

doi:10.11835/j.issn.1000-582X.2016.02.008

矿用高压开关电器短路开断与关合试验电源

陈 钊

(中煤科工集团重庆研究院有限公司, 重庆 400037)

摘 要:针对国内冲击发电机性能参数不足,以国外冲击发电机作为试验电源,建立基于直接试验法的矿用高压开关电器短路开断与关合试验系统,提出了一种新的技术解决方案。仿真试验结果表明,该方案满足综合性煤矿高压电气实验室建设项目技术指标和试验标准要求,为大容量开断与关合试验系统设计和建造提供一种技术思路。

关键词:短路;开断与关合;发电机;高电压;大电流;试验标准

中图分类号:TM833

文献标志码:A

文章编号:1000-582X(2016)02-058-06

Power source of short circuit breaking and making test for mining high-voltage switch

CHEN Zhao

(China Coal Technology Engineering Group Chongqing Research Institute, Chongqing 400037, P. R. China)

Abstract: In order to improve the performance parameters of domestic short circuit generators, we took a foreign short circuit generator as test power source, established a short circuit breaking and making test system on the basis of direct test method, and put forward a new technical scheme. Simulation results show that the scheme can meet the technical need and the testing criteria of the comprehensive mine electrical laboratory. The scheme provides a solving idea of constructing system for large capacity breaking test.

Keywords: short circuit; breaking and making; generator; high voltage; strong current; testing criterion

矿用高压开关电器(以下简称高压电器)主要用于保护和控制煤矿井下高压供电系统各个段落及其组成设备(煤炭行业所称高压,泛指井下交流供电 10 kV、6 kV 和 3.3 kV 额定电压等级^[1-2],在其他行业归属于中压范围^[3])。当异常开断短路故障电流时,电动力和过电压等可能危及高压电器本体,甚至电弧烧穿防爆外壳或高温引燃堆积在外壳表面的煤尘,直接引起瓦斯煤尘爆炸等恶性安全事故。也可能无法及时切除故障段落,造成上级或同级母线上开关电器误动作,扩大无计划停电事故范围,停电期间井下极易产生瓦斯积聚超限现象,是引发瓦斯爆炸事故的重大安全隐患。因此,及时、可靠地开断短路故障电流是井下安全供电的重要基础,短路开断与关合性能是矿用高压电器安全准入测试最重要的试验内容之一。目前,针对矿用高压电器的短路开断与关合试验系统(以下简称试验系统)仍未完善,安全准入时的隐患排查和事故调查时的分析验证工作存在技术困难,亟需在煤炭行业内建立适合井下电压等级的专门的试验手段。

短路开断与关合试验能力是大容量实验室的标志能力,试验系统建造费用高、周期长、技术难度大,尤其是试验电源的高要求是新建试验系统的主要障碍。若电力网试验电源提供的短路容量不足,试验期间对

收稿日期:2015-11-15

基金项目:矿用新装备新材料安全准入分析验证中心实验室建设项目(2014744)。

Supported by Safety Access Approval and Certification Center Laboratory Project of Mining New Equipment, New Materials NDRC Investment(2014744).

作者简介:陈钊(1975-),男,博士,主要从事电器电机检测技术研究,(E-mail)2009007@cqccteg.com。

电力网电压和电流产生的冲击性影响将超过标准规定^[4],危害电力网安全运行。为解决这一难题,国内外新建或扩容的大容量实验室,通常采用冲击发电机(IEC标准使用“短路发电机”称谓^[5],以下简称发电机)作为试验电源。试验电流的冲击影响作用于发电机而不是电力网,在试验系统允许范围内,试验电流和试验次数等不受电力网短路容量的严格限制。

国外发电机的研究和应用早于国内,经过改进设计后性能稳定可靠,典型的制造商有 TOSHIBA、ALSTOM 等,发电机最大短路容量为 8 880 MVA^[6],公开的参考文献较少。国内自主技术起步较晚,公开的参考文献以研究发电机为主。例如,文献[7]介绍国内发电机设计特点,文献[8]完成了该型号发电机电流衰减特性仿真试验。文献[9]介绍国外发电机发展状况,并从发电机基本要求、电流衰减特性及强迫励磁补偿、定子绝缘结构与使用容量关系,以及如何提高发电机出力等方面进行较为详细的阐述。文献[10]介绍了国外发电机性能指标,结合试验标准对试验电源的要求探讨了国内发电机的研制参数。文献[11]论述了发电机特点和选型要求,并比较分析国外发电机参数指标。

