

引用格式:胡召鹏,李实锋,杨朝中,等.增强型罗兰发射天线试验方法研究[J].时间频率学报,2021,44(4):310-316.

# 增强型罗兰发射天线试验方法研究

胡召鹏,李实锋,杨朝中,袁江斌,闫温合

(中国科学院 国家授时中心,西安 710600)

**摘要:**增强型发射天线作为高精度地基授时系统的重要组成部分,其测试方法也同样至关重要。由于该发射天线体积大,造价高,结构复杂等原因,对正在建设或已建设完成的天线系统进行详细测试难度较大,因此通过缩比模型的实验方法进行初步测试,既可以对发射天线的各项参数进行初步设计,也可以根据工程的需要进行相应调整,从而为实际建设提供实验基础,并提前解决和分析可能遇到的各种问题,更好地服务于高精度地基授时系统的建设。

**关键词:**发射天线;缩比模型实验;输入阻抗;有效高度

DOI:10.13875/j.issn.1674-0637.2021-04-0310-07

## Research on test method of enhanced Loran transmitting antenna

HU Zhao-peng, LI Shi-feng, YANG Chao-zhong, YUAN Jiang-bin, YAN Wen-he

(National Time Service Center, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710600)

**Abstract:** The test method of the enhanced transmitting antenna, which is an important part of the High-precision Ground-based Time Service System, is very important. Due to the large size, high cost and complex structure of this antenna, it is difficult to test the antenna system which is under construction or completed in detail. Therefore, the preliminary test is carried out using the experimental method of reduced scale model. With the help of this method parameters of the transmitting antenna can be preliminarily designed and adjusted according to the needs of the project. It provides the experimental basis for the construction, and solves and analyzes various possible problems in advance, and serves the construction of the High-precision Ground-based Time Service System better.

**Key words:** transmitting antenna; scaled model experiment; input impedance; effective height

## 0 引言

罗兰发射天线技术经过多年的发展,目前趋于成熟,主要分为单塔伞状天线和四塔倒锥天线。增强型罗兰发射天线属于电小天线(电小天线是指最大尺寸小于工作波长 $1/2\pi$ 或 $1/10$ 的天线,电小天线一般只存在于长、中、短波和超短波波段中<sup>[1]</sup>),具有辐射电阻小、容抗大、辐射效率低、频带窄、规模

庞大、结构复杂和占地面积大等特点，其基本功能是承载发射机输出的大功率信号，将电流能量转变为无线电波并传送到空间，是辐射波的变换器和能量转换装置，最终完成大功率罗兰授时信号的高效辐射发射。

依据高精度地基授时系统的建设方案，未来将在我国西部建设三个增强型罗兰发射台，因此增强型罗兰发射天线的实验及测试工作显得尤为重要。通过解析计算以及计算机仿真的结果，设计并架设了比例为1:100的缩比模型，再结合模型试验对已有的设计方案进行有效的验证，同时比较不同天线状态，对计算中不能完全确定的局部尺寸进行比较、验证得出最优的天线尺寸。通过缩比模型试验能够直接测量出模型的输入阻抗、自谐频率以及静态电容，并可利用场强测试以及根部电流测试来间接得出模型的有效高度，这些参数基本上能够准确地反映出实际尺寸下天线的各项电气性能指标<sup>[2-4]</sup>。

## 1 缩比模型测试方法

### 1.1 静态电容测试

一般来说，在天线模型基座上测得的电容为视在电容，并不总是天线的静态电容，只有当观测的频率接近于零时，才能认为测得的电容接近静态电容。因此，在实验中使用静电容测试仪的工作频率越低，所测得的结果越接近真实情况。本实验使用工作于60~100 Hz的电容测试仪，直接在天线根部测出天线的静态电容，以减小误差。

