The Method of Linear DC Electric Load Design Method Based on Capacitor Buffer

LIN Xin, ZHOU Changlin, YU Daojie
Theory College, Information Engineering University, Zhengzhou ,China

Abstract: This paper proposes a based on capacitive buffer high-power dc linear electric load circuit design method. Based on the current dc passive electronic load and active electronic load the defects, in this method, through the capacitance buffer action, For passive electronic load, can effectively reduce power consumption in power devices for linear regulation, no energy resistance of switching, with the continuous adjustable characteristics. For active electronic load, can effectively improve the input characteristics, avoid inverter circuit effect the load linear characteristics. This method can be used in all kinds of constant voltage, constant current, the constant resistance and constant power properties of passive electronic load and active electronic load circuits.

Keyword: electric load; capacitor buffer; linear

基于电容缓冲的线性直流电子负载设计方法

林　欣，周长林，余道杰，杨青杰。
信息工程大学理学院电子系，　郑州，中国，　450002

摘　要: 本文提出一种基于电容缓冲的大功率线性直流电子负载电路设计方法。针对目前的直流无源电子负载和有源电子负载中存在的缺陷，本方法通过电容缓冲作用，对于无源电子负载，可以有效地降低用于线性调节的功率器件的功耗，免除耗能电阻的切换，具有实验范围连续可调的特点。对于有源电子负载，可以有效地改善其输入特性，避免逆变开关对负载线性特性的影响。本方法可用于各种恒压、恒流、恒阻及恒功率性质的无源、有源电子负载电路中。

关键词: 电子负载；电容缓冲；线性

1. 引言

直流电子负载是用于对直流电源、蓄电池、功率器件以及某些功率电路等被测设备的性能进行测试的重要装置，可分为无源电子负载和有源电子负载两大类。

无源电子负载利用功率器件的线性工作方式，可使负载电路表现出良好的恒压、恒流、恒阻及恒功率等负载特性，具有平稳、线性度好、电路简单等特点，目前在电子负载产品中占有重要的地位。但无源电子负载是通过自身器件的功率损耗完成对被测设备性能测试的，由于功率器件的耗散功率有限，在构成大功率负载时，需要串接适当阻值的大功率电阻来分担大部分的功耗。这种模式使无源电子负载在负载性能连续进行调节时，需要不断以切换方式调节大功率电阻的阻值，以保证由功率器件所承担的功耗在其承受范围内，使电路的设计增加了难度[1][2]。

有源电子负载则是将被测设备输入的直流电能逆变为交流电并回馈至交流电网，实现对被测设备的性能测试。有源电子负载具有功率损耗低，装置体积小等特点。但有源电子负载的电能逆变是以功率器件的 PWM 开关动作来实现的，电路入口处往往还配置有大电容或大电感，对被测设备而言，负载的线性程度和平稳性均存在缺陷[3][4]。

针对目前直流无源电子负载和有源电子负载中存在的缺陷，本文提出基于电容缓冲的大功率线性直流电子负载电路设计方法。此方法充分利用线性工作方式的功率器件，对于无源电子负载，保证负载电路的负载平稳性及线性度，同时，通过电容缓冲作用，可使被测设备输入的直流电能大部分消耗在大功率电阻上，有效地降低功率器件的功耗。对于有源电子负载，线性工作方式的功率器件保证了电子负载的负载平稳性及线性度，而缓冲电容与功率开关器件共同构成了电压型 PWM 逆变电路[5]，能有效地将电能回馈交流电网。

2. 无源电子负载的功耗分配形式

无源电子负载的原理电路，如图 1 所示。

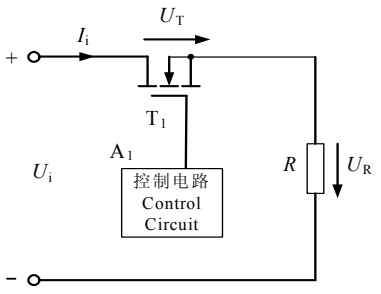

图 1. 无源电子负载原理电路

Figure 1. Passive electronic load principle circuit

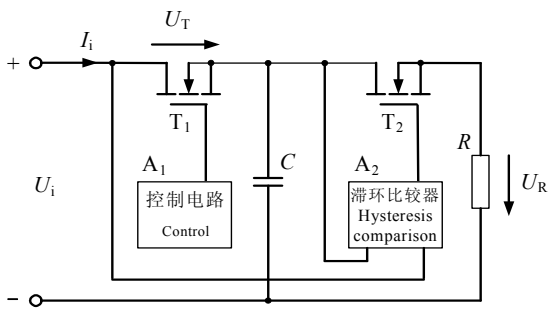

图 3. 电容缓冲的无源电子负载

Figure 2. Capacitance buffer passive electronic load

电路中，功率晶体管 T1 工作于线性工作方式，实现恒压、恒流、恒阻及恒功率等负载特性，并可根据被测设备的要求，调节电子负载的功能参数。大功率电阻 R 用于降低 T1 的功耗，消耗从被测设备接收的电功率。由电路形式有

