

灯丝电流磁场对电子枪束流品质的影响*

Effects of Magnetic Field of Filament Current
on Beam Current Quality of Electron Gun

北京航空制造工程研究所高能束流加工技术重点实验室 胡元视 左从进 郭光耀 付鹏飞

[摘要] 在直热式电子枪中阴极灯丝电流将会产生磁场而影响电子运动轨迹。用一个简化模型来估算灯丝电流磁场导致束流产生的偏差,试验表明灯丝电流磁场确实影响了束流能量密度分布。把工程计算的结果与电子枪结构模拟的结果相比较所得结果是一致的。同时考虑灯丝加热电流跳动所带来的影响,试验表明随时间变化的磁场导致束流能量密度分散,焊缝质量下降,而且无法依靠静态合轴来消除。

关键词: 直热式 磁场 能量密度 工程计算

[ABSTRACT] In directly heated electron guns, the cathode current generates a magnetic field that will change trajectories of electrons. The deflection of the electron beam caused by a cathode magnetic field can be estimated with an equivalent plane diode analytical model. It is shown that such a magnetic field really can affect the practical operating characteristics of an electron gun. The equations suggested for engineering calculation agree well with results of computer simulation for the real construction of a three-electrode gun. It is shown that a magnetic field which changes with time leads to a dispersive electron beam and causes a substantial decrease in the accuracy of positioning of the beam on the object, irremovable by the static alignment of the device.

Keywords: Direct heating Magnetic field Energy density Engineering calculation

随着电子束焊接技术发展,电子束焊接设备得到越来越广泛的推广和应用。现在大多数电子束焊接设备中阴极灯丝大都采用丝带状直热式加热,直热式结构简单、加工方便,灯丝加热电流从几安到几十安。但阴极灯丝加热电流产生的磁场将会影响从阴极发射出来的电子轨迹,V型丝带状灯丝产生的磁场呈面对状分布而非轴对称,从而打乱了电子光学系统的同轴性,导致阳极处虚拟截面畸变和束流会聚角的偏移。在偏移量不大的情况下,可以依靠电子枪电磁部分偏转系统来进行补偿。事实上影响截面畸变和束流会聚角变化的因素不止一个,其中阴极灯丝加热电流跳动的影响很大,

其原因主要是电源输出信号的过滤效果不好所引起的。当加热电流比较大时电流跳动的影响效果更明显,束流对光学轴的偏移角变化随截面尺寸减小而成比例的增大。阳极处虚拟截面大小的起伏不定导致束流能量密度和焊缝位置也周期性变化,这样很明显会影响到直热式电子枪的束流品质,从而影响到电子枪的性能参数和技术水平。

因此定量估算阴极灯丝电流磁场对电子枪发射电子轨迹和束流能量密度分布所产生的影响就很有必要了。阴极灯丝电流磁场分布如图1所示。

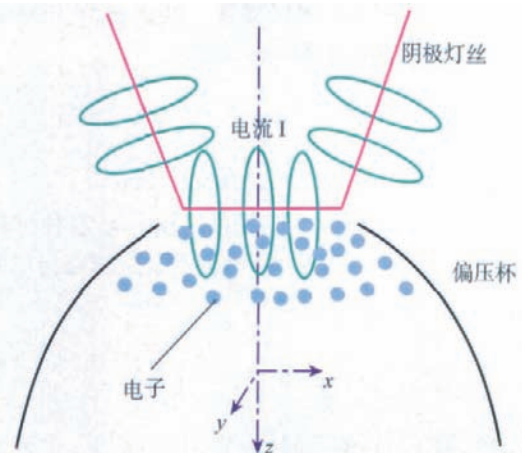


图1 阴极灯丝电流磁场分布示意图

Fig.1 Magnetic field distribution diagram of cathode filament current

1 计算依据^[1]

定义 $\phi(z)$ 为电子枪 Z 轴的电势, $B(z)$ 为磁感应强度,方向沿 Y 轴。电子横向速度方程可表示为:

$$\frac{dv_x}{dt} = \frac{e}{m} v_z B, \quad (1)$$

这里 $v_z = \sqrt{2e\phi/m}$ 是纵向速度(在阴极表面($Z=0$)的电子初始能量被认为等于0)。假定 $v_x \ll v_z$, 电子轨迹偏移角 $\beta = v_x/v_z$ 可以用积分形式表示:

$$\beta(z) = \sqrt{\frac{e}{2m\phi(z)}} \int_0^z (\tau_1) dz_1. \quad (2)$$

2010年第9期·航空制造技术 81

定义 L 为阴阳极距离, 在阳极口的偏移就可表示为

$$\Delta = x(L) = \int_0^L \beta(z) dz \quad (3)$$

2 建立模型

我们把电子枪内电场用等效平面二极管并考虑两种极端情况的模型来计算^[2]。

(1) 忽略空间电荷效应, 并认为电场 $\phi(Z) = U(z/L)$ 是均匀的, 这里的 U 是阳极电势, L 为阴阳极距离。

(2) 电子枪束流在空间电荷限制发射模式运行(合乎 3/2 法则 $J_{s,c} = K_1 \frac{V^{3/2}}{d^2}$) 以及 $\phi(z) = U(z/L)^{4/3}$ 。

直热式阴极磁场的空间分布主要取决于阴极结构设计。选用丝带状 V 型钨钼合金来作为阴极灯丝。这个模型中 V 型阴极沿枪中心轴的磁感应的模拟分布状况, 可以从下面形式的表达式得出:

$$B(Z) = A / (Z + r_0) \quad (4)$$

如果 α 是近似无穷阴极导体之间夹角, 它的横截面半径为 r_0 , 并且 $r_0 \ll L$, 因此

$$A = \frac{\mu_0 I}{2\pi} \tan \frac{\alpha}{4} \quad (5)$$

式中, I 是阴极灯丝电流, μ_0 为真空磁导率。

考虑到这些情况之后, 上面的积分很容易计算出来, 可以获得下面的结果。依照方程(2) 偏移角不取决于沿轴电势分布, 可表示为

$$\beta(L) = C \frac{A}{\sqrt{U}} \ln \left(1 + \frac{L}{r_0} \right) \quad (6)$$

由于电场均匀, 束流偏移可以用下面的方程来描述

$$\Delta \approx C \frac{A}{\sqrt{U}} \left[2 \ln \left(1 + \frac{L}{r_0} \right) - 4 \right] L \quad (7)$$

同时在 3/2 法则设立的模型中我们可以得到

$$\Delta \approx C \frac{A}{\sqrt{U}} \left[3 \ln \left(1 + \frac{L}{r_0} \right) - 9 \right] L \quad (8)$$

其中, $C = \sqrt{e/2m} = 2.97 \times 10^5 V^{1/2} \cdot m^{-1} T^{-1}$ 。

很明显, 经过模型简化获得的上面列出的方程式是相当粗糙的, 但是它们简单方便, 便于工程计算。

3 计算结果

用上述简化模型所获得的方程式进行计算, 出现差错是难免的, 因此我们也对实际阴极的磁场进行了计算。这个磁场被当作一个由许多分离的直线段组成的阴极重合场^[3-5]。每段的磁场用 Biot-Savart 公式计算

$$|B(P)| = \mu_0 I \frac{\cos \phi_2 - \cos \phi_1}{4\pi \cdot r} \quad (9)$$

这里 r 是需要计算磁感应强度的 P 点和带电导体(阴极灯丝)中心轴的距离。 ϕ_1 是电流方向与从 P 点至导体起点半径矢量 r_1 之间的夹角。 ϕ_2 是电流方向与从 P 点至导体终点半径矢量 r_2 之间的夹角。

图 2 是标准 V 型钨丝阴极的几何图形, 同时表示了用 Biot-Savart 公式和方程(4)和(5)计算出来的在电子枪轴磁场分布状况。灯丝直径为 0.8mm, 加热电流为 3A。图中实线是用 Biot-Savart 公式计算的, 点状线是方程(4)和(5)分析估算得出的。

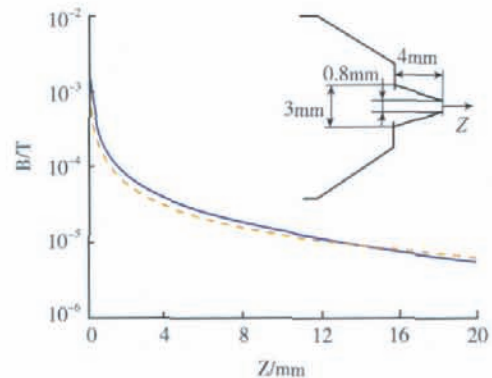


图2 在标准V型钨丝阴极的电子枪中磁场轴向分布
Fig.2 Axial distribution of magnetic field in the gun with standard V-shaped tungsten wire cathode

