DOI：10.13234/j.issn.2095-2805.2026.5.49 **中图分类号**：TM46 **文献标志码**：A

Boost 变换器全功率范围效率优化控制策略

汪 涛，申宏扬，廖卉莲，王群锋
(国网河南省电力公司直流分公司，郑州 450000)

摘要：临界导通模式 CRM(critical conduction mode)下 Boost 变换器开关频率受输入电压和负载的影响而大范围变化，导致其开关损耗增加、整体效率下降。针对以上问题，提出一种 Boost 变换器全功率范围效率优化控制策略。首先，在传统变幅控制策略基础上引入电感电流内环控制，推导了断续导通模式 DCM(discontinuous conduction mode)和临界导通模式下电感电流峰值与输出功率之间的数学关系并据此精确控制电感电流峰值。其次，对不同负载时的变换器电感电流峰值选择最优的工作模式，降低电流应力，提升变换器效率。最后，搭建了 1 台 300 W 的实验样机对提出的控制策略进行实验验证。结果表明，相较于传统方法，提出的优化控制策略将电流应力至少降低了 8.34%，峰值效率提高了 2.15%。

关键词：Boost 变换器；变频控制；变幅控制；峰值效率

Boost Converter Full Power Range Efficiency Optimization Control Strategy

WANG Tao, SHEN Hongyang, LIAO Huilian, WANG Qunfeng
(State Grid Henan DC Company, Zhengzhou 450000, China)

Abstract: Critical conduction mode (CRM), in which the switching frequency of Boost converter changes widely due to the input voltage and load, leading to an increase in switching loss and a decrease in overall efficiency. To solve the above problems, an optimal control strategy for the full power range efficiency of Boost converter is proposed. Firstly, the internal loop control of inductive current is introduced on the basis of the traditional variable amplitude control strategy, and the mathematical relationship between the peak of inductive current and the output power under discontinuous conduction mode (DCM) and critical conduction mode is derived, and the peak of inductive current is accurately controlled accordingly. Secondly, the optimal working mode is selected for the peak value of inductive current at different loads to reduce the current stress and improve the efficiency of the converter. Finally, a 300 W experimental prototype is built to verify the proposed control strategy. The results show that compared with the traditional method, the proposed optimal control strategy can reduce the current stress by at least 8.34% and increase the peak efficiency by 2.15%.

Keywords: Boost converter; variable frequency control; variable amplitude control; peak efficiency

随着电力电子技术的不断发展，对电力电子装备的高效率、高功率密度的应用需求不断提高[1]。Boost 变换器凭借拓扑结构简单、可靠性较高的优势，在航空航天、新能源发电和绿色照明等领域得到了广泛应用[2-3]。

基于 Boost 变换器的控制策略性能优化是目前一个主要的研究方向。Boost 电路一般采用变幅控制，该方法[4-5]通过改变基准电压的幅值来控制输出电压最终的稳定值，但是变幅控制仅在输出电压改变时才能被检测并反馈纠正，因此响应速度较

收稿日期：2023-10-10；**修回日期**：2023-12-21；**录用日期**：2024-03-22；**网络首发日期**：2024-05-15
基金项目：国网河南省电力公司科技资助项目(5217M0220008)
This work is supported by the State Grid Henan Electric Power Company Technology under the grant 5217M0220008

慢。谷值电流控制是一种改进的变幅控制，其动态响应速度更快，但谷值电流控制在占空比极小的情况下仍会呈现一定的不稳定性，产生谐波振荡[6-7]。以上 2 种方法的动态响应速度均比较慢且无法在变换器全负载范围内实现功率的高效传输。

为实现全负载范围内的快速动态响应，变频控制方法被提出[8]。但是传统变频控制方法稳定性不佳，且对输出电压的控制精度较低。为提高 Boost 变换器的传输效率，许多学者提出了改进的控制方法。文献[9]提出基于恒定关断时间的变频控制，为了防止开关管长时间关断导致控制失效，其给出了控制条件以保证变换器的正常工作；但在应用中闭环参数的设计较为复杂，增加了其运用的繁杂度。文献[10]提出恒定导通时间下的变频控制，实现了对输出电压的调节，相较于传统电压型控制，变频控制下的系统具有更好的暂态性能；但其控制的稳态精度仍有些不足。滞环控制也是变频控制的一种，文献[11]采用电流滞环跟踪控制方法，该方法电流跟踪速度快、精度高，但控制电路设计比较复杂，且无法工作于空载状态。

传统控制策略虽然能够提高变换器的动态响应速度，但是其模式切换过程复杂且稳态时输出电压存在较大误差[12-14]。Boost 变换器在轻载时，所需功率较低，为了减少功率损耗，可以使电路工作在断续导通模式 DCM(discontinuous conduction mode)[15-17]；在变换器的传输功率较大时，为了降低变换器的传输损耗和输出电流的纹波，电路需要工作在临界导通模式 CRM(critical conduction mode)或者连续导通模式 CCM(continuous conduction mode)[18-20]。根据上述特性，虽然变幅或变频控制也可以调节工作模式，但需提前设计且不易控制。为进一步提高开关变换器的工作特性，本文提出了一种 Boost 变换器全范围效率优化控制策略，研究了 CRM 与 DCM 的切换。该控制策略结合了变幅控制和变频控制的优点，研究了电感峰值电流、输出功率与输入电压之间的关系，其可以跟随负载变换调节最优的工作模式，增加的自由度也可更好地控制，提高了控制准确性；同时可以减小开关管的电流应力，减少开关管的导通损耗，实现全负载范围内 Boost 变化器效率的优化。

