



吉赫兹横电磁波传输室连接头的优化设计

张 凯^{1,2}, 李万莉¹, 于得水¹, 游张平¹

1. 同济大学机械工程学院, 上海 201804
2. 常熟理工学院机械工程学院, 江苏常熟 215500

摘要 吉赫兹横电磁波 (GTEM) 传输室在电磁兼容测试领域应用广泛。GTEM 传输室过渡接头对 GTEM 传输室性能的影响较大。过渡接头连接同轴传输线与 GTEM 传输室主体, 是从圆形同轴传输线过渡到矩形同轴线的转换部件。如果过渡接头处存在结构不连续, 使其特性阻抗与 GTEM 传输室不匹配, 将会引起电磁波反射和激发高次模现象, 降低传输室的传输性能。根据 GTEM 传输室的技术要求, 以传输系统阻抗连续为原则, 对过渡接头内导体外表面和外导体内表面的形状进行同时设计, 使内导体外表面与外导体内表面光滑过渡, 过渡接头的特性阻抗与系统匹配。对前后端分别与标准同轴线和斧形件相连接部位进行结合设计, 保证连接表面光滑, 尽量降低突变。根据设计计算数据, 通过设计软件 SolidWorks 对过渡接头构造精确三维模型。将三维模型导入电磁软件 HFSS 进行仿真测试。这样, 对保证过渡接头特性阻抗恒定提供了一种有效的设计方法; 可以将构建的数学模型直接导入电磁仿真软件, 以便进一步分析; 也可以将内、外导体三维结构数模导入数控机床加工, 保证内外导体表面的精度要求。

关键词 过渡接头; 特性阻抗; 形状设计; 吉赫兹横电磁波

中图分类号 TM30, TH21

文献标识码 A

文章编号 1000-7857(2009)19-0033-05

Optimal Design of GTEM Cell Connector

ZHANG Kai^{1,2}, LI Wanli¹, YU Deshui¹,
YOU Zhangping¹

1. College of Mechanical Engineering, Tongji University, Shanghai 201804, China
2. College of Mechanical Engineering, Changshu Institute of Technology, Changshu 215500, Jiangsu Province, China

Abstract Gigahertz Transverse Electro Magnetic (GTEM) transmission cell is widely used in the field of electromagnetic compatibility tests. The transition connector of GTEM transmission cell is closely related with the performance of the transmission cell. The transition connector as a transition of the conversion component between the circular coaxial transmission line and the rectangular coaxial line connects the coaxial transmission line and the main body of the GTEM transfer chamber. If there is a structural discontinuity at the transition connector, it would make the characteristic impedance and the transmission cell mismatch and cause the phenomenon of

electromagnetic wave reflection and high-order modes, deteriorating the transmission performance of the transmission room. According to the technical requirements of GTEM transmission cell, it should in principle be a continuous transmission system of impedance. To design the shape of the transition joint's outer surface of the inner conductor and the inner surface of the outer conductor simultaneously, the outer surface of the inner conductor and the outer conductor of the inner surface could smoothly transit, and the transition joint's characteristic impedance could match with the system. To design the connected parts between two ends and standard coaxial line and ax-shaped pieces, the smoothly connected surface, with minimized mutations should be ensured. According to the designed calculation data, the precise three-dimensional model is constructed through the SolidWorks. Three-dimensional model is imported into HFSS to be simulated and tested. So, it provides an effective design method to ensure the constancy of impedance characteristics of the transition joints. The mathematical model could be imported directly into the electromagnetic simulation software for easier further analysis. The inside and outside of the conductor's three-dimensional structure model could be imported into CNC to ensure the accuracy of conductor surface on both sides.

Keywords transition connector; characteristic impedance; shape design; Gigahertz Transverse Electro Magnetic

收稿日期: 2009-08-25

基金项目: “十一五”国家科技支撑计划项目 (2006BAJ12B01)

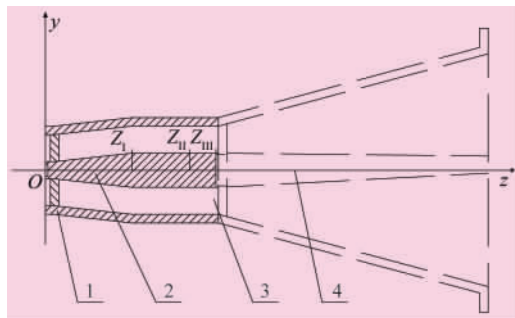
作者简介: 张凯, 博士研究生, 研究方向为工程机械 EMC 检测系统设计理论及应用研究, 电子信箱: zkhht@126.com; 李万莉 (通信作者), 教授, 研究方向为智能交通控制装备研制, 电子信箱: cnlwl@tongji.edu.cn