从图 2 可以看出灯丝电流产生的磁场感应强度是相当强的, 在阴极附近更是达到 7.6mT。在距离从 2~20mm, 磁感应强度从 78 μ T 减少到 5 μ T。依据方程(4)和(5)在阴极边缘附近计算得出的一系列更小的磁感应强度值 1.6mT, 这可以解释为在实际阴极边缘是圆边绕制的。在距离阴极 2mm 和 20mm 处, 方程式(4)和(5)求出的值为 49 μ T 和 4.9 μ T, 相应地, 用 Biot-Savart 公式计算得到更高的磁感应强度值是因为流过实际阴极电流偏移枪轴所导致。所以, 用简化方程计算应该会导致束流的偏移角和偏移值被低估。

表 1 列出了严格轨迹计算结果和阴极磁场对束流品质影响近似方程式计算结果(灯丝宽度 0.8mm)。这里 β 为束流偏移角, Δ 和 R 是对应在阳极平面和从阴极 20mm 处(那里的磁场十分小)对于束流轴中心的偏移值。

在等效二极管磁场下轨迹的严格计算结果表明: 由于 V 型灯丝阴极磁场的影响, 从电子枪发射出的束流计算角度值在 $1.15 \times 10^{-3} \sim 1.15 \times 10^{-2}$ rad 之间排列, 这是因为束流孔径角的规律。因为考虑到了这些情况, 距离阴

表1 V型丝状阴极磁场影响的计算结果

阴阳极距离 d/mm	加速电压/ kV	等效二极管的轨迹计算结果			方程(4)和(5)的计算结果	
		束流和枪轴的夹角 $\beta/10^{-3}\text{rad}$	束流轴相对于枪轴的偏移 (距离阴极20mm) $R/\mu\text{m}$	阳极平面处束流轴相 对于枪轴的偏移 $\Delta/\mu\text{m}$	$\beta/10^{-4}\text{rad}$	$\Delta/\mu\text{m}$
6	1	11.5	261	100	43	27
	2	8.1	184	71	30	19
	4	5.7	131	51	21	13.5
	8	4.1	92	34.6	15	9.5
	16	2.9	65	24.4	11	6.7
	30	2.1	47	17.6	7.8	4.9
10	1	11.5	311	196	47	59
	30	2.1	56	35	8.6	11
	50	1.62	44	28	6.7	8
15	30	2.1	70	60	9.2	20
20	30	2.1	83	83	9.8	29
	50	1.64	64	64	7.6	22
	100	1.15	46	46	5.4	16

极 20mm 平面处全部束流偏移值在 46~311 μm , 在阳极平面处在 17.6~196 μm 。也就说在模型中偏移角几乎不依靠阴阳极距离而是与阳极电压的平方根成相应比例关系。束流在阳极平面处和安装平面 ($Z=20\text{mm}$) 偏移值非线性取决于 d 并且随着距离增加而增加, 因为在给定加速电压下与之相关联的电场是减小的。

当在等效二极管中空间电荷效应能够被忽略(例如 $E(Z)=Ua/d=\text{常数}$)时, 也使用类似的计算。因此, 阴极附近电场自然增加将会导致 β 、 Δ 和 R 的降低。模拟表明: 在这种情况下 β 几乎不变化, 同时 R 下降不超过 10%。在表 1 最后 2 栏列出了用近似公式计算出 β 和 Δ 的值。用这些值和轨迹计算结果相比较, 表明用近似公式获得值只有我们预期的 1/3~1/4。如果在轨迹计算中我们不考虑电子热能, 然后用近似公式得到的结果也小大约 2 倍。

在其他条件相等的情况下, 灯丝电流磁场对束流的影响直接与灯丝电流成比例; 因此, 当用大电流直接加热较宽阴极灯丝时, 这个影响会很明显(加热电流为 10~30A)。

经严格计算(用 Biot-Savart 公式), 在电子枪轴上实际带状长方形阴极(带宽 4mm, 带厚为 50 μm) 在灯丝电流为 20A 时的关于电流导致的磁场影响, 其阴极的磁场分布如图 3 所示。

