

文章编号:1007-2780(2010)01-0040-09

真空荧光显示器亮度特性的研究

张建平¹, 赵 威², 戴咏夏¹

(1. 上海电力学院 能源与环境工程学院, 上海 200090, E-mail:jpzhanglzu@163.com;

2. 上海工商外国语学院 计算机系, 上海 201300)

摘 要: 为了确定真空荧光显示器(Vacuum Fluorescent Display, VFD)亮度特性(灯丝发射电流、电流分配系数、发光效率和亮度)与阳极电压的关系, 缩短开发时间并提高新品开发的成功率, 选取 8 种常见颜色荧光粉制作了 8 种型号的 VFD 实验样品, 实测每个步长阳极电压下的灯丝发射电流、阳极电流以及亮度数据, 利用最小二乘法得到了灯丝发射电流随阳极电压变化的关系, 采用右逼近法分别给出了电流分配系数及发光效率的威布尔拟合公式, 最终确定了亮度随阳极电压变化的计算表达式。研究结果表明, 实验设计方案切实可行, 灯丝发射电流、电流分配系数及发光效率随阳极电压变化的拟合公式精确度很高, 亮度的计算值与实验值相比误差很小, 便于在设计之初只需根据阳极电压设计值就能够获得 VFD 的亮度特性, 为 VFD 的结构优化设计提供重要的理论依据和技术参考。

关 键 词: 真空荧光显示; 亮度特性; 阳极电压; 右逼近法; 威布尔分布

中图分类号: TN141 **文献标识码:** A

Research on Luminance Characteristics of VFD

ZHANG Jian-ping¹, ZHAO Wei², DAI Yong-xia¹

(1. School of Thermal Power and Environmental Engineering, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China, E-mail:jpzhanglzu@163.com;

2. Department of Computers, Shanghai Industry and Commerce Foreign Language College, Shanghai 201300, China)

Abstract : In order to determine the relationship between luminance characteristics (filament emission current, current distributive coefficient, luminous efficiency and luminance) and anode voltage for Vacuum Fluorescent Display(VFD), shorten developing time and improve successful rate of new product development, eight types of VFD produced by fluorescent phosphors of eight colors were used as test samples, and the filament emission current, the anode voltage and the luminance were measured under each step of anode voltage. The calculating formula between the luminance and the anode voltage for VFD was achieved by applying least square method (LSM) to fitting the relationship between the filament emission current and the anode voltage, and right approximation method to calculate Weibull fitting formulae of the current distributive coefficient and the luminous efficiency. The research results demonstrate that test design scheme is correct and feasible, that the fitting formulae of the filament emission current, the current distributive coefficient and the luminous efficiency have very high accuracy, and that the calculated luminance has less error than the experimental one. It would not only determine luminance characteristics based on the designed value of

收稿日期: 2008-12-31; 修订日期: 2009-01-16

基金项目: 上海市自然科学基金项目(No. 09ZR1413000); 上海市高等学校本科教育高地建设项目; 上海市科委重点科技攻关计划项目(No. 08160510600)

作者简介: 张建平(1972—), 男, 江苏南京人, 副教授, 博士后, 从事电子器件特性分析、电力系统中力学行为分析的研究。

anode voltage at the beginning of VFD design very conveniently, but also provide significant theoretical foundation and technical guidance for VFD structural optimization design.

Key words: vacuum fluorescent display; luminance characteristics; anode voltage; right approximation method; Weibull distribution

1 引 言

真空荧光显示器(Vacuum Fluorescent Display, VFD)是一种从真空电子管发展而来的主动发光显示器件,具有亮度高、多色彩显示、体积小和寿命长等特点,广泛应用于录像机、高档音响、电子衡器、商用收款机、微波炉、汽车等各类商品及工业上的仪器仪表等方面^[1,2]。典型的 VFD 是三极结构,由直热式阴极、网状栅极和表面涂覆有荧光粉的阳极构成,所有的零件置于密封的真空玻璃容器内^[3]。VFD 阴极发射电子的能力和发光效率的高低是影响器件性能和发展应用的两个重要因素,为了开发低功耗、高亮度的 VFD 产品,需要对其阳极电流、发光效率和亮度等特性进行精确的测量和计算。

目前对于显示器件的亮度特性已有一些实验与研究。王元庆^[4]通过实验研究了 TFT-LCD 背光源中冷阴极荧光灯(CCFL)的发光亮度和发光效率特性,设计出高效率背光模块,使得 CCFL 发出最大的光亮度,从而实现了 CCFL 高效率驱动的目的;赵守珍等^[5]测量了光电平板显示器荧光屏发光亮度随激发电流、激发电压的变化,研制了激发电压较低、发光亮度较高的荧光粉,并将其应用于所研制的光电平板显示器中;侯建国等^[6]对高亮度白光发光二极管(HB-WLED)不同驱动方式下的亮度数据进行了分析,比较了直流调制和脉冲调制对 HB-WLED 发光情况的影响,得出了不同驱动方式下 HB-WLED 发光的特点以及影响其发光亮度的因素;管世振等^[7]测量了橙黄色陶瓷厚膜电致发光器件(CTFEL)的电致发光光谱,研究了 CTFEL 的亮度-电压、效率-电压等特性。但是由于 VFD 亮度特性的测试参量较多、测试过程比较复杂,加之亮度和阳极电压的关系难以确定,到目前为止还未曾见到有关 VFD 亮度特性测量和计算的研究报道。

