

# 避雷针接闪对通信台站布线及接地系统影响分析

杜思深, 庄绪春, 李伟

(空军工程大学信息与导航学院, 陕西西安, 710077)

**摘要** 从避雷针保护范围及雷电流分析入手,研究了避雷针引下线周围,通信台站布线及接地系统构成的金属线框,若非闭合其回路上的感应电压大小与雷电流关系,若闭合其回路上的感应电流以及各段电压的变化,计算结果表明:雷电峰值越大,波头时间越短,金属线框距雷击点越近,设备损坏可能性越大;若该金属线框作为通信台站防雷、保护及工作共用接地线,因雷电强电磁感应,使共用接地系统的地线电位无法处处相等,并有达数百至数千V变化,将使通信台站内的设备,特别是逻辑集成电路工作混乱、CPU死机或硬件损坏。文中的定量分析结论,可为通信台、雷达站及建筑物电子信息系统的防雷电设计提供参考依据。

**关键词** 雷电;电磁感应;防雷建筑;接地系统

**DOI** 10.3969/j.issn.1009-3516.2013.06.014

**中图分类号** TM862<sup>+</sup>.3 **文献标志码** A **文章编号** 1009-3516(2013)06-0059-05

## Analysis of the Influence of Lightning Rod Current upon the Wiring and the Grounding Systems of Communication Stations

DU Si-shen, ZHUANG Xu-chun, LI Wei

(Information and navigation College, Air Force Engineering University, Xi'an 710077, China)

**Abstract:** This paper begins with the analysis of the protection range of lightning rod and lightning current, focusing on the discussion of the metal wire frame around the down lead, formed with wires of communication stations and the grounding system. The calculating result shows that the greater the lightning peak value, the shorter the wave front time, the nearer the metal wire frame with the lightning spot and the more likely the electrical device is compromised. If the metal wire frame works as the common ground of the lightning proof, the protection, working circuit, and the ground potential of the common ground fail to be equal everywhere due to the high voltage induction such as lightning with the fluctuations of voltage ranging from hundreds to thousands of volts, undermining electrical devices in the communication stations, especially the disruption of logic integrated circuit, the crash of CPU and hardware damage. The conclusion shows that the quantitative analysis of the paper provides a reference basis for the design of the thunder prevention of communication stations.

**Key words:** lightning; electromagnetic induction; structures against lightning; grounding system

雷电对通信台站入侵及损害方式主要有:通过天线、地线等直击入侵方式,以及静电感应、电磁感应等感应入侵方式,均会造成设备功能性损坏或出现工作性干扰。

**收稿日期:** 2013-06-19

**作者简介:** 杜思深(1962—),男,陕西礼泉人,副教授,主要从事通信工程设计及系统防护研究。

E-mail: 949327701@qq.com

雷电及直击雷电防护<sup>[1-7]</sup>的研究起步较早,避雷针(线、带)、引下线、接地体等防护工程手段也多种多样。国际电工委员会发布的建筑防雷标准 IEC61024、国家建设部发布的 GB50057 建筑物防雷设计规范等,对建筑物直击雷防护均有明确的要求。而静电与电磁感应雷电的防护<sup>[8-20]</sup>,近 20 年来才得到普遍重视,这是因为感应雷电是大概率事件,感应雷电的损害程度可小于直击雷,但电磁波无孔不入,及微电子器件大量应用,使感应雷电引起设备损害概率大大增加。针对感应雷电的防护,国家也制定了 GB500343 建筑物电子信息系统防雷技术规范,国内外许多专家做了大量的工作,特别是共用接地系统、屏蔽、等电位连接、合理布线、安装浪涌保护器 (SPD) 等措施。但具有全面防雷措施的建筑、通信台站等重要设施,仍时有雷击事件发生。究其原因,比较复杂,在避雷针、线、带等建筑物直击雷防护中,接闪电流在引下线周围产生的强大电磁场,感应损害通信台站及建筑物内电子信息系统,即“引狼入室”问题,目前国内外详细研究结果报道很少。

## 1 避雷针保护范围及雷电流特性分析

国际电工委员会发布的建筑防雷标准 IEC61024 中,避雷针保护范围采用滚球法(也称为雷击距法),就是假想一个半径为  $h_r$ (滚球半径)球体, $h_r$  等于雷电闪络距离,沿需要防护直击雷的部位滚动,如果球体只接触到避雷针(线),或避雷针(线)与地面,而不触及需要保护的部位,则该部位就在避雷针(线)的保护范围内。

