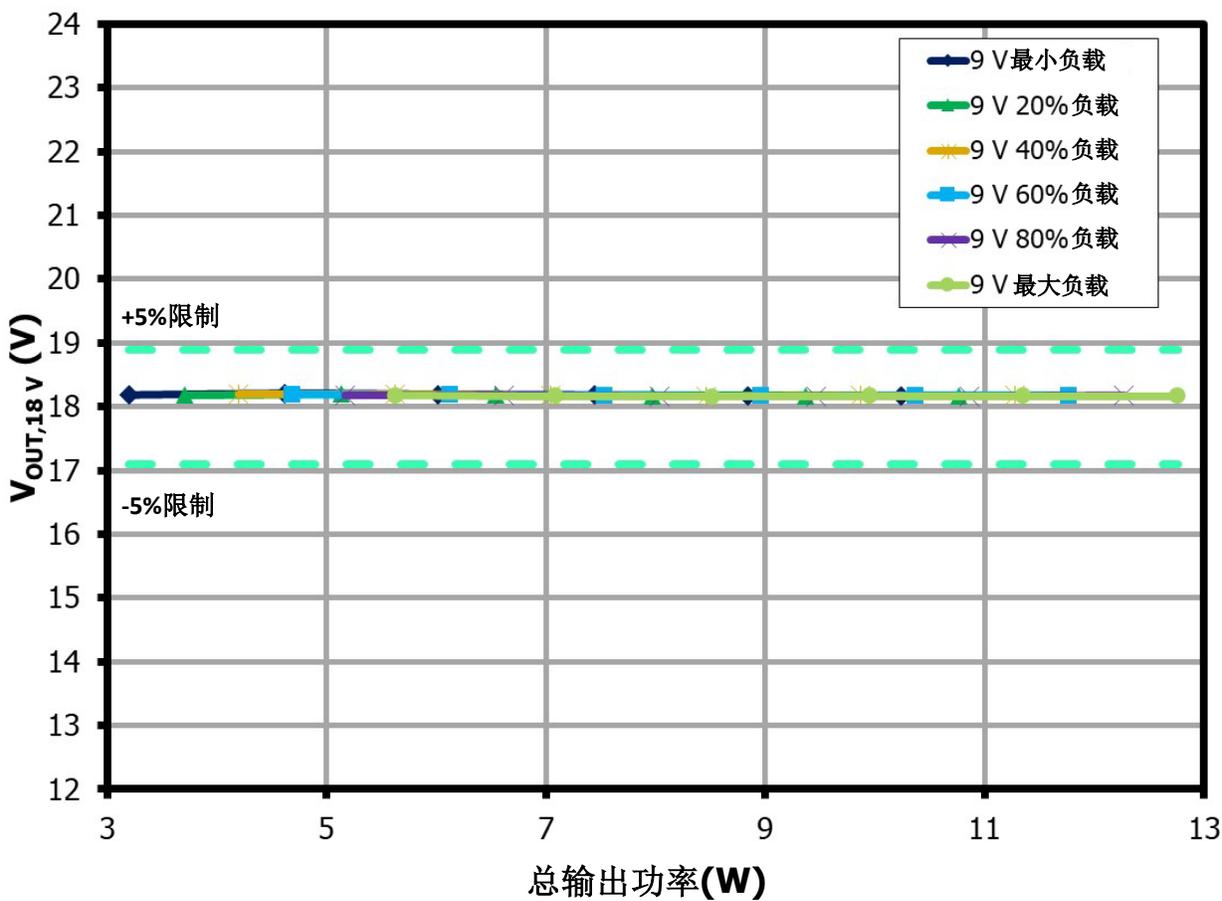


图44 - 在1000V<sub>DC</sub>输入及-40°C环境温度下18V输出电压相对于总输出功率的变化

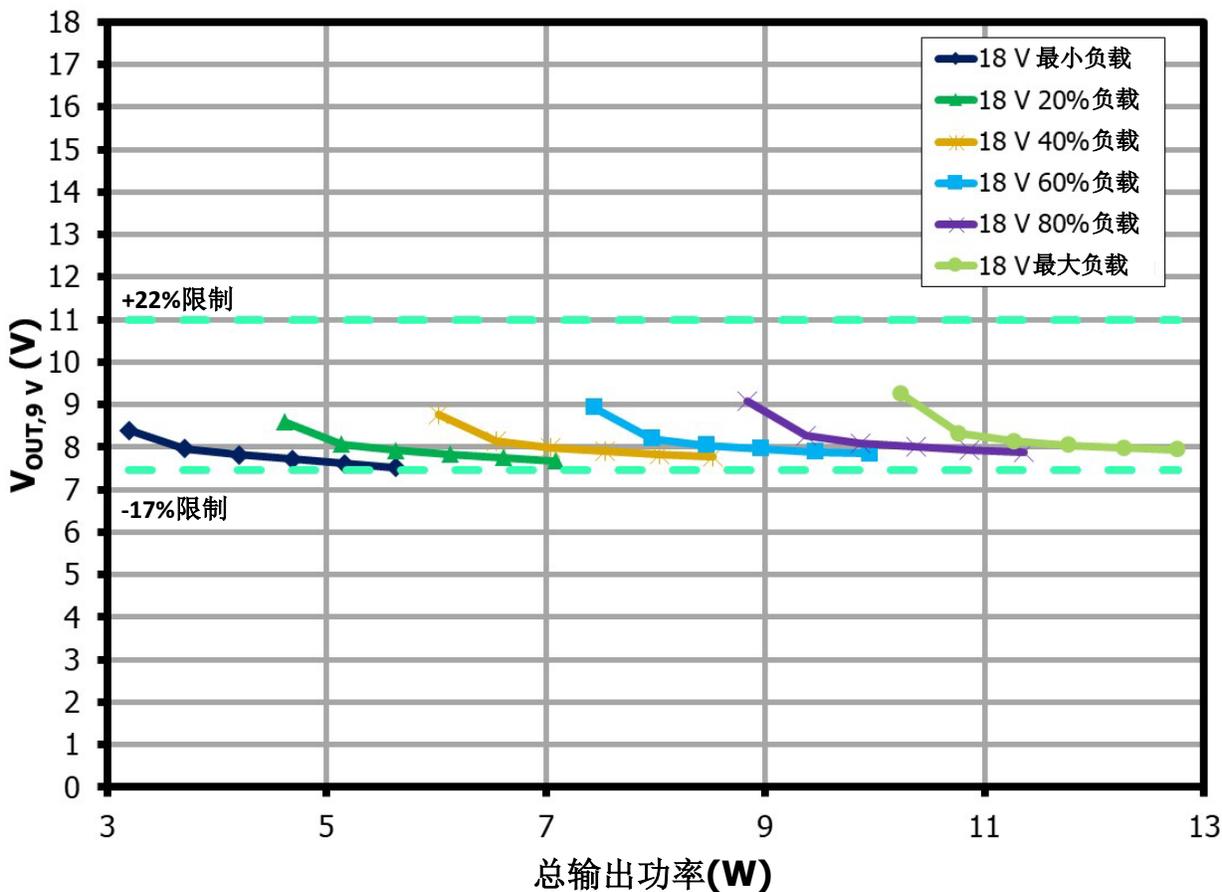


图45 - 在1000V<sub>DC</sub>输入及-40°C环境温度下9V输出电压相对于总输出功率的变化

### 9.4 输入电压调整率

输入电压调整率描述输入电压的变化如何影响输出电压。

#### 9.4.1 负载条件: 18V = 最大值 / 9V = 最大值

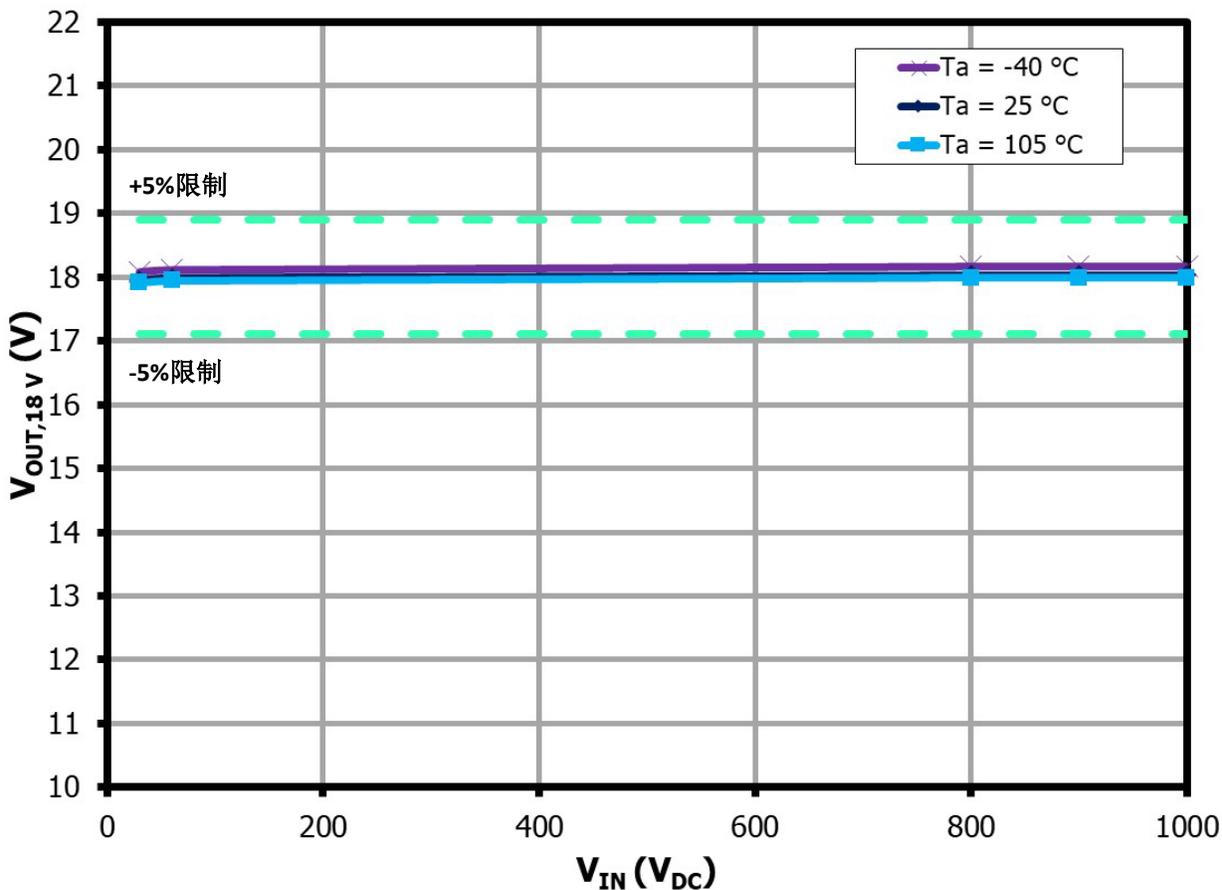


图46 - 18V输出电压相对于输入电压的变化

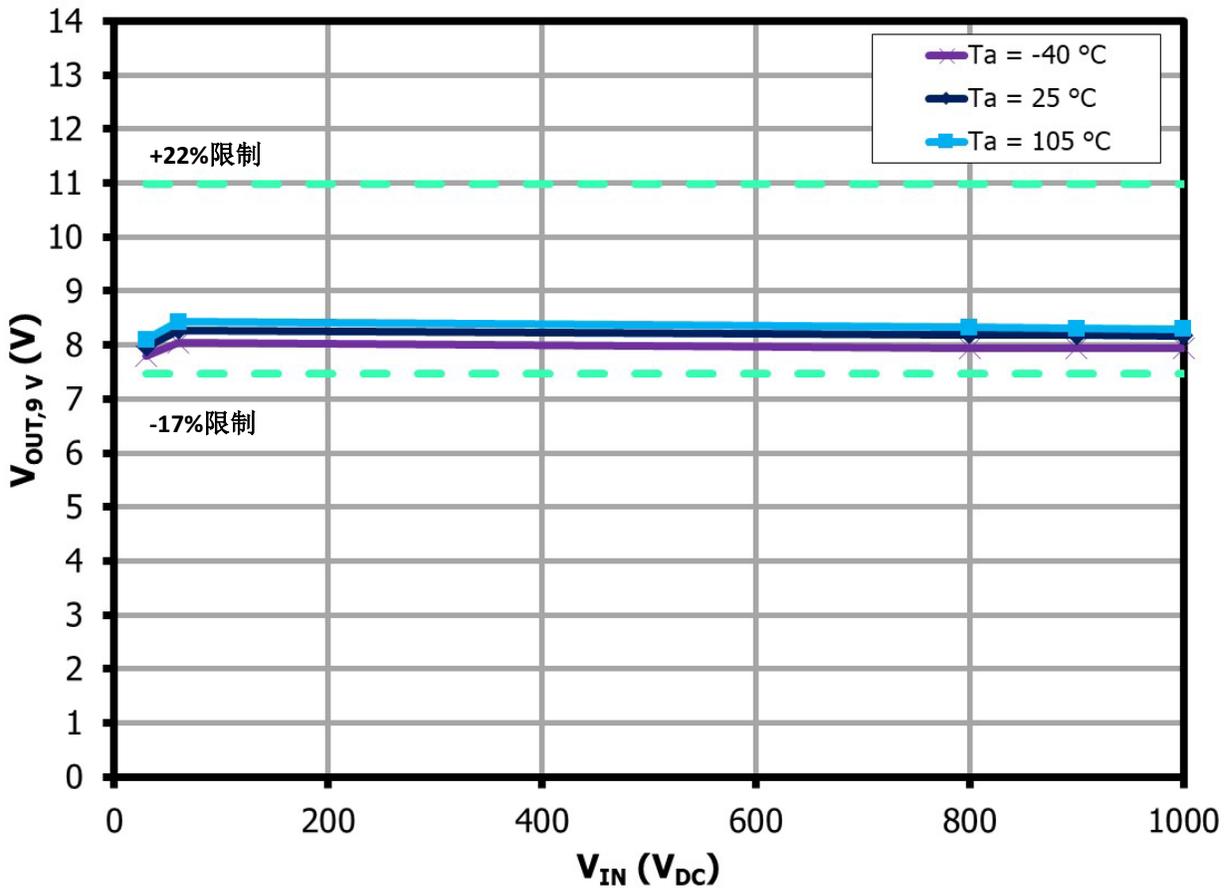


图47 - 9V输出电压相对于输入电压的变化

9.4.2 负载条件: 18V = 最大值 / 9V = 最小值

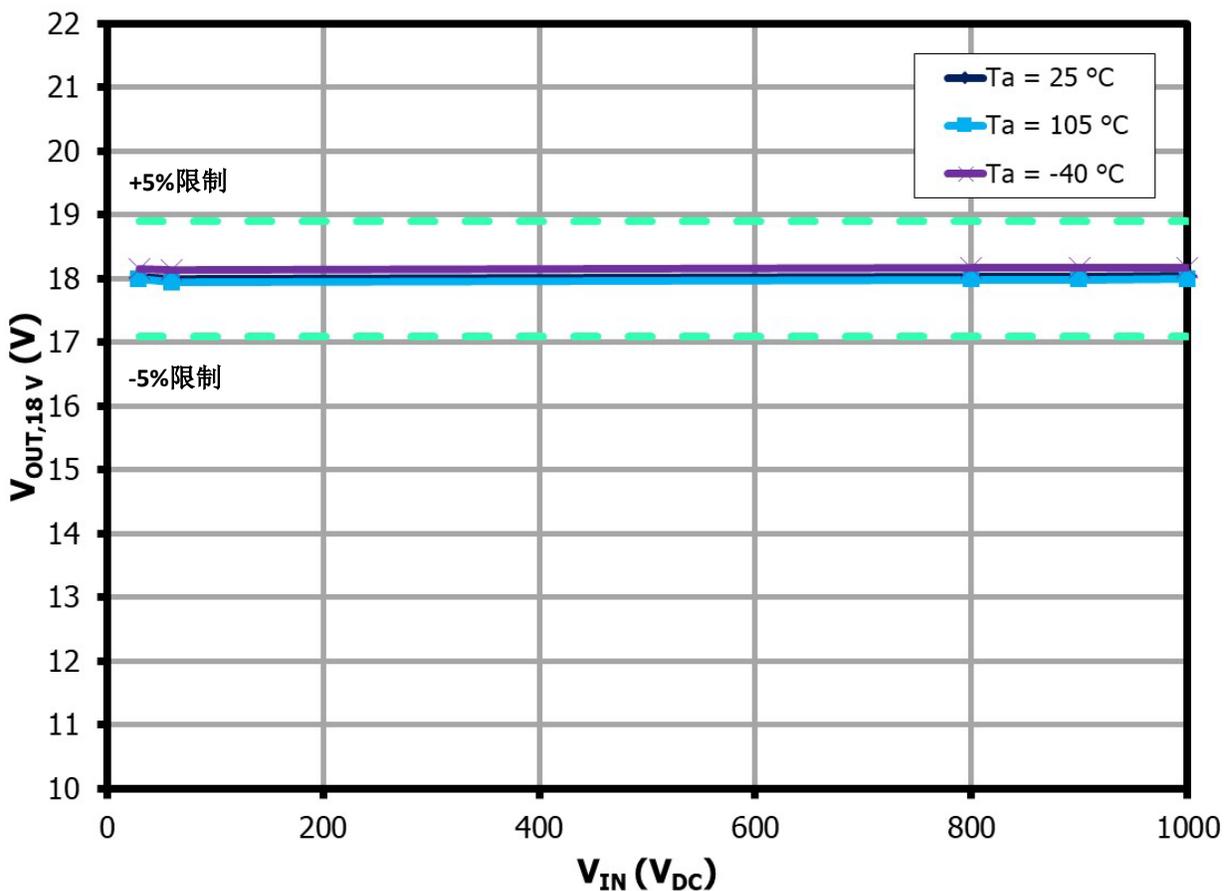


图48 - 18V输出电压相对于输入电压的变化

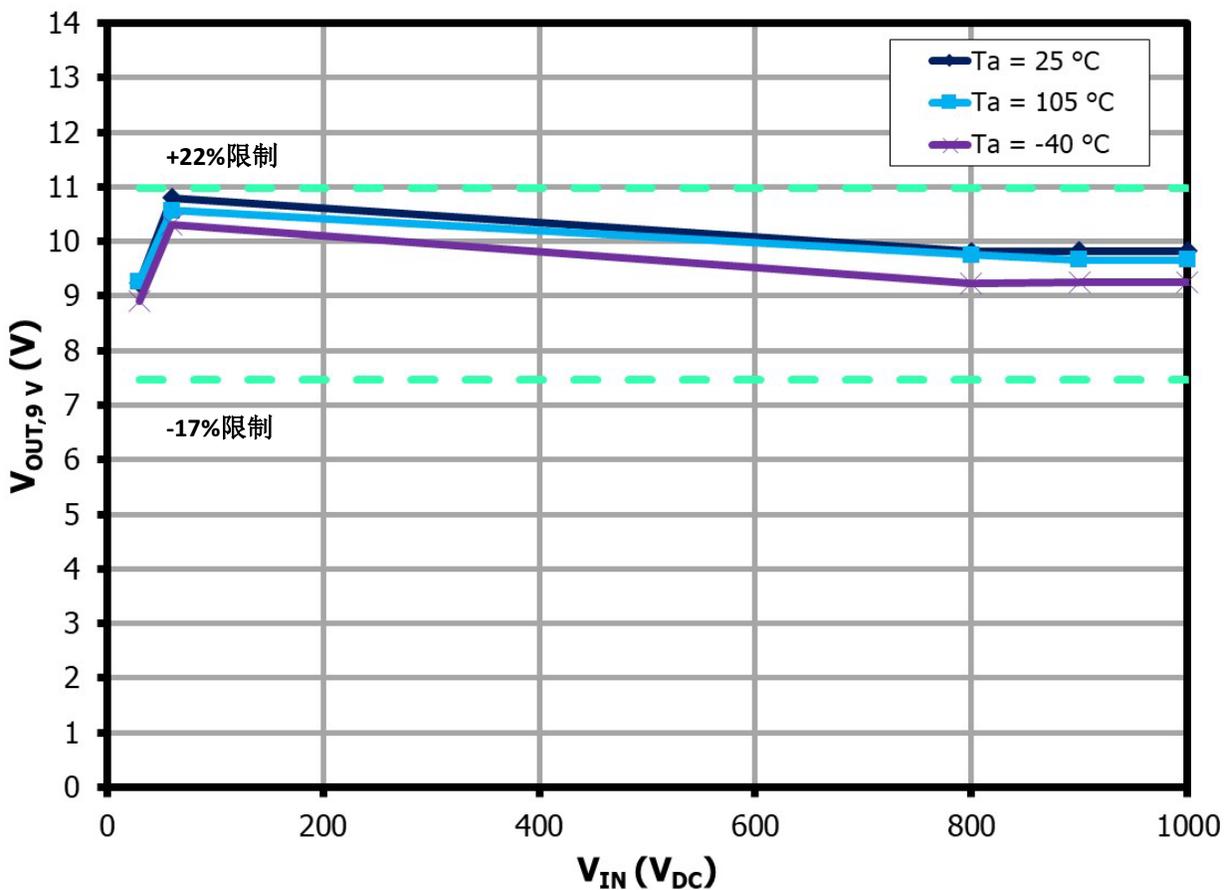


图49 - 9V输出电压相对于输入电压的变化

9.4.3 负载条件: 18V = 最小值 / 9V = 最大值

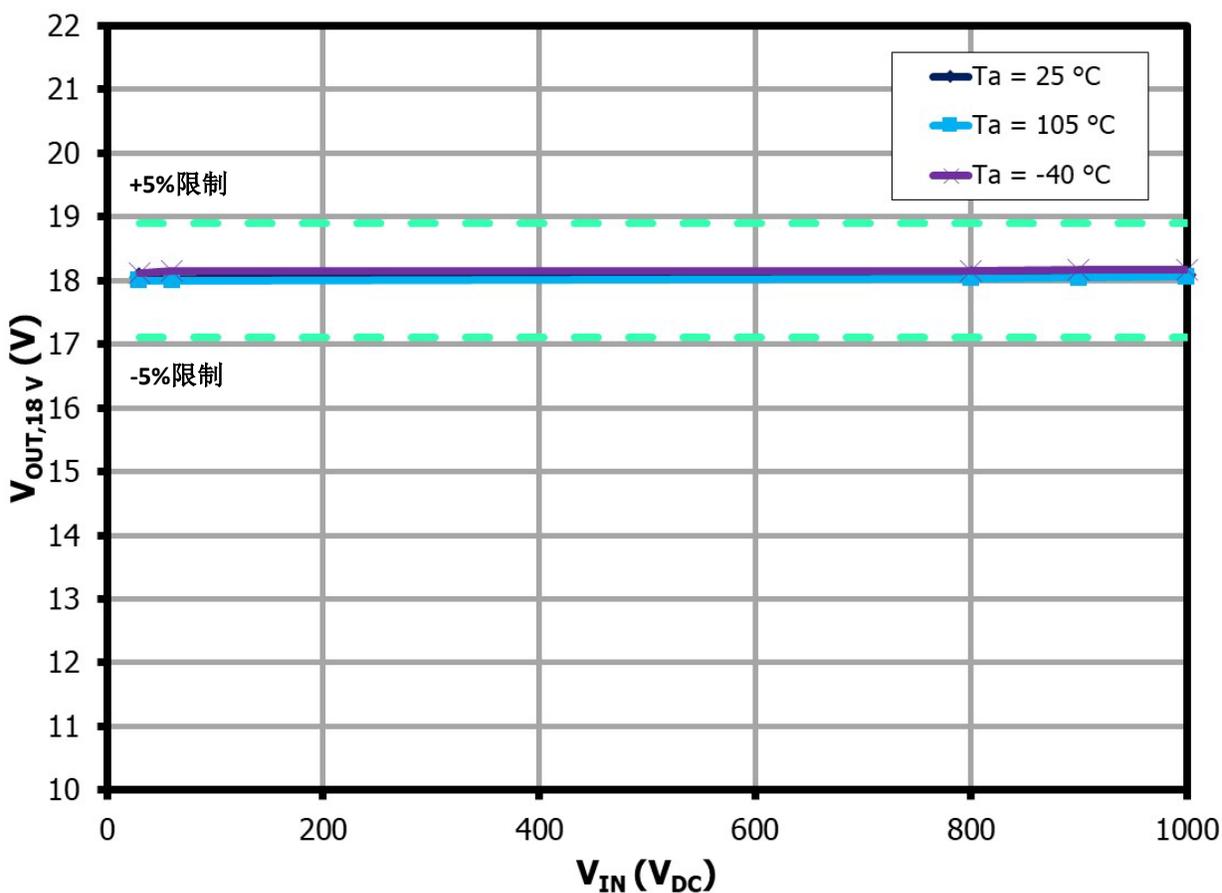


图50 - 18V输出电压相对于输入电压的变化

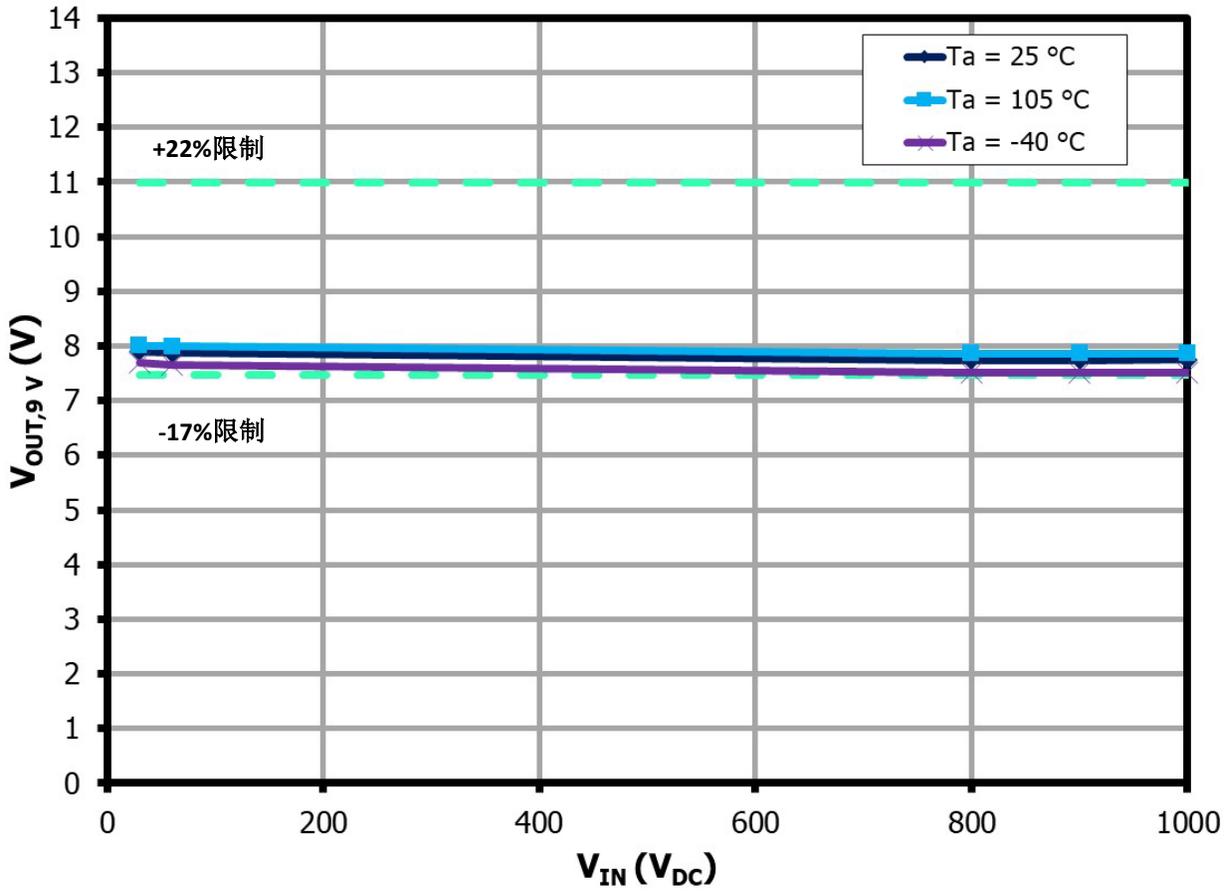


图51 - 9V输出电压相对于输入电压的变化

## 10 温升性能

### 10.1 105°C环境温度下的温升数据

电源置于热处理室内。在被测电源通电之前，将热处理室预热到105°C至少30分钟。在电源连续工作至少一个(1)小时以使元件温度稳定后进行以下测量。

关键元件	输入电压			
	30V	60V	800V	1000V
输入共模电感	118.8°C	124.1°C	126.4°C	127.5°C
变压器初级-次级导线	119.4°C	124.4°C	127.7°C	128.1°C
变压器次级-初级导线	119.2°C	124.0°C	127.3°C	127.8°C
变压器初级-空气导线	117.9°C	122.4°C	124.8°C	125.6°C
变压器磁芯	116.4°C	120.6°C	124.2°C	124.8°C
<b>18V SR FET</b>	116.1°C	119.8°C	120.5°C	121.8°C
次级缓冲电阻	115.5°C	118.8°C	121.7°C	122.1°C
<b>18V Cout</b>	113.9°C	116.9°C	117.1°C	118.1°C
<b>18V</b> 滤波电感	114.3°C	120.4°C	118.5°C	120.8°C
<b>18V</b> 滤波电容	113.4°C	116.1°C	115.5°C	116.4°C
<b>9V</b> 续流二极管	123.7°C	125.2°C	125.3°C	125.5°C
初级缓冲器电阻	118.3°C	121.1°C	120.0°C	120.6°C
<b>INN3949CQ</b>	121.4°C	124.6°C	129.1°C <sup>6</sup>	131.1°C
环境温度	104.9°C	105.9°C	103.6°C	103.5°C

