

## Boost 电路过渡态行为的建模与仿真分析

薛景缤<sup>1</sup> 祁予扬<sup>1</sup> 吕德超<sup>1</sup> 徐王熠<sup>2</sup>

(<sup>1</sup> 杭州师范大学物理学院, 浙江 杭州 311121; <sup>2</sup> 杭州师范大学经亨颐教育学院, 浙江 杭州 311121)

**摘 要** 针对高校教材对 Boost 电路趋稳过程探讨不足的问题, 系统刻画 Boost 电路过渡态的过程特征及影响因素。分别对开关闭合、断开两个子过程依据基尔霍夫定律建立状态方程, 并引入二极管钳制定向约束; 据子过程二阶方程判别式开展欠阻尼、过阻尼(或临界阻尼)分类。在此基础上构建开关常闭、常断、周期性开闭三类情境, 利用 Matlab 软件对其电流电压数值仿真, 探究其内在联系并分析各子过程对整体演化的影响。结果表明, 常闭情形下输出电压指数衰减, 常断情形下电压上限等于输入电压, 均无法实现升压; 在周期性开闭条件下, 宏观演化轨迹由断开子过程的阻尼类型主导, 呈现欠阻尼(振荡—钳制—趋稳)或过阻尼(上升—趋稳)两类趋势, 微观上则出现由开关调制引起的类锯齿纹波, 而其升压机制与闭合子过程的储能有关; 无论阻尼情形如何, 电路都会自发趋稳, 输出电压符合经典稳态框架下的理论预期。

**关键词** Boost 电路; 过渡态行为; 状态方程建模; 阻尼态; 数值仿真; Matlab

**DOI:** 10.27024/j.wlygc.2025.08.22.02

## MODELING AND SIMULATION ANALYSIS OF TRANSIENT BEHAVIOR IN BOOST CONVERTERS

XUE Jingbin<sup>1</sup> QI Yuyang<sup>1</sup> LYU Dechao<sup>1</sup> XU Wangyi<sup>2</sup>

(<sup>1</sup> School of Physics, Hangzhou Normal University, Hangzhou, Zhejiang 311121;

<sup>2</sup> Jing Hengyi School of Education, Hangzhou Normal University, Hangzhou, Zhejiang 311121)

**Abstract** This paper investigates the transient behavior of a Boost converter as it evolves toward steady state, a topic that is only briefly addressed in most university textbooks. State equations are established for the switch-closed and switch-open sub-processes based on Kirchhoff's laws, together with a directional clamping constraint imposed by the diode. According to the discriminant of the second-order equation for the switch-open sub-process, the transient response is classified into underdamped, overdamped, and critically damped cases. On this basis, three operating scenarios are considered: permanently closed, permanently open, and periodic switching. MATLAB is then used to simulate the current and voltage waveforms, so as to reveal their internal connections and clarify the role of each sub-process in the overall evolution. The results show that, when the switch remains closed, the output voltage decays exponentially, whereas when the switch remains open, the output voltage is

收稿日期: 2025-08-22; 修回日期: 2025-10-16; 出版日期: 2026-05-20

通信作者: 徐王熠, xwy@hznu.edu.cn.

引文格式: 薛景缤, 祁予扬, 吕德超, 等. Boost 电路过渡态行为的建模与仿真分析[J]. 物理与工程, 2026, 36(3): 201-208, 222.

**Cite this article:** XUE J B, QI Y Y, LYU D C, et al. Modeling and simulation analysis of transient behavior in Boost converters[J]. Physics and Engineering, 2026, 36(3): 201-208, 222. (in Chinese)

bounded above by the input voltage; in neither case can voltage boosting be achieved. Under periodic switching, the macroscopic trajectory is dominated by the damping type of the switch-open sub-process, exhibiting either an underdamped pattern of oscillation-clamping-stabilization or an overdamped pattern of rise-stabilization. At the microscopic level, switching-induced sawtooth-like ripples appear, while the boosting effect originates from energy storage during the switch-closed sub-process. Regardless of the damping type, the converter eventually converges to a steady state, and the final output voltage agrees with the prediction of classical steady-state theory.

**Key words** Boost converter; transient behavior; state-equation modeling; damped state; numerical simulation; Matlab

Boost 电路是直流升压变换器的典型代表,在高校教材<sup>[1-3]</sup>与电子工程实践中占据重要位置。例如,在可再生能源中常需要采用直流升压电路将发电源与负载连接<sup>[4-6]</sup>,还常将其用于匹配输入端工作点以确保最大功率传输<sup>[7]</sup>。传统教材体系多聚焦稳态条件下的性能指标与输出电压,经典的,在连续导电模式(CCM)且理想器件假设下,输出电压可表示为  $U_o = \frac{U_i}{1-D}$ <sup>[1-3]</sup>。这种稳态分析有助于工程计算和实际应用,却很少触及零电压起步到稳态(下称为“过渡态”)的动态演化过程<sup>[8]</sup>;同时,现有分析多将开关闭合与断开仅作为求解稳态输出的步骤,较少独立考察两种子过程对整体演化的影响。

