

DOI: 10.7652/xjtuxb201908018

高功率单孔柱-孔汇聚结构的电流损失实验研究

吴撼宇, 曾正中, 邱孟通, 张金海

(强脉冲辐射环境模拟与效应国家重点实验室, 710024, 西安)

摘要: 为了深入理解高功率柱-孔汇聚结构电流损失的机理,使用西北核技术研究所多功能辐射模拟实验平台“强光一号”加速器,针对单孔柱-孔汇聚传输结构进行大电流密度高达 6×10^5 A/cm 条件下的电流传输实验研究,利用 B-dot 探针分别测量不同结构的柱-孔结构上下游的电流。实验结果发现:柱-孔结构的电流损失与其结构参数相关,阴极孔直径越小,损失电流越大;和普通圆孔的柱-孔结构相比,水滴状异型孔的柱-孔结构的传输效率更好;另外分析发现,在阳极柱和负载中心之间的直线上,阴极孔边缘与阳极柱的距离能明显影响柱-孔汇聚结构电流传输效率,当柱-孔间隙大于传输线阴阳极间隙的 60% 时,柱-孔汇聚结构即可高效传输脉冲大电流,当柱-孔间隙大于传输线阴阳极间隙时,柱-孔汇聚结构几乎不存在电流损失。研究结果有助于对高功率柱-孔汇聚结构电流损失机理的理解,为大型脉冲功率装置的设计提供技术支撑。

关键词: 柱-孔汇聚结构;磁绝缘;电流损失;高功率脉冲

中图分类号: TM8;TN78 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2019)08-0135-06

Experimental Research on Current Loss at High Power Single Hole Post-Hole Convolute

WU Hanyu, ZENG Zhengzhong, QIU Mengtong, ZHANG Jinhai

(State Key Laboratory of Intense Pulsed Radiation Simulation and Effect, Xi'an 710024, China)

Abstract: To reveal the operating mechanism of high power post-hole convolute (PHC), a single hole PHC is designed for experiments of current transmission on the Qiang Guang I generator, an experimental platform for radiation simulation. Linear current density of the cathode and the anode post is up to about 6×10^5 A/cm in this experiment, and the downstream and upstream current of the PHC is measured by B-dot probe. The preliminary experiments show that there are different current losses for different PHC configurations, and the smaller the cathode-hole diameter is, the greater the loss current is. The gap distance is closely related to the current transmission efficiency of the single-hole PHC. When the gap distance of the PHC is larger than 60% of the AK gap distance of MITL, the PHC can transmit the high pulse current efficiently. When the gap distance of the PHC is larger than the AK gap distance of MITL, there is no current loss at the PHC. The PHC with blob cathode hole has better transmission efficiency than the PHC with normal cathode hole. This study may be beneficial to investigation of current loss mechanism of the PHC and design of huge pulsed power generators.

Keywords: post-hole convolute; magnetic insulation; current loss; high power pulse

收稿日期: 2019-02-02。 作者简介: 吴撼宇(1981—),男,博士生;邱孟通(通信作者),男,教授。 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51790521);强脉冲辐射环境模拟与效应国家重点实验室基金资助项目(SKLIPR1701Z)。

网络出版时间: 2019-05-05 网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20190429.1701.002.html>

脉冲功率技术发展的重要方向之一是研制大型脉冲功率装置,以开展高能物理^[1]、聚变能源技术^[2-3]、激波物理^[4]和等熵压缩^[5]等研究。柱-孔汇聚结构(PHC)普遍应用于大型脉冲功率驱动源以传输和汇聚高功率电脉冲,比如Z装置^[6-7]和“聚龙一号”装置^[8],同时也应用到下一代大型脉冲功率驱动源的概念设计中^[9-10]。

Z装置在PHC附近存在明显的电流损失^[11-12],即当堆栈电流达到22 MA时,PHC附近电流损失的峰值达到4 MA,损失比例达到18%;“聚龙一号”装置上的PHC有大约300 kA的电子流损失^[8]。这说明在大型脉冲功率装置的实验和研制中,PHC处的电流损失现象不可避免,而且可能成为下一代大型脉冲功率装置研制的技术瓶颈。

