

舰船电力载波通信的阻抗匹配设计

张皓岚¹, 贺慧英¹, 陈涛², 吴春秋², 王森²

(1. 海军工程大学电气工程学院, 湖北 武汉 430033;

2. 海军驻上海江南造船(集团)有限责任公司军事代表室, 上海 201913)

摘要: 舰船电网是具有各类负载和变电装置的移动式独立电网。首先提出在舰船照明电网中应用电力线载波通信技术(Power Line Communication), 具有信道谐波干扰少、负载简单、脉冲噪声可评估, 分布广的优势。而后在考虑趋肤效应的影响下分析计算出包括交流电阻、交流电感和相间电容在内的照明电缆参数, 根据传输线理论得出舰船照明电网电力线信道特性阻抗、输入阻抗与频率的关系, 实现电力载波调制解调器耦合电路与舰船照明电缆线的两种匹配: 一是发射端的共轭匹配, 使发射功率最大; 二是负载端的阻抗匹配, 使接收功率最大。同时给出了适用于舰船电网的电力载波耦合电器的阻抗设计参数。
关键词: 电力线载波通信; 交流电抗; 特性阻抗; 输入阻抗; 阻抗匹配

Impedance matching research on power line carrier applied to shipboard electric network

ZHANG Hao-lan¹, HE Hui-ying¹, CHEN Tao², WU Chun-qiu², WANG Sen²

(1. School of Electric Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China;

2. Naval Military Representative Office in Jiangnan Shipyard (Group) Co., Ltd, Shanghai 201913, China)

Abstract: Shipboard electric network is an independent mobile electric network with all forms of loads and power transformation devices. This paper proposes the power line carrier (PLC) application to shipboard lighting network in the first place, because lighting network is of less harmonic wave, simple load, accessible pulse noise and widespread distribution. Considering the skin effect, we calculate the lighting cable parameters including AC resistance, AC inductance and line-to-line capacitance. The relation between the frequency and the characteristic impedance and input resistance is deduced according to the Microwave Transmission Theory. And we can realize two kinds of impedance matching between PLC coupling circuit and lighting cable: one is conjugate match in transmitting terminal, which can achieve maximum transmitted power; the other is impedance match in loading terminal, which can achieve maximum received power. At the same time, we give the parameter design of the coupling circuit suitable for shipboard electric network.

Key words: power line carrier; AC impedance; characteristic impedance; input impedance; impedance matching

中图分类号: TM73 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2014)02-0104-07

0 引言

电力线载波通信技术是指采用调制/解调技术, 是利用传输工频电能的电力线传输数据和媒体信号的一种通信方式, 是电力系统特有的一种通信方式。如今陆地低压电力线通信技术已经能够提供家庭高速上网服务和远距离抄表控制^[1-4], 但对于电力载波技术的船舶应用, 还没有深入研究, 舰船的电力线资源还没有被充分开发^[5]。如果能将舰船配电网络复用为通信网络, 即采用 PLC 技术实现舰船电气设备的通信, 相对于传统的通信网络, 将会有工程量小, 投入成本低; 增装简便; 减少了故障源

等优势, 使舰船电网趋于自动化、网络化和智能化^[6-8]。

舰船电网指主配电板和应急配电板到用点负载之间的电缆连接。船舶负载种类和数量较多, 不可能每个负载都直接由主配电板或应急配电板供电, 有许多成组用点设备是由区、分电板供电, 由主配电板直接供电的电网叫一次配电网, 而由区、分电板供电的网络叫二次配电网。船舶配电网分为^[9]: a. 正常照明配电网。该电网则由照明变压器副边算起通过主配电网的照明负载馈电各照明分配电板, 再由各分配电板供电给全船所有照明灯具。b. 动力配电网。指供电给三相异步电动机负

载的电网, 也包括供电给 380 V 三相电热负载的电缆。该网络输送的电能约占全船全部电能的 70% 左右。c. 应急电网。当主电源失电时, 应急电源自动启动并通过应急电网供电给应急用户。d. 小应急电网。由 24 V 蓄电池提供的直流电提供给各应急设备。e. 弱电电网。全船无线电通讯设备、各种助航设备、信号报警系统等用户供电的低压直流电网或中频电网。将电力载波技术应用于区域舰船照明电网, 有以下优势:

(1) 照明电网中变电装置少, 各种谐波干扰和开关脉冲噪声较少。电力载波通信应用的最大制约在于, 与专用通信网相比, 电力线网络具有复杂的信道特性: 线路的阻抗、衰减、传输特性随着不同负载和接入地点的变化, 会呈现频率选择性的剧烈变化, 相差可达 50 dB 以上。对于照明电网来说, 到了区域配电一级就不再有变电装置, 各种电力电子器件产生的谐波影响可以降到最小^[10]。

(2) 照明电网的负载简单, 其对信道特性的影响可以评估。照明电网的负载是各种船用灯具, 功率较小, 状态平稳, 其电阻、电感、电容等参数已知, 可利用经典传输理论评估负载的对电力线信道反射系数和特性阻抗的影响。

(3) 照明网络分布广, 符合电力载波通信技术的应用要求。

为实现电力载波调制解调器发射端的最大发射功率和负载端的最大接收功率以实现最长距离的通信,

必须要对舰船照明配电网进行阻抗匹配分析。本文按照舰船照明配电网的特点设计电力载波耦合器的阻抗特征, 目标是实现发射端的共轭匹配和负载端的阻抗匹配。

1 照明电缆参数计算

1.1 舰船区域照明配电网的网络计算

图 1 为典型舰船区域配电网结构。按照规范要求^[11], 每个支线以两个插座计算, 每个照明插座应按二个灯头计, 则支路负载系数为 1。支线 5 负载功率 $P_{2-5} = 2 \times 2 \times 60 \text{ W} = 240 \text{ W}$, 支线电流 $I_{2-5} = 1.091 \text{ A}$ 。干线分支 2 的功率为 $P_2 = 3 \times 240 \text{ W} \times \rho = 960 \text{ W}$, ρ 为负载系数, 干线分支 2 有六个插座, 负载系数 0.75。干线分支 2 负载电流 $I_2 = 4.364 \text{ A}$ 。根据以上计算方法, 区域照明配电网路计算结果如表 1。

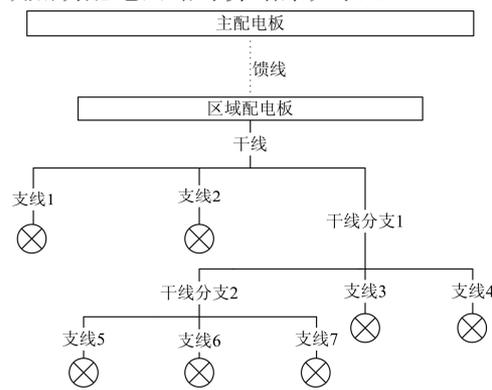


图 1 典型舰船照明区域配电网结构

Fig. 1 Typical shipboard regional lighting network

表 1 典型区域照明配电网网络计算结果

Table 1 Network calculation of typical shipboard lighting network

序号	支线			干线分支			干线		
	负载电流/A	负载功率/W	负载系数	负载电流/A	负载功率/W	负载系数	负载电流/A	负载功率/W	负载系数
1	1.091	240	1	9.091	2000	0.6	13.88	3055	0.55
2	1.091	240	1	4.364	960	0.75	—	—	—
3	1.091	240	1	—	—	—	—	—	—
4	1.091	240	1	—	—	—	—	—	—
5	1.091	240	1	—	—	—	—	—	—
6	1.091	240	1	—	—	—	—	—	—
7	1.091	240	1	—	—	—	—	—	—

则支线负载电流以 1.091 A 计, 干线分支电流负载电流以 1.091 A 计, 干线负载电流以 13.88 A 计。船用电缆载流量表确定电缆规格。船用三芯照明电缆用聚氯乙烯绝缘电缆即可。

按发热要求的安全载流量如表 2 中所示。

根据表 2, 照明支线电缆为截面积为 1 mm^2 , 干线分支电缆为 2.5 mm^2 , 干线电缆需用 4 mm^2 。表 3 为船用三芯电缆线芯的电阻和感抗值。

表 2 导体最高工作温度为 60℃ 的聚氯乙烯绝缘电缆的电流定额 (基准环境温度 45℃)

Table 2 Current rating PVC insulation cable with conduction whose maximum temperature is 60℃ (ambient temperature 45℃)