表8 - 在105°C工作温度下DER-956Q关键元件温度汇总

<sup>6</sup> 建议在实际设计中增加散热面积或在器件源极面积和壳体之间使用散热片或导热垫。

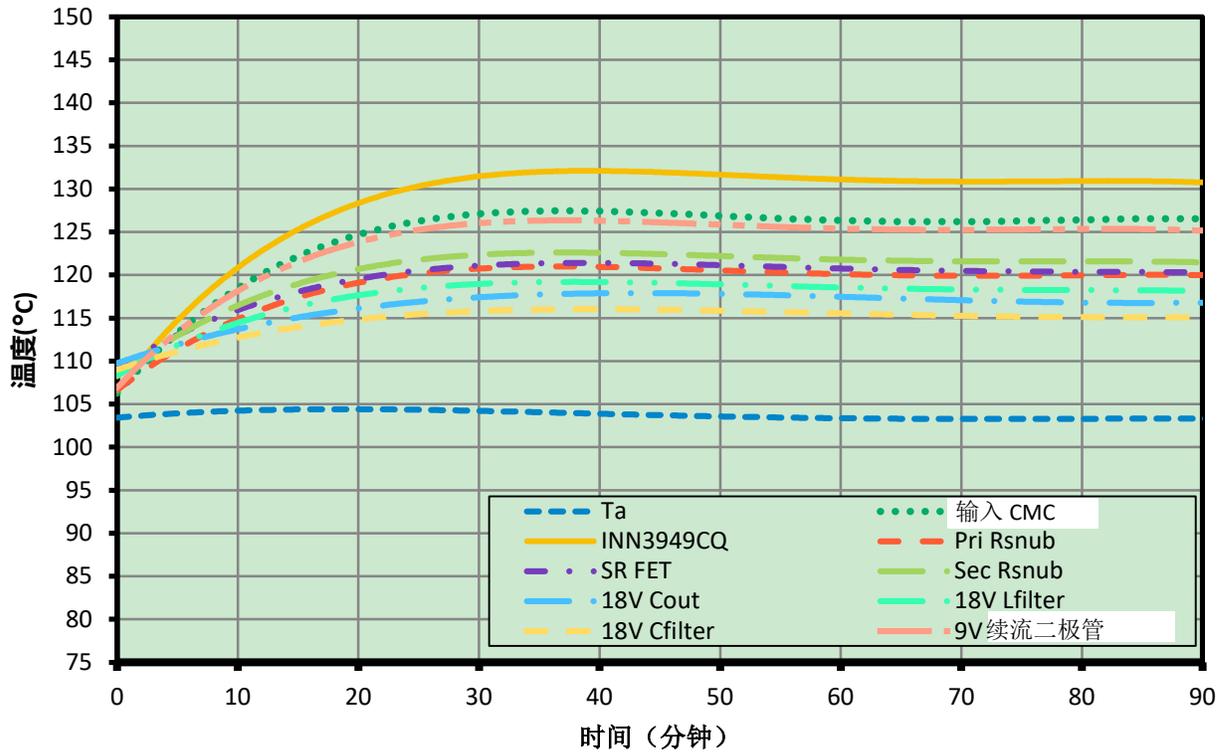


图52 - DER-956Q关键元件在1000V<sub>DC</sub>输入、13W输出下的工作温度

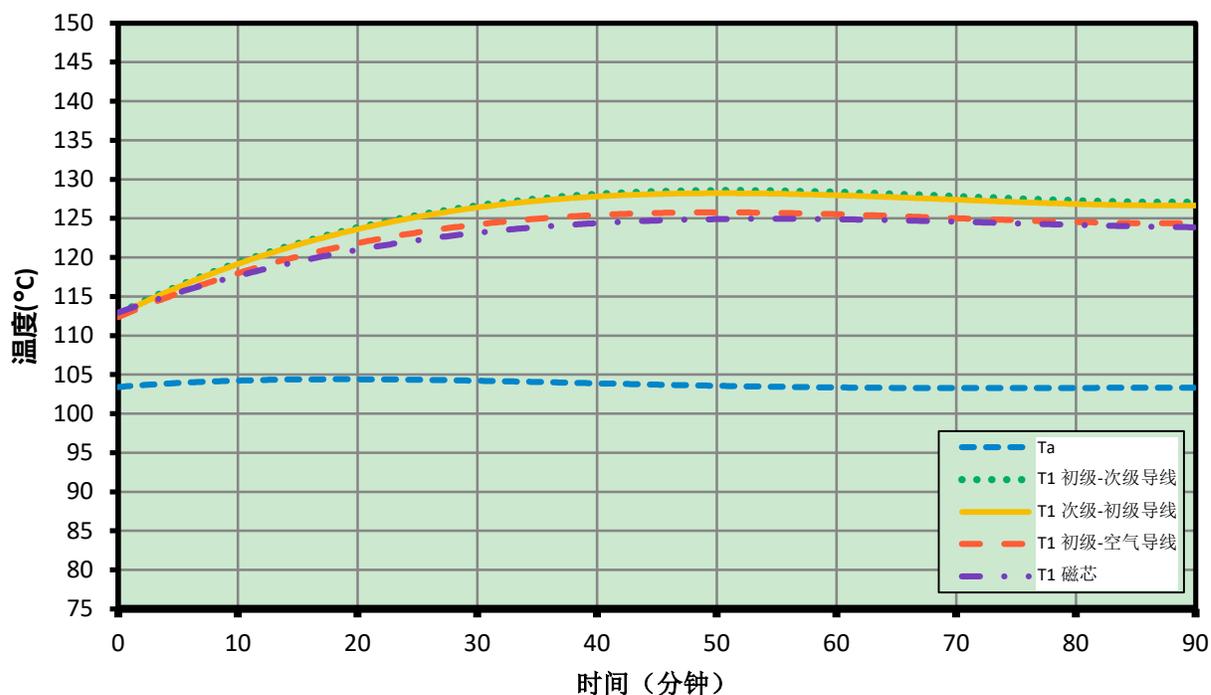


图53 - DER-956Q T1反激式变压器在1000V<sub>DC</sub>输入、13W输出下的工作温度

## 10.2 25°C环境温度下的温升数据

以下热像图是在将被测电源置于丙烯酸壳体内连续工作1小时以最大程度减少任何外部/强制风冷的影响后使用Fluke热像仪捕获到的。

关键元件	输入电压			
	30V	60V	800V	1000V
输入共模电感	43.6°C	47.2°C	68.9°C	77.3°C
变压器磁芯	40.6°C	44.3°C	49.6°C	52.5°C
变压器导线	42.0°C	46.5°C	51.6°C	54.4°C
<b>18V SR FET</b>	37.6°C	40.5°C	47.0°C	50.0°C
次级缓冲电阻	37.3°C	39.9°C	48.2°C	51.9°C
<b>18V Cout</b>	36.0°C	40.6°C	44.7°C	44.4°C
<b>18V</b> 滤波电容	35.6°C	38.0°C	41.7°C	42.7°C
<b>9V</b> 续流二极管	50.7°C	51.0°C	53.5°C	55.3°C
初级缓冲器电阻	50.8°C	57.0°C	59.7°C	62.3°C
<b>INN3949CQ</b>	42.6°C	46.1°C	58.7°C	66.5°C
环境温度	31.0°C	30.0°C	30.8°C	31.2°C

表9 - 在25°C工作温度下DER-956Q关键元件温度汇总



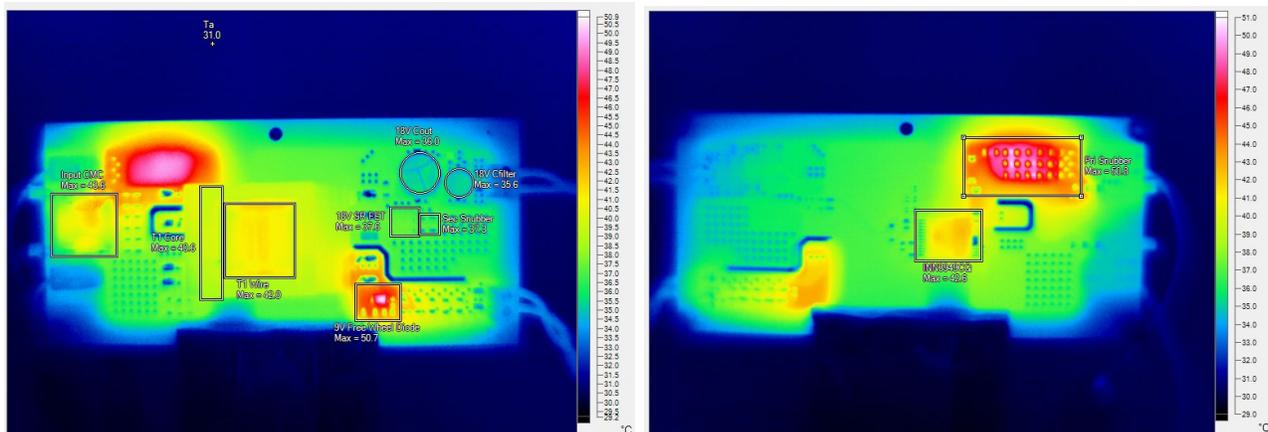


图54 - 30V<sub>DC</sub>输入、13W输出热像图，顶面PCB（左）和底面PCB（右）

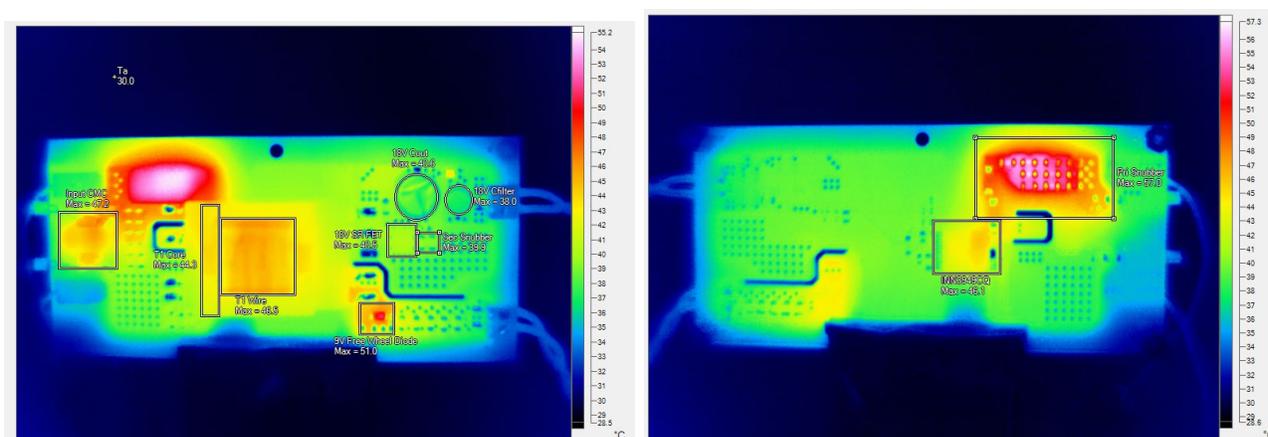


图55 - 60V<sub>DC</sub>输入、13W输出热像图，顶面PCB（左）和底面PCB（右）

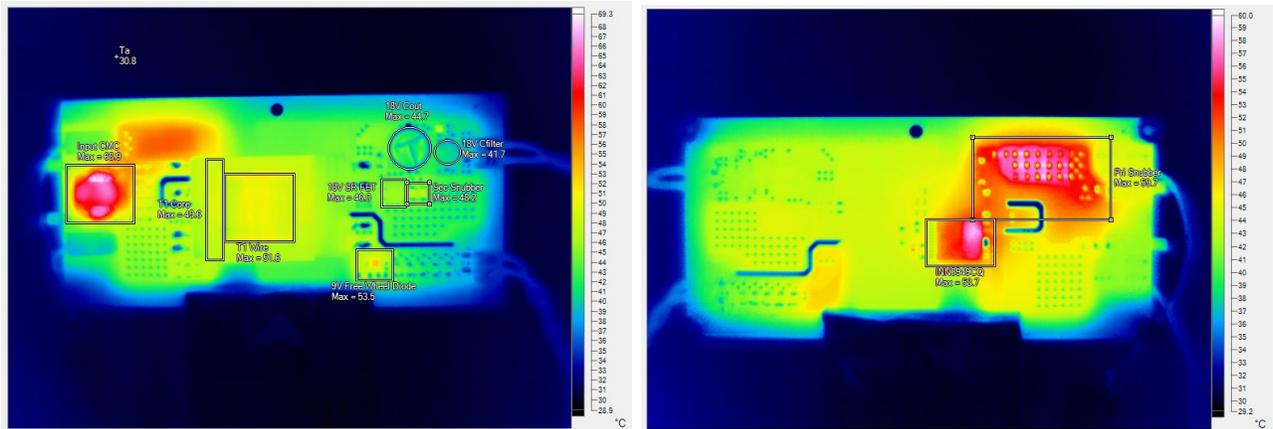


图56 - 800V<sub>DC</sub>输入、13W输出热像图，顶面PCB（左）和底面PCB（右）

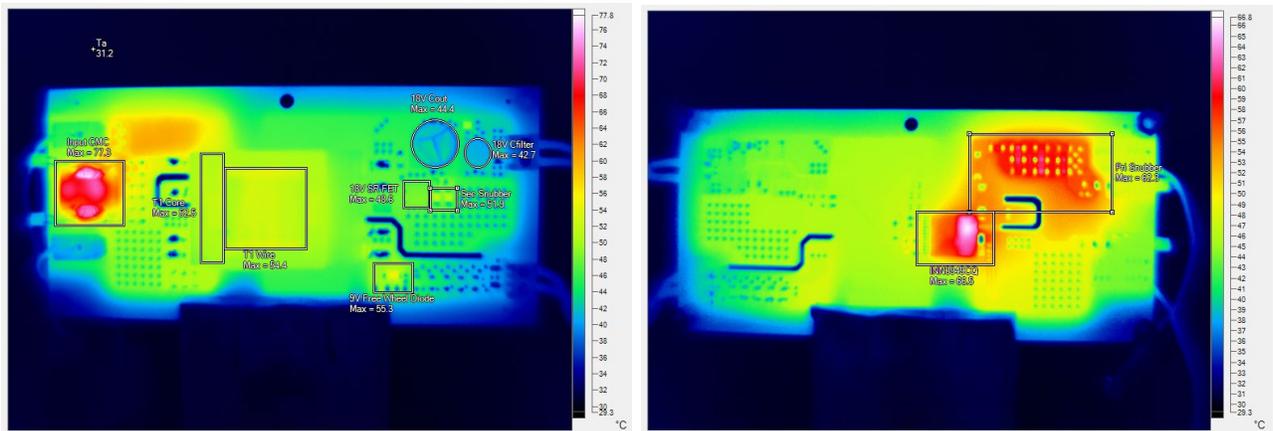


图57 - 1000V<sub>DC</sub>输入、13W输出热像图，顶面PCB（左）和底面PCB（右）

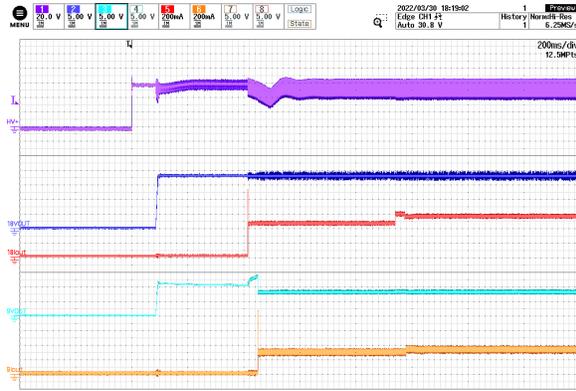
## 11 波形

### 11.1 启机波形

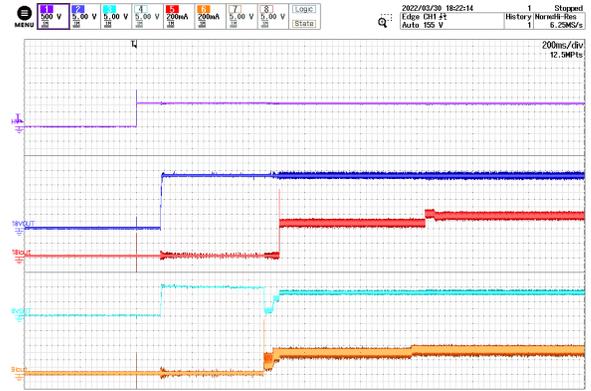
#### 11.1.1 25°C环境温度

以下测量是通过将电源插入完全充电的直流母线电容<sup>7</sup>下进行的，以测试HV+输入电压。

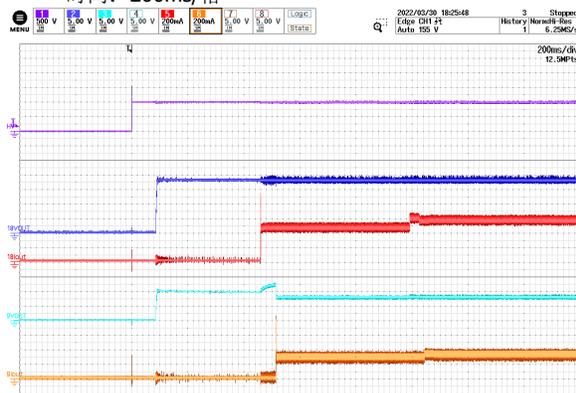
##### 11.1.1.1 输出电压和电流<sup>8,9</sup>



a. CH1: HV+, 20V/格  
 CH2: 18V, 5V/格  
 CH3: 9V, 5V/格  
 CH5: 18V I<sub>OUT</sub>, 200mA/格  
 CH6: 9V I<sub>OUT</sub>, 200mA/格  
 时间: 200ms/格



b. CH1: HV+, 500V/格  
 CH2: 18V, 5V/格  
 CH3: 9V, 5V/格  
 CH5: 18V I<sub>OUT</sub>, 200mA/格  
 CH6: 9V I<sub>OUT</sub>, 200mA/格  
 时间: 200ms/格



c. CH1: HV+, 500V/格  
 CH2: 18V, 5V/格  
 CH3: 9V, 5V/格  
 CH5: 18V I<sub>OUT</sub>, 200mA/格  
 CH6: 9V I<sub>OUT</sub>, 200mA/格  
 时间: 200ms/格

图58 - 输出电压和电流

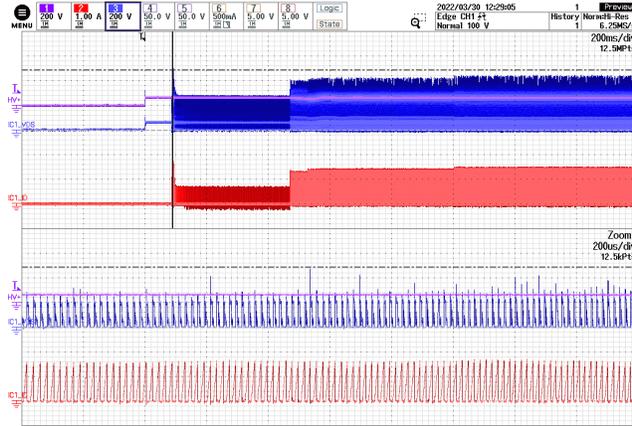
- a. 60 V<sub>DC</sub>输入，18V = 最大值，9V = 最大值输出
- b. 800 V<sub>DC</sub>输入，18V = 最大值，9V = 最大值输出
- c. 1000 V<sub>DC</sub>输入，18V = 最大值，9V = 最大值输出

<sup>7</sup> 通过在直流母线电容和被测电源之间添加一个 10 Ω 串联电阻来限制浪涌电流。

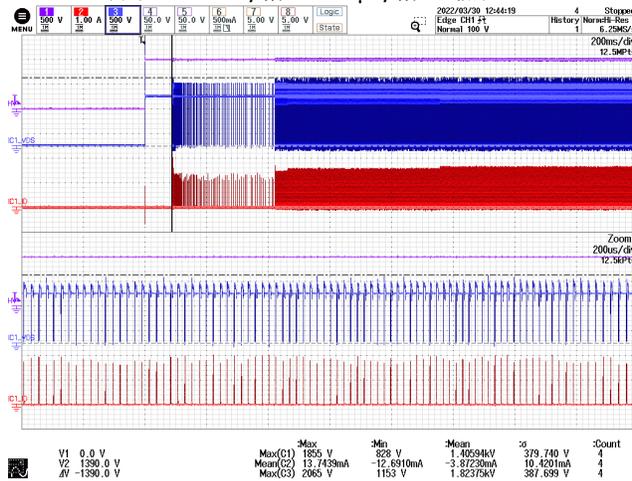
<sup>8</sup> HV+ 波形上的电压骤降是由于从直流母线电容到被测电源的有效电压阻抗造成的。

<sup>9</sup> I<sub>OUT</sub> 波形上出现的小步长增加是由于电子负载的 CR（恒定电阻）模式响应造成的。输出电压和输出电流上升沿之间的延迟也是由于电子负载响应造成的。

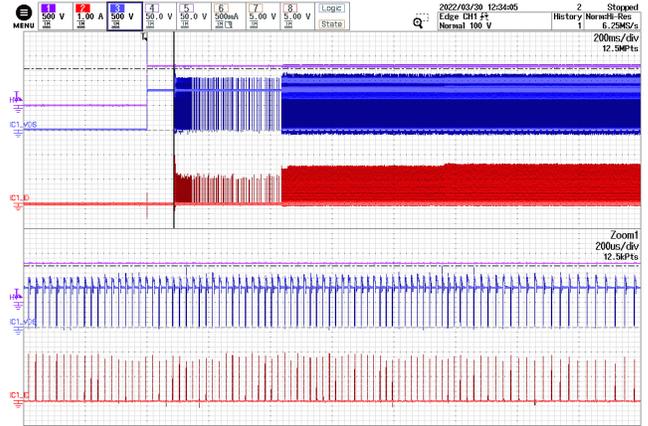
11.1.1.2 初级漏极电压和电流<sup>10,11</sup>



a. CH1: HV+, 200V/格  
 CH2: Id, 1A/格  
 CH3: V<sub>DS</sub>, 200V/格  
 时间: 200ms/格 (200µs/格, 缩放)



c. CH1: HV+, 500V/格  
 CH2: Id, 1A/格  
 CH3: V<sub>DS</sub>, 500V/格  
 时间: 200ms/格 (200µs/格, 缩放)



b. CH1: HV+, 500V/格  
 CH2: Id, 1A/格  
 CH3: V<sub>DS</sub>, 500V/格  
 时间: 200ms/格 (200µs/格, 缩放)

图59 - 初级漏极电压和电流

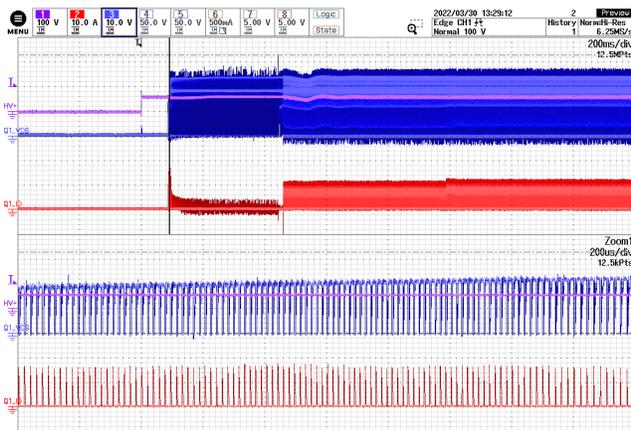
- a. 60 V<sub>DC</sub>输入, 18V = 最大值, 9V = 最大值输出
- b. 800 V<sub>DC</sub>输入, 18V = 最大值, 9V = 最大值输出
- c. 1000 V<sub>DC</sub>输入, 18V = 最大值, 9V = 最大值输出