本文选取由 8 种常见颜色荧光粉制作的 8 种型号 VFD 作为实验样品进行亮度特性实验,实

测其灯丝发射电流、阳极电流以及亮度,建立了 VFD 亮度特性的基本算法模型,通过采用最小二乘法和右逼近法对灯丝发射电流、电流分配系数及发光效率随阳极电压的变化进行了拟合,并且确定了 VFD 亮度随阳极电压变化的计算表达式,使得今后在生产实际中,不需测得灯丝发射电流、阳极电流及亮度便可计算出 VFD 的亮度特性,为 VFD 生产厂商和技术人员提供了一种使用简便、计算精确的亮度特性确定方法。

2 实 验

2.1 实验样品的选取

对于 VFD 亮度特性计算的实验样品选取有以下要求:

- (1)实验样品必须具有典型的代表性;
- (2)生产工艺比较稳定;
- (3)在生产线上流转量比较大。

目前 VFD 常用的荧光粉主要有 8 种颜色,分别为绿粉、白粉、红粉、蓝粉、草绿粉、桔红粉、桔黄粉和淡黄粉。结合 VFD 的实际生产情况,最后确定选取 20-0704N(8 种颜色粉)、25-1217FN(B)(绿粉)、40-1506(蓝粉)、20-0906F(A)(白粉)、25-0638(蓝粉)、25-0709(绿粉)、33-1211FN(B)(白粉)和 40-1004NA(绿粉)共 8 个型号的荧光粉分别制作实验样品。

2.2 实验产品参数的测量

计算 VFD 的亮度特性需要知道灯丝发射电流、电流分配系数、栅极电流、阳极电流和亮度等指标,主要用到以下参数:阳极面积、栅极面积、发光面积、阴极栅极间距、阳极电压、栅极电压、占空比以及发光效率。阳极电压、栅极电压、占空比可采用产品的设计值,不需要测量。阳极面积、栅极面积、发光面积可以利用设计图纸文件和 CAD 软件中的面积计算命令得到。由于阴极栅极间距的实际值与它们对应设计值之间的差异较大,实验中利用三维测厚仪对每个样品亮度测试位所对应的栅网和灯丝的高度分别从左中右三端进行测

量,然后取平均作为该样品的测量值。在 VFD 测试仪上,按照产品检验规范条件,测量每个样品的光电参数,具体包括灯丝发射电流、栅极电流、阳极电流和亮度,并将实测值取平均后作为该批样品的测量值。发光效率可以通过阳极电流和亮度的测量值,结合阳极电压、占空比和发光面积计算得出。

2.3 实验所需的仪器设备

根据实验需要测量的参数,主要的仪器设备有:电脑测试仪(选取实验样品时进行 IK 实验);三维测厚仪(测试产品各电极间的距离);亮度计(BM-5a,精度为 1 cd/m^2 ,校准受光素子倍率来测试亮度);VFD 光电参数测试仪(测量阳极电流、栅极电流和亮度等光电参数);示波器(确定产品的阳极电压、栅极电压、脉宽和占空比);数字电压表(确定产品两端灯丝的实际电压)。

2.4 实验步骤

(1)确定实验样品型号,每个型号样品各取 50 只;

(2)用电脑测试仪对各样品进行 IK(灯丝发射电流)实验,选取 IK 较好的样品,然后在 VFD 测试仪上对这些样品进行亮度测试,选取亮度接近平均亮度的样品作为实验样品(每种样品 30 只,其中 20 只作为实验样品用,10 只备用),以确保实验结果的准确性(每个型号剩余 20 只样品退还给仓库);

(3)选好实验样品后,对各个样品进行编号;

(4)用三维测厚仪测量各个实验样品的灯丝和栅网的高度;

(5)利用 CAD 软件计算出所需的发光面积;

(6)采用亮度计校准每批样品所使用的受光素子倍率;

(7)在 VFD 测试仪上,按照产品检验规范条件,测量每个样品的阳极电流、栅极电流和亮度等光电参数。

3 基本算法模型

3.1 伏安特性

灯丝发射电流 I_k 分为阳极电流 I_b 和栅极电流 I_c 两部分,令 $I_c/I_b=d$,则阳、栅极电流可表示为:

$$I_b = \frac{1}{1+d} I_k, I_c = \frac{d}{1+d} I_k \quad (1)$$

式中: d 为电流分配系数,是由电极结构和尺寸以

及栅极(栅网)的开口率决定的常数。

3.2 灯丝发射电流及其系数计算公式的确定方法

通过对每种 VFD 型号的实验数据(E_b^n/d_{cg}^2 , I_k)进行观察后可知, I_k 与 E_b^n/d_{cg}^2 基本呈线性关系,这说明了灯丝发射电流系数 C_k 对于每种型号是一个常数。因此,设 I_k 与 E_b^n/d_{cg}^2 满足公式(2):

$$I_k = C_k \times \frac{E_b^n}{d_{cg}^2} + C_b \quad (2)$$

式中, C_k 是与阴极的表面积及质量有关,决定于电极结构的常数; C_b 为灯丝发射电流 I_k 的修正系数; d_{cg} 表示灯丝阴极到栅极间的距离,是影响电气特性的最大因素,一般 d_{cg} 设计得小时必须增加灯丝的根数,这将导致消耗功率的增加; $n=1.5 \sim 2.0$,其理论值为 $n=1.5$,实验值为 $n=1.7$ 。