在近年直流变换器的前沿研究中,涌现出大量新型 DC-DC 变换器系统,其应用建构亟须暂态理论的支持和完善<sup>[9]</sup>。Adly 等构建了高占空比情形下升压增益饱和的过渡模型<sup>[10]</sup>,指出传统稳态模型的分析在输出电压动态提升阶段会产生系统性偏差;Tofoli 等基于通用 PWM 的思想<sup>[11]</sup>,给出面向断续导电模式(DCM)的小信号模型,为多相拓扑的过渡行为分析提供了统一的框架;在大信号过渡方面,Li 等通过采样电压死拍控制与无感电流估计<sup>[12]</sup>,为大扰动信号下 Boost 电路的过渡行为展开了系统分析;面相关功率负载情形,Nithara 利用 Brayton-Moser 被动性理论<sup>[13]</sup>,提升升压变换器的动态电压稳定性,进一步解释了稳态假设在强耦合负载下的局限。与上述工作相比,本文不依赖稳态近似或大/小信号化的假设,而是基于精确的二阶常微分方程建立统一的过渡态解析模型,在大/小信号统一框架下给出可复现的图像—阻尼的映射规律。因此,深入探究 Boost 电路的过渡态行为,不仅拓展了传统高校教材稳

态分析的理论边界,也呼应了当前直流变换器在动态建模与控制方面的前沿探索

基于上述背景,本文聚焦:(1)Boost 电路输出电压如何逐步趋稳,过渡态过程电流电压变化规律及其与电路参数的关系;(2)开关“周期性开闭”与开关“始终闭合”“始终断开”(下称为“常闭”“常断”)这两种情形的内在关联,进而分析“闭合”“断开”的子过程对电路趋稳的影响;(3)传统探讨的“稳态”( $U_o = \frac{U_i}{1-D}$ ),是否为输出电压的真实恒定,亦或仅为理想化近似。

本文将先对传统稳态 Boost 电路做简要阐述,进而依据基尔霍夫定律分别建立过渡态开关闭合与断开两种子过程的微分方程,根据二阶微分方程形式展开阻尼情形分类。在此基础上,通过 Matlab 对“常闭”“常断”与“周期性开闭”三类情境逐级仿真,比较其演化轨迹与相互联系,为以上问题做出系统性解答。限于篇幅,本文仅探讨 CCM 情形。

## 1 传统稳态框架下的 Boost 电路分析

如图 1 所示,Boost 电路的基本构成包括输入端、电感、二极管、电容、理想开关和负载电阻(在实际电力电子装置中,所谓“开关”由功率 MOSFET 等器件实现<sup>[1-2]</sup>,本文为突出电路机理,将其抽象为理想开关<sup>[3]</sup>,仅保留导通/关断两态的核心功能),通过周期性开闭开关实现输出电压大于输入电压的升压功能。本节聚焦传统高校教材对 Boost 电路稳态的探讨,以构建必要的理论基础。所谓“稳态”,指假设电路已处于输出恒定的稳定工作状态,不考虑从初始非稳态到稳态过程的动态演化。

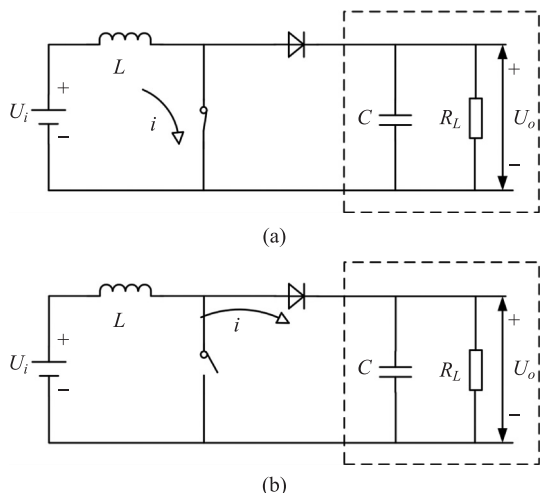


图 1 Boost 电路示意图

(a) 开关闭合; (b) 开关断开

如图 1(a)所示,开关闭合时,电感两端电压等于输入电源电压,有

$$L \frac{di_L}{dt} = U_i \quad (1)$$

如图 1(b)所示,开关断开时,有

$$L \frac{di_L}{dt} = U_i - U_o \quad (2)$$

根据式(1)(2),由于稳态下认为输出电压  $U_o$  恒定,电感电流在周期内与时间呈线性关系,其整体图像应为锯齿波型。如图 2 所示,电感电流呈现出周期性线性上升、下降的交替过程。

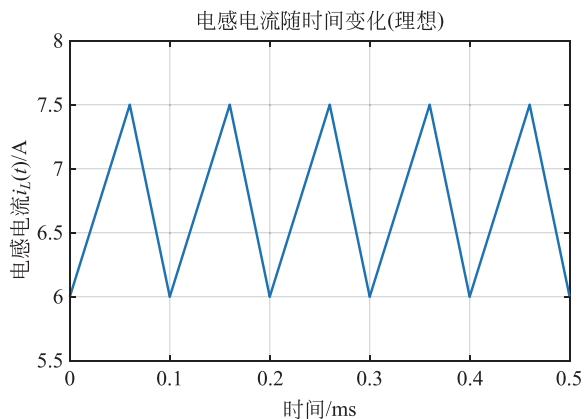


图 2 稳态 Boost 电路电流随时间变化示意图

设  $T$  为开关周期,即开关完成一次闭合与断开所经历的总时间; $D$  为占空比,表示一个周期内开关闭合时间占总周期的比例。在稳态下,电感电流在一个周期内的变化量应为零,否则电流将