1 Boost 电路的控制方法分析

1.1 Boost 电路变幅控制原理

图 1 为 Boost 变换器的主电路及变幅控制示意图。图中：U_{in}、U_{out}分别为输入、输出电压；S 为导通开关；L 为电感；U_L为电感电压；I_L为电感电流；C_{out}为电容；VD 为续流二极管；$e(t)$为输出误差；$U_{\text{out}}(t)$为在 t 时刻的输出电压；U_{ref}为参考/基准电压；$u(t)$为数字控制器在 t 时刻输出的控制量。则开关管开通和关断电感两端的电压可表示为

$$\begin{cases} U_L = U_{\text{in}} = L\dfrac{\mathrm{d}I_L}{\mathrm{d}t} \\ U_L = U_{\text{out}} - U_{\text{in}} = L\dfrac{\mathrm{d}I_L}{\mathrm{d}t} \end{cases} \tag{1}$$

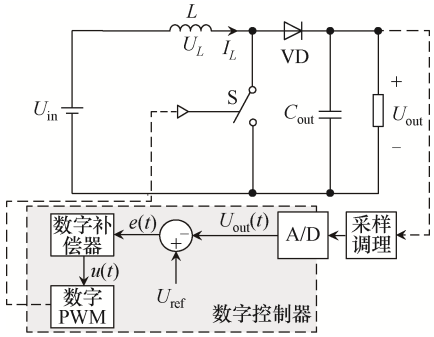


图 1 Boost 变换器变幅控制示意图

Fig. 1 Boost converter amplitude control diagram

输入、输出电压的直接比例关系为

$$U_{\text{out}} = \frac{1}{T}\int_0^T U_{\text{out}}(t)\mathrm{d}t = \frac{1}{1-D}U_{\text{in}} \tag{2}$$

式中：T 为开关管的工作周期；D 为占空比。传统变幅控制采用电压的幅值控制，仅能对电压做出反馈，无法实现对变换器工况的设定[12]。

1.2 Boost 电路变频控制原理

图 2 为 Boost 变换器的变频控制原理及控制部分示意图[19]。

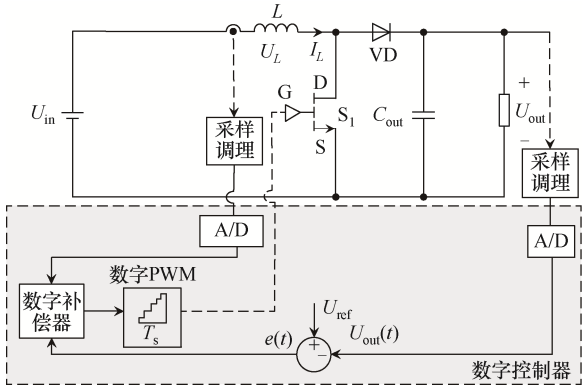


图 2　Boost 变换器变频控制示意图

Fig. 2 Boost converter frequency conversion control diagram

则输入、输出电压的直接比例关系为

$$U_{\text{out}}=\frac{1}{T}\int_0^T U_{\text{out}}(t)\mathrm{d}t=\frac{1/f_{\text{s}}}{1/f_{\text{s}}-t_{\text{on}}}U_{\text{in}} \tag{3}$$

式中：T=1/f_{s}；f_{s} 为开关管的工作频率；t_{on} 为开关管的导通时间。t_{on} 保持不变，当输出电压发生变化时，通过调节开关管的工作频率实现输出跟随给定的目的。相较于传统的变幅控制，Boost 变频控制具有较好的动态性能，但其控制稳定性不佳，同样无法实现对变换器工况的精确设定[21-22]。

2　Boost 变换器全范围效率优化控制策略

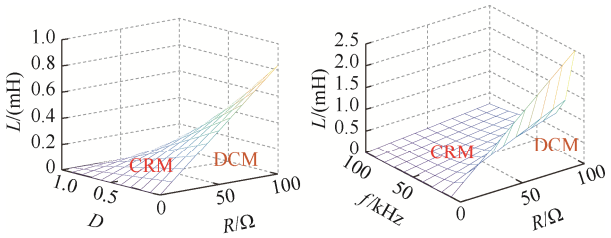
2.1　Boost 电路的工作模式分析

基于第 1 节对 Boost 电路的工作模式进行分析，进一步阐述本文所提控制方法的特点。实际上，当 Boost 电路设计完成后，工作状态受已设定电感的约束[23]，约束条件为

$$L\leqslant\frac{(1-D)^2DR}{2f} \tag{4}$$

图 3(a)为变幅控制下，占空比 D 和负载 R 与电感 L 之间的关系图；图 3(b)为变频控制下，频率 f 和负载 R 与电感 L 之间的关系图。

由图 3(a)可知，在变换器的工作频率固定时，当电路的电感值处在曲面下方时，电路将工作在 DCM；仅当电感值处于曲面上时，电路才工作在 CRM。由图 3(b)可知，当占空比 D 保持不变时，仅当电感值处于曲面上时，电路才工作在 CRM；电路的电感值处在曲面下方时，电路工作在 DCM。



