

用于大功率超声的电缆传输特征的实验研究

沈建国¹, 陈丽华², 周翔², 盛晓斐²

(1. 天津大学功率超声实验室, 天津 300072; 2. 天津大学电气与自动化工程学院, 天津 300072)

摘要: 大功率超声电信号通过特种电缆传输时, 其电流损耗比较大。为了解决该电信号的长距离传输问题, 用 4294A 阻抗分析仪对单芯同轴电缆进行了有针对性的测试。通过改变电缆的负载电阻, 获得了一系列电缆的输入阻抗随频率的变化曲线。当负载电阻比较小时, 在一些特定的频率处, 电缆的输入阻抗很大。这时, 其电功率传输效率很低。当负载电阻比较大时, 电缆的输入阻抗取极大值的频率位置发生改变。借助于电磁波在电缆负载端的反射和透射特征, 分析了这些实验结果, 探讨了这些实验结果对大功率超声电功率传输特征的影响, 最后结合实验结果给出了大功率超声传输电缆的设计原则。

关键词: 大功率超声; 电缆; 特征电阻; 输入电阻; 传输

中图分类号: TE355

文献标识码: A

文章编号: 1000-3630(2014)-01-0025-05

DOI 编码: 10.3969/j.issn1000-3630.2014.01.006

Experimental research on the transmission characteristics of high power ultrasonic cable

SHEN Jian-guo¹, CHEN Li-hua², ZHOU Xiang², SHENG Xiao-fei²

(1. School of Pharmaceutical Science and Technology, Tianjin University, Tianjin 300072, China;

2. School of Electrical Engineering and Automation, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: When the high power ultrasonic electrical signal is transmitted via special cable, the power loss is relatively large. To solve the long distance transmission problem of high power ultrasonic electrical signal, the 4294A impedance analyzer is used to do a more detailed test for single core cable. By changing the load resistance of the cable, a series of curves which describe the differences of input impedance changing with frequency are obtained. When the load resistance is relatively low, the input impedance of the cable is very high at some specific frequencies. Then the transmission efficiency of the power is very low. While the load resistance is relatively great, the position of frequency, at which the input impedance of the cable reaches the maximum, changes. With the aid of the reflection and transmission characteristics of electromagnetic wave at the load end of the cable, the results of these experiments are analyzed in detail, and the influence of these experiments on the transmission characteristics of the high power ultrasonic power is discussed. Finally, according to the experimental results, the design principles of the high power ultrasonic transmission cable are brought out.

Key words: high power ultrasonic; cable; characteristics resistance; input resistance; transmission

0 前言

在对油井与河道的超声解堵, 各种输油管道、锅炉和化工设备的超声清洗和除垢作业中, 需要将大功率超声^[1-3]电能量传输到比较远的作业位置。具有较高频率的大功率超声电能量, 在特种传输电缆传播^[1]过程具有反射和透射特征。大功率超声作业所使用的超声换能器^[4]不但具有容性负载的特征,

而且不同的换能器其动态阻抗、谐振频率也不同。通常情况下, 大功率超声激发时, 需要将激发电信号的频率调整到换能器的谐振频率。但是, 在换能器的谐振频率处, 电缆能否最有效地传输电能量^[5,6], 如何设计电缆的结构参数和长度来实现最佳电功率的有效传输, 即如何对电缆和换能器进行最佳匹配是亟需解决的问题。

文献[7]讨论了电缆损耗; 文献[8]分析了电缆对换能器阻抗的影响; 文献[9]则根据信号反射的不同形式给出了相应的阻抗匹配方法; 文献[10]介绍了时域测试法、史密斯图法和谐振频率法三种测试同轴电缆的方法; 文献[11]则从工程应用出发, 介绍了通过测量单个连接器电压驻波比获得射频同轴电缆特征阻抗的方法; 文献[12]采用边界元法研究

