

doi:10.3969/j.issn.1673-9833.2020.05.002

# 基于非奇异终端滑模技术的 DC-DC Buck 变换器研究

郑则炯<sup>1</sup>, 黄鹏<sup>1</sup>, 程晓燕<sup>2</sup>

(1. 广东轻工职业技术学院 机电技术学院, 广东 广州 510300;

2. 日立电梯(中国)有限公司 技术研发部, 广东 广州 511430)

**摘要:** 针对 DC-DC Buck 变换器所需的稳定性及快速性, 设计出一种恒频非奇异终端滑模控制器。对比平均电流技术, 该控制器能避免设计系统补偿器, 并能解决传统滑模技术控制中存在工作频率不固定、响应速度较慢的难题。通过设定  $S$  函数作为切换面, 以双曲正切函数作为控制律进行仿真及实验验证, 结果表明, 在输入电压和负载电流发生变化时, 运用非奇异终端滑模技术对 DC-DC Buck 变换器控制的输出电压超调量远小于运用平均电流技术的, 且响应速度大大提高。

**关键词:** 平均电流技术; 非奇异终端滑模技术; 超调量; 稳定性; 快速性;

**中图分类号:** TM46

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1673-9833(2020)05-0008-07

**引文格式:** 郑则炯, 黄鹏, 程晓燕. 基于非奇异终端滑模技术的 DC-DC Buck 变换器研究 [J]. 湖南工业大学学报, 2021, 34(5): 8-14.

## Research on DC-DC Buck Converter Based on Nonsingular Terminal Sliding Mode Technology

ZHENG Zejiang<sup>1</sup>, HUANG Peng<sup>1</sup>, CHENG Xiaoyan<sup>2</sup>

(1. School of Mechatronics, Guangdong Industry Technical College, Guangzhou 510300, China;

2. Technology R & D Department, Hitachi Elevator (China) Co., Ltd., Guangzhou 511430, China)

**Abstract:** In view of the required stability and rapidity of DC-DC buck converter, an improved design has been proposed of the constant frequency nonsingular terminal sliding mode controller. Compared with the average current technology, the controller can avoid the design of system compensator, thus solving the problems of unstable working frequency and slow response in traditional sliding mode control. By setting  $S$ -function as the switching surface and hyperbolic tangent function as the control law, the simulation and experimental results show that, with the changes of the input voltage and load current, the output voltage overshoot of DC-DC buck converter controlled by nonsingular terminal sliding mode technology is far less than that using average current technology, thus greatly improving the response speed.

**Keywords:** average current technology; nonsingular terminal sliding mode technology; overshoot; stability; rapidity

收稿日期: 2020-05-10

基金项目: 2018 年广东省普通高校青年创新人才类项目 (2018GKQNCX107), 2018 年广东轻工职业技术学院优秀青年基金资助项目 (QN2018-006), 2019 年广东轻工职业技术学院横向课题基金资助项目 (HX2019-062)

作者简介: 郑则炯 (1982-), 男, 广东揭阳人, 广东轻工职业技术学院助理研究员, 实验师, 硕士, 主要研究方向为自动化及电力电子技术, E-mail: 81224919@qq.com

## 1 研究背景

目前, DC-DC Buck 变换器已在不同行业(如汽车新能源等)中陆续使用, 其稳定性和响应快速性将决定它的使用寿命。所以, 对 DC-DC Buck 变换器稳定性及动态性的深层次研究具有现实意义<sup>[1-2]</sup>。目前, 国内外许多学者对 DC-DC Buck 变换器控制策略进行了研究, 其中常见的非线性控制方法有: 平均电流技术<sup>[3-4]</sup>、传统滑模技术<sup>[5-6]</sup>及终端滑模技术<sup>[7-10]</sup>等。

在平均电流技术方面, 文献[3]提出了一种对平均电流进行改进的控制方法, 其控制原理简单, 但该方法的难点是要对2个补偿器进行设计及参数整定。文献[4]针对 DC-DC Buck 变换器的瞬态响应, 提出了一种基于遗传算法控制平均电流的方法, 但该方法相当复杂且稳定性较低。

在传统滑模技术方面, 文献[5]采用传统比例积分控制器(proportional integral controller, PI)与滑模控制相结合的方法, 即采用传统PI技术对外环电压进行控制, 同时采用滑模控制技术对内环电流进行控制, 但该方法存在工作频率不固定、动态响应慢的缺点; 文献[6]采用线性化反馈进行固频滑模控制, 该方法的优点是具有快速的瞬态响应, 不足的是稳态误差较大。