若令:

$$I_k = y, E_b^{1.7}/d_{cg}^2 = x, C_k = A, C_b = B \quad (3)$$

则由式(2)和(3)可得到以下线性关系式:

$$y = A \cdot x + B \quad (4)$$

因此,结合式(3)可以得到以下线性数据:

$$(E_{bi}^{1.7}/d_{cg}^2, I_{ki}) = (x_i + y_i) \quad (5)$$

式中, $i=1, \dots, N$ (N 为实验中所测阳极电压的个数)。

然后,对式(5)采用最小二乘法进行拟合^[8],便可确定参数 A 、 B 的值为:

$$A = \frac{\sum_{i=1}^N x_i y_i - (\sum_{i=1}^N x_i \cdot \sum_{i=1}^N y_i) / N}{\sum_{i=1}^N x_i^2 - (\sum_{i=1}^N x_i)^2 / N}$$

$$B = \sum_{i=1}^N y_i / N - A \sum_{i=1}^N x_i / N \quad (6)$$

由式(3)和(6),可以得到每种型号下 VFD 的灯丝发射电流系数 C_k 和修正系数 C_b 的估计值。

为了探究灯丝发射电流系数 C_k 与 VFD 相关参数的关系,对实验数据分析后不难发现,灯丝发射电流系数 C_k 确实与 $S_g \cdot d_{cg}^{0.25}$ 和 $S_a \cdot d_{cg}^{0.25}$ 有关系,具体如下:

$$C_k = \bar{A} \times (S_g \cdot d_{cg}^{0.25}) + \bar{B} \times (S_a \cdot d_{cg}^{0.25}) \quad (7)$$

式中, S_g 为 VFD 的栅极面积; S_a 为 VFD 的阳极面积。

将式(7)变换为:

$$\frac{C_k}{S_a \cdot d_{cg}^{0.25}} = \bar{A} \cdot \frac{S_g}{S_a} + \bar{B} \quad (8)$$

同样利用最小二乘法对式(8)进行拟合,求得

式(7)中的参数 $\bar{A}$ 和 $\bar{B}$ 的估计值。再将式(7)代入式(2),就可以得到灯丝发射电流 I_k 随阳极电压 E_b 变化的公式:

$$I_k = [\bar{A} \times (S_g \cdot d_{cg}^{0.25}) + \bar{B} \times (S_a \cdot d_{cg}^{0.25})] \times \frac{E_b^{1.7}}{d_{cg}^2} + \bar{C}_b = (\bar{A} \times S_g + \bar{B} \times S_a) \times E_b^{1.7} \times d_{cg}^{-1.75} + \bar{C}_b \quad (9)$$

式中, $\bar{C}_b$ 为各型号灯丝发射电流修正系数 C_b 的平均值。

3.3 电流分配系数计算公式的确定方法

对实验数据 $(S_g/S_a, d)$ 分析后不难发现,在相同阳极电压 E_b 时,不同型号 VFD 下的电流分配系数 d 与栅极、阳极面积之比 S_g/S_a 也基本呈线性关系。因此,设电流分配系数 d 与栅极、阳极面积之比 S_g/S_a 满足以下公式:

$$d = \tilde{A} \cdot S_g/S_a + \tilde{B} \quad (10)$$

采用最小二乘法对数据 $(S_g/S_a, d)$ 进行拟合,求出式(10)中参数 $\tilde{A}$ 和 $\tilde{B}$ 的估计值,进而就可以得到各阳极电压 E_b 下电流分配系数 d 的拟合公式。

通过对各阳极电压 E_b 下电流分配系数拟合公式中的参数 $\tilde{A}$ 和 $\tilde{B}$ 观察后不难发现:参数 $\tilde{A}$ 和 $\tilde{B}$ 分别随 E_b 的变化呈非线性递减和递增关系。由于威布尔分布含有的参数对各种类型试验数据的拟合能力强,设参数 $\tilde{A}$ 和 $\tilde{B}$ 随阳极电压 E_b 变化分别满足以下三参数威布尔分布^[9]:

$$\tilde{A} = \tilde{A}_0 \times \exp\left[-\left(\frac{E_b - E_{b0}}{\lambda}\right)^m\right] \quad (11)$$

$$\tilde{B} = C_1 - C_2 \exp\left[-\left(\frac{E_b - E_{b0}}{\lambda}\right)^m\right] \quad (12)$$