(a) 变幅控制下的 D、R和L的关系　　(b) 变频控制下的 f、R和L的关系

图 3　变幅控制与变频控制示意图

Fig. 3 Amplitude control and frequency conversion control diagram

由于变频与变幅控制均在电路电感确定之后，故电路的工作模式无法再根据实际电路负载进行精确的模式切换，限制了开关管电流应力的优化。

2.2　Boost 变换器全范围效率优化控制策略

针对上述基本方法的不足，提出一种 Boost 变换器全范围效率优化控制策略，其控制原理如图 4 所示。该策略通过增加电感电流内环来实现 Boost 变换器的工作模式切换，使其在轻载时工作在 DCM；在其他情况工作在 CRM。为了简化分析，假设传输效率为 100%。

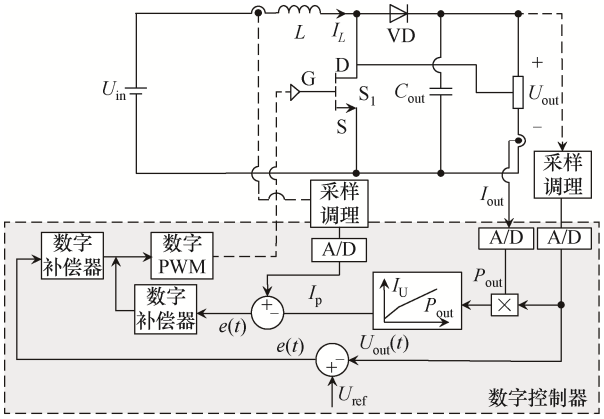


图 4　Boost 变换器全范围效率优化控制示意图

Fig. 4 Boost converter full range efficiency optimization control diagram

由图 4 可知，输出电压 U_{out} 采样后与基准电压 U_{ref} 进行比较后进入数字补偿器，然后通过数字 PWM 控制开关管的导通。同时输出电压 U_{o} 与输出电流 I_{o} 经过相乘器得到负载的输出功率 P_{out}，通过

输出功率 P_{out} 判断所处模式为 DCM 或 CRM，进而通过函数编辑器得到对应的电感峰值电流 I_p。最后电感峰值电流 I_p 和电感电流 I_L 经过数字控制器产生驱动信号，控制开关管的关断。

2.2.1 CRM

若要使电路工作在 CRM，需保证电感值不变，由 Boost 的电路工作原理可得

$$\frac{L}{RT}=\frac{D(1-D)^2}{2} \tag{5}$$

又由原理可知，电路工作在 CRM 时，需满足伏秒平衡原理[24]，即

$$(U_{out}-U_{in})\frac{t_{off}}{L}=\frac{U_{in}t_{on}}{L} \tag{6}$$

式中，t_{off} 为开关管的关断时间。

根据式(5)和式(6)以及 P_{out}=P_{in}，可得电感电流峰值和输入功率的关系为

$$I_p=\frac{2P_{out}}{U_{in}} \tag{7}$$

综上可得 Boost 变换器电感峰值电流 I_p 和输出功率 P_{out}、输入电压 U_{in} 的关系曲线，如图 5 所示。

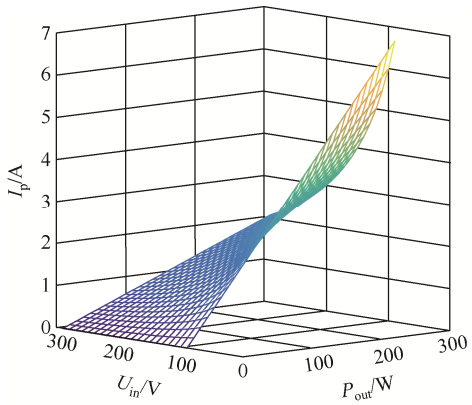


图 5 CRM 下 I_p、P_{out} 和 U_{in} 的关系图

Fig. 5 Relationship diagram of I_p, P_{out} and U_{in} in CRM

2.2.2 DCM

若要使电路工作在 DCM，占空比 D 与输入电压 U_{in} 和输出电压 U_{out} 的关系需满足

$$D<(U_{out}-U_{in})/U_{out} \tag{8}$$

当电路工作在 DCM 时，根据 Boost 电路的工作原理[25]可得

$$(U_{out}-U_{in})\delta T=U_{in}DT \tag{9}$$

$$\frac{P_{in}}{U_{in}}=\frac{1}{2}I_p(D+\delta) \tag{10}$$

式中：δT 为开关管断开电感的续流时间；δ 为电感电流下降时间占空比。由此可得 DCM 下 I_p 与 P_{out} 的关系为

$$I_p=\frac{2(U_{out}-U_{in})P_{out}}{DU_{out}U_{in}} \tag{11}$$

DCM 下 I_p、P_{out} 和 U_{in} 的关系如图 6 所示。由图可知，当输入电压保持不变时，电感电流峰值会随输出功率的变化而做出相同变化；当输出功率保持不变时，电感电流和输入电压成反比例关系。

