

一种新型高频荧光灯管模型

Thomas J. Ribarich and John J. Ribarich

李志刚 译

摘要: 该模型是对工作在高频下的荧光灯非线性电阻描述的最新发展。为了简化荧光灯输出级非线性微分方程的解，我们以实际的灯管数据进行抛物线拟合，也可以使用椭圆形灯电流模型进行灯管的波形分析，使之最优化。

I. 引言

许多模型描述了工作在高频下的荧光灯的电阻，包括线性值和三次近似值。其线性值或电阻值，近似给出如下：

$$v = iR \quad (1)$$

式中，

v = 灯管瞬态电压 [Volts]

i = 灯管瞬态电流 [Amperes]

这种模型简单易用，但精度受到限制。

三次模型给出如下：

$$v = Ai + Bi^3 \quad (2)$$

这种模型接近实际，但比较复杂。近似值简单精确。本文的焦点集中在简单精确的抛物线模型上，求解非线性微分方程并提出获取镇流器设计参数的快捷方法，包括抛物线模型、最优灯管波形分析、非线性微分方程以及与线性解的比较。

II. 抛物线模型

抛物线函数模拟非线性灯管电阻的公式如下：

$$v = ki^2 \quad (3)$$

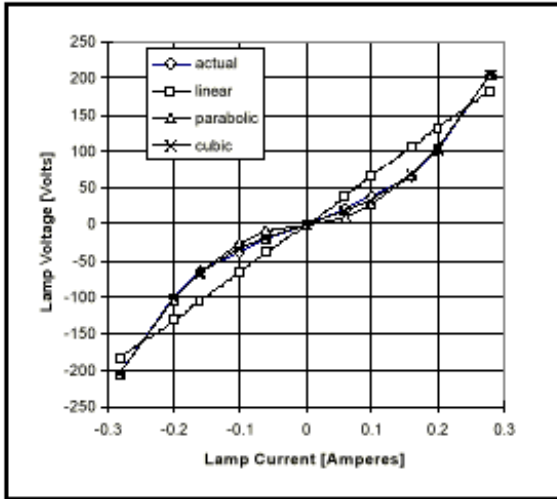


Figure 1, Non-linear lamp resistance and fitted models for T8/32W lamp type running at 50kHz (Plamp=30W, R=656 Ohms, k=2615, A=278, B=5740).

工作在高频下的荧光灯灯管电压和电流按线性，三次和抛物线模型测量，如图1所示。

抛物线模型非常适合v-i曲线的大电流范围，大部分功率被灯管消耗。三次模型对小电流呈线性，不能预知当电流增加时，其实际电压急剧增加。对于抛物线模型，电压急剧增加，更适于大电流场合，其谐波较大。总之，抛物线模型并不逊于三次模型，而且易于使用。

III. 最优灯管波形

抛物线模型用于计算各种灯管参数，如波峰系数，峰值电压和峰值电流，电压谐波和电流谐波，以及功率。灯管电流波形如下：

$$I = I_m \quad (\text{pulse}) \quad (4)$$

$$I = I_m \sin^2 wt \quad (\text{sine-squared}) \quad (5)$$

$$I = 4I_m ft \quad (\text{triangle}) \quad (6)$$

$$I = I_m \sin wt \quad (\text{sinewave}) \quad (7)$$

$$I = 2I_m \sqrt{ft} \quad (\text{parabola}) \quad (8)$$

$$I = I_m \sqrt{1-16f^2 t^2} \quad (\text{ellipse}) \quad (9)$$

$$I = I_m \quad (\text{rectangle}) \quad (10)$$

式中，

$$I_m = \text{灯管电流振幅 [Amperes]}$$

为了寻找驱动灯管的最优值，波形由高窄的脉冲转变成短宽的矩形。以纯正弦形电流驱动灯管，其灯管电压和功率如下，

$$V = ki^2 = kI_m^2 \sin^2 \omega t \quad (11)$$

$$P = \frac{4}{3\pi} kI_m^3 \quad (12)$$

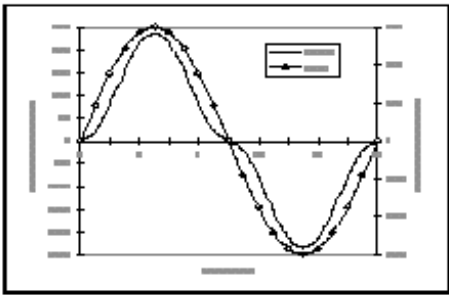


Figure 2. Sinewave lamp current and predicted lamp voltage for T8/32W lamp type running at 50kHz.