当前,建设矿用高压电器开断与关合试验系统面临的主要技术问题是:适用规格国内发电机的工频电流衰减较快^[10],使用一台发电机进行 50 kA 短路开断电流试验时,工频恢复电压很难达到 0.95 倍额定电压及以上,相当于降低了考核标准;或者采用更多数量发电机或更大容量发电机,将极大增加试验系统建设和运行成本。为此,笔者在简要阐述短路开断与关合试验系统基础上,重点论述发电机试验电源,结合综合性煤矿高压电气实验室建设项目预期技术指标,提出应用国外发电机的试验系统设计方案并进行了优化,给出了相应的模拟仿真实验结果。

1 试验系统

试验系统模拟高压电器可能遇到的短路故障工况,以规定的功率因数和频率,给高压电器试品施加电压、电流,考察试品能否可靠地开断和关合故障电流,试验过程中电弧、高温和电动力对试品是否发生损害等。根据外施电压和电流来源,分为直接试验法和合成试验法。前者的电压和电流源为同一电源,等价性较好。后者的电压和电流分别来自不同的两个电源^[12],适合于电压等级很高、开断容量很大的试验。矿用高压电器应采用直接试验法,试验系统主回路基本构成如图 1 所示^[13-14],其中:试验电源为发电机或与电力网的共同结合;出线保护开关的功能是保护、隔离试验电源和试验线路设备;阻抗的作用是保护发电机、调节试验电流和功率因数;陪试开关为合闸断路器,合闸后为试品提供试验电流,试验失败时也起着保护作用;冲击变压器用于改变电压等级、提供工频恢复电压;电阻和电容用于调节瞬态恢复电压。

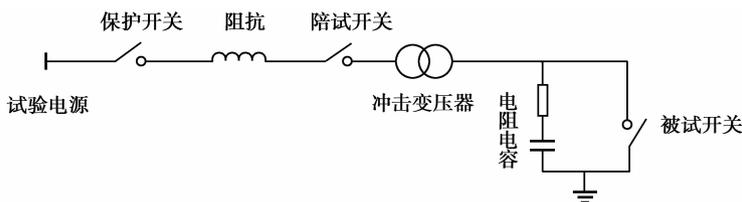


图 1 直接法试验主回路示意图

Fig.1 Schematic diagram of primary loop based on direct test method

设计和实现试验系统时,技术难点有 3 个方面:一是试验电流是试品额定电流数十倍甚至上百倍且持续时间很短,试验电源应能提供足够大的短路容量。二是试验主回路阻抗配置要合理,尽可能提高试验电流量上限值。三是二次测控回路的信息化和集成化,确保测试数据准确、有效。技术重点有 4 个方面:一是在试验断口处模拟的参数指标及其变化应符合试验标准,包括试验电压、试验电流及其衰减、功率因数、频率跌落和恢复电压^[15-16]等。二是优化试验系统结构和设备布局,减小主回路线路阻抗,同时,便于试验阻抗调节和试品在不同试验工序间运输转换。三是齐全、完备的继电保护,试品验证失败或试验系统发生故障时,能保护人员和试验设备安全。四是保证测试结果的有效性和准确性,提高试验系统综合技术水平。

2 试验电源

2.1 发电机组组成

图 2 所示为成套发电机组组成框图,主要包括发电机、拖动电机、强迫励磁系统、水冷却和油润滑配套系

统,以及相应的配电和控制设备等。发电机是极其特殊的试验用同步发电机,设计试验系统时,除了考察发电机机端容量和使用容量外,还应考虑试验过程中短路电流衰减情况,仅考虑直轴分量时电流 i 为

$$i = U_0 \left[\frac{k}{X_d + X_e} + \left(\frac{k}{X'_d + X_e} - \frac{k}{X_d + X_e} \right) e^{-\frac{t}{T'_d}} + \left(\frac{k}{X''_d + X_e} - \frac{k}{X'_d + X_e} \right) e^{-\frac{t}{T''_d}} \right], \quad (1)$$