本文基于西北核技术研究所的“强光一号”装置的参数特点,设计了单孔PHC,以开展大电流密度条件下的电流损失实验研究。实验结果可帮助研究人员理解PHC附近电流损失的物理机制,掌握电流损失的规律,为大型脉冲功率装置的设计提供技术支撑。

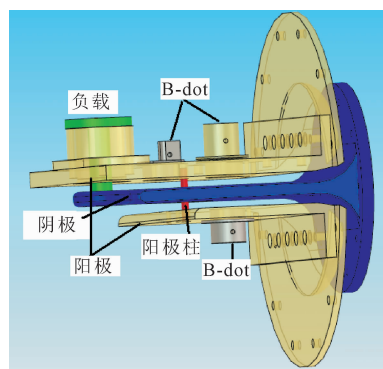
1 单孔PHC的设计

1.1 单孔PHC的结构

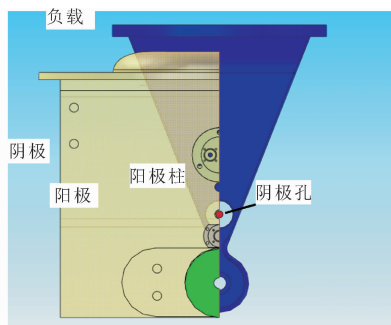
在PHC中,输入电流的面密度与磁绝缘传输线的传输特性相关^[13-15]。PHC作为磁绝缘传输线中的一段异型结构,传输特性受到输入电流面密度的影响,因此PHC的设计中,电流面密度是一个重点考量的参数。“强光一号”加速器是一台多用途辐射模拟实验平台,可以开展大量的Z箍缩等离子体实验和电子器件的辐射效应研究^[16-19]。当负载为短路状态时,真空传输线上工作电压峰值约为1 MV,电流峰值约为1.5 MA,电流上升前沿约为100 ns。基于“强光一号”装置的参数,设计一个接近Z装置电流密度的PHC是一项有相当技术难度且有趣的工作。

图1展示的是用于实验的单孔PHC的实体示意图。单孔PHC连接着负载和三板传输线,负责将三板传输线传输的高功率脉冲汇聚传输至负载,传输线边缘采用开放的结构以便后期的光学测量。

在设计过程中,为了在PHC附近获得较大的电流密度,PHC的宽度应缩短。同时,为确保三板传输线和“强光一号”装置的连接过渡尽量合理、平缓,根据装置连接处的结构来确定三板传输线阴极连接处的宽度。为尽力降低阴极板的边缘效应,阴



(a)侧视图



(b)俯视图

图1 单孔PHC及三板传输线实体示意图

极板边缘需要加工成圆弧状,阳极板的长应大于三角平板阴极的宽。最终,确定三板传输线阴极的几何形状为三角平板阴极,底宽为200 mm。PHC附近阴极板宽度最短约为18 mm、厚度为16 mm。阳极分为上、下阳极板,长为350 mm,上阳极板宽为250 mm,下阳极板宽为150 mm。三板传输线阴、阳极间距为10 mm。

图1中,阳极柱穿过阴极孔,将上、下阳极板连接起来,阴极孔直径和孔型可根据实验需要进行调整,阳极柱和阴极孔直径分别为8 mm和30 mm,负载和阴极孔的中心距离为54 mm。短路负载是一个直径为20 mm的铜杆。

鉴于该结构的特点,越靠近负载,阴极表面的电流密度就越高。另外,由于常见的PHC^[6-8]都呈现角对称分布特点,因此针对单孔PHC的实验研究有助于对PHC运行特点的理解。

