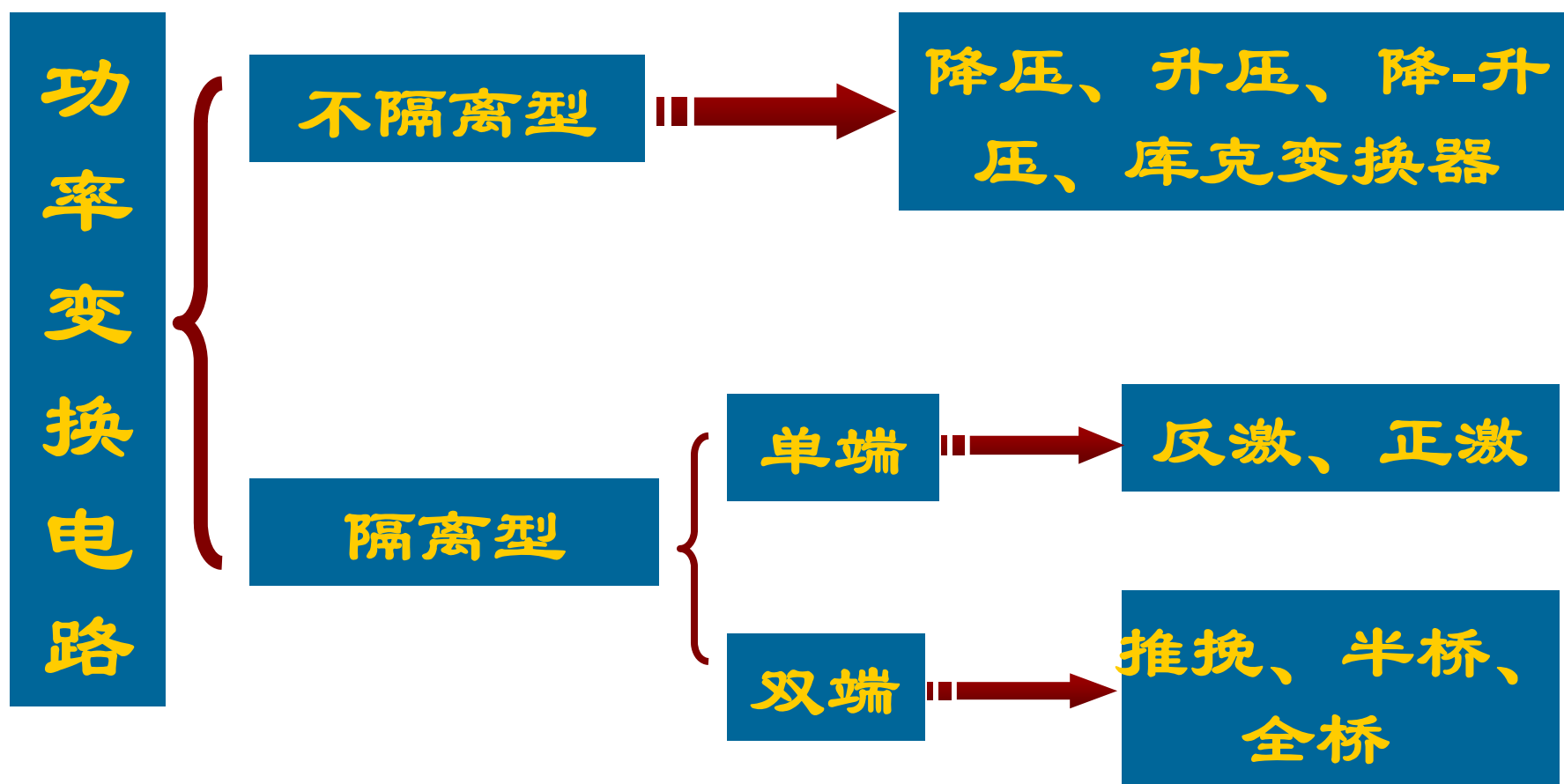


第四章 基本开关型调整器——BUCK变换器



第四章 BUCK变换器

4.1 BUCK变换器基本原理

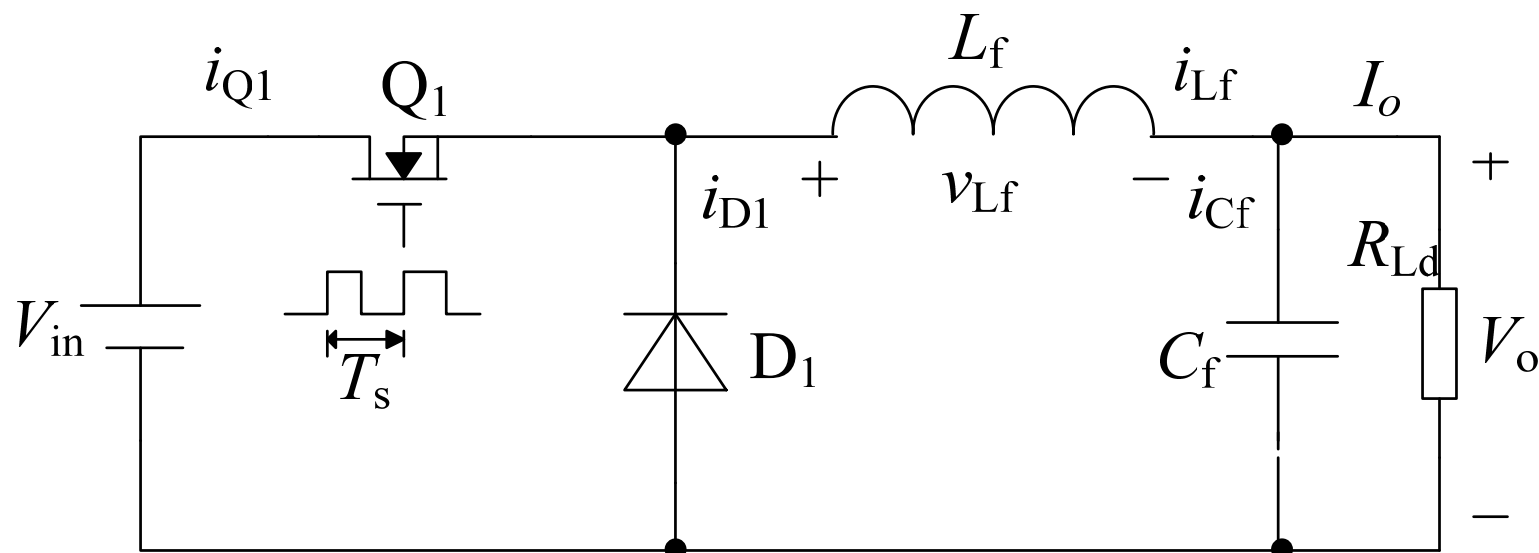
4.2 Buck变换器的参数设计

4.3 BUCK变换器仿真

本章小结

第四章 BUCK变换器

4.1 BUCK变换器基本原理



降压式（**Buck**）变换器是一种输出电压小于输入电压的非隔离直流变换器。电路由开关管**Q1**、二极管**D1**，输出滤波电感**L_f**和输出滤波电容**C_f**构成。根据输出滤波电感中电流是否连续，**Buck**电路可以工作在电流连续模式（**Continuous current mode, CCM**）和电流断续模式（**Discontinuous current mode, DCM**）。电感电流连续模式是指输出电感**L_f**的电流总是大于零，电感电流断续是指在开关管关断期间有一段时间**L_f**的电流为零。在这两种工作方式之间有一个工作边界，即在开关管关断区间结束时，**L_f**的电流刚好降为零。