$$U_T = U_i - U_R = U_i - I_i R \tag{1-1}$$

$$P_T = U_T I_i = U_i I_i - I_i^2 R \tag{1-2}$$

当大功率电阻 R 的阻值选择适当时，可使输入电压 Ui 的大部分压降作用在电阻 R 上，功率晶体管 T1 的管压降 UT 相对较低，自身功耗 PT 处于器件的最大耗散功率范围之内。然而，在电子负载按测试要求进行参数调节时，由于输入电流 Ii 的变化，功率晶体管 T1 的自身功耗 PT 也将随之变化。此变化中 PT 的极大值为

$$\frac{dP_T}{dI_i} = U_i - 2I_i R$$

令：$\frac{dP_T}{dI_i} = 0$

可得 P_T 的最大值出现于 $I_i = \frac{U_i}{2R}$ 时，此时电子负载的等效阻抗为 $2R$，功率晶体管 T 的管压降 U_T 与大功率电阻 R 的压降 U_R 相等，二者的功耗也相等，为

$$P_{Tmax} = P_R = \frac{U_i^2}{4R} \tag{1-3}$$

如果将功率晶体管 T_1 的自身功耗能力设计为 P_{Tmax}，势必增加电路成本。因此，一般无源电子负载均采用切换大功率电阻 R 的阻值，避免功率晶体管 T_1 的自身功耗 P_T 达到极大值的方法。由于涉及大功率电阻的切换，就使大功率无源电子负载的测量参数调节比较困难。

3. 采用电容缓冲方法后的功耗分配形式

基于电容缓冲的大功率无源电子负载的原理电路如图 2 所示。

电容 C、以开关方式工作的功率 MOSFET 管 T_2 以及滞环电压比较器 A_2 构成了电容缓冲电路，用于降低线性工作方式的调整管 T_1 的功耗。电阻 R 用于消耗从被测设备接收的电功率。

设电子负载的最大测试电流为 I_{imax}，功率 MOSFET 管 T1 在进入可调电阻区后，等效电阻为 RT，则应选择 T_1 在线性调节时的最小管压降 UTmin 等于 IimaxRT，故滞环电压比较器 A_2 应设置为：滞环下限电压 $V_-=U_{Tmin}$，滞环上限电压 $V_+= U_{Tmin} +\Delta V=U_{Tmax}$，$\Delta V$ 为滞环电压比较器的回差电压，可选择为 1~2V。

电路工作时，功率 MOSFET 管 T1 以线性方式控制输入的电流 I_i，此电流充入电容 C。当 $U_T \le V_-=U_{Tmin}$ 时，T_2 以开关方式导通，经大功率电阻 R 使电容 C 放电，u_C 下降，U_T 增大。当 U_T 上升降至 $V_+=U_{Tmax}$ 时，T_2 关闭，输入电流 I_i 使 u_C 上升，U_T 减小。由此可见，在电路工作时，功率 MOSFET 管 T1 上的电压降在 U_{Tmin}~ U_{Tmax} 之间变化，平均电压降

$$U_{Tave} = U_{Tmin} + \Delta V/2 \tag{2-1}$$

在负载电路的测量参数进行调节时，由于滞环电压比较器的上下限电压不变，T_1 管的平均电压降 U_{Tave} 是不变的，因此，T_1 管的最大功耗出现于输入电流 $I_i=I_{imax}$ 时，为

$$P_{Tmax} = I_{imax} U_{Tave} = I_{imax}(U_{Tmin} + \Delta V/2) \tag{2-2}$$

为比较有、无电容缓冲电路时，无源负载电路中功率 MOSFET 管 T_1 功耗的差别，可设无电容缓冲电路功率 MOSFET 管 T_1 与有电容缓冲电路的 T_1 管型号相同，则二者在输入电流 $I_i=I_{imax}$ 时，作用在管子上的最小压降 U_{Tmin} 相同，则图 1 电路中的电阻 R 应选择为

$$R = \frac{U_i - U_{Tmin}}{I_{imax}} \tag{2-3}$$

978-1-935068-04-4 © 2009 SciRes.