周期性累积,电路无法维持稳定状态。结合式(1)(2)可知

$$DTU_i + (1-D)T(U_i - U_o) = 0 \quad (3)$$

解式(3)得

$$U_o = \frac{U_i}{1-D} \quad (4)$$

由于  $0 < D < 1$ ,故电路输出电压大于输入电压,实现升压功能。不难发现,上述推导的核心在于视输出电压  $U_o$  为常量,极大简化积分运算的同时不需考虑电容和负载在电路平衡中的作用。这样的分析本质上是结果导向的——只研究稳态下各物理量的关系,不研究稳态的形成过程。接下来,我们通过微分方程建构和 Matlab 仿真,重点研究 Boost 电路的过渡态特征,以过程为导向揭示 Boost 电路真实运作机制。

## 2 Boost 电路过渡态行为研究

### 2.1 子过程状态方程建立

与第 1 节论述的稳态分析不同,过渡态电路研究不可将电压  $U_o$  视为常量,而应视为关于时间的函数。因此,需结合输出端的电容和负载电阻展开分析,构建相应的物理方程组。

根据基尔霍夫定律,开关闭合时,如图 1(a)所示,有

$$L \frac{di_L}{dt} = U_i \quad (5)$$

$$C \frac{dU_o}{dt} = -\frac{U_o}{R_L} \quad (6)$$

开关断开时,如图 1(b),有

$$L \frac{di_L}{dt} = U_i - U_o \quad (7)$$

$$C \frac{dU_o}{dt} = i_L - \frac{U_o}{R_L} \quad (8)$$

分析过程中需考虑二极管对电流的钳制作用,因此对方程组(5)(6)和方程组(7)(8)还应补充:若  $i_L < 0$  则  $i_L = 0$ ,这是后续仿真的重要约束条件。(说明:CCM/DCM 识别长期稳态下电感电流是否连续,而非判断瞬时过渡过程是否触发二极管钳制;因此,过渡态分析中可能出现的短暂钳制状态不与本文对 CCM 的讨论冲突。)

方程组(5)(6)的电流、电压彼此独立,可直接移项积分求解,解得

$$i_L(t) = i_L(0) + \frac{U_i}{L}t \quad (9)$$

$$U_o(t) = U_o(0)e^{-\frac{t}{R_L C}} \quad (10)$$

开关断开时的方程组(7)(8),彼此耦合,可将式(7)代入式(8)中,消去  $U_o$ ,得到

$$\frac{d^2 i_L}{dt^2} + \frac{1}{R_L C} \frac{di_L}{dt} + \frac{1}{LC} i_L = \frac{U_i}{LCR_L} \quad (11)$$

消去  $i_L$ ,则有

$$\frac{d^2 U_o}{dt^2} + \frac{1}{R_L C} \frac{dU_o}{dt} + \frac{1}{LC} U_o = \frac{U_i}{LC} \quad (12)$$

式(11)(12)是  $i_L$ 、 $U_o$  关于  $t$  的二阶微分方程,两式特征方程对应的判别式均为  $\Delta = \left(\frac{1}{R_L C}\right)^2 - \frac{4}{LC}$ ,可按照判别式开展阻尼情形分类。在分类仿真之前,我们以欠阻尼情形为例,通过解析解分析电路及负载参量对输出电压趋稳可能存在的影响。

对式(12),先求解其常数特解(平衡点)。将  $\frac{dU_o}{dt} = \frac{d^2 U_o}{dt^2} = 0$  代入,得  $U_\infty = U_i$ ,事实上这就是方程对应的稳态解。为分析过渡过程,引入偏移变量  $x(t) = U_o(t) - U_\infty$ ,可将式(12)化为以下齐次二阶方程

$$\frac{d^2 x}{dt^2} + \frac{1}{R_L C} \frac{dx}{dt} + \frac{1}{LC} x = 0 \quad (13)$$

而标准二阶线性系统的齐次形式如式(14)<sup>[14]</sup>

$$\frac{d^2 x}{dt^2} + 2\zeta\omega_n \frac{dx}{dt} + \omega_n^2 x = 0 \quad (14)$$

与式(13)逐项比较,可得到  $\omega_n = \frac{1}{\sqrt{LC}}$  (无阻尼自然频率<sup>[14]</sup>),  $\zeta = \frac{\sqrt{L/C}}{2R_L}$  (阻尼比<sup>[14]</sup>)。为后续讨论方便,再记阻尼自然频率  $\omega_d = \omega_n \sqrt{1-\zeta^2}$ ,则欠阻尼情形下式(12)的通解为

$$U_o(t) = U_\infty + e^{-\zeta\omega_n t} [A \cos(\omega_d t) + B \sin(\omega_d t)] \quad (15)$$

其系数  $A, B$  由初始条件给定,即  $A = U_o(0) - U_\infty, B = \frac{\dot{U}_o(0) + \zeta\omega_n A}{\omega_d}$ 。

分析式(12)(15)可知,从基尔霍夫定律所表征的二阶微分方程出发,输出电压对应的平衡点固定为  $U_\infty = U_i$ ,不随  $L, C, R_L$  等电路器件或电路初始参量决定;此外,方程整体的趋稳快慢主要

由指数包络  $e^{-\zeta\omega_n t}$  决定,根据无阻尼频率和阻尼比表达式,指数包络由电容和负载电阻决定,衰减速率与电容负相关,与负载电阻正相关;而  $\omega_d$  为电路在欠阻尼情形下的振铃频率,由电感、电容和负载电阻共同决定。

可见,电容电感及负载参数不会改变电路最终的稳态结果,但会直接影响电路达到稳态的动态过程。基于此,下文将结合二阶微分方程,进一步加入二极管正向约束,在不同阻尼情形下展开仿真分析,揭示 Boost 电路在过渡态的运行特征。