式中, $\tilde{A}_0$ 为参数 $\tilde{A}$ 的初始值; E_{b0} 为阳极电压 E_b 的初始值; $m, \tilde{m}$ 和 $\lambda, \tilde{\lambda}$ 分别为威布尔分布的形状参数和尺度参数。为了将式(12)化简成便于数值求解的非线性递减形式,令 $C_1 = -\tilde{B}_1 + \tilde{B}_N$, $C_2 = -2\tilde{B}_1 + \tilde{B}_N$ 。

采用右逼近法^[10]估计三参数威布尔分布式(11)中的 E_{b0} ,以便获得最佳的拟合效果。该方法具体描述如下:首先取 $E_{b01} = \min\{E_{bi}\}$ 为参数 E_{b0} 的初始值,做参数变换 $(E_{b0i} - E_{b01}, \tilde{A}_i)$,将三参数转化为二参数威布尔分布,用最小二乘法对数据点进行直线拟合,计算出相应的决定系数 R_k^2 ,然后选取步长 Δ ,从 $E_{b02} = E_{b01} - \Delta$, $E_{b03} = E_{b02} - \Delta, \dots, E_{b0(k-1)} - \Delta, \dots (k=1, 2, \dots, N)$ 开始下降,

从右逼近 E_{b0} (即 $E_{b0} \leq E_{b0k} \leq E_{b1}$),重复上述步骤,求出每次的决定系数 R_k^2 。最后,取 $R_{\max}^2 = \max\{R_k^2\}$,通过选择最大的 $R_{\max}^2$,就可以得到式(11)中的形状参数 m 和尺度参数 λ ,进而能够确定参数 $\tilde{A}$ 随阳极电压 E_b 变化的威布尔拟合公式。按照同样的方法,也可以确定式(12)参数 $\tilde{B}$ 随阳极电压 E_b 变化的表达式。

因此,结合式(10)、(11)和(12)可以得到各种型号 VFD 电流分配系数 d 随阳极电压 E_b 变化的统一计算公式:

$$d = \tilde{A}(E_b) \cdot S_g/S_a + \tilde{B}(E_b) \quad (13)$$

将式(9)和(13)代入式(1)便可得到阳极电流 I_b 随阳极电压 E_b 变化的表达式:

$$I_b = \frac{1}{1 + \tilde{A}(E_b) \cdot S_g/S_a + \tilde{B}(E_b)} \times [(\bar{A} \times S_g + \bar{B} \times S_a) \times E_b^{1.7} \times d_{cg}^{-1.75} + \bar{C}_b] \quad (14)$$

3.4 发光效率计算公式的确定方法

当测得 VFD 的亮度 L 和阳极电流 I_b 后,发光效率 η 可由以下基本算式进行计算,即:

$$\eta = 3.142 \times 10^{-3} \times \frac{L \cdot S_b}{E_b \cdot I_b \cdot D_u} \quad (15)$$

通过式(15)来计算发光效率,需要测量的参数较多且测量过程复杂。大量实验数据证实 VFD 发光效率 η 确实与阳极电压 E_b 有关,并呈现非线性递减的关系,此外,同一种颜色荧光粉会应用在不同型号的 VFD 中,也就是说,同一种荧光粉可以在不同阳极电压下工作;因此,需要确定 VFD 发光效率 η 随阳极电压 E_b 变化的关系式。设 VFD 发光效率 η 与阳极电压 E_b 的关系服从三参数威布尔分布,即:

$$\eta = \eta_0 \times \exp\left[-\left(\frac{E_b - E_{b0}}{\lambda}\right)^{\tilde{m}}\right] \quad (16)$$

式中, E_{b0} 为阳极电压 E_b 的初始值; η_0 为对应于 E_{b0} 通过式(15)计算得到发光效率 η 的初始值; $\tilde{m}$ 和 $\tilde{\lambda}$ 分别是威布尔分布的形状参数和尺度参数。

利用 3.3 中所述的右逼近法估计式(16)中的威布尔分布参数 $\tilde{m}$ 和 $\tilde{\lambda}$,进而能够确定发光效率 η 随阳极电压 E_b 变化的威布尔拟合公式。

3.5 VFD 亮度的计算公式

对式(14)进行变换,可以得到 VFD 亮度 L 的计算公式如下:

$$L = 3.183 \times 10^2 \times \frac{\eta \cdot E_b \cdot I_b \cdot D_n}{S_b} \quad (17)$$

将式(14)和(16)代入式(17),便可只需根据阳极电压来确定 VFD 的亮度。

4 实验结果与讨论

4.1 实验数据

选取 20-0704N(8 种颜色粉)、25-1217FN(B)(绿粉)、40-1506(蓝粉)、20-0906F(A)(白粉)、25-0638(蓝粉)、25-0709(绿粉)、33-1211FN(B)

表 1 25-1217FN(B)(绿粉)的栅极面积 S_g 、阳极面积 S_a 、阴极到栅极距离 d_{cg} 、发光面积 S_b 和占空比 D_u

Table 1 Grid area S_g , anode area S_a , distance between cathode and grid d_{cg} , luminescence area S_b and duty cycle of 25-1217FN(B)