上述2种技术方法只有当时间趋向无限时, 状态变量才无限趋近于稳定点, 而终端滑模技术能使状态变量在有限时间内快速收敛于稳定点。例如文献[7]设计了一种有限时间终端滑模控制器, 文献[8]提出了 DC-DC Buck 变换器电压-电流双闭环终端滑模控制方法。二者均采用指数趋近律来设计控制律, 从而使 DC-DC Buck 变换器电压输出有快速的收敛, 但因为符号函数不连续而导致输出控制量存在奇异性及不连续性, 这会使变换器高频地震抖。又如文献[9]中所述的终端滑模控制器、文献[10]中所提的 DC-DC Buck 变换器滑模控制系统未建模动态诱发谐波分析方法, 二者均能在有限时间内使 DC-DC Buck 变换器电压输出误差收敛到稳定点, 但其不足在于收敛上限时间值会受初始状态变量值的影响, 从而导致收敛上限时间值存在误差。

因此, 针对在 DC-DC Buck 变换器中采用平均电流技术设计的系统补偿器较为复杂, 及传统滑模技术中存在工作频率不固定、响应速度较慢的难点, 本文将以前脉冲宽度调制(pulse width modulation, PWM)为契机, 进行非奇异终端滑模控制的研究, 对开关器件占空比与控制变量进行等效控制。

## 2 DC-DC Buck 变换器数学模型

DC-DC Buck 变换器的电路拓扑图如图1所示。图中  $V_{IN}$  表示直流输入电压,  $R$  表示负载, DC-DC Buck 变换器处在 CCM (continuous conduction mode) 工作模式下, 将系统的状态变量选定为电感电流  $i_L$  和电容电压  $V_C$ , 开关管具有导通 ( $V_T=1$ ) 及关断 ( $V_T=0$ ) 状态, 二极管电压  $V_D$ 。

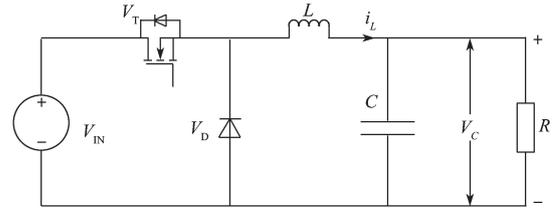


图1 DC-DC Buck 电路图

Fig. 1 DC-DC Buck circuit diagram

当  $V_T=1$ , 即开关管导通时, 负载  $R$  的电压将由直流电压  $V_{IN}$  经过电感  $L$  分压后提供, 而电容  $C$  也将进行充电, 其数学方程为

$$\begin{cases} L \frac{di_L}{dt} = V_{IN} - V_C, \\ C \frac{dV_C}{dt} = i_L - \frac{V_C}{R}. \end{cases} \quad (1)$$

当  $V_T=0$ , 即开关管关断时, 负载  $R$  的电压将由电容  $C$  提供, 而电感  $L$  将通过二极管续流, 其数学方程为

$$\begin{cases} L \frac{di_L}{dt} = -V_C, \\ C \frac{dV_C}{dt} = i_L - \frac{V_C}{R}. \end{cases} \quad (2)$$

当 DC-DC Buck 变换器工作在 CCM 下时, 假设  $x_1=i_L$ ,  $x_2=V_C$ , 通过状态空间建立相应的空间方程为

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = -\frac{x_2}{L} + \frac{V_{IN}}{L} \mu, \\ \dot{x}_2 = -\frac{x_2}{RC} + \frac{x_1}{C}, \end{cases} \quad (3)$$

式中  $\mu$  为控制量。

## 3 非奇异终端滑模技术

### 3.1 利用双曲正切函数改善指数趋近律

为使 DC-DC Buck 变换器输出电压保持恒定, 可以用 DC-DC Buck 变换器按输出电压误差及其微分的非线性组合构成, 来确定非奇异终端滑模切换面函数。因此, 定义输出电压误差

$$e_1 = x_\Delta - x_1, \quad (4)$$

式中  $x_\Delta$  为输出电压参考值。

假设误差变量为  $e_2$ , 则

$$e_2 = \dot{e}_1. \quad (5)$$

由式(3)~(5)得到以  $e_1$  和  $e_2$  两个误差为状态变量的状态方程为

$$\begin{cases} \dot{e}_1 = \frac{1}{RC}x_2 - \frac{1}{C}x_1, \\ \dot{e}_2 = \frac{1}{RC}\left(-\frac{1}{RC}x_2 + \frac{1}{C}x_1\right) + \frac{1}{LC}x_2 - \frac{V_{IN}}{LC}\mu. \end{cases} \quad (6)$$

根据输出电压误差与其微分的非线性进行组合设计出切换面函数, 即

$$S(x) = e_1 + \frac{1}{\alpha}e_2^{\frac{n}{m}}, \quad (7)$$

式中:  $\alpha$  为常数, 且  $\alpha > 0$ ;