第四章 BUCK变换器

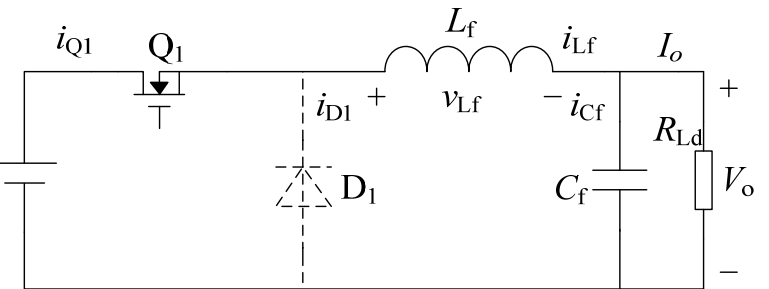
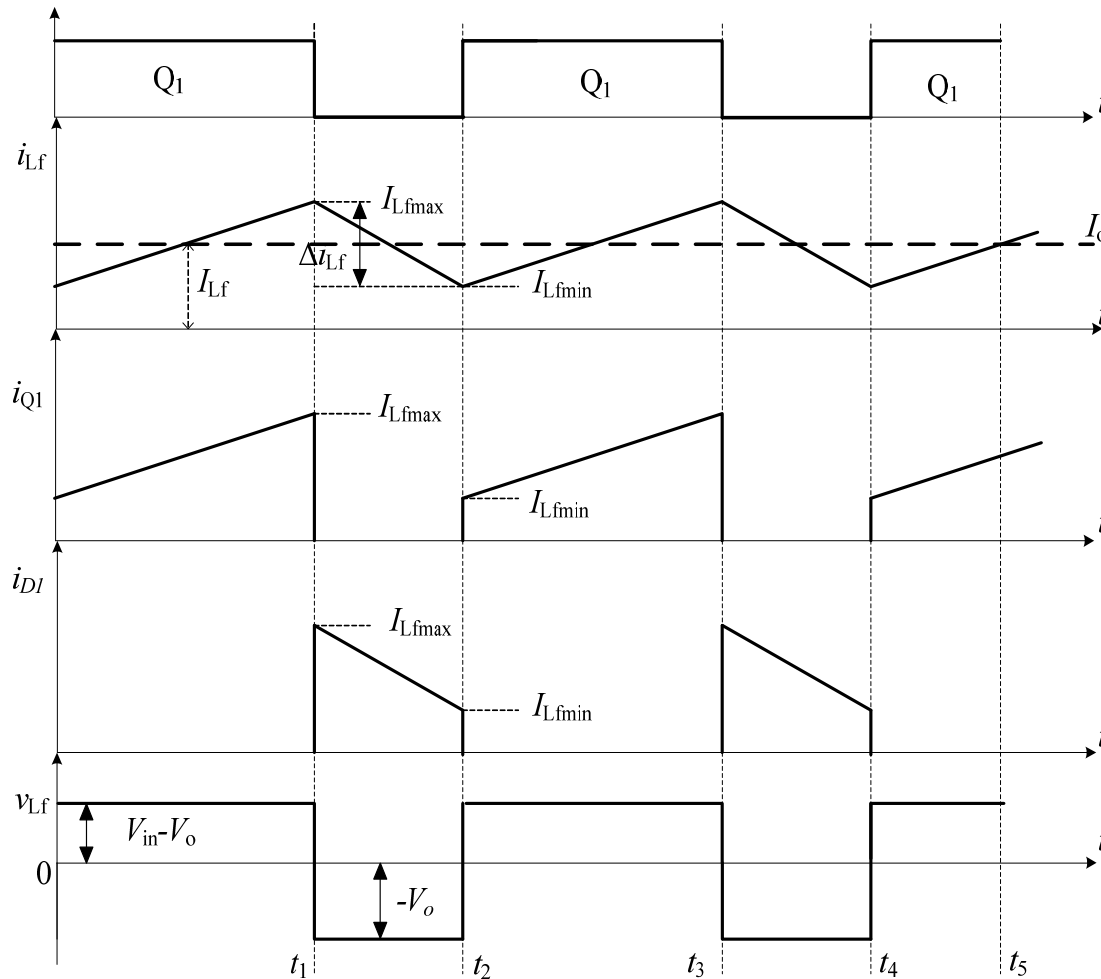
假设：

- 1、所用电力电子器件理想，即开关管**Q1**和续流二极管**D1**的开通延迟和关断延迟时间为零，通态电压为零，断态漏电流为零；
- 2、在一个开关周期内，输入电压 **V_{in}** 保持不变；输出滤波电容电压，即输出 **V_o** 有很小的纹波 ΔV_o ，但可认为基本保持不变，其值为 **V_o** ；
- 3、电感和电容均为无损耗的理想储能元件；
- 4、不计线路阻抗。

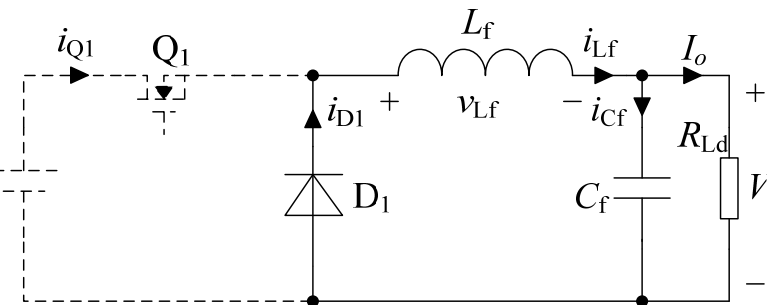
第四章 BUCK变换器

电流连续时的工作模式(CCM)

注意：电感中的能量的积累、释放经过一个周期后必须回到原来的状态！



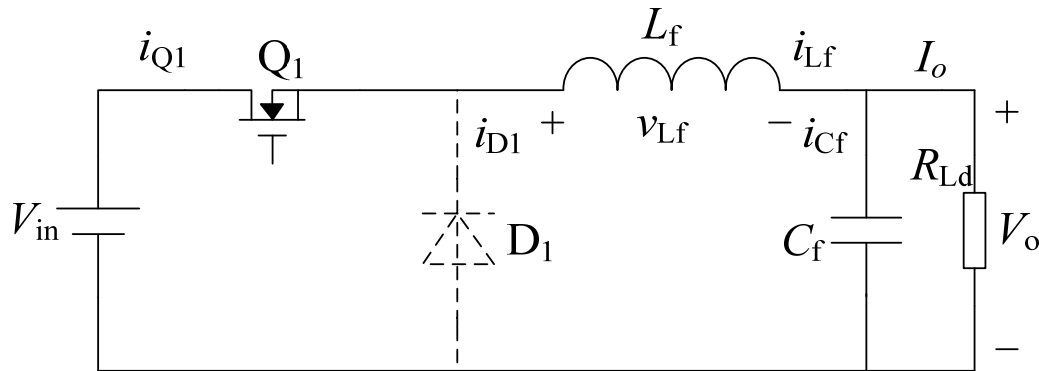
Mode 1



Mode 2

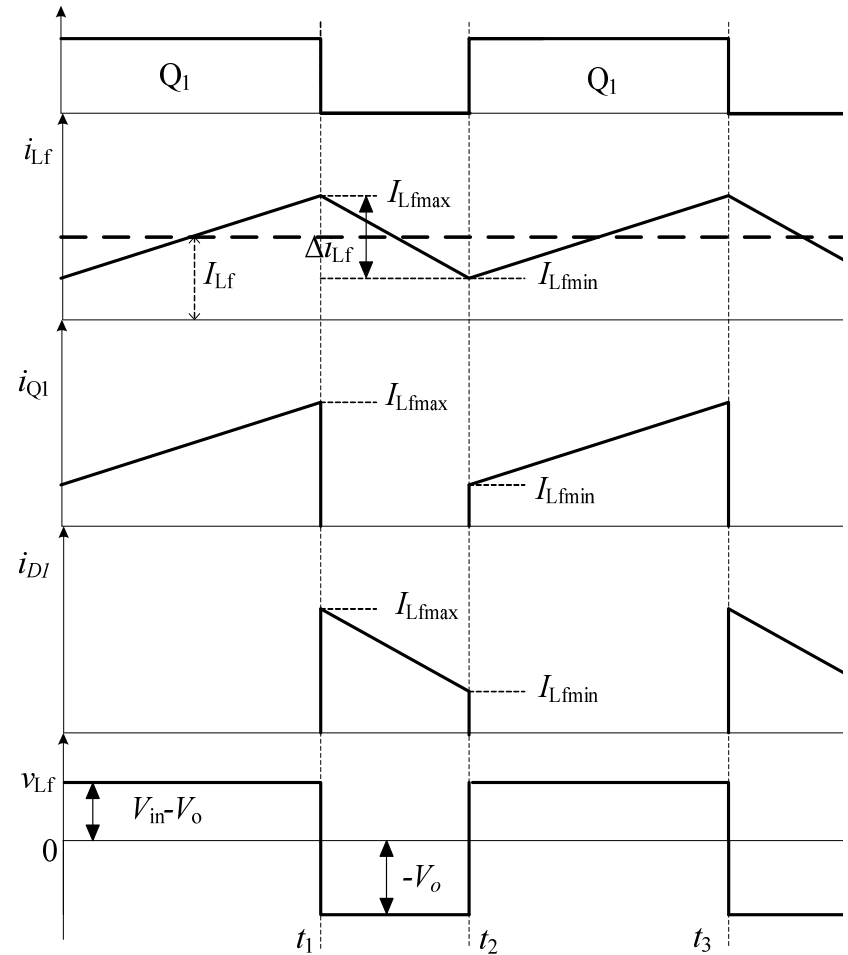
第四章 BUCK变换器

Mode 1 [0, t₁]