### 1.2 天线输入阻抗和自谐频率测试

长波发射天线的输入阻抗分为实部（输入电阻）以及虚部（输入电抗）两部分。其真实的输入电阻不能准确地通过模型试验来测得，这是因为在缩比模型工作频段内，地损耗电阻及调谐元器件损耗电阻占去了天线输入电阻的相当大部分。地损耗电阻与地电导率有关，天线模型的电导率应该等于实际天线场地的电导率乘以模型的比例倍数，要在相当大的区域内模拟出与实际场地电导率成比例的“地面”来，可以说是很难实现的。因此长波天线的输入电阻只能在实际天线架设完毕之后进行实地测试。真实天线的输入电抗部分是能够通过缩比模型来测量的，并且按照电抗曲线可以得出模型天线的谐振频率，从而推导出真实天线的谐振频率<sup>[5]</sup>。

在天线缩比模型试验中，使用矢量网络分析仪校准后，在模型天线根部直接测得天线的输入阻抗和谐振频率。测试原理图如图1所示，使用仪器如图2所示。

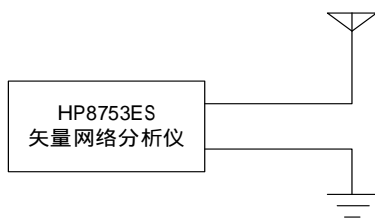


图1 阻抗测试连接示意图



图2 HP8753ES 矢量网络分析仪

模型天线的输入阻抗测试是缩比模型试验的重要内容，测试的准确度与测试方法密切相关，在进行测试时，对仪表进行校准尤其重要。而且，由于缩比模型所工作的频段，外界电磁波干扰较大，需要进行多次测试才能得出较准确的结果<sup>[5-6]</sup>。

### 1.3 天线有效高度测试

有效高度是长波天线的重要电气参数，该数值将直接影响到天线的辐射电阻和效率，因此必须在天线的缩比模型上得到准确的测量结果。通常使用的方法是先测出辐射区的有效垂直场强和天线根部的电

流 (测试示意图如图 3 所示), 再按照舒来依金—范德波尔地波场强公式推算出被测天线模型的有效高度<sup>[7]</sup>:

$$h_e = \frac{E\lambda D}{120\pi I_A} \quad (1)$$

式 (1) 中,  $E$  为场强 (mv/m);  $\lambda$  为波长 (m);  $D$  为距离 (km);  $I_A$  为天线底部馈入电流 (A);  $h_e$  的单位是 m。

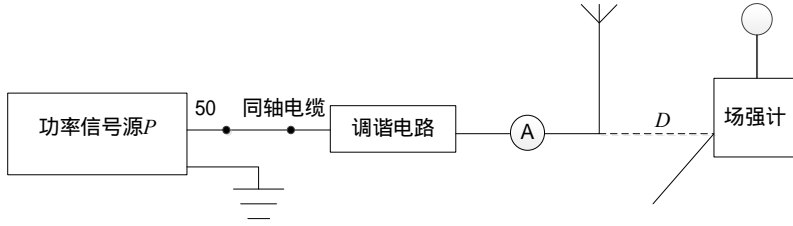


图 3 有效高度测试示意图

图 3 中:  $P$  为功率信号源;  $A$  为高频电流表, 其型号为 62C51 型, 量程 0~1.5 A;  $D$  为测试距离; 调谐电路使用无感电阻、可调电容、可调电感串连组成; 场强计采用 ML428B 型<sup>[8-9]</sup>。

为了准确地测出场强, 减小周边环境及仪表的影响, 必须用场强修正法对场强进行修正。修正原理就是利用一根标准单极子作为参考, 采用对比法对场强测量结果进行修正。

选用一根与天线模型高度相等的单极子天线作为发射天线, 理论上其有效高度等于实际高度的一半, 即  $h_e = \frac{1}{2}H$ 。利用该单极子天线发射, 在模型场强待测点  $\rho$  处测得场强  $E_1$ , 另外利用理论有效高度可推算出场强的理论值  $E_2$ , 令  $K = \frac{E_2}{E_1}$ , 则  $K$  便是所用场强计的修正系数。这意味着在这一频率和距离上,