图2，灯管电压有零交叉失真，并随电流增加而急剧增加，产生较高的电压谐波，电流波峰系数减少，延长灯管寿命，峰值电流最大值降低，提高镇流器输出级效率。因此，正弦形灯电流并非最优值。

以三角形电流驱动灯管，其灯电压和功率如下，

$$V = ki^2 = 16kI_m^2 f^2 t^2 \quad (13)$$

$$P = \frac{1}{4} kI_m^3 \quad (14)$$

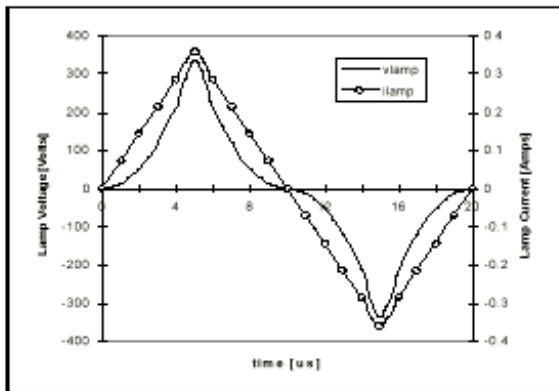


Figure 3. Triangular lamp current and predicted lamp voltage for T8/32W lamp type running at 50kHz.

图3，峰值电流和谐波比正弦形的高，脉冲变坏。

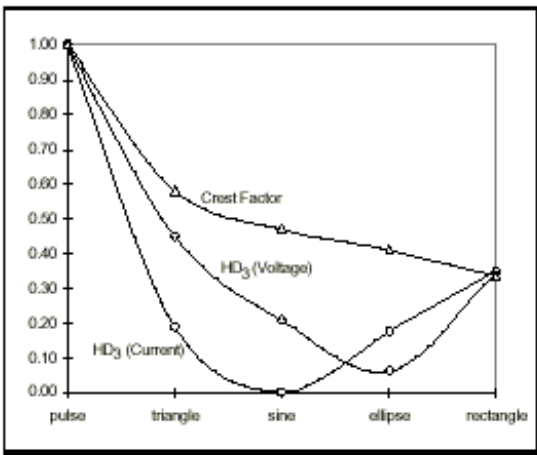


Figure 4, Optimum lamp waveform analysis summary for T8/32W lamp type.

波峰系数等于1.0时，灯电流最小，电压谐波和电流谐波较高，因此，方波也不是最优值。为了更好地选择最优值，应使每个波形的结果规范化，如图4所示。

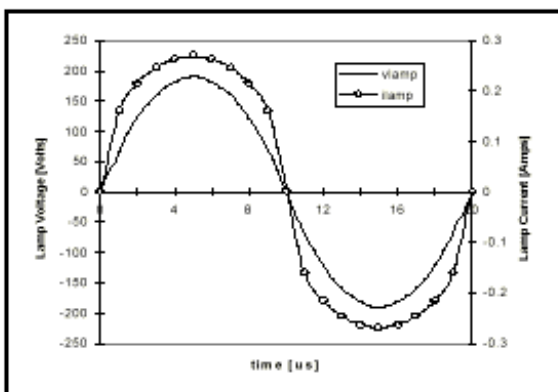


Figure 5, Elliptical lamp current and predicted lamp voltage for T8/32W lamp type running at 50kHz.