可以看出, 在接近带状阴极表面的磁场比上面提到的丝状阴极有细微的下降。同时,

被灯丝电流感应的磁场随阴极距离增加而降低的速度比丝状阴极更慢。因此, 带状阴极灯丝电流的影响也更明显。

表 2 列出了较宽带状阴极(4mm)灯丝电流对束流

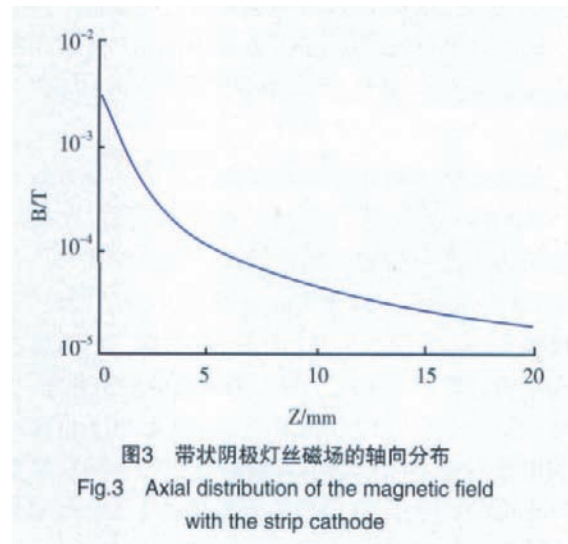


表2 矩形带状阴极磁场影响的计算结果

阴阳极距离 d/mm	加速电压/ kV	等效二极管的轨迹计算结果		
		束流和枪轴的夹角 $\beta/10^{-3}\text{rad}$	束流轴相对于枪轴的偏移 (距离阴极20mm) $R/\mu\text{m}$	阳极平面处束流轴相 对于枪轴的偏移 $\Delta/\mu\text{m}$
16	10	1.2	364	317
16	30	6.9	210	183
16	60	4.9	149	129

的影响的计算结果,主要依靠利用表 1 中所列的计算数据的方法来获得(电子枪束流在空间电荷限制发射模式运行,轴向电压分布遵循 3/2 定律)。

比较在 V 型丝状和矩形带状阴极等效二极管中的计算结果表明,电流越大磁场影响也就越大,这和我们的预期一致。电子枪中束流的偏移不合轴将会导致束流轰击结构元件,而损坏电子枪及电源控制系统,所以在设计电子枪时会考虑通过合轴系统来进行补偿。但是灯丝电流一旦发生变化,其合轴系统将会被打乱,需要适时改变控制参数,所以稳定灯丝电流可以大大减少这种情况的发生。

毫无疑问,获得的模拟计算结果只是估算而已,但它们表明了阴极灯丝电流磁场充分能够影响电子束流参数。实际电子枪中电势轴向分布用 WINCHARGE 规则计算得出,考虑到电子枪的空间电荷效应(见图 4),设计电子枪有如下特性:阴极电势 -60kV ,阳极电势 0kV ,控制极的电势 -61.5kV ,电子束流为 0.1mA ,阳极虚拟截面半径为 $30\mu\text{m}$,阳极孔径张角为 0.025rad 。图 5 为电子枪灯丝电流磁场所导致产生的束流偏移角和偏移量计算结果。

在阳极平面处($Z=15\text{mm}$)由磁场引起的束流轴偏移角度是 $2.2 \times 10^{-3}\text{rad}$,轴偏移量 $100\mu\text{m}$ 。在离阴极 20mm 处 $\beta=2.1 \times 10^{-3}\text{rad}$, $\Delta=110\mu\text{m}$ 。在磁场影响下虚拟截面横行偏移更大,在截面半径 $30\mu\text{m}$ 处等于 $70\mu\text{m}$ 。

把实际电子枪计算结果和利用轨迹计算等效二极管($U=30\text{kV}$)方法获得的结果相比较表明,在束流轴偏移角方面是一致的。而在枪口处束流轴偏移值相差 36% ,从而实际电子枪在实际电势分布下的计算比等效二极管方法产生更大偏移值。因此,等效二极管方法能用在精确计算从电子枪发射出来束流的轴偏移角,也可估计在枪口束流轴较低的界限。在实际电子枪系统中灯丝电流对束流的影响更大被解释为因为控制极是比阴极更低的负电压,在阴极附近电场比等效二极管模型中小的多。

在其他条件相等的情况下,灯丝磁场对束流的影响直接和灯丝电流成比例;因此当用大电流直接加热钨钨化物和金属带状阴极,灯丝电流高达 $10\sim 30\text{A}$ 时意义是非常重大的。

当稳定阴极灯丝电流时,在阴极磁场影响下的合轴和束流偏移可以用合轴系统来补偿。然而,作为一个规律,大电流灯丝电源有大的脉冲。由于阴极磁场导致的束流偏移角大约 $10^{-2}\sim 10^{-3}\text{rad}$,偏移角和束流偏移与灯丝电流成比例。如果灯丝电流脉冲等于 $P\%$,于是由于脉冲引起的偏差值也等于计算值 β 、 Δ 和 R 乘以 $P\%$ 所