标称截面/ mm ²	单芯	双芯	三芯或 四芯
	i/A		
1	8	7	6
1.5	12	10	8
2.5	17	14	12
4	22	19	15
6	29	25	20
10	40	34	28

表 3 船用三芯电缆线芯的电阻和感抗值 (t = +20℃, f = 50 Hz)

Table 3 DC Resistance and inductive resistance of shipboard three-conductor cable (t = +20℃, f = 50 Hz)

标称截面/mm ²	电阻 R/ (Ω/km)	感抗 X/ (Ω/km)
1	18.4	0.128
1.5	12.2	0.120
2.5	7.36	0.117
4	4.60	0.109

1.2 交流电阻的计算

电力载波通信需要采用高频信号通过船用电缆, 所以会产生显著的趋肤效应^[12]。研究表明, 导线中电流密度从导线表面到中心按指数规律下降, 导线的有效截面积减少而电阻加大。工程上定义从表面到电流密度下降到表面电流密度的 1/e 时的厚度为趋肤深度 Δ:

$$\Delta = \frac{1}{\sqrt{2\pi f \rho \mu}} \quad (1)$$

其中: f 为频率; μ 为磁导率; ρ 为电导率。对于铜介质, μ = 1.257 μH/m, ρ = 5.714 × 10⁹ S/m, 均为 20℃ 时的数值。那么交流电阻 R 与直流电阻的关系可表示为

$$\frac{R}{R_0} = \frac{\pi l^2 / 4}{\pi l^2 / 4 - \pi (d - 2\Delta)^2} \quad (2)$$

令

$$K = \frac{(d/2\Delta)^2}{(d/2\Delta)^2 - (d/2\Delta - 1)^2} \quad (3)$$

则交流电阻 R = K · R₀, K 的值与频率有关, R₀ 为直流电阻。计算可得三种线路的交流电阻如图 2

所示。

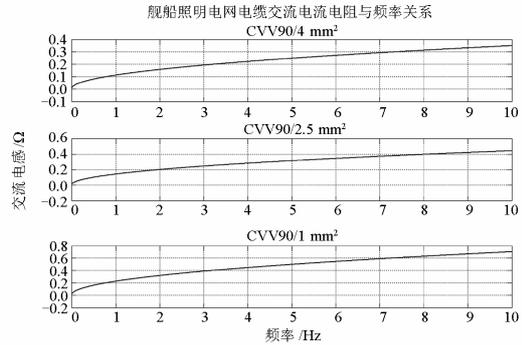


图 2 舰船照明电缆交流电阻与频率关系

Fig. 2 AC resistance of shipboard lighting cable versus frequency

可见随着频率增加线路交流电阻会不断变大, 原因是由于高频信号的载流截面由于趋肤效应变得非常狭小。10 MHz 时的电阻可为直流电阻的 80 倍。

1.3 交流电感的计算

电缆电感包括两部分: 外电感和内电感。外电感决定于电缆结构的几何尺寸, 与频率无关。电力电缆相间的聚氯乙烯绝缘层不导磁, 所以一般情况下外电感可以忽略。内电感的数值与传输电流的频率有关, 频率越高, 趋肤效应愈显著, 内电感越小。交流电感可用式 (4) 计算。