$m$ 、 $n$  是正奇数, 且  $m < n$ 。

对  $S(x)$  求导数, 并由式(6)可得

$$\begin{aligned} \dot{S}(x) &= \frac{1}{RC}x_2 - \frac{1}{C}x_1 + \frac{n}{\alpha m} \left(\frac{1}{RC}x_2 - \frac{1}{C}x_1\right)^{\frac{n}{m}-1} \\ &\quad \left(\frac{1}{RC}\left(-\frac{1}{RC}x_2 + \frac{1}{C}x_1\right) + \frac{1}{LC}x_2 - \frac{V_{IN}}{LC}\mu\right). \end{aligned} \quad (8)$$

在滑模技术中, 因为控制量  $\mu$  是一种不连续状态, 即取 0 或 1<sup>[11]</sup>, 滑模技术的运用会导致开关频率不固定。因此, 对 DC-DC Buck 变换器非连续控制量与占空比联系起来, 建立等效方式<sup>[12]</sup>。

设计控制系统时, 要求在有限时间里每个状态都要接近切换面。如果按指数趋近律设计控制律<sup>[13]</sup>, 其符号函数会呈现不连续现象, 得出的设计控制量函数同样会不连续。为了使输出的控制量连续, 本文以双曲正切函数来改善指数趋近律的设计<sup>[14]</sup>, 即

$$\dot{S} = -\varepsilon \tanh(kS) - \eta S, \quad \varepsilon > 0, k > 0, \eta > 0. \quad (9)$$

由式(8)和式(9)可解得所求控制量  $\mu$ , 但计算难度较大, 因此在确保趋近律正确的前提下对  $\mu$  进行简化<sup>[15]</sup>, 则有

$$\begin{aligned} \mu &= \frac{LC}{V_{IN}}(\varepsilon \tanh(kS) + \eta S) + \\ &\quad \frac{LC}{V_{IN}}\alpha \frac{m}{n} \left(\frac{1}{RC}x_2 - \frac{1}{C}x_1\right)^{2-\frac{n}{m}} + \\ &\quad \frac{LC}{V_{IN}} \left(\frac{1}{LC}x_2 + \frac{1}{RC}\left(-\frac{1}{RC}x_2 + \frac{1}{C}x_1\right)\right). \end{aligned} \quad (10)$$

### 3.2 验证非奇异终端滑模技术的稳定性

下面分析所设计非奇异终端滑模技术系统的稳定性。

将式(10)代入式(8)可得

$$\dot{S}(x) = \frac{n}{\alpha m} \left(\frac{1}{RC}x_2 - \frac{1}{C}x_1\right)^{\frac{n}{m}-1} (-\varepsilon \tanh(kS) - \eta S). \quad (11)$$

引进李雅普诺夫函数  $I = \frac{1}{2}S^2$ <sup>[16]</sup>, 并对其求导得

$$\dot{I} = \frac{n}{\alpha m} \left(\frac{1}{RC}x_2 - \frac{1}{C}x_1\right)^{\frac{n}{m}-1} (-\varepsilon \tanh(kS)S - \eta S^2), \quad (12)$$

式中  $\alpha > 0$ ,  $1 < \frac{n}{m} < 2$ 。

如果  $\frac{1}{RC}x_2 - \frac{1}{C}x_1 > 0$ , 则符合李雅普诺夫稳定性判断  $\dot{I} < 0$ , 即在李雅普诺夫意义下系统是稳定的<sup>[6]</sup>。

将式(10)代入式(6)可得

$$\dot{e}_2 = -\frac{\alpha m}{n} \left(\frac{1}{RC}x_2 - \frac{1}{C}x_1\right)^{2-\frac{n}{m}} - \varepsilon \tanh(kS) - \eta S. \quad (13)$$

如果  $\frac{1}{RC}x_2 - \frac{1}{C}x_1 = 0$ , 则

$$\dot{e}_2 = -\varepsilon \tanh(kS) - \eta S. \quad (14)$$

因此, 当  $S > 0$  时, 则  $\dot{e}_2 < 0$ ,  $e_2$  单调递减; 当  $S < 0$  时, 则  $\dot{e}_2 > 0$ ,  $e_2$  单调递增; 当  $\dot{e}_2 = 0$  时, 将实现有限时间里使  $S = 0$ 。