模型天线场强测量值乘以  $K$  才是修正过后的场强。模型天线修正后的场强  $E_A$  为

$$E_A = E_0 + K \quad (2)$$

式 (2) 中,  $E_0$  为模型天线直接测试得到的场强。利用  $E_A$ , 而不是利用  $E_0$ , 就可以计算出经过修正后的有效高度。

为了消除由距离和频率引起的误差, 可以采用对模型天线和单极子校准天线进行同时测试的方法。假定所使用的场强计在  $\rho$  处的修正系数为  $K$ , 则高为  $H$  的校准天线的真实场强为  $KE_1$ , 有

$$\frac{H}{2} = \frac{E_1\lambda\rho}{120\pi I_{A1}} \quad (3)$$

模型天线在该接收点的场强为  $KE_2$ , 有

$$h_e = \frac{E_2\lambda D}{120\pi I_{A2}} \quad (4)$$

将式 (3) 和 (4) 相除, 可得:

$$h_e = \frac{H}{2} \cdot \frac{I_{A1}}{I_{A2}} \cdot \frac{E_2}{E_1} \quad (5)$$

式 (5) 中,  $E_2$  和  $E_1$  的单位是  $\mu\text{V/m}$ 。

应该指出, 模型天线的有效高度测试受环境气候的影响较大, 因此需要进行多次测量, 而后取其平均值<sup>[10-12]</sup>。

## 1.4 缩比模型测试

单伞绝缘天线缩比模型仅有一座中心绝缘塔，塔高 2.8 m，为天线主辐射体，其上均匀布置有 12 根顶线，顶线与塔夹角  $50^\circ$ ，长度 1.4 m，并通过绝缘子串连接拉线至地锚点；中心绝缘塔设置三方四层纤绳，将桅杆固定；天线底部采用铜板做地，周围采用辐射状地网，共 36 根；缩比模型天线如图 4 所示。天线根部通过线缆连接至地下测试室。以上述单伞天线为基本模型，调整天线中心绝缘塔高度、顶线与塔夹角、顶线长度等参数，测试不同状态下天线的输入阻抗、自谐振频率、静态电容及有效高度。

缩比模型在单伞塔底引出一根馈线，由一根 3 m 长同轴线引入地下测试间，进行阻抗及功率发射测量。调谐测试间建设于中心桅杆根部地网下方以减小测试干扰。缩比模型的顶容线、高馈线、地网线及跳线分别使用不同直径的铜导线，支撑塔纤绳使用钢丝绳<sup>[13-14]</sup>。



图 4 缩比天线整体图

单伞绝缘天线，中心桅杆作为天线的主辐射体，其高度和顶线长度及夹角对天线的自谐频率、有效高度有较大的影响，合适的尺寸将直接决定天线能否全面达到指标要求。缩比模型试验除验证解析计算和仿真分析的结果外，主要针对选取不同的中心桅杆高度和顶线长度及夹角下引线长度进行测试，保证其他几何尺寸参数不变，并将结果进行对比选出最佳尺寸。单伞天线缩比模型除图 4 参考模型天线外，共测试了如表 1 所示的 2 种天线状态。

表 1 单伞缩比模型试验天线状态

序号	天线状态		
	中心塔高/m	顶线长/m	夹角
1	2.8	1.5	$45^\circ$
2	2.8	1.4	$50^\circ$

模型天线对不同状态下输入电阻  $R$ 、输入电抗  $X$ 、接收点场强  $E$ 、根部电流  $I$ 、静态电容  $C_0$  进行了测试，并推算出有效高度  $h$  和自谐振频率  $f_0$ 。