$$L = \frac{1}{2\pi r} \Delta \rho w \quad (4)$$

其中: r 为电缆芯半径; Δ 为趋肤深度; ρ 铜的电导率。三种电缆的交流电感计算结果如图 3 所示。

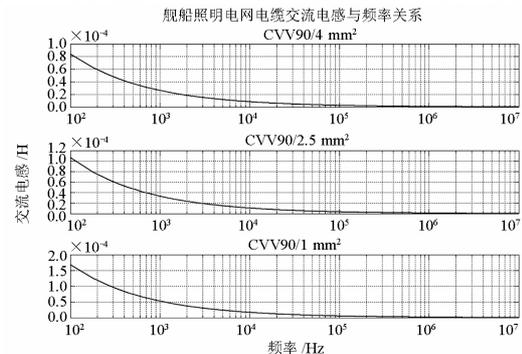


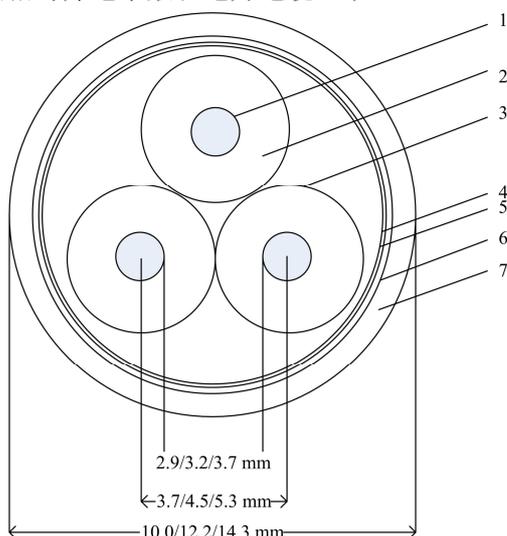
图 3 舰船照明电缆交流电感与频率关系

Fig. 3 AC inductive resistance of shipboard lighting cable versus frequency

1.4 相间电容的计算

分析对象为聚氯乙烯船用三芯电缆, 型号 CVV90^[13]。电力电缆对于工频电能的相间绝缘一定符合要求的, 所以在考虑导线间电场影响时我们忽略工频电能只关注高频载波信号。利用计算通信电

缆相间电容的方法计算载波通信下的电缆电容, 几何特征上符合电力电缆要求, 屏蔽层的组合绝缘介质等效相对介电常数和电力电缆一致^[14]。



1-铜导线; 2-聚氯乙烯绝缘; 3-非吸湿性材料填充物; 4-聚氯乙烯包带; 5-聚氯乙烯烧包衬垫; 6-铠装; 7-聚氯乙烯外套

图4 船用三芯电缆结构图^[13]

Fig. 4 Framework of shipboard three-conductor cable

图4为船用三芯电缆结构图。将其简化为无限长圆柱导线, 半径设为 R , 带点线密度设为 λ , 其周围的电场具有圆柱对称性, 可用高斯定律求出电场强度为

$$E(r) = \frac{\lambda}{2\pi\epsilon r} \quad (5)$$

将式(5)积分, 选择 $r = r_0$ 处电势为0, 可得电势为

$$\delta(r) = \frac{\lambda}{2\pi\epsilon} \ln \frac{r_0}{r} \quad (6)$$

在 $r \geq R$ 处, 电势 $\delta(r)$ 与 R 无关, 所以可以假设导线收缩为一条线密度为 λ 的直线, 电势仍不受影响。

如图5所示, 对于三芯导体来说, 3、2径向之

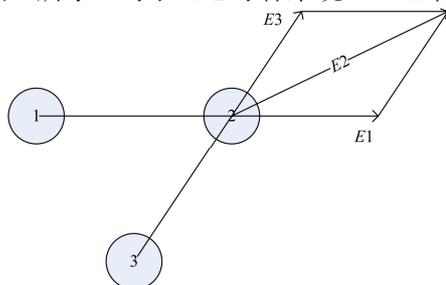


图5 船用三芯电缆中的电场矢量

Fig. 5 Electric field vector of shipboard three-conductor cable

间的电场存在1导线的分量。

$$E = E_3 + E_1 \cdot \cos(\pi/3) = \frac{2\lambda}{3\pi\epsilon r} \quad (7)$$

则3、2之间的电势差可以积分求得, 积分路径为 R 到 d , d 为导线芯间距。

$$U_{32} = \int_R^d \frac{2\lambda}{3\pi\epsilon r} dr = \frac{2\lambda}{3\pi\epsilon} \ln \frac{d}{R} \quad (8)$$

那么相间电容公式为

$$C = \frac{q}{U} = \frac{3\pi\epsilon}{2 \ln d/R} \quad (9)$$

电力电缆绝缘材料特性如表4^[13]。

表4 常用介质材料特性表

Table 4 Media characteristics

介质种类	介电常数	介质损耗角
空气	1.00	0
物理发泡聚乙烯	1.20-1.30	<0.0001
化学发泡聚乙烯	1.50	0.004
橡胶	3.2~7.0	0.008~0.05
聚四氟乙烯	2.10	<0.0002
聚苯乙烯	2.50	—
聚氨酯	7.0	—
聚氯乙烯(软)	4.00	—
聚氯乙烯(硬)	4.60	—