<sup>10</sup> HV+ 导通和 InnoSwitch 开始开关之间的时间是由于 InnoSwitch 的“等待和侦听”时间造成的。

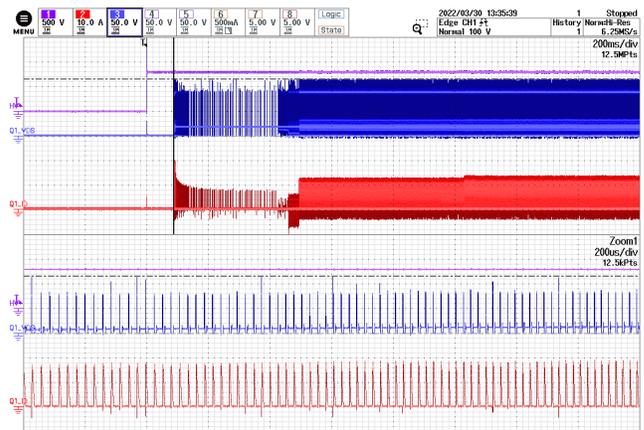
<sup>11</sup> InnoSwitch 的开关频率变化是由于电子负载的 CR (恒定电阻) 模式响应造成的。



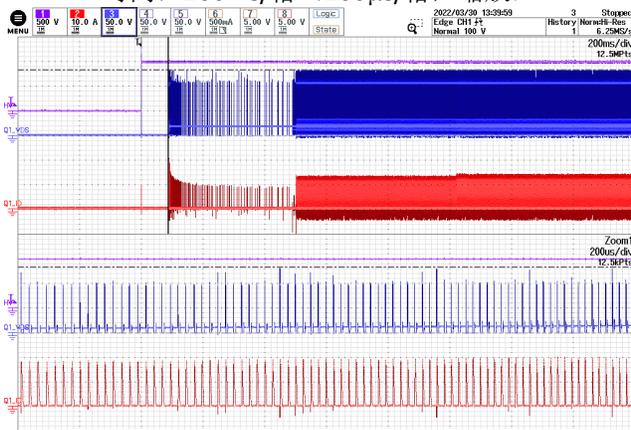
### 11.1.1.3 SR FET漏极电压和电流<sup>12,13</sup>



a. CH1: HV+, 100V/格  
 CH2:  $I_D$ , 10A/格  
 CH3:  $V_{DS}$ , 10V/格  
 时间: 200ms/格 (200 $\mu$ s/格, 缩放)



b. CH1: HV+, 500V/格  
 CH2:  $I_D$ , 10A/格  
 CH3:  $V_{DS}$ , 50V/格  
 时间: 200ms/格 (200 $\mu$ s/格, 缩放)



c. CH1: HV+, 500V/格  
 CH2:  $I_D$ , 10A/格  
 CH3:  $V_{DS}$ , 50V/格  
 时间: 200ms/格 (200 $\mu$ s/格, 缩放)

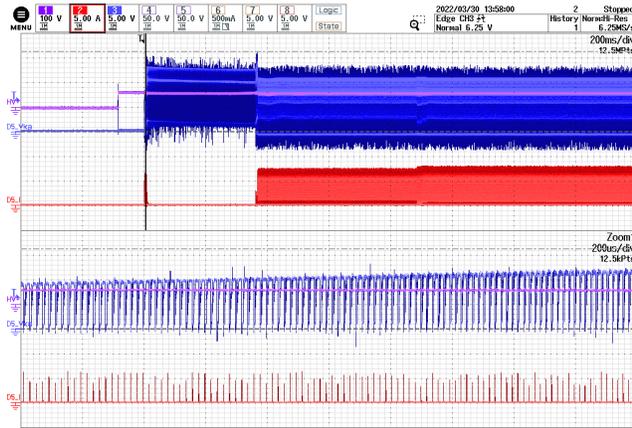
图60 - SR FET漏极电压和电流

- a. 60  $V_{DC}$ 输入, 18V = 最大值, 9V = 最大值输出
- b. 800  $V_{DC}$ 输入, 18V = 最大值, 9V = 最大值输出
- c. 1000  $V_{DC}$ 输入, 18V = 最大值, 9V = 最大值输出

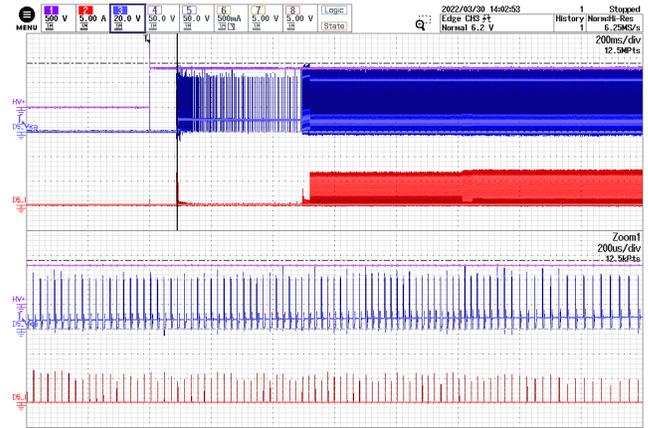
<sup>12</sup>HV+导通和 SR FET 开始开关之间的时间是由于 InnoSwitch 的“等待和侦听”时间造成的。

<sup>13</sup>SR FET 开关频率变化是由于电子负载的 CR (恒定电阻) 模式响应造成的。

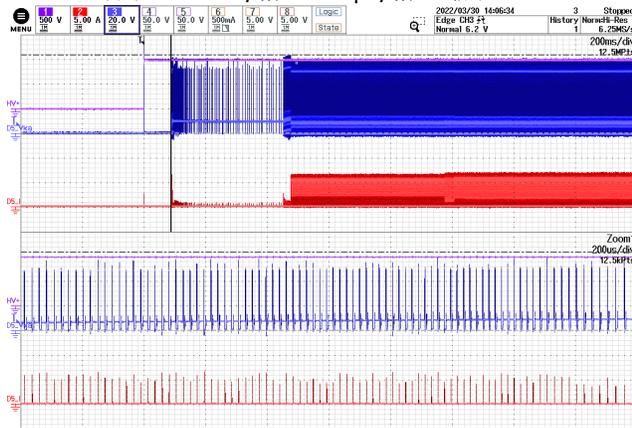
11.1.1.4 9V输出二极管电压和电流<sup>14,15</sup>



a. CH1: HV+, 100V/格  
 CH2: ID, 5A/格  
 CH3: VKA, 5V/格  
 时间: 200ms/格 (200μs/格, 缩放)



b. CH1: HV+, 500V/格  
 CH2: ID, 5A/格  
 CH3: VKA, 20V/格  
 时间: 200ms/格 (200μs/格, 缩放)



c. CH1: HV+, 500V/格  
 CH2: ID, 5A/格  
 CH3: VKA, 20V/格  
 时间: 200ms/格 (200μs/格, 缩放)

图61 - 9V续流二极管极电压和电流

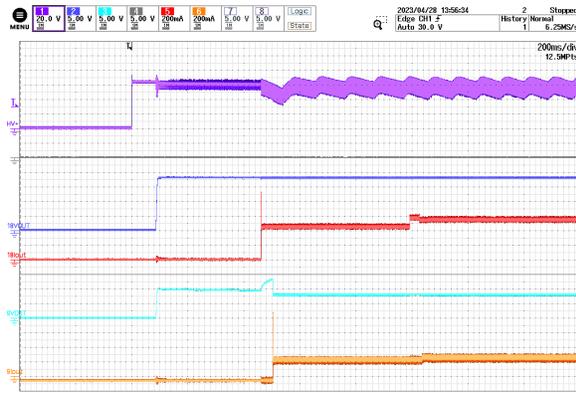
- a. 60 V<sub>Dc</sub>输入, 18V = 最大值, 9V = 最大值输出
- b. 800 V<sub>Dc</sub>输入, 18V = 最大值, 9V = 最大值输出
- c. 1000 V<sub>Dc</sub>输入, 18V = 最大值, 9V = 最大值输出

<sup>14</sup>HV+导通和 9V 输出二极管开始开关之间的时间是由于 InnoSwitch 的“等待和侦听”时间造成的。  
<sup>15</sup>9V 输出二极管的开关频率变化是由于电子负载的 CR (恒定电阻) 模式响应造成的。



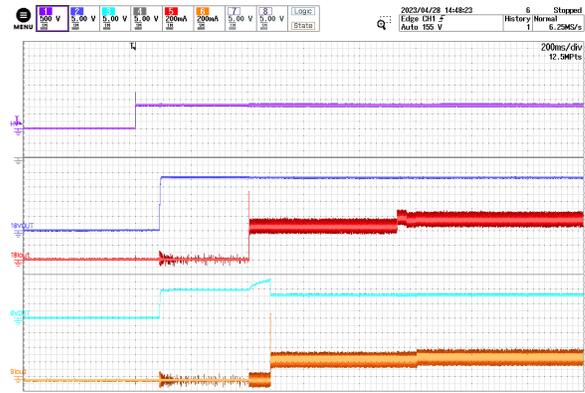
11.1.2 -40°C环境温度

11.1.2.1 输出电压和电流<sup>16,17</sup>



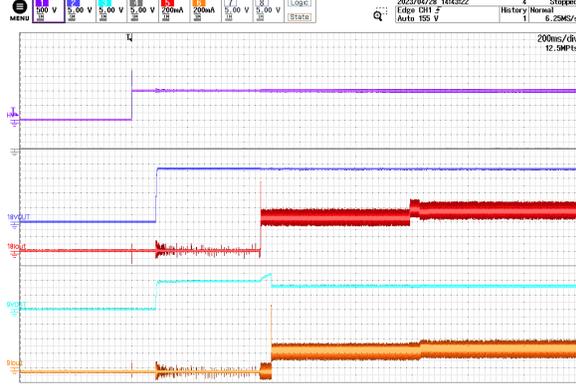
Max	Min	Mean	Std	Count	
Max(C1)	74.1 V	74.1 V	74.1000 V	0.00000 V	2
Max(C2)	18.6 V	18.6 V	18.6000 V	0.00000 V	2
Max(C3)	13.4 V	10.4 V	11.3875 V	1.51250 V	2

d. CH1: HV+, 20V/格  
 CH2: 18V, 5V/格  
 CH3: 9V, 5V/格  
 CH5: 18V I<sub>OUT</sub>, 200mA/格  
 CH6: 9V I<sub>OUT</sub>, 200mA/格  
 时间: 200ms/格



Max	Min	Mean	Std	Count	
Max(C1)	138.0 V	122.0 V	1.3321kV	172.451 V	6
Max(C2)	18.8 V	18.6 V	18.6521 V	74.4482mV	6
Max(C3)	13.4 V	10.0 V	11.3554 V	1.11750 V	6

e. CH1: HV+, 500V/格  
 CH2: 18V, 5V/格  
 CH3: 9V, 5V/格  
 CH5: 18V I<sub>OUT</sub>, 200mA/格  
 CH6: 9V I<sub>OUT</sub>, 200mA/格  
 时间: 200ms/格



Max	Min	Mean	Std	Count	
Max(C1)	183.0 V	122.0 V	1.3322kV	195.738 V	4
Max(C2)	18.8 V	18.6 V	18.6781 V	78.2420mV	4
Max(C3)	12.4 V	10.0 V	11.3031 V	348.162mV	4

f. CH1: HV+, 500V/格  
 CH2: 18V, 5V/格  
 CH3: 9V, 5V/格  
 CH5: 18V I<sub>OUT</sub>, 200mA/格  
 CH6: 9V I<sub>OUT</sub>, 200mA/格  
 时间: 200ms/格

图62 - 输出电压和电流

- d. 60 V<sub>DC</sub>输入, 18V = 最大值, 9V = 最大值输出
- e. 80 V<sub>DC</sub>输入, 18V = 最大值, 9V = 最大值输出
- f. 100 V<sub>DC</sub>输入, 18V = 最大值, 9V = 最大值输出

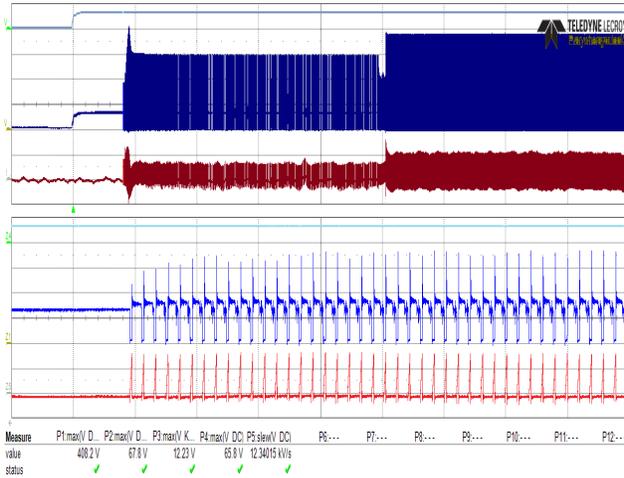
<sup>16</sup>HV+波形上的电压骤降是由于从直流母线电容到被测电源的有效电压阻抗造成的。

<sup>17</sup>I<sub>OUT</sub>波形上出现的小步长增加是由于电子负载的 CR (恒定电阻) 模式响应造成的。输出电压和输出电流上升沿之间的延迟也是由于电子负载响应造成的。

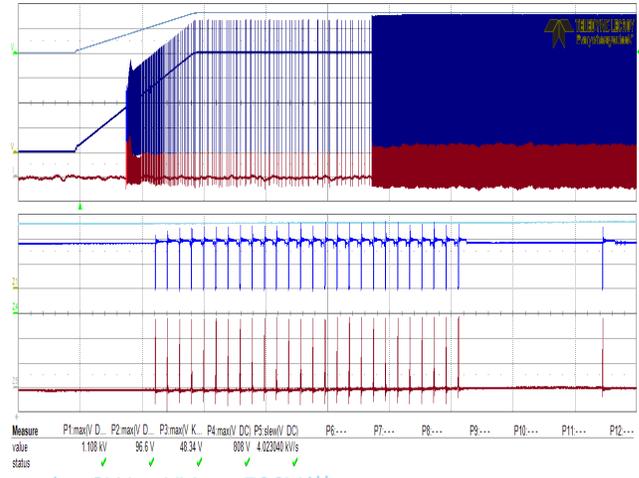


以下测量是使用500ns的直流母线电压上升时间（500ns 内HV+的10%至90%）进行的。

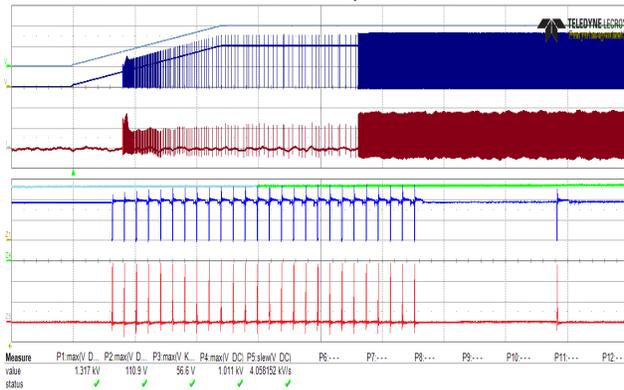
11.1.2.2 初级漏极电压和电流<sup>18,19</sup>



a. CH1: HV+, 100V/格  
 CH2:  $I_D$ , 1A/格  
 CH3:  $V_{DS}$ , 100V/格  
 时间: 100ms/格 (200 $\mu$ s/格, 缩放)



b. CH1: HV+, 500V/格  
 CH2:  $I_D$ , 1A/格  
 CH3:  $V_{DS}$ , 200V/格  
 时间: 100ms/格 (200 $\mu$ s/格, 缩放)



c. CH1: HV+, 500V/格  
 CH2:  $I_D$ , 1A/格  
 CH3:  $V_{DS}$ , 500V/格  
 时间: 100ms/格 (200 $\mu$ s/格, 缩放)

图63 - 初级漏极电压和电流

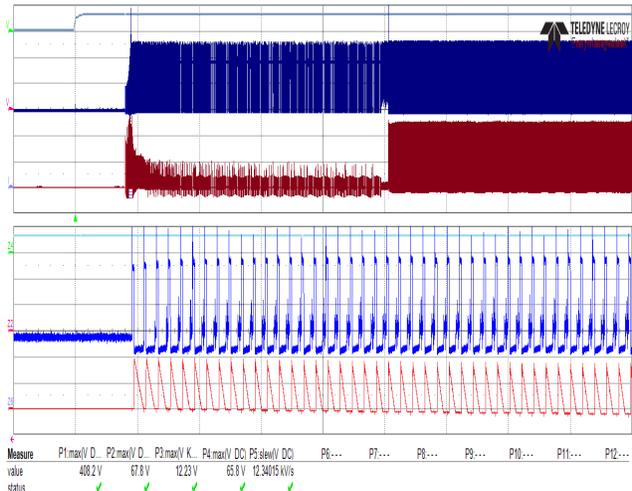
- a. 60 V<sub>DC</sub>输入, 18V = 最大值, 9V = 最大值输出
- b. 800 V<sub>DC</sub>输入, 18V = 最大值, 9V = 最大值输出
- c. 1000 V<sub>DC</sub>输入, 18V = 最大值, 9V = 最大值输出

<sup>18</sup> HV+ 导通和 InnoSwitch 开始开关之间的时间是由于 InnoSwitch 的“等待和侦听”时间造成的。

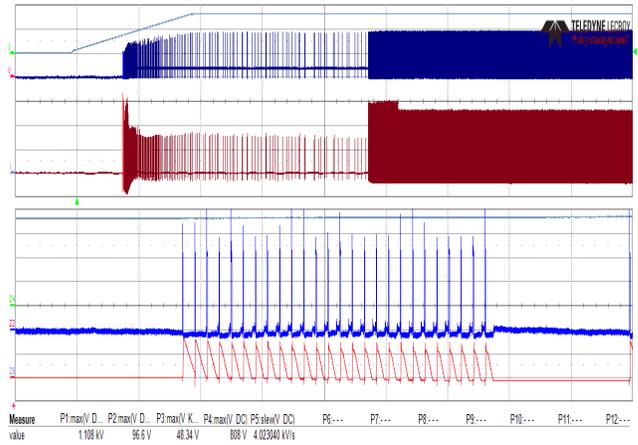
<sup>19</sup> InnoSwitch 的开关频率变化是由于电子负载的 CR（恒定电阻）模式响应造成的。



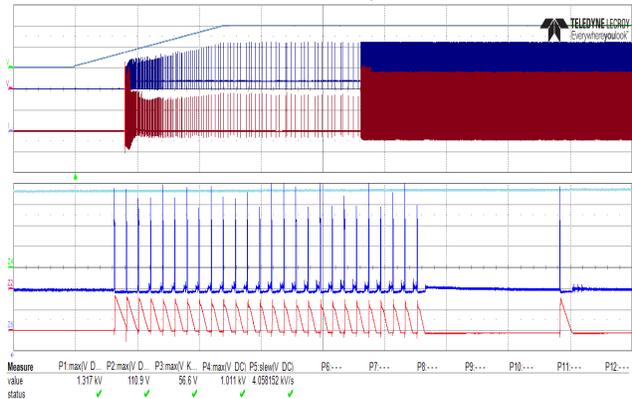
### 11.1.2.3 SR FET漏极电压和电流<sup>20,21</sup>



a. CH1: HV+, 100V/格  
 CH2:  $I_D$ , 1A/格  
 CH3:  $V_{DS}$ , 10V/格  
 时间: 100ms/格 (200 $\mu$ s/格, 缩放)



b. CH1: HV+, 500V/格  
 CH2:  $I_D$ , 5A/格  
 CH3:  $V_{DS}$ , 50V/格  
 时间: 100ms/格 (200 $\mu$ s/格, 缩放)



c. CH1: HV+, 500V/格  
 CH2:  $I_D$ , 5A/格  
 CH3:  $V_{DS}$ , 50V/格  
 时间: 100ms/格 (200 $\mu$ s/格, 缩放)

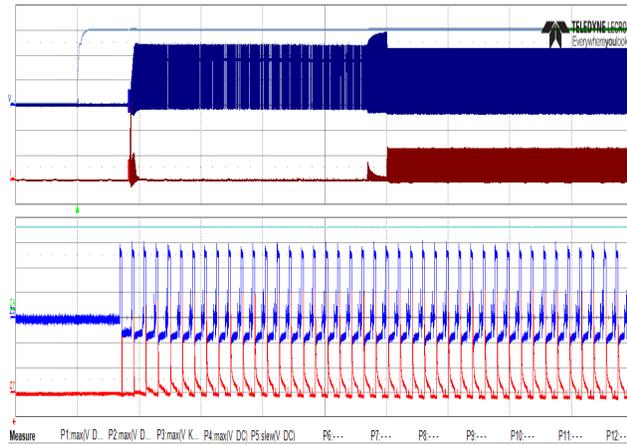
图64 - SR FET漏极电压和电流

- a. 60 V<sub>DC</sub>输入, 18V = 最大值, 9V = 最大值输出
- b. 800 V<sub>DC</sub>输入, 18V = 最大值, 9V = 最大值输出
- c. 1000 V<sub>DC</sub>输入, 18V = 最大值, 9V = 最大值输出

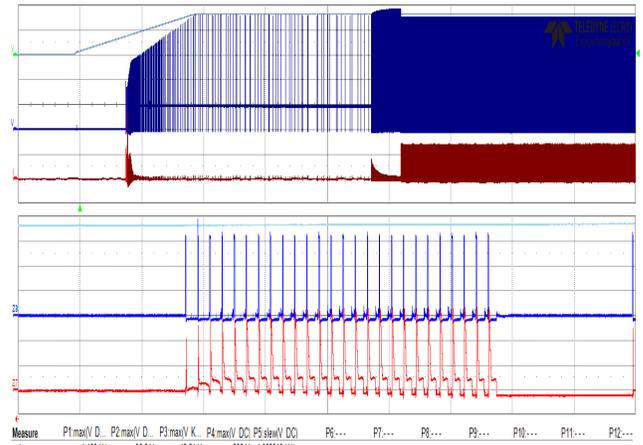
<sup>20</sup>HV+导通和 SR FET 开始开关之间的时间是由于 InnoSwitch 的“等待和侦听”时间造成的。

<sup>21</sup>SR FET 开关频率变化是由于电子负载的 CR (恒定电阻) 模式响应造成的。

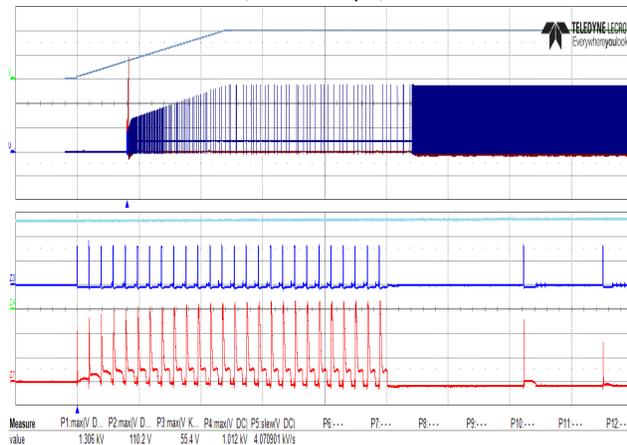
11.1.2.4 9V输出二极管电压和电流<sup>22,23</sup>



a. CH1: HV+, 20V/格  
 CH2:  $I_D$ , 5A/格  
 CH3:  $V_{KA}$ , 5V/格  
 时间: 100ms/格 (200µs/格, 缩放)



b. CH1: HV+, 500V/格  
 CH2:  $I_D$ , 5A/格  
 CH3:  $V_{KA}$ , 10V/格  
 时间: 100ms/格 (200µs/格, 缩放)



c. CH1: HV+, 500V/格  
 CH2:  $I_D$ , 5A/格  
 CH3:  $V_{KA}$ , 20V/格  
 时间: 100ms/格 (200µs/格, 缩放)

图65 - 9V续流二极管极电压和电流

- a. 60 V<sub>DC</sub>输入, 18V = 最大值, 9V = 最大值输出
- b. 800 V<sub>DC</sub>输入, 18V = 最大值, 9V = 最大值输出
- c. 1000 V<sub>DC</sub>输入, 18V = 最大值, 9V = 最大值输出

<sup>22</sup>HV+ 导通和 9V 输出二极管开始开关之间的时间是由于 InnoSwitch 的“等待和侦听”时间造成的。  
<sup>23</sup>9V 输出二极管的开关频率变化是由于电子负载的 CR (恒定电阻) 模式响应造成的。



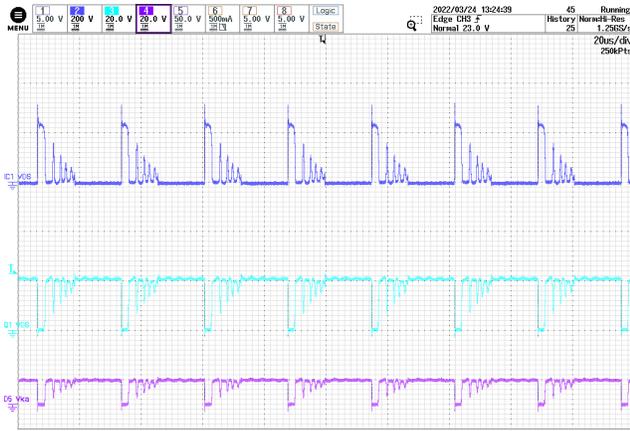
## 11.2 稳态应力波形

## 11.2.1 在105°C环境温度下的开关波形

## 11.2.1.1 正常工作情况

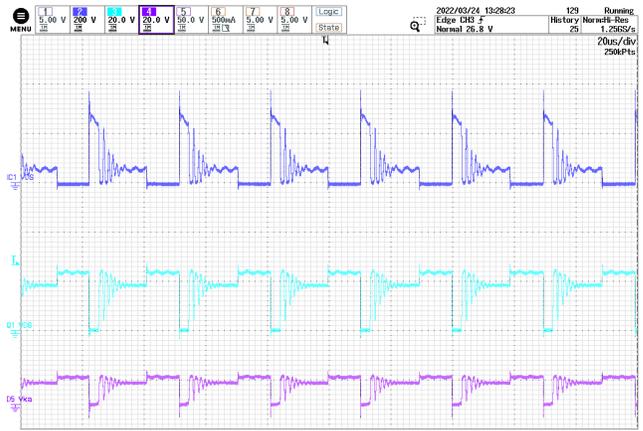
105° C环境温度下的稳态开关波形								
输入	18V输出	9V输出	INN3949CQ		18V SR FET		9V续流二极管	
V <sub>IN</sub> (V)	I <sub>OUT</sub> (mA)	I <sub>OUT</sub> (mA)	IC1 V <sub>DS</sub> (V)	V <sub>STRESS</sub> (%)	Q1 V <sub>DS</sub> (V)	V <sub>STRESS</sub> (%)	D5 (V <sub>KA</sub> )	V <sub>STRESS</sub> (%)
30	222	22	323	19.0	23.2	15.5	12.4	12.4
	166	333	318	18.7	23.2	15.5	11.1	11.1
	222	333	320	18.8	23.5	15.7	11.6	11.6
60	555	22	391	23.0	27.3	18.2	16.1	16.1
	166	333	351	20.6	27.2	18.1	13.3	13.3
	555	333	382	22.5	27.8	18.5	14	14.0
800	555	22	1090	64.1	111.5	74.3	59.5	59.5
	166	333	1080	63.5	111.8	74.5	57	57.0
	555	333	1140	67.1	112.1	74.7	57.5	57.5
1000	555	22	1301	76.5	120.5	80.3	69.5	69.5
	166	333	1270	74.7	122.6	81.7	66.4	66.4
	555	333	1299	76.4	120	80.0	68.5	68.5

