

文章编号: 2095-4980(2015)06-0990-06

基于 B-Dot 的 kA 级短脉冲电流测量方法

谭榕容, 冉汉政, 程 刚

(中国工程物理研究院 电子工程研究所, 四川 绵阳 621999)

摘 要: 高压脉冲电流的测量方式主要是 Rogowski 线圈。B-Dot 是一种非侵入式脉冲电流测量探针, 但由于 B-Dot 测量模型的建立以及应用标定等过程与实际应用环境密切相关, 且对待测电流强度有严格的要求, 目前还未见其在实际 kA 级短脉冲方面的应用研究。本文在对 B-Dot 的 kA 级短脉冲测量方法进行理论研究的基础上, 设计了微型 B-Dot 探针, 并利用 B-Dot 探针对于 kA 级短脉冲电流进行试验。试验结果表明, B-Dot 探针适用于 kA 级脉冲电流的测量, 且与理论研究结论一致。

关键词: Rogowski 线圈; 脉冲电流; B-Dot 探针; 非侵入式

中图分类号: TN248

文献标识码: A

doi: 10.11805/TKYDA201506.0990

Measurement of kA-level short pulse current based on B-Dot

TAN Rongrong, RAN Hanzheng, CHENG Gang

(Institute of Electronic Engineering, China Academy of Engineering Physics, Mianyang Sichuan 621999, China)

Abstract: Taking measurement by using Rogowski coil is the main method for high voltage pulse. B-Dot is a non-invasive measurement probe of pulse current, which bears many advantages in the measurement on the discharge circuit with compact structure and strictly specified parameters compared with general Rogowski coils. Nevertheless, the modeling of B-Dot and its calibration process are closely related to the practical application environments, and there are also strict requirements on the current intensity, the researches on its applications in kA level short pulse current measurement are seldom reported. This work aims to the preliminary exploration research on application of B-Dot in kA short pulse current. Based on analyzing the principle of kA level short pulse current measurement by using B-Dot, micro B-Dot probes are designed and tested on kA- μ s level pulse current. The test results accord well to the theory analysis.

Key words: Rogowski coil; pulse current; B-Dot probes; non-invasive

由于高新技术和国防建设的需求, 脉冲功率技术应运而生。脉冲功率技术在技术上的特征是: 高脉冲功率($>10^6$ W), 短脉冲持续时间(10^{-10} s~ 10^{-3} s), 高电压(10^3 V~ 10^7 V)和大电流(10^3 A~ 10^7 A)。测量是脉冲功率装置调试运行、改造和提高不可或缺的重要手段^[1]。因此, 随着脉冲功率的发展, 脉冲功率技术领域的测量技术发展显得尤为迫切, 而由于脉冲功率的技术特点, 对测量技术提出了很高的要求。脉冲电流是脉冲功率装置的核心参数之一。目前, 脉冲电流的测量方式主要有: 分流器法、Rogowski 线圈法和磁光效应法。Rogowski 线圈由于精确度高、频率响应特性好的特点, 在目前脉冲电流测量方面应用最为广泛^[2]。然而, 在利用 Rogowski 线圈进行脉冲电流测量时, 被测电流回路必须穿过线圈, 而 Rogowski 线圈体积较大, 对待测回路面积有一定的要求, 不仅要求增加装置体积, 而且引入较大的分布参数, 这在体积和回路参数要求严格的脉冲功率装置的电流测量方面并不大适用。

B-Dot 是一种结构特殊的 Rogowski 线圈, 主要用于测量变化的磁场, 也可通过测量变化的电流建立的变化磁场达到间接测量电流的目的。B-Dot 结构简单, 放置方式灵活, 进行脉冲电流测量时, 不需要将线圈穿过被测回路, 与脉冲电流回路没有直接的电气连接关系, 不会改变待测电流回路的设计, 不会引入额外的分布参数,

收稿日期: 2014-10-17; 修回日期: 2014-11-16

基金项目: 中国工程物理研究院电子工程研究所创新基金资助项目(S20140804)