式中: U_0 为空载电压(相电压); X''_d 为超瞬变电抗; X'_d 为瞬变电抗; X_d 为同步电抗; T''_d 为超瞬变时间常数; T'_d 为瞬变时间常数; k 为强励倍数(强励磁电压与空载励磁电压之比); X_e 为外部电抗。则短路电流开断后的恢复电压 U_r 为

$$U_r = i \times (X''_d + X_e), \quad (2)$$

式(1)、式(2)表明,恢复电压与发电机短路电流成线性关系,若发电机短路电流衰减过快,则工频恢复电压难以满足试验标准规定。通过强迫励磁系统来补偿发电机短路电流衰减特性的同时,也可补偿恢复电压。

强励磁系统可采用直流机组或静止电源^[17](电力网整流或超级电容放电),强励倍数为几倍至十几倍。拖动电机一般采用变频调速控制,从电力网获取电能,并与发电机机械同轴连接,驱动发电机达到额定转速。因发电机机械惯量很大,短路持续时间很短,通过励磁对机端电压和电流跟随,发电机在短时间内输出大电流,并使电流衰减和转速(频率)跌落符合试验标准要求。试验期间发电机输出大电流会使转子减速,同样会强迫拖动电机转速下降,在拖动电机输入电源侧产生一个瞬时电流浪涌。与电力网允许的冲击电流相比,该浪涌可忽略不计,也可切断或封锁拖动电机与电力网的电连接。

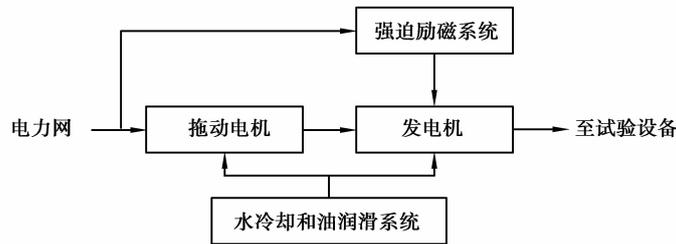


图 2 成套发电机组框图

Fig.2 Block diagram of short-circuit generator units

2.2 发电机选型

煤矿高压电气实验室开断与关合试验系统在试验断口位置处短路容量需求最大约为 1 100 MVA,对比适用规格国内和国外发电机主要参数,如表 1 所示,可以看出,国内发电机机端三相对称短路容量和短路电流有效值分别为 3 200 MVA、118 kA,国外发电机分别为 2 200 MVA、86 kA。国内一般将短路初始阶段电流最大值作为计算发电机机端容量的依据,依照文献[15],国外发电机标称值为短路结束时刻对应的容量和电流值,在短路持续时间更长情况下,这种定义更加严格。国外发电机的短路电流衰减、额定电压、恢复电压、转速跌落、试验循环次数和循环周期内冲击次数等主要性能参数较优,例如,国外发电机允许短路时间长达 0.3 s,其中 0.05~0.15 s 电流衰减量小于最大电流值的 5%,短路电流衰减特性好,是保证工频恢复电压符合试验标准要求的根本原因。外部阻抗为 28 mΩ 时国外发电机的短路仿真波形如图 3 所示,其中,(a)为电流衰减波形,(b)为强迫励磁电压和电流波形,(c)为转速跌落波形,(d)为工频恢复电压波形。显而易见,短路结束时刻对应 86 kA 短路电流,外部强迫励磁电压约为 1.1 kV,励磁电流约为 19.5 kA。在这个条件下,发电机转速约为 2 890 r/min,相比初始值跌幅为 4%;工频电压的第 2 个试验频率半波峰值及其与第 1、3 个半波峰值连线垂直点分别恢复至 21.5 kV 和 21.45 kV,经计算为 0.98 倍额定电压,满足国内外试验标准规定。

驱动国外发电机还可采用无拖动电机方式,发电机首先以电动机模式启动,当转速超过额定值后,从电动机模式切换至发电机模式,对外输出短路电流,至短路结束时刻转速跌落且能满足标准要求。优点是不需要拖动电机,建设和运行成本稍低;缺点是无法并机出力,限制了试验系统的升级扩容能力。国外发电机试验电源也可用于动热稳定性试验、电寿命试验、超低频试验和变压器突发短路试验^[18]等。以电寿命试验为例,E2 级断路器电寿命概念^[19]是:在预期使用寿命内,不经过中间检修,按照不同操作顺序,完成全部系列