经过长期实际测量与实验验证,最小闪络电流  $I_{\min}$  与滚球半径  $h_r$  关系确定为:

$$h_r = 2I_{\min} + 30(1 - e^{-I_{\min}^{0.6,8}}) \quad (1)$$

另外,每次雷闪电流大小不同,波形也有差别,为了方便防雷研究,根据统计推荐具有代表性的首次雷击电流归一化波形见图 1,其中  $I_{\max}$  为峰值电流, $\tau_1$  为波头时间, $\tau_2$  为半值时间<sup>[4-5]</sup>。

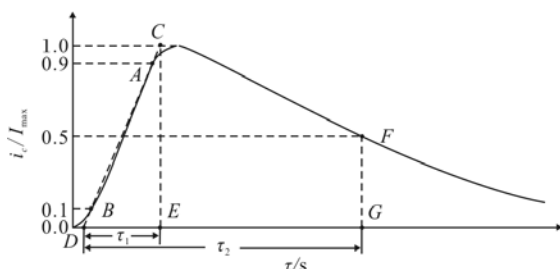


图 1 首次雷击电流归一化波形

Fig. 1 The normalized waveform of lightning current at first time

雷电流随时间变化近似规律为双指数函数:

$$i_c(t) = \begin{cases} 0 & , t < 0 \\ I_{\max} k(e^{-t/\tau_1} - e^{-t/\tau_2}) & , t \geq 0 \end{cases} \quad (2)$$

GB50057-2004 建筑物防雷设计规范中引用 IEC 规定,并从防雷要求出发,根据建筑物的重要性、使用性质、遭受雷击的可能性和雷击所造成后果的严重性等,把建筑物分为 I、II、III 类,其主要参数指标见表 1,雷电流波形采用 10/350  $\mu$ s 参数,峰值比率频率特性见图 2<sup>[6]</sup>。

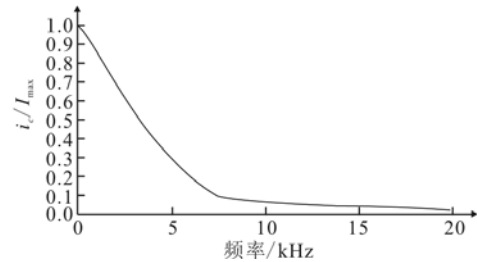


图 2 雷电流 10/350  $\mu$ s 峰值比率频率特性

Fig. 2 The frequency characteristic of apex valve rate of lightning current 10/350  $\mu$ s

表 1 防雷建筑分类及参数指标

Tab. 1 The classify of structures against lighting and parameter index

防雷建筑类别	I	II	III
雷电流峰值 $I_{\max}$ /kA	200	150	100
波形参数 ( $\tau_1/\tau_2$ )/ $\mu$ s	10/350	10/350	10/350
滚球半径 $h_r$ /m	30	45	60
最小闪络电流 $I_{\min}$ /kA	5.4	10.1	15.8

由以上可知,雷电流 10  $\mu$ s 极短时间内会达到数百 kA,避雷针接闪时,将在其周围产生强大的瞬变电磁场,但频率分量主要在低频内,故分析其影响时可以忽略容性耦合,主要考虑感性耦合。

## 2 非闭合回路上的感应电压分析

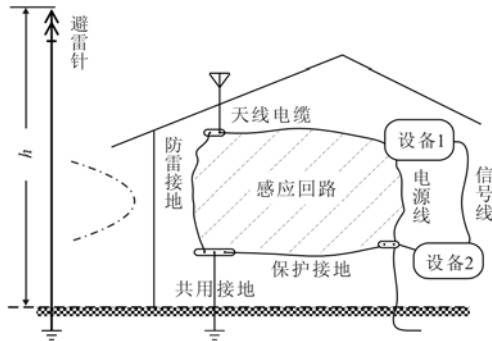
一般通信台、雷达站及建筑物电子信息系统建设中,设备及线缆种类很多,除信号回路外,金属线、屏蔽层、地线等还可形成非信号金属回路,这些金属回路在强大雷电及电磁武器的瞬变电磁场作用下,将会感应出强大的电动势。