图5，椭圆形是最佳的波峰系数波形，由于灯电压更接近正弦形，其峰值电流和电压谐波较低。

IV. 非线性解

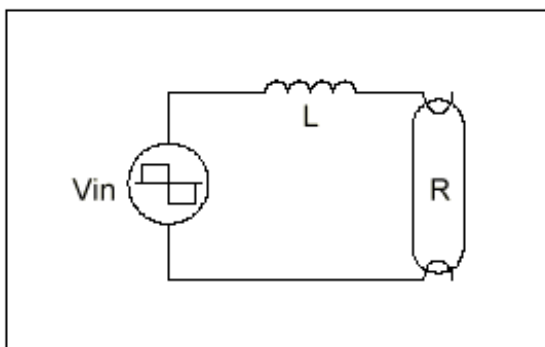


Figure 6, Series L-lamp output stage

抛物线模型描述了不同的荧光灯输出级非线性微分方程的解。典型的输出级由电感L与灯管串联而成（图6）。

假设灯管已经点亮，运行于正常功率下，根据该模型，非线性微分方程结果如下：

$$L \frac{di}{dt} + ki^2 = V_{in} \quad (15)$$

存在解

$$i(t) = \sqrt{\frac{V_{in}}{k} \tanh\left(\frac{\sqrt{k} V_{in}}{L}\right)} \quad (16)$$

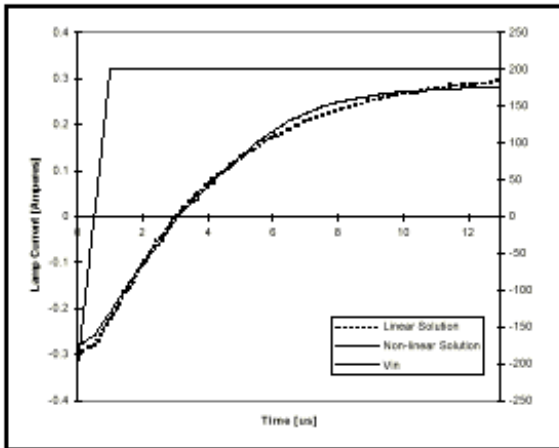


Figure 7, Linear and non-linear solutions for the series L-Lamp output stage. Lamp type: T8/32W

图7画出了处于稳态过程1/2周期的灯电流的线性和非线性解。从图中可以看出，非线性解相对于线性解急剧上升，峰值电流较低，同时也可以看出脉冲的差别。对于给定的灯管功率，非线性解将导致较高的工作频率。

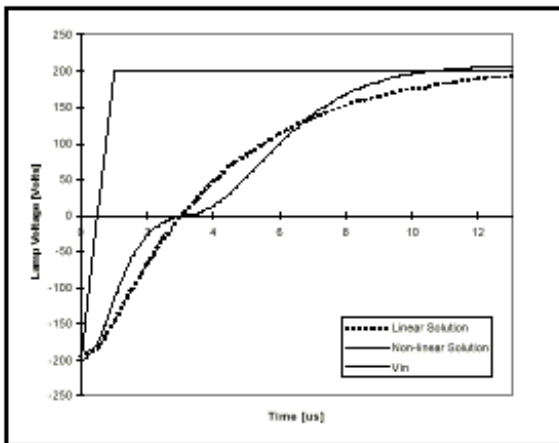


Figure 8, Linear and non-linear solutions for the series L-Lamp output stage. Lamp type: T8/32W

灯电压如图8所示，由于存在非线性灯管电阻，其峰值电压较高，谐波较大。

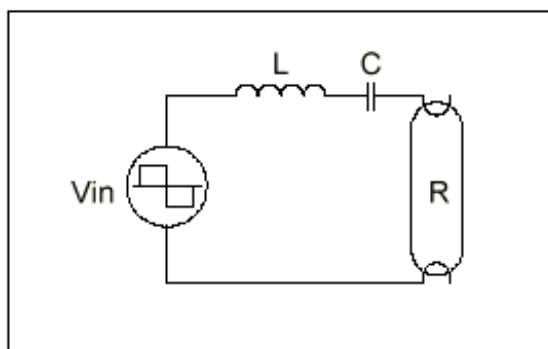


Figure 9, Series L-C-lamp output stage

另一种常见的输出级是L-C-Lamp串联结构(图9)。

三次模型是非线性微分方程，结果如下：

$$L \frac{di}{dt} + Ai + Bi^3 + \frac{1}{c} \int i dt = V_{in} \quad (17)$$

解决办法不是众所周知的Rayleigh/Van der Pol方程，而是抛物线模型，其非线性微分方程和求解结果如下，

$$L \frac{di}{dt} + ki^2 + \frac{1}{c} \int i dt = V_{in} \quad (18)$$

$$V_{in} = L \frac{di}{dt} + ki^2 + \frac{L}{2kC} \ln \left(\frac{\frac{2kV_{in}C}{L} + 1}{2kC \frac{di}{dt} + 1} \right) \quad (19)$$