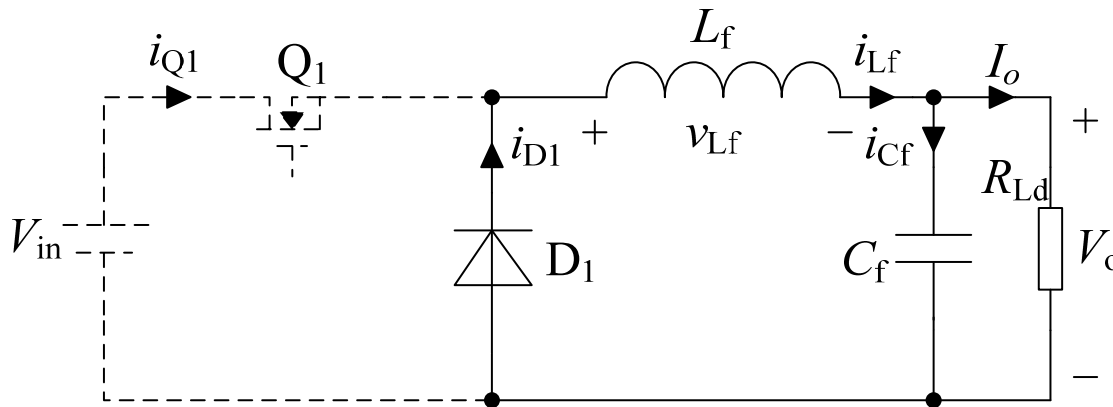
$$v_{L_f} = L_f \frac{di}{dt} = V_{in} - V_o$$

$$\Delta I_{L_f(+)} = \frac{V_{in} - V_o}{L_f} T_{on} = \frac{V_{in} - V_o}{L_f} DT_s$$



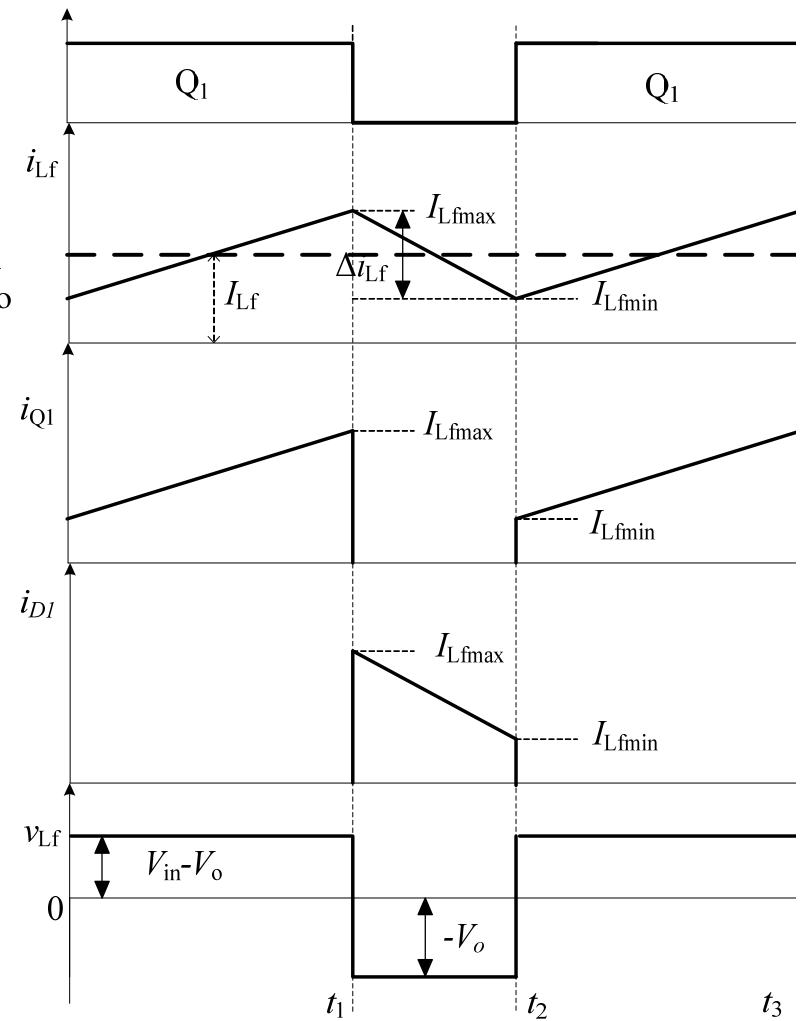
第四章 BUCK变换器

Mode 2 [t_1 , t_2]



$$v_{Lf} = L_f \frac{di}{dt} = -V_o$$

$$\Delta I_{Lf(-)} = \frac{V_o}{L_f} (T_s - T_{on}) = \frac{V_o}{L_f} (1 - D) T_s$$



基本关系:

$$\Delta I_{L_{f(+)}} = \Delta I_{L_{f(-)}} = \Delta I_{L_f}$$

$$\frac{V_{in} - V_o}{L_f} D T_s = \frac{V_o}{L_f} (1 - D) T_s$$

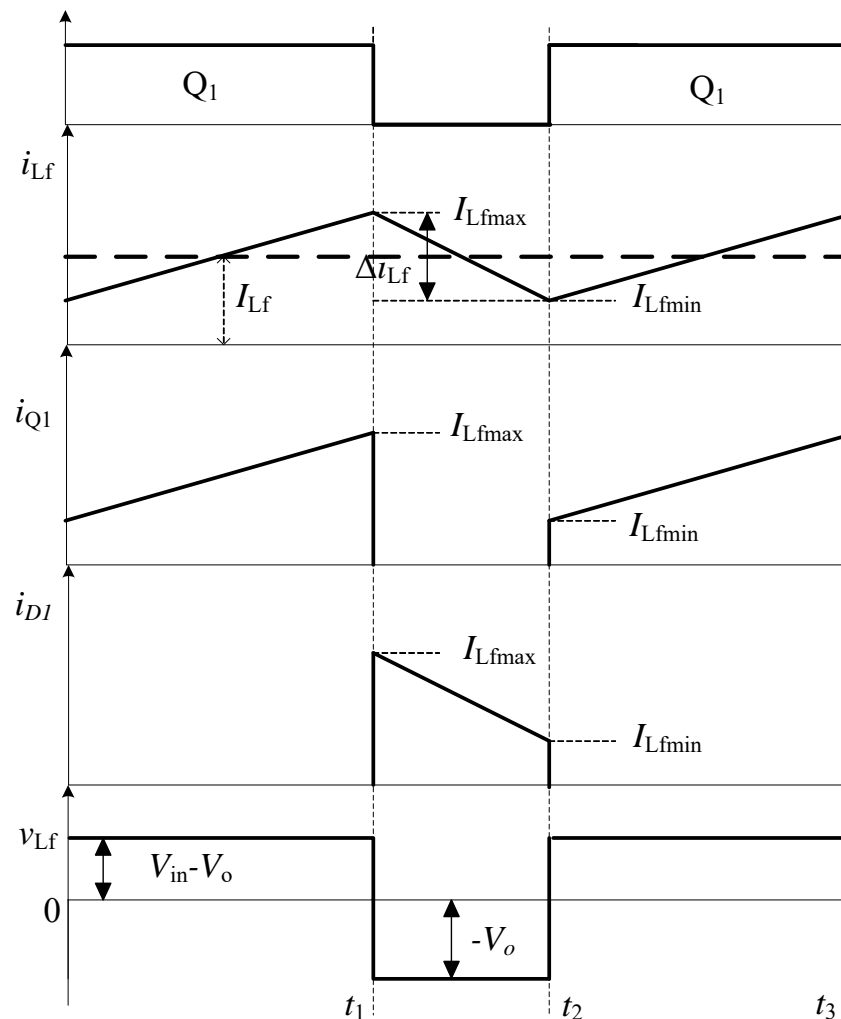
$$\frac{V_o}{V_{in}} = D = \frac{T_{on}}{T_{on} + T_{off}}$$

$$I_o = \frac{I_{L_{fmin}} + I_{L_{fmax}}}{2}$$

$$\Delta Q = \frac{\Delta I_{L_f}}{4} \frac{T_s}{2} = \frac{\Delta I_{L_f}}{8 f_s}$$