图 3(a)为避雷针及其附近天线馈线屏蔽层、电源线屏蔽层及保护地线、防雷地线等形成的典型金属线框感应回路示意图。

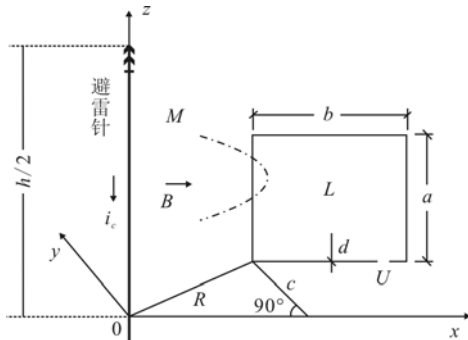
图 3(b)、(c)为其等效电路,设避雷针高度  $h$ ,避雷针及引下线与  $z$  坐标轴重合, $x-y$  坐标平面在避雷针高度一半位置  $h/2$ ,金属线框底面在  $x-y$  坐标平面上,防雷接闪时避雷针及引下线上通过雷击电

流为  $i_c$ , 与  $z$  坐标轴不共面的金属线框  $S$  非闭合, 其长为  $a \times b$ , 线材直径  $d$ , 线框与  $x$  坐标轴距离  $c$ , 线框竖边与  $z$  坐标轴距离分别为  $R, R_1$ , 其中:

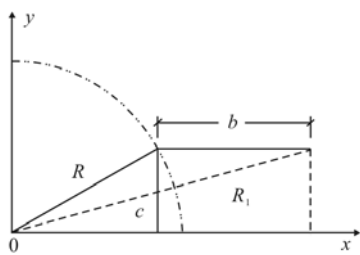
$$R_1 = \sqrt{(b + \sqrt{R^2 - c^2})^2 + c^2} = \sqrt{b^2 + R^2 + 2b\sqrt{R^2 - c^2}}, \quad R \geq c \quad (3)$$



(a) 天线与地线等形成感应回路



(b) 三维电磁感应等效电路



(c) 二维电磁感应等效电路

图 3 避雷针引下线附近线圈电磁感应示意图

Fig. 3 Electromagnetic induction in coil near lightning rod of down-conductor system

根据电磁感应定律可知, 高为  $h$ 、电流为  $I$  载流直导线(避雷针引下线), 当电流沿  $z$  轴, 坐标原点在  $h/2$  高度处时, 其分布关于  $z$  轴旋转对称, 磁场与圆坐标  $\phi$  无关, 取场点  $(r, z)$ , 则磁感应强度应为<sup>[21]</sup>:

$$\vec{B}(r, z) = \frac{\mu_0 I}{4\pi r} \left( \frac{z+h/2}{\sqrt{r^2 + (z+h/2)^2}} - \frac{z-h/2}{\sqrt{r^2 + (z-h/2)^2}} \right) \vec{e}_\phi \quad (4)$$

式中  $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$  H/m 为真空磁导率。

其穿过金属线框的磁通量  $\Phi$  为:

$$\Phi = \iint_S \frac{\mu_0 I}{4\pi r} \left( \frac{z+h/2}{\sqrt{r^2 + (z+h/2)^2}} - \frac{z-h/2}{\sqrt{r^2 + (z-h/2)^2}} \right) dx dr =$$

$$\int_R^{R_1} \int_0^a \frac{\mu_0 I}{4\pi r} \left( \frac{z+h/2}{\sqrt{r^2 + (z+h/2)^2}} - \frac{z-h/2}{\sqrt{r^2 + (z-h/2)^2}} \right) dx dr \quad (5)$$

则避雷针引下线与金属线框互感系数  $M$  可用下式计算:

$$M = \frac{\Phi}{I} = \int_R^{R_1} \int_0^a \frac{\mu_0}{4\pi r} \frac{z+h/2}{\sqrt{r^2 + (z+h/2)^2}} - \frac{z-h/2}{\sqrt{r^2 + (z-h/2)^2}} dx dr \quad (6)$$

若金属线框  $a=b=5$  m,  $c=5$  m, 1 m, 0 m, 避雷针高度  $h=30$  m, 60 m, 与线框间距  $R=1$  m, 2 m, 5 m, 10 m, 20 m, 50 m, 100 m 时, 用 Matlab 软件计算式(3)、式(6), 结果见表 2。