表10 - 105°C环境温度下的电压应力分析总结



Max	Min	Mean	σ	Count
Max(C2) 320.0 V	312.5 V	317.295 V	1.78478 V	44
Max(C3) 23.50 V	22.40 V	23.0175 V	285.262mV	44
Max(C4) 11.55 V	10.80 V	11.0341 V	197.649mV	44

30 V<sub>DC</sub>输入, 18V = 最大值, 9V = 最大值输出  
 CH2: INN3949CQ V<sub>DS</sub>, 200V/格  
 CH3: SR FET V<sub>DS</sub>, 20V/格  
 CH4: 9V续流二极管V<sub>KA</sub>, 20V/格  
 时间: 20µs/格



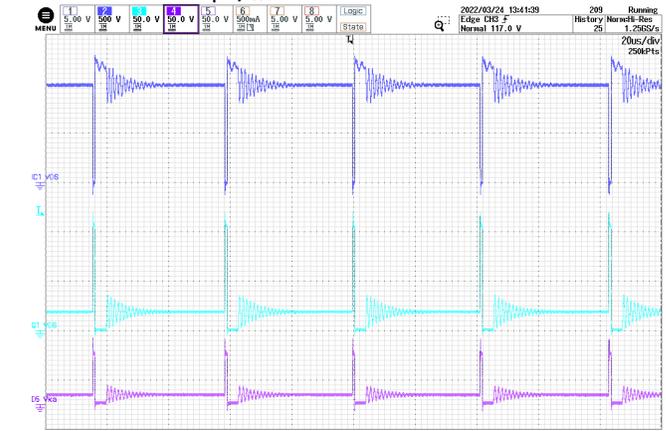
Max	Min	Mean	σ	Count
Max(C2) 382.0 V	369.0 V	374.702 V	2.26664 V	129
Max(C3) 27.05 V	25.58 V	27.1018 V	286.196mV	129
Max(C4) 14.00 V	13.10 V	13.6310 V	204.617mV	129

60 V<sub>DC</sub>输入, 18V = 最大值, 9V = 最大值输出  
 CH2: INN3949CQ V<sub>DS</sub>, 200V/格  
 CH3: SR FET V<sub>DS</sub>, 20V/格  
 CH4: 9V续流二极管V<sub>KA</sub>, 20V/格  
 时间: 20µs/格



Max	Min	Mean	σ	Count
Max(C2) 1140 V	1101 V	1122.26kV	8.73642 V	173
Max(C3) 112.1 V	110.5 V	111.321 V	333.369mV	173
Max(C4) 57.5 V	56.0 V	56.7673 V	204.429mV	173

800 V<sub>DC</sub>输入, 18V = 最大值, 9V = 最大值输出  
 CH2: INN3949CQ V<sub>DS</sub>, 500V/格  
 CH3: SR FET V<sub>DS</sub>, 50V/格  
 CH4: 9V续流二极管V<sub>KA</sub>, 50V/格  
 时间: 20µs/格

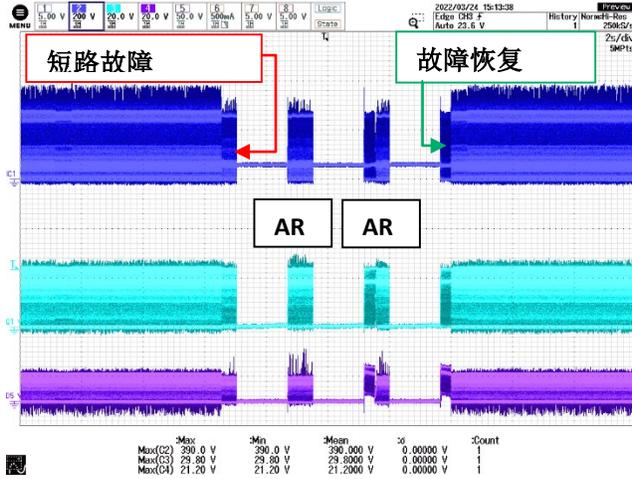


Max	Min	Mean	σ	Count
Max(C2) 1299 V	1276 V	1286.35kV	3.68628 V	209
Max(C3) 120.0 V	119.6 V	119.952 V	73.0498mV	209
Max(C4) 68.5 V	66.6 V	67.1411 V	305.659mV	209

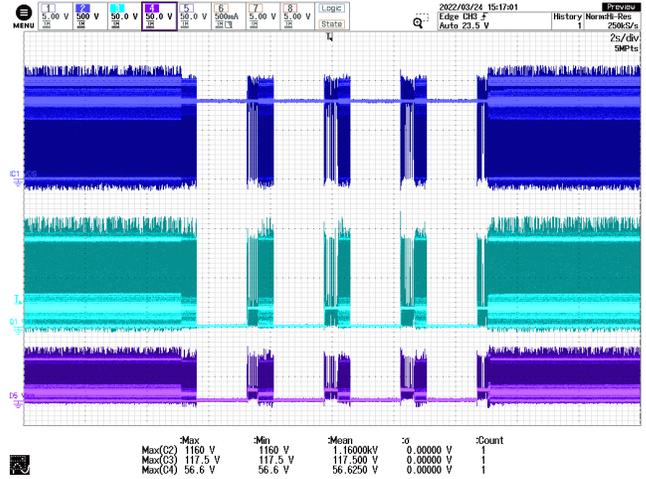
1000 V<sub>DC</sub>输入, 18V = 最大值, 9V = 最大值输出  
 CH2: INN3949CQ V<sub>DS</sub>, 500V/格  
 CH3: SR FET V<sub>DS</sub>, 50V/格  
 CH4: 9V续流二极管V<sub>KA</sub>, 50V/格  
 时间: 20µs/格

图66 - 在105°C环境温度下正常工作情况期间的开关波形

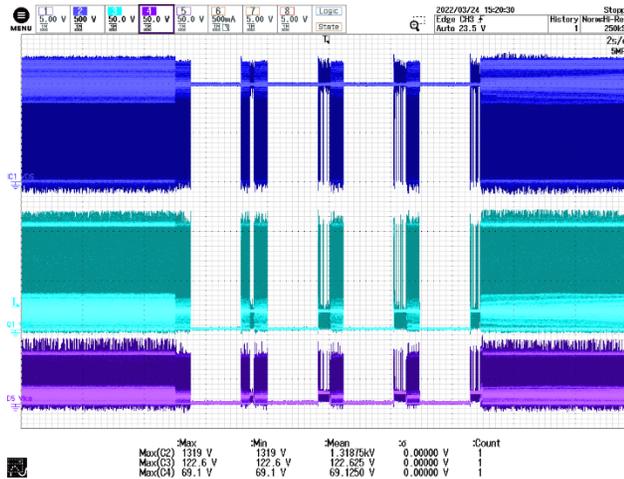
11.2.1.2 短路响应



60V<sub>DC</sub>输入,  
 18V = 最大值 (短路最大值) 9V = 最大值输出  
 CH2: INN3949CQ V<sub>DS</sub>, 200V/格  
 CH3: SR FET V<sub>DS</sub>, 20V/格  
 CH4: 9V续流二极管V<sub>KA</sub>, 20V/格  
 时间: 2s/格



80V<sub>DC</sub>输入,  
 18V = 最大值 (短路最大值) 9V = 最大值输出  
 CH2: INN3949CQ V<sub>DS</sub>, 500V/格  
 CH3: SR FET V<sub>DS</sub>, 50V/格  
 CH4: 9V续流二极管V<sub>KA</sub>, 50V/格  
 时间: 2s/格



1000V<sub>DC</sub>输入,  
 18V = 最大值 (短路最大值) 9V = 最大值输出  
 CH2: INN3949CQ V<sub>DS</sub>, 500V/格  
 CH3: SR FET V<sub>DS</sub>, 50V/格  
 CH4: 9V续流二极管V<sub>KA</sub>, 50V/格  
 时间: 2s/格

图67 - 在105°C环境温度下短路工作情况期间的开关波形

## 11.2.2 在25° C环境温度下的开关波形

### 11.2.2.1 初级漏极电压和电流

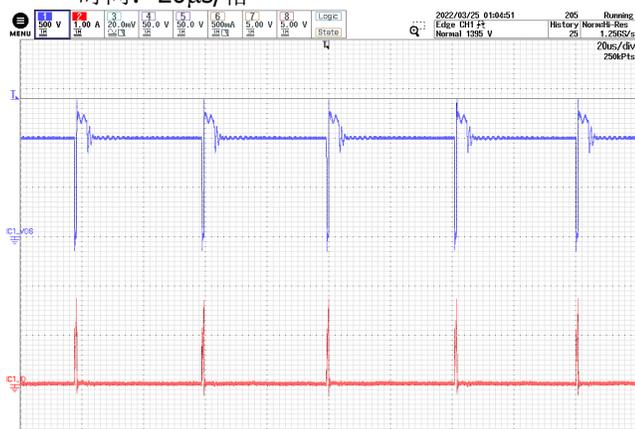


60 V<sub>DC</sub>输入, 18V = 最大值, 9V = 最大值输出

CH1: V<sub>DS</sub>, 200V/格

CH2: I<sub>D</sub>, 1A/格

时间: 20µs/格

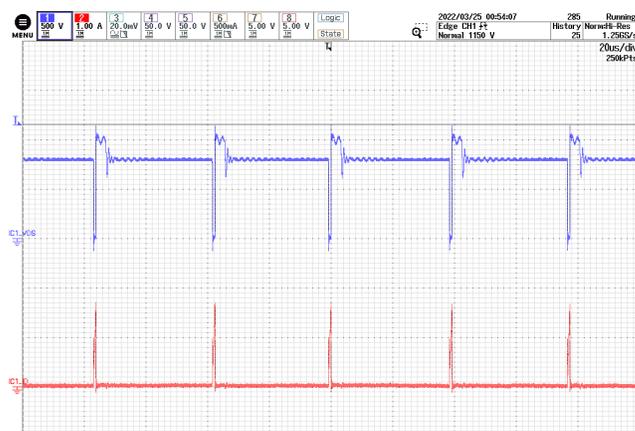


1000 V<sub>DC</sub>输入, 18V = 最大值, 9V = 最大值输出

CH1: V<sub>DS</sub>, 500V/格

CH2: I<sub>D</sub>, 1A/格

时间: 20µs/格

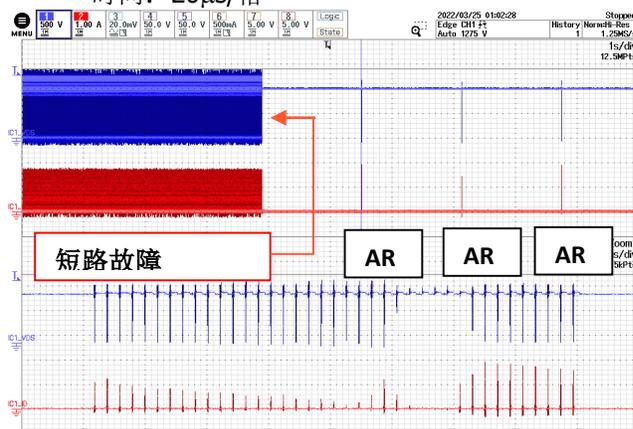


800 V<sub>DC</sub>输入, 18V = 最大值, 9V = 最大值输出

CH1: V<sub>DS</sub>, 500V/格

CH2: I<sub>D</sub>, 1A/格

时间: 20µs/格



1000 V<sub>DC</sub>输入, 18V = 最大值 (短路), 9V = 最大值输出

出

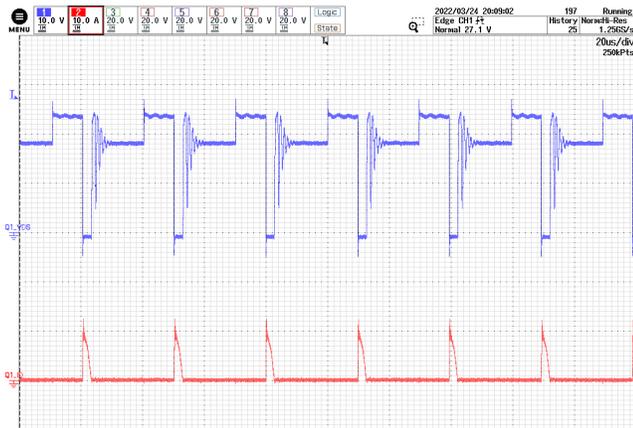
CH1: V<sub>DS</sub>, 500V/格

CH2: I<sub>D</sub>, 1A/格

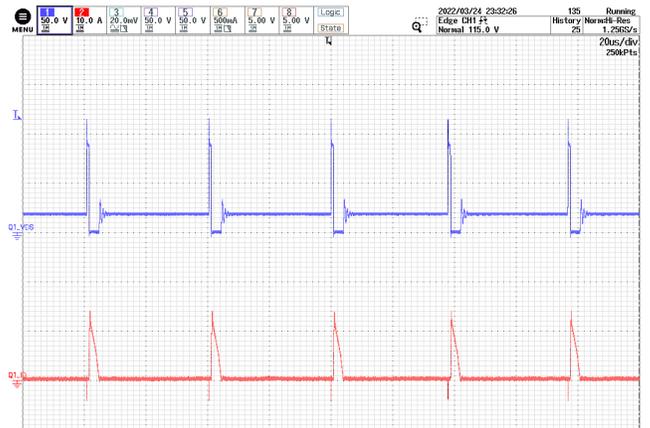
时间: 1s/格 (200µs/格, 缩放)

图68 - 在25°C环境温度下的初级漏极电压和电流

### 11.2.2.2 SR FET漏极电压和电流



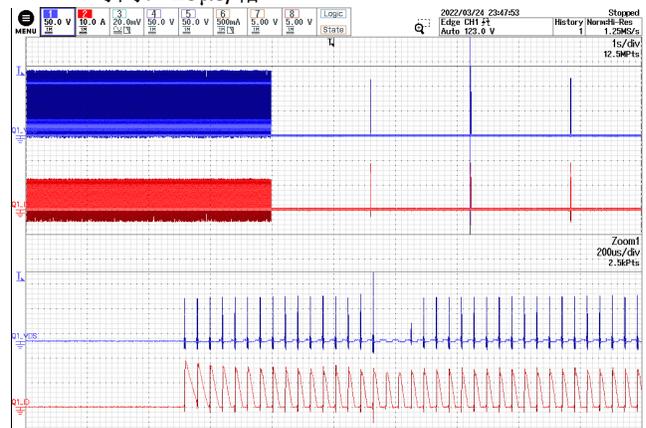
60 V<sub>DC</sub>输入, 18V = 最大值, 9V = 最大值输出  
 CH1: V<sub>DS</sub>, 10V/格  
 CH2: I<sub>D</sub>, 10A/格  
 时间: 20µs/格



80 V<sub>DC</sub>输入, 18V = 最大值, 9V = 最大值输出  
 CH1: V<sub>DS</sub>, 50V/格  
 CH2: I<sub>D</sub>, 10A/格  
 时间: 20µs/格



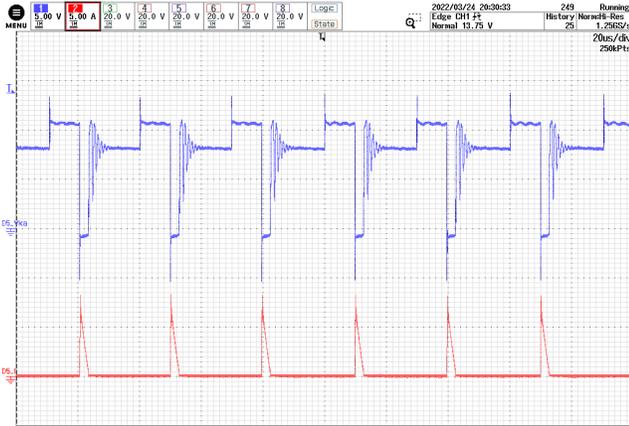
1000 V<sub>DC</sub>输入, 18V = 最大值, 9V = 最大值输出  
 CH1: V<sub>DS</sub>, 50V/格  
 CH2: I<sub>D</sub>, 10A/格  
 时间: 20µs/格



1000 V<sub>DC</sub>输入, 18V = 最大值 (短路), 9V = 最大值输出  
 CH1: V<sub>DS</sub>, 50V/格  
 CH2: I<sub>D</sub>, 10A/格  
 时间: 1s/格 (200µs/格, 缩放)

图69 - 在25°C环境温度下的SR FET漏极电压和电流

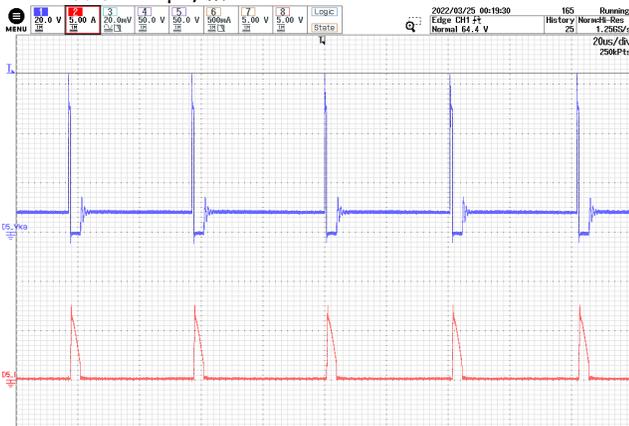
### 11.2.2.3 9V续流二极管电压和电流



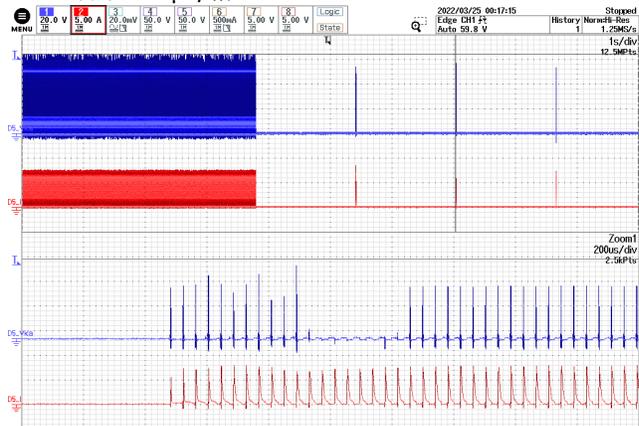
60 V<sub>DC</sub>输入, 18V = 最大值, 9V = 最大值输出  
 CH1: V<sub>KA</sub>, 5V/格  
 CH2: I<sub>D</sub>, 5A/格  
 时间: 20µs/格



800 V<sub>DC</sub>输入, 18V = 最大值, 9V = 最大值输出  
 CH1: V<sub>KA</sub>, 20V/格  
 CH2: I<sub>D</sub>, 5A/格  
 时间: 20µs/格



1000 V<sub>DC</sub>输入, 18V = 最大值, 9V = 最大值输出  
 CH1: V<sub>KA</sub>, 20V/格  
 CH2: I<sub>D</sub>, 5A/格  
 时间: 20µs/格



1000 V<sub>DC</sub>输入, 18V = 最大值 (短路), 9V = 最大值输出  
 CH1: V<sub>KA</sub>, 20V/格  
 CH2: I<sub>D</sub>, 5A/格  
 时间: 1s/格 (200µs/格, 缩放)

图70 - 在25°C环境温度下的9V续流二极管电压和电流



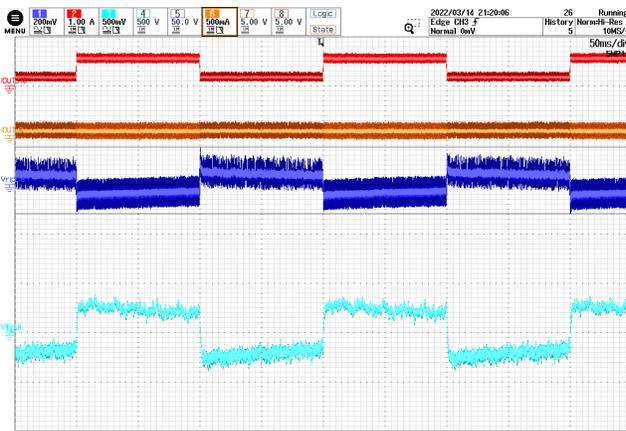
### 11.3 负载动态响应

负载动态响应描述被测电源对突然的负载变化的响应特性。在开关负载从最小到最大再回到最小的动态情况下，捕获了电源的输出电压波形。重负载状态持续时间为100ms，轻负载状态持续时间为100ms，电流变化率100mA/μs。

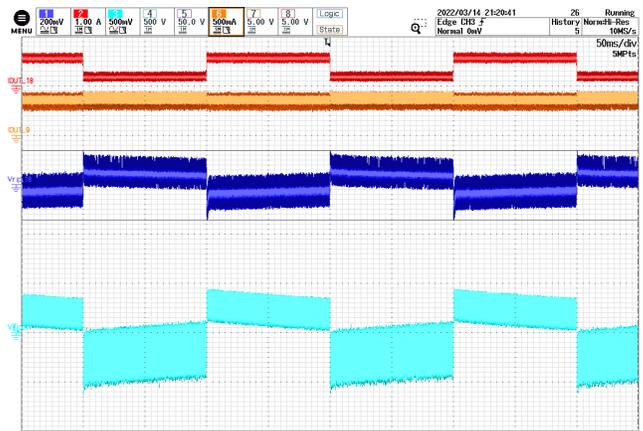
#### 11.3.1 在105°C环境温度下的负载动态响应

测试条件 (0.1A/μs电压变化率, 200ms时间, 最小值-典型值-最小值)			输出过冲和 下冲结果			
输入	18V输出	9V输出	18V输出		9V输出	
V <sub>IN</sub> (V)	I <sub>OUT</sub> (mA)	I <sub>OUT</sub> (mA)	18 V <sub>MAX</sub>	18 V <sub>MIN</sub>	9 V <sub>MAX</sub>	9 V <sub>MIN</sub>
30	开关	22.00	18.0	18.0	8.62	8.24
	开关	333.00	18.1	17.9	8.64	8.15
	166.00	开关	18.0	17.9	9.00	7.52
	222.00	开关	18.1	17.9	9.09	7.56
60	开关	22.00	18.1	17.8	9.33	8.11
	开关	333.00	18.1	17.9	9.11	8.11
	166.00	开关	18.0	17.9	9.32	7.79
	555.00	开关	18.0	17.9	9.56	7.80
800	开关	22.00	18.1	17.9	9.01	8.01
	开关	333.00	18.1	17.9	8.94	7.84
	166.00	开关	18.1	18.0	9.19	7.47
	555.00	开关	18.1	18.0	9.21	7.72
1000	开关	22.00	18.2	18.0	8.90	8.05
	开关	22.00	18.2	17.9	8.92	7.82
	166.00	开关	18.1	18.0	9.15	7.36
	555.00	开关	18.1	18.0	9.13	7.75

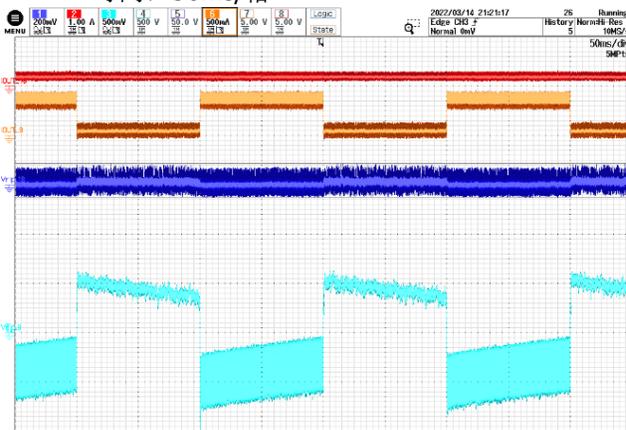
表11 - 105°C环境温度下的负载动态响应汇总



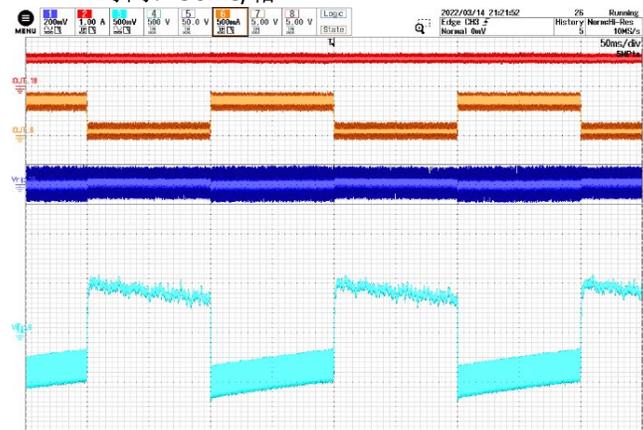
负载: 18V = 开关 9V = 最小值输出  
 CH1: 18V, 200mV/格  
 CH2: 18V I<sub>OUT</sub>, 1A/格  
 CH3: 9V, 500mV/格  
 CH6: 9V I<sub>OUT</sub>, 500mA/格  
 时间: 50ms/格



负载: 18V = 开关 9V = 最大值输出  
 CH1: 18V, 200mV/格  
 CH2: 18V I<sub>OUT</sub>, 1A/格  
 CH3: 9V, 500mV/格  
 CH6: 9V I<sub>OUT</sub>, 500mA/格  
 时间: 50ms/格



负载: 18V = 最小值 9V = 开关输出  
 CH1: 18V, 200mV/格  
 CH2: 18V I<sub>OUT</sub>, 1A/格  
 CH3: 9V, 500mV/格  
 CH6: 9V I<sub>OUT</sub>, 500mA/格  
 时间: 50ms/格



负载: 18V = 最大值 9V = 开关输出  
 CH1: 18V, 200mV/格  
 CH2: 18V I<sub>OUT</sub>, 1A/格  
 CH3: 9V, 500mV/格  
 CH6: 9V I<sub>OUT</sub>, 500mA/格  
 时间: 50ms/格