因此,较 Rogowski 线圈更为适合应用在对体积和回路参数有严格要求的情况。1957 年,俄罗斯学者 Artsimovich L A 等人首次提出了磁探针的测量方法,自此,B-Dot 磁探针便广泛用于等离子体内部磁场测量和磁绝缘线传输线和直线感应加速器等存在大电流设备中的脉冲电流的测量^[3-8]。相对于 Rogowski 线圈,B-Dot 能感应到的磁场面积更小,因此对脉冲电流磁场强度要求相对较高。目前,B-Dot 测量技术主要应用在等离子体或磁绝缘传输线等设备中,其脉冲电流通常为 MA-ns 级,电流所产生的磁场强度大。而对于 kA 级短脉冲电流,所产生的磁场强度较小,均匀性较差,增加了通过磁场测量脉冲电流的难度。将 B-Dot 探针应用在 kA 级短脉冲电流的测量发展还需开展大量的理论和试验研究进行验证和设计。本文是针对 kA 级短脉冲电流开展的基于 B-Dot 的脉冲电流测量技术研究。结合 B-Dot 探针的脉冲电流测量原理,设计制作了 2 种简易的线圈,可分别在放电回路中和扁平传输电缆上任意位置测取脉冲电流,并利用这 2 种类型的 B-Dot 线圈方式与电流环的测量方式进行了对比试验。

1 B-Dot 脉冲电流测量技术原理

B-Dot 是一种结构特殊的 Rogowski 线圈,通过测量变化的电流建立的变化磁场达到间接测量电流的目的。B-Dot 磁探针测量脉冲电流的原理如图 1 所示,根据电磁感应原理,当电流 I 发生变化时,将在线圈中产生感应电压信号。在 B-Dot 探头上产生的感应电压信号通过电阻 R 拾取。B-Dot 探头可等效为一个与电阻串联、感应电压驱动的电感,等效电路如图 2 所示。当 B-Dot 探针环半径 $r \ll h$ 时,可认为 B-Dot 线圈中通过的磁场是均匀的,可以得到式(1)所示的表达式。根据图 2 得式(2)。由此可知,即可通过拾取电阻上电压进行电流的测量。

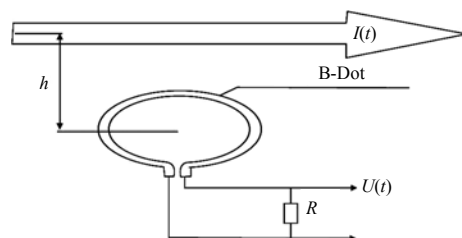


Fig.1 Current measurement schematics of B-Dot
图 1 B-Dot 电流测量原理图

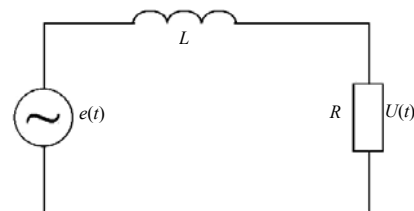


Fig.2 Equivalent circuit of B-Dot
图 2 B-Dot 等效电路

$$\varepsilon(t) = -S \frac{dB(t)}{dt} \quad (1)$$

$$U(t) = -S \frac{dB(t)}{dt} - \frac{L}{R} \frac{dU(t)}{dt} \quad (2)$$

式中: S 为探针线圈的有效面积; $B(t)$ 为 t 时刻电流变化所激发的磁场中线圈内的磁感应强度; h 为探针中心距导体的距离。

脉冲电流传输线路附近所激发的磁场强度可根据毕奥-萨伐定理^[9]计算。根据毕奥-萨伐定理可知,若导线无限长或者 B-Dot 探针环半径 $r_0 \ll l$ 时,载流直导线激发产生的磁场强度 B 如式(3)所示。

$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi r_0} \quad (3)$$

当利用磁探针放置在电流传输电缆附近时,磁场强度可按式(3)进行计算。

B-Dot 是一个小的线圈,其体积很小,线圈的截面半径一般为毫米量级。B-Dot 探针测量电流时不与被测回路直接接触,是通过磁场耦合的方式进行脉冲电流测量;也不同于 Rogowski 线圈测量方式,为非穿越式非侵入式测量,对被测电流的回路及磁场不会造成大的干扰,在很大程度上保障了被测设备的工作可靠性,具有广泛的应用前景。