收稿日期: 2012-09-16; 修回日期: 2012-12-18

基金项目: 国家 863 计划资助项目(2007AA06Z226)。

作者简介: 沈建国(1963—), 男, 河南省人, 教授, 研究方向为功率超声、声波测井及配套工艺技术的研究。

通讯作者: 沈建国, E-mail: sjanguo2003@eyou.com

了同轴电缆内导体偏心时的特征阻抗。

文献[13]对不同结构的电缆进行了比较详细的理论分析。给出了电缆的特征阻抗与电缆结构参数之间的理论关系。并且用电磁波的垂直入射和反射方法给出了电缆输入端的输入阻抗计算公式。本文用安捷伦 4294A 仪器对电缆的输入阻抗进行针对性的测试, 结果发现: 随着频率的增加, 电缆的输入阻抗具有一系列的峰值, 在输入阻抗出现峰值的频率处加电压时, 电缆中的电流较小, 此时传输效率将比较低。改变负载电阻, 峰值会随之改变。对于确定的电缆, 负载电阻越小, 峰值越大; 负载电阻增加时, 峰值减小, 在电缆的特征阻抗处, 输入阻抗接近平直, 其随频率变化较小; 当负载电阻逐渐增加时, 输入阻抗随之减小, 并随频率的变化变缓, 会在其它频率处出现峰值。

1 实验装置及初步实验结果

实验中所使用的同轴电缆的铜芯半径 a 为 5.88 mm, 外铠层的半径 b 为 15.78 mm, 长度 l 为 120m, 绝缘材料为聚乙烯, 其相对介电常数为 2.3, 则由文献[14]可得此电缆特征阻抗的理论计算值为 27.85Ω。

在同轴电缆的一端接上一个滑动变阻器, 通过改变滑动变阻器的阻值来模拟不同的负载。电缆的另外一端接安捷伦 4294A 阻抗分析仪, 如图 1 所示, 测量电缆接上负载以后的输入阻抗。图 2 是负载电阻分别为 1Ω、30Ω 以及 100Ω 时所测量的输入阻抗实部(R)随频率的变化曲线。从图 2 可以看到: 负载电阻为 1Ω 时, 在频率为 290 kHz 处输入阻抗的实部取极大值 120Ω; 频率为 600kHz 时, 输入阻抗的实部比较小, 在 10Ω 左右; 在频率为 930kHz、1600kHz 时, 输入阻抗同样达到极大值, 但是极大值的峰值较 290 kHz 处小, 即随着频率的增加, 输入阻抗的峰值逐步减小。

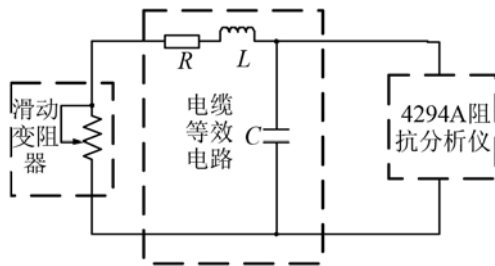


图 1 实验结构框图
Fig.1 Schematic of experimental structure

当负载电阻为 100Ω 时, 在频率 290、900、1600 kHz 处, 输入阻抗的实部取极小值 18Ω; 在

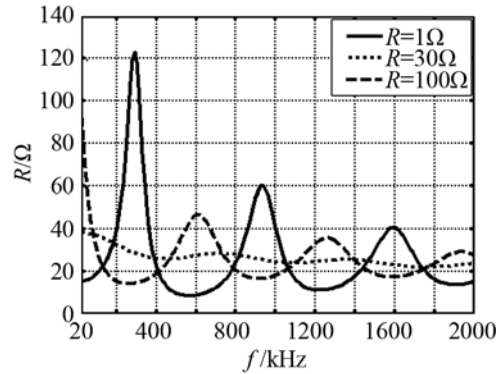


图 2 负载电阻为 1Ω, 30Ω 以及 100Ω 时, 电阻变化曲线
Fig.2 The input resistance variation curve of cable when the load resistance is 1Ω, 30Ω and 100Ω

600、1300、1900 kHz 处, 输入阻抗取极大值, 在频率为 0 时输入阻抗最大, 即输入阻抗实部的极大值所处频率位置介于负载电阻为 1Ω 时输入阻抗的极大值对应频率位置的中间。第一个极大值是 45Ω。

当负载电阻为 30Ω 时, 输入电阻曲线随频率的变化比较小, 随着频率的增加, 输入电阻从 39Ω 以波动形式逐渐减小到 22Ω。在 1MHz 的频率内, 输入电阻衰减比较小, 输入电阻值在 28Ω 左右, 最接近理论的特征阻抗值。

图 3 是与图 2 所对应的三种负载阻抗条件下输入阻抗的虚部(X)随频率的变化规律。在输入阻抗实部取得峰值的位置, 其虚部变化最快, 在实部极大值的两侧, 虚部分别取得极大值和极小值。另外, 负载阻抗为 1Ω 时的输入阻抗虚部曲线与负载阻抗为 100Ω 时曲线变化规律完全相反。频率低于 200 kHz 时, 负载为 1Ω 时的输入阻抗的虚部为正; 负载为 100Ω 时的输入阻抗虚部为负, 两条曲线在 280 kHz 位置相交, 虚部为 5Ω。在其他频率处, 两条曲线也相交。