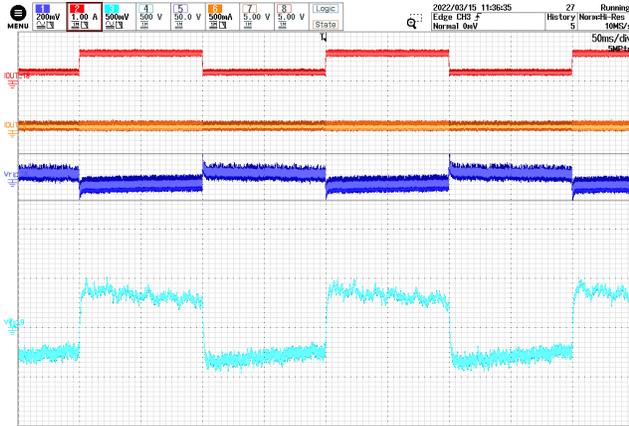
图71 - 105°C环境温度下的1000V<sub>DC</sub>输入负载动态响应



## 11.3.2 在25°C环境温度下的负载动态响应

测试条件 (0.1A/ $\mu$ s电压变化率, 200ms时间, 最小值-典型值-最小值)			输出过冲和 下冲结果			
输入	18V输出	输入	18V输出		输入	
V <sub>IN</sub> (V)	I <sub>OUT</sub> (mA)	V <sub>IN</sub> (V)	I <sub>OUT</sub> (mA)	V <sub>IN</sub> (V)	I <sub>OUT</sub> (mA)	V <sub>IN</sub> (V)
30	开关	22.00	18.1	18.0	8.39	8.04
	开关	333.00	18.1	18.0	8.42	7.96
	166.00	开关	18.1	18.0	8.78	7.34
	222.00	开关	18.1	17.9	8.82	7.41
60	开关	22.00	18.1	17.9	9.23	7.99
	开关	333.00	18.1	17.9	8.99	8.03
	166.00	开关	18.0	18.0	9.20	7.71
	555.00	开关	18.1	18.0	9.47	7.71
800	开关	22.00	18.2	18.0	8.93	7.85
	开关	333.00	18.2	18.0	8.81	7.74
	166.00	开关	18.1	18.1	9.05	7.52
	555.00	开关	18.1	18.1	9.16	7.56
1000	开关	22.00	18.2	18.0	8.89	7.86
	开关	22.00	18.2	18.0	8.80	7.75
	166.00	开关	18.1	18.0	9.03	7.31
	555.00	开关	18.1	18.0	9.13	7.56

表12 - 25°C环境温度下的负载动态响应汇总



Max(C1)	Max	Min	Mean	σ	Count
118.0mV	118.0mV	97.0mV	107.854mV	3.57279mV	26
78.5mV	78.5mV	-87.5mV	-83.6154mV	2.38237mV	26
197.5mV	197.5mV	182.5mV	191.269mV	3.22917mV	26

负载: 18V = 开关 9V = 最小值输出

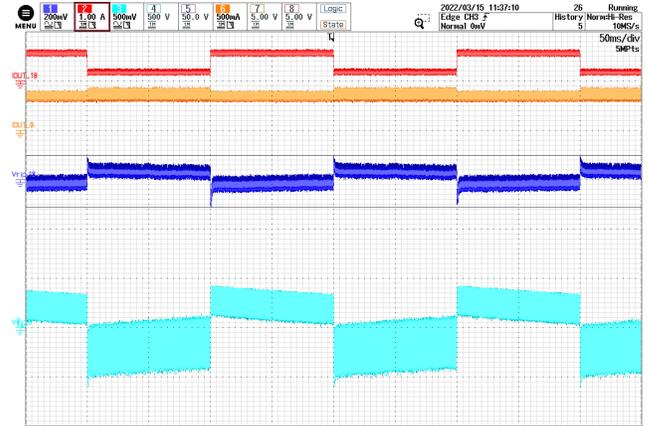
CH1: 18V, 200mV/格

CH2: 18V I<sub>OUT</sub>, 1A/格

CH3: 9V, 500mV/格

CH6: 9V I<sub>OUT</sub>, 500mA/格

时间: 50ms/格



Max(C1)	Max	Min	Mean	σ	Count
89.5mV	89.5mV	90.5mV	94.4400mV	2.35508mV	26
-102.5mV	-102.5mV	-112.0mV	-107.890mV	2.76833mV	26
210.5mV	210.5mV	194.0mV	202.040mV	3.84687mV	26

负载: 18V = 开关 9V = 最大值输出

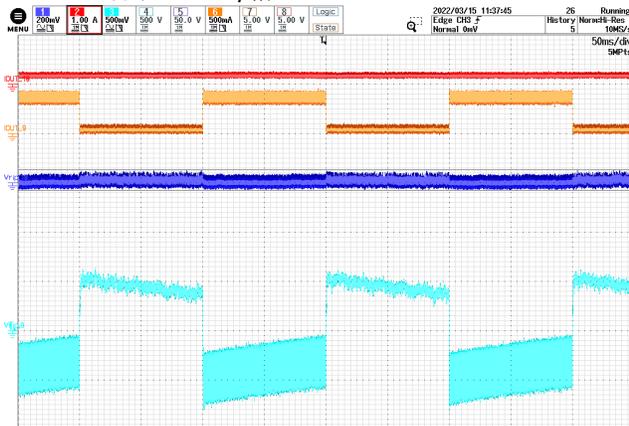
CH1: 18V, 200mV/格

CH2: 18V I<sub>OUT</sub>, 1A/格

CH3: 9V, 500mV/格

CH6: 9V I<sub>OUT</sub>, 500mA/格

时间: 50ms/格



Max(C1)	Max	Min	Mean	σ	Count
36.0mV	36.0mV	50.0mV	53.4900mV	1.22409mV	26
-28.0mV	-28.0mV	-30.0mV	-30.8600mV	1.26302mV	26
87.5mV	87.5mV	84.320mV	84.3200mV	1.67857mV	26

负载: 18V = 最小值 9V = 开关输出

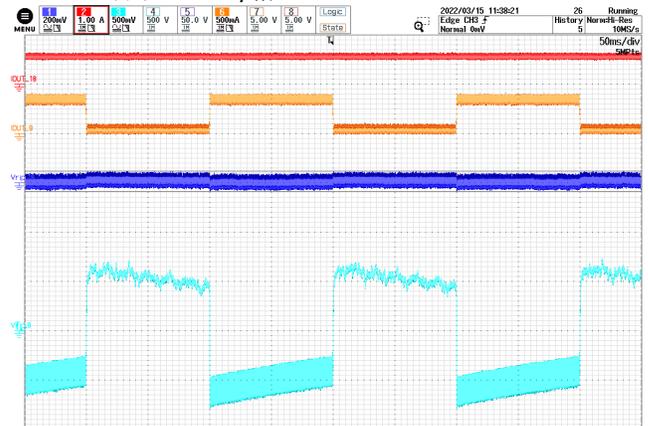
CH1: 18V, 200mV/格

CH2: 18V I<sub>OUT</sub>, 1A/格

CH3: 9V, 500mV/格

CH6: 9V I<sub>OUT</sub>, 500mA/格

时间: 50ms/格



Max(C1)	Max	Min	Mean	σ	Count
48.5mV	48.5mV	45.0mV	46.8200mV	1.01925mV	26
-33.0mV	-33.0mV	-43.5mV	-36.3200mV	2.50651mV	26
91.5mV	91.5mV	79.5mV	83.7400mV	2.74780mV	26

负载: 18V = 最大值 9V = 开关输出

CH1: 18V, 200mV/格

CH2: 18V I<sub>OUT</sub>, 1A/格

CH3: 9V, 500mV/格

CH6: 9V I<sub>OUT</sub>, 500mA/格

时间: 50ms/格

图72 - 25°C环境温度下的1000V<sub>DC</sub>输入负载动态响应

## 11.4 输出电压纹波测量

### 11.4.1 输出电压纹波测量技术

在测量输出纹波时，使用经改装的示波器测试探头，以减少干扰引起的杂散信号。探头改装细节如下图57和图58所示。

一个 $1\mu\text{F}$ 、50V陶瓷电容附加在CT2708探头适配器上并在探头尖端上并联。然后将一对尽可能短的双绞线直接焊接在探头和被测电源的输出端子之间。

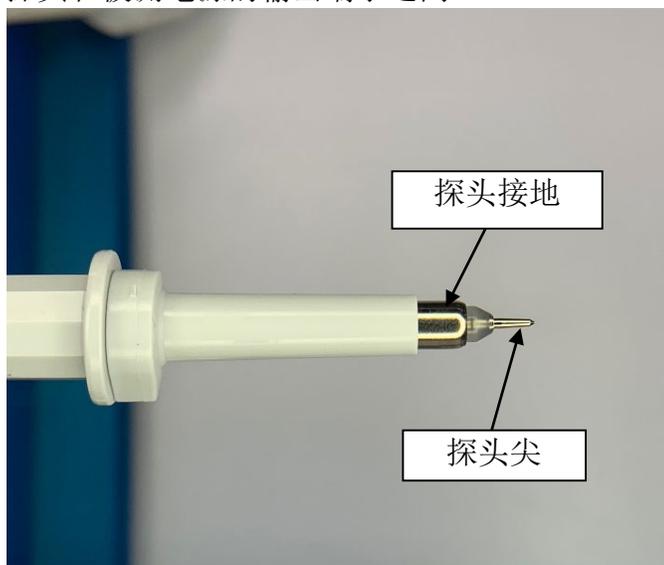


图73 - 准备用于纹波测量的示波器探头。（端盖和接地引线已拆下）

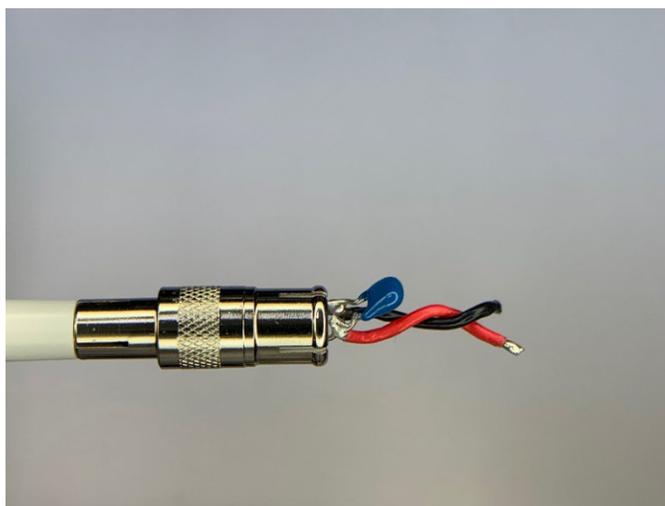
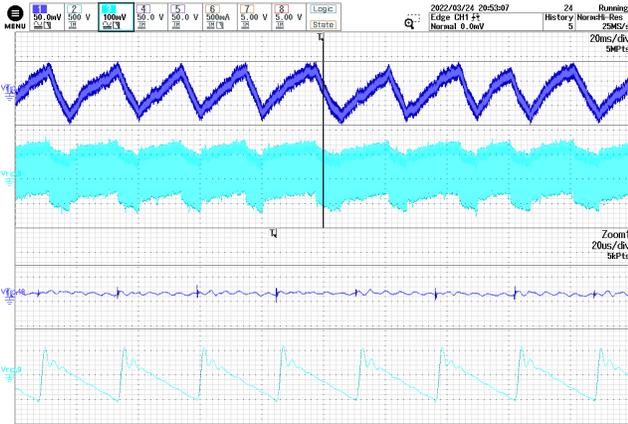


图74 - 具有Cal Test CT2708 BNC适配器的示波器探头（改用导线进行纹波测量，并添加一个并联的去耦电容。）

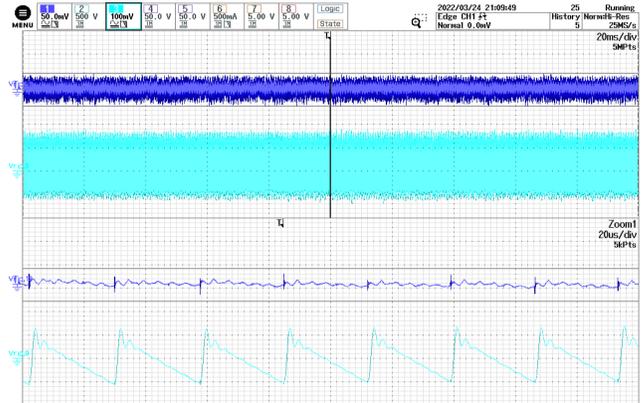
### 11.4.2 输出电压纹波波形

使用具有去耦电容的纹波测量探头在输出端记录输出电压纹波波形。在每个测试序列开始时，电源均需在满载条件下连续工作至少5分钟。对于每个负载点，在进行测量之前，电源均需带载超过20秒。

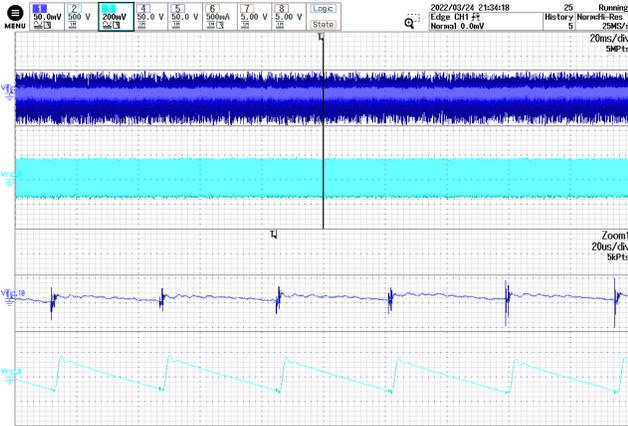
#### 11.4.2.1 在105°C环境温度下的输出电压纹波<sup>24</sup>



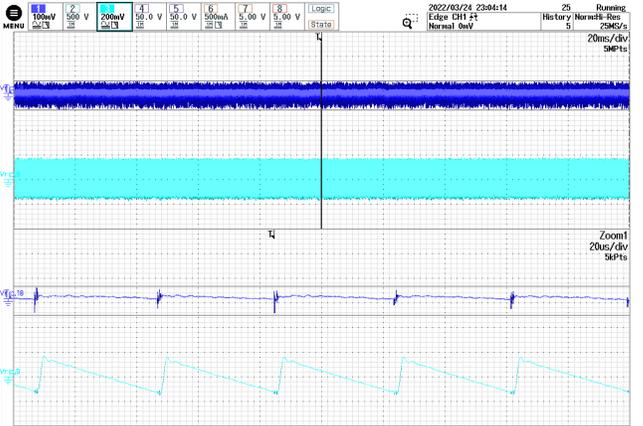
30 V<sub>DC</sub>输入，18V = 最大值，9V = 最大值输出  
 CH1: 18V, 50mV/格  
 CH3: 9V, 100mV/格  
 时间: 20ms/格 (20μs/格, 缩放)



60 V<sub>DC</sub>输入，18V = 最大值，9V = 最大值输出  
 CH1: 18V, 50mV/格  
 CH3: 9V, 100mV/格  
 时间: 20ms/格 (μs格, 缩放)



80 V<sub>DC</sub>输入，18V = 最大值，9V = 最大值输出  
 CH1: 18V, 50mV/格  
 CH3: 9V, 200mV/格  
 时间: 20ms/格 (20μs/格, 缩放)



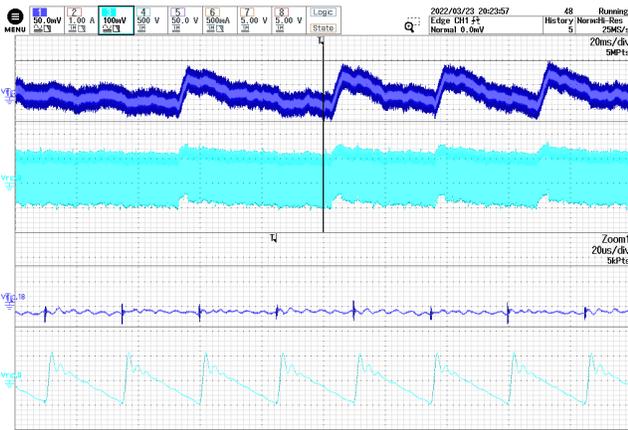
100 V<sub>DC</sub>输入，18V = 最大值，9V = 最大值输出  
 CH1: 18V, 100mV/格  
 CH3: 9V, 200mV/格  
 时间: 20ms/格 (20μs/格, 缩放)

图75 - 在105°C环境温度下的输出电压纹波

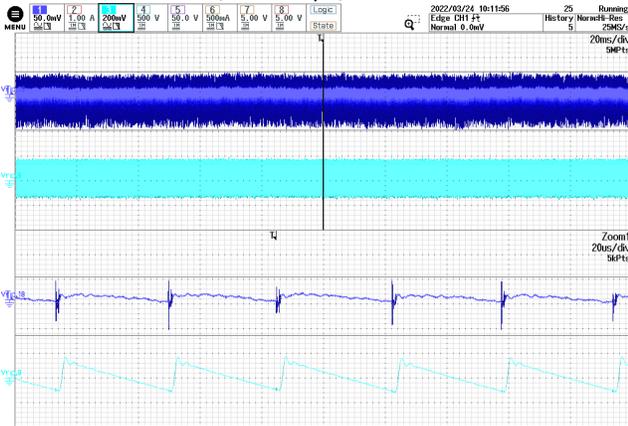
<sup>24</sup>每次示波器捕获记录中的峰峰值电压测量是最差情况下的纹波，其中包括低频和高频开关电压纹波（每次捕获的顶部）。



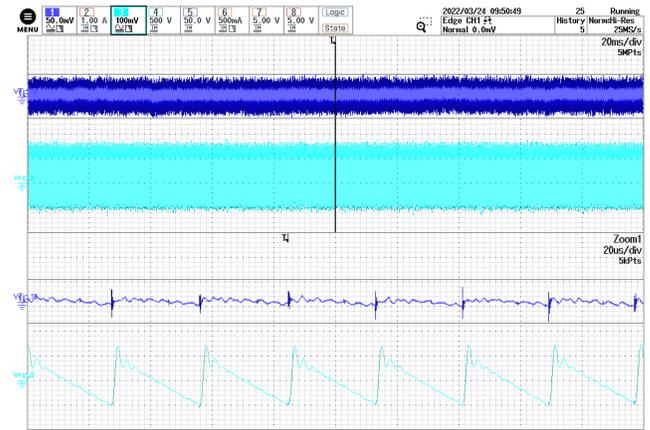
11.4.2.2 在25°C环境温度下的输出电压纹波<sup>25</sup>



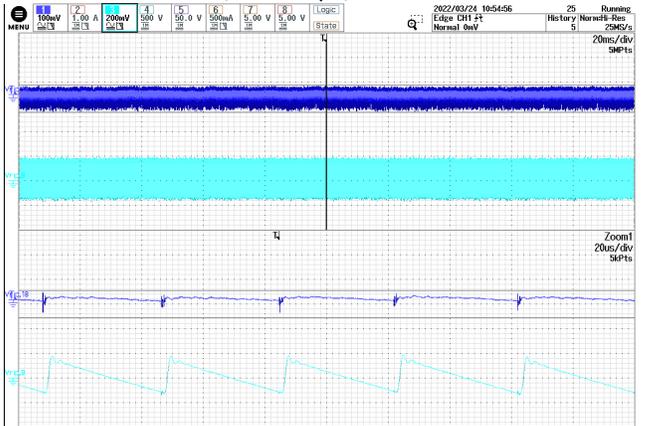
30 V<sub>DC</sub>输入, 18V = 最大值, 9V = 最大值输出  
 CH1: 18V, 50mV/格  
 CH3: 9V, 100mV/格  
 时间: 20ms/格 (20μs/格, 缩放)



60 V<sub>DC</sub>输入, 18V = 最大值, 9V = 最大值输出  
 CH1: 18V, 50mV/格  
 CH3: 9V, 100mV/格  
 时间: 20ms/格 (20μs/格, 缩放)



80 V<sub>DC</sub>输入, 18V = 最大值, 9V = 最大值输出  
 CH1: 18V, 50mV/格  
 CH3: 9V, 200mV/格  
 时间: 20ms/格 (20μs/格, 缩放)



100 V<sub>DC</sub>输入, 18V = 最大值, 9V = 最大值输出  
 CH1: 18V, 100mV/格  
 CH3: 9V, 200mV/格  
 时间: 20ms/格 (20μs/格, 缩放)

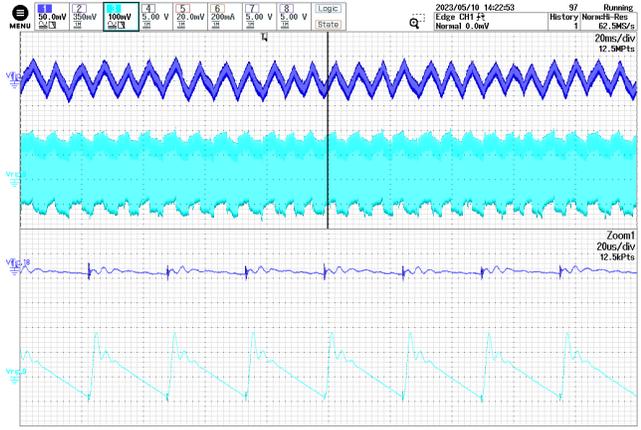
图76 - 在25°C环境温度下的输出电压纹波

<sup>25</sup>每次示波器捕获记录中的峰峰值电压测量是最差情况下的纹波，其中包括低频和高频开关电压纹波（每次捕获的顶部）。

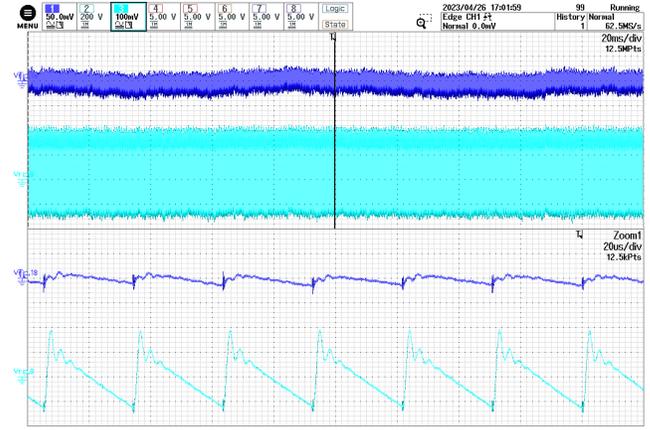


11.4.2.3 在-40°C环境温度下的输出电压纹波<sup>26</sup>

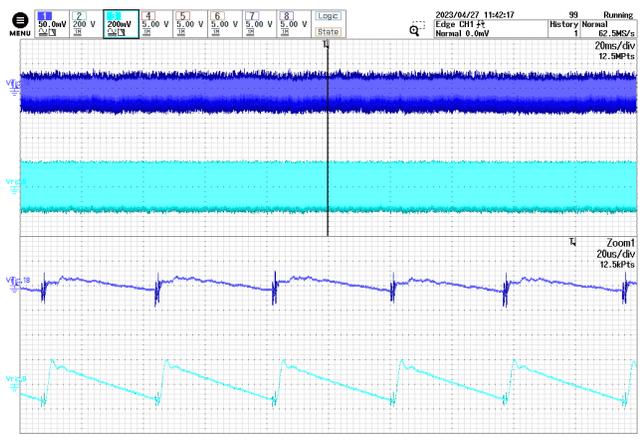
为了便于在-40°C环境温度下进行测试，利用双绞线对探头进行延长。采取此必要措施，是因为探头在放置于热处理室内后，就无法触及到探测点。为了补偿探头延长线带来的影响，需要调整下图所示的值：对于18V输出，增加14.17mV<sub>PP</sub>，而对于9V输出，降低57.14mV<sub>PP</sub>。<sup>27</sup>



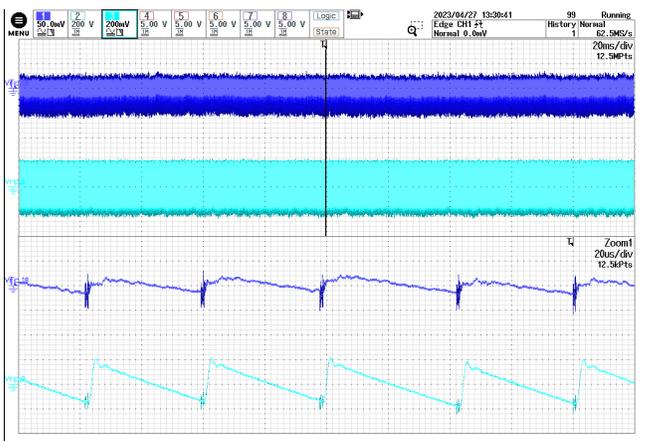
30 V<sub>DC</sub>输入，18V = 最大值，9V = 最大值输出  
 CH1: 18V, 50mV/格  
 CH3: 9V, 100mV/格  
 时间: 20ms/格 (20μs/格, 缩放)



60 V<sub>DC</sub>输入，18V = 最大值，9V = 最大值输出  
 CH1: 18V, 50mV/格  
 CH3: 9V, 100mV/格  
 时间: 20ms/格 (20μs/格, 缩放)



800 V<sub>DC</sub>输入，18V = 最大值，9V = 最大值输出  
 CH1: 18V, 50mV/格  
 CH3: 9V, 200mV/格  
 时间: 20ms/格 (20μs/格, 缩放)



1000 V<sub>DC</sub>输入，18V = 最大值，9V = 最大值输出  
 CH1: 18V, 100mV/格  
 CH3: 9V, 200mV/格  
 时间: 20ms/格 (20μs/格, 缩放)

图77 - 在-40°C环境温度下的输出电压纹波

<sup>26</sup>每次示波器捕获记录中的峰峰值电压测量是最差情况下的纹波，其中包括低频和高频开关电压纹波（每次捕获的顶部）。  
<sup>27</sup>14.17mV<sub>PP</sub> 和 57.14mV<sub>PP</sub> 是在 25° C 环境温度下分别使用短探头和延长探头获得的 18V 和 9V 输出电压纹波不同测量值的平均值。