产品型号	$S_g(\text{mm}^2)$	$S_a(\text{mm}^2)$	$d_{cg}(\text{mm})$	$S_b(\text{mm}^2)$	D_u
VFD25-1217FN(B)(绿粉)	57.698	23.707	0.983	9.788	1/13

表 2 不同阳极电压下测得的阳极电流 I_b 、栅极电流 I_c 、灯丝发射电流 I_k 和亮度 L

Table 2 Test data of anode current I_b , grid current I_c , filament emission current I_k and luminance L under different anode voltages

$E_b(\text{V})$	VFD25-1217FN(B)(绿粉)			
	$I_b(\text{mA})$	$I_c(\text{mA})$	$I_k(\text{mA})$	$L(\text{md} \cdot \text{m}^2)$
14.00	0.56	0.67	1.23	371.12
16.00	0.89	0.98	1.87	507.46
18.00	1.26	1.32	2.58	648.82
20.00	1.63	1.74	3.37	811.92
22.00	1.97	2.02	3.99	979.31
24.00	2.32	2.43	4.75	1 178.43
26.00	2.72	2.87	5.59	1 371.51
28.00	3.14	3.28	6.42	1 568.22
30.00	3.63	3.75	7.38	1 794.76
32.00	4.11	4.22	8.33	2 047.95
34.00	4.59	4.71	9.30	2 261.26
36.00	5.13	5.30	10.43	2 504.25
38.00	5.63	5.81	11.44	2 771.92
40.00	6.18	6.34	12.52	3 023.84
42.00	6.73	6.97	13.70	3 281.64
44.00	7.18	7.34	14.52	3 484.49
46.00	7.64	7.85	15.49	3 684.12

(白粉)和 40-1004NA(绿粉)共 8 个型号作为实验样品,分别测量了它们的阳极电流 I_b 、栅极电流 I_c 和亮度 L 。由于数据繁多,本文以 VFD 生产过程中较为常用的型号 25-1217FN(B)(绿粉)为例,表 1 给出了其栅极面积 S_g 、阳极面积 S_a 、阴极到栅极距离 d_{cg} 、发光面积 S_b 和占空比 D_u 的数值。不同阳极电压 E_b 下测得的阳极电流 I_b 、栅极电流 I_c 和亮度 L 如表 2 所示。

4.2 灯丝发射电流公式的确定

为了确定灯丝发射电流 I_k 及其系数 C_k ,对 VFD20-0704N(8 种颜色粉)、25-1217FN(B)(绿粉)、40-1506(蓝粉)在其阳极电压 E_b 的使用范围内(14~46 V)进行了栅极电流 I_c 、阳极电流 I_b 以及亮度 L 的测量,在此基础上,为了保证灯丝发射电流系数 C_k 的计算精度,还对型号 20-0906F(A)(白粉)、25-0638(蓝粉)和 33-1211FN(B)(白粉)进行了同样的实验数据测量。

按照 3.2 中所述,首先对上述 6 种 VFD 型号的实验数据($E_b^{1.7}/d_{cg}^2, I_k$)进行最小二乘拟合(其中对 20-0704N(8 种颜色粉)的数据取平均值),得到 6 种型号下 VFD 的灯丝发射电流系数 C_k 和修正系数 C_b 的估计值,如表 3 所示。25-1217FN(B)(绿粉)的灯丝发射电流 I_k 和 $E_b^{1.7}/d_{cg}^2$ 的拟合效果如图 1 所示,拟合的决定系数为 $R^2=0.998\ 8$,很接近于 1,就说明其拟合结果很好。

表 3 各型号的灯丝发射电流系数 C_k 和修正系数 C_b
Table 3 Coefficient of filament emission current and the correction coefficient of six VFD types

产品型号	$C_k(\text{mA} \cdot \text{mm}^2/\text{V})$	$C_b(\text{mA})$
20-0704N(8 种颜色粉取平均)	0.028 09	-0.943 6
25-1217FN(B)(绿粉)	0.024 02	-0.761 4
40-1506(蓝粉)	0.082 30	-1.632 7
20-0906F(A)(白粉)	0.026 78	-0.899 0
25-0638(蓝粉)	0.054 17	-1.335 0
33-1211FN(B)(白粉)	0.024 77	-1.098 6
平均值	—	-1.111 7

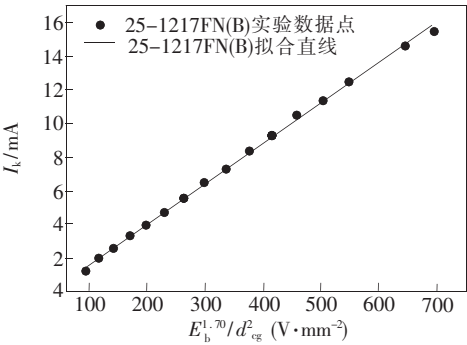


图 1 25-1217FN(B)(绿粉)灯丝发射电流 I_k 的拟合图
Fig. 1 Fitting curve of filament emission current I_k