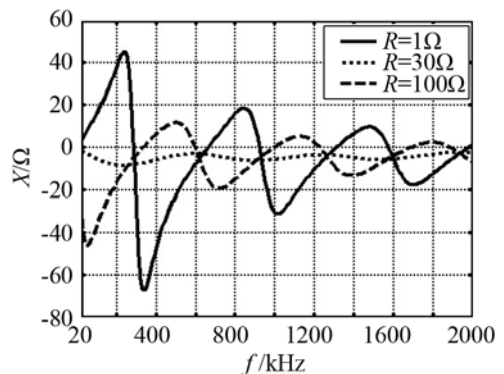


图 3 负载电阻为 1Ω, 30Ω 以及 100Ω 时, 电抗变化曲线
Fig.3 The input reactance variation curve of cable when the load resistance is 1Ω, 30Ω and 100Ω

为了进一步确定阻抗的实部取极小值时导纳的变化特征, 实验还对接入负载后的电缆输入导纳进行了测量。图 4 是导纳实部的测量结果, 图 5 是

导纳虚部的测量结果。与图 2、图 3 类似，导纳的实部和虚部同样具有明显的峰值。并且，导纳的实部(G)与虚部(B)随频率的变化规律具有对应关系：在导纳实部取极大值的两侧，导纳的虚部分别取极大值和极小值。这些特征与电阻、电感和电容所构成的二阶网络的频率响应相似。

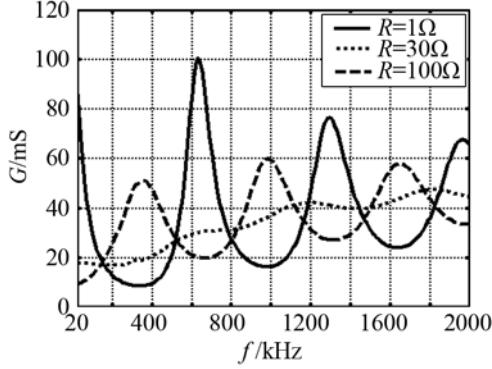


图 4 负载电阻为 1Ω, 30Ω 以及 100Ω 时, 电导变化曲线
Fig.4 The input conductance variation curve when the load resistance is 1Ω, 30Ω and 100Ω

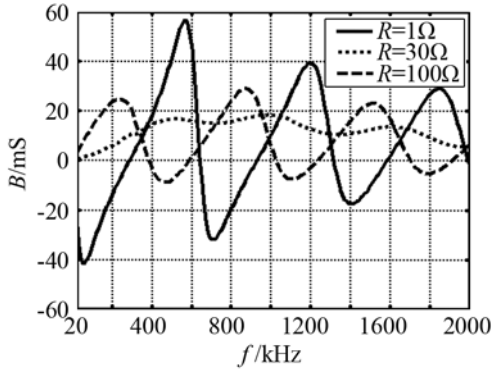


图 5 负载电阻为 1Ω, 30Ω 以及 100Ω 时, 电纳变化曲线
Fig.5 The input susceptance variation curve when the load resistance is 1Ω, 30Ω and 100Ω

2 负载阻抗的影响

改变负载电阻从 1 Ω 到 100 Ω, 重新测量得到输入阻抗的实部(R)和虚部(X)随频率的变化规律如图 6、图 7 所示。从图中可以看到：负载不同，输入阻抗曲线的峰值差别很大。即输入阻抗极大值随负载阻抗改变明显。在 200 kHz 至 400 kHz 之间，负载阻抗越小，输入阻抗实部和虚部的极大值越大，在 600 kHz 附近，负载阻抗越大，则输入阻抗的极大值越大。

3 分析与讨论

由同轴电缆的传输特征和失配时电磁波在电缆上的反射和透射特征，文献[13]在忽略了电缆的

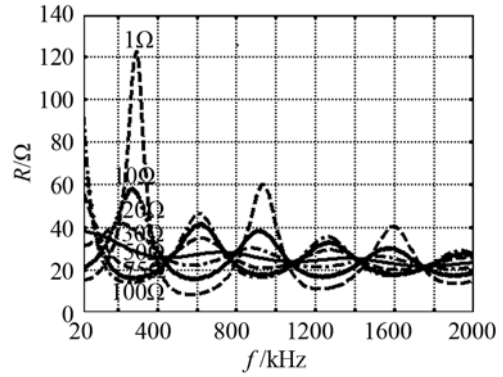


图 6 不同负载电阻值时, 电阻变化曲线
Fig.6 The input resistance variation curve for different load resistances