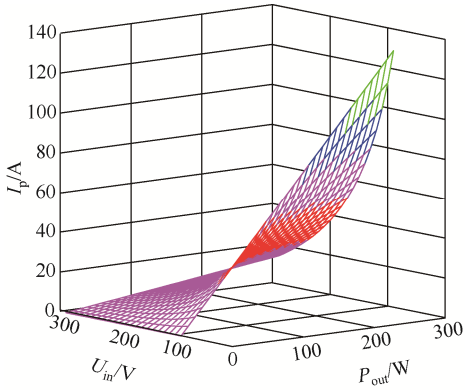


图 6 DCM 下 I_p、P_{out} 和 U_{in} 的关系图

Fig. 6 Relationship diagram of I_p, P_{out} and U_{in} in DCM

2.3 Boost 变换器效率优化控制的实现流程

根据第 2.2 节可得 Boost 变换器全功率范围效率优化控制策略框图，如图 7 所示。

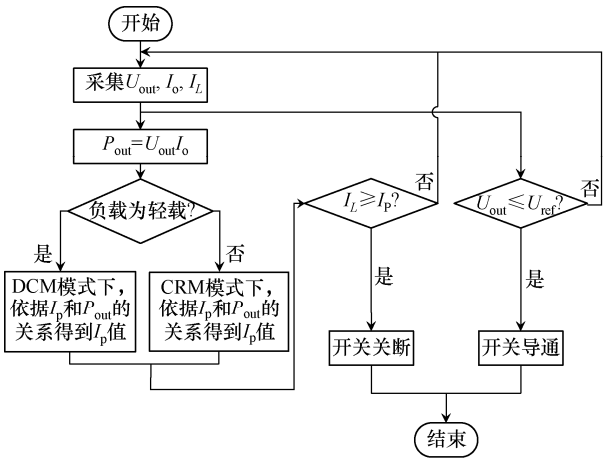


图 7 Boost 变换器全功率范围效率优化控制策略框图

Fig. 7 Boost converter full power range efficiency optimization control strategy diagram

由图 7 可知，Boost 变换器全功率范围效率优

化控制策略流程为：采集输出电压 U_{out}、输出电流 I_o 和电感电流 I_L。当输出电压 U_{out} 下降到基准电压 U_{ref} 时，数字 PWM 控制开关管导通，输出电压 U_{out} 开始上升；同时输出功率 P_{out} 经过函数编辑器，根据输出功率和电感峰值电流的关系曲线，产生电流比较器的基准值 I_p。当电感电流 I_L 上升到峰值电流 I_p 时，经过数字控制器产生驱动信号，控制开关管的关断。该策略可实现 Boost 变换器输出电压的调节和模式的精确控制，进一步提升变化器的效率。

2.4 开关管的电流应力

本文控制策略添加了控制参量的自由度，既可改变电流的峰值，也可调节闭环控制的频率，减少了单独调节占空比控制的开关管的电流应力。当处于 DCM 时，开关管的电流应力为 $I_p=\dfrac{2P_{out}}{U_{in}}$；当处于 CRM 时，开关管电流应力为 $I_p=\dfrac{2(U_{out}-U_{in})P_{out}}{DU_{out}U_{in}}$，设满载功率符号为 $P_{hp,out}$。

工况关系如图 8 所示，即在不同条件下选取最优的工作模式，以达到开关管最低电流应力的控制效果。

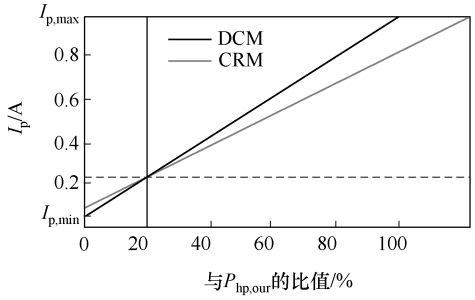


图 8　工况关系图

Fig. 8 Working condition diagram

由图 8 可知，当输入电压为 265 V 时，若输出功率小于等于 $P_{hp,out}$ 的 20%，控制电路工作在 DCM；若输出功率大于 $P_{hp,out}$ 的 20%，控制电路工作在 CRM。在此控制模式下开关管的电流应力可以降到最小，电流应力的表达式为

$$\begin{cases} I_P=\dfrac{2P_{out}}{U_{out}} & P_{out}\leqslant 20\%P_{hp,out} \\ I_P=\dfrac{2(V_{out}-U_{in})P_{out}}{DU_{out}U_{in}} & P_{out}>20\%P_{hp,out} \end{cases} \tag{12}$$

通过 Boost 变换器全功率范围效率优化控制策略，可以根据不同的电路工况，选择最优的工作模式，进而减小开关管的电流应力，精确控制电路模式的切换，提高电路效率[26]。

2.5 损耗分析

GaN 功率开关管由于器件没有反向恢复电流，关断损耗小，故可忽略不计。功率开关管的损耗主要包含 3 部分：导通损耗 P_{cond}、开关损耗 $P_{swtching}$ 和容性损耗 P_{oss}[13]，可分别表示为

$$P_{cond}=I_{DS}^2R_{DS,on} \tag{13}$$

$$P_{swtching}=U_{DS}I_{DS}n_g(Q_{gs}+Q_{gd})f_s \tag{14}$$

$$n_g=R_{g,on}/2(U_{drive}-U_{plat})+R_{g,off}/U_{plat} \tag{15}$$

$$P_{oss}=Q_{oss}U_{DS}f_s \tag{16}$$

式中：I_{DS} 为导通电流的有效值；$R_{DS,on}$ 为导通电阻；U_{DS} 为开关时刻器件漏源极两端电压；n_g 为开关损耗修正系数；Q_{gs} 为栅源电荷；Q_{gd} 为栅漏电荷；$R_{g,on}$、$R_{g,off}$ 分别为开启、关闭时栅极充电电阻；U_{drive} 为栅极驱动电压；U_{plat} 为米勒平台电压；Q_{oss} 为输出电荷，由数据手册给出。