## 2.2 数值仿真与对比

稳态分析通常把闭合与断开作为求解手段而非研究对象。为揭示真实的过渡机制,本文分别考察常闭、常断与周期性开闭三种情形,并比对两类子过程在演化中的作用。

### 2.2.1 开关常闭情形

假设电路维持图 1(a)的开关闭合状态,结合方程组(9)(10),若初始电容不带电,仿真得回路电流如图 3(a),随时间线性上升;输出电压始终为零(见式(10))。而在实际 Boost 电路运作中,由于输出端存在累积电压,闭合开关后输出电压将指数衰减(见图 3(b))。

由此可见,开关闭合动作的主要作用并非抬升输出电压,恰恰相反,单一的闭合动作会使输出电压指数下降。根据电流线性升高可推测,开关闭合的主要作用在于“储能”,通过抬升电流使电感存储能量,该能量在开关断开时向电容端转移,使电压抬升能够挣脱输入电压限制而达到低压-高压转化效果。这一结论将在下文开关常断和真实 Boost 电路(开关周期性开闭)的升压能力对比中得到验证。

### 2.2.2 开关常断情形

注意到,二阶微分方程(11)(12)解的形式由其特征方程判别式决定。我们通过调控仿真参数,研究开关维持断开状态时参数在欠阻尼、过阻尼情形下的输出电压、电感电流变化情况,并进行比较。由于临界阻尼与过阻尼情形在图像呈现上相似,我们归并至过阻尼的讨论中。

在电感、电容等仿真参数选取上,我们遵循工程设计原则并参考前人研究。其一,按照 TI 的 Boost 电路参数计算流程<sup>[15]</sup>,先设定电感电流纹波比例与输出电压纹波上限,据此由  $L \approx \frac{V_{in} D}{\Delta I_L f_s}$ ,

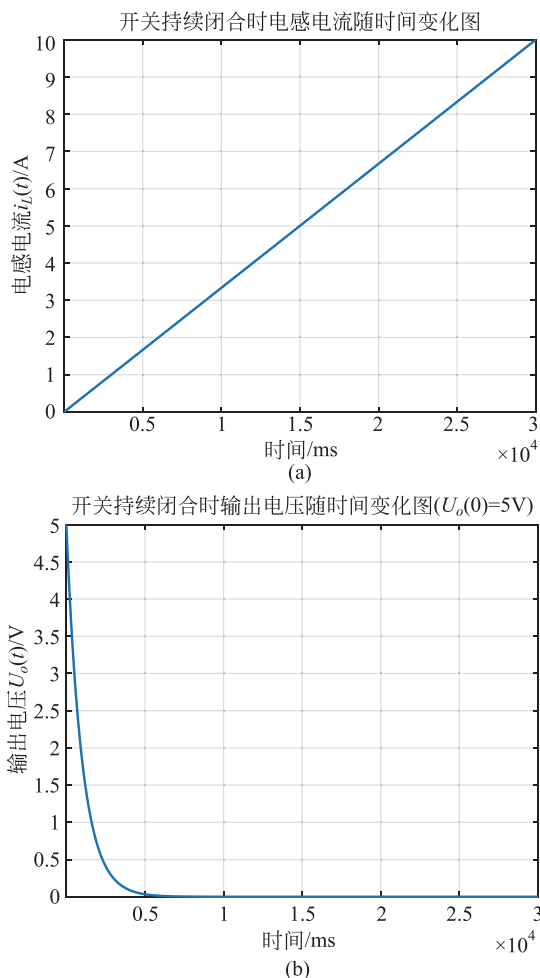


图3 开关持续闭合时电压电流随时间变化图

(a) 电感电流随时间变化图; (b) 输出电压随时间变化图

$C_{\min} \approx \frac{I_o D}{f_s \Delta V_o}$  确定实际电感电容参数;其二,为确保参数量级有可比的工程背景,我们对照相关文献的实验样机参数,如 Kobaku 等人的实验表明<sup>[16]</sup>,直流变换器在中低频条件下以 mH 级电感和 mF 级电容式为常见选型。基于上述分析,我们在仿真中拟定  $L = 15\text{mH}$ ,  $C = 22\text{mF}$ ,而负载  $R_L$  作为外部可调参数,其调整即可覆盖欠阻尼、过阻尼情形。需要说明的是,下文(含 2.2.3 节)为突出图像与阻尼的映射关系,不再赘述参数选取依据,而通过判别式所对应的不等式标注参数所属的阻尼区间,具体通过调控  $R_L$  实现即可。

#### 1) 欠阻尼情形

参数选取:  $\left(\frac{1}{R_L C}\right)^2 < \frac{4}{LC}$ , 输入电压  $U_{in} = 5\text{V}$ , 电容初始不带电。