理想情况下:

$$\Delta V_o = \Delta V_{C_f} = \frac{\Delta Q}{C_f} = \frac{\Delta I_{L_f}}{8 f_s C_f} = \frac{U_{in} D(1-D)}{8 f_s^2 L_f C_f}$$



实际电容有损耗，其等效电路如图所示。

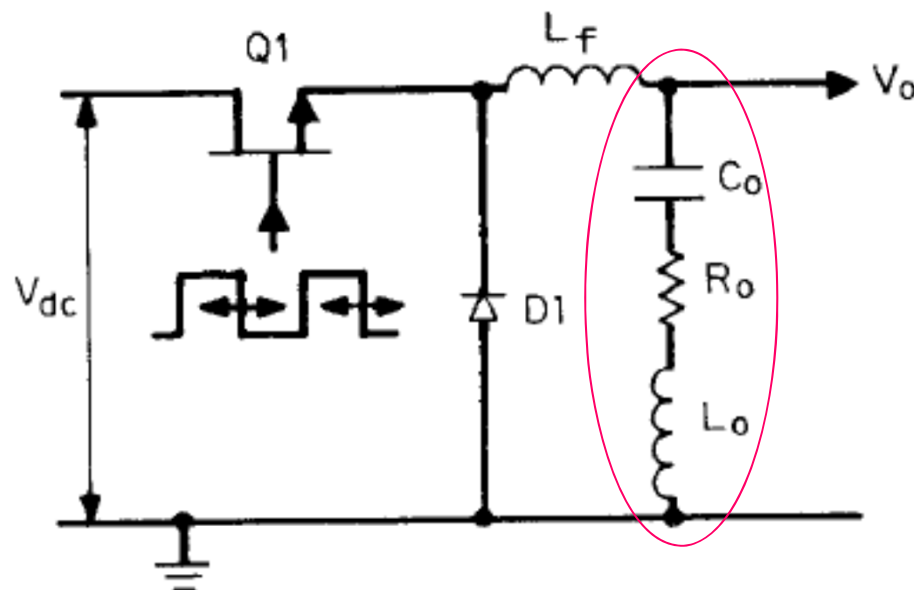
电容设计：

滤波电容的选择必须满足输出纹波的要求。

纹波分量：等效串联电阻 R_o 和 C_o 决定

R_o 决定的纹波分量与
($I_{LFMAX} - I_{LFMIN}$) 成正比

C_o 决定的纹波分量与流
过 C_o 电流的积分成正比



两者相位不同，考虑最恶劣情况，假设它们同相相加

研究发现：等效串联电阻引出的电压纹波远远大于电容引起的容性纹波，因此在实际设计中，为了简化设计，仅仅考虑等效串联电阻引起的电压纹波就可以了。

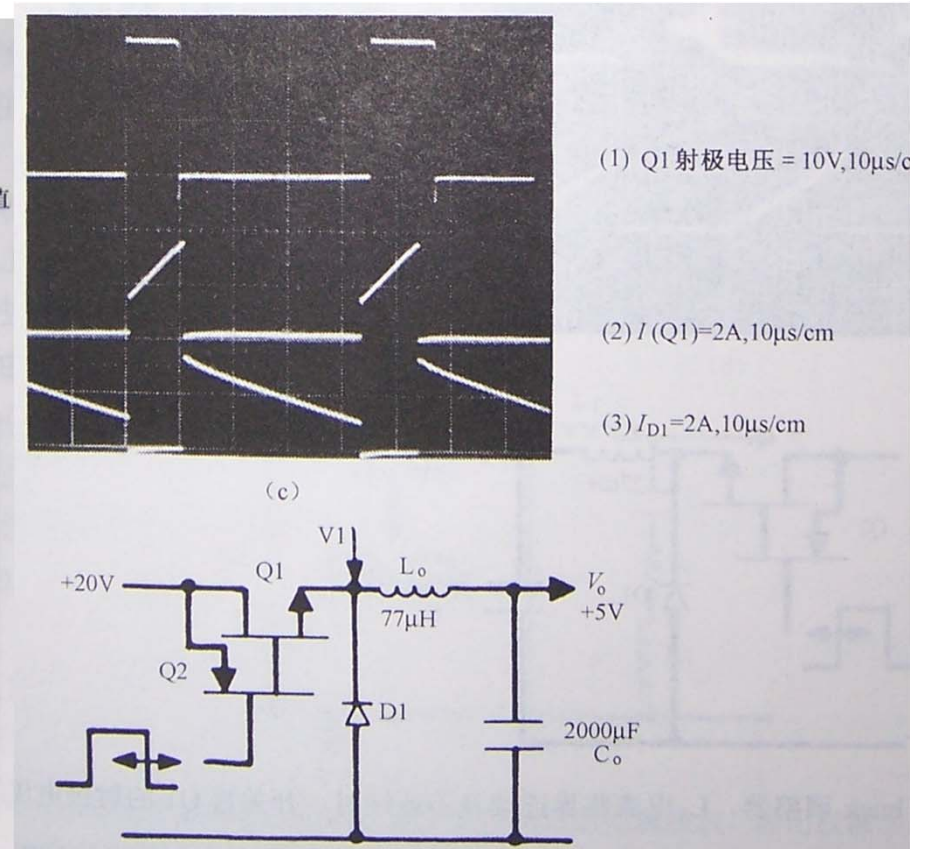
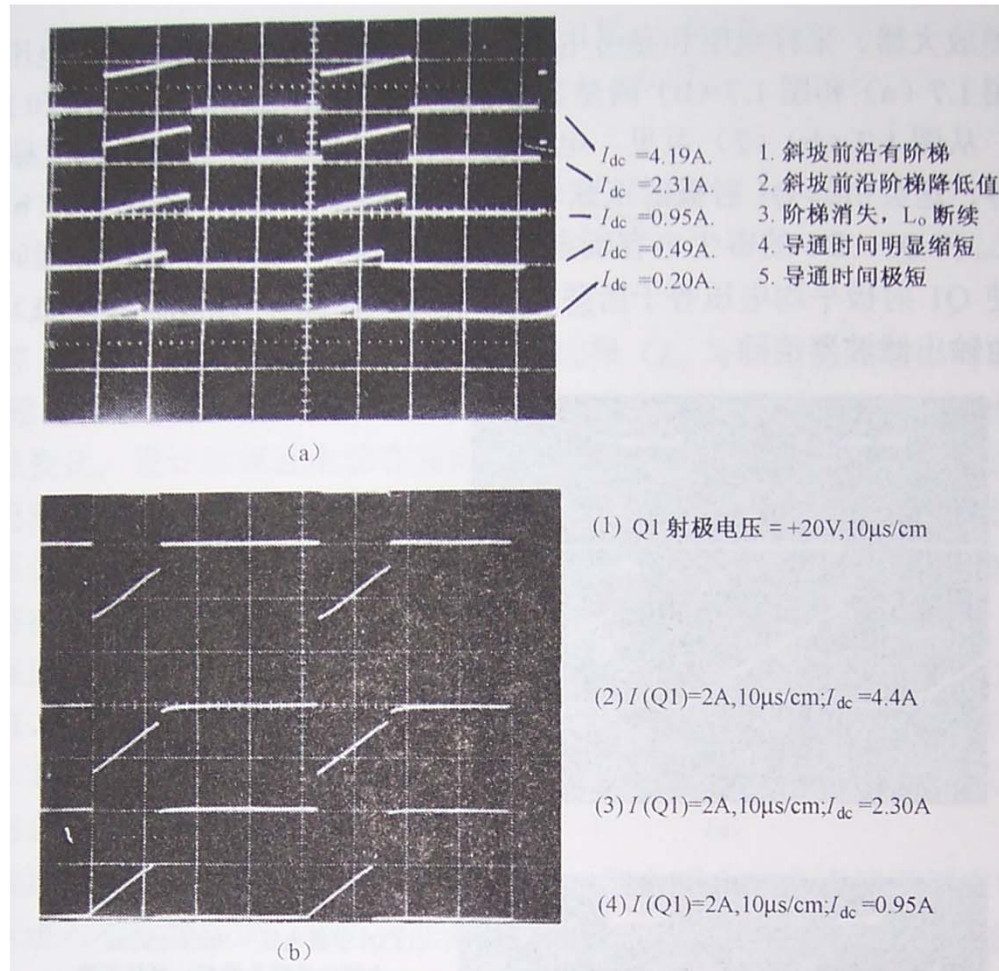
4.2 Buck变换器的参数设计