### 11.4.3 输出电压纹波相对于负载的变化

图表上的每条线代表当18V输出负载维持在一定百分比，而9V输出负载从其最小负载条件增加到最大负载条件时，被测电源的输出电压纹波相对于总输出功率的变化情况。

#### 11.4.3.1 30V<sub>DC</sub>输入

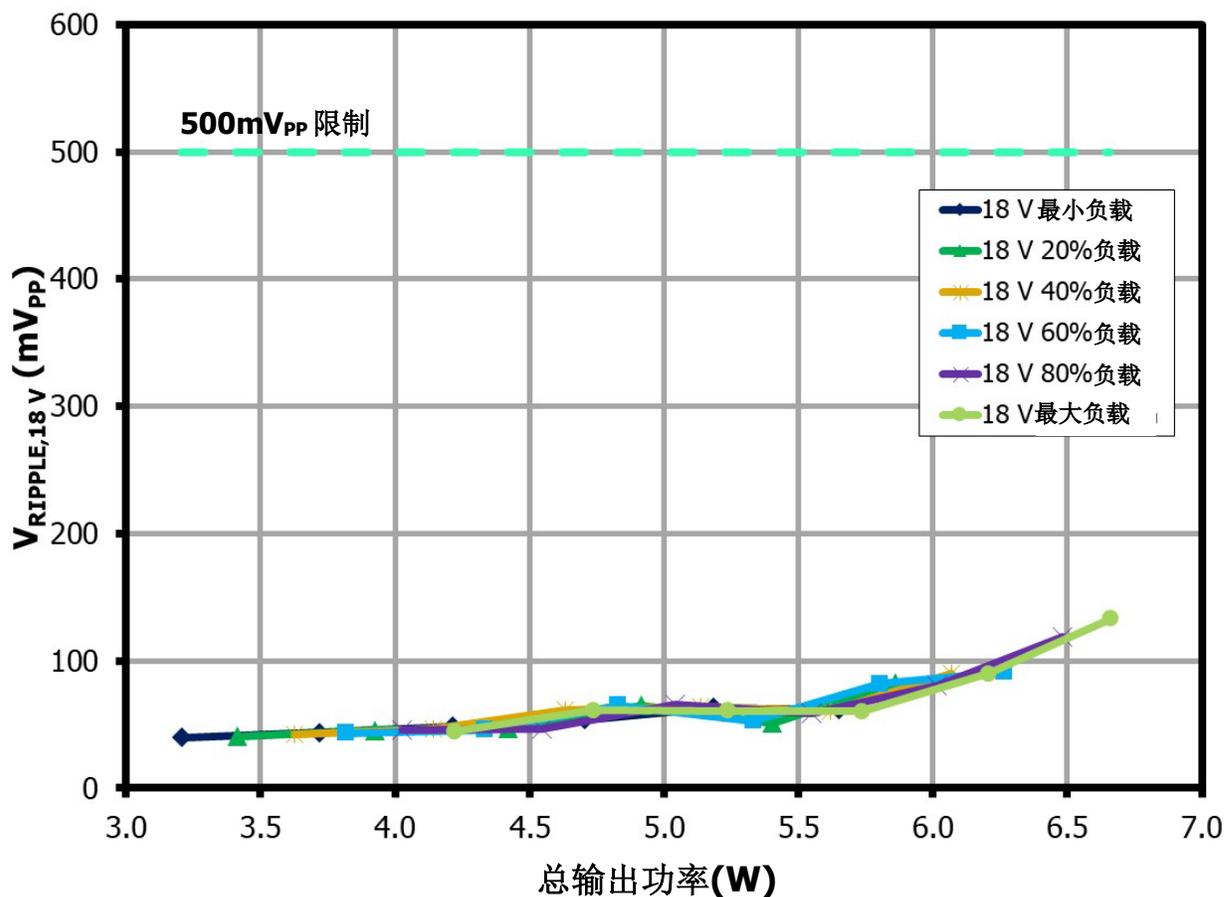


图78 - 在30V<sub>DC</sub>输入及105°C环境温度下18V输出电压纹波相对于总输出功率的变化

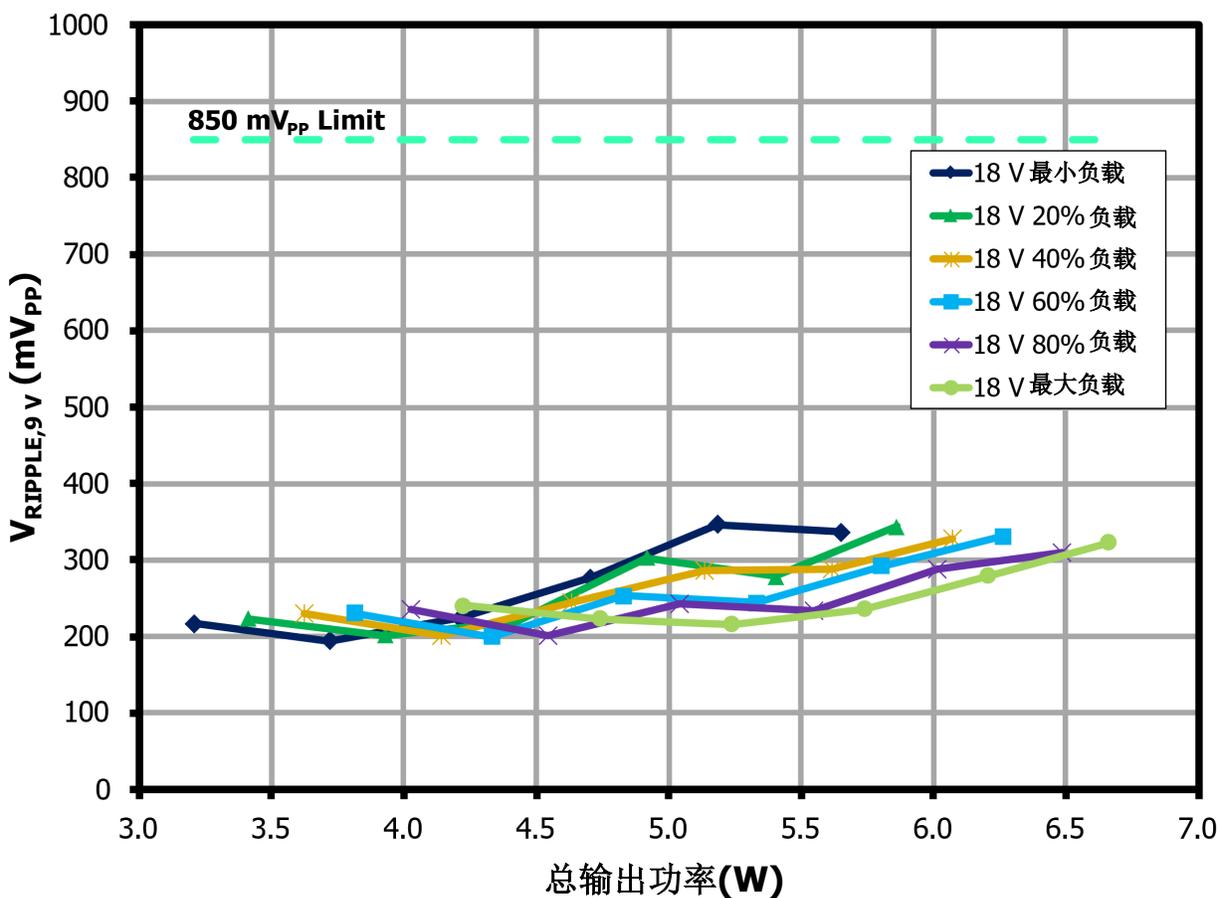


图79 - 在30V<sub>DC</sub>输入及105°C环境温度下9V输出电压纹波相对于总输出功率的变化

下图显示的-40°C环境温度下的输出电压纹波数据包括14.17mV<sub>PP</sub>偏移量，以补偿探头延长线对电压纹波值的影响。<sup>28</sup>

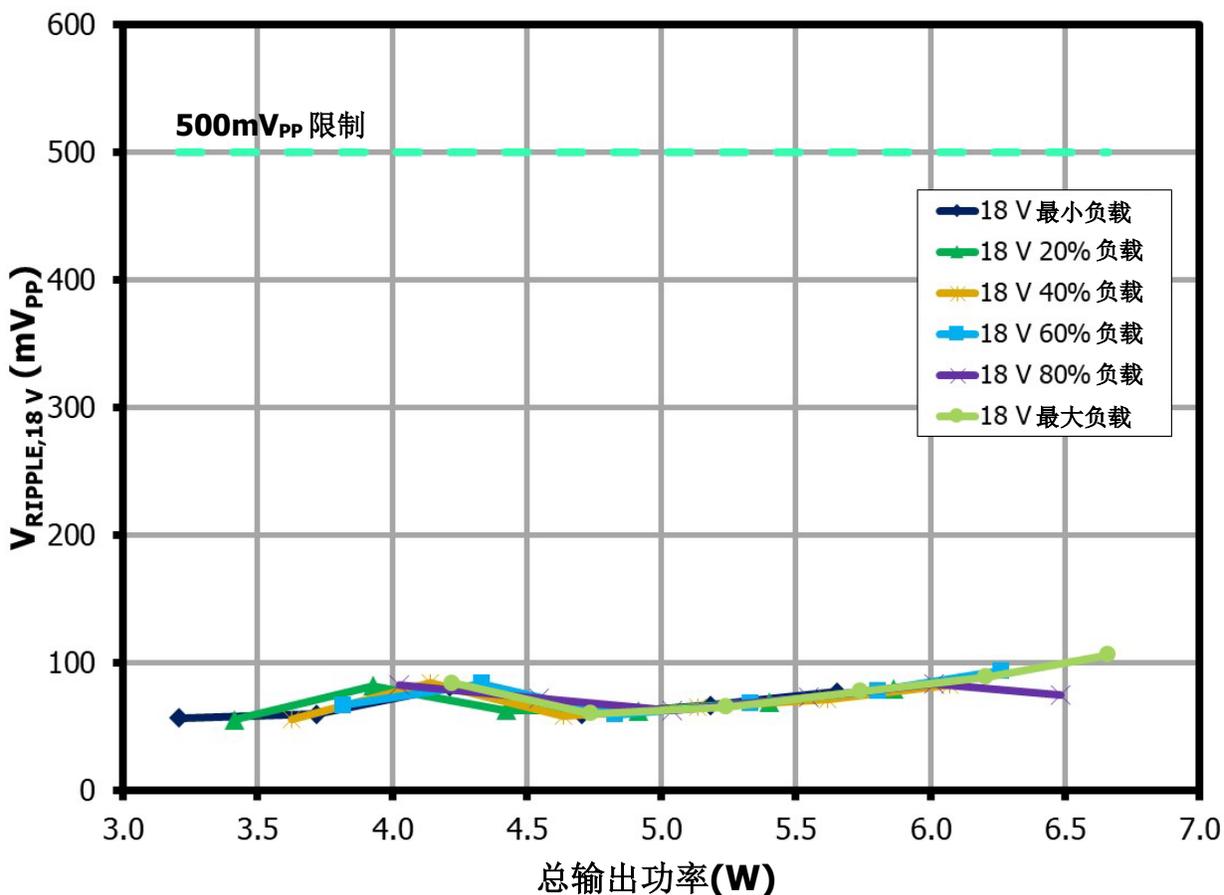


图80 - 在30V<sub>DC</sub>输入及-40°C环境温度下18V输出电压纹波相对于总输出功率的变化

<sup>28</sup>14.17mV<sub>PP</sub> 和 57.14mV<sub>PP</sub> 是在 25° C 环境温度下分别使用短探头和延长探头获得的 18V 和 9V 输出电压纹波值的平均值。



下图显示的-40°C环境温度下的输出电压纹波数据包括57.14mV<sub>PP</sub>偏移量，以补偿探头延长线对电压纹波值的影响。<sup>29</sup>

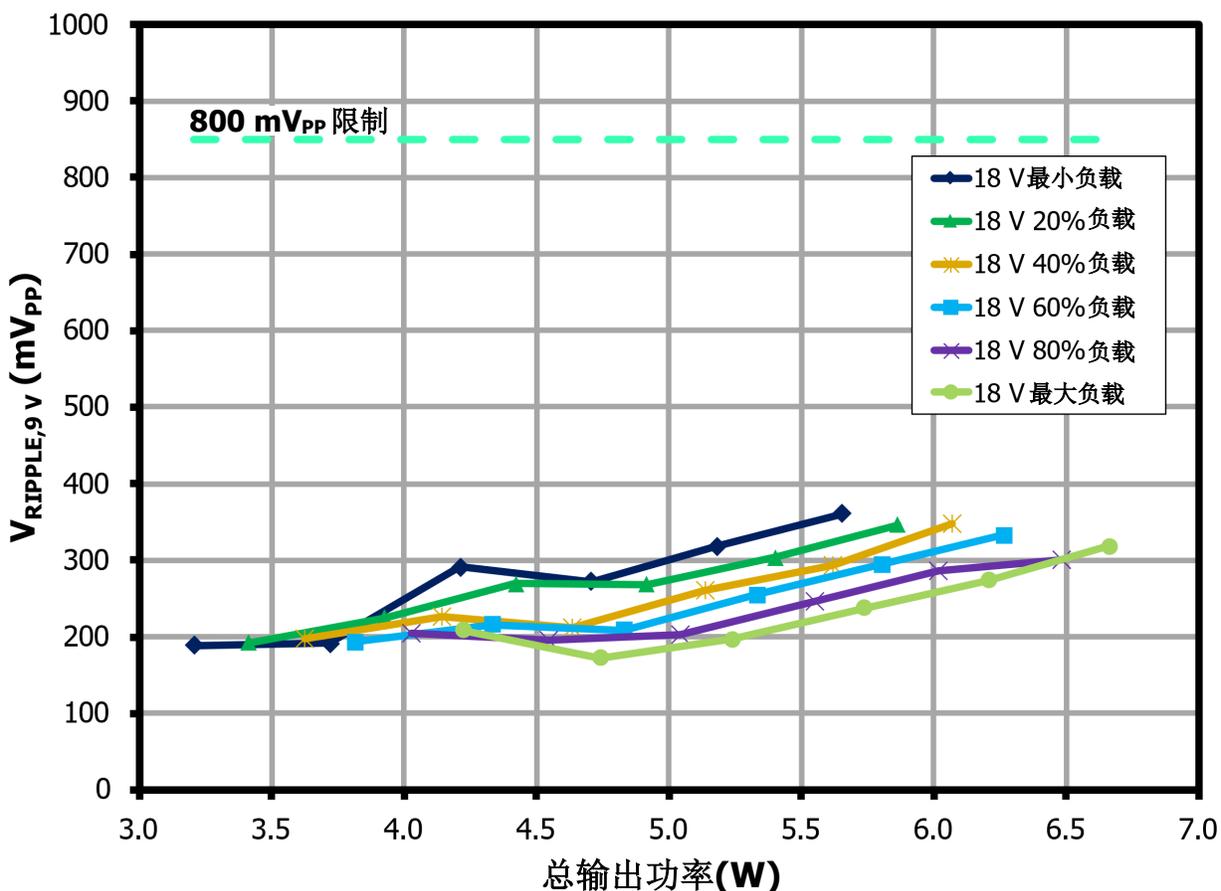


图81 - 在30V<sub>DC</sub>输入及-40°C环境温度下9V输出电压纹波相对于总输出功率的变化

<sup>29</sup>14.17mV<sub>pp</sub> 和 57.14mV<sub>pp</sub> 是在 25° C 环境温度下分别使用短探头和延长探头获得的 18V 和 9V 输出电压纹波值的平均值。



11.4.3.2 60V<sub>DC</sub>输入

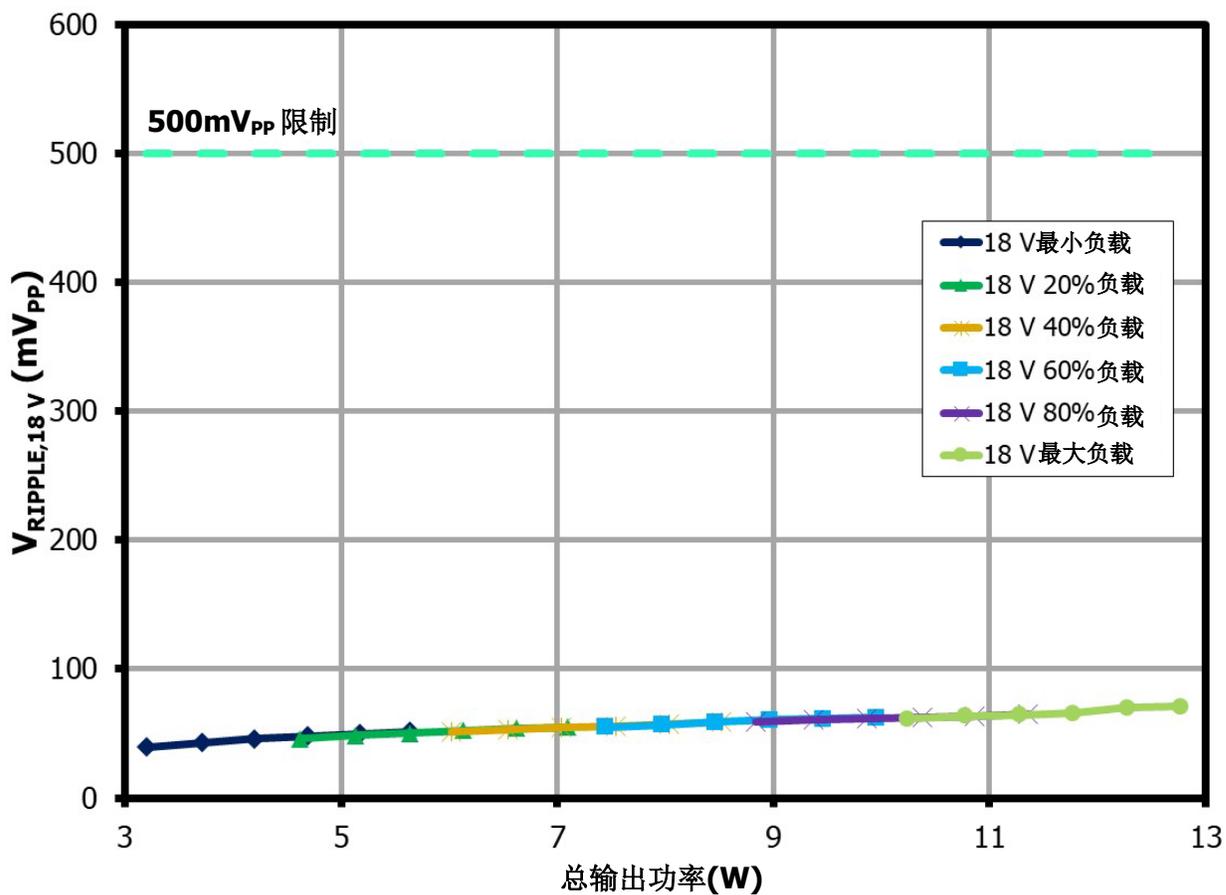


图82 - 在60V<sub>DC</sub>输入及105°C环境温度下18V输出电压纹波相对于总输出功率的变化

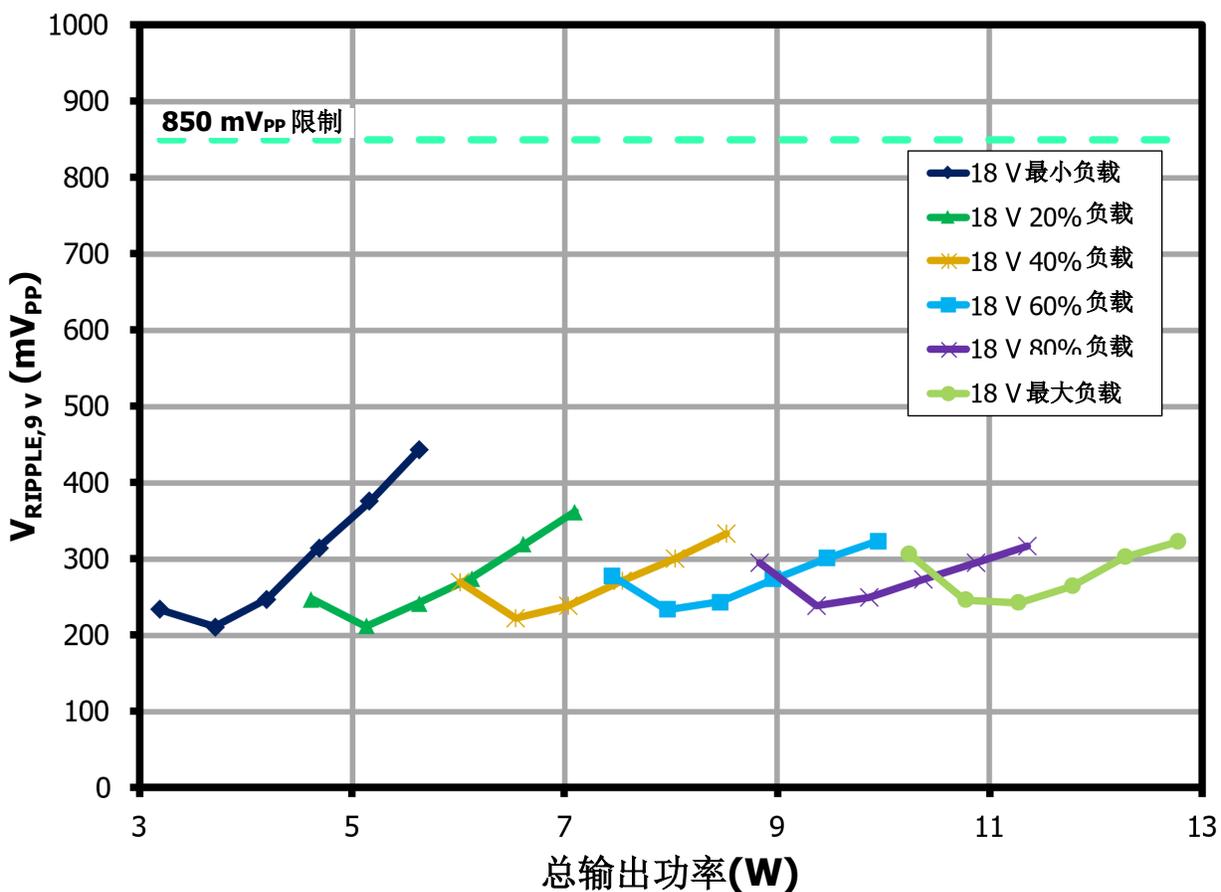


图83 - 在60V<sub>DC</sub>输入及105°C环境温度下9V输出电压纹波相对于总输出功率的变化

下图显示的-40°C环境温度下的输出电压纹波数据包括14.17mV<sub>PP</sub>偏移量，以补偿探头延长线对电压纹波值的影响。<sup>30</sup>

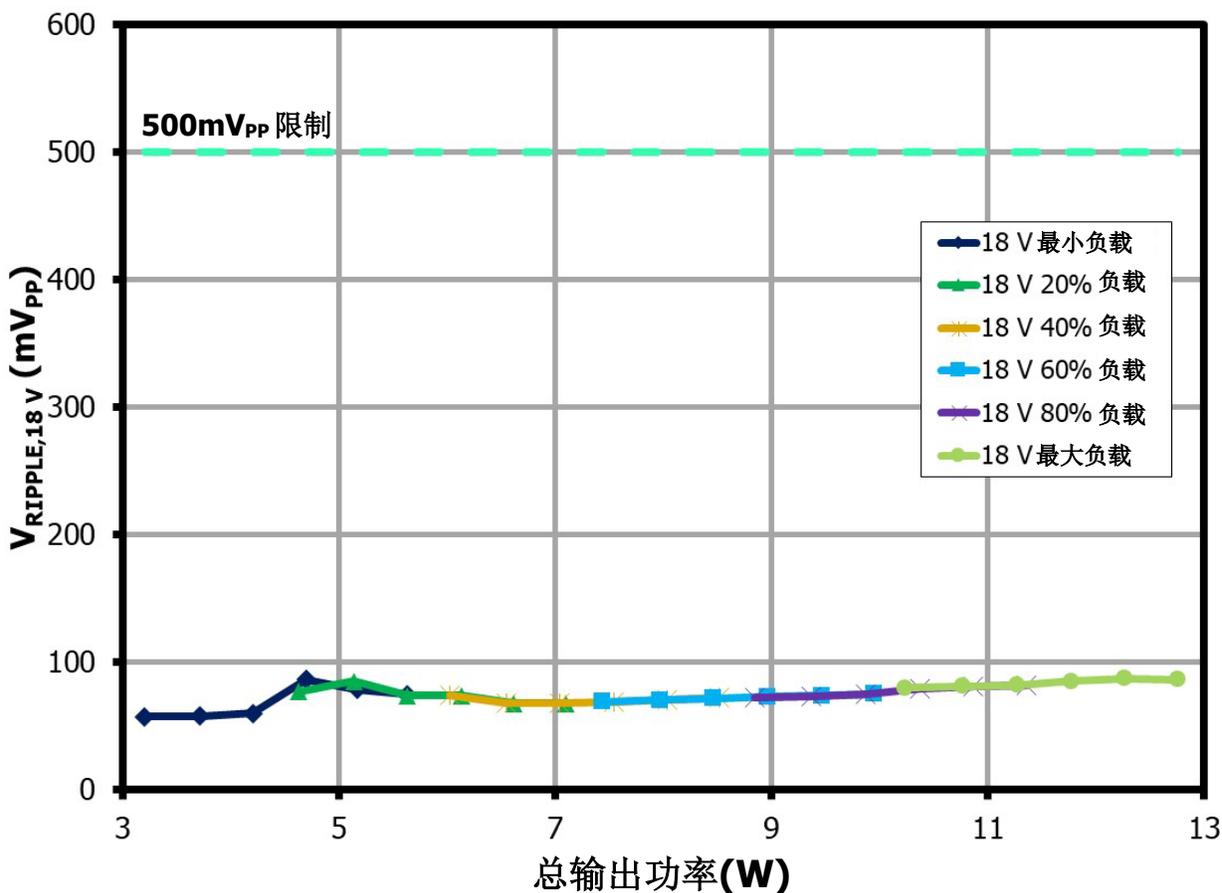


图84 - 在60V<sub>DC</sub>输入及-40°C环境温度下18V输出电压纹波相对于总输出功率的变化

<sup>30</sup>14.17mV<sub>PP</sub> 和 57.14mV<sub>PP</sub> 是在 25° C 环境温度下分别使用短探头和延长探头获得的 18V 和 9V 输出电压纹波值的平均值。



下图显示的-40°C环境温度下的输出电压纹波数据包括57.14mV<sub>PP</sub>偏移量，以补偿探头延长线对电压纹波值的影响。<sup>31</sup>