通过 Matlab 仿真,得到输出电压、电感电流

随时间变化如图 4 所示。

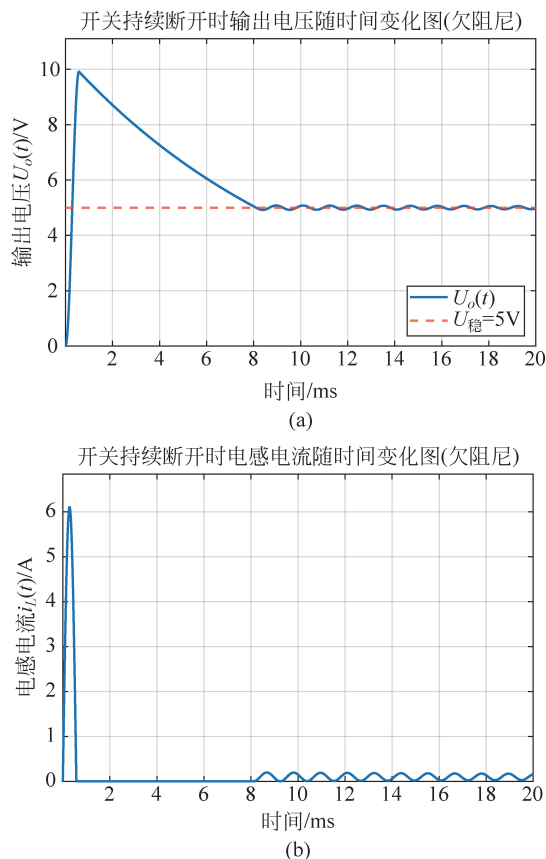


图4 开关持续断开电压电流随时间变化图(欠阻尼)

(a) 输出电压-时间图; (b) 电感电流-时间图

本文将图 4(a)(b)的动态过程定性整合为以下三个阶段:

(1) 阶段一:振荡阶段。电路运作初期,电感周期性吸收能量并向电容转移,电流电压迅速上升。按照欠阻尼解的特征,电流呈现出先上升后下降的振荡特点。

(2) 阶段二:钳制阶段。按照欠阻尼特征,电流本应越过平衡位置往反方向继续振动,但由于二极管的存在,电流被钳制为零,此阶段输出电压下降。

(3) 阶段三:趋稳阶段。随着电容不断放电,输出端电压降至一定值后,电流回归正向,二极管钳制作用消失,电流再次抬升。此后,系统在充放电间做小幅度、周期性波动的平衡状态,最终输出电压在输入电压附近做小幅振动,无法实现升压效果。

#### 2) 过(或临界)阻尼情形

参数选取:  $\left(\frac{1}{R_L C}\right)^2 \geq \frac{4}{LC}$ , 输入电压  $U_{in} =$

5V, 电容初始不带电。

通过 Matlab 仿真, 得到输出电压、电感电流随时间变化如图 5(a)(b) 所示。

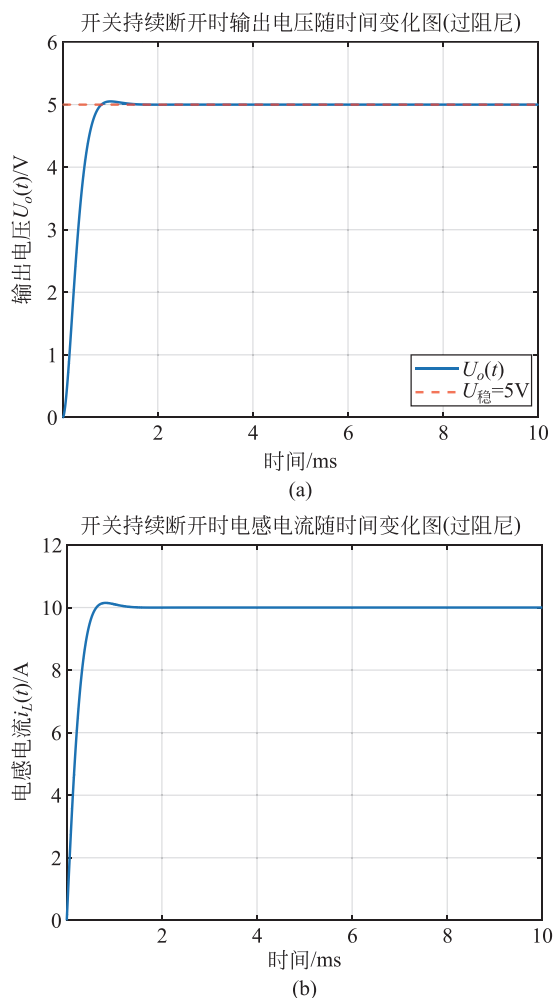


图5 开关持续断开电压电流随时间变化图(过阻尼)  
(a) 输出电压-时间图; (b) 电感电流-时间图

我们将图 5(a)(b) 的动态过程整合为以下两个阶段:

(1) 阶段一: 快速上升阶段。电路运作初期, 输入端持续为电感和电容供能, 电流迅速上升, 电容充电, 输出电压也迅速上升。在过阻尼情形下, 电流呈现单调上升趋势, 未呈现出先升后降的振荡特征, 不会出现钳制阶段。

(2) 阶段二: 趋稳阶段。电路逐渐趋于稳态, 其稳态电压依旧为 5V, 无法实现升压。

### 2.2.3 Boost 电路开关周期性开闭情境

真实的 Boost 电路是对“开关断开”和“开关闭合”这两个关键动作的周期性组合。同样按照

欠阻尼、过(或临界)阻尼展开分类, 探究开关周期性开闭情境下 Boost 电路过渡态行为。

#### 1) 欠阻尼情形

参数选取:  $\left(\frac{1}{R_L C}\right)^2 < \frac{4}{LC}$ , 输入电压  $U_i = 5V$ ,

$D = 0.55$ , 电容初始不带电。

根据方程组(9)(10)和方程组(11)(12), 结合电流不反向的约束条件, 做出 Boost 电路的  $U_o-t$ ,  $i_L-t$  图像, 如图 6(a)(b) 所示。