性能指标:

- 输入电压: $V_{in}=20\sim 28\text{VDC}$ 。
- 输出电压: $V_o=9\text{VDC}$ 。
- 输出电流: $I_o=1\text{A}$ 。
- 输出纹波电压峰峰值: $V_{rr}<0.06\text{V}$ 。
- 开关频率: $f_s=100\text{KHz}$ 。

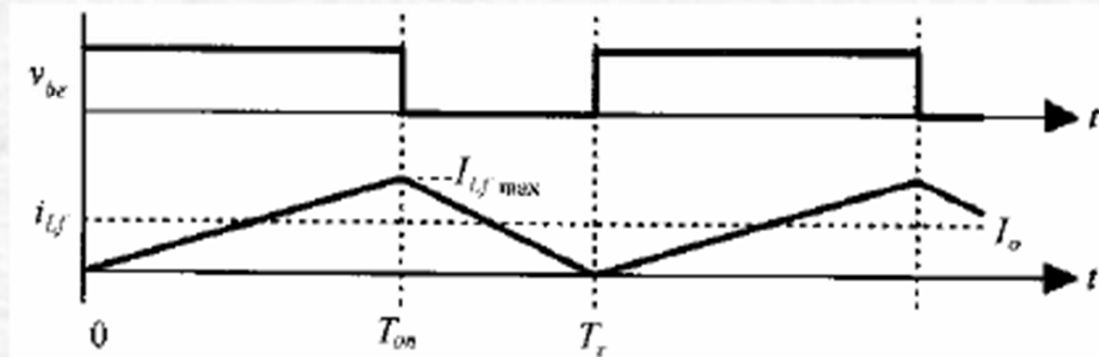
4.2 Buck变换器的参数设计

参数设计——输出滤波电感的选择



4.2 Buck变换器的参数设计

电感电流临界连续 (TM)



$$I_o = \frac{I_{Lf \max} - I_{Lf \min}}{2} = \frac{I_{Lf \max} - 0}{2} = \frac{I_{Lf \max}}{2}$$

4.2 Buck变换器的参数设计

电感设计:

保证直流输出最小规定电流（额定电流的**1/10**）时，电感电流也保持连续。

$$I_{o(\min)} = 0.1I_o = (I_{Lf\max} - I_{Lf\min})/2 \quad \text{即} \quad (I_{Lf\max} - I_{Lf\min}) = dI = 0.2I_o$$

其中， dI 为斜波幅值， $dI = (V_{in} - V_o)T_{on}/Lf$

$$L_f = \frac{(V_{in} - V_o)T_{on}}{dI} = \frac{(V_{in} - V_o)T_{on}}{0.2I_o}$$

因为 $T_{on} = V_o T / V_{in}$

$$L_f = \frac{5(V_{in} - V_o)V_o T_s}{V_{in} I_o} \quad (4-19)$$

$$L_f = \frac{5(V_{in} - V_o)V_o T_s}{V_{in} I_o} = \frac{5(28 - 9)9 \times 10 \times 10^{-6}}{28 \times 1} = 305.36 \mu H$$

4.2 Buck变换器的参数设计

输出滤波电容的选择：常用铝电解电容： $R_o C_o \approx 50 \sim 80 \times 10^{-6}$

$$\text{斜坡峰一峰值 } (I_{L_{fmax}} - I_{L_{fmin}}) = 0.2I_o = 0.2$$

方法1： 设阻性纹波电压 V_{rr} 峰一峰值为0.06V，
则 $0.06 = (I_{L_{fmax}} - I_{L_{fmin}}) R_o$ ， $R_o = 0.3\Omega$

若 $R_o C_f = 65 \times 10^{-6}$ ，则 $C_f = 65 \times 10^{-6} / 0.05 = 216.67\mu F$

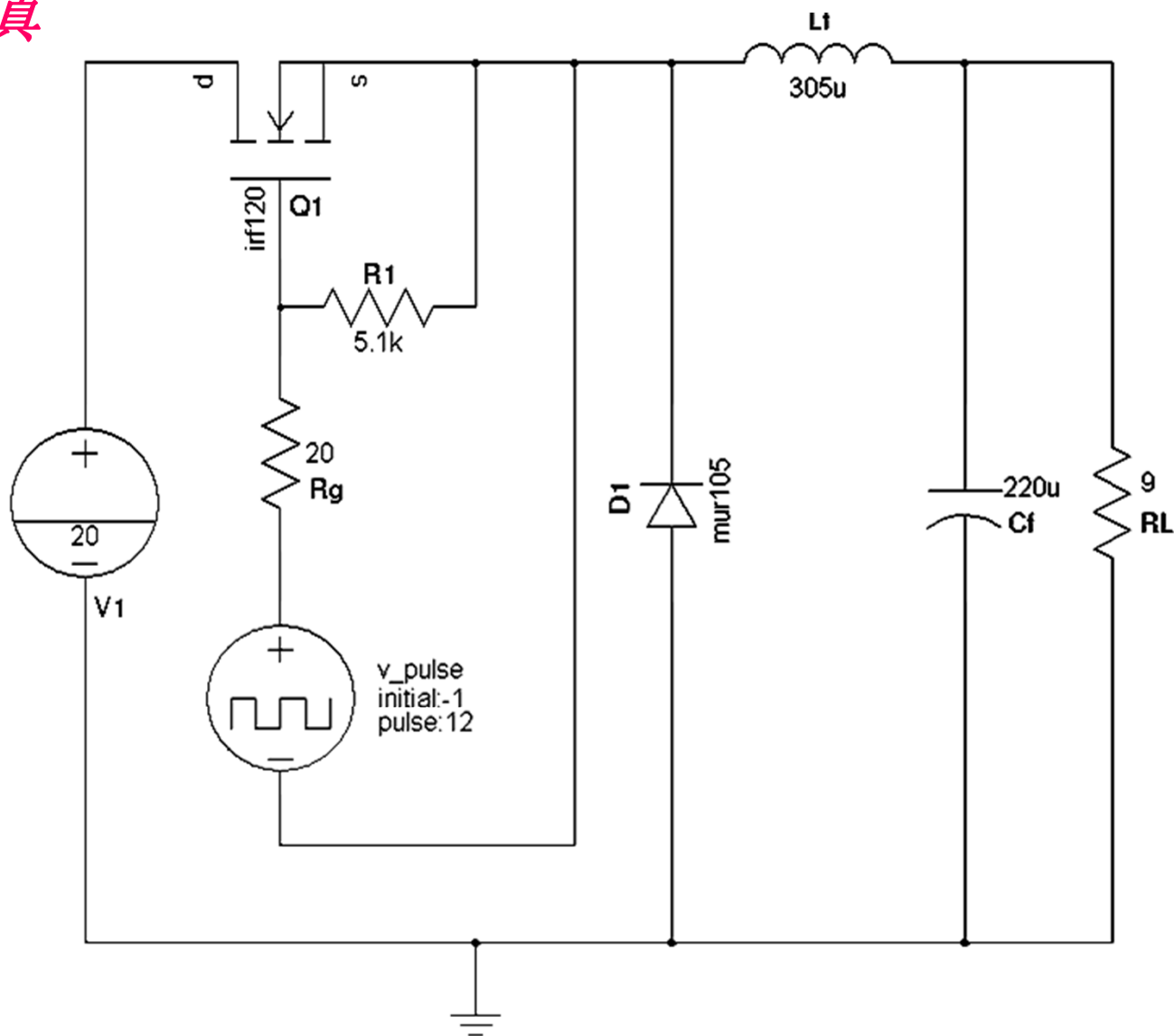
方法2： 根据图4.2计算容性纹波电压 V_{cr} 。该三角波电流的平均值为
 $(I_{L_{fmax}} - I_{L_{fmin}}) / 4 = 0.2I_o / 4 = 0.05A$

$$V_{Cf} = \frac{It}{C_f} = \frac{0.05 \times 5 \times 10^{-6}}{216.67 \times 10^{-6}} = 1.15mV$$