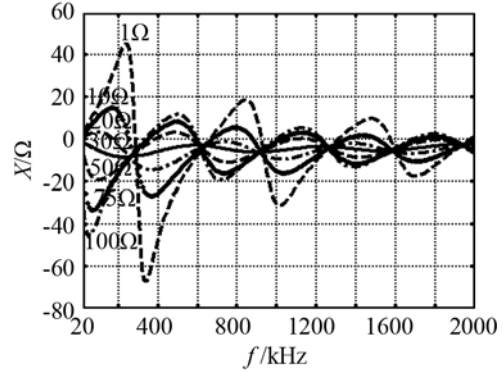


图 7 不同负载电阻值时, 电抗变化曲线
Fig.7 The input reactance variation curve for different load resistances

导电发热损耗后给出了电缆的输入阻抗 Z_{in} 计算公式：

$$Z_{in} = Z_0 \frac{Z \cos kl + jZ_0 \sin kl}{Z_0 \cos kl + jZ \sin kl} \quad (1)$$

其中： Z_0 是电缆的特征阻抗，由电缆的几何尺寸决定； Z 是负载阻抗； l 是电缆长度； k 是波数，由频率 f 和电缆的电磁波传播速度 v 计算得到：

$$k = \frac{2\pi f}{v} \quad (2)$$

$$v = \frac{1}{\sqrt{\epsilon\epsilon_0 \mu\mu_0}} \quad (3)$$

取负载电阻 Z 和电缆的特征阻抗 Z_0 为实数，对输入阻抗计算公式进行变换得实部和虚部分别为：

$$Z_R = \frac{ZZ_0^2}{Z_0^2 \cos^2 kl + Z^2 \sin^2 kl} \quad (4)$$

$$Z_X = \frac{Z_0^2 \cos kl \sin kl - ZZ_0 \sin^2 kl}{Z^2 \cos^2 kl + Z_0^2 \sin^2 kl} \quad (5)$$

当 $\cos kl = 0$ 时， $\sin kl = 1$ ， $Z_R = Z_0^2/Z$ ， Z 越小，输入阻抗的实部 Z_R 越大， Z 越大， Z_R 越小，与频率 f 为 290、900、1600 kHz 处的曲线峰值变化特征一致，对应于输入阻抗曲线的极值(该极值的数值随负载电阻值 Z 的增加而减小，两者成反比例关系)。从所测量的输入阻抗曲线中取频率为 290 kHz 时的输

入阻抗极值得到表 1, 其变化曲线如图 8 所示, Z_R 和 Z 呈反比例关系减小, 用理论值 Z_0 为 28Ω 的曲线拟合, 两者比较接近, 这时的 Z_0 比较接近电缆本身的特征阻抗。

表 1 不同负载阻抗、不同谐振频率处 Z_R 值
Table 1 The values of Z_R for different load resistances and different resonant frequencies

负载阻抗 Z/Ω	频率为 290kHz 时的 Z_R 值/ Ω
1	123
10	58
20	42
30	30
50	21
75	16
100	14

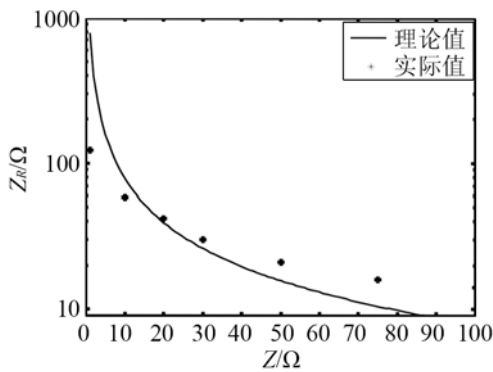


图 8 谐振频率 300kHz 处, Z_R 随 Z 的变化曲线

Fig.8 The curve of $Z-Z_R$ when the resonant frequency is 300 kHz

从上述结果可以看出: 公式(1)给出了电缆主要特征的描述。不同频率特别是频率比较高时, 电缆电导的影响不能够忽略, 公式(1)对电缆的描述精度降低, 特别是输入阻抗和导纳的数值需要通过实验测量。