利用优值参数可以简化器件损耗的计算，具体表示为

$$\begin{cases} P_{swtching}=n_gU_{DS}I_{DS}Y_{HS}f_s/R_{DS,on} \\ P_{oss}=U_{DS}f_sY_{oss}/R_{DS,on} \end{cases} \tag{17}$$

式中，Y_{HS} 和 Y_{OSS} 分别为开关损耗优值、输出电容损耗优值，可分别表示为

$$\begin{cases} Y_{HS}=(Q_{gs}+Q_{gd})R_{DS,on} \\ Y_{oss}=Q_{oss}R_{DS,on} \end{cases} \tag{18}$$

则总损耗为

$$P_{GaN,total}=n_Tn_DI_{DS}^2R_{DS,on}+U_{DS}(I_{DS}n_gY_{HS}+Y_{oss})f_s/R_{DS,on} \tag{19}$$

式中，n_T、n_D 分别为导通损耗的温度修正系数、电流波形修正系数。

2.5.1 开关频率范围的选取原则

根据式(19)获得的总损耗和基本不等式 $A+B\geqslant 2\sqrt{AB}$，可得损耗的最小值 $P_{GaN,min}$ 为

$$P_{GaN,min}=2I_{DS}\sqrt{U_{DS}n_Tn_D(n_gI_{DS}Y_{HS}+Y_{oss})f_s} \tag{20}$$

根据式(20)可得$f_{s,max}$与功率的关系，进而可以确定 1 个最大的工作频率，其表达式为

$$f_{s,max} \leqslant \frac{\lambda^2 P_{out}^2}{4U_{DS}^2 I_{DS}^2 n_T n_D (n_g I_{DS} Y_{HS} + Y_{oss})} \tag{21}$$

式中，λ为损耗分配系数。

CRM 下，最低开关频率的取值取决于升压电感和输出功率的大小，变换器工作频率$f_{s,min}$与输出功率P_{out}之间的关系为

$$f_{s,min} \geqslant \frac{U_{out}^2}{2LP_{out}} D(1-D)^2 \geqslant \frac{U_{in}^2 (1-U_{in}/U_{out})}{2LP_{out}} \tag{22}$$

由式(22)可以确定 1 个最小的工作频率。

3 实验验证

为了验证本文所提 Boost 变换器全范围效率优化控制策略的正确性，搭建如图 9 所示的实验平台。Boost 电路参数如下：额定输出功率为 300 W；额定输出电压为 400 V；输入电压为 90~265 V；电感为 250 μH；电容为 100 μF；开关频率为 30~200 kHz，开关器件为 GaN 器件。

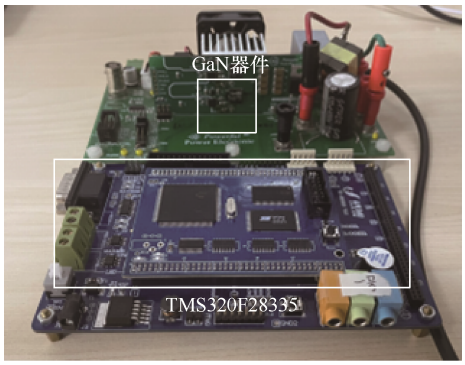


图 9 Boost 变换器实验平台

Fig. 9 Boost converter experimental platform

利用图 9 的实验平台，分别对输入电压为 90 V、265 V 时的工作模式进行分析，其不同负载下的输出电压和电感电流及脉冲实验波形如图 10~图 11 所示。图中，U_{GS}为导通关开电压。在图 10(a)中电路工作在设定的工作模式，在 20%的轻载下电感电流的峰值为 1.374 A，电路工作在 DCM，输出电压稳定为 400 V；图 10(d)电路工作在 CRM，电感电流的峰值为 2.120 A。图 11(a)电路工作在设定的工作模式，电感电流的峰值为 0.242 A；在图 11(b)~图(d)中，电路工作在 CRM。