再结合表 3 中的数据对 $[S_g/S_a, C_k/(S_a \cdot d_{cg}^{0.25})]$ 进行最小二乘拟合,求出式(7)中的参数 $\bar{A}=2.549\ 5\times 10^{-4}$, $\bar{B}=3.947\ 0\times 10^{-4}$,代入式(9)可以得到灯丝发射电流 I_k 随阳极电压 E_b 变化的公式:

$$I_k = 2.549\ 5 \times 10^{-4} \times d_{cg}^{-1.75} \times (S_g + 1.548\ 0 S_a) \times E_b^{1.7} - 1.111\ 7 \quad (18)$$

$C_k/(S_a \cdot d_{cg}^{0.25})$ 和 S_g/S_a 的拟合效果如图 2 所示,拟合曲线的决定系数为 $R^2=0.999\ 8$,很接近于 1,说明其拟合结果很好。

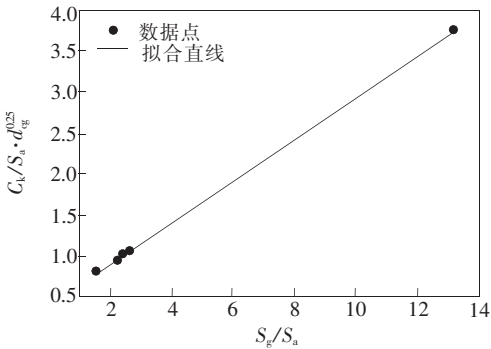


图 2 $C_k/(S_a \cdot d_{cg}^{0.25})$ 随 S_g/S_a 变化的拟合图
Fig. 2 Fitting curve of $C_k/(S_a \cdot d_{cg}^{0.25})$ vs S_g/S_a

4.3 电流分配系数公式的确定

为了确定电流分配系数 d ,对 VFD20-0704N(8 种颜色粉)、25-1217FN(B)(绿粉)、40-1506(蓝粉)在其阳极电压 E_b 的使用范围内(14~46 V)进行了栅极电流 I_c 、阳极电流 I_b 以及亮度 L 的测量,在此基础上,为了保证电流分配系数 d 的计算精度,还对型号 20-0906F(A)(白粉)、25-0638(蓝粉)、25-0709(绿粉)、33-1211FN(B)(白粉)和 40-1004NA(绿粉)进行了同样的实验数据测量。

按照 3.3 中所述的方法,首先根据实验测得的栅极电流 I_c 和阳极电流 I_b ,计算出相同阳极电压 E_b 下上述 8 种型号的电流分配系数 $d(d=I_c/I_b)$,其中对 20-0704N(8 种颜色粉)的数据取平均值),再与栅阳极面积之比 S_g/S_a 进行最小二乘拟合,各阳极电压 E_b 下决定系数以及参数 $\tilde{A}$ 和 $\tilde{B}$ 的值详见表 4。由表 4 可知:各阳极电压 E_b 下电流分配系数 d 的拟合决定系数都非常越接近于 1,说明拟合结果都很好。

表 4 不同阳极电压下电流分配系数 d 的拟合决定系数、参数值 $\tilde{A}$ 和 $\tilde{B}$ 的值

Table 4 Determination coefficients of current distributive coefficient d and the values of parameters $\tilde{A}$ and $\tilde{B}$

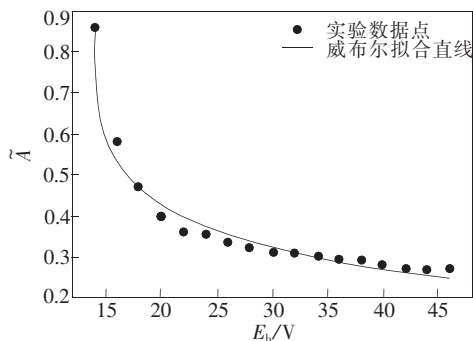
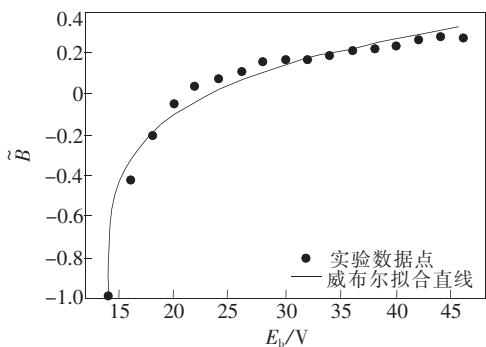
E_b (V)	决定系数 R^3	参数 $\tilde{A}$	参数 $\tilde{B}$
14.00	0.994 9	0.860 3	-0.986 9
16.00	0.995 5	0.580 9	-0.419 3
18.00	0.994 7	0.466 6	-0.196 7
20.00	0.992 9	0.396 3	-0.046 1
22.00	0.993 5	0.362 1	0.035 5
24.00	0.993 6	0.350 8	0.074 2
26.00	0.993 7	0.338 8	0.114 9
28.00	0.993 3	0.321 1	0.150 3
30.00	0.993 0	0.309 1	0.166 0
32.00	0.993 8	0.302 9	0.168 9
34.00	0.992 5	0.298 4	0.191 8
36.00	0.992 3	0.294 1	0.205 7
38.00	0.991 5	0.289 2	0.218 7
40.00	0.990 8	0.282 8	0.236 9
42.00	0.988 3	0.270 8	0.267 8
44.00	0.986 6	0.264 7	0.284 5
46.00	0.987 1	0.271 1	0.272 3