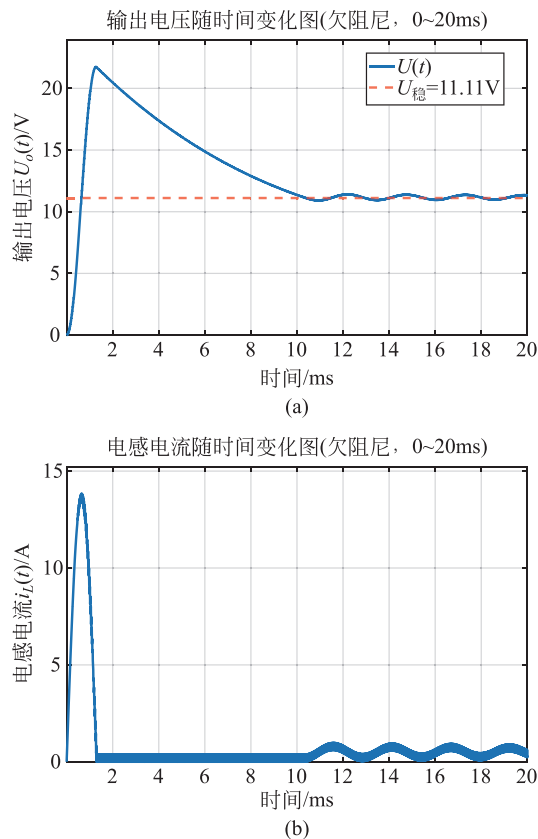


图6 欠阻尼 Boost 电路动态过程(宏观趋势)  
(a) 输出电压-时间图; (b) 电感电流-时间图

由于开关周期性开闭, 图 6(a)(b) 内部存在锯齿形。考虑到在整体图像中该锯齿细节不易辨识, 我们选取图 6 局部区域放大, 展示 11~13ms 的细节特征如图 7 所示。

可以发现, 在宏观趋势上, Boost 电路过渡态行为与 2.2.2 节中开关维持断开状态完全一致, 分为振荡、钳制、趋稳三个阶段。但是, 在开关周期性断开闭合的作用下, 电路的输出电压最终稳定在 11.11V, 恰满足式(4)稳态理论预期。此外, 由于开关的周期性开闭, 输出电压在微观局部始终呈现类锯齿形波动, 可见传统框架下的稳态指宏观趋势的趋稳, 并不意味着输出电压的绝对恒定。

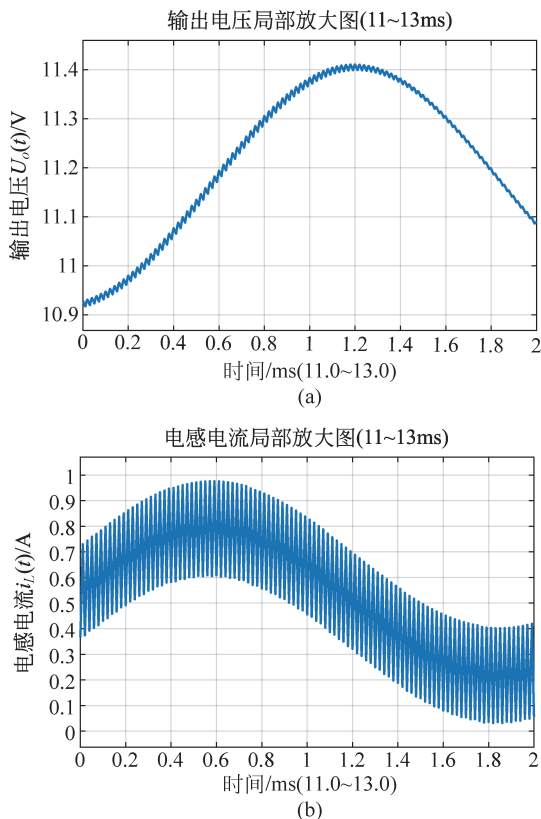


图7 欠阻尼 Boost 电路动态过程(局部放大)  
(a) 输出电压-时间图; (b) 电感电流-时间图

## 2) 过(或临界)阻尼情形

参数选取:  $\left(\frac{1}{R_L C}\right)^2 \geq \frac{4}{LC}$ , 输入电压  $U_i = 5V$ ,  $D = 0.55$ , 电容初始不带电。

利用 Matlab 仿真如图 8 所示。

同样的, 对图 8 典型时段进行局部放大, 展示 4~6ms 的锯齿波细节特征, 如图 9 所示。

图 8 在宏观趋势上, 仍与开关维持断开状态的过阻尼情形完全一致, 分为快速上升、趋稳两个阶段。电压最终稳定在 11.11V, 仍符合式(4)稳态理论预期。

基于上述分析, 我们归纳出 Boost 电路过渡态运行特征:

(1) 宏观上, 整体电感电流、输出电压的图形走向, 由方程(11)(12)的阻尼情况决定。尽管该方程组表征的仅是“开关断开”情形, 但能够决定开关周期性开闭下 Boost 电路的整体演化趋势。在欠阻尼情形下, 电路动态过程可划分为三个典型阶段: 振荡、钳制、趋稳; 在过阻尼情形下, 电路动态过程可划分为两个典型阶段: 上升、趋稳。