表 2 避雷针引下线与金属线框互感系数

Tab. 2 The mutual inductance between down-conductor system of lightning rod and metal wire frame

R/m	互感系数 M			
	h=30 m		h=60 m	
	与金属线框 不共面 c=5 m	与金属线框 不共面 c=1 m	与金属线框 共面 c=0 m	与金属线框 共面 c=0 m
1		2.65	2.88	2.89
2		1.83	1.86	1.88
5	0.47	0.89	0.89	0.91
10	0.42	0.45	0.45	0.48
20	0.20	0.20	0.20	0.23
50	0.05	0.05	0.05	0.07
100	0.01	0.01	0.01	0.02

通过上述分析可知, 避雷针高度  $h$  变化对互感系数影响很小, 可以忽略。金属线框与避雷针共面程度(即  $c$  值大小)对互感系数影响大, 这符合电磁场与电磁波基本规律。

下面以表 2 中  $h=30$  m,  $c=0$  m 典型数值为代表, 计算金属线框开口处最大感应电动势  $U_{\max}$  为:

$$U_{\max} = M \left[ \frac{di_c}{dt} \right]_{\max} \quad (7)$$

从雷电流波形特征来看, 其波头部分的变化率远大于其波尾部分, 所以在考虑雷电流的电磁感应危害性时, 主要考虑雷电流波头部分变化率, 即波头陡度, 并将  $[di_c/dt]_{\max}$  用  $I_{\max}/\tau_1$  代替计算, 则感应电势大小见表 3。

表 3 I, III 类防雷建筑引下线周围

金属线框感应电势  $U_{\max}$

Tab. 3 The induction voltage of metal wire frame near down-conductor system of class I, III structures

R/m	against lightning						kV
	1	2	5	10	20	50	
雷击电流 200 kA/10 $\mu$ s	57.6	37.2	17.8	9.0	4.0	1.0	0.2
雷击电流 100 kA/10 $\mu$ s	28.8	18.6	8.9	4.5	2.0	0.5	0.1

雷雨时环境湿度大, 空气击穿电压约为 1 kV/mm, 若金属线框开口间距为 mm 量级, 则距金属线框 50 m 内雷击,  $[di_c/dt]_{\max} = 200$  kA/10  $\mu$ s

雷电就可使开口处空气击穿,发生火化放电,损坏设备。当雷击电流幅值不变,波头时间  $\tau_1$  取更苛刻数值  $2.5 \mu\text{s}$  时,产生的感应电动势会更大,破坏力更强。总之,雷电峰值越大,波头时间越短,金属线框距雷击点越近,感应电势越大,设备损坏可能性越大。另外,我们通过增大避雷针引下线与金属线框距离,可减小感应雷电损害设备事件的发生,但受避雷针保护范围(滚球半径)限制,不能太远。

### 3 闭合回路上的感应电流分析

当图 3 金属线框为闭合回路时,雷击电流  $i_c$  与闭合回路中感应电流  $i_0$  之间将满足以下关系:

$$i_0 = i_c M/L \quad (8)$$

式中:  $M$  为避雷针引下线与金属线框互感系数;  $L$  为金属线框自感系数;若线材直径  $d \ll a, b$  情况下,可用下式计算<sup>[1]</sup>:

$$L = 4 \times 10^{-7} \{ 2 \sqrt{a^2 + b^2} - 2(a+b) + \ln \left[ \frac{4b}{d(1 + \sqrt{1 + (b/a)^2})} \right] + \ln \left[ \frac{4a}{d(1 + \sqrt{1 + (a/b)^2})} \right] \} \quad (9)$$

当金属线框  $a = b = 5 \text{ m}$ , 直径  $d = 10 \text{ mm}$ , 由式(9)可得自电感系数为  $24.5 \times 10^{-6} \text{ H}$ , 单位长度电感为  $L_0 = 20/L \text{ m} = 1.225 \times 10^{-6} \text{ H}$ , 与实际测量的数值相当,代入式(8)可得回路电流  $i_0$  见表 4。

由表 4 可知,雷电峰值越大,金属线框距雷击点越近,回路电流越大。一般情况下回路电流幅值可达 kA 级,对弱电系统具有非常大的破坏力。

表 4 I, III 类防雷建筑引下线周围金属线框回路电流  $i_0$

Tab. 4 The current of metal wire frame near down-conductor system of Class I, III structures against lightning