绝缘层为软聚氯乙烯, 则介电常数 $\epsilon = \epsilon_0 \epsilon_D$, 其中 $\epsilon_0 = 8.854e-12$ 。可计算出截面积为 1 mm^2 、 2.5 mm^2 和 4 mm^2 的CVV90船用照明三芯电缆相间电容分别为 74.938 pF 、 84.940 pF/m 和 88.141 pF/m 。

2 舰船电力线信道特性参量的计算

根据单口网络的传输特性^[15], 分别计算出特性阻抗、传输系数、负载阻抗、负载反射、反射系数和输入阻抗, 得出三种电缆带负载的输入阻抗与频率的关系如图6所示, 负载为阻抗参数已知的船用荧光灯。图中实线为特性阻抗, 虚线为输入阻抗。

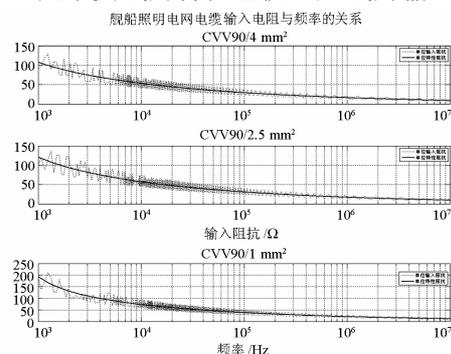


图6 舰船照明电缆输入阻抗与频率关系

Fig. 6 Input resistance of shipboard lighting cable versus frequency

对于有损耗的传输线，由于线上有损耗，使输入波和反射波的振幅沿着各自的传播方向指数衰减，致使越靠近信号源端，驻波起伏越小，阻抗的波动也越小，最后接近于传输线的特性阻抗。有耗传输线的这种特性，在损耗大时更加明显，因此可把足够长度的有耗线用作匹配负载。

3 阻抗匹配计算

阻抗匹配主要解决两个问题^[16]：一是如何从微波源中取出最大功率，这就要求信号源与传输线输入阻抗实现共轭匹配；二是如何使负载全部吸收入射功率，要求负载与传输线实现无反射匹配。我们采用第四代 OFDM 电力载波芯片 LME2980，中心频率 352 kHz，带宽 96 khz，则频率范围为 256~448 kHz。

以 CVV/1 mm² 用于支路的照明电缆为例，通过计算，在频率范围内的特性参量范围如表 5 所示。

表 5 信道特性参量取值范围

Table 5 Characteristic parameter value range of shipboard PLC channel

信道特性参量	最小值/ Ω	最大值/ Ω	中心频率/ Ω
输入电抗	-7.831 7	7.892 3	-1.189 6
输入电阻	20.148 4	38.591 5	22.322 8
特性阻抗	26.031 6	30.036 3	27.665 5

3.1 发射端共轭匹配

发射端共轭匹配的要求为

$$\begin{aligned} R_{in} &= R_g \\ X_{in} &= -X_g \end{aligned} \quad (10)$$

即耦合器电阻等于传输线输入电阻值，耦合器电抗等于传输线输入电抗的共轭。当发射端共轭匹配时，负载与传输线并没有实现匹配，所以一般情况下，传输线上电压时行驻波分布。输入阻抗公式与负载有关，因此发射端匹配随负载变化而变化。

3.2 负载端阻抗匹配

负载阻抗等于传输线上特性阻抗时的匹配称为负载匹配，负载匹配可以使负载从发射端中吸收最大功率，传输线功率容量最大，微波源工作状态稳定。本文中即是使耦合器的输出阻抗等于传输线特性阻抗。