阴极边缘效应导致曲率大的阴极边缘电子发射较强,但是由于阴极边缘发射面积很小,因此宏观上因边缘效应导致的电子流损失很小,可以忽略不计^[20]。

1.2 单孔PHC的三维电磁场仿真

利用3D电磁场仿真计算,可大致获得图1所示三板传输线的电感和单孔PHC附近的电流面密度。在仿真计算模型中,设置理想驱动电压波形为

前、后沿皆为 96 ns、峰值为 1 MV、脉宽为 100 ns 的梯形高压脉冲信号。仿真过程中,不考虑阴极电子发射等因素。仿真结果显示,流经三板传输线的电流峰值为 2.08 MA,前沿为 196.5 ns,电流随时间变化率峰值为 2.06×10^{13} A/s,因此可估算三板传输线(含负载、PHC)整体电感约为 48.5 nH。

将三板传输线整体等效为 48.5 nH 的电感,代入“强光一号”装置的电路模型^[21],可获得三板传输线理想的运行电压信号。在电磁场仿真模型中,继续利用该电压信号,可获得三板传输线电流分布的理想情况,以此可对单孔 PHC 的传输和汇聚作用有一个定性的了解。图 2 展示了三板传输线的驱动电压和电流信号,驱动电压的峰值约为 1 MV,流经三板传输线的电流峰值为 1.2 MA。根据仿真结果,可获得柱-孔附近阴极面电流密度超过 6×10^5 A/cm。

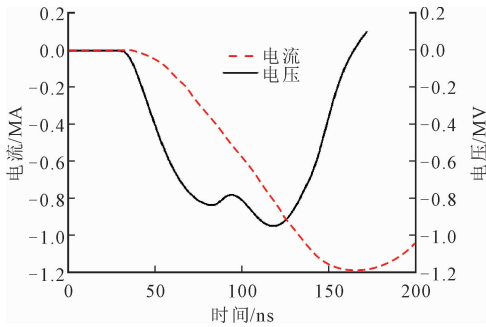


图 2 仿真模型计算得到的电压和电流波形

根据层流理论^[22-24],传输线达到磁绝缘状态的最小电流为

$$I_{\min} = I_a \gamma_L^3 g \ln[\gamma_L + (\gamma_L^2 - 1)^{1/2}] \quad (1)$$

式中: I_a 为阿尔芬电流,8 500 A; g 为传输线形状因子^[22]; γ_0 为相对论因子, γ_0 和 γ_L 的关系如下式

$$\gamma_0 = \gamma_L + (\gamma_L^2 - 1)^{3/2} \ln[\gamma_L + (\gamma_L^2 - 1)^{1/2}] \quad (2)$$

根据传输线几何结构以及仿真电压和电流,可以获得 g 最大值约为 3.18, γ_0 最大值约为 2。

根据等式(1)(2),可估算单孔 PHC 和三板传输线达到磁绝缘状态时最小电流约为 70 kA。由图 2 可知,“强光一号”加速器的输出电压和电流完全可以保证单孔 PHC 和三板传输线达到磁绝缘状态。

2 实验结果

当前,仅对两种单孔 PHC 展开了实验研究。用于实验的三板传输线整体选用不锈钢材料,仅负载采用金属铜。第一种单孔 PHC 的阴极孔是常见的圆孔;第二种单孔 PHC 的阴极孔是异型的水滴形孔。图 3 展示了水滴形孔的几何结构示意图,其

中水滴形孔两端为半径不同的圆弧,较小的圆弧直径为 15 mm,较大圆弧直径为 30 mm,两圆弧的圆心距离 d 为 20 mm,阳极柱位于大圆弧圆心。电流测量采用 B-dot 探针,其系数的相对标准偏差约为 1%。

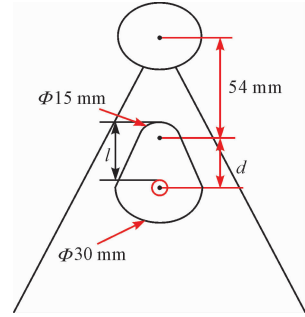
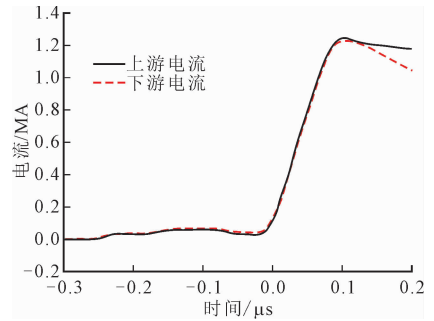
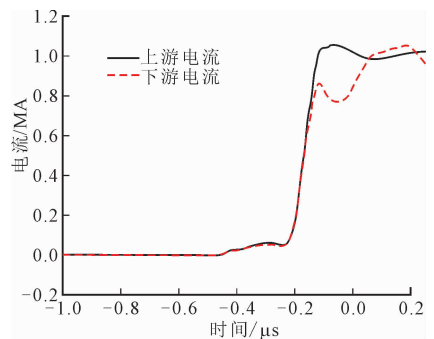