0 引言

吉赫兹横电磁波 (Gigahertz Transverse Electro Magnetic, GTEM) 传输室是电磁兼容测试装置, 于 1984 年由瑞士 Asea Boveri 公司电磁干扰控制中心的 Diethard Hansen 和 Dietrich Hansen 推出^[1]。由于其宽频带特性, GTEM 既可用于电磁辐射敏感度试验 (EMS 试验), 又可用于电磁辐射试验 (EMI 试验), 具有快速和自动测试等特点, 越来越受到国内外研究人员的重视。K. Huang 和 W. Lin 等采用保角变换法对 GTEM 传输室的特性阻抗进行了计算^[2]。D. Pouhe 采用球面波理论分析了 GTEM 传输室的高次截止频率^[3]。GTEM 传输室结构体一般呈四棱锥形。可以认为是由同轴传输线演变而来, 同轴传输线的外导体逐渐演变为四棱锥形外箱体, 内导体由圆柱体逐渐扩张为扁平状芯板。GTEM 传输室实质上是双导体导波系统^[4-5]。

GTEM 传输室过渡接头是连接同轴传输线与 GTEM 传输室主体的中间过渡件。图 1 为过渡接头与斧形件的结构。过渡接头结构尺寸较小, 并且此处的电流较密集, 对结构的变化很敏感^[2-3]。如果在过渡接头段结构出现不连续处, 电磁波就会产生反射和激发高次模现象, GTEM 传输室电压驻波比将增大, 降低了传输性能。通常通过 50 Ω 同轴传输线给 GTEM 传输室馈电, 要求系统匹配。匹配主要是同轴传输线、过渡接头、斧形件、芯板之间特性阻抗的匹配。通常 50 Ω 同轴传输线外导体内径有 14.7、3.5 和 2.9 mm 等规格, 与其相对应的标准接头分别是 APC-14 型、N 型 APC-7 型、SMA 型/APC3.5 型和 K 型等。



1—过渡连接件外导体; 2—过渡连接件内导体;
3—内导体支撑; 4—斧形件

图 1 连接头结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of connector

由于 GTEM 传输室测试产品领域不同, 其测试要求和技术指标也不同。采用标准的过渡接头往往不能满足整个装置的性能要求, 故 GTEM 传输室过渡接头需要进行重新设计。在结构设计时, 保证过渡接头内导体外表面和外导体内表面之间没有结构上的突变, 光滑过渡, 保证特性阻抗连续、恒定, 使横电磁波反射小, 使装置具有很小的电压驻波比的性能^[4,6]。本文主要是对过渡接头的内导体外表面和外导体

内表面进行设计。设计的过渡接头内外导体面已不再是简单的曲面组合, 而是更复杂的表面结构, 使之与外导体内径 7 mm 的同轴传输线与斧形件端头的矩形截面连续对接, 如图 1 的阴影部分; 确保过渡连接头的结构正确, 使其具有 50 Ω 特性阻抗与同轴传输线匹配; 能够通过数控机床加工生产。

1 连接件的设计原则

1.1 GTEM 传输室的技术指标

设计的 GTEM 传输室的电磁参数指标如下。频率范围: DC~18 GHz; 输入阻抗: $(50 \pm 5) \Omega$, 典型值: $(50 \pm 2) \Omega$; 电压驻波比: ≤ 1.75 , 典型值: ≤ 1.5 ; 最大输入功率: 1 000 W; 电场强度范围: 0.01~200 V/m, 随输入功率的大小变化。

1.2 设计原则

依据 GTEM 传输室两个主要性能指标进行接头设计。首先, GTEM 传输室采用特性阻抗为 50 Ω 同轴线进行输入, 为使工作频率范围内信号不产生反射和激发高次模现象, 电压驻波比应小于 1.5, 过渡接头的特性阻抗也应为 50 Ω , 使系统的阻抗保持连续性; 其次, 输入的功率大, 过渡接头处的电流密集, 接头段内各处的场强很大, 容易将内外导体间的绝缘介质击穿, 在设计时应考虑传输接头所具备的结构, 使之能承受最大电磁场强, 介质不被击穿。