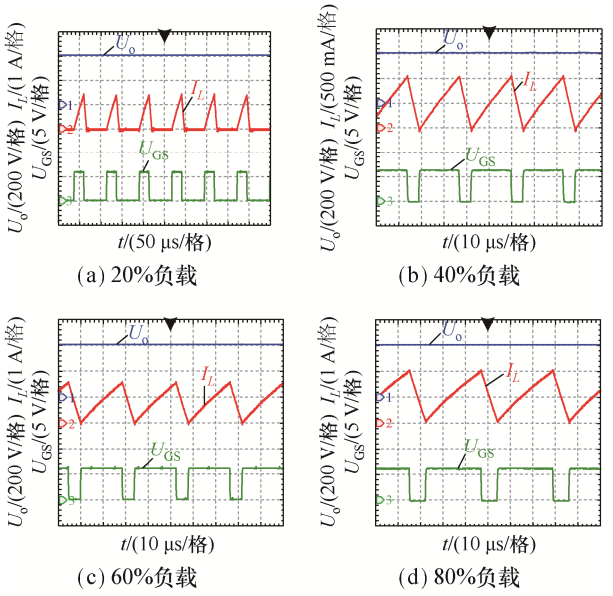


图 10 U_{in}=90 V 电路工作模式

Fig. 10 Circuit operating mode when U_{in} =90 V

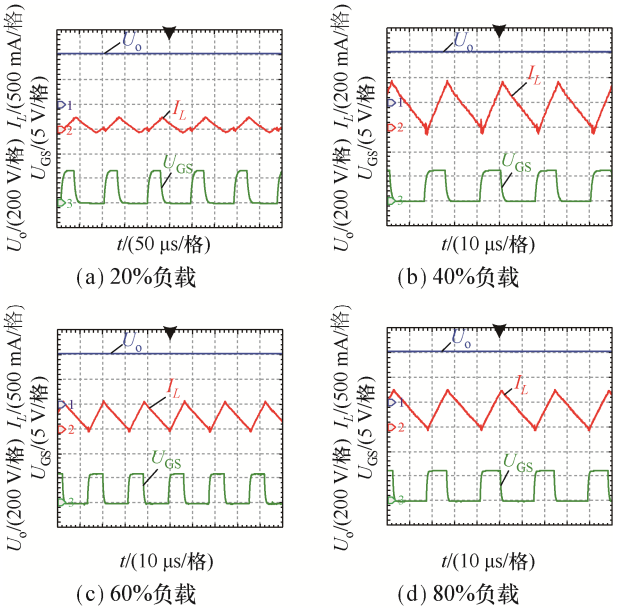


图 11 U_{in}=265 V 电路工作模式

Fig. 11 Circuit operating mode when U_{in}=265 V

由图 10 和图 11 可得，本文控制策略可实现对 Boost 变换器输出电压的调节和模式的精确控制。该控制策略使电路工作在电流应力最优的工作模式，电流应力对比传统方法具有明显优化，两者的对比结果见表1。

表 1　电流应力对比分析

Tab.1 Comparative analysis of current stress

输入电压/V	负载/%	本文控制策略 I_p/A	变幅控制 I_p/A	变频控制 I_p/A	应力优化	
					本文控制策略与变幅控制策略对比提升/%	本文控制策略与变频控制策略对比提升/%
90	20	1.374	1.533	1.553	10.37	11.52
	40	1.036	1.267	1.231	18.23	15.84
	60	1.567	1.763	1.801	11.11	12.99
	80	2.120	2.313	2.331	8.34	9.05
265	20	0.242	0.324	0.334	25.93	27.54
	40	0.364	0.453	0.465	19.65	21.72
	60	0.553	0.681	0.693	18.79	20.20
	80	0.734	0.831	0.892	11.67	17.71

本文控制策略与变幅、变频控制策略在 Boost 变换器全范围工作的效率曲线测试对比结果，如图 12 所示。

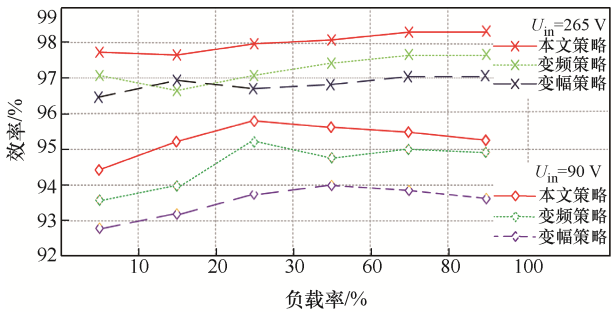


图 12　不同负载率下的效率曲线

Fig. 12 Efficiency curves at different load ratios

由图 12 可知，本文控制策略的全负载效率优化更明显，效率最高提升量达到 2.15%，输入电压为 265 V 时，轻载时的工作效率约为 97.73%、半载以上的工作效率约为 98.07%；输入电压为 90 V 时，轻载时的工作效率也可达 94.44%，验证了本文方法的可行性。

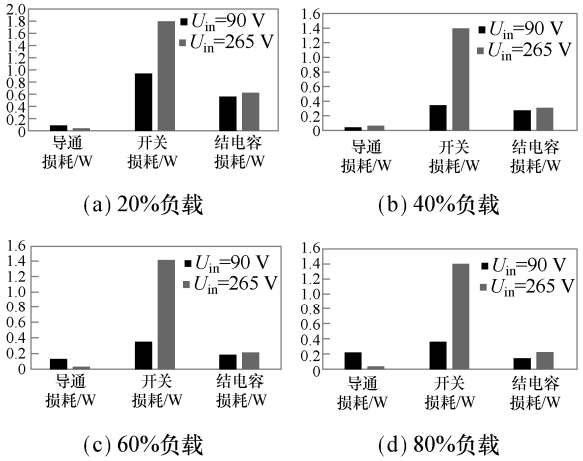
表 2 为输入电压不同时，不同负载的理论计算效率和实际测试效率的损耗偏差值。其偏差值产生的主要原因是器件温度、杂散损耗、器件参数误差、计算公式误差、测量仪器精度等。

图 13 为开关管损耗分布，即输入电压不同时，不同负载的器件损耗。其功率损耗根据电路参数与损耗计算公式获得。

表 2　损耗偏差表

Tab. 2 Loss deviation table

负载/%	U_{in}=90 V			U_{in}=265 V		
	理论计算效率/%	实际测试效率/%	偏差/%	理论计算效率/%	实际测试效率/%	偏差/%
20	97.3	95.1	2.2	98.4	97.6	0.8
40	98.1	95.8	2.3	98.7	98.1	0.6
60	97.9	95.7	2.2	98.8	98.2	0.6
80	98.8	95.4	3.4	99.1	98.4	0.7