图 3 水滴形孔阴极的结构示意图

图 4 展示了本轮实验的典型电流波形。在电流峰值前,PHC 上游和下游电流波形一致性较好,仅在电流峰值处有些微差别。单孔 PHC 上、下游电路波形在电流峰值之后出现明显的差别,这主要是 B-dot 探针采集的是电流微分信号,不可避免地会同时采集到一些干扰信号,从而引起电流波形后沿的变化。因此,在分析电流波形时,主要分析电流峰值及其前沿信号携带的信息。



(a) 实验编号为 Shot18124



(b) 实验编号为 Shot18132

图 4 典型的单孔 PHC 上、下游电流波形

图 4a 展示的是实验编号为 Shot18124 的电流波形,阳极柱直径为 8 mm,阴极孔直径为 30 mm,

上游电流的峰值约为 1.25 MA,电流峰值处电流损失约为 19 kA,损失比率为 1.5%,上、下游电流波形前沿出现显著差别的时刻大约在峰值后 70 ns。由此可以认为该几何参数的单孔 PHC 可以较好地传输高功率电脉冲。

图 4b 展示的是实验编号为 Shot18132 的电流波形,阳极柱直径为 8 mm,阴极孔直径为 15 mm,上游电流的峰值约为 1.04 MA,电流峰值处电流损失约为 179 kA,损失比率为 17.2%。该结构的单孔 PHC 存在显著的电流损失,不能很好地传输高功率电脉冲。

表 1 不同几何参数单孔 PHC 的实验数据

实验编号	阴极孔直径/mm	阳极柱直径/mm	l /mm	上游电流峰值/MA	电流损失峰值/kA	相对电流损失/%
Shot18124	30	8	11.0	1.25	19	1.5
Shot18125	20	8	6.0	1.26	35	2.8
Shot18126	15, 30	8	21.5	1.31	2	0.2
Shot18127	30	6	12.0	1.17	10	0.9
Shot18128	20	6	7.0	1.22	20	1.6
Shot18129	20	8	6.0	1.15	24	2.1
Shot18132	15	6	4.5	1.04	179	17.2

注:Shot18126 的阴极孔形为水滴形,其他阴极孔均为圆形。

是阴极孔圆弧和阳极柱表面之间的距离,如图 3 所示。相比其他参数, l 与损失电流 I_L 之间的关系更为紧密。比如,编号为 Shot18124 和 Shot18126 的实验结果,由于阴极孔型不同,Shot18126 中参数 l 较大,此时电流几乎无损失,而 Shot18124 仍有较明显的电流损失。可见光图像诊断结果也表明,如图 5 所示(图中离散的白点为干扰信号),主要放电通道存在于参数 l 所示的位置(见图 3),因此参数 l 可表征等离子体放电通道长度。

理论上, l 越长阴极孔边缘的电场强度越低,放电通道的等效阻抗越大,间隙闭合时间越长。因此,在阴极孔直径满足绝缘要求的基础上,增大 l 会进一步提高单孔 PHC 的传输效率,所以水滴形阴极

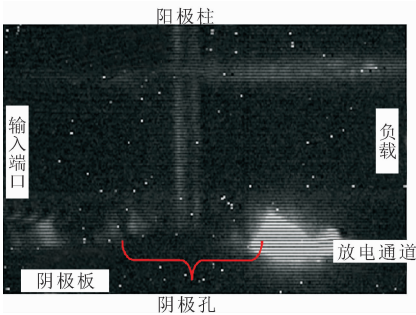


图 5 PHC 放电通道可见光图像(实验编号为 Shot18132)