2 过渡接头的设计

以往的过渡接头和斧形件的设计是根据已有外导体内表面的形状进行设计, 由于加工制造的原因, 过渡的高级曲面常以简单曲面代替, 并多采用分体设计。本文中接头部分的内导体外表面和外导体内表面采取一体化结构设计, 通过三维设计软件 SolidWorks 精确实现结构设计。图 1 中, 从左到右分为 OZ_I 、 $Z_I Z_{II}$ 和 $Z_{II} Z_{III}$ 3 段。在这 3 段过渡中, 内导体的外表面和外导体的内表面, 是由圆形同轴向非全圆同轴过渡, 最后到矩形同轴结构。整个变化过程是连续的。断面变化如图 2 所示。

2.1 前后端头的结构设计

过渡接头的后端与标准同轴线内导体紧相连接, 前端与斧形件相连接, 电磁波在导体的表面传输, 所以在接头的前后端采取特定结构, 保证过渡接头与同轴传输线内导体和斧形件连接表面光滑, 尽量降低突变, 如图 3 所示。

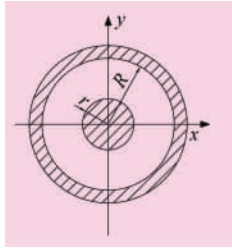
2.2 OZ_I 段结构设计

在 OZ_I 段内, 由于此处前端与同轴传输线相连接, 而同轴传输线的特性阻抗为

$$Z = \frac{60}{\sqrt{\epsilon_r}} \ln \frac{R}{R_0} \quad (1)$$

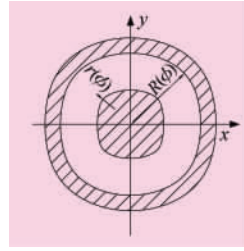
其中, ϵ_r 为介电常数, R_0 为内导体半径, R 为外导体内半径,

此段传输结构为同轴圆台型, 截面还是圆形同轴面, 在单位长度内可以认为是同轴传输线。如图 4 所示, 建立柱坐标系 (r, ρ, ϕ) , 电位函数 $\phi(\rho, \varphi)$ 满足拉普拉斯方程^[2]



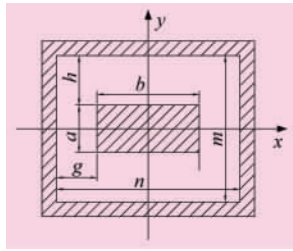
(a) 圆形同轴

(a) The coaxial and round cross-section



(b) 非全圆同轴

(b) The coaxial and non-round cross-section

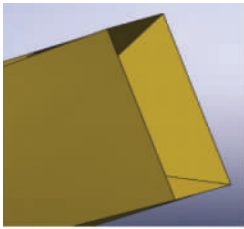


(c) 矩形同轴

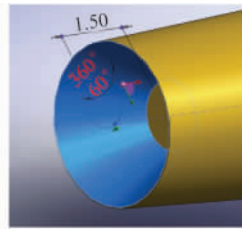
(c) The coaxial and rectangular cross-section

图 2 过渡接头截面变化过程

Fig. 2 Joint cross-section changes in the process of transition



(a)



(b)

图 3 内导体前(a)、后(b)端面

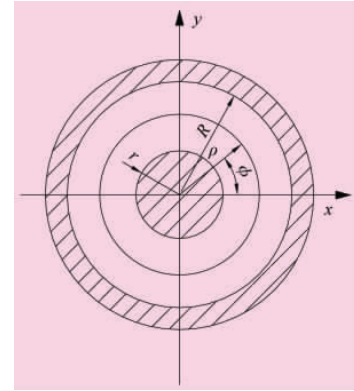
Fig. 3 Face before (a) and after (b) the inner conductor

$$\frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial \rho} \left(\rho \frac{\partial \phi}{\partial \rho} \right) + \frac{1}{\rho^2} \frac{\partial^2 \phi}{\partial \varphi^2} = 0 \quad (2)$$

根据截面的对称性, 电位函数 $\phi(\rho, \varphi)$ 与 φ 无关, 可以解得电位为

$$\phi(\rho) = \phi_1 + \frac{\phi_2 - \phi_1}{\ln(R/r)} \ln \frac{\rho}{r} \quad (3)$$