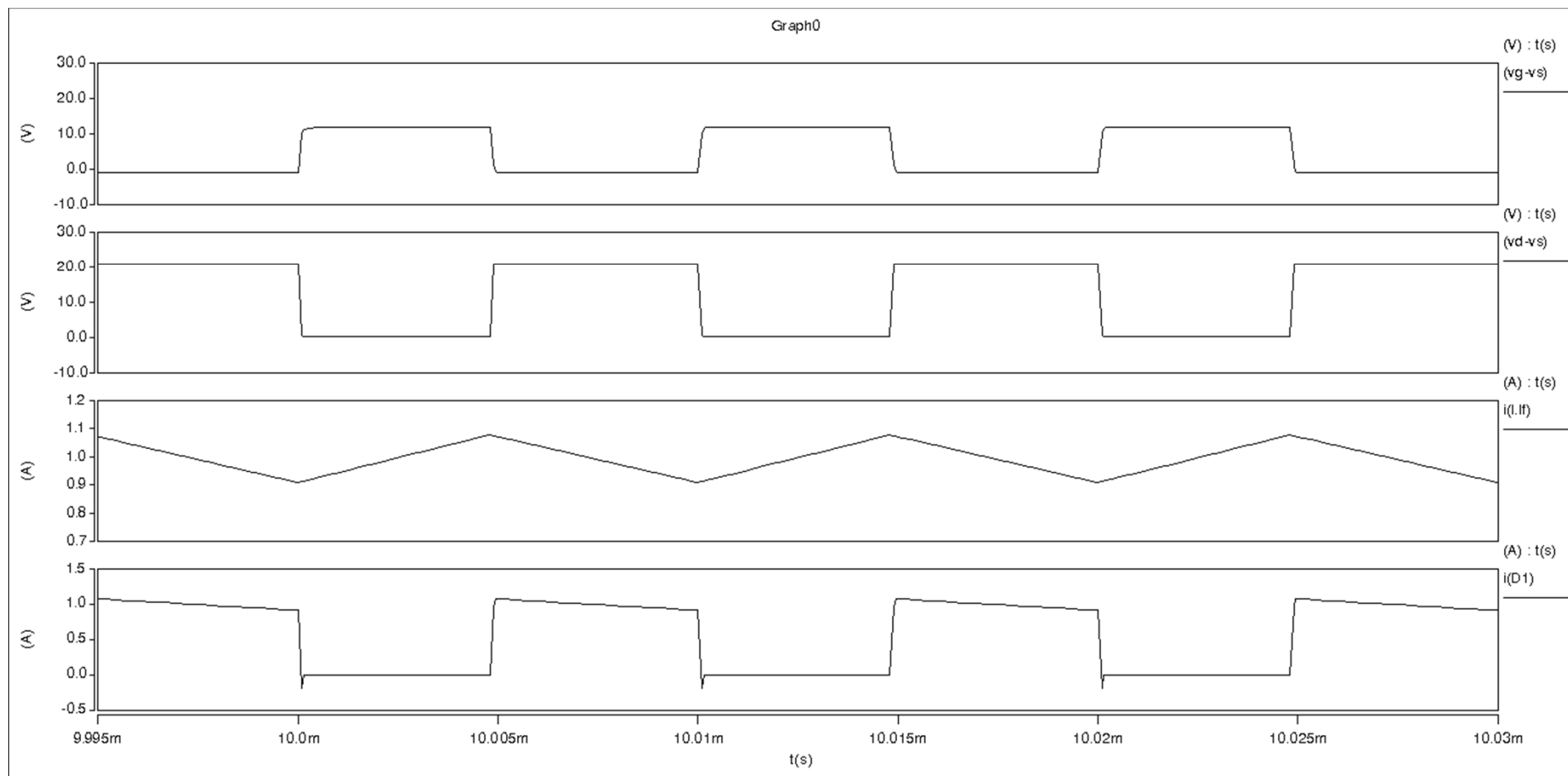
I_o 线下的纹波电流将产生另外的1.15mV的纹波电压。电容造成的电压纹波远比ESR电阻R造成的电压纹波小，因此可以忽略。