2 微型 B-Dot 线圈的结构设计

国内外在 B-Dot 线圈的结构设计方面进行了许多研究,也取得一些研究成果。传统的 B-Dot 探针采用单匝铜漆包线绕制而成,为了降低电磁干扰对测量的影响,采用极性相反的线圈进行绕制^[10-12]。在绕制线圈时,为了尽量减少引出线所形成的杂散面积,引线相绞合后从电磁屏蔽管内引出,最终经同轴传输线到达示波器,传统圆形线圈的结构如图 3 所示。

在圆形 B-Dot 探针脉冲电流测量原理的基础上, 圣地亚国家实验室提出了一种新型的 B-Dot 线圈探测器, 即 U 形 B-Dot 线圈^[13-14]。可将 U 形 B-Dot 线圈放置在扁平传输电缆上进行脉冲电流的测量。利用 U 形 B-Dot 线圈进行脉冲电流测量的原理见图 4, U 形 B-Dot 线圈采用柔性印制板实现, U 形 B-Dot 线圈结构设计原理如图 5 所示。脉冲电流产生磁场变化, 变化磁场在 U 形 B-Dot 线圈中激发产生电流, 利用电流环检测 U 形 B-Dot 线圈中的感应电流并通过同轴电缆将采集信号送至示波器, 即可推算出脉冲电流大小。为了减小电磁干扰对测量的影响, U 形 B-Dot 线圈的背面采用铜层进行屏蔽, 电流环出线端前的所有结构也采用屏蔽壳体进行屏蔽。

根据图 4 有:

$$i = \int \frac{e - iR}{L} dt \quad (4)$$

如果 $iR = e$, 那么

$$i = \int \frac{e}{L} dt = \int \frac{kN}{L} \frac{dI}{dt} dt = \frac{kN}{L} I \quad (5)$$

式中: e 为 B-Dot 线圈中的感应电压; i 为线圈中的感应电流; I 为待测脉冲电流; N 为线圈匝数; k 为比例系数。

通过检测 U 形 B-Dot 线圈中的感应电流, 并根据式(4)或式(5), 即可还原出真实的脉冲电流。

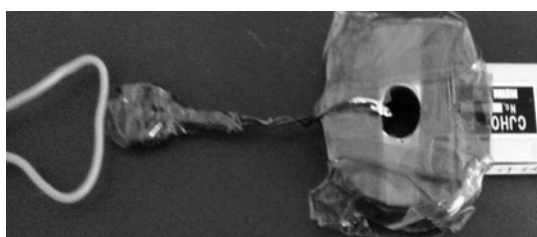
通过理论分析可知, B-Dot 线圈可应用于 kA 级短脉冲电流的测量, 但是测量结果受 B-Dot 线圈的结构设计和放置位置影响, 下面通过开展相关试验进一步对 B-Dot 探针在 kA 级短脉冲的测量方面进行研究。

借鉴上述 2 种 B-Dot 探针的设计, 采用单根直径为 0.1 mm 的漆包线进行绕制, 设计了圆形和 U 形的 B-Dot 线圈, 直径为 1.5 cm, 5 匝。U 形磁探针是利用漆包线绕制为长 $l=3$ cm, 宽 $d=5$ cm, 5 匝的矩形线圈后, 从中部弯折为长 $l=3$ cm, 宽 $d=2.5$ cm 的 U 形线圈, U 形线圈可直接卡夹在扁平传输电缆的任意位置。B-Dot 线圈外采用聚四氟乙烯薄膜进行包裹, 增强线圈的绝缘强度。2 种 B-Dot 线圈用于脉冲电流测量时, 利用 1:10 的电流环拾取线圈内的感应电流。

3 脉冲电流测量的试验研究

3.1 圆形 B-Dot 线圈与电流环的对比试验

利用上述所设计的圆形 B-Dot 线圈对峰值约 5 kA, 周期约为 1.8 μ s 的脉冲电流进行测量。采用 1:1 000 电流环所测得的脉冲电流波形作为标准。圆形 B-Dot 脉冲电流测量方式如图 6 所示, 利用 1:1 000 电流环拾取 B-Dot 线圈中的感应电流, 根据式(5)可知, 线圈中的感应电流与实际待测电流成正比。在同一示波器显示屏中比较 2 类测量波形的周期和幅值, 即可实现基本的标定和比较。