其中, ρ 为内外导体间距轴心的半径, ϕ_1 为内导体外表面电

图 4 OZ_1 段单位长度截面Fig. 4 OZ_1 cross section per unit length

位, ϕ_2 为外导体内表面电位。

进而, 得出内外导体间电场和磁场分量为

$$E_r = -\hat{\rho} \frac{\phi_2 - \phi_1}{\rho \ln(R/r)} e^{-jkz} \quad (4)$$

$$H_\varphi = -\hat{\phi} \frac{\phi_2 - \phi_1}{\eta \rho \ln(R/r)} e^{-jkz} \quad (5)$$

其中, η 为固有阻抗。

单位内导体表面的电流为

$$I = \oint \mathbf{a} \times \mathbf{H}_t |_{\rho=r} dl = \frac{2\pi(\phi_2 - \phi_1)}{\eta \ln(R/r)} \quad (6)$$

根据阻抗的定义, 得出此截面的特性阻抗为

$$Z = \frac{\phi_2 - \phi_1}{|I|} = \frac{60}{\sqrt{\epsilon_r}} \ln \frac{R}{r} \quad (7)$$

在 OZ_1 内, 由于内外导体半径是关于坐标 z 的函数, 特性阻抗可以表示为

$$Z(z) = \frac{60}{\sqrt{\epsilon_r}} \ln \frac{R(z)}{r(z)} \quad (8)$$

为了使在整个阶段保持特定阻抗为 50Ω , 需要 $R(z)/r(z) = 2.303$ 。

在此阶段, 内导体的外表面符合方程

$$x^2 + y^2 + 1.52z^2 + 12.16z + 4^2 = 0 \quad (9)$$

外导体的内表面符合方程

$$x^2 + y^2 + 3.5z^2 + 12.16z + 9.21^2 = 0 \quad (10)$$

2.3 $Z_{II}Z_{III}$ 段结构设计

$Z_{II}Z_{III}$ 处的末端与斧形件进行连接时, 内连接导体已经过渡到四面体结构, 此阶段每一处剖面均为矩形传输结构, 如图 5 所示。此矩形结构的特性阻抗符合公式^[7-9]:

$$Z = \frac{\sqrt{\mu_0}}{2\sqrt{\epsilon_0}} \left\{ \frac{1}{\ln(m/a)} \left[\frac{m-a}{g} - \ln \tan \left(\frac{\pi}{4} + \frac{1}{2} \arctan \frac{m-a}{2g} \right) + \arctan \frac{m-a}{2g} \right] + \frac{1}{\ln(n/w)} \left[\frac{2(n-b)}{m-b} - \ln \tan \left(\frac{\pi}{4} + \frac{1}{2} \arctan \frac{n-b}{m-b} \right) + \arctan \frac{n-b}{m-b} \right] \right\} \quad (11)$$

整理后变为

$$Z = \frac{\sqrt{\mu_0}}{2\sqrt{\varepsilon_0} \left\{ \frac{1}{\ln(m/b)} \left[\frac{m-b}{g} - \ln \tan \left(\frac{\pi}{4} + \frac{1}{2} \arctan \frac{m-b}{2g} \right) + \arctan \frac{m-b}{2g} \right] + \frac{1}{\ln(n/w)} \left[\frac{2(n-w)}{m-b} - \ln \tan \left(\frac{\pi}{4} + \frac{1}{2} \arctan \frac{n-w}{m-b} \right) + \arctan \frac{n-w}{m-b} \right] \right\}} \quad (12)$$

式(12)只有矩形内导体和外导体的尺寸,比较容易确定。在不同 z 坐标位置处的 m 、 n 、 a 、 b 是不同的。本文中取几个 z 坐标位置,根据GTEM传输室锥角确定相应的截面尺寸数据组,然后以此数据组为关键数据,构造模型,给定的数据组数越多,构造模型精度越高。表1列举了此例的两组数据。

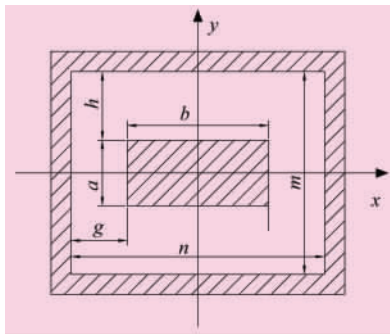


图5 矩形截面示意

Fig. 5 Rectangular cross-section diagram

表1 矩形端面尺寸

Table 1 Rectangular face dimensions

z	m	b	a	n
75.00	17.49	9.38	7.50	19.38
80.00	18.50	10.00	8.00	20.50

2.4 ZZ_{II} 段的结构设计

ZZ_{II} 段是从圆断面到矩形断面的过渡阶段。在过渡接头前后部分都设计完成的情况下,为了保证此部分的特性阻抗与前后段一致,其内外导体表面采用多重曲面组合。精确设计出数学表达式表示此段是非常困难的。此处设计是在精确设计完成前后段之后,通过SolidWorks软件的高级曲面功能,将内导体过渡接头前后段进行高级曲面光滑连接,保持曲面连续,然后以内导体的外表面为基础进行外导体内表面设计。