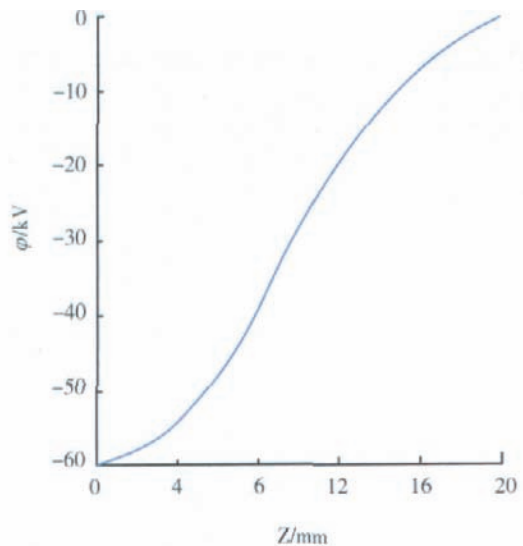


图4 电子枪电势的轴向分布
Fig.4 Axial distribution of the voltage in electron gun

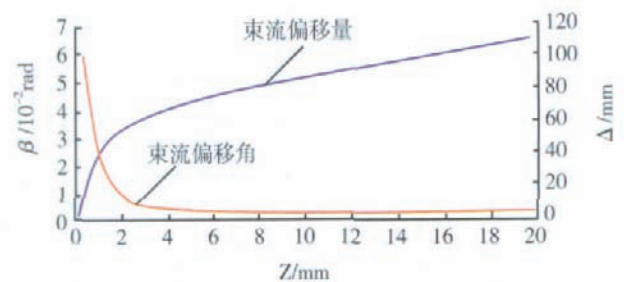


图5 在阴极磁场影响下沿 Z 轴束流轴偏移角和束流偏移量的关系曲线
Fig.5 Relationship curve of inclination angle of beam axis Z and inclination amount of beam under the effect of cathode magnetic field

得到的值。即使脉冲大约在 10% ,那些偏差值也能够引起束流产生明显跳动。如果灯丝电流不是特别稳定,当电流在 $20\sim 30\text{A}$ 时,它的脉冲值也在百分之十几,这样的脉冲不仅会打乱操作过程,也会损坏电子束焊接设备。

4 结论

(1) 提出了在直热式阴极磁场的影下束流偏移角和偏移量的近似估算工程方程式。

(2) 基于等效二极管模型,估算直热式阴极磁场对束流偏移角和偏移量影响的方法和程序进行了发展改进。把依靠上述方法获得的结果和实际电子枪作比较来确保在实际应用中具有充分的准确性。

(3) 试验表明:阴极灯丝电流产生束流偏移角和束流孔径角作比较,其大小与之相当甚至超过它。在阴极

(下转第 90 页)

表5 模糊控制系统在制品状态表

生产状态	各阶段生产速率 $r/(\text{件}\cdot\text{h}^{-1})$			各buffer在制品量 $b/\text{件}$			在制品总量 $b_{\text{总}}$
	第1阶段	第2阶段	第3阶段	b_{1j}	b_{2j}	b_{3j}	
初始状态	2	1	1	8	0	3	11
8h	0.384	0.905	0.57	3.8	2.7	2.6	10
16h	0.52	0.71	0.58	2.3	3.7	2.2	8
24h	0.6	0.645	0.605	1.9	4.0	2.0	8
32h	0.625	0.615	0.615	2.0	4.0	2.0	8

用 MATLAB 软件的模糊逻辑工具箱来仿真整个控制过程^[12],根据初始条件,模糊控制器输出结果 $k_{i1}(k=r/d)$: $k_{11}=0.768, k_{21}=1.81, k_{31}=1.14$ 。相应的各阶段生产速率分别为: $r_{11}=0.384, r_{21}=0.905, r_{31}=0.57$ 。一个周期(8h)后,各缓存区的在制品量分别为:

$$b_{11} = 8 + (0.384 - 0.905) \times 8 \approx 3.8 (\text{件});$$

$$b_{21} = 0 + (0.905 - 0.57) \times 8 \approx 2.7 (\text{件});$$

$$b_{31} = 3 + (0.57 - 0.625) \times 8 \approx 2.6 (\text{件});$$

生产过程中在制品总量 $B=10$ 。各阶段的产品剩余量分别为:

$$x_{11} = 12 + (0.384 - 0.5) \times 8 = 11 (\text{件});$$

$$x_{21} = 4 + (0.905 - 0.5) \times 8 = 7.2 (\text{件});$$

$$x_{31} = 4 + (0.57 - 0.5) \times 8 = 4.6 (\text{件});$$

模糊控制器根据此时在制品数量和 产品剩余量再次调整个阶段的生产速率 r_{i2} : $r_{12}=0.52, r_{22}=0.71, r_{32}=0.58$ 。2 个周期(16h)后,各缓存区在制品量为: $b_{12}=2.3, b_{22}=3.7, b_{32}=2.2$ 。在制品总量 $b_{\text{总}}=8$ 。各阶段产品剩余量为: $x_{12}=11; x_{22}=8.8; x_{32}=5.2$ 。3 个周期(24h)、4 个周期(32h)后各阶段在制品量如表 5 所示。

从表 5 中可以看出,2 个周期(16h)后,该零件的整个生产过程就会处于平稳状态,在制品分布均匀且数量减少。

4 结束语

本课题利用 MP-P 生产控制模式,将各零件的生产过程按拉动式和推动式原理分成几个控制阶段,并在此基础上,利用模糊控制技术,对各零件的生产过程建立了生产控制模型,通过模糊控制器实现生产过程的实时监控,使得由各零件生产过程组成的整个车间生产系统在满足需求的同时确保了生产过程的平稳,并使整个车间在制品的库存量达到了最小。

参考文献

[1] N C Tsourveloudis, S Ioannidis. Fuzzy work-in-process inventory control of unreliable manufacturing system. Information Sciences, 2000

(127): 69-83.

[2] N C Tsourveloudis, S Ioannidis. Work-in-process scheduling by evolutionary tuned fuzzy controllers. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2007 (34): 748-761.

[3] Hui Li, Liming Liu. Production control in a two-stage system. European Journal of Operational Research, 2006 (174): 887-904.

[4] Taho Yang, Hsin-Pin Fu, Kuang-Yi Yang. An evolutionary-simulation approach for the optimization of multi-constant work-in-process strategy—A case study. Int. J. Production Economics, 2007 (107): 104-114.

[5] H P G van Ooijen, J W M Bertrand. The effects of a simple arrival rate control policy on throughput and work-in-process in production systems with workload dependent processing rates. Int. J. Production Economics, 2003 (85): 61-68.

[6] 张洁,汪宇,刘世平,等. 工序间在制品库存优化设计. 华中科技大学学报(自然科学版). 2002 (30): 71-73.

[7] 尤静. 面型供应链的在制品跟踪与管理研究[D]. 南京航空航天大学. 2005.

[8] 郭彩芬. 生产物流系统在制品控制技术研究[D]. 南京航空航天大学. 2005.

[9] 杨国栋,宋国防,陈顺正. 在制品(WIP)多阶段优化控制方法研究. 工业工程, 2005, 8(1): 101-106.

[10] 诸静. 模糊控制理论与系统原理. 北京: 机械工业出版社, 2005.

[11] 陈国华. 生产与运作管理. 南京: 南京大学出版社, 2006.

[12] 张国良. 模糊控制理论及其 MATLAB 应用. 西安: 西安交通大学出版社, 2002.

(责编 岩石)

(上接第 84 页)

磁场作用下被估算的虚拟截面偏移量充分超过截面半径。

(4)考虑了在电子束参数中灯丝电流脉冲的影响。试验表明: 随时间变化的磁场导致束流以及焊缝质量明显下降,而且无法用电子光学系统中的静态合轴去除。根据设备要求的参数,设计灯丝电流稳定电路使电流脉冲控制在可承受的范围内。

参考文献

[1] Tsarev B M. Calculation and design of electron tubes. Moscow-Leningrad: Gosenergoizdat, 1952.

[2] Rozenfeld L B, Grinfeld D E. Estimation of effect of magnetic field of directly heated cathode on electron gun parameters. Bulletin of the Russian Academy of Sciences (Physics), 2005, 169 (4): 573-579.

[3] 阿良莫夫斯基 И В. 电子注与电子枪. 黄高年,译. 北京: 电子管技术编辑组, 1974.

[4] 《国外航空》编辑部. 电子束焊枪设计理论和实验技术, 国外航空技术. 1975.1.

[5] 华中一,顾昌鑫. 电子光学. 上海: 复旦大学出版社, 1991.

(责编 侧卫)