(T10、T30、T60、T100 方式)开断和关合试验,连续开断与关合的累计次数(累计电流)。电寿命试验对发电机试验电源的综合性能提出了极高要求,国外发电机大修周期为 10 万次,完全可用于电寿命试验,例如, KEMA 实验室就是采用发电机进行电寿命试验的。

表 1 国内外发电机主要参数指标

Table 1 The main parameters of domestic and foreign short-circuit generator

参数	国内	国外	备注
三相对称短路容量/MVA	3 200	2 200	50Hz 时
额定频率/Hz	50/60	50/60	
额定电压 U/kV	12.0	14.0	
工频恢复电压 $U_r/(% U)$	—	>95	试验标准规定 >95% U
短路电流(rms, kA)	118	86	
短路持续时间/s	0.15	0.30	
短路电流衰减(0.05~0.15s)/%	—	<5	外部强迫励磁时
每天试验循环次数	8	无限制	最大短路电流时
试验循环内连续冲击次数	4	6	最大短路电流时
试验循环间隔时间/min	30	30	最大短路电流时
试验循环中空载带电时间/min	8	5	国内为累计值
转速跌落/%	≤8	≤5	试验标准规定 ≤8%
拖动电机功率/kW	2 500	2 300	
拖动电机转速 $n/(r \cdot \min^{-1})$	3 000/3 600	3 000/3 600	