于是，无电容缓冲电路的无源负载电路中，功率 MOSFET 管 T_1 的最大功耗为

$$P_{\mathrm{Tmax}}=\frac{U_{\mathrm{i}}^{2}}{4R}=\frac{U_{\mathrm{i}}^{2}I_{\mathrm{imax}}}{4(U_{\mathrm{i}}-U_{\mathrm{Tmin}})} \tag{2-4}$$

功率 MOSFET 管 T_1 在充分开通情况下等效电阻 R_T 很小，故 T_1 管的电压降 U_{Tmin} 很低，可忽略此压降。于是，式(2-2)变化为

$$P_{\mathrm{Tmax}}=I_{\mathrm{imax}}\Delta V/2 \tag{2-5}$$

式(2-4)变化为

$$P_{\mathrm{Tmax}}=\frac{U_{\mathrm{i}}I_{\mathrm{imax}}}{4} \tag{2-6}$$

比较式(2-5)和式(2-6)，因

$$\Delta V \ll U_{\mathrm{i}}/2 \tag{2-7}$$

故采用电容缓冲电路后，功率 MOSFET 管 T_1 功耗远低于无电容缓冲电路时的功耗。由此可见，采用电容缓冲电路可以有效地降低线性工作的功率 MOSFET 管 T_1 的功耗。

4. 电容缓冲方法在有源负载电路中的应用

电容缓冲方式的有源负载电路如图 3 所示。

线性工作的功率 MOSFET 管 T_1 和缓冲电容 C 作为负载电路的前级，这使得此电子负载的线性和可调性与无源电子负载是一致的，后级逆变电路的开关动作并不能影响至前级。同时，缓冲电容 C 与 IGBT 功率开关构成了电压型 PWM 方式逆变电路，将被测设备输入的直流逆变为交流电压 u_o 回馈电网。此电路中，IGBT 管的通断动作即代替了图 2 电路中开关管 T_2 的作用，但通过 IGBT 管的有序动作，将缓冲电容 C 上的电能以逆变形式回馈电网，使电子负载具备了能量再生的特性。

5. 结论

由以上分析可见，基于电容缓冲的大功率线性直流电子负载电路设计方法对于大功率无源电子负载和有源电子负载的设计均有重要的作用。通过电容缓冲作用，可在保证电子负载表现出良好的恒压、恒流、恒阻及恒功率等负载特性的同时，大大降低前级线性工作的功率器件的功耗，实现无需进行耗能电阻切换的大功率无源电子负载，这将会使大功率无源电子负载的连续调节性能大大改善。对于有源电子负载电路，通过前级线性工作方式的功率器件，可大大改善电子负载的平稳性及线性度，使其线性和可调性与无源电子负载是一致的。而缓冲电容又作为逆变电路的一部分，直接参与逆变电路对电能的逆变和回馈电网。

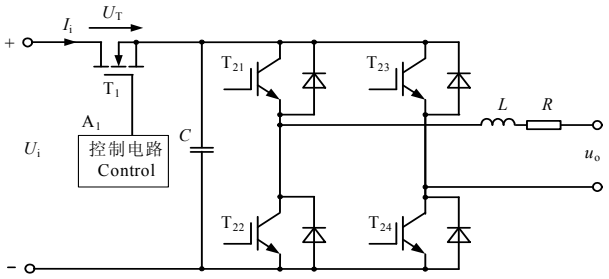

图 3 有源电子负载原理电路

Figure 3. The principle circuit of active electronic load

References（参考文献）

[1] Yang Changan, Wang Wei,Zhao Liang，et al. Experimental Research of CC E-load Based on Feedback Control[J]. Modern Electronics Technique. 2006,229(14):127-128(in Chinese).
杨长安,王蔚,赵亮等. 基于反馈控制的恒流型电子负载的实验研究[J]. 现代电子技术.2006,229(14).127-128.

[2] Gao Jiaying, Gao Yufeng, Liu Ya long.Research of Constant-current Discharge Equipment with New Type Electronic Load[J]. Power Supply Technologies and Applications. 2007,10(8). 48-51(in Chinese).
高嘉英，高玉峰，刘亚龙. 基于新型电子负载恒流放电设备的研究[J]. 电源技术应用.2007,10(8):48-51.

[3] Wang Chengzhi，Zou Xudong，Chen pengyun，et al. Design and Improvement on the Grid Connection Converter of Power Electronic Load [J]. Proceedings of the CSEE，2009,29(18):1-7 (in Chinese).
王成智，邹旭东，陈鹏云等.大功率电力电子负载并网变换器的设计与改进[J] . 中国电机工程学报.2009,29(18).1-7.

[4] Li Xianfeng,Wang Ziqiang.The Study of Digital Control for Energy Recycling DC Electronic Load[J].Power Electronics, 2008,(4): 16-20(in Chinese).
李先峰，王自强. 馈能型直流电子负载数字化控制的研究[J]. 电力电子. 2008(4):16-20.

[5] 林欣. 功率电子技术[M]. 北京:清华大学出版社. 2009. 296-301.