R/m	1	2	5	10	20	50	100
雷击电流 200 kA/10 $\mu\text{s}$	23.51	15.18	7.27	3.67	1.63	0.41	0.08
雷击电流 100 kA/10 $\mu\text{s}$	11.76	7.59	3.63	1.84	0.82	0.20	0.04

### 4 感应电流引起的线路电压变化

由电路原理可知,任何一根导线都存在着分布电感,暂态感应雷电流引起线路电压变化,主要由线路电阻、分布电感及暂态雷电流的大小决定。

若图 3(b)闭合回路为直径  $d = 10 \text{ mm}$  铜金属线,其单位长度电阻率  $\rho_0 = 1.7 \times 10^{-8} \Omega$ , 单位长度电感  $L_0 = 1.225 \times 10^{-6} \text{ H}$ , 则感应回路电流  $i_0$  在 5

m 长金属线框上引起的总电压变化,可以用下式近似计算:

$$u = 5 i_0 R_0 + 5 L_0 \frac{di_0}{dt} = i_0 \frac{5 \rho_0}{\pi (d/2)^2} + 5 L_0 \frac{i_0}{\tau_1} \quad (10)$$

通过表 4 和式(10)计算,结果见表 5。

表 5 I, III 类防雷建筑引下线周围金属线框单边上电压变化量

Tab. 5 The voltage of single side of metal wire frame near down-conductor system of Class I, III

	structures against lightning						kA
R/m	1	2	5	10	20	50	100
雷击电流 200 kA/10 $\mu\text{s}$	14 435	9 701	4 464	2 253	1 001	252	49
雷击电流 100 kA/10 $\mu\text{s}$	7 221	4 660	2 229	1 130	503	123	25

由表 5 可知,避雷针接闪时,金属线框距离引下线越近,感应电流引起的回路电压变化幅度越大,达数万伏,因此对弱电系统具有非常大的破坏力。这是因为,目前通信设备使用集成电路和接口(芯片)器件,耐受暂态过电压水平都在 100 V 以下,其中大多数集成电路耐压水平均低于 60 V 以下。

若该金属线框作为通信台站防雷、保护及工作共用接地线,因雷电及电磁武器等强电磁感应,使共用接地系统的地线电位无法处处相等,并通过上述分析,电压变化巨大,这将会使通信台站内的逻辑集成电路工作混乱、CPU 死机或硬件损害。

### 5 结语

接地特指系统或设备与电位基准面或地球之间,建立低阻导电通路的过程,所构成的地线网络称谓接地系统或接地网络。接地系统很多,按其功能性质不同,可分为保护性接地和工作接地两类多种。

保护接地包含 4 种:防电击接地(即狭义的“保护接地”)、防雷接地、防静电接地及屏蔽保护接地。

工作接地包含 3 种:交直流工作回路接地(即功率接地)、数字逻辑信号基准接地及模拟信号工作回路接地。

一般通信台、雷达站及建筑物电子信息系统设备种类多,地面接地空间小,为了减小用地,各种保护性接地可以共地连接。而工作性接地不能与保护性接地共地连接,因地网线路上电位不稳,特别是避雷针接闪时,防护了直击雷对通信台站的损害,但“引狼入室”感应雷电,使共地网上产生最高达数万伏电压差,仍会造成通信台站工作瘫痪、设备损坏。另外,为减小避雷针接闪时感应电势影响,通信台站建设过程中,应尽量避免与引下线共面的金属布线回路,或使布线回路远离避雷针引下线 50 m 以上。