## 4 仿真实验

通过 Matlab Simulink 软件对搭建的 DC-DC Buck 变换器电路, 进行本文所设计的非奇异终端滑模控制仿真研究, 并与平均电流控制的情形进行对比, 以检验当输入电压发生变化或负载电流发生变化时, 非奇异终端滑模技术的响应速度及其稳定性。表 1 是 DC-DC Buck 变换器电路的相关参数, 图 2 是非奇异终端滑模技术控制原理图。控制的基本思路是: 将非奇异终端滑模控制量与 PWM 锯齿波相比较, 得出开关管  $V_1$  控制信号, 而锯齿波信号将控制开关管的开关频率  $f_s$ , 以保证开关频率的固定。

表 1 Buck 变换器参数  
Table 1 Buck converter parameters

参数名称	参数值
$f_s/\text{kHz}$	60
$V_C/\text{V}$	9
$V_{IN}/\text{V}$	36
$L/\text{mH}$	0.02
$C/\mu\text{F}$	220

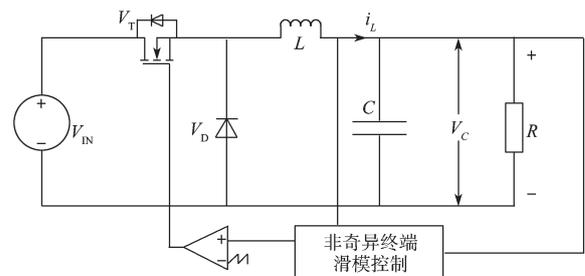


图 2 非奇异终端滑模控制原理图

Fig. 2 Schematic diagram of nonsingular terminal sliding mode control

4.1 非奇异终端滑模技术的稳定性检验

图 3 是 DC-DC Buck 变换器运用非奇异终端滑模技术后, 输出电压与电感电流的仿真波形。由图可知, 仿真过程中输出电压、电感电流均无超调量, 且输出电压在短时间内快速递增并与参考电压 (9 V) 接近, 而电感电流快速递减接近于 1.2 A。

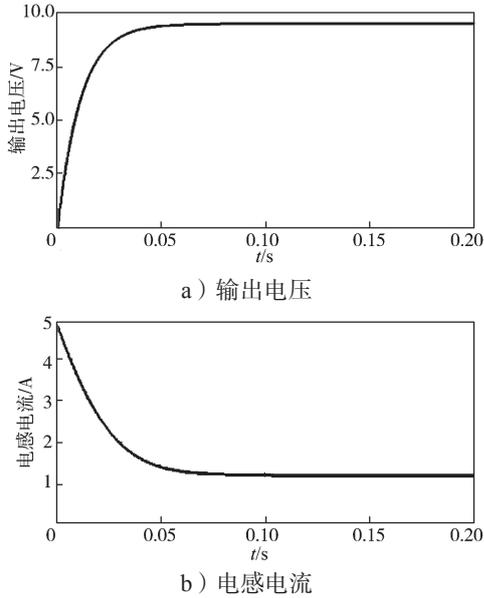


图 3 输出电压和电感电流仿真图

Fig. 3 Simulation diagram of output voltage and inductance current

图 4 是系统空间状态  $e_1$  和  $e_2$  的轨迹仿真曲线。由图可知, 两状态变量曲线分别趋近于 0, 并在 0 位置上下波动。图中  $e_1$  状态变量曲线波动范围较小, 可知输出电压的误差将接近于 0。

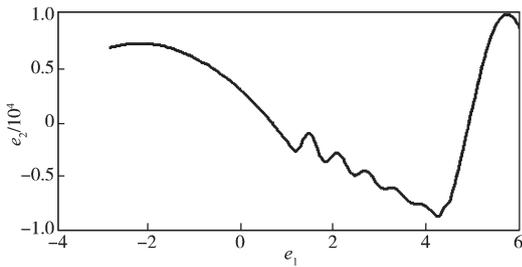


图 4  $e_1$  和  $e_2$  空间状态轨迹仿真图

Fig. 4 Simulation diagram of  $e_1$  and  $e_2$  space state trajectory

图 5 是切换面函数  $S$  的仿真曲线。由图可知, 函数  $S$  将快速趋近于 0, 并按一定的开关频率在滑模面周围来回振荡。

图 6 是输入电压出现阶跃突变时, 变换器的输出电压仿真波形。由图可知, 当  $t=0.07$  s 时, 输入电压从 36 V 阶跃降成 18 V, 当  $t=0.13$  s 时, 输入电压从 18 V 阶跃升成 36 V, 呈规律变化。在整个输入电压发生阶跃突变的过程中, 变换器输出电压基本为 9 V。

图 7 是当负载电流发生阶跃突变时, 变换器的输

出电压仿真波形。由图可知, 当  $t=0.07$  s 时, 负载电流从 1.4 A 阶跃降为 0.7 A, 当  $t=0.13$  s 时, 负载电流从 0.7 A 阶跃升成 1.4 A, 呈规律变化。在整个负载电流发生阶跃突变的过程中, 变换器电压输出始终也保持在 9 V 左右。