3.3 耦合电路阻抗匹配设计

耦合电等效图如图 7 示^[17-18]。

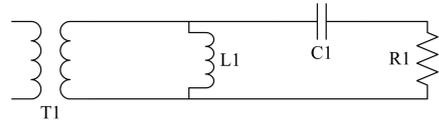


图 7 电力载波耦合器等效电路

Fig. 7 PLC coupling equivalent circuit

右侧为电力线端。其中 $L_1 = L_s + M \cdot L_m$ ，等效为线路自感与互感之和， M 为从电力载波端到电力线端的变压器互感系数。变压器为 $I:I$ ，实现电力载波端和电力线端的电气隔离。耦合电路阻抗为

$$Z_g = R_1 + j(2\pi f \cdot L_1 + \frac{1}{2\pi f \cdot C_1}) \quad (11)$$

设通信线路长度为 d ，按照匹配原则，可以计算出 R_1 、 L_1 、 C_1 的取值范围如表 6 所示。

表 6 等效耦合电路参数取值范围

Table 6 Parameters range of coupling equivalent circuit

耦合电路等效参数	取值范围
R_1	$26 \Omega \sim 30 \Omega \times d$
C_1	$\geq 0.045 \mu F / d$
L_1	$\leq 4.8 \mu H \times d$

为取得更好的高通特性和品质因数，应尽量减少电感值。从左端口看入，耦合器为 RC 高通滤波器，设截止频率为 10 kHz，则截止频率近似为

$$f_p \approx \frac{1}{2\pi R_1 C_1} \quad (12)$$

可求得等效电容 C_1 的取值约为 $5.3 \mu F / d^2$ 。从右端口看入，耦合器为 LC 高通滤波器，设截止频率为 100 kHz，则截止频率近似为

$$f_p \approx \frac{1}{2\pi \sqrt{L_1 C_1}} \quad (13)$$

计算可得等效电感 L_1 的取值约为 $0.11 \mu H \times d^2$ 。设通信线路长度为 30 m，利用 Multisim 验证元件取值，得出耦合电路幅频响应如图 8 所示，耦合电路符合高通滤波和匹配要求^[19]。

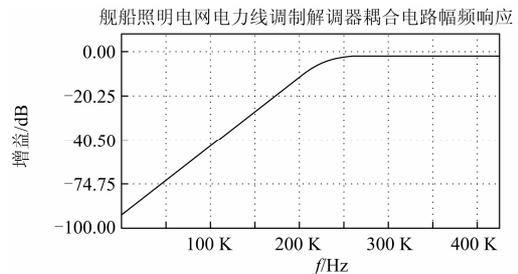


图 8 电力载波调制解调器耦合电路幅频响应

Fig. 8 Amplitude frequency response of PLC coupling circuit

4 结论

本文将电力载波通信技术应用于舰船照明配电网, 减少了负载噪声和谐波对载波通信的影响。在计算出舰船照明电缆的各类型参数基础上, 得出特性阻抗、输入阻抗与频率的关系, 针对第四代 OFDM 载波芯片, 给出了实现发射端共轭匹配和负载端阻抗匹配的电力载波调制解调器耦合电路设计。并通过电路仿真, 验证了所设计耦合电路参数符合高通滤波的要求。