表 1 列出了其他实验数据,除 Shot18126 之外,其余实验用 PHC 的阴极孔型皆为普通圆形,其中 l 为阳极柱表面与阴极孔圆弧边缘之间的距离。当阴极孔为圆孔时, l 即为阴极孔与阳极柱表面之间的距离;当阴极孔为水滴形孔时, l 即为阳极柱表面与小圆弧之间的距离(如图 3 所示)。表 1 实验数据表明,阴极孔直径、阳极柱直径对电流损失都有影响。当阴极孔直径足够大时,PHC 损失电流几乎可以忽略不计,阴极孔为水滴形的 PHC 的电流损失几乎为 0(实验编号为 Shot18126)。

需注意的是, l 位于负载和阳极柱的中心连线上,

孔 PHC 的传输效率要优于常见圆形阴极孔 PHC。图 7 展示了单孔 PHC 相对损失电流与 l/D_{MITL} 的关系,其中定义 D_{MITL} 为三板传输线的阴阳极间隙距离,为 10 mm。图 6 表明,当 l 约为 D_{MITL} 的一半时,单孔 PHC 的电流损失可忽略;当 l 超过 D_{MITL} 时,单孔 PHC 几乎无电流损失。

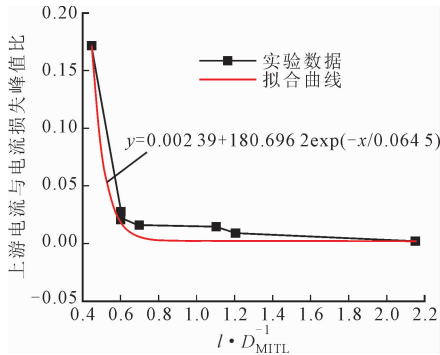


图 6 相对损失电流与 $l \cdot D_{MITL}^{-1}$ 的关系

3 结 论

本文在“强光一号”加速器上开展的单孔 PHC 电流传输特性实验,同时设计的单孔 PHC 能确保电流面密度达到 6×10^5 A/cm 以上,以便研究大电流面密度条件下单孔 PHC 的电流传输特性。

实验结果表明,不同结构的单孔 PHC 具有不同的电流传输效率。阴极孔直径越大,电流传输效率越高。阴极孔圆弧和阳极柱表面之间的距离 l 位于负载和阳极柱的中心连线上,如图 3 所示,能更明显地影响单孔 PHC 的电流传输效率。这意味对于阴极孔和阳极柱直径的某种组合,如果仅增加距离 l ,就能提升单孔 PHC 的传输效率(比如 Shot18124 和 Shot18126)。更进一步,当 l 大于上游传输线阴阳极板间隙距离 D_{MITL} 的 60% 时,单孔 PHC 即可较高效地传输脉冲大电流; l 大于 D_{MITL} 时,单孔 PHC 将不存在电流损失。实验结果表明,在相同条件下,水滴形异型阴极孔的单孔 PHC 的传输效率优于常见的圆形孔单孔 PHC。

单孔 PHC 的电流传输实验数据、内容偏少,仅能获得其电流传输特性部分定性的分析结果,但是建立起来的实验平台以及测量方法为下一步实验研究提供了基础。未来,将增加光学测量手段,丰富单孔 PHC 电流传输实验的数据,更进一步分析掌握单孔 PHC 电流传输特性。

参考文献:

- [1] SINARS D B, LEMKE R W, CUNEO M E, et al. Radiation energetics of ICF-relevant wire-array Z pinches [J]. *Physical Review Letters*, 2008, 100(14): 145002.
- [2] LI Qiang, FENG Kaiming, HE Kaihui et al. Metal wire-array load for Z-pinch used as X-ray source [J]. *China Nuclear Science and Technology Report*, 1999, S3: 108-110.
- [3] SLUTZ S A, HERMANN M C, VESSEY R A, et al. Pulsed-power-driven cylindrical liner implosions of laser preheated fuel magnetized with an axial field [J]. *Physics of Plasmas*, 2010, 17(5): 056303.
- [4] LEMKE R W, KNUDSON M D, BLISS D E, et al. Magnetically accelerated, ultrahigh velocity flyer plates for shock wave experiments [J]. *Journal of Applied Physics*, 2005, 98(7): 073530.
- [5] DAVIS J P. Experimental measurement of the principal isentrope for aluminum 6061-T6 to 240 GPa [J]. *Journal of Applied Physics*, 2006, 99(10): 103512.
- [6] ROSE D V, WELCH D R, MADRID E A, et al. Three-dimensional electromagnetic model of the pulsed-power Z-pinch accelerator [J]. *Physical Review Special Topics: Accelerators and Beams*, 2010, 13(1): 010402.
- [7] MCBRIDE R D, JENNINGS C A, VESEY R A, et

- al. Displacement current phenomena in the magnetically insulated transmission lines of the refurbished Z accelerator [J]. *Physical Review Special Topics: Accelerators and Beams*, 2010, 13(12): 120401.
- [8] 邹文康, 郭帆, 王贵林, 等. 聚龙一号装置磁绝缘传输线的电流损失特性 [J]. *高电压技术*, 2015, 41(6): 1844-1851.
- ZOU Wenkang, GUO Fan, WANG Guilin, et al. Current loss properties of the magnetically insulated transmission line in the PTS facility [J]. *High Voltage Engineering*, 2015, 41(6): 1844-1851.
- [9] STYGAR W A, CUNEO M E, HEADLEY D I, et al. Architecture of petawatt-class z-pinch accelerators [J]. *Physical Review Special Topics: Accelerators and Beams*, 2007, 10(3): 030401.
- [10] STYGAR W A, AWE T J, BAILEY J E, et al. Concept designs of two petawatt-class pulsed power accelerators for high energy density physics experiments [J]. *Physical Review Special Topics: Accelerators and Beams*, 2015, 18(11): 110401.
- [11] JENNINGS C A, CHITTENDEN J P, CUNEO M E, et al. Circuit model for driving three-dimensional resistive MHD wire array Z-pinch calculations [J]. *IEEE Transaction on Plasma Science*, 2010, 38(4): 529-539.
- [12] GOMEZ M R, GILGENBACH R M, CUNEO M E, et al. Experimental study of current loss and plasma formation in the Z machine post-hole convolute [J]. *Physical Review Special Topics: Accelerators and Beams*, 2017, 20(1): 010401.
- [13] VANDEVENDER J P, STINNETT R W, ANDERSON R J. Negative ion losses in magnetically insulated vacuum gaps [J]. *Applied Physics Letter*, 1981, 38(4): 229-231.
- [14] WU Hanyu, ZENG Zhengzhong, GUO Ning, et al. Experimental study on the current loss of MITL with cathode made of different stainless steel [J]. *IEEE Transaction on Plasma Science*, 2012, 40(4): 1177-1182.
- [15] WU Hanyu, ZENG Zhengzhong, WANG Liangping, et al. Experimental study of current loss of stainless steel magnetically insulated line with current density at MA/cm level [J]. *Plasma Science and Technology*, 2014, 16(6): 625-628.
- [16] WU Jian, QIU Aici, WU Gang, et al. X-pinch experiments on 1-MA 'QiangGuang-1' facility [J]. *IEEE Transaction on Plasma Science*, 2010, 38(4): 639-645.