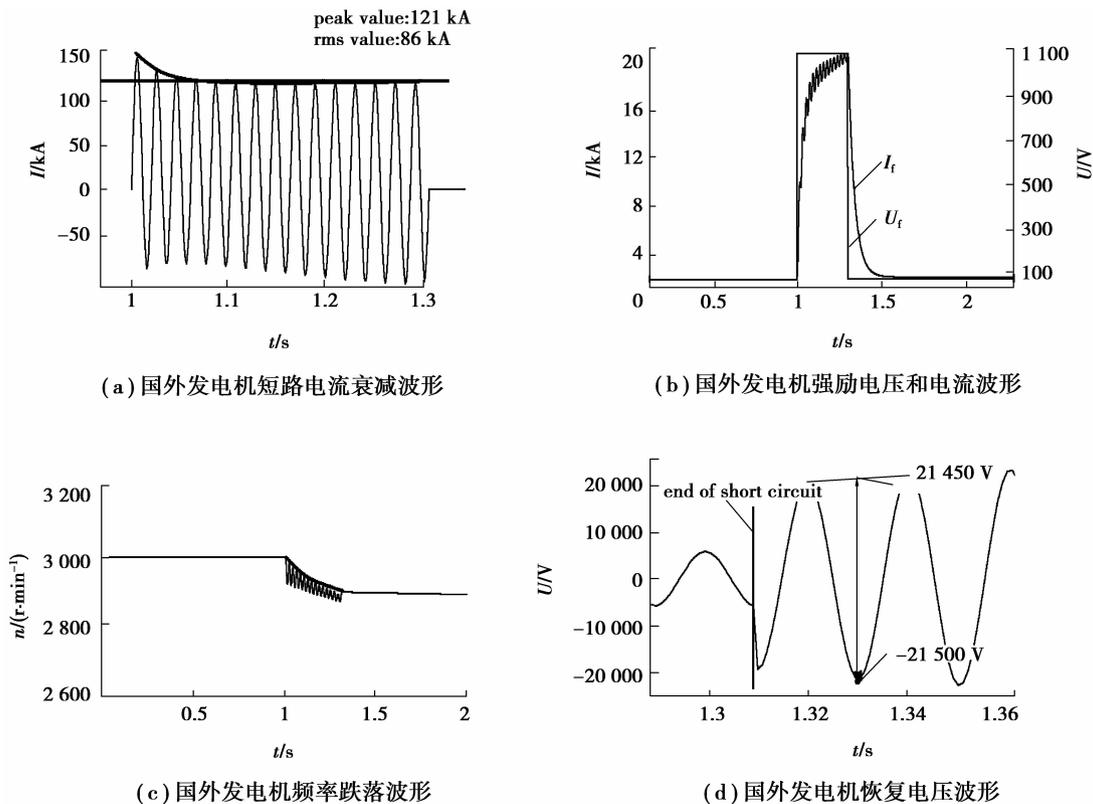


图 3 短路仿真波形

Fig.3 The simulation waveform of short-circuit

3 仿真实验

煤矿高压电气实验室开断与关合试验系统技术指标如下:试品额定电压 10 kV、6 kV 和 3.3 kV,短路开断试验最大电流值 50 kA;功率因数调整范围为 0.1~0.35。试验项目包括短路开断和关合试验、短时耐受电流和峰值耐受电流试验(动热稳定性试验)等,兼顾电寿命试验。当前采用一台发电机试验电源,预留一台发电机并网运行,预留冲击变压器位置,用于实验室升级扩容。

当试验电压比发电机额定电压低时,若发电机输出直接连接试品而不经冲击变压器,则可大幅节省试验系统建造费用。仅当试验电压高于发电机额定电压时,或试验电压低于发电机额定电压且需要足够大电流时,在主回路中才有必要配置冲击变压器用于升压或最大限度地利用发电机出力。基于这一设想并结合国外发电机性能,提出一种新的技术设计方案:参照地面非矿用试验标准,试品额定电压分别对应为 12 kV、7.2 kV 和 3.6 kV,均高于项目所需电压等级,且试验电压最大值低于发电机额定电压 14.0 kV;发电机试验电源的输出,经过保护开关后,直接连接至试品,省去昂贵的冲击变压器;采用一台国外发电机作为试验电源,通过调节发电机励磁电流以获得不同等级试验电压;采用变频拖动电机驱动发电机蓄能,电机由变频器供电和控制;采用超级电容进行强迫励磁,降低对辅助电源供电容量的要求。

以短路开断试验为例进行仿真实验,主回路电路如图 4 所示。参与仿真的主要参数包括发电机直轴和交轴瞬变和超瞬变电抗、时间常数,以及线路阻抗等参数,通过仿真获得最优励磁倍数,从而提供短路开断试验最大电流。仿真过程为:1)0 s 时刻,试品处于合闸状态、保护开关处于分闸状态,发电机处于额定电压和转速状态,励磁系统处于额定电压状态。2)1 s 时刻,预置强迫励磁,保护开关合闸后开始短路开断试验,发电机转速下降。3)1.3 s 时刻,试品分闸,若试品未分闸则保护开关动作;试验系统处于空载状态,强迫励磁卸载,发电机处于额定电压状态。表 2 所示为工频恢复电压、频率跌落等参数满足试验标准时的仿真实验结果。其中,当试验系统的线路阻抗为 100 mΩ 时,等效于长线路阻抗,在 12 kV 额定电压、励磁倍数为 12 时,试验断口位置可达到 50 kA 试验电流,满足试验系统设计指标。若试验线路布置更加紧凑,将线路阻抗降低至 45 mΩ 时,则试验电流值优于预期指标,在 12 kV 额定电压、励磁倍数为 12 时可达 63 kA 试验电流,如图 5 所示。

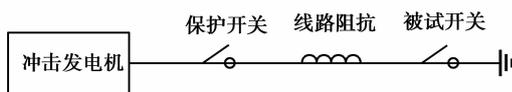


图 4 仿真电路示意图

Fig.4 Schematic diagram of simulation circuit

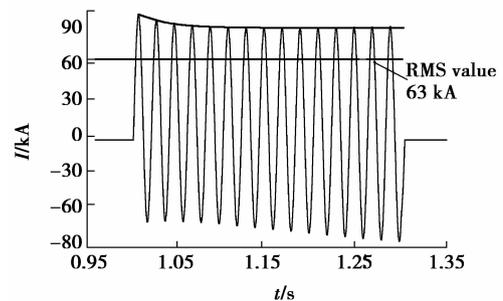


图 5 12 kV 额定电压时短路开断电流波形

Fig.5 Waveform chart of short-circuit breaking current

表 2 国外冲击发电机短路开断试验仿真数据

Table 2 The simulation data of short-circuit breaking test

设计值	额定电压/kV	12	7.2	3.6		
	最大试验电流-RMS/kA	50	40	31.5		
仿真实验值	外部阻抗/mΩ	45	100	45	100	
	最大试验电流-RMS/kA	63	50	70	40	35