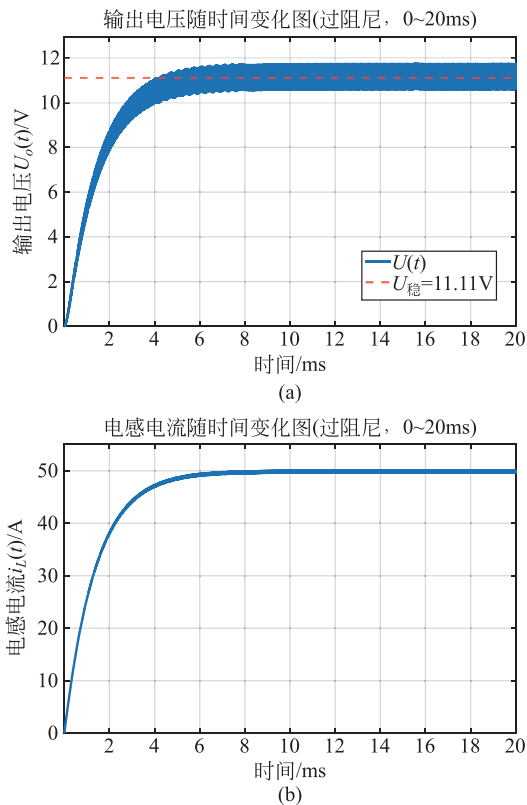


图8 过阻尼 Boost 电路动态过程(宏观趋势)  
(a) 输出电压-时间图; (b) 电感电流-时间图

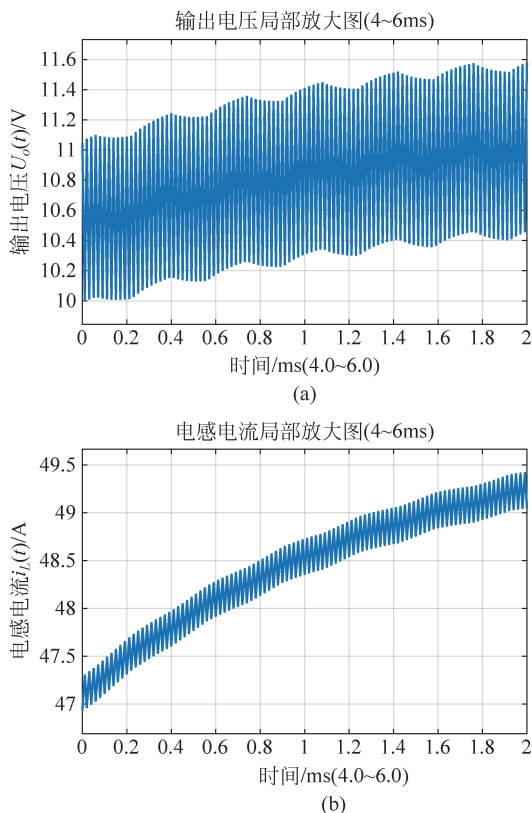


图9 过阻尼 Boost 电路动态过程(局部放大)  
(a) 输出电压-时间图; (b) 电感电流-时间图

(2) 微观上,所有阻尼情形内部存在类锯齿波,由 Boost 电路中开关周期性开闭引致。

(3) 开关闭合时对应的方程组(9)(10),虽不足以决定电路整体的演化趋势,但其对电感能量的存储,是实现升压的核心机制。若开关仅保持断开,输出电压的上限为输入电压,电路无法实现升压功能。

(4) 无论阻尼情形如何,只要时间足够长,非稳态 Boost 电路都能够自发回归  $U_o = \frac{U_{in}}{1-D}$  的稳态,式(4)所约束的占空比仍然成立。此稳态并不意味着输出电压的绝对恒定,而是指输出电压在稳态值附近小幅上下波动,表现出动态平衡。

### 3 拓展与展望

#### 3.1 教学转化,工具落地

基于前述过渡态图像和阻尼判据,研究结果可直接转化为教学资源与工具。在实验课上通过调节负载电阻、电感、电容,组织“欠阻尼-过阻尼”的对比观测,分析不同阻尼情形下的电路趋稳过程,从过程和结果两个维度解读 Boost 电路的真实运作机制。此外,由于本研究基于 Matlab 仿真,可将脚本封装为交互式可视化工具,设置滑动条实时联动参数与仿真图像,形成“参数-图像-物理含义”的可视化学习链,降低学生对二阶微分模型的认知负荷,并提升对 Boost 电路过渡态运行的直观认知。

#### 3.2 理论深化,研究延展

基于本文结论,后续研究可沿两条主线展开:其一是非理想量化,在现有模型上加入开关损耗、电感铜损与寄生电容等因素,考查这些因素对 Boost 电路阻尼效应的影响,并通过数值仿真量化过渡态指标的变化,进而为器件选型与实验安全提供直观依据;其二是情景扩展,将现有框架推广至 DCM、负载阶跃等情境中,检验过渡态结论与稳态特征是否一致,尝试用统一的框架体系解释不同情境下 Boost 电路的运作特征。

### 4 结语

本文围绕 Boost 电路过渡态展开研究,比较了常闭、常断与周期性开闭三种情境下的电压、电

流演变及其与稳态结论的关联。结果表明:单独的常闭或常断情境均无法实现升压;周期性开闭可获得稳定的升压输出,宏观走向由断开子过程的阻尼属性决定,微观呈现由开关动作引起的类锯齿波。基于这一过程视角,本文给出了面向教学的实验与可视化方案,并明确了非理想因素与应用场景扩展的研究方向,后续工作可在此框架上继续推进。