参考天线中心塔高 2.8 m，根据两种不同的天线状态测试结果如图 5，图 6，图 7 和图 8 所示：

中心塔高 2.8 m，顶线长 1.5 m，夹角  $45^\circ$ ，静态电容 136 pF 自谐振频率 11 MHz。

中心塔高 2.8 m，顶线长 1.4 m，夹角  $50^\circ$ ，静态电容 132 pF 自谐振频率 10.8 MHz。

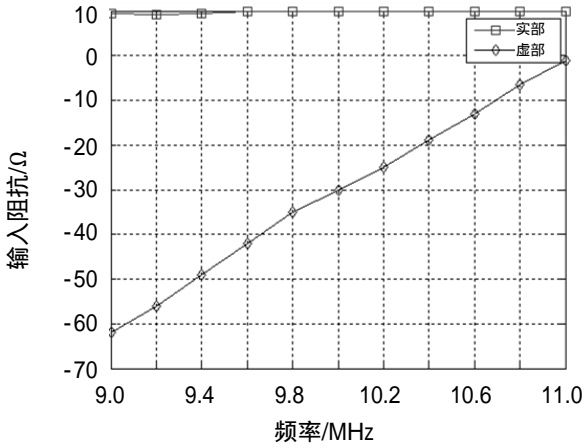


图 5 单伞模型天线 1 输入阻抗

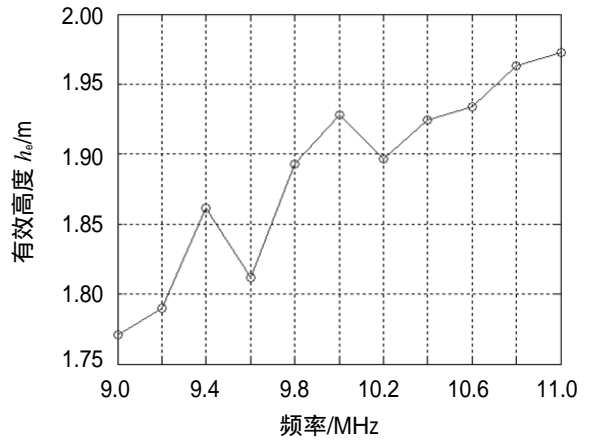


图 6 单伞模型天线 1 有效高度

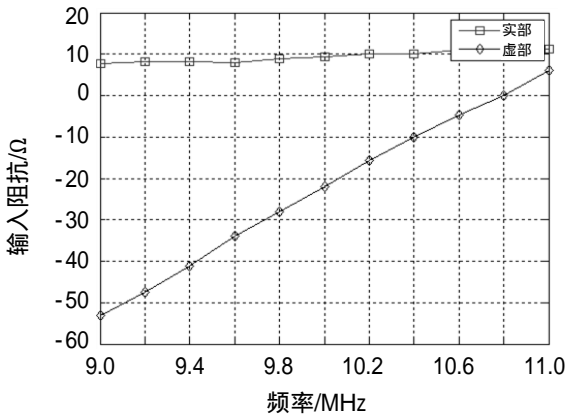


图 7 单伞模型天线 2 输入阻抗

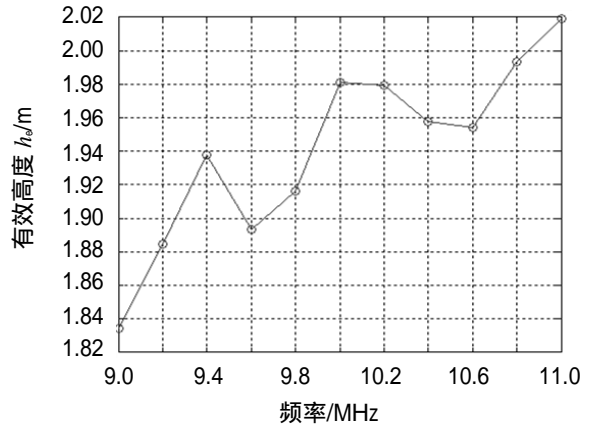


图 8 单伞模型天线 2 有效高度

## 1.5 两种状态下模型天线参数对比

从上述 2 种状态的测试结果可以看出,模型天线的输入电抗及谐振频率测试较稳定准确,多次测量结果基本一致;而有效高度的测试结果在频段内波动较大,约有 10%左右的起伏,这与理论分析有一些差别。分析其原因,主要是因为模型天线的工作频段为低频频段,此波段在进行场强测试时的外界干扰较大,并且环境和测试仪器也会带来一定误差,按照经验这一波动应视为正常。在此基础上,对整个测试频段内的有效高度进行平均,采用平均有效高度的方法能够比较准确地反映模型天线的真实有效高度。