(a) 20%负载　(b) 40%负载

(c) 60%负载　(d) 80%负载

图 13　开关管损耗分布

Fig. 13 Switching tube loss distribution

由图 13 可知，在轻载情况下，低压时，开关损耗和结电容损耗对总损耗的影响最大；高压时，开关损耗对总损耗的影响最大。在重载情况下，低压时导通损耗增加，开关损耗降低；高压时，开关

损耗对总损耗的影响最大，结电容损耗降低。

4 结语

本文提出了一种 Boost 变换器全范围效率优化控制策略，研究了其控制策略与特性，通过添加自由度来提升变换器控制的准确性。分析表明，在 DCM 工况下，电感电流峰值与负载侧的输出功率是线性关系；在 CRM 工况下，电感电流峰值与负载侧的输出功率是非线性关系。利用二者的关系，电感电流峰值可以反映负载的变换。当负载变化时，电感电流控制回路的参考值也会对应调整，以确保电路工作在设定的工况下；同时可以根据负载的变换选择最优的工况，保证开关管的应力最小，减小全负载范围内的电流应力。实验表明，在此控制方法下，变换器可以工作在设定的工作模式，电流应力至少优化了 8.34%，峰值效率提高了 2.15%，实现了全负载范围内 Boost 电路效率的优化，验证了理论分析的正确性与准确性。后续将研究精确谷值开通以及基于谷值开通的频率限制控制策略，从而进一步提高整个负载范围内效率。

参考文献：

[1] 田富升, 曾怡达, 谭金练, 等. 新型高增益 DC/DC 升压变换器的研究[J]. 电力电子技术, 2019, 53(12): 1-3, 15.
Tian Fusheng, Zeng Yida, Tan Jinlian, et al. Research on a novel high gain DC/DC Boost converter [J]. Power Electronics, 2019, 53(12): 1-3, 15. (in Chinese)

[2] 胡超, 张兴, 石荣亮, 等. 分布式电源并联系统中基于荷电状态均衡的改进型下垂控制策略[J]. 太阳能学报, 2019, 40(3): 809-816.
Hu Chao, Zhang Xing, Shi Rongliang, et al. Improved droop control based on state of charge balance in parallel distributed generation systems [J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2019, 40(3): 809-816. (in Chinese)

[3] 李臻, 蒋程, 田博文. 三电平 NPC 变换器谐波与电磁干扰噪声优化调制[J]. 西安工程大学学报, 2021, 35(5): 74-79.
Li Zhen, Jiang Cheng, Tian Bowen. Optimal modulation of harmonic and electromagnetic interference noise in three level NPC converter [J]. Journal of Xi'an Polytechnic University, 2021, 35(5): 74-79. (in Chinese)

[4] 王广柱. 抛物线法 PWM 电流控制新技术[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(16): 97-102.
Wang Guangzhu. A novel PWM current control technique using parabola function [J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(16): 97-102. (in Chinese)

[5] Feng Guang, Meyer E, Liu Yanfei. A new digital control algorithm to achieve optimal dynamic performance in DC-to-DC converters [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2007, 22(4): 1489-1498.

[6] Xu Hengshan, Chen Diyi, Xue Fei, et al. Optimal design method of interleaved boost PFC for improving efficiency from switching frequency, boost inductor, and output voltage [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2019, 34(7): 6088-6107.

[7] 朱健, 胡耀华, 李学宁. 数字式多相 DC-DC 变换器稳定性分析[J]. 电源学报, 2025, 23(5): 10-17.
Zhu Jian, Hu Yaohua, Li Xuening. Stability analysis for digital multi-phase DC-DC converter [J]. Journal of Power Supply, 2025, 23(5): 10-17. (in Chinese)

[8] Wang Yao, Xu Jianping, Yin Gang. Cross-regulation suppression and stability analysis of capacitor current ripple controlled SIDO CCM Buck converter [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2019, 66(3): 1770-1780.

[9] Yao Kai, Zhang Zhen, Yang Jian, et al. Quasi-fixed switching frequency control of CRM Boost PFC converter based on variable inductor in wide input voltage range [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2021, 36(2): 1814-1827.

[10] 吴松荣, 许建平, 何圣仲, 等. 开关变换器多频率控制方法研究[J]. 电子科技大学学报, 2014, 43(6): 857-862.
Wu Songrong, Xu Jianping, He Shengzhong, et al. Investigation of multifrequency control method for switching converters [J]. Journal of University of Electronic Science and Technology of China, 2014, 43(6): 857-862. (in Chinese)

[11] 李宁, 杨家林, 田博文, 等. 串联谐振型 DAB 变换器

回流功率及损耗优化策略[J]. 电源学报, 2025, 23(5): 1-9.

Li Ning, Yang Jialin, Tian Bowen, etal. Optimization strategy of power return and loss for series resonant DAB converter [J]. Journal of Power Supply, 2025, 23(5): 1-9. (in Chinese)

[12] Valipour H, Mahdavi M, Ordonez M. Resonant bridgeless AC/DC rectifier with high switching frequency and inherent PFC capability [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2020, 35(1): 232-246.

[13] 王忠杰, 王议锋, 陈庆, 等. 基于 GaN 的高频 Boost 变换器优化设计[J]. 电工技术学报, 2021, 36(12): 2495-2504.

Wang Zhongjie, Wang Yifeng, Chen Qing, et al. Optimal design of high frequency Boost converter based on GaN [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36(12): 2495-2504. (in Chinese)

[14] Wang Yao, Xu Jianping, Yin Gang. Cross-regulation suppression and stability analysis of capacitor current ripple controlled SIDO CCM Buck converter [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2019, 66(3): 1770-1780.