### 参 考 文 献

- [1] CHEN J. Power electronics—conversion and control technology[M]. 2nd ed. Beijing: Higher Education Press, 2004. (in Chinese)
- [2] HONG N G. Fundamentals of power electronics technology[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2008. (in Chinese)
- [3] RASHID M H. Power electronics: Circuits, devices, and applications[M]. 3rd ed. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall, 2004.
- [4] RAGHAVENDRA K V G, et al. A comprehensive review of DC-DC converter topologies and modulation strategies with recent advances in solar photovoltaic systems[J]. Electronics, 2020, 9(1): 31.
- [5] HASSAN N M, ABDELLATIF S O. Assessing centralized and decentralized EV charging schemes using PV-grid connected system: case study in Egypt[C]//2021 International Conference on Microelectronics (ICM). New Cairo City: IEEE, 2021: 232-235.
- [6] SANAD M F, SHALAN A E, ABDELLATIF S O, et al. Thermoelectric energy harvesters: a review of recent developments in materials and devices for different potential applications[J]. Topics in Current Chemistry, 2020, 378(6): 1-43.
- [7] ADLY G S, ANIS W R, RIAD P H S, et al. Techno-economic feasibility study on a PV system for peach crop irrigation in Egypt[C]//2022 International Seminar on Intelligent Technology and Its Applications (ISITIA). Surabaya: IEEE, 2022: 455-459.
- [8] SAGAR BHASKAR M, RAMACHANDARAMURTHY V K, PADMANABAN S, et al. Survey of DC-DC non-isolated topologies for unidirectional power flow in fuel cell vehicles[J]. IEEE Access, 2020, 8: 178130-178166.
- [9] MAREY A, BHASKAR M S, ALMAKHLES D, et al. DC/DC converter for 400 V DC grid system[C]//Proceedings of the 2022 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2022 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC/1&CPS Europe). Prague: IEEE, 2022: 1-6. DOI: 10.1109/EEEIC/ICPSEurope54979.2022.9854607.

(下转第 222 页)

在高校物理实验教学中推广,可以为提升实验的开放性与探究性提供有效支持。

### 参 考 文 献

- [1] TIMOSHENKO S, MACCULLOUGH G H. Elements of strength of materials[M]. New Jersey: D. Van Nostrand Company, 1949.
  - [2] GERE J M, GOODNO B J. Mechanics of materials[M]. Cengage Learning, 2009.
  - [3] 杨桂通. 弹性力学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2011.  
YANG G T. Elastic mechanics[M]. Beijing: Higher Education Press, 2011. (in Chinese)
  - [4] 张增明. 大学物理实验[M]. 北京: 高等教育出版社, 2024.  
ZHANG Z M. University physics experiments[M]. Beijing: Higher Education Press, 2024. (in Chinese)
  - [5] 吴泳华, 霍剑青, 浦其荣. 大学物理实验[M]. 北京: 高等教育出版社, 2005.  
WU Y H, HUO J Q, PU Q R. University physics experiments[M]. Beijing: Higher Education Press, 2005. (in Chinese)
  - [6] BEVINGTON P R, ROBINSON D K. Data reduction and error analysis for the physical sciences[M]. New York: McGraw-Hill, 2003.
  - [7] UGURAL A C. Stresses in beams, plates, and shells[M]. Boca Raton: CRC Press, 2017.
  - [8] NASA. Metallic materials properties development and standardization (MMPDS-10)[R]. USA: National Aeronautics and Space Administration, 2015.
  - [9] 岳盈, 赵霞, 赵伟, 等. 基于梁弯曲问题的弹性力学教学实践研究[J]. 物理与工程, 2025, 35(6): 24-9, 34.  
YUE Y, ZHAO X, ZHAO W, et al. A study of teaching practice in elasticity mechanics based on beam bending problems[J]. Physics and Engineering, 2025, 35(6): 24-9, 34.
  - [10] HEISSER R H, PATIL V P, STOOP N, et al. Controlling fracture cascades through twisting and quenching[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2018, 115(35): 8665-70.
  - [11] JIANG S, ZHU M, ZENG X, et al. Analysis of Mechanical Texture of Straight Thread-Like Pasta Based on Compressive Rod Post-Buckling [J]. Food Science, 2012, 33(23): 83-7.
- 
- (上接第 208 页)
- [10] ADLY G S, ANIS W R, EZZAT S, et al. Experimental validation of an analytical transient model for saturated boosting gain in DC-DC converters with variable duty cycle [J]. Discover Applied Sciences, 2024, 6: 375.
  - [11] TOFOLI F L, DE ARAÚJO R P, LINO P R G, et al. Generalized PWM switch model for small-signal modeling of converters operating in DCM [J]. Sensors, 2024, 24(10): 3084.
  - [12] LI Q, ZHANG D, ZHU L, et al. Sample voltage dead-beat control based on differentiative voltage prediction and switching-cycle extension for DC-DC converters[J]. Electronics, 2024, 13(12): 2319.
  - [13] NITHARA P V, GEORGE B, LIJO J, et al. Brayton-Moser passivity based controller for constant power load with interleaved boost converter[J]. Scientific Reports, 2024, 14: 28325.
  - [14] OGATA K. Modern control engineering[M]. 5th ed. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall, 2010.
  - [15] HAUKE B. Basic calculation of a boost converter's power stage: SLVA372D[R]. Dallas: Texas Instruments, 2022.
  - [16] KOBAKU T, JEYASENTHIL R, SAHOO S, et al. Experimental verification of robust PID controller under feed-forward framework for a nonminimum phase DC-DC boost converter[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2021, 9(3): 3373-3383.