从上面参数测试结果对比可以看到,中心塔高 2.8 m,顶线长 1.4 m,夹角为  $50^\circ$  的状态时,测试的缩比模型天线电气参数都能满足设计需求,且占地小的情况下性能优异,因而我们选用该天线状态作为单伞天线的基本状态<sup>[15]</sup>。

## 1.6 计算、仿真及模型实验的结果对比

我们将天线的电气解析计算、软件仿真及模型实验结果进行对比。对比时将模型天线实验数据进行缩放,还原到实际天线参数的数值。图 9 是单伞绝缘天线初步选定的模型 2 辐射电阻计算、仿真及模型实验的结果对比。图 10 是天线输入电抗的结果对比。辐射电阻的测试结果是由测试的有效高度推导得出。图 11 是天线有效高度的计算、仿真及模型实验结果<sup>[16]</sup>。

从天线参数的计算、仿真及模型实验结果的对比不难看出,一些关键的电气参数如有效高度、辐射电阻、输入电抗等,通过解析计算、计算机仿真与模型实验的结果变化规律一致性较好、误差较小,充

分验证了电气参数计算的准确性。在缩比模型试验中,铁塔、顶线及拉线的外径很难按照比例进行缩小,这对于静态电容有一定影响。因此,为了得到更精确地测试数据,需要对静态电容值进行一定的修正。