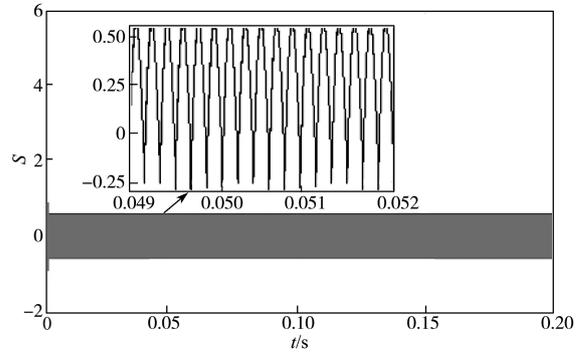


图 5 切换面函数  $S$  仿真图

Fig. 5 Simulation diagram of switching surface function  $S$

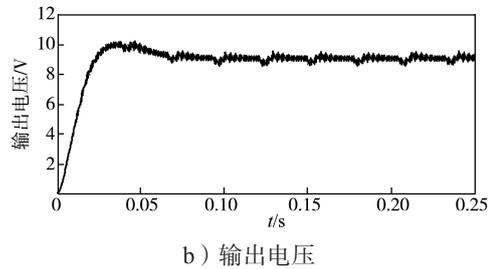
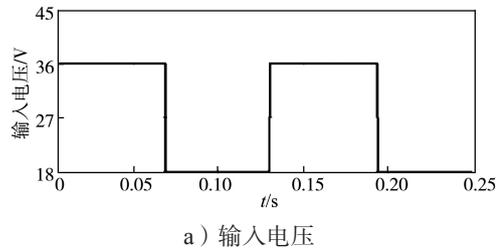


图 6 输入电压阶跃突变时变换器输出电压仿真图  
Fig. 6 Output voltage simulation diagram of converter with input voltage step mutation

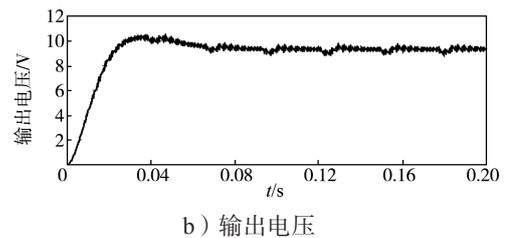
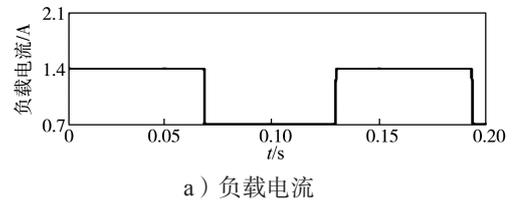


图 7 负载电流阶跃突变时变换器输出电压仿真图  
Fig. 7 Simulation diagram of output voltage of converter with load current step mutation

### 4.2 两种技术的稳定性比较

通过与平均电流技术方法比较,以验证非奇异终端滑模技术的稳定性。当输入电压发生阶跃突变时,变换器输出电压仿真波形如图8所示。由图可知,当 $t=0.07\text{ s}$ ,输入电压从 $36\text{ V}$ 阶跃降成 $18\text{ V}$ 时,运用平均电流技术输出电压有 $0.1\text{ V}$ 的误差,而运用非奇异终端滑模技术输出电压基本保持为 $9\text{ V}$ 。可见本文的非奇异终端滑模技术抗干扰能力比平均电流技术好。

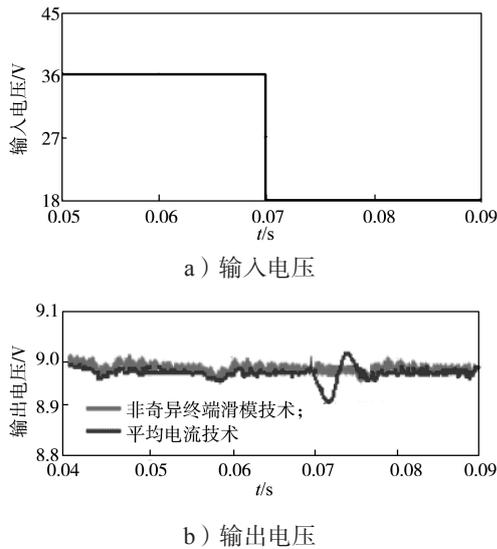


图8 输入电压阶跃突变时变换器输出电压仿真结果对比  
Fig. 8 Simulation results comparison of output voltage of converter with input voltage step mutation