4 实验结果的意义

大功率超声的激发频率由实际应用的具体条件决定。传输不同频率的大功率超声电信号, 需要采用不同结构参数的电缆。上述给出的电缆实验结果为设计传输电缆、向探头提供大功率电能提供了基础。其主要意义有以下几点:

(1) 根据电缆输入阻抗随频率的变化曲线可以得到电缆的特征阻抗值, 不但为电缆特征阻抗的测量提供了一种新的办法, 而且为电缆特征描述提供了更丰富的实际测量资料和信息。

(2) 电缆的输入阻抗越大, 相同电压条件下, 输入到电缆的电流就越小。这样, 通过电缆传输的高频电功率就越小。因此, 实验结果中, 所用激发

频率使得输入阻抗对应变大, 会引起该电缆传输效率变低。输入阻抗随频率改变说明电缆对不同频率的传输效率是不一样的。

(3) 要实现最佳功率的传输, 首先要保证换能器与电缆的阻抗匹配, 然后还要保证电源内阻与电缆的阻抗匹配, 在此前提下, 选择电缆输入阻抗的最小值或者电缆输入电导的最大值, 这时输入到电缆的电流比较大, 到达负载的电流也相应地比较大。

(4) 电缆输入阻抗最大值和最小值所对应的频率随负载变化, 所以, 不同的负载不能使用同一根电缆。当负载相差比较大时, 所使用的电缆也会有较大差别。

(5) 当负载的阻抗与电缆的特征阻抗接近时, 输入阻抗的改变随频率变化较小, 所传输的电功率随频率变化也较小。

(6) 电缆传递电功率受电缆特征阻抗与负载以及电缆长度与频率的共同约束。设计时应该根据具体的情况进行折中。首先要考虑的是电缆的特征阻抗与换能器负载的阻抗接近, 这样, 频率变化的因素所起的影响可以降到最小。如果这点不能够实现, 则要考虑电缆长度和换能器的谐振频率, 调整电缆长度使电缆接上换能器及其相关负载以后, 电缆整体的输入阻抗的极小值位于换能器的谐振频率处。

5 结论

从上述实验结果及其分析可以得到下列认识和结论:

(1) 大功率电缆传输的电磁波能量在负载处满足电磁波反射和透射规律。当负载的阻抗与电缆的特征阻抗不同时, 大部分电能量从负载处被反射回电缆, 在电缆中传播, 使电缆的传输效率随电缆长度和频率改变。

(2) 电磁波在电缆中被多次反射以后导致输入阻抗或导纳随频率和电缆长度改变, 若电缆长度确定则表现为: 电缆的输入阻抗或导纳随频率的增加, 实部有多个极大值、虚部有相应的极大或极小值与此对应。

(3) 设计电缆结构时, 应该根据大功率超声换能器的动态参数和匹配情况首先确定电缆的负载。设计电缆结构参数使电缆的特征阻抗与电缆的负载相等或者接近。

(4) 当电缆确定, 电缆特征阻抗不能够改变时, 传输电缆传输的电功率随频率改变。

(5) 应该合理设计电缆长度, 使大功率超声换能器的谐振频率位于输入阻抗的极小值位置。

(6) 本文在验证公式(1)结果的基础上, 提供了一种将电缆输入阻抗随频率变化曲线的测量方法。尽管这种方法较其他方法复杂, 但是相对于开路短路电阻测量方法来讲, 可提供有关电缆的更多的有用信息。

6 应用

将上述结果应用于大功率超声波采油电缆设计时, 由于电缆长度受井深和电导两个因素的制约, 工作中调整了电缆的结构参数, 使电缆的特征阻抗为 26Ω , 与换能器的动态阻抗 24Ω 比较接近, 并且将电缆导纳随频率的变化曲线的峰值设计到了换能器的谐振频率处。本实验室在 863 项目中设计并试制完成了功率容量达到 100kVA 的装备。采用 380 V 交流电, 直流电压在 600 V 左右, 电流最大容量为 450A, 采用 2 个双封装的 IGBT 管, 在油田投入了现场应用。现场所使用的铠装同轴电缆长度分别为 4000m、3390m 和 2200m, 这些长度是根据井的深度和油层的位置以及工程安全确定的。超声频率根据井筒条件(油井半径、套管半径以及水泥环厚度等)确定的。电缆长度与超声频率各自独立, 均进行折中考虑。现场实验时所使用的上述三种电缆, 其超声频率也各不相同。设计原则是能够有效地穿过套管井声系统, 使超声波能量透射到地层。现场实验结果显示, 传输效率得到了比较大的提高。