结合表 4 中参数 $\tilde{A}$ 和 $\tilde{B}$ 的值,对式(11)和(12)分别进行威布尔分布拟合,并利用右逼近法得到参数 $\tilde{A}$ 和 $\tilde{B}$ 分别随阳极电压 E_b 变化的威布尔拟合公式:

$$\tilde{A} = 0.860\ 3 \times \exp\left[-\left(\frac{E_b - 14.000\ 0}{16.789\ 0}\right)^{0.349\ 8}\right] \quad (19)$$

$$\tilde{B} = 1.259\ 2 - 2.246\ 1 \times \exp\left[-\left(\frac{E_b - 14.000\ 0}{46.364\ 6}\right)^{0.340\ 1}\right] \quad (20)$$

其拟合效果如图 3 和图 4 所示,拟合曲线的决定系数分别为 $R^2=0.995\ 0$ 和 $R^2=0.995\ 8$,都

图 3 参数 $\tilde{A}$ 随阳极电压 E_b 变化的拟合图Fig. 3 Fitting curve of parameter $\tilde{A}$ vs anode voltage E_b 图 4 参数 $\tilde{B}$ 随阳极电压 E_b 变化的拟合图Fig. 4 Fitting curve of parameter $\tilde{B}$ vs anode voltage E_b

很接近于 1,说明其拟合结果均很好。

因此,结合式(13)、(19)和(20),便可得到电流分配系数 d 随阳极电压 E_b 变化的统一计算公式:

$$d = 1.259\ 2 + 0.860\ 3 \times \exp\left[-\left(\frac{E_b - 14.000\ 0}{16.789\ 0}\right)^{0.349\ 8}\right] \times S_g/S_a - 2.246\ 1 \times \exp\left[-\left(\frac{E_b - 14.000\ 0}{46.364\ 6}\right)^{0.340\ 1}\right] \quad (21)$$

4.4 发光效率随阳极电压变化关系的确定

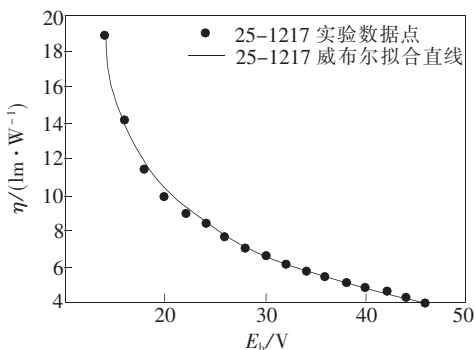
为了确定发光效率 η 随阳极电压 E_b 变化的关系,对 VFD20-0704N(8 种颜色粉)在其阳极电压 E_b 的使用范围内(14~46 V)进行了阳极电流 I_b 以及亮度 L 的测量,并选取型号 25-1217FN(B)(绿粉)、40-1004NA(绿粉)和 33-1211FN(B)(白粉)作为发光效率计算的对比和修正。

按照 3.4 中所述的方法,首先结合各型号 VFD 的发光面积 S_b 、占空比 D_a 以及不同阳极电压 E_b 下阳极电流 I_b 和亮度 L ,通过式(15)计算

出由不同颜色荧光粉制作的 VFD 发光效率 η 的实验值。然后,利用右逼近法估计出式(16)中的威布尔分布三参数值,代入式(16)便可得到发光效率 η 的拟合公式。对于 VFD25-1217FN(B)(绿粉),其发光效率 η 随阳极电压 E_b 变化的公式如下所示:

$$\eta = 18.925\ 3 \times \exp\left[-\left(\frac{E_b - 14.000\ 0}{14.860\ 3}\right)^{0.567\ 8}\right] \quad (22)$$

其拟合曲线的决定系数为 $R^2 = 0.999\ 4$,很接近于 1,说明拟合效果很好。其发光效率 η 随阳极电压 E_b 变化的拟合效果绘于图 5,由图 5 可见,VFD25-1217FN(B)(绿粉)的发光效率 η 随阳极电压 E_b 呈非线性递减。

图 5 25-1217FN(B)(绿粉)发光效率 η 随阳极电压 E_b 变化的威布尔拟合曲线Fig. 5 Weibull fitting curve of luminous efficiency η vs anode voltage E_b