4 结 语

国外发电机性能优异、稳定,能克服国内类似规格发电机的技术缺点。提出使用一台国外发电机作为矿用高压电器短路开断与关合试验电源,试验电源直连试品的总体技术方案,提高了试验系统性价比。仿真实验结果表明:国外发电机性能参数全部符合国际和国内试验标准要求,短路开断试验最大电流值达到甚至超过试验系统技术要求。为煤矿高压电气实验室建设项目提供了理论依据,也为国内类似大容量实验室设计和修建提供了一种新的方法。

参考文献:

- [1] 国家安全生产监督管理总局,国家煤矿安全监察局.煤矿安全规程[M].北京:煤炭工业出版社,2011:249-250.
The State Administration of Production Safety Supervision and Management, State Administration of Coal Mine Safety. Coal mine safety regulation[M]. Beijing: China Coal Industry Publishing House,2011:249-250.(in Chinese)
- [2] 机械工业部.JB/T8739 矿用隔爆型高压配电装置[S].北京:机械科学研究院,1998:2.
Ministry of Machinery Industry. JB/T8739 Mine explosion-proof high-voltage power distribution equipment[S]. Beijing: Academy of Machinery Science and Technology,1998:2.(in Chinese)
- [3] 国家质量监督检验检疫总局,国家标准化委员会.GB/T156—2007 标准电压[S].北京:中国标准出版社,2007:3.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine, National Standardization Management Committee. GB/T156—2007 Standard voltages[S]. Beijing: China Standard Press,2007:3.(in Chinese)
- [4] 国家质量监督检验检疫总局,国家标准化委员会.GB/T12326—2008 电能质量电压波动和闪变[S].北京:中国标准出版社,2008:2.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine, National Standardization Management Committee. GB/T12326—2008 Power quality-voltage fluctuation and flicker[S]. Beijing: China Standard Press,2008:2.(in Chinese)
- [5] 郝明剑.大容量冲击发电机的开发成果[J].上海大中型电机,2009(1):1-3.
HAO Mingjian. Development results of large capacity impact generator[J]. Shanghai Medium and Large Electrical Machines,2009(1):1-3.(in Chinese)
- [6] Yoda H, Fujita M, Nakamura E, et al. The world's largest class 8,880MVA short circuit generator[C]// 2002 IEEE Power Engineering Society Summer Meeting, July 22-25, Chicago, IL, USA.[S.L.]: IEEE,2002,2:688-693.
- [7] 张亮,刘大鹏,邵桂兰,等.大中容量短路试验发电机主要设计特点[J].大电机技术,2011(3):28-30.
ZHANG Liang, LIU Dapeng, SHAO Guilin, et al. The main design features of short-circuit-test-generators with medium and large capacity[J]. Large Electric Machine and Hydraulic Turbine,2011(3):28-30.(in Chinese)
- [8] 汪海波,万德春,洪深.大容量冲击发电机短路电流衰减特性研究[J].江苏电机工程,2013,32(5):26-29.
WANG Haibo, WAN Dechun, HONG Shen. A research on the short circuit current attenuation characteristic of short circuit generator with large capacity[J]. Jiangsu Electrical Engineering,2013,32(5):26-29.(in Chinese)
- [9] 李重光.国外大容量冲击发电机概况[J].高压电器,1975,11(4):55-64.
LI Zhongguang. General situation of foreign large capacity impact generator[J]. High Voltage Apparatus,1975,11(4):55-64.(in Chinese)
- [10] 王征庆.大容量试验短路发电机[J].高压电器,1988,24(3):27-35.
WANG Zhengqing. Large capacity test short circuit generator[J]. High Voltage Apparatus,1988,24(3):27-35.(in Chinese)
- [11] 臧尔诚.冲击发电机选型初探[J].大电机技术,1986(5):10-15.
ZANG Ercheng. Preliminary exploration on impact generator selection[J]. Large Electric Machine and Hydraulic Turbine,1986(5):10-15.(in Chinese)
- [12] 裴振江,姚斯立,何俊佳,等.特高压断路器几种开断试验回路比较[J].高压电器,2006,42(5):321-323.
PEI Zhenjiang, YAO Sili, HE Junjia, et al. Comparison of several synthetic test circuits for ultra-high voltage circuit breakers[J]. High Voltage Apparatus,2006,42(5):321-323.(in Chinese)