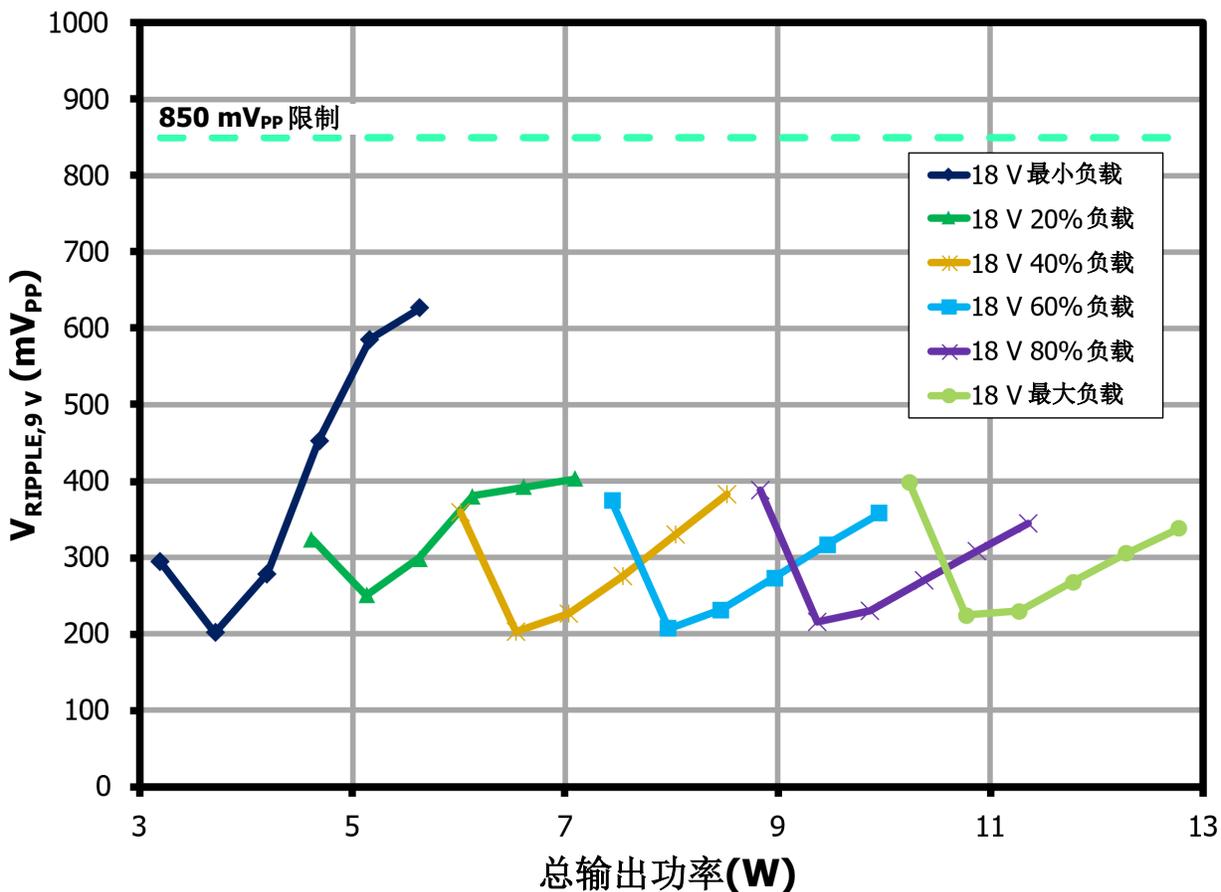


图85 - 在60V<sub>DC</sub>输入及-40°C环境温度下9V输出电压纹波相对于总输出功率的变化

<sup>31</sup>14.17mV<sub>pp</sub> 和 57.14mV<sub>pp</sub> 是在 25° C 环境温度下分别使用短探头和延长探头获得的 18V 和 9V 输出电压纹波值的平均值。

### 11.4.3.3 800V<sub>DC</sub>输入

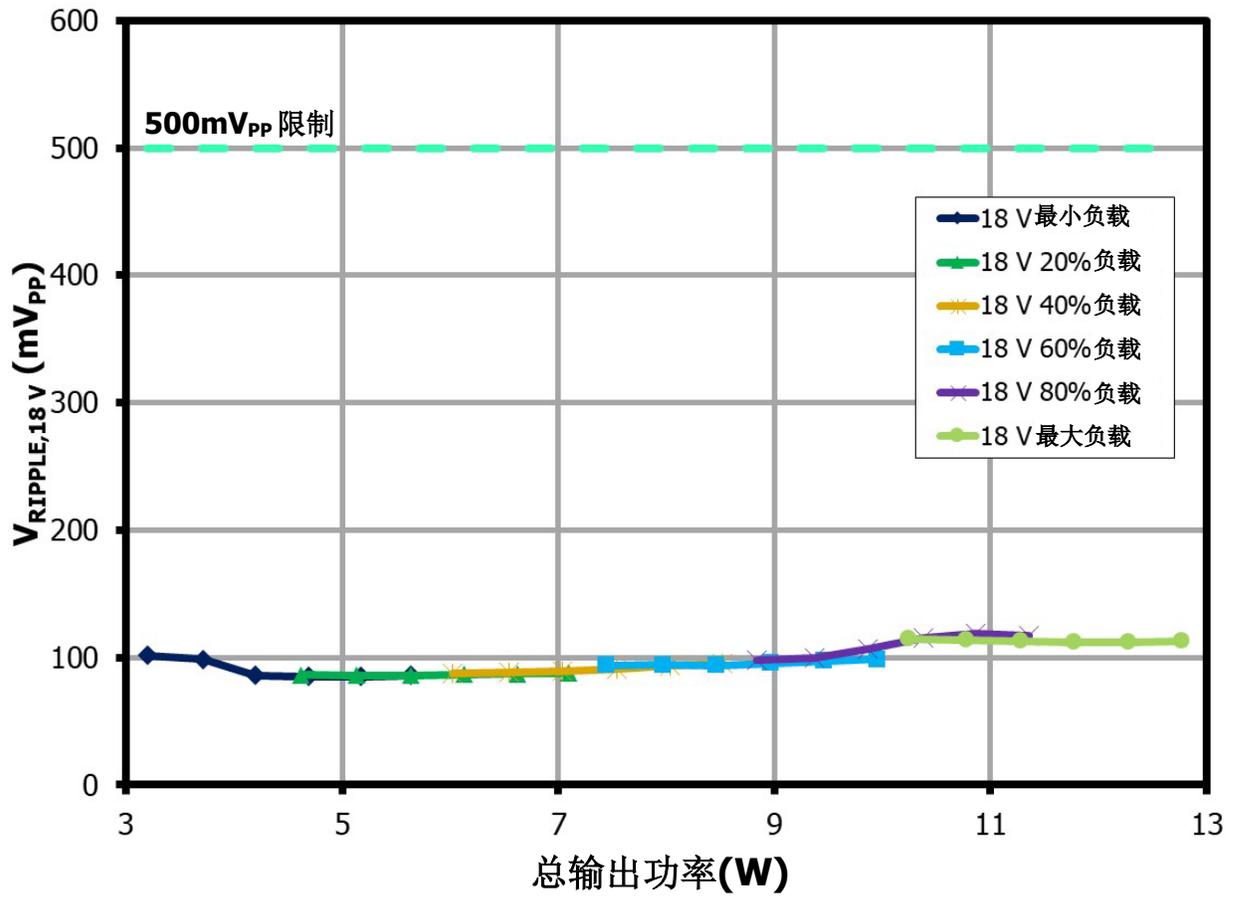


图86 - 在800V<sub>DC</sub>输入及105°C环境温度下18V输出电压纹波相对于总输出功率的变化

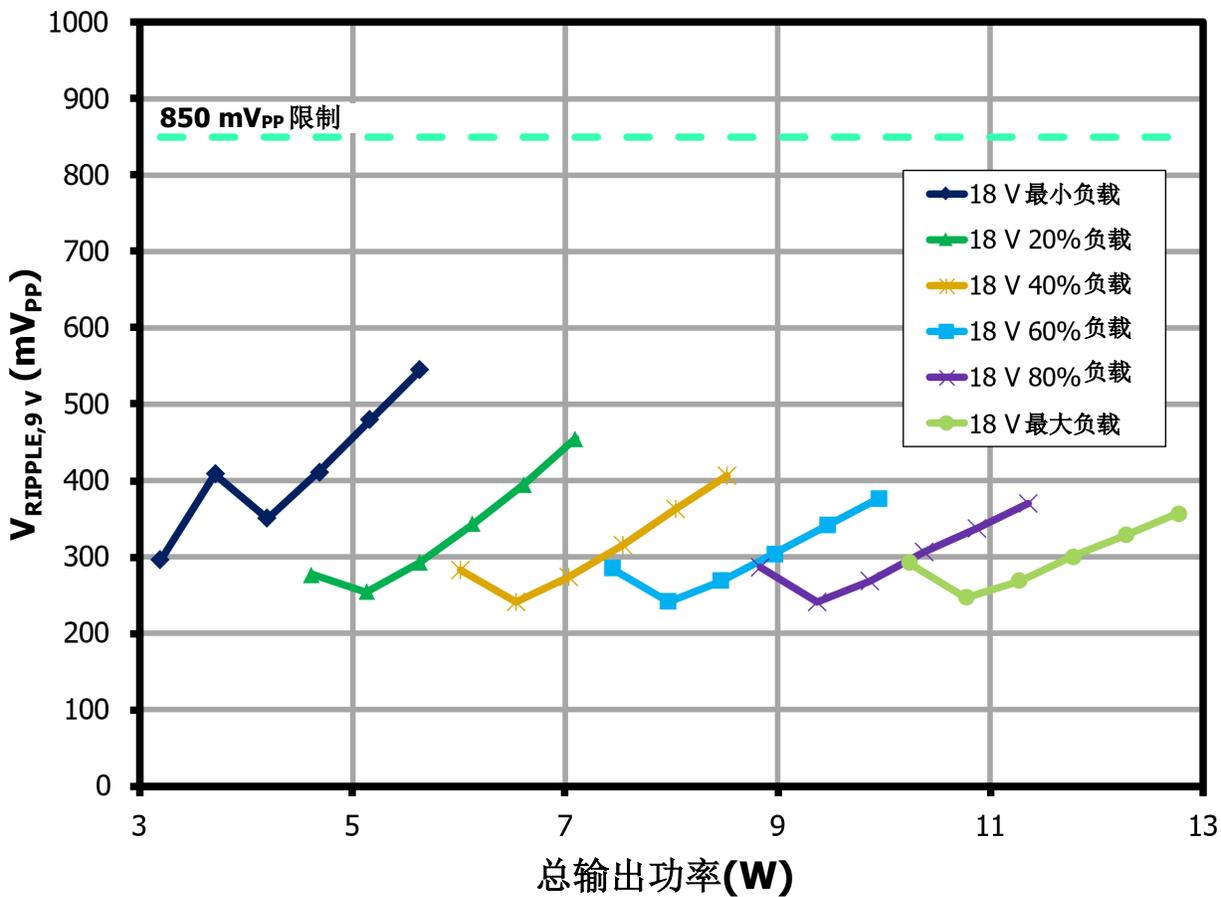


图87 - 在800V<sub>DC</sub>输入及105°C环境温度下9V输出电压纹波相对于总输出功率的变化

下图显示的-40° C环境温度下的输出电压纹波数据包括14.17mV<sub>PP</sub>偏移量，以补偿探头延长线对电压纹波值的影响。<sup>32</sup>

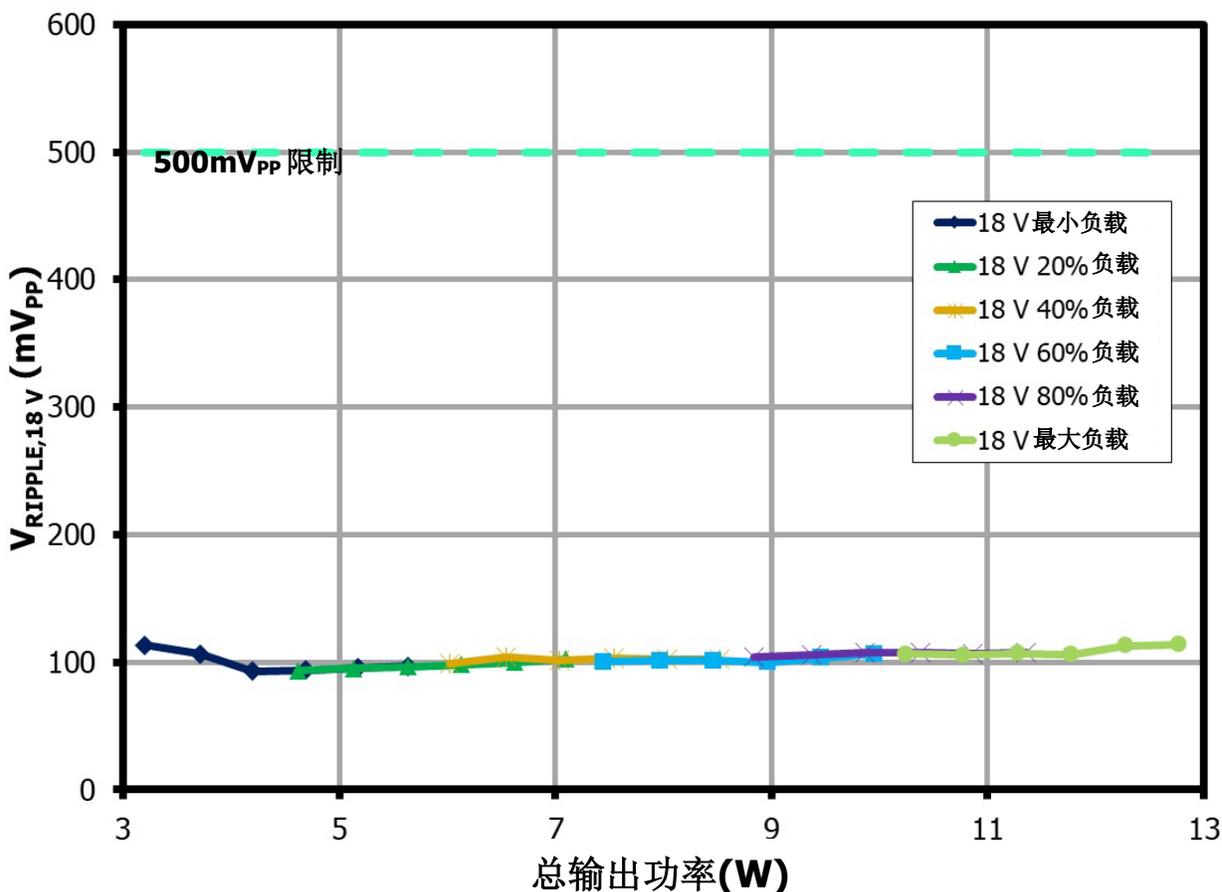


图88 - 在800V<sub>DC</sub>输入及-40°C环境温度下18V输出电压纹波相对于总输出功率的变化

<sup>32</sup>14.17mV<sub>PP</sub> 和 57.14mV<sub>PP</sub> 是在 25° C 环境温度下分别使用短探头和延长探头获得的 18V 和 9V 输出电压纹波值的平均值。



下图显示的-40°C环境温度下的输出电压纹波数据包括57.14mV<sub>PP</sub>偏移量，以补偿探头延长线对电压纹波值的影响。<sup>33</sup>

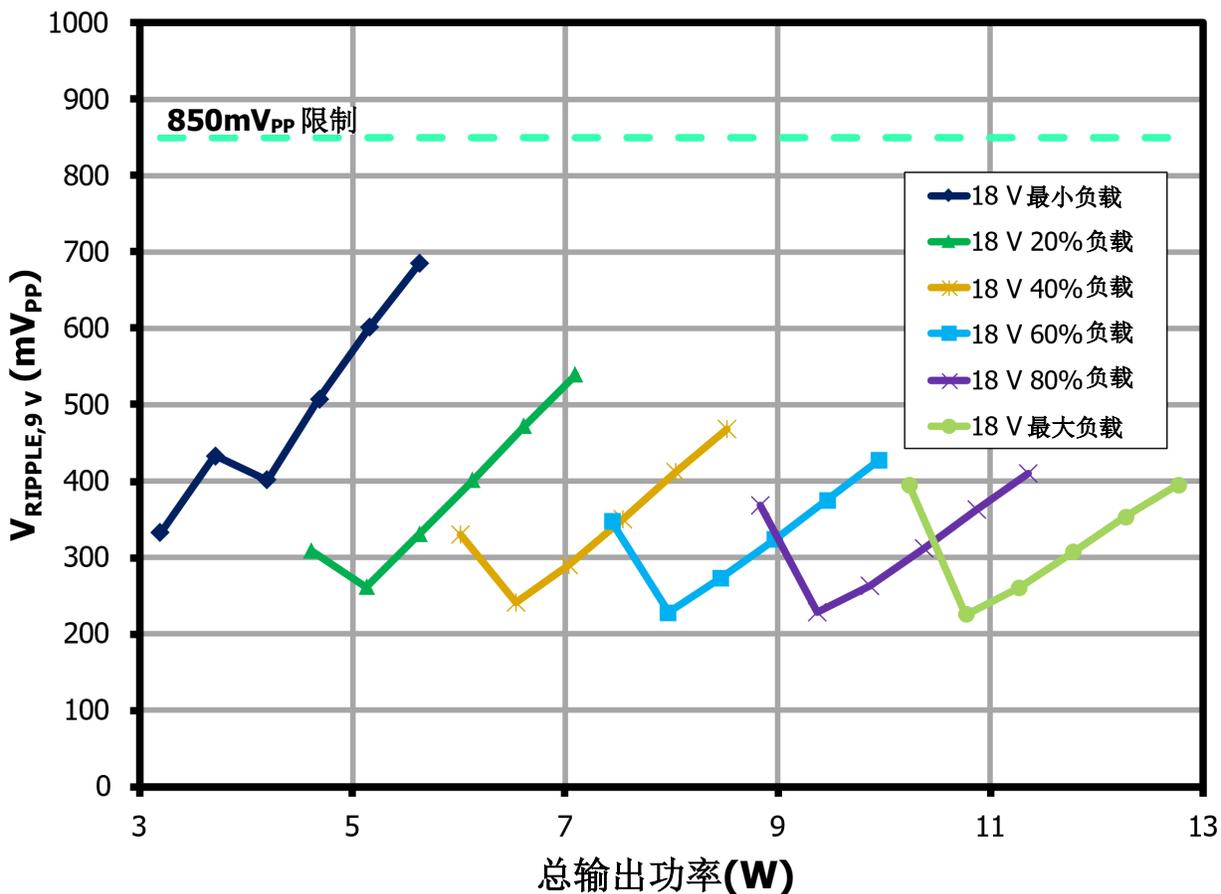


图89 - 在800V<sub>DC</sub>输入及-40°C环境温度下9V输出电压纹波相对于总输出功率的变化

<sup>33</sup>14.17mV<sub>pp</sub> 和 57.14mV<sub>pp</sub> 是在 25° C 环境温度下分别使用短探头和延长探头获得的 18V 和 9V 输出电压纹波值的平均值。



11.4.3.4 1000V<sub>DC</sub>输入

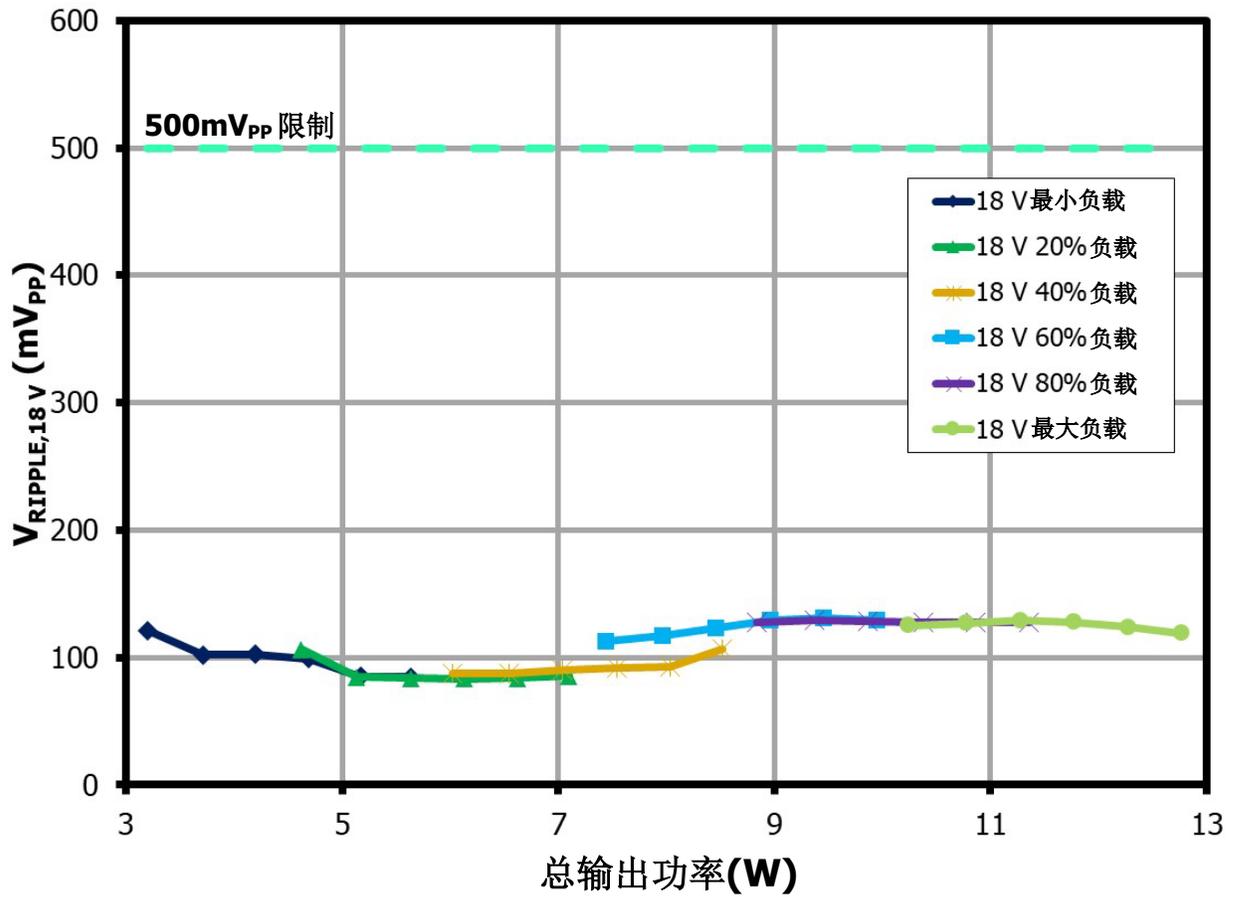


图90 - 在1000V<sub>DC</sub>输入及105°C环境温度下18V输出电压纹波相对于总输出功率的变化

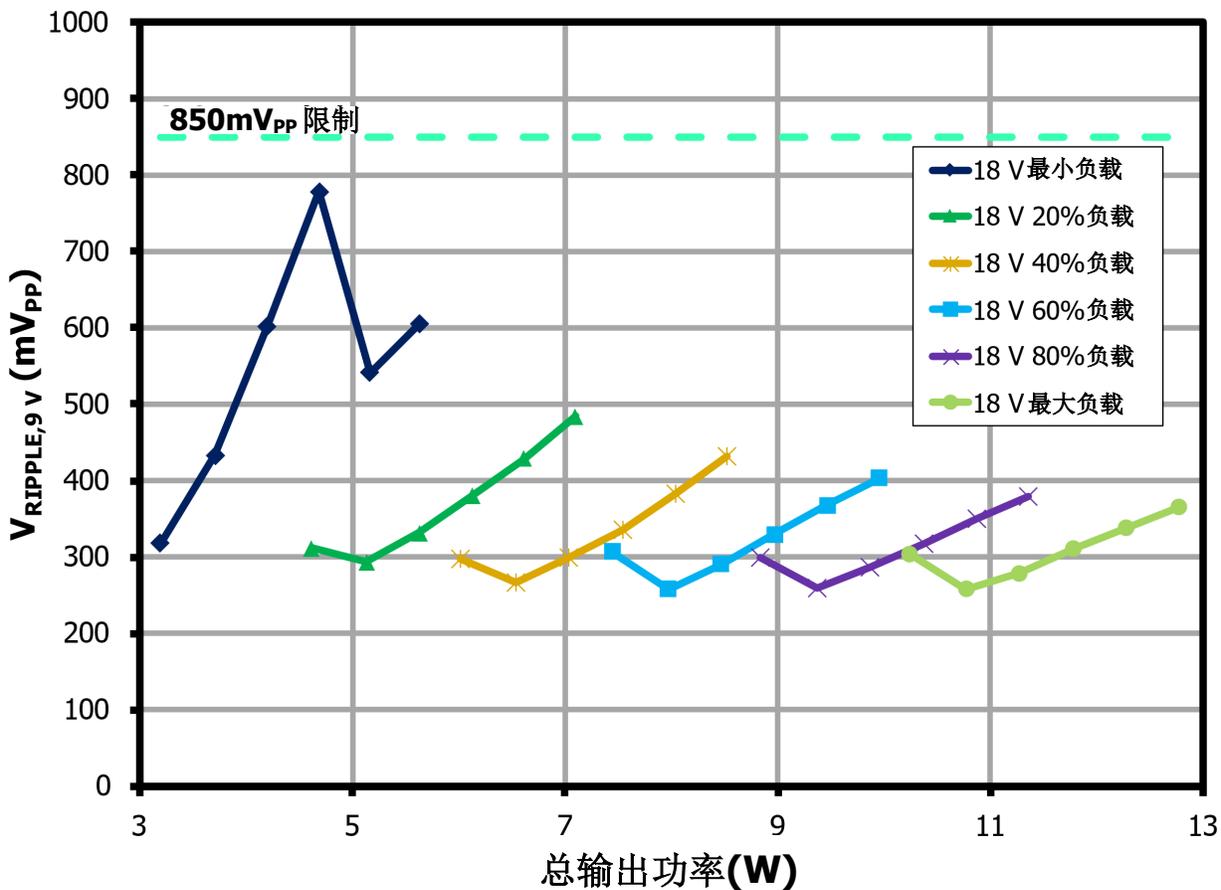


图91 - 在1000V<sub>DC</sub>输入及105°C环境温度下9V输出电压纹波相对于总输出功率的变化

下图显示的-40°C环境温度下的输出电压纹波数据包括14.17mV<sub>PP</sub>偏移量，以补偿探头延长线对电压纹波值的影响。<sup>34</sup>