4.5 VFD 亮度的计算表达式及其与实验值比较

对于 VFD25-1217FN(B)(绿粉),将灯丝发射电流 I_k 表达式(18)、电流分配系数 d 统一计算公式(21)和发光效率 η 公式(22)代入式(17)中,就可以根据阳极电压 E_b (选取其工作电压 28 V 作为起始值)计算出其亮度 L ,如表 5 所示。分别以测得的阳极电流 I_b 和亮度 L 实验值以及由式(15)计算得到的 VFD 发光效率 η 为基准,将阳极电流 I_b 、发光效率 η 和亮度 L 的计算值与实验值相比较,相对误差见表 5。由表 5 可知:阳极电流 I_b 和发光效率 η 的平均相对误差均不超过 1.61%,亮度 L 的最小相对误差为 0.01%,平均相对误差为 0.75%,精度很高,说明该方法适合于 VFD 亮度特性的计算。

表 5 不同阳极电压下 VFD 阳极电流 I_b 、发光效率 η 和亮度 L 的计算值与实验值比较

Table 5 Comparison between the calculated anode current I_b , luminous efficiency η and luminance L with the experimental ones under different anode voltages

E_b (V)	I_b (mA)			η (lm/W)			L (cd/m ²)		
	实验值	计算值	相对误差(%)	实验值	计算值	相对误差(%)	实验值	计算值	相对误差(%)
28.00	3.14	3.14	0.04	7.20	7.13	0.94	1 568.22	1 583.72	0.99
30.00	3.63	3.61	0.67	6.67	6.59	1.23	1 794.76	1 804.85	0.56
32.00	4.11	4.09	0.45	6.21	6.23	0.31	2 047.95	2 032.56	0.75
34.00	4.59	4.60	0.18	5.79	5.79	0.01	2 261.26	2 265.90	0.20
36.00	5.13	5.13	0.08	5.42	5.42	0.06	2 504.25	2 504.00	0.01
38.00	5.63	5.67	0.77	5.09	5.18	1.70	2 771.92	2 746.08	0.93
40.00	6.18	6.24	0.98	4.79	4.89	2.05	3 023.84	2 991.39	1.07
42.00	6.73	6.83	1.45	4.52	4.64	2.71	3 281.64	3 239.26	1.29
44.00	7.18	7.43	3.53	4.26	4.41	3.29	3 484.49	3 489.06	0.13
46.00	7.64	8.06	5.47	4.03	4.19	3.75	3 684.12	3 740.22	1.52
平均值	—	—	1.36	—	—	1.61	—	—	0.75

5 结 论

选取由 8 种常见颜色荧光粉制作的 8 种型号 VFD 作为实验样品进行亮度特性实验,结合最小二乘法和右逼近法,给出了灯丝发射电流 I_k 、电流分配系数 d 和发光效率 η 随阳极电压 E_b 变化的关系表达式,并得出以下结论:

(1)VFD 的灯丝发射电流 I_k 、电流分配系数 d 公式中参数 $\tilde{A}$ 和 $\tilde{B}$ 分别随阳极电压 E_b 变化的拟合公式决定系数高达 0.999 8,VFD25-1217FN(B)(绿粉)发光效率 η 随阳极电压 E_b 变化的威布尔拟合公式决定系数为 0.999 4,很接近于 1,拟合程度非常好,证明本文给出的 VFD 亮度特性计算模型是正确可行的。

(2)VFD25-1217FN(B)(绿粉)的阳极电流 I_b 、发光效率 η 和亮度 L 的计算值分别与其实验值相比,最小相对误差不超过 0.04%,亮度 L 的最大相对误差仅为 1.52%,计算精度很高,实现了不需通过实验测量便可精确获得 VFD 的亮度特性。

(3)所提出的实验方案和计算方法具有很强的通用性,适用于确定由其他颜色荧光粉制作的 VFD 亮度特性。因此,利用本文所确定的亮度特性随阳极电压变化的拟合公式,只需根据 VFD 阳极电压的设计值即可快速、准确地得到 VFD 的亮度特性,为 VFD 生产厂商和技术人员开发和研制高亮度、低电压的显示器件提供有价值的技术参考。

参 考 文 献:

[1] 张建平,王睿韬. 基于 MAM 的真空荧光显示器寿命预测 [J]. 液晶与显示, 2008, 23(6):765-770.

[2] 李定珍,牛军. 基于 LabVIEW 的 VFD 检测及实现 [J]. 微计算机信息, 2008, 24(8):307-309.

[3] 阮世平. 直流驱动真空荧光显示器的阴极设计 [J]. 真空科学与技术学报, 2007, 27(5):434-436.

[4] 王元庆. CCFL 的亮度特性及其驱动电路分析 [J]. 液晶与显示, 2004, 19(3):202-206.

[5] 赵守珍,谢宝森,梁翠果,等. 光电平板显示器荧光屏及其亮度测量 [J]. 南开大学学报(自然科学版), 2004, 37(2):40-43.

[6] 侯建国,陈鸣,陈健. 高亮度白光发光二极管发光特性的研究 [J]. 光源与照明, 2006, (2):12-14.

[7] 管世振,杨健,朱宁. 橙黄色电致发光器件发光特性的研究 [J]. 天津理工大学学报, 2007, 23(4): 34-36.

载体类型	标志代码
磁带(magnetic tape)	MT
磁盘(disk)	DK
光盘(CD-ROM)	CD
联机网络(online)	OL