参考文献

- [1] 张典谟. 电力系统通信基础[M]. 北京: 水利电力出版社, 1999: 6-10.
ZHANG Dian-mo. Basis of power line carrier technology[M]. Beijing: Hydraulic and electric Power Press, 1999: 6-10.
- [2] 何海波, 周拥华, 吴昕, 等. 低压电力线载波通信研究与应用现状[J]. 继电器, 2001, 29(7): 12-16.
HE Hai-bo, ZHOU Yong-hua, WU Xin, et al. Low-voltage power line carrier communication research and its application circumstances[J]. Relay, 2001, 29(7): 12-16.
- [3] 李安全, 周波, 殷树刚, 等. 低压电力线载波通信技术研究进展[J]. 电网技术, 2010, 34(5): 161-169.
LI An-quan, ZHOU Bo, YIN Shu-gang, et al. Advances of research on low-voltage power line carrier communication technology[J]. Power System Technology, 2010, 34(5): 161-169.
- [4] 陈凤, 郑文刚, 申长军, 等. 低压电力载波通信技术及应用[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(22): 193-194.
CHEN Feng, ZHENG Wen-gang, SHEN Chang-jun, et al. Low-voltage power line carrier communication technology and its application[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(22): 193-194.
- [5] Antoniali M, Tonello A M, Qualizza M L A. Measurements and analysis of PLC channels in a cruise ship [C]// 2011 Int Conf Power Line Communication and Its Application, Ocala.
- [6] 张有兵, 翁国庆, 曹一家. 网络化电能质量监测系统 中的配电箱载波通信[J]. 电工技术学报, 2010, 25(6): 116-117.
ZHANG You-bing, WENG Guo-qing, CAO Yi-jia. Distribution line carrier communication in networked power quality monitoring system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(6): 116-117.
- [7] 刘晓胜, 张良, 周岩, 等. 低压电力线载波通信新型组网模式性能分析[J]. 电工技术学报, 2012, 27(11): 271-277.
LIU Xiao-sheng, ZHANG Liang, ZHOU Yan, et al. Performance analysis of novel low-voltage power line communication model[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(11): 271-277.
- [8] 王琦, 宋晓东, 邢剑, 等. 舰船电力系统中智能电网技术的应用浅析[J]. 中国舰船研究, 2012, 7(2): 72-74, 96.
WANG Qi, SONG Xiao-dong, XING Jian, et al. Application of smart grid technology to shipboard power system[J]. Chinese Journal of Ship Research, 2012, 7(2): 72-74, 96.
- [9] 李麟, 沈冰, 庄劲武. 舰船电力系统[M]. 武汉: 海军工程大学出版社, 2001: 199-210.
LI Lin, SHEN Bing, ZHUANG Jing-wu. Shipboard power system[M]. Wuhan: Naval University of Engineering Press, 2001: 199-210.
- [10] 马伟明. 电力电子在舰船电力系统中的典型应用[J]. 电工技术学报, 2011, 26(5): 1-7.
MA Wei-ming. Typical applications of power electronics in naval ship power systems[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(5): 1-7.
- [11] 吴强, 甄洪斌, 张超, 等. 水面舰艇电气设备[M]. 武汉: 海军工程大学出版, 2011: 86-92.
WU Qiang, ZHEN Hong-bin, ZHANG Chao, et al. Electrical equipment surface ship[M]. Wuhan: Naval University of Engineering Press, 2011: 86-92.
- [12] 余明扬, 童磊. 集肤效应对铜排导电性能的影响分析[J]. 电气技术, 2007(4): 56-57, 65.
YU Ming-yang, TONG Lei. Skin effect on conductivity of copper busbars[J]. Electrical Technology, 2007(4): 56-57, 65.
- [13] 白雪, 刘玉华, 徐雷钧. 电缆及其附件手册[M]. 北京: 化学工业出版社, 2007: 252-267.
BAI Xue, LIU Yu-hua, XU Lei-jun. Handbook of cable and cable set[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2007: 252-267.
- [14] 屠德民, 仇斌, 刘越, 等. 新型半导电电缆屏蔽料的工作原理[J]. 电工技术学报, 1993, 11(4): 46-47.

- TU De-min, QIU Bin, LIU Yue, et al. Principle of operation in new semi conductive material for electrical shield of power cable[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 1993, 11(4): 46-47.
- [15] 张喻, 郝文辉, 高金辉. 微波技术与应用[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2006: 42-45.
- ZHANG Yu, HAO Wen-hui, GAO Jin-hui. Microwave technique and its application[M]. Xi'an: Xidian University Press, 2006: 42-45.
- [16] 范函, 张浩. 一种电力线载波通信自适应阻抗匹配方案[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(8): 79-82.
- FAN Han, ZHANG Hao. A solution of adaption impedance matching for power line communication system[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(8): 79-82.
- [17] 梁丰. 电力载波通信模块硬件设计[D]. 成都: 电子科技大学, 2006: 32-34.
- LIANG Feng. Hardware design of power line carrier communication module[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2006: 32-34.
- [18] 郑雪, 乐健, 蔡伟, 等. 电力线载波通信元件阻抗模型研究综述[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(6): 135-141.
- ZHENG Xue, YUE Jian, CAI Wei, et al. Overview of the component impedance modeling research of power line communication[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(6): 135-141.
- [19] 王卫东, 傅佑麟. 高频电子电路[M]. 北京: 电子工业出版社, 2004: 7-15.
- WANG Wei-dong, FU You-lin. High-frequency electronic technology[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2004: 7-15.

收稿日期: 2013-04-15; 修回日期: 2013-06-24

作者简介:

张皓岚(1989-), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统通信; E-mail:haolanyouming@126.com

贺慧英(1972-), 女, 副教授, 硕士生导师, 研究方向为电力系统及其自动化;

陈涛(1980-), 男, 工程师, 研究方向为机电管理。