或，

$$i^2 = \frac{1}{k} \left[-\frac{q}{C} + \left(V_{in} + \frac{L}{2kC} \right) \left(1 - e^{-\frac{2k}{L}q} \right) \right] \quad (20)$$

式中，

q=电容器C存储的电荷

这是最新的求解方法，从未有人用过。根据公式(18), (20)和基本电路分析，电感器电流和灯电压按线性和非线性解绘出(图10和11)。从图中可以看出，峰值电流略有不同，相位差可以忽略不计。灯电压的解表明，峰值电压和谐波较高。

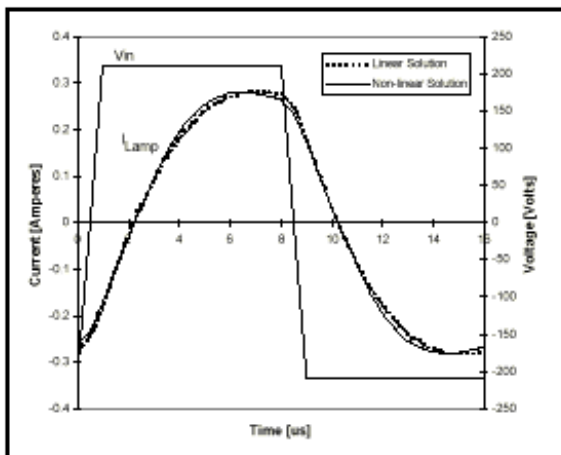


Figure 10, Linear and non-linear solutions for the Series L-C-lamp output stage. Lamp type: T8/32W

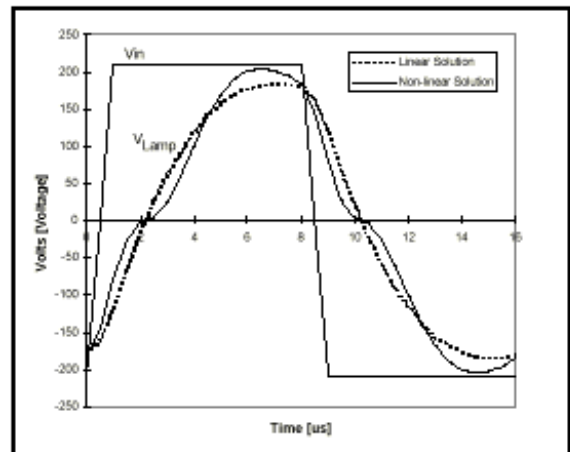


Figure 11, Linear and non-linear solutions for the Series L-C-lamp output stage. Lamp type: T8/32W

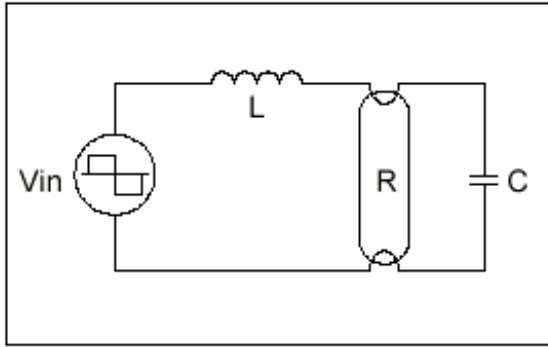


Figure 12, Series-L parallel lamp-C output stage

传统的输出级由一个与灯管串联的电感和与灯管并联的电容组成，如图12。

如图13、14和15，数学的求解方法出现一些有趣的计算结果。由于存在非线性解，电容器电流出现“过冲”（图

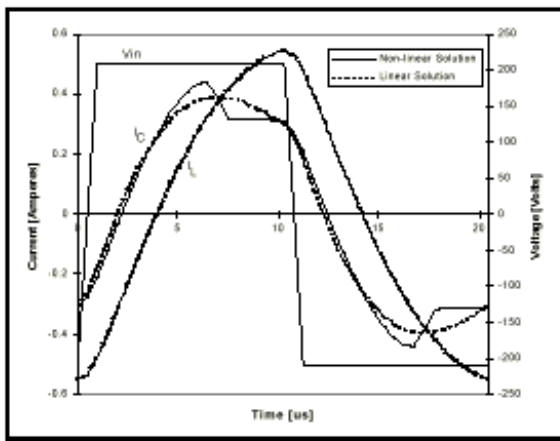


Figure 13, Linear and non-linear solutions for the series-L parallel Lamp-C output stage. Lamp type: T8/32W