当负载电流发生阶跃突变时,变换器输出电压仿真波形如图9所示。

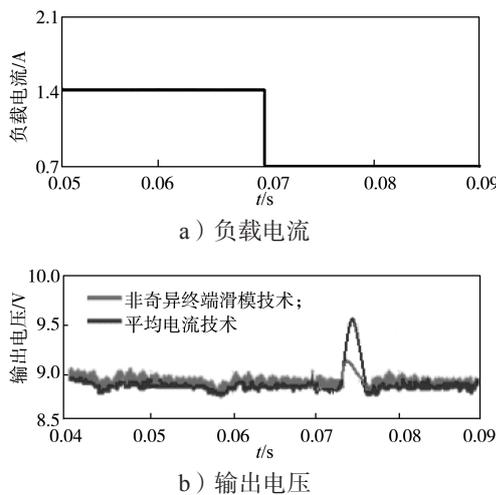


图9 负载电流阶跃突变时变换器输出电压仿真结果对比  
Fig. 9 Simulation results comparison of output voltage of converter with load current step mutation

由图9可知,当 $t=0.07\text{ s}$ ,负载电流由 $1.4\text{ A}$ 阶跃降成 $0.7\text{ A}$ 时,运用平均电流技术方法,输出电压

有 $0.6\text{ V}$ 的超调量,而运用非奇异终端滑模技术方法,输出电压的超调量只有 $0.3\text{ V}$ 。可见运用非奇异终端滑模技术比平均电流技术,输出电压自适应调整快。

## 5 实验验证

为进一步验证非奇异终端滑模技术比平均电流技术好,对非奇异终端滑模技术进行实验,如图10所示。实验的主要设备包括Buck变换器、dSPACE实时控制器、直流电源、电压传感器及示波器。实验时,Buck变换器相关参数如表1所示;与控制器参数及控制信号相关的变量文件由系统RTI产生,通过Control Desk进行访问;RTI将完成Matlab Simulink仿真后生成dSPACE实时控制器硬件系统所需机器代码的下载任务;系统采样时间设为 $20\text{ }\mu\text{s}$ 。



图10 非奇异终端滑模技术实验平台  
Fig. 10 Experimental platform of nonsingular terminal sliding mode technology

实验连接图如图11所示。Buck变换器所选低压功率MOS管为SSM3K131TU,其工作原理是:通过Matlab Simulink系统控制dSPACE实时控制器提供PWM控制信号,然后去控制Buck拓扑电路中低压功率MOS管SSM3K131TU;再由电压传感器采样电压输出信号反馈回给Matlab Simulink系统进行误差分析,实现非奇异终端滑模技术控制。整个电路搭线简单直观。

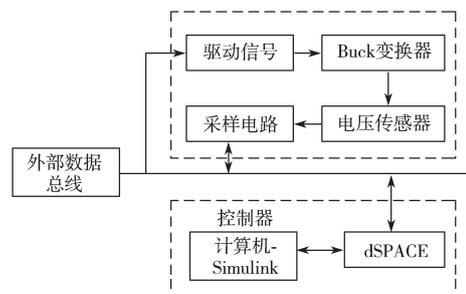


图11 非奇异终端滑模技术实验连接图  
Fig. 11 Experimental connection diagram of nonsingular terminal sliding mode technology

实验的输出电压与电感电流波形如图 12 所示。由图 12 可知, 电压输出接近于参考电压 9 V, 而电感电流接近于 1.2 A, 均无超调量。

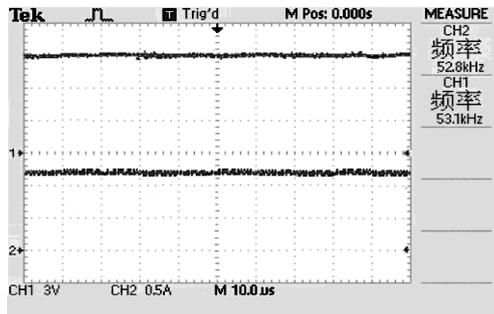


图 12 非奇异终端滑模技术输出电压与电感电流实验波形  
Fig. 12 Experimental waveforms of output voltage and inductance current of nonsingular terminal sliding mode technology

当输入电压由 36 V 阶跃降成 18 V 时, 分别以平均电流技术与非奇异终端滑模技术进行实验, 变换器输出电压波形见图 13~14。由图可知, 瞬时动态响应测试波形与前面的仿真验证基本一致。因输入电压的变化, 运用平均电流技术的变换器, 输出电压约产生 1 V 的误差; 而运用非奇异终端滑模技术的变换器, 输出电压基本保持为 9 V, 其抗干扰性较好。