4.3 BUCK变换器仿真

开环仿真

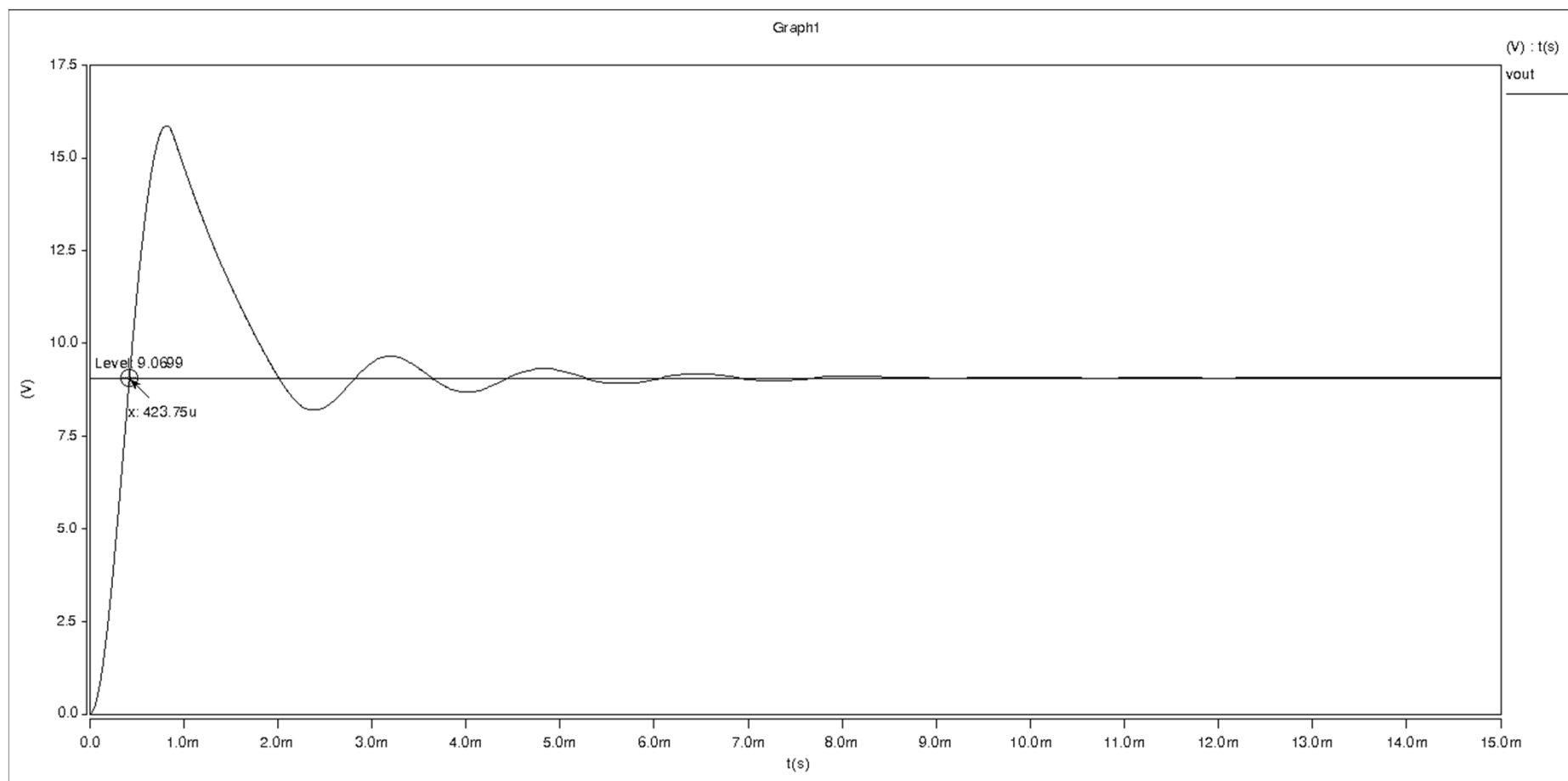


4.3 BUCK变换器仿真



Buck开环仿真电路关键电压及电流波形

4.3 BUCK变换器仿真

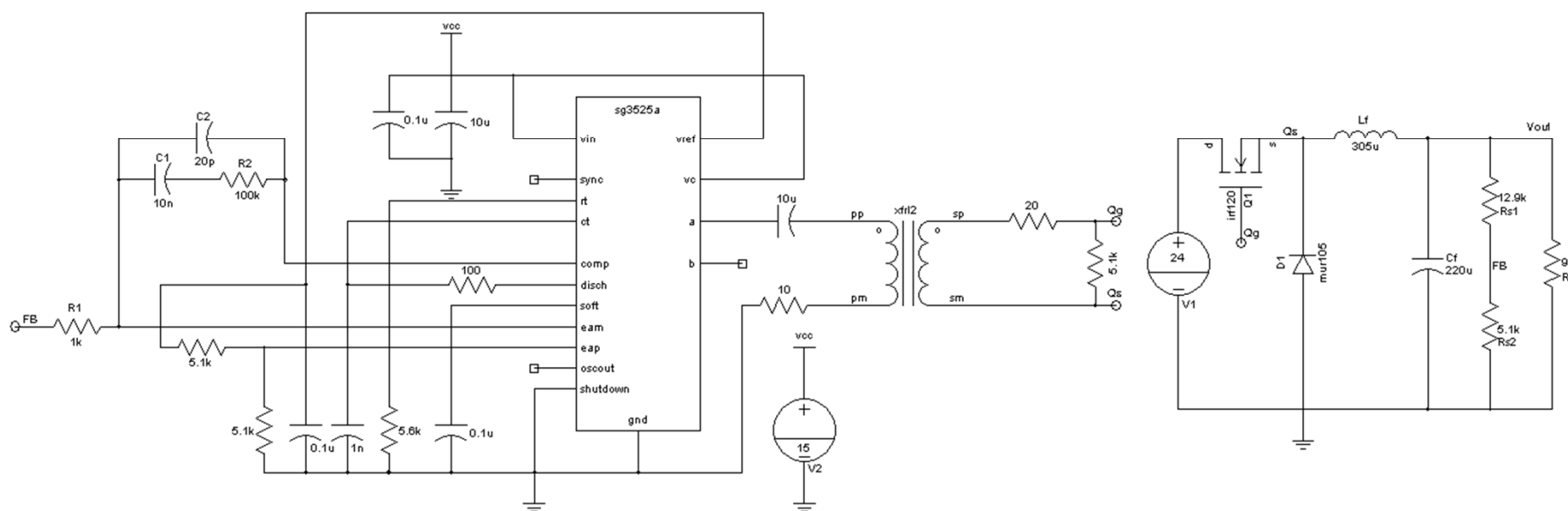


Buck开环仿真输出电压波形

变换器的输出电压稳定在9.07V

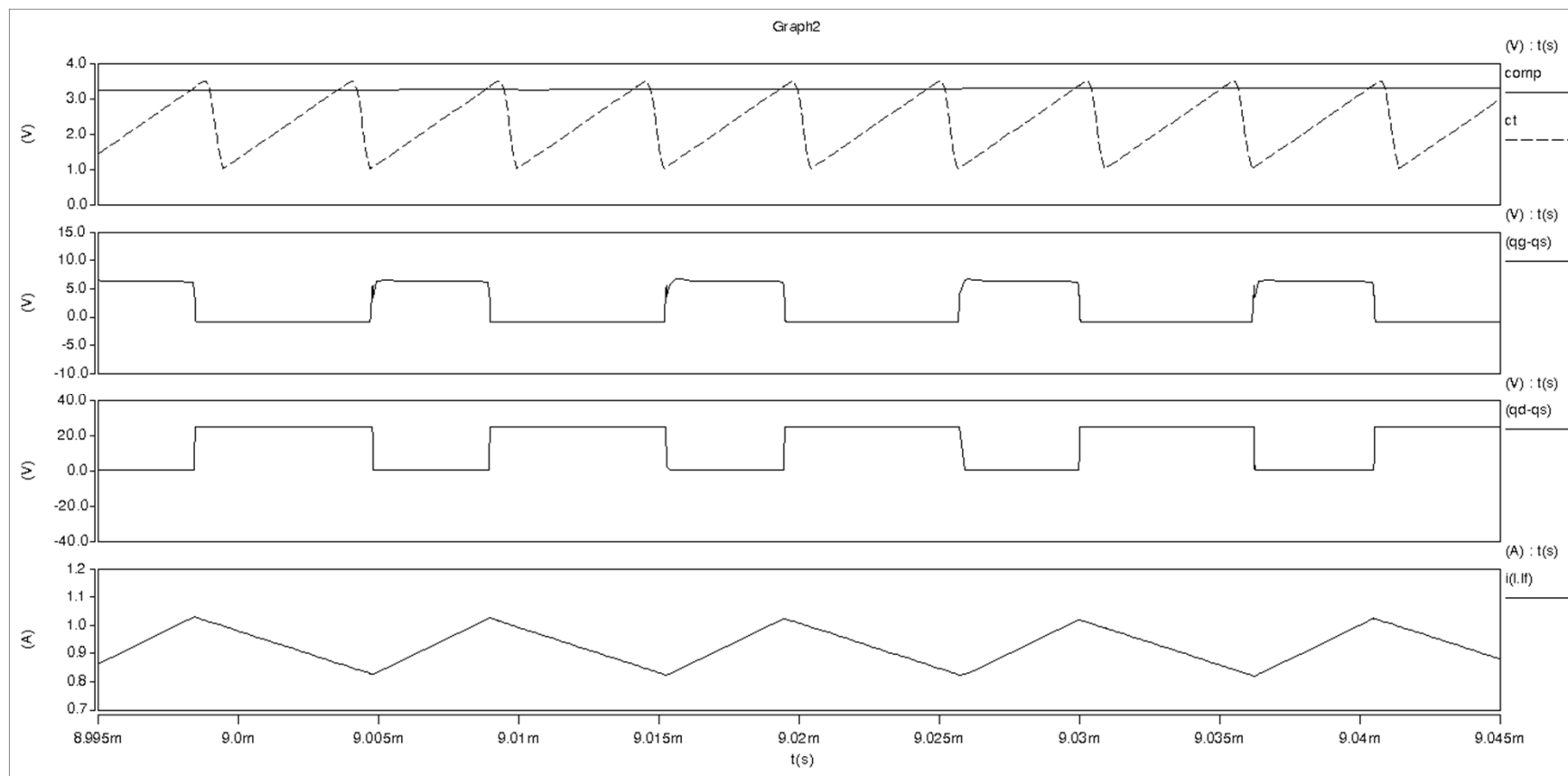
4.3 BUCK变换器仿真

闭环仿真



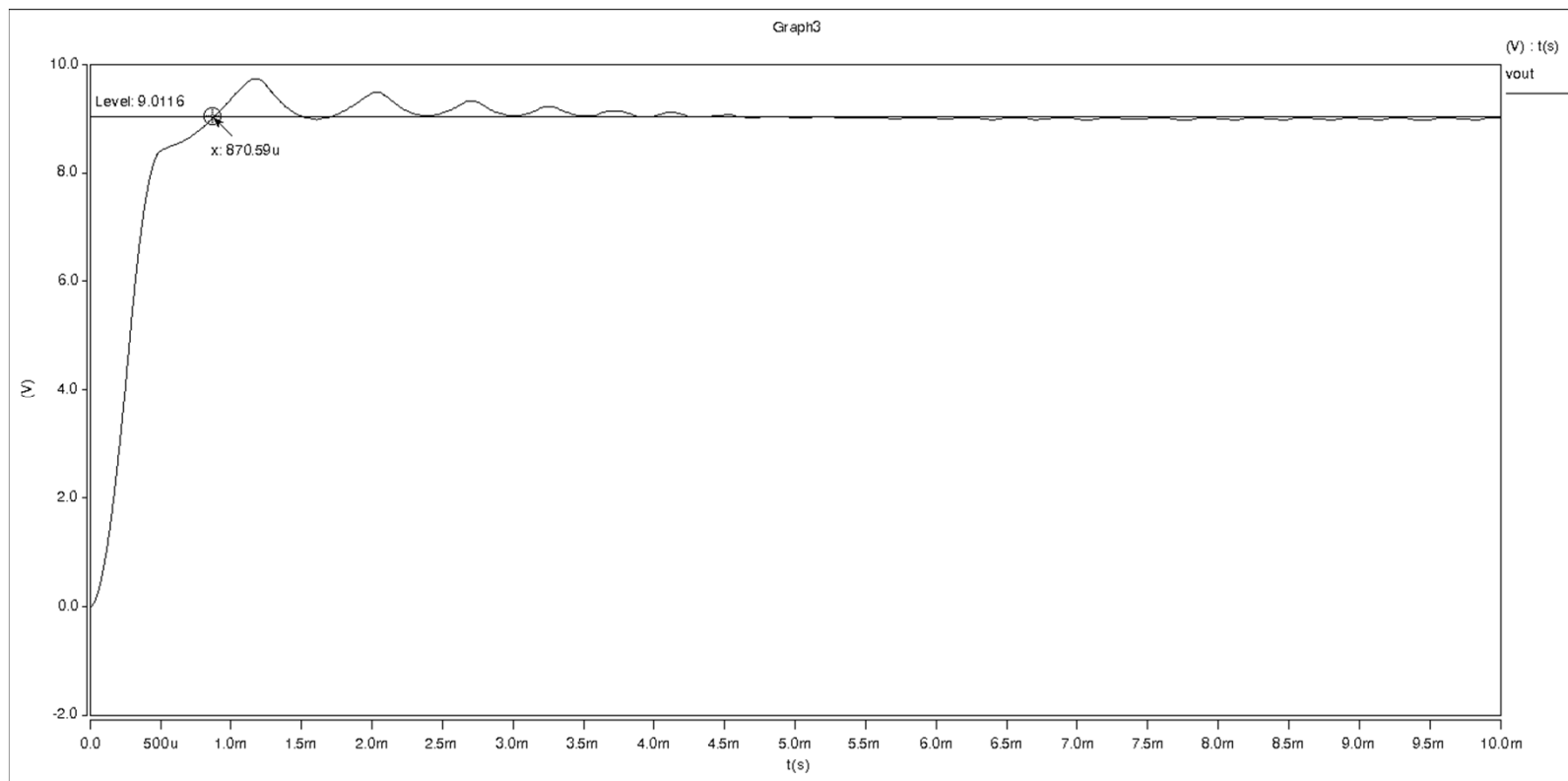
基于SG3525控制的Buck变换器的仿真模型图

4.3 BUCK变换器仿真