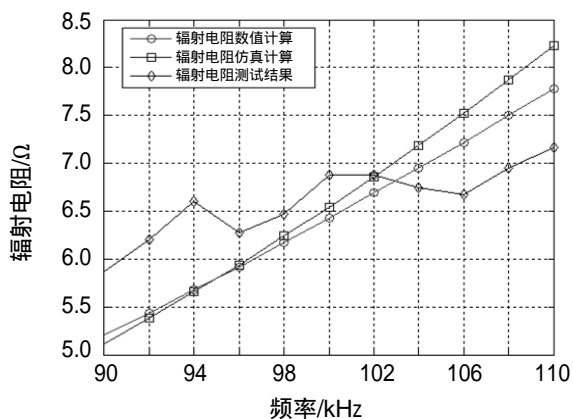


图9 单伞绝缘天线模型2辐射电阻对比

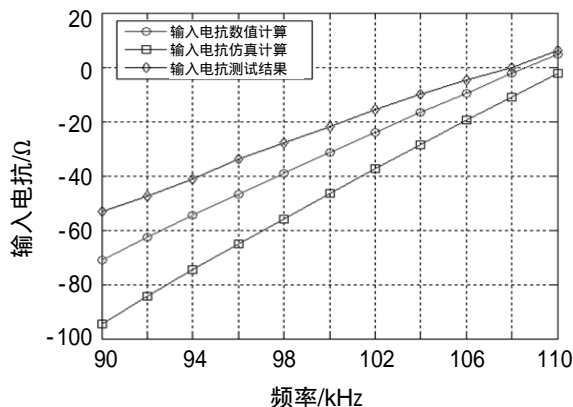


图10 单伞绝缘天线模型2输入电抗对比

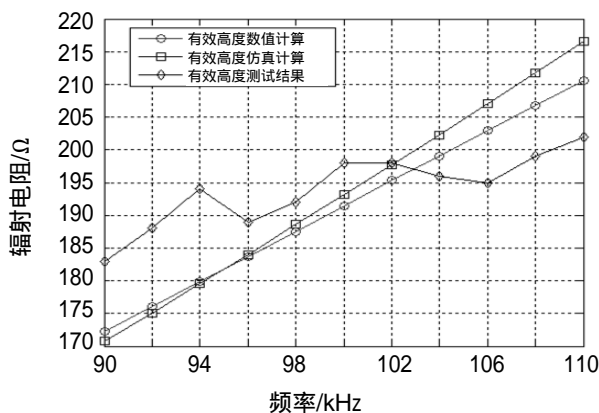


图11 单伞绝缘天线模型2有效高度对比

## 2 总结

通过对增强型罗兰发射天线系统各电气参数的反复核算,并结合计算机仿真以及缩比模型试验的验证,最终可以确定单伞绝缘天线系统的组成及详细的电气、结构等参数,该测试方法的运用,将为高精度地基授时系统增强型罗兰发射天线的最终建设提供良好的技术支撑,并为发射天线系统的相关测试工作提供有效的理论依据。

## 参考文献:

- [1] LOPEZ A R. Fundamental limitations of small antennas: validation of wheeler's formulas[J]. IEEE Antennas and Propagation Magazine, 2006, 48(4): 28-36.
- [2] 刘建国, 高万明, 陈广林. BPL 授时发播系统天线物理特性的研究[J]. 现代电子技术, 2012, 35(9): 57-61.
- [3] 段建文. BPL 长波授时信号发播控制方法的研究[D]. 西安: 中国科学院国家授时中心, 2008.
- [4] 方福胜, 王治才. BPL 长波天线体吊装悬挂系统的某些结构改进[J]. 时间频率学报, 2012, 1(1): 11-15.
- [5] 郭加宁, 谢欢欢. 大型长波天线支撑塔对电气性能影响分析[J]. 现代导航, 2014, 3(6): 201-20.
- [6] 黄纪军, 刘克成, 庞卫勇. 伞形天线扫描分析[J]. 国防科技大学学报, 1996, 2(12): 68-72.

- [7] 孙胜利, 李云红. 甚低频伞形天线的电气性能研究[J]. 舰船电子工程, 2016(6): 59-60.
- [8] HEYES D D. The Loran-C midcontinent expansion project-a status report[C] // IEEE Symposium on Position Location and Navigation, Orlando: IEEE, 1988.
- [9] KOO H, NAM S. Modified L-type eloran transmitting antenna for co-location with an AM antenna[C] // 2016 International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP), Okinawa: IEEE, 2016.
- [10] LIANG Min, ZHANG Hong-yin, ZHANG Fu-shun, et al. A novel single-fed high-gain and phase-adjustable transmitting antenna element for wireless power transmission[C] // 2018 IEEE MTT-S International Wireless Symposium (IWS), Chengdu: IEEE, 2018.
- [11] PAPAMICHAEL V C, KARADIMAS P. Performance evaluation of actual multielement antenna systems under transmit antenna selection/maximal ratio combining[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2011, 10(2): 690-691.
- [12] KAWAKAMI H, HAGA T, HOSOIDIGITAL K. Digital terrestrial broadcasting antennas-4-plane synthesis pattern and gain improvement[C] // 2007 IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium, Honolulu: IEEE, 2007.
- [13] ERFANI E, TATU S, JAZI M N, et al. A millimeter-wave transmitarray antenna[C] // 2016 17th International Symposium on Antenna Technology and Applied Electromagnetics (ANTEM), Montreal: IEEE, 2016.
- [14] HANSEN P M, RODRIGUEZ A. Performance analysis of large electrically small transmit antennas[C] // 2011 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation (APSURSI), Spokane: IEEE, 2011.
- [15] LI H, LIU C. Calculation on characteristics of VLF umbrella inverted-cone transmitting antenna[C] // 2014 Sixth International Conference on Ubiquitous and Future Networks (ICUFN), Shanghai: IEEE, 2014.
- [16] MONIN A. Submarine floating antenna model for LORAN-C signal processing[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2003, 39(4): 1304-1315.