- [17] 邱爱慈, 蒯斌, 曾正中, 等. “强光一号”钨丝阵 Z 箍缩等离子体辐射特性研究 [J]. 物理学报, 2006, 55(11): 5917-5922.
- QIU Aici, KUAI Bin, ZENG Zhengzhong, et al. Study on W wire array Z pinch plasma radiation at QiangGuang-I facility [J]. Acta Physica Sinica, 2006, 55(11): 5917-5922.
- [18] WANG Liangping, LI Mo, HAN Juanjuan, et al. Conversion of electromagnetic energy in Z-pinch process of single planar wire arrays at 1.5 MA [J]. Physics of Plasmas, 2014, 21: 062706.
- [19] 王桂珍, 林东生, 齐超, 等. EEPROM 和 SRAM 瞬时剂量率效应比较 [J]. 微电子学, 2014, 44(4): 510-514.
- WANG Guizhen, LIN Dongsheng, QI Chao, et al. Comparison of transient radiation effect between EEPROM and SRAM [J]. Microelectronics, 2014, 44(4): 510-514.
- [20] VANDEVENDER J P, POINTON T D, SEIDEL D B, et al. Requirements for self-magnetically insulated transmission lines [J]. Physical Review Special Topics: Accelerators and Beams, 2015, 18(3): 030401.
- [21] 黄涛, 丛培天, 张国伟, 等. “强光一号”加速器电路模拟与分析 [J]. 强激光与粒子束, 2010, 22(4): 897-890.
- HUANG Tao, CONG Peitian, ZHANG Guowei, et al. Circuit simulation and analysis for Qiangguang-I accelerator [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2010, 22(4): 897-890.
- [22] CREEDON J M. Relativistic Brillouin flow in the high v/γ diode [J]. Journal of Applied Physics, 1975, 46(7): 2946-2955.
- [23] 刘锡三. 高功率脉冲技术 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2005: 172.
- [24] CREEDON J M. Magnetic cutoff in high-current diode [J]. Journal of Applied Physics, 1977, 48(3): 1070-1077.

(编辑 杜秀杰)

(上接第 55 页)

- [12] 崔江, 唐军祥, 龚春英, 等. 一种基于改进堆栈自动编码器的航空发电机旋转整流器故障特征提取方法 [J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(19): 5696-5706.
- CUI Jiang, TANG Junxiang, GONG Chunying, et al. A fault feature extraction method of aerospace generator rotating rectifier based on improved stacked auto-encoder [J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(19): 5696-5706.
- [13] 张西宁, 向宙, 夏心锐, 等. 堆叠自编码网络性能优化及其在滚动轴承故障诊断中的应用 [J]. 西安交通大学学报, 2018, 52(10): 49-56.
- ZHANG Xining, XIANG Zhou, XIA Xinrui, et al. Optimization of staking auto-encoder and its application in bearing fault diagnosis [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2018, 52(10): 49-56.
- [14] LEI Yaguo, JIA Feng, LIN Jing, et al. An intelligent fault diagnosis method using unsupervised feature learning towards mechanical big data [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2016, 63(5): 3137-3147.
- [15] 张西宁, 向宙, 唐春华. 一种深度卷积自编码网络及其在滚动轴承故障诊断中的应用 [J]. 西安交通大学学报, 2018, 52(7): 1-8.
- ZHANG Xining, XIANG Zhou, TANG Chunhua. A deep convolutional auto-encoding neural network and its application in bearing fault diagnosis [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2018, 52(7): 1-8.
- [16] RUMELHART D E, HINTON G E, WILLIAMS R J. Learning representations by back-propagating errors [J]. Nature, 1988, 323(6088): 399-421.
- [17] KINGMA D P, BA J. Adam: a method for stochastic optimization[EB/OL]. [2018-12-22]. <http://arxiv.org/abs/1412.6980>. pdf.
- [18] HINTON G E, SRIVASTAVA N, KRIZHEVSKY A, et al. Improving neural networks by preventing co-adaptation of feature detectors [J]. Computer Science, 2012, 3(4): 212-223.
- [19] 张西宁, 雷威, 李兵. 主分量分析和隐马尔科夫模型结合的轴承监测诊断方法 [J]. 西安交通大学学报, 2017, 51(6): 1-7.
- ZHANG Xining, LEI Wei, LI Bing. Bearing fault detection and diagnosis method based on principal component analysis and hidden Markov model [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2017, 51(6): 1-7.
- [20] MAATEN L V D, HINTON G. Visualizing data using t-SNE [J]. Journal of Machine Learning Research, 2008, 9(2605): 2579-2605.

(编辑 杜秀杰)