参 考 文 献

- [1] 林仲茂. 20 世纪功率超声在国内外的发展[J]. 声学技术, 2000, 19(2): 53-57.
LIN Zhongmao. Development of high power ultrasonics in China and abroad during 20 century[J]. Technical Acoustics, 2000, 19(2): 53-57.
- [2] 梁召峰, 周光平. 大功率低频超声场测量研究进展[J]. 声学技术, 2004, 23(1): 61-66.
LIANG Zhaofeng, ZHOU Guangping. Review of the high-power low-frequency ultrasonic fields measurement[J]. Technical Acoustics, 2004, 23(1): 61-66.
- [3] 周光平, 梁召峰. 基于声功率的液体中大功率超声场的评价方法[J]. 声学技术, 2005, 24(2): 110-112.
ZHOU Guangping, LIANG Zhaofeng. Evaluation of high power ultrasound in liquids based on acoustic power[J]. Technical Acoustics, 2005, 24(2): 110-112.
- [4] 林书玉, 张福成. 功率超声换能器电声效率及辐射声功率的测量[J]. 声学技术, 1999, 18(4): 8-13.
LIN Shuyu, ZHANG Fucheng. Measurement for ultrasonic power and electro-acoustical efficiency of high power transducers[J]. Technical Acoustics, 1999, 18(4): 8-13.
- [5] 刘新平, 房军, 金有海. 随钻测井数据传输技术应用现状及展望[J]. 测井技术, 2008, 32(3): 249-253.
LIU Xinping, FANG Jun, JIN Youhai. Application status and prospect of LWD data transmission technology[J]. Well Logging Technology, 2008, 32(3): 249-253.
- [6] 曹茂永, 张逸芳. 超声电信号在测井电缆中传输的匹配设计问题的探讨[J]. 山东矿业学院学报, 1996, 15(3): 61-64.
CAO Maoyong, ZHANG Yifang. Research on matching design of ultrasonic electrical signal transmitting through the logging cable [J]. Journal of Shandong Mining Institute, 1996, 15(3): 61-64.
- [7] Bernard Hyland. 电缆损耗对自动测试设备的影响[J]. 电子设计工程, 2009, (4): 126-128.
Bernard Hyland. The influence of cable loss on the automatic test equipment[J]. Electronic Design Engineering, 2009, (4): 126-128.
- [8] 郭榕. 传输电缆对换能器阻抗特性的影响[J]. 应用声学, 1999, (1): 40-43.
GUO Rong. Effect of transmission cable on the transducer impedance characteristics[J]. Applied Acoustics, 1999, (1): 40-43.
- [9] 叶志琼, 郑春华. 工控系统串行通信传输线的阻抗匹配技术[J]. 工业控制计算机, 2006, 19(10): 16-17.
YE Zhiqiong, ZHENG Chunhua. Impedance matching techniques of serial communication in industry control system[J]. Industrial Control Computer, 2006, 19(10): 16-17.
- [10] 周军霞. 同轴电缆特性阻抗测试方法及应用研究[J]. 机电工程技术, 2010, 39(6): 35-38.
ZHOU Junxia. The characteristic impedance measurement of coaxial cable and its application[J]. Mechanical & Electrical Engineering Technology, 2010, 39(6): 35-38.
- [11] 范伟峰, 王昱, 梁振兴. 射频同轴电缆特性阻抗测量方法的探讨[J]. 光纤与电缆及其应用技术, 2010, (2): 22-24.
FAN Weifeng, WANG Yu, LIANG Zhenxing. Discussion on the measurement method of RF cable characteristic impedance[J]. Optical Fiber & Electric Cable, 2010, (2): 22-24.
- [12] 董绪伟, 逯迈, 陈小强. 偏心同轴电缆特性阻抗的分析和计算[J]. 电线电缆, 2007, (6): 16-18.
DONG Xuwei, LU Mai, CHEN Xiaoqiang. Analysis and calculation of the characteristic impedance of eccentric coaxial cables[J]. Electric Wire & Cable, 2007, (6): 16-18.
- [13] 刘歧元, 王鸣阳. 电磁学[M]. 北京: 人民教育出版社, 1982.
LIU Qiyuan, WANG Mingyang. Electromagnetics[M]. Beijing: People's Education Press, 1982.
- [14] 刘长军. 射频通信电路的设计[M]. 北京: 科学出版社, 2010: 48-49.
LIU Changjun. Design of RF Communication Circuit[M]. Beijing: Science Press, 2010: 48-49.