(下转第 106 页)

- ZHANG Liangjun, CAO Jin, JIANG Shizhong. Neural network practical tutorial[M]. Beijing: China Machine Press, 2009:22-31.(in Chinese)
- [12] 颜虹.医学统计学[M].2 版.北京:人民卫生出版社,2010:215.
YAN Hong. Medical statistics[M]. 2th ed. Beijing: People's Medical Publishing House, 2010: 215. (in Chinese)
- [13] 张德丰.MATLAB 神经网络编程[M].北京:化学工业出版社,2011.
ZHANG Defeng. MATLAB neural network programming[M]. Beijing: Chemical Industry Press,2011.(in Chinese)
- [14] 陈芳,楼文高.基于广义回归神经网络的蔬菜市场日价格预测[J].浙江农业学报,2015,27(7):1253-1258.
CHEN Fang, LOU Wengao. Vegetable market day price forecasting based on generalized regression neural network[J]. Acta Agriculturae Zhejiangensis,2015,27(7):1253-1258.(in Chinese)
- [15] Liu B, Zhao L, Zhai Z J, et al. Optimum model of GM(1,1) and its suitable range[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics,2003,35(4):451-454.
- [16] 陈永胜.基于 MATLAB 和 SPSS 的非线性回归分析[J].牡丹江大学学报,2009,18(5):101-103.
CHEN Yongsheng. Nonlinear regression analysis based on MATLAB and SPSS[J]. Journal of Mudanjiang University, 2009,18(5):101-104.(in Chinese)
- [17] 杨华龙,刘金霞,郑斌.灰色预测 GM(1,1)模型的改进及应用[J].数学的实践与认识,2011,41(23):39-46.
YANG Hualong, LIU Jinxia, ZHENG Bin. Improvement and application of grey prediction GM (1,1) model[J]. Mathematics in Practice and Theory,2011,41(23):39-46.(in Chinese)

(编辑 王维朗)

(上接第 64 页)

- [13] 方鸿发,贾继钧.电器测试技术[M].北京:机械工业出版社,1994:131.
FANG Hongfa, JIA Jijun. Electrical Appliances Testing Technology[M]. Beijing: Machinery Industry Press, 1994: 131.(in Chinese)
- [14] 徐国政,张节荣,钱家骊,等.高压断路器原理和应用[M].北京:清华大学出版社,2000:176.
XU Guozheng, ZHANG Jierong, QIAN Jiali, et al. Principle and Application of High-voltage Circuit Breaker[M]. Beijing: Tsinghua University Press,2000:176.(in Chinese)
- [15] International Electrotechnical Commission. IEC62271-100 High-voltage alternating-current circuit-breakers[S]. Geneva: International Electrotechnical Commission,2006:165-204.(in Chinese)
- [16] 国家质量监督检验检疫总局,国家标准化管理委员会.GB1984 高压交流断路器[S].北京:中国标准出版社,2014:53-69.
General Administration of Quality Supervision and Inspection and Quarantine, National Standardization Management Committee. GB1984 High-voltage alternating current circuit-breakers[S]. Beijing: China Standard Press,2014:53-69.(in Chinese)
- [17] 张海峰,黄实,赵庆斌,等.短路发电机的强励系统[J].高压电器,2014,50(8):32-35.
ZHANG Haifeng HUANG Shi, ZHAO Qingbin, et al. Strong Excitation System for Short Circuit Generator[J]. High Voltage Apparatus,2014,50(8):32-35.(in Chinese)
- [18] 国家质量监督检验检疫总局,国家标准化管理委员会.GB1094.5—2008 电力变压器承受短路的能力[S].北京:中国标准出版社,2008:3-5.
General Administration of Quality Supervision and Inspection and Quarantine, National Standardization Management Committee. GB1094.5—2008 Power transformer to withstand the ability to short-circuit[S]. Beijing: China Standard Press,2008:3-5.(in Chinese)
- [19] 顾霓鸿,王学军.高压交流断路器电寿命试验方法探讨[J].高压电器,2005,41(1):62-64.
GU Nihong, WANG Xuejun. Discussion on Testing Method of Electrical Endurance for High Voltage Alternating-current Circuit Breakers[J]. High Voltage Apparatus,2005,41(1):62-64.(in Chinese)

(编辑 王维朗)