本文定量分析结论,可为通信台、雷达站及建筑

物电子信息系统防雷电及电磁武器设计提供了参考的依据。

#### 参考文献(References):

- [1] 张小青. 建筑防雷与接地技术[M]. 北京:中国电力出版社,2003.  
ZHANG Xiaoqing. Protection of structures against lightning and grounding technology [M]. Beijing:China electric power press,2003. (in Chinese)
- [2] IEC 61024. 国际电工委员会发布的建筑防雷标准[S].  
IEC 61024. Protection of structures against lightning [S].
- [3] GB-50057. 国家建筑物防雷设计规范[S].  
GB-50057. Design code for protection of structures against lightning[S]. (in Chinese)
- [4] 李瑞芳,吴广宁. 雷电流幅值概率计算公式[J]. 电工技术学报,2011,26(4):161-167.  
LI Ruifang, WU Guangning. Formula for probability of lightning current amplitude[J]. Journal of China electrotechnical society, 2011, 26(4): 161-167. (in Chinese)
- [5] 陈娜娜. 雷电流数学模型的对比分析[J]. 电气开关, 2010(3):82-84.  
CHEN Nana. Contrast and analysis of the mathematical model of lightning currents[J]. Electric switchgear, 2010(3):82-84. (in Chinese)
- [6] 陈绍东,王孝波. 标准雷电波形的频谱分析及其应用[J]. 气象科技,2006,32(10):11-19.  
Chen Shaodong, Wang Xiaobo. Frequency spectrum of standard lightning currents and its application [J]. Meteorological, 2006,32(10):11-19. (in Chinese)
- [7] 张景颖,张展. 多针接闪器最佳针数的研究[J]. 高电压技术, 2006,32(8):82-83.  
ZHANG Jingying, ZHANG Zhan. Research on the optimum needle numbers of the lightning receiver [J]. High voltage engineering, 2006,32(8):82-83. (in Chinese)
- [8] 魏明. 雷电电磁脉冲及其防护[M]. 北京:国防工业出版社,2012.  
WEI Ming. LEMP and protection[M]. Beijing: National defense industry press, 2012. (in Chinese)
- [9] Du Sishen. Integrated protection design for electromagnetic and electrostatic induction[J]. Scientific research publishing,2012(5):356-360.
- [10] Upul Sonnadara. Lightning radiation field spectra of cloud flashes [C]//ICLP. France: [s. n. ], 2004: 85-90.
- [11] Szczerbinski M. A discussion of faraday cage lightning protection and application to real building structures [J]. Journal of electrostatics,2000,48(2):145-154.
- [12] Cristina S. Calculation of the induced effects due to a lightning stroke [J]. IEE proceedings: Part B, 1992, 139:67-68.
- [13] 杨春山. 雷电电磁脉冲对电缆的耦合效应研究[J]. 空军雷达学院学报,2005,19(2):1-5.  
YANG Chunshan, Study of coupling effects of lightning electromagnetic pulse on cable[J]. Journal of air force radar academy,2005,19(2):1-5. (in Chinese)
- [14] 孙蓓云. 两种高空核爆电磁脉冲电缆耦合效应的比较[J]. 强激光与粒子束,2002,14(6):901-904.  
SUN Beiyun. Comparison of the cable coupling effects under two kinds of HEMP environment, high power laser & particle beams,2002,14(6):901-904. (in Chinese)
- [15] 张水平. 直埋通信电缆雷电感应过电压试验研究[J]. 高电压技术,2002,28(11):32-33.  
ZHANG Shuiping. Research on over-voltage induced by lightning on directly-buried communication coaxial cable [J]. High voltage engineering, 2002,28(11):32-33. (in Chinese)
- [16] 傅正财,徐霖. 有独立引下线建筑物遭雷击时室内的磁场分布[J]. 上海交通大学学报,2005,39(8):18-21.  
FU Zhengcai, XU Lin. The magnetic field distribution in buildings with separate lightning down conductors during a direct lightning stroke[J]. Journal of Shanghai jiaotong university, 2005,39(8):18-21. (in Chinese)
- [17] 杜思深. 基于战场环境下通信台站的雷电及电磁武器防护设计[J]. 河北科技大学学报,2011,32(1):5-8.  
DU Sishen. Thunderbolt and electro-magnetic arm protection Design for signal station on battlefield [J]. Journal of Hebei university of science and technology, 2011,32(1):5-8. (in Chinese)
- [18] GB-500343. 建筑物电子信息系统防雷技术规范[S].  
GB-500343. Technical code for protection against lightning of building electronic information system[S].
- [19] 周璧华. 电磁脉冲及其工程防护[M]. 北京:国防工业出版社,2003.  
ZHOU Bihua. EMP and engineering for prevention [M]. Beijing: National defense industry press, 2003. (in Chinese)
- [20] 杨儒贵. 电磁场与电磁波[M]. 北京:高等教育出版社,2009.  
YANG Rugui. Electromagnetic field and wave [M]. Beijing: Higher education press, 2009. (in Chinese)

(编辑:徐楠楠)