由经典传输线理论可知,高频时无损耗传输线的特性阻抗为

$$Z = \sqrt{\frac{L}{C}} \quad (13)$$

其中, L 为单位长度传输线的电感, C 为单位长度传输线上的分布电容。

对于无损耗传输线,有

$$\frac{1}{\sqrt{\varepsilon\mu_0}} = \frac{1}{\sqrt{LC}}$$

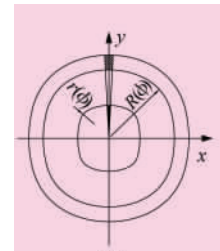
成立,其中 ε_0 为真空或空气中的介电常数, μ_0 为真空或空气中的磁导率。

单位长度传输线的特性阻抗为

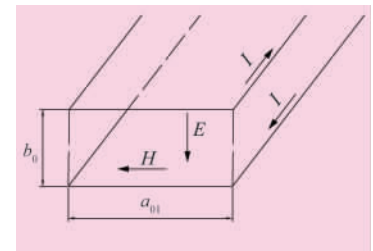
$$Z = \frac{\sqrt{\varepsilon_0\mu_0}}{C} \quad (14)$$

这样,求解过渡接头的特性阻抗就转化为求解过渡接头单位长度上的分布电容。由于电荷的移动是在内外导体表面上移动,故将内外导体取一微小内外导体,这一微小内外导体可以看作平板传输线,如图6所示。由此,可以得出单位平板电容量为

$$C_0 = \varepsilon \frac{a_{01}}{b_0} \quad (15)$$



(a) 取非全圆同轴单元体
(a) Non-round and coaxial element



(b) 单元体展开平板传输线
(b) Flat transmission line by expanding element

图6 单元平板传输线

Fig. 6 Transmission line of cell plate

将整个截面在圆周上分解为 n 个单元体,相应地可以求得 $C_1, C_2, \dots, C_n$ 。则内外导体的电容为

$$C(z_0) = \sum_{i=1}^n C_i = \frac{\varepsilon}{b_0} \sum_{i=1}^n a_{0i} \quad (16)$$

令 $B(z_0) = \sum_{i=1}^n a_{0i}$,是 z_0 处内导体横截面外缘的周长,则有

$$b_0(z_0) = \frac{\varepsilon}{C(z_0)} B(z_0) \quad (17)$$

这样就可以确定出 $b_0(z_0)$ 值,然后确定出此截面的内表面线。相应地取不同的 z 值,可以确定不同 z 值处的外导体在此截面的内表面线。应用SolidWorks软件构造经过所计算的外导体内表面的线的表面,完成此部分的设计。表2列出了此例的一些数据。

2.5 支撑处结构设计

由于支撑部分采用聚四氟乙烯支撑板进行支撑,而聚四氟乙烯的相对介电常数 $\varepsilon_r=2.1$,若在支撑处还是采取上述设计的结构,根据式(1),会造成特性阻抗减少,产生阻抗不连续,故在支撑处适当地缩小内外导体半径。

表 2 不同 z 坐标所对应的 b 值
Table 2 Different z coordinates corresponding to the value of b

z	$b(z)$	z	$b(z)$
55	5.22	64	5.24
57	5.22	66	5.24
59	5.23	68	5.25
...	...	...	...

2.6 过渡连接件结构设计

根据上面的计算分析,应用 SolidWorks 软件进行结构设计,建立三维结构模型,如图 7 所示。

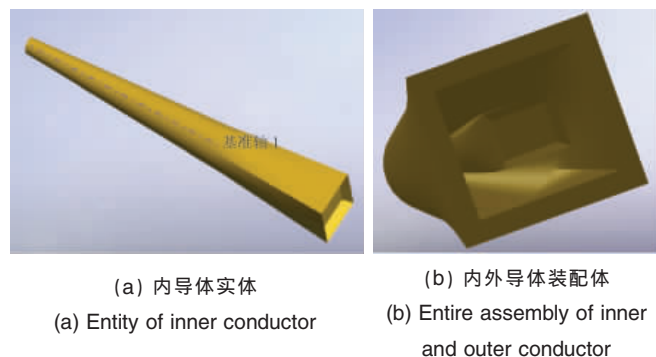


图 7 SolidWorks 界面实体图
Fig. 7 SolidWorks interface entity chart

3 性能计算

承受击穿场强计算从两个方面进行考虑,一是特定介质中的电场强度极限值。正常大气压下击穿空气的电场强度约为 30 kV/cm,而此装置的设计最高场强为 200 V/m,远小于击穿电场强度。另一方面在保证横电磁波的情况下,内导体的有效半径须满足