[15] 赵玲玲, 吴云峰, 陈章勇, 等. 全占空比范围电容串接式交错并联 Boost 变换器均流策略研究[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(7): 2330-2338, 2411.

Zhao Lingling, Wu Yunfeng, Chen Zhangyong, et al. Study on current sharing strategy about series capacitor interleaved Boost converter in full-duty range [J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(7): 2330-2338, 2411. (in Chinese)

[16] 姚子睿, 曾君, 刘俊峰. 基于耦合电感的高增益低电压应力 Boost 变换器[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(12): 3659-3667.

Yao Zirui, Zeng Jun, Liu Junfeng. High step-up low-voltage stress Boost converter based on coupled inductor [J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(12): 3659-3667. (in Chinese)

[17] Lu Cheyu, Hsu Y W, Chen H C. Design of current sensorless control for totem-pole boost PFC converter [C]// 2019 10th International Conference on Power Electronics and ECCE Asia (ICPE 2019 - ECCE Asia). Busan, Korea, 2019: 986-991.

[18] López F, López-Martín V M, Azcondo F J, et al. Current-sensorless power factor correction with predictive controllers [J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2019, 7(2): 891-900.

[19] 赵朝阳, 卢伟国, 胡志凌, 等. 耦合电感序列切换的快速卸载瞬态响应 Buck 变换器[J]. 电工技术学报, 2020, 35(S1): 28-36.

Zhao Zhaoyang, Lu Weiguo, Hu Zhiling, et al. Fast unloading transient response Buck converter using coupled inductor based on sequence switching control [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35(S1): 28-36. (in Chinese)

[20] 马小勇, 王萍, 王议锋, 等. 基于交错并联 Boost 变换器的耦合电感综合建模与多目标优化方法[J]. 电工技术学报, 2022, 37(24): 6399-6410.

Ma Xiaoyong, Wang Ping, Wang Yifeng, et al. Comprehensive modeling and multi-objective optimization method for coupled inductors of interleaved Boost converters [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(24): 6399-6410. (in Chinese)

[21] 王朝晖, 冯凌, 杨顺风, 等. 基于 NPC 型三电平逆变器的固定开关频率改进模型预测控制策略[J]. 电源学报, 2025, 23(5): 79-87.

Wang Zhaohui, Feng Ling, Yang Shunfeng, etal. Improved model predictive control strategy with fixed switching frequency based on NPC three-level inverter [J]. Journal of Power Supply, 2025, 23(5): 79-87. (in Chinese)

[22] 周国华, 冉祥, 周述晗, 等. 恒定谷值电流型变频控制 CCM 单电感双输出 Boost 变换器建模与分析[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(23): 7015-7025, 7135.

Zhou Guohua, Ran Xiang, Zhou Shuhan, et al. Modeling and analysis of CCM single-inductor dual-output Boost converter with fixed valley current mode variable frequency control [J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(23): 7015-7025, 7135. (in Chinese)

[23] 吴佳芮, 杨旭, 王道玺, 等. 高效宽范围四开关 Buck-Boost 变换器的低纹波-变频控制策略[J]. 电工技术学报, 2025, 40(10): 3236-3250.

Wu Jiarui, Yang Xu, Wang Daoxi, etal. Low ripple-variable frequency control strategy for high efficiency wide range four-switch Buck-Boost converter [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2025, 40(10): 3236-3250. (in Chinese)

[24] 罗利江, 施佳楠, 任小永, 等. 基于交错双沿调制的四管 Buck-Boost 变换器的变频控制策略[J]. 电工技术学报, 2025, 40(6): 1878-1887.
Luo Lijiang, Shi Jianan, Ren Xiaoyong, etal. Variable frequency control strategy of four-switch Buck-Boost converter based on interleaved dual-edge modulation [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2025, 40(6): 1878-1887. (in Chinese)

[25] 王红斌, 陈奥博, 薛云涛, 等. 基于图形化方法的四开关 Buck-Boost 变换器模式平滑切换策略研究[J]. 电源学报, 2025, 23(4): 53-62.
Wang Hongbin, Chen Aobo, XueYuntao, etal. Research on smooth mode transition strategy for four-switch Buck-Boost converter based on graphical method [J]. Journal of Power Supply, 2025, 23(4): 53-62. (in Chinese)

[26] 陈明城, 张卫平, 刘元超, 等. 一种新型的 CRM-Boost APFC 控制方法[J]. 电源学报, 2024, 22(2): 139-146.
Chen Mingcheng, Zhang Weiping, Liu Yuanchao, etal. Novel CRM-Boost APFC control method [J]. Journal of Power Supply, 2024, 22(2): 139-146. (in Chinese)



汪涛

作者简介：

汪涛(1982—)，男，通信作者，本科。研究方向：特高压交直流设备检修技术。E-mail：13839802607@139.com。

申宏扬(1996—)，男，本科。研究方向：换流阀设备运检技术。E-mail：925540416@qq.com。

廖卉莲(1982—)，女，本科。研究方向：特高压交直流设备运维及检修技术。E-mail：liaohuilian@ha.sgcc.com.cn。

王群锋(1986—)，男，本科。研究方向：特高压交直流设备检修技术。E-mail：15039812361@139.com。

(责任编辑：郭凯凯)