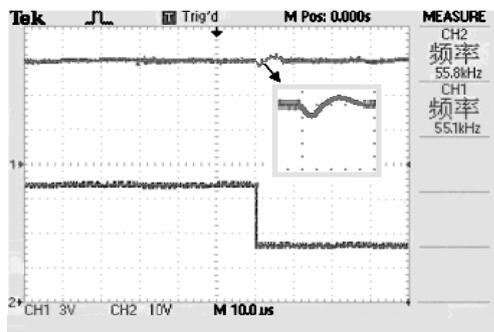


图 13 输入电压发生变化时平均电流技术输出电压实验波形

Fig. 13 Output voltage experimental waveforms of average current technology when input voltage changes

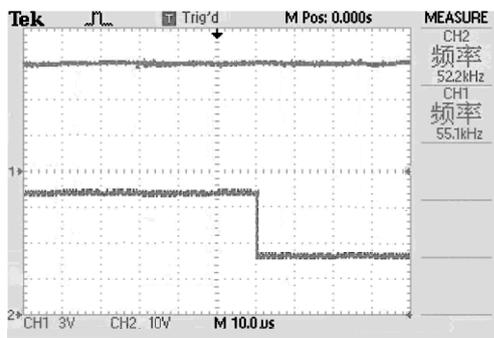


图 14 输入电压发生变化时非奇异终端滑模技术输出电压实验波形

Fig. 14 Output voltage experimental waveforms of nonsingular terminal sliding mode technology when input voltage changes

当负载电流由 1.4 A 阶跃降成 0.7 A 时, 同样以平均电流技术与非奇异终端滑模技术分别实验, 变换器输出电压的波形分别如图 15 和图 16 所示。由图 15 和图 16 可知, 所测波形与前面的仿真波形也基本一致。因负载电流突然变小, 运用平均电流技术的变换器, 输出电压有 0.6 V 的超调量; 而运用非奇异终端滑模技术的变换器, 输出电压超调量只有 0.3 V, 其自适应调整较快。

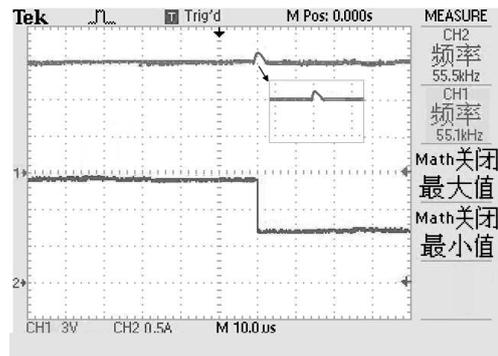


图 15 负载电流发生变化时平均电流技术输出电压波形  
Fig. 15 Output voltage waveforms of average current technology under load current changes

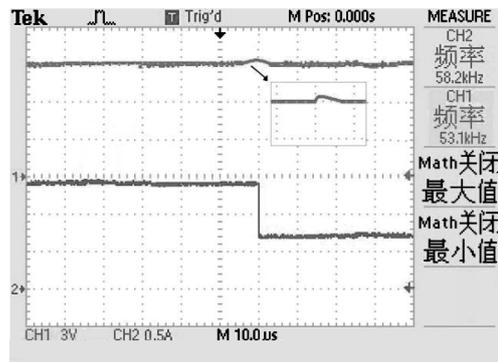


图 16 负载电流发生变化时非奇异终端滑模技术输出电压波形

Fig. 16 Output voltage waveforms of nonsingular terminal sliding mode technology when load current changes

### 6 结语

非奇异终端滑模技术作为一种非线性控制方法, 在输入或输出发生改变时 DC-DC Buck 变换器具有快速收敛性。这与平均电流技术方法的仿真及实验波形相比较, 效果很明显。当输入电压由 36 V 阶跃降至 18 V 时, 采用平均电流技术的变换器输出电压的压降远高于非奇异终端滑模技术的; 当负载电流由 1.4 A 阶跃降至 0.7 A 时, 采用平均电流技术的变换器输出电压有 0.6 V 的超调量, 而非奇异终端滑模技术的只有 0.3 V 的超调量。可见, 非奇异终端滑模技术对系统的动态调节具有很强的响应性及稳定性。