$$\lambda \geq \lambda_{\min} \approx \pi(r+R) \quad (18)$$

以最高频率 18 GHz 计算出其最小工作波长为 17 mm,而传输线能承受的最小波长为 15.7 mm,最小工作波长要大于传输线所承受的最小波长。传输室的驻波比波动范围较大的是高频段。通过对过渡接头电压驻波比计算,其电压驻波比 $VSWR < 1.5$ 。从以上结果可知,此过渡连接头设计符合要求。

4 结论

通过以上对过渡连接头的设计,使其与系统阻抗匹配。能够保证 GTEM 传输室的整体性能要求。同时此种设计过程还具有以下优点:① 对过渡连接头内外导体采取同时设计,内外导体的光滑过渡与阻抗一致能保证;② 可以将内外导体三维结构数值模型导入数控加工机床,能够保证内外导体表面、过渡连接件的精度要求;③ 此种方法也可以将构建的数

学模型直接导入电磁仿真软件中,以便进一步的分析。

参考文献 (References)

- [1] 余绍斌,方志坚.用于电磁兼容测量的 GTEM 小室[J].电子质量,2007(10): 76–78.
Yu Shaobin, Fang Zhijian. *Electronics Quality*, 2007(10): 76–78.
- [2] Huang K, Lin W, Lin Y. Characteristic impedance of rectangular coaxial cone transmission line [C]//*IEEE Proceedings–Microwaves, Antennas and Propagation*. 1994, 141(4): 326–328.
- [3] Pouhe D. On the theory of spherical waves in GTEM cells: Higher-order modes in unloaded cells [C]//*IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility*. 2001, 1: 408–441.
- [4] 周忠元,汤仕平,蒋全兴,等.宽频带 GTEM 传输室接头的优化设计[J].电波科学学报,2005(4): 143–146.
Zhou Zhongyuan, Tang Shiping, Jiang Quanxing, et al. *Chinese Journal of Radio Science*, 2005(4): 143–146.
- [5] 王一平,郭宏福.电磁波——传输·辐射·传播 [M].西安:西安电子科技大学出版社,2006.
Wang Yipin, Guo Hongfu. *Electromagnetic: Transfer, radiation and communication*[M]. Xi'an: Xidian University Press, 2006.
- [6] Ghosh S, Singhley M R, Shastry S V K. Design and characterization of GTEM cell [C]//*Proceedings of the International Conference on Electromagnetic Interference and Compatibility'99. IEEE*, 1999: 274–279.
- [7] 周旭.吉赫兹横电磁波传输室内导体侧边形状的研究[J].南通工学院学报,2003(6): 62–66.
Zhou Xu. *Journal of Nantong Institute of Technology*, 2003(6): 62–66.
- [8] Bai Tongyun. A new method of calculating distributed capacity in TEM cells[C]//*Proceedings International Symposium Electromagnetic Compact*. Beijing, 1992(3): 186–189.
- [9] 李玲,姚斌,郑勤红.正 N 边形同轴传输线特性阻抗的近似计算[J].云南师范大学学报,2006(1): 42–45.
Li Ling, Yao Bin, Zheng Qinrong. *Journal of Yunnan Normal University*, 2006(1): 42–45.

(责任编辑 朱宇)

《科技导报》“研究论文”栏目征稿

《科技导报》以发表国内外科学技术各学科专业原创性学术论文为主,同时刊登阶段性最新科研成果报告,以及国内外重大科技新闻,快速、全方位、高密度、大容量提供科技信息。“研究论文”栏目专门发表自然科学、工程技术领域具有创新性的研究论文,要求学术价值显著、实验数据完整、具有原始性和创造性,同时应重点突出、文字精炼、引证及数据准确、图表清晰,并附中、英文摘要以及作者姓名、所在单位、通信地址、关键词等信息。本栏目欢迎广大一线科技工作者投稿。投稿网址:www.kjdb.org; 投稿邮箱:kjdbbjb@cast.org.cn。