(a) outside



(b) middle

Fig.6 Measurement of pulse current using B-Dot circular coil

图 6 脉冲电流的圆形 B-Dot 线圈测量方式

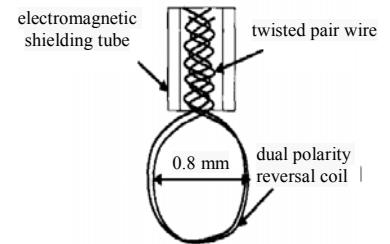


Fig.3 Structure of round B-Dot coil
图 3 圆形 B-Dot 线圈结构

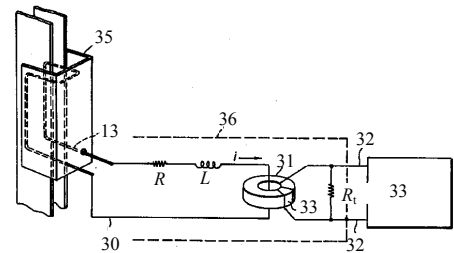


Fig.4 Flat cable pulse current measurement principle based on the U-shaped B-Dot coil

图 4 基于 U 形 B-Dot 线圈扁平电缆脉冲电流测量原理

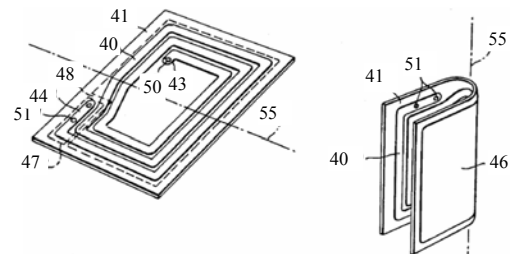


Fig.5 Design principles of U-shaped B-Dot coil structure
图 5 U 形 B-Dot 线圈结构设计原理

将 B-Dot 线圈放置在脉冲电流传输回路旁侧(外侧, 中间)。测量波形结果比较如图 7 所示(波形 A 为电流环测量结果, 波形 B 为 B-Dot 线圈测量结果)。

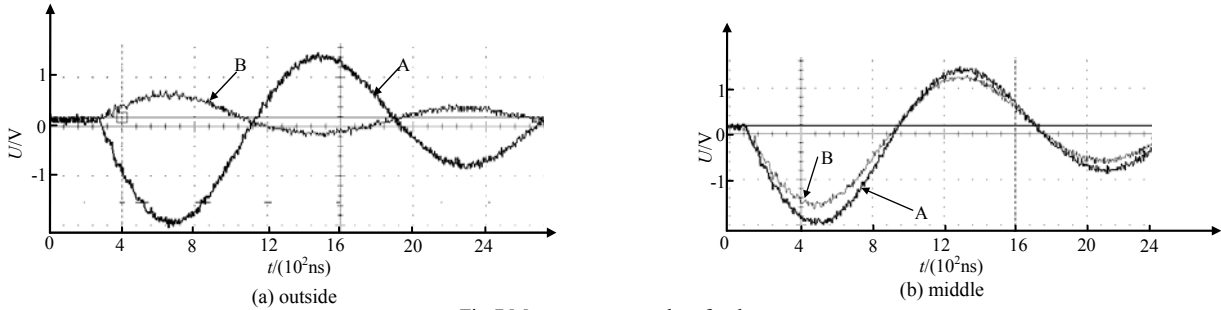


Fig.7 Measurement results of pulse current
图 7 脉冲电流的测量结果

由图 7 可以看出, 电流环与 B-Dot 测得脉冲电流的周期一致, 为 $1.8 \mu\text{s}$, B-Dot 放置于放电回路外侧时, 测取电流与电流环比较极性相反, B-Dot 放置于放电回路中间时, 极性相同, 这与 B-Dot 线圈内的磁场方向直接相关。比较图 7 的(a),(b) 2 图可知, 利用 B-Dot 线圈测量电流幅值的正负、大小与放置位置有关。B-Dot 线圈测量的波形仅反映了 B-Dot 线圈内感应电流的大小, 需要通过调制和标定才可获取真实电流的大小。(由于简易 B-Dot 线圈设计并不规范, 难以实现 B-Dot 感应电流与待测电流的标定, 本文中电流幅值未开展定量比较标定。)