Buck变换器闭环仿真关键点的输出波形

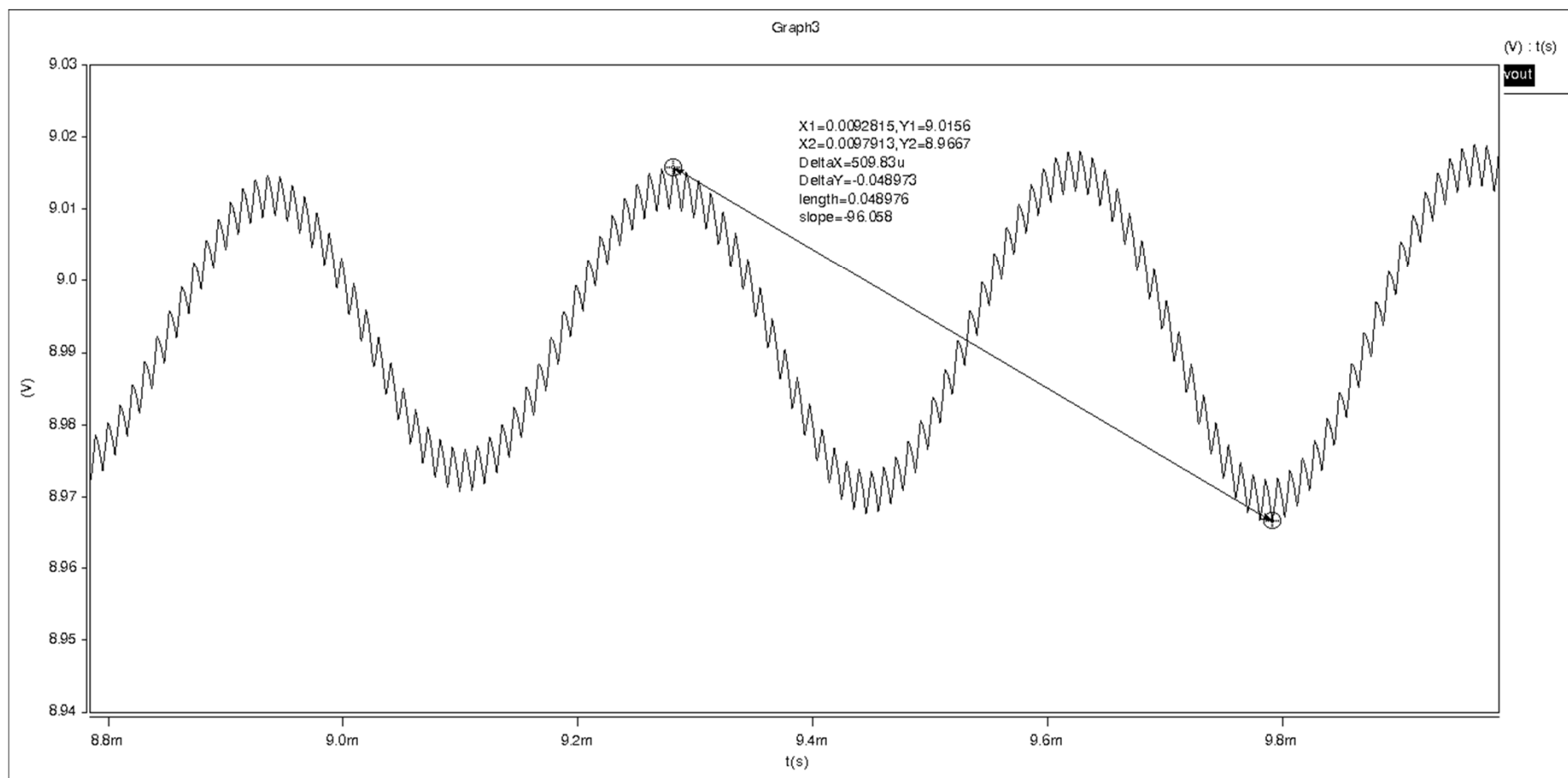
4.3 BUCK变换器仿真



Buck变换器闭环仿真输出电压波形

输出电压能稳定地控制在9.01V

4.3 BUCK变换器仿真



Buck变换器闭环仿真输出电压纹波

输出电压纹波为0.049V，纹波小于1%

Buck变换器

要记住的公式:

$$R_o = \frac{V_{or}}{I_{Lf \max} - I_{Lf \min}} = \frac{V_{or}}{0.2I_{on}}$$

$$C_f = \frac{65 \times 10^{-6}}{R_o} = 65 \times 10^{-6} \frac{0.2I_{on}}{V_{or}}$$