13)。这是由于灯管电流趋近零时，非线性灯管电阻降低的缘故。灯管电阻降低，电容器电流增加，因而在灯管电流接近零时急剧增加。对于给定的灯管功率，将导致非线性灯管电流的峰值比线性解更低。图5预期的结果是，椭圆形灯电流将使灯管电压进一步接近正弦形。

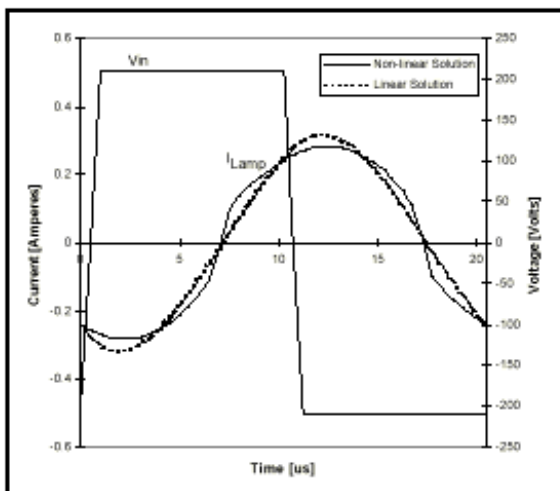


Figure 14, Linear and non-linear solutions for the series-L parallel Lamp-C output stage. Lamp type: T8/32W

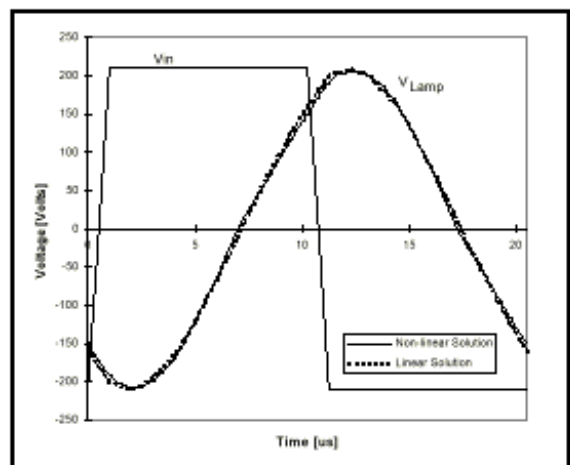


Figure 15, Linear and non-linear solutions for the series-L parallel Lamp-C output stage. Lamp type: T8/32W

V. 结论

抛物线模型简单精确，使灯管波形分析大大简化，同时也提出了非线性微分方程新的求解方法，减少镇流器的设计时间。未来的改进将使模型扩展到调光，将 k 改为灯管功率的函数。

（译者注：用计算机来仿真电子电路，在发达国家早已获得广泛应用，但是，对电子镇流器的仿真遇到了荧光灯管模型的难点，成为当今世界的专家、学者和厂商关注研究的热点。）

于深圳 2000年10月1日

REFERENCES

- [1] U. Mader and P. Horn, "A Dynamic Model for the Electrical Characteristics of Fluorescent Lamps", IEEE IAS 1992, pp. 1928-1934
- [2] S.L. Salas and Einar Hille, "Calculus: One and Several Variables", John Wiley and Sons, Canada, 1982.
- [3] T. Ribarich, J. Ribarich, "A New Model for High-Frequency Ballast Design", in IEEE-IAS *Conf. Rec.*, 1997, pp. 2334-2339.
- [4] T. Ribarich, J. Ribarich, "A New Control Method for Dimmable High-Frequency Electronic Ballasts", in IEEE-IAS *Conf. Rec.*, 1998.