## 参考文献:

- [1] 龚伟家. 基于BUCK电路的数字DC/DC变换器[D]. 成都: 电子科技大学, 2013.  
GONG Weijia. A Digital DC/DC Converter Based on BUCK Circuit[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2013.
- [2] 裴云庆, 杨旭, 王兆安. 开关稳压电源的设计和应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 2010: 232-239.  
PEI Yunqing, YANG Xu, WANG Zhaoan. Design and Application of Switching Voltage Stabilizing Power Supply[M]. Beijing: China Machine Press, 2010: 232-239.
- [3] 王伟, 易建强, 郑耀林, 等. DC-DC变换器的模糊神经网络控制方法研究[J]. 系统仿真学报, 2004, 16(11): 2567-2570, 2574.  
WANG Wei, YI Jianqiang, ZHENG Yaolin, et al. Fuzzy Neural Network Control Method for DC-DC Converter[J]. Journal of System Simulation, 2004, 16(11): 2567-2570, 2574.
- [4] 蔡明想. 基于LPV模型的DC/DC变换器的鲁棒H-控制器设计[D]. 广州: 华南理工大学, 2012.  
CAI Mingxiang. Robust H-Controller Design of a DC/DC Converter Based on an LPV Model[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2012.
- [5] 郑则炯, 赵慧, 黄鹏. 基于滑模控制技术的DC-DC Buck变换器研究[J]. 湖南工程学院学报(自然科学版), 2019, 29(4): 20-25.  
ZHENG Zejiang, ZHAO Hui, HUANG Peng. Research on DC-DC Buck Converter Based on Sliding Mode Control Technology[J]. Journal of Hunan Institute of Engineering (Natural Science Edition), 2019, 29(4): 20-25.
- [6] 尚佳宁. 直流开关变换器的精确建模和稳定性分析方法研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2016.  
SHANG Jianing. A Study of Precise Modeling and Stability Analysis Methods for DC-DC Switching Converters[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2016.
- [7] 张巍巍, 王京. 基于指数趋近律的非奇异Terminal滑模控制[J]. 控制与决策, 2012, 27(6): 909-913.  
ZHANG Weiwei, WANG Jing. Nonsingular Terminal Sliding Model Control Based on Exponential Reaching Law[J]. Control and Decision, 2012, 27(6): 909-913.
- [8] 王艳敏, 曹雨晴, 夏红伟, 等. Buck变换器电压-电流双闭环终端滑模控制方法: CN104734505A[P]. 2015-06-24.  
WANG Yanmin, CAO Yuqing, XIA Hongwei, et al. Voltage-Current Double Closed-Loop Terminal Sliding Mode Control Method of Buck Converter: CN104734505A[P]. 2015-06-24.
- [9] 钱宁, 陈强, 杨宇, 等. Buck型变换器非奇异固定时间滑模控制[J]. 计算机测量与控制, 2019, 27(6): 62-65, 74.  
QIAN Ning, CHEN Qiang, YANG Yu, et al. Non-Singular Fixed Time Sliding Mode Control of Buck Converters[J]. Computer Measurement & Control, 2019, 27(6): 62-65, 74.
- [10] 孙兰昕, 英钊, 王艳敏, 等. Buck变换器滑模控制系统未建模动态诱发谐波分析方法: CN109462329A[P]. 2019-03-12.  
SUN Lanxin, YING Zhao, WANG Yanmin, et al. Unmodeled Dynamics Induced Harmonic Analysis Method for Buck Converter Sliding Mode Control System: CN109462329A[P]. 2019-03-12.
- [11] 罗晓曙. DC-DC变换器的非线性动力学行为与混沌控制[M]. 2版. 北京: 科学出版社, 2016: 33-56.  
LUO Xiaoshu. Nonlinear Dynamics and Chaos Control of DC-DC Converter[M]. 2nd ed. Beijing: Science Press, 2016: 33-56.
- [12] 穆朝絮, 余星火, 孙长银. 非奇异终端滑模控制系统相轨迹和暂态分析[J]. 自动化学报, 2013, 39(6): 902-908.  
MU Chaoxu, YU Xinghuo, SUN Changyin. Phase Trajectory and Transient Analysis for Nonsingular Terminal Sliding Mode Control Systems[J]. Acta Automatica Sinica, 2013, 39(6): 902-908.
- [13] 李永恒, 梁青阳, 孙超, 等. Buck变换器的幂次函数指数趋近律滑模算法研究[J]. 电光与控制, 2015, 22(2): 85-88.  
LI Yongheng, LIANG Qingyang, SUN Chao, et al. Buck Converter Sliding Mode Algorithm Based on Power Function Exponential Reaching Law[J]. Electronics Optics & Control, 2015, 22(2): 85-88.
- [14] ZHANG C L, WANG J X, LI S H, et al. Robust Control for PWM-Based DC-DC Buck Power Converters with Uncertainty via Sampled-Data Output Feedback[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2015, 30(1): 504-515.
- [15] SUN J K, YANG J, ZHENG W X, et al. GPIO-Based Robust Control of Nonlinear Uncertain Systems Under Time-Varying Disturbance with Application to DC-DC Converter[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs, 2016, 63(11): 1074-1078.
- [16] GUO S B, LIN-SHI X F, ALLARD B, et al. Digital Sliding-Mode Controller for High-Frequency DC/DC SMPS[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2010, 25(5): 1120-1123.

(责任编辑: 邓光辉)