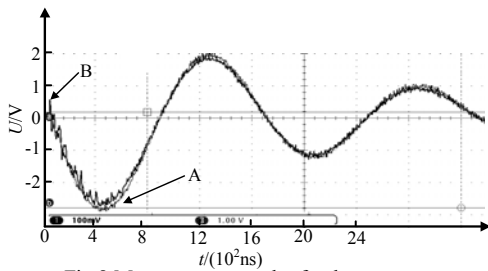


Fig.8 Measurement result of pulse current
图 8 脉冲电流的测量结果

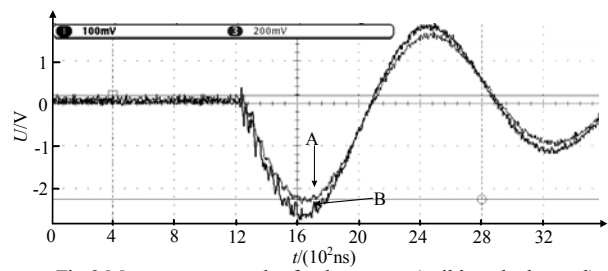


Fig.9 Measurement result of pulse current (coil length changed)
图 9 脉冲电流的测量结果(改变线圈长度)

3.2 U 形 B-Dot 线圈与电流环的对比试验

利用电流环和设计的 U 形 B-Dot 线圈进行脉冲电流的测量比较。U 形 B-Dot 线圈对电流的测量是通过感应扁平电缆中脉冲电流产生磁场强度进行, 试验方法与圆形 B-Dot 的试验方法相同。测量波形结果比较如图 8 所示, 改变 U 形 B-Dot 线圈沿传输电缆方向长度, 测得脉冲电流波形如图 9 所示(波形 A 为电流环测量结果, 波形 B 为 U 形线圈测量结果)。

由图 8 和图 9 可知, 利用 U 形线圈测量结果与实际脉冲电流周期一致, 约为 $1.8 \mu\text{s}$, 极性相同。改变 U 形线圈在沿扁平电缆长度方向的放置位置, 波形幅值未有任何改变。由此可知, U 形线圈的测量结果与放置位置无关。改变 U 形线圈沿扁平传输电缆长度方向的长度, 测量结果如图 9, 由图知, 测量波形的幅值增大, 极性不改变。由于扁平电缆中同时通过正负 2 个方向电流, 磁场存在抵消, 因此能感应的电流强度较小, 感应电流易受干扰, 因此, 在实现 U 型 B-Dot 的工程应用研究中, 测量干扰的消除也是一大难点。

3.3 试验结果分析

对于圆形 B-Dot 线圈, 在此种测量条件下, $\omega L \gg R$ (ω 为脉冲电流频率), 式(2)可简化为:

$$S \frac{dB(t)}{dt} = \frac{L}{R} \frac{dU(t)}{dt} \quad (6)$$

结合式(3), 有:

$$U(t) = \frac{RS}{L} B(t) = \frac{RS}{L} \frac{\mu_0 I}{2\pi r_0} \quad (7)$$

$$i = \frac{U(t)}{R} = \frac{\mu_0 S}{2\pi r_0 L} I = \frac{\mu_0 N S_0}{2\pi r_0 L} I \quad (8)$$

根据示波器测量值, 实际脉冲电流幅值与 B-Dot 中感应电流幅值大小近似满足正比关系。根据式(8)可知, 通过圆形 B-Dot 线圈直接测得电流与圆形 B-Dot 线圈的横截面积、线圈匝数成正比, 与放置距离成反比, 根据图 7 的试验结果与理论分析一致。并且, 改变线圈放置与脉冲电流方向的相对位置, 会改变线圈内感应磁场的方向, 因此出现测得电流极性改变的现象。改变 B-Dot 位置, 会改变测量电流衰减系数, 短路线内部衰减最小, 中间位置衰减最大。外侧衰减系数与线圈到短路线之间的距离成正比。由此可知, 利用 B-Dot 线圈可以实现 kA 级短脉冲电流的测量, 但还需对信号进行进一步的理论分析和标定, 才可还原为真实的电流信号。

在 U 形 B-Dot 线圈中, 测得电流与待测电流关系如式(8)所示。根据式(8)可知, 测得电流与线圈的匝数、线圈电感和比例系数 k 相关, 其中比例系数可以通过试验标定获得。根据式(6)的载流直导线产生磁场关系, 可以认为 U 形线圈的衰减系数与线圈长度和线圈的面积相关; 相同面积的 U 形线圈对脉冲电流传输电缆的覆盖面积不同, 测量幅值不同。测得电流与面电流产生的磁场分布相关, 这需要进行进一步的仿真分析和试验研究。