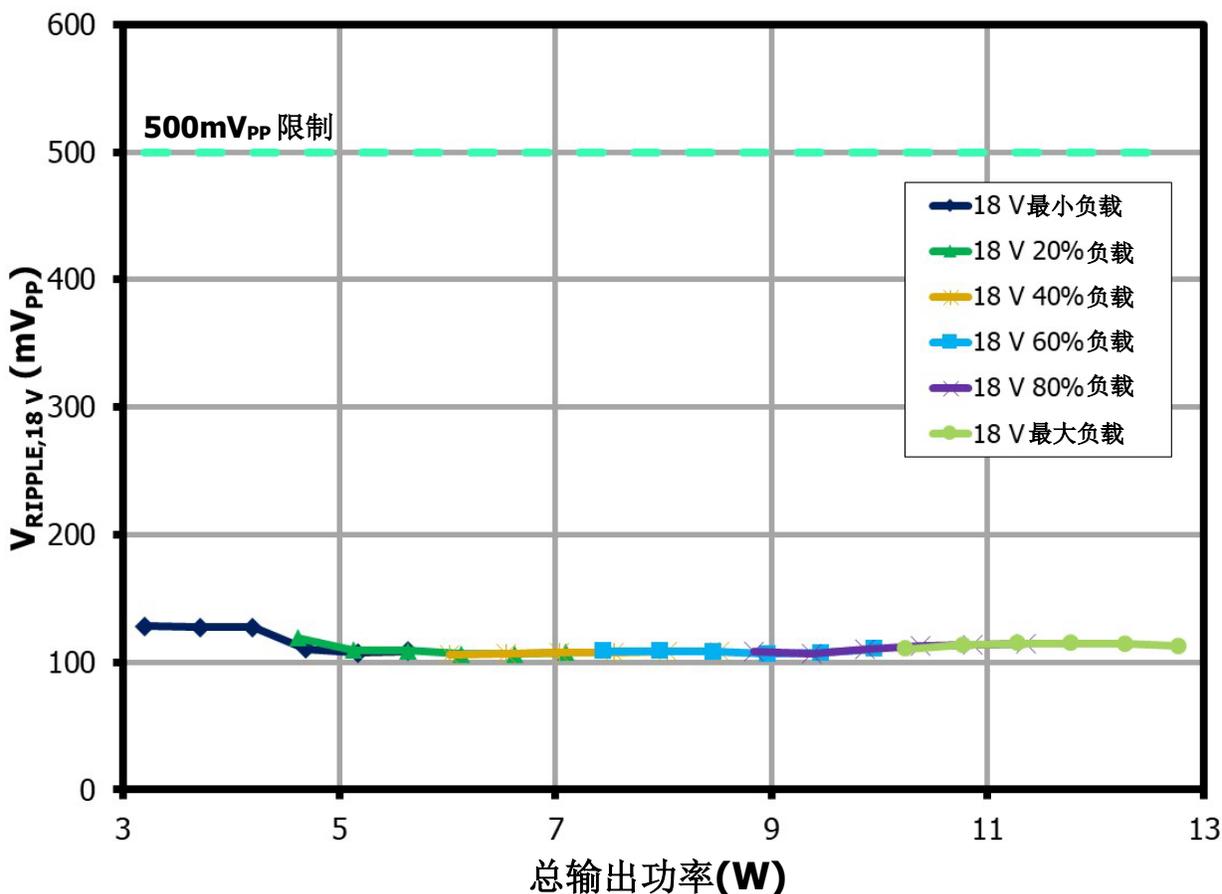


图92 - 在1000V<sub>DC</sub>输入及-40°C环境温度下18V输出电压纹波相对于总输出功率的变化

<sup>34</sup>14.17mV<sub>PP</sub> 和 57.14mV<sub>PP</sub> 是在 25° C 环境温度下分别使用短探头和延长探头获得的 18V 和 9V 输出电压纹波值的平均值。

下图显示的-40°C环境温度下的输出电压纹波数据包括57.14mV<sub>PP</sub>偏移量，以补偿探头延长线对电压纹波值的影响。<sup>35</sup>

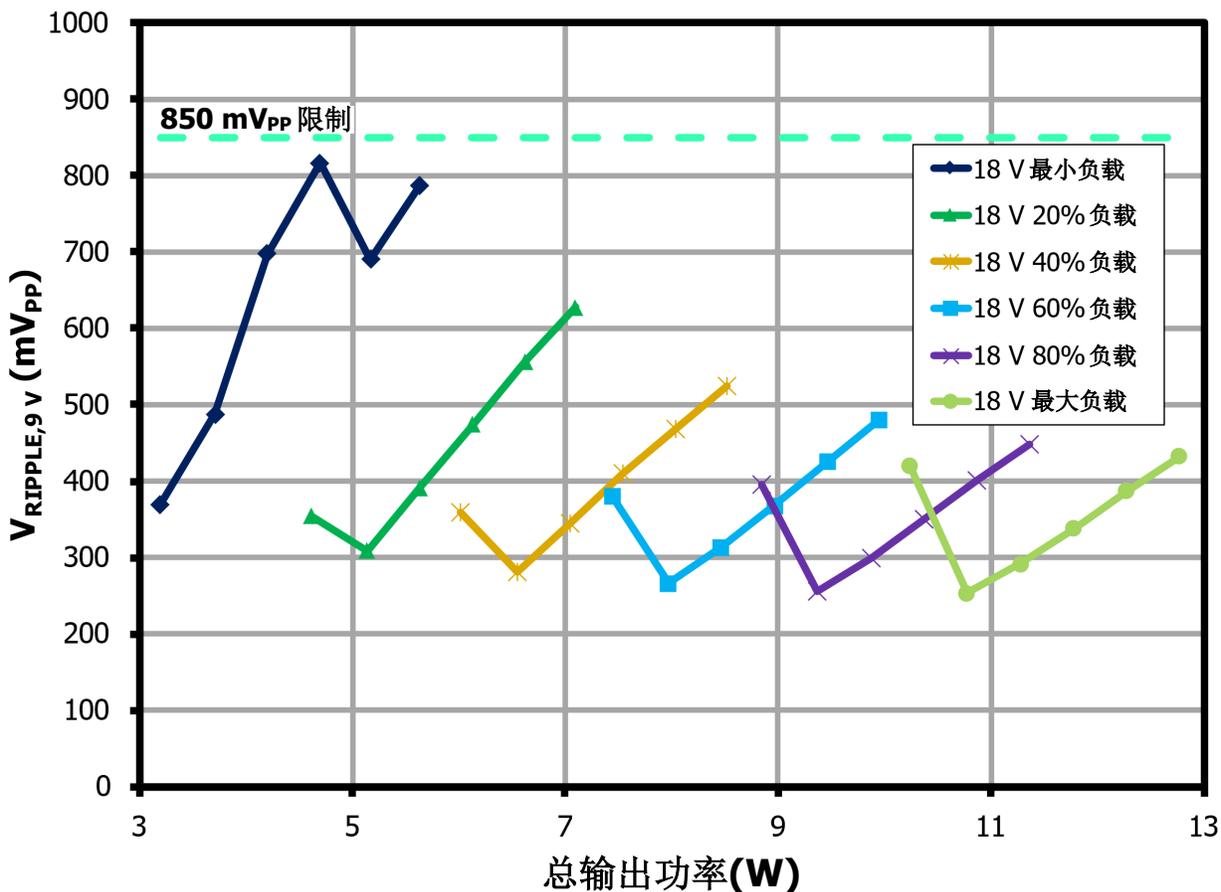


图93 - 在1000V<sub>DC</sub>输入及-40°C环境温度下9V输出电压纹波相对于总输出功率的变化

<sup>35</sup>14.17mV<sub>pp</sub> 和 57.14mV<sub>pp</sub> 是在 25° C 环境温度下分别使用短探头和延长探头获得的 18V 和 9V 输出电压纹波值的平均值。



## 12 输出过载

### 12.1 18V输出过载能力

电源置于热处理室内。在被测电源通电之前，将热处理室预热到所需的环境温度至少30分钟。在每个测试序列开始时，电源均需连续工作至少20分钟。对于每个负载点，在18V输出下进行电压和电流测量前，电源均需负载超过60秒。

#### 12.1.1 30V<sub>DC</sub>输入

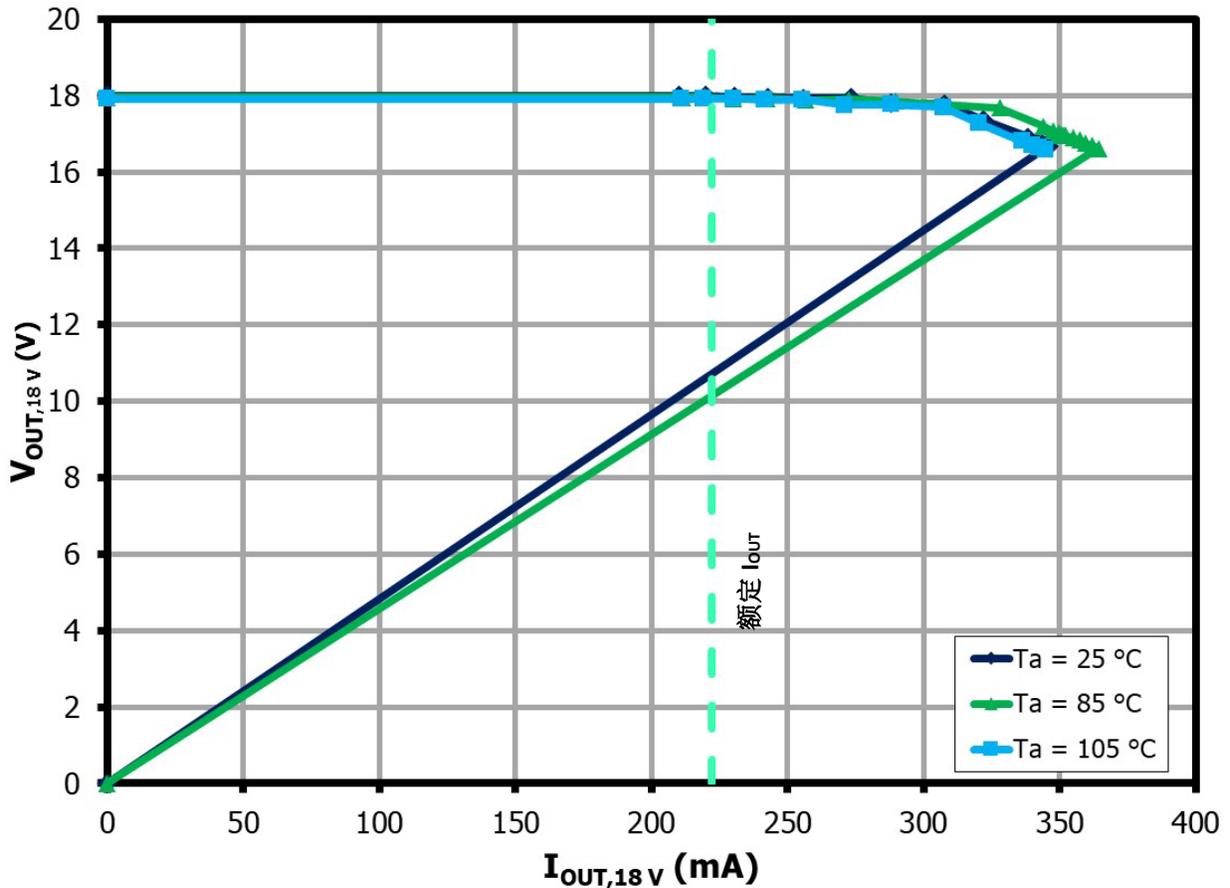


图94 - 在30V<sub>DC</sub>输入下的18V输出过载曲线

### 12.1.2 60V<sub>DC</sub>输入

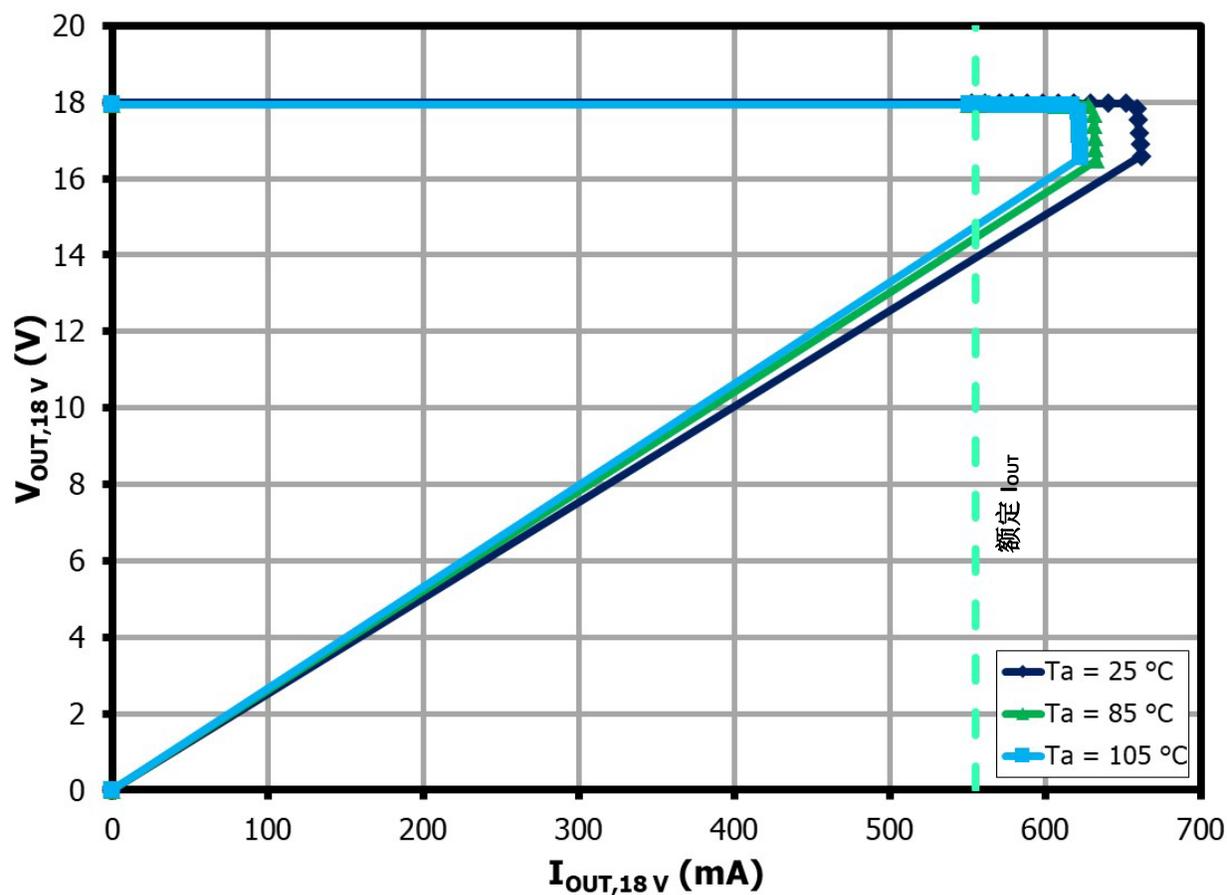


图95 - 在60V<sub>DC</sub>输入下的18V输出过载曲线

### 12.1.3 800V<sub>DC</sub>输入

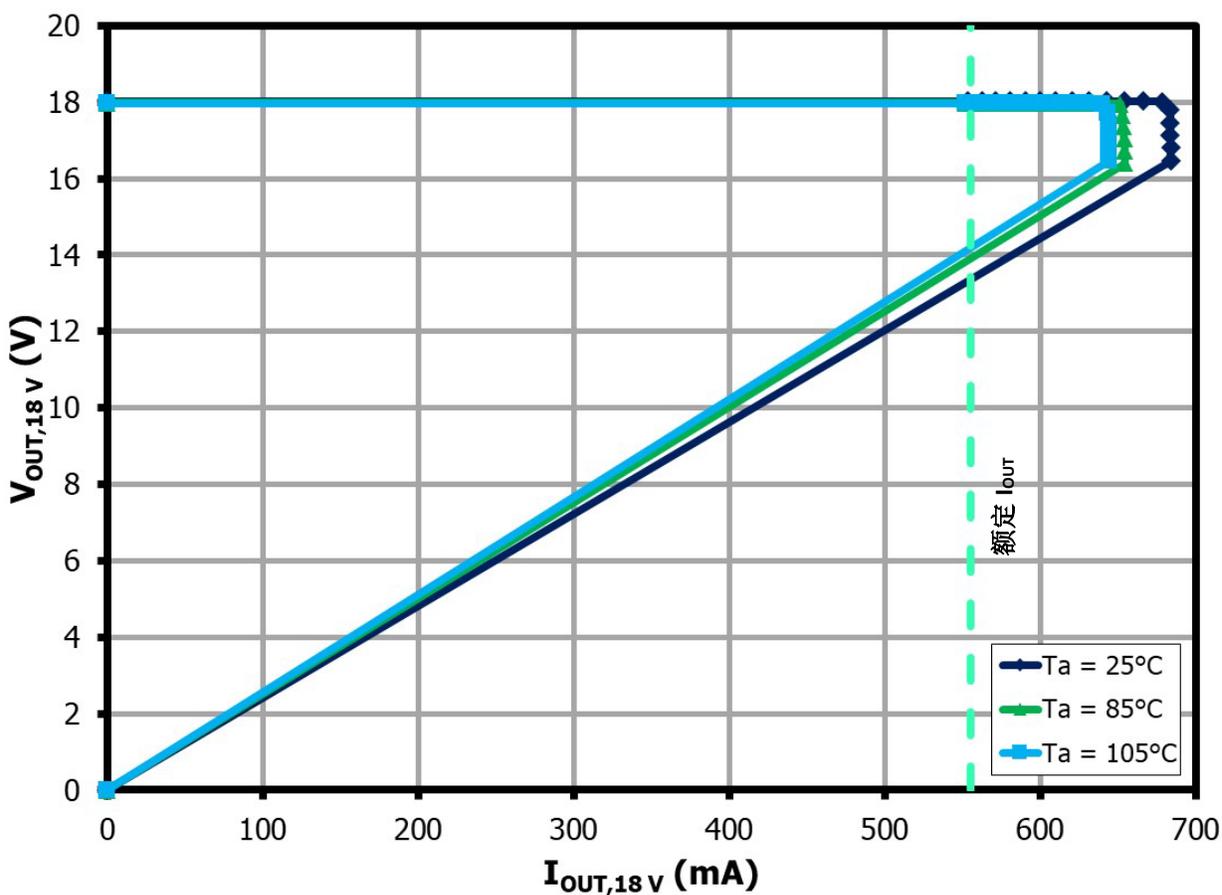


图96 - 在800V<sub>DC</sub>输入下的18V输出过载曲线

12.1.4 1000V<sub>DC</sub>输入

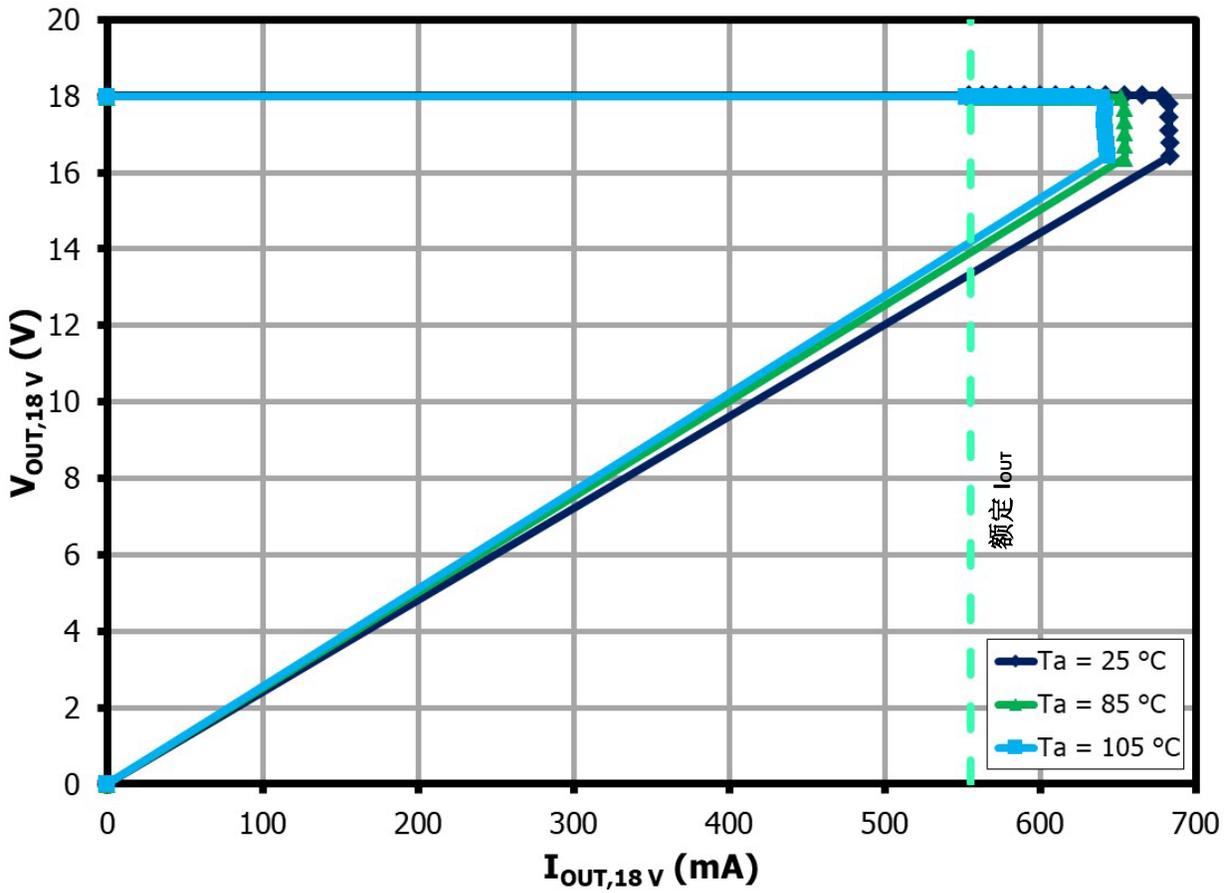


图97 - 在1000V<sub>DC</sub>输入下的18V输出过载曲线

### 13 版本历史

日期	作者	修订版本	说明和变更	审核者
2022/5/9	JRL	1.0	初始版本。	Apps & Mktg
2022/7/20	JRL	1.1	更新了图4至5。更新了第2.2、7.5和9.1部分。	Apps & Mktg
2023/7/31	JS	2.0	更新并增加了在-40°C环境温度测试情况下的数据部分和图表。	Apps & Mktg
2024/5/15	NU	2.1	文字变更。更新了空载图表。	Apps & Mktg



有关最新产品信息，请访问：[www.power.com](http://www.power.com)

Reference Designs are technical proposals concerning how to use Power Integrations' automotive RDHP and DER in particular applications and/or with certain power modules. These proposals are "as is" and are not subject to any qualification process. The suitability, implementation and qualification are the sole responsibility of the end user. The statements, technical information and recommendations contained herein are believed to be accurate as of the date hereof. All parameters, numbers, values and other technical data included in the technical information were calculated and determined to our best knowledge in accordance with the relevant technical norms (if any). They may base on assumptions or operational conditions that do not necessarily apply in general. We exclude any representation or warranty, express or implied, in relation to the accuracy or completeness of the statements, technical information and recommendations contained herein. No responsibility is accepted for the accuracy or sufficiency of any of the statements, technical information, recommendations or opinions communicated and any liability for any direct, indirect or consequential loss or damage suffered by any person arising therefrom is expressly disclaimed.

Power Integrations reserves the right to make changes to its products at any time to improve reliability or manufacturability. Power Integrations does not assume any liability arising from the use of any device or circuit described herein. POWER INTEGRATIONS MAKES NO WARRANTY HEREIN AND SPECIFICALLY DISCLAIMS ALL WARRANTIES INCLUDING, WITHOUT LIMITATION, THE IMPLIED WARRANTIES OF MERCHANTABILITY, FITNESS FOR A PARTICULAR PURPOSE, AND NON-INFRINGEMENT OF THIRD PARTY RIGHTS.

**Patent Information**

The products and applications illustrated herein (including transformer construction and circuits' external to the products) may be covered by one or more U.S. and foreign patents, or potentially by pending U.S. and foreign patent applications assigned to Power Integrations. A complete list of Power Integrations' patents may be found at [www.power.com](http://www.power.com). Power Integrations grants its customers a license under certain patent rights as set forth at <http://www.power.com/ip.htm>.

Power Integrations, the Power Integrations logo, CAPZero, ChiPhy, CHY, DPA-Switch, EcoSmart, E-Shield, eSIP, eSOP, HiperPLC, HiperPFS, HiperTFS, InnoSwitch, Innovation in Power Conversion, InSOP, LinkSwitch, LinkZero, LYTSwitch, SENZero, TinySwitch, TOPSwitch, PI, PI Expert, SCALE, SCALE-1, SCALE-2, SCALE-3 and SCALE-iDriver, are trademarks of Power Integrations, Inc. Other trademarks are property of their respective companies. ©2019, Power Integrations, Inc.

**Power Integrations全球销售支持网络**

**全球总部**

5245 Hellyer Avenue  
San Jose, CA 95138, USA.  
Main: +1-408-414-9200  
Customer Service:  
Worldwide: +1-65-635-64480  
Americas: +1-408-414-9621  
e-mail: [usasales@power.com](mailto:usasales@power.com)

**中国（上海）**

徐汇区漕溪北路88号圣爱广场  
1601-1603室  
上海|中国, 200030  
电话: +86-21-6354-6323  
电子邮箱: [chinasales@power.com](mailto:chinasales@power.com)

**中国（深圳）**

南山区科技南八路二号豪威科技大厦17层  
深圳|中国, 518057  
电话: +86-755-8672-8689  
电子邮箱: [chinasales@power.com](mailto:chinasales@power.com)

**德国（AC-DC/LED业务销售）**

Einsteinring 24  
85609 Dornach/Aschheim  
Germany  
Tel: +49-89-5527-39100  
e-mail: [eurosales@power.com](mailto:eurosales@power.com)

**德国（门极驱动器销售）**

HellwegForum 1  
59469 Ense  
Germany  
Tel: +49-2938-64-39990  
e-mail: [igbt-driver.sales@power.com](mailto:igbt-driver.sales@power.com)

**印度**

#1, 14<sup>th</sup> Main Road  
Vasanthanagar  
Bangalore-560052  
India  
Phone: +91-80-4113-8020  
e-mail: [indiasales@power.com](mailto:indiasales@power.com)

**意大利**

Via Milanese 20, 3<sup>rd</sup> Fl.  
20099 Sesto San Giovanni (MI) Italy  
Phone: +39-024-550-8701  
e-mail: [eurosales@power.com](mailto:eurosales@power.com)

**日本**

Yusen Shin-Yokohama 1-chome Bldg.  
1-7-9, Shin-Yokohama, Kohoku-ku  
Yokohama-shi,  
Kanagawa 222-0033 Japan  
Phone: +81-45-471-1021  
e-mail: [japansales@power.com](mailto:japansales@power.com)

**韩国**

RM 602, 6FL  
Korea City Air Terminal B/D,  
159-6  
Samsung-Dong, Kangnam-Gu,  
Seoul, 135-728 Korea  
Phone: +82-2-2016-6610  
e-mail: [koreasales@power.com](mailto:koreasales@power.com)

**新加坡**

51 Newton Road,  
#19-01/05 Goldhill Plaza  
Singapore, 308900  
Phone: +65-6358-2160  
e-mail: [singaporesales@power.com](mailto:singaporesales@power.com)

**台湾地区**

5F, No. 318, Nei Hu Rd.,  
Sec. 1  
Nei Hu District  
Taipei 11493, Taiwan R.O.C.  
Phone: +886-2-2659-4570  
e-mail: [taiwansales@power.com](mailto:taiwansales@power.com)

**英国**

Building 5, Suite 21  
The Westbrook Centre  
Milton Road  
Cambridge  
CB4 1YG  
Phone: +44 (0) 7823-557484  
e-mail: [eurosales@power.com](mailto:eurosales@power.com)