4 结论

为了满足一些结构特殊的高压放电回路中对脉冲电流测量的要求, 提出了利用 B-Dot 线圈进行脉冲电流测试的方法。从磁场的基本理论出发, 研究了 B-Dot 脉冲电流测量方式的原理, 并设计了 2 种结构的 B-Dot 线圈。利用所设计的 B-Dot 进行脉冲电流的测量, 与标准电流环的测量结果进行比对, 证明了试验结果与理论研究一致, 而且利用 2 种类型的 B-Dot 线圈均可有效进行 kA 级短脉冲电流的测量。后续将进一步开展脉冲电流磁场分布和 B-Dot 线圈设计研究, 并将采用印制线实现圆形 B-Dot 线圈, 将该线圈与放电回路集成, 实现嵌入式 B-Dot 测量方式。

参考文献:

- [1] 韩旻, 邹晓兵, 张贵新. 脉冲功率技术基础[M]. 北京: 清华大学出版社, 2010. (HAN Min, ZOU Xiaobing, ZHANG Guixin. Pulsed Power Technology Principle[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2010.)
- [2] 樊宽军, 王相基, 尚磊, 等. 微秒脉冲电流的测量[J]. 核技术, 1999, 22(8): 469–473. (FAN Kuanjun, WANG Xiangqi, SHANG Lei, et al. Measurement of microsecond pulse current[J]. Nuclear Technology, 1999, 22(8): 469–473.)
- [3] Kurehatov I V. On the possibility of producing thermonuclear reactions in a gas discharge[J]. Journal of Nuclear Energy, 1957, 4(2): 193–198.
- [4] 奚维斌, 武松涛, 沈飏, 等. EAST 装置的磁探针设计[J]. 核聚变与等离子体物理, 2008, 28(1): 73–76. (XI Weibin, WU Songtao, SHEN Biao, et al. Magnetic probe design of EAST device[J]. Fusion and Plasma Physics, 2008, 28(1): 73–76.)
- [5] 卫兵, 顾元朝, 周荣国, 等. 真空磁绝缘线 B-Dot 电流探测器的研制[J]. 高电压技术, 2007, 33(9): 188–191. (WEI Bing, GU Yuanchao, ZHOU Rongguo, et al. Development of B-Dot current probe of vacuum magnetically insulated transmission line[J]. High Voltage Engineering, 2007, 33(9): 188–191.)
- [6] 薛飞彪, 杨建伦, 徐荣昆. 微型磁探针在 Z 箍缩负载电流诊断中的应用[J]. 强激光与粒子束, 2010, 22(9): 2055–2058. (XUE Feibiao, YANG Jianlun, XU Rongkun. Miniature magnetic probe used in Z-pinch load current diagnosis[J]. Laser and Particle Beams, 2010, 22(9): 2055–2058.)
- [7] 程诚. 串联增强型电磁轨道炮内弹道速度测量研究[D]. 绵阳: 中国工程物理研究院, 2012. (CHENG Cheng. Study on velocity measurement of enhanced internal tandem electromagnetic railgun ballistic[D]. Mianyang, Sichuan, China: China Academy of Engineering Physics, 2012.)
- [8] 郭宁. 驱动快 Z 箍缩的脉冲电流测量技术的研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2009. (GUO Ning. Research on driving fast Z-pinch pulse current measurement techniques[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2009.)
- [9] 陈重, 崔正勤. 电磁场理论基础[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2010. (CHEN Zhong, CUI Zhengqin. Electromagnetic Theory Foundation[M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2010.)
- [10] Mike O. LL NL Flash X-ray radiography machine(FXR) double pulse upgrade diagnostics[C]// 11th IEEE International Pulsed Power Conference. Baltimore, MD: [s.n.], 1997: 430–435.
- [11] HE Junjia, GUO Rui. Measurement of arc velocity in an arc-rotating pulsed power switch based on B-Dot probes[C]// L se upgrade diagnostics IEEE Transactions on Plasma Science. USA: IEEE, 2009: 658–662.

(下转第 999 页)