

文章编号: 2095-4980(2019)01-0008-05

基于行波法对螺旋波纹波导色散特性的仿真

张景俊, 王峨锋, 邬显平

(北京真空电子技术研究所 微波电真空器件国家重点实验室, 北京 100015)

摘要: 为研究螺旋波纹波导的色散曲线特性, 利用阻抗微扰法对螺旋波纹波导色散方程进行求解, 并分析了波导尺寸的变化对色散特性的影响。针对目前采用谐振法仿真色散曲线时存在模式分割以及谐振点的选取问题, 利用行波法(不属于波纹波导理论体系下的新方法)对不同频率下的色散值进行仿真求解。研究表明, 基于行波法仿真得到的色散曲线与由 Matlab 计算得到的理论色散曲线吻合度好, 计算过程不涉及波纹波导理论体系下谐振点的选取问题, 相比传统的谐振法, 整个仿真计算过程更简洁。

关键词: 螺旋波纹波导; 阻抗微扰法; 行波法; 色散曲线

中图分类号: TN24

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA201901.0008

Simulation study on dispersion characteristics of spiral waveguide by traveling wave method

ZHANG Jingjun, WANG E'feng, WU Xianping

(National Key Laboratory of Science and Technology on Vacuum Electronics, Beijing Vacuum Electronics Research Institute, Beijing 100015, China)

Abstract: The impedance perturbation method is utilized to solve the dispersion equation of spiral waveguide in order to study the dispersion curve characteristics of spiral corrugated waveguide, and the influence of waveguide size on dispersion characteristics is analyzed. There are some problems about mode segmentation and the selection of resonance points when simulating the dispersion curves by resonance method, so a new solution of traveling wave method is employed to simulate the dispersion curve among different frequencies. The results show that the dispersion curves obtained by traveling wave method are in good agreement with the theoretical dispersion curves calculated by Matlab, and the calculating process does not involve the selection of resonance points in the corrugated waveguide theory system. Compared with that of the traditional resonance method, the simulation process is also more concise.

Keywords: spiral waveguide; impedance perturbation method; traveling wave method; dispersion curves

由俄罗斯 G Dension 等^[1]提出的螺旋波纹波导是一种高频结构^[2], 具有频带宽、峰值功率高^[3]和抑制模式竞争等优点, 因而在电子对抗、军事通信等领域有很好的应用。目前, 对螺旋波纹波导色散曲线的仿真通常采用文献[4-5]给出的谐振法, 这种方法有 2 个特点: a) 色散特性的最终计算公式是在螺旋波纹波导理论体系下推导形成; b) 选取谐振点时, S_{21} 模式曲线图的谐振点不易选取, 后续计算结果存在一定误差。针对上述原因, 提出不属于螺旋波纹波导理论体系下的行波法对色散特性进行仿真, 并通过理论分析计算, 验证了行波法对螺旋波纹波导色散曲线仿真的可行性。

1 理论分析

螺旋波纹波导具有特殊的非对称结构, 如图 1~2 所示, 在角向和纵向上都呈现周期性, 在柱坐标系下, 螺旋波纹波导的边界条件有如下关系:

$$r(\phi, z) = r_0 + r_1 \cos(m_B \phi + k_B z) \quad (1)$$

式中： r_0 为螺旋波纹波导的平均半径； r_1 为起伏度； m_B 为角向变化次数； k_B 为周期变化次数， $k_B=2\pi/d$ ， d 为波导的周期长度。

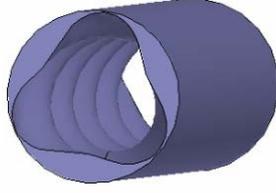


Fig.1 Schematic diagram of spiral waveguide structure
图 1 螺旋波纹波导结构示意图

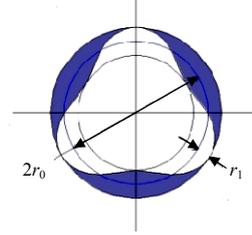


Fig.2 Cross section diagram of spiral waveguide structure
图 2 螺旋波纹波导横截面示意图

利用阻抗微扰法^[6-7]求解，得到螺旋波纹波导内的耦合波方程式：

$$\begin{cases} \frac{dU_i}{dz} = -j\omega\mu I_i + \frac{1}{r_0} I_k \oint (\Delta Z_{zk}) \frac{\partial \Pi_{ik}}{\partial \phi} \frac{\partial \Pi_{ii}}{\partial \phi} d\phi \\ \frac{dI_i}{dz} = -jk_{zi} U_i \frac{k_{zi}}{\omega\mu} + \frac{1}{r_0} \left(\frac{k_{zk} k_{ci}}{\omega\mu} \right)^2 U_k \oint (\Delta Z_{\phi k}) \Pi_{ik} \Pi_{ii} d\phi \end{cases} \quad (2)$$

式中：下标 i, k 分别代表螺旋波纹波导内部传输的 TE_{11}, TE_{21} 模； ω 代表角频率； μ 代表煤质的导磁系数； U_i, I_i 分别为 i 模的传输波的驻波电压、电流幅值； U_k, I_k 分别为 k 模传输波的驻波电压、电流幅值； $\Delta Z_{zk}, \Delta Z_{\phi k}$ 分别为螺旋纹形变在参考界面上表现出的阻抗微扰； k_{zi}, k_{zk} 分别为 i, k 模传输波的轴向波数； k_{ci} 为 i 模传输波的截止波数； Π_{ii}, Π_{ik} 分为 i, k 波的赫兹函数，可由指数 $e^{im_i\phi}$ ($m_i=0, \pm 1, \pm 2$) 来代替， m_i 取正值和负值分别代表右旋波和左旋波。由式(2)可得螺旋波纹波导内行波幅值耦合方程式：

$$\begin{cases} \frac{dA_i^+}{dz} = -jk_{zi} A_i^+ - jk^{i+k} A_k^+ e^{jk_B z} - jk^{i-k} A_k^- e^{jk_B z} \\ \frac{dA_i^-}{dz} = jk_{zi} A_i^- + jk^{i-k} A_k^+ e^{-jk_B z} + jk^{i+k} A_k^- e^{-jk_B z} \\ \frac{dA_k^+}{dz} = -jk_{zk} A_k^+ - jk^{k+i} A_i^+ e^{-jk_B z} - jk^{k-i} A_i^- e^{jk_B z} \\ \frac{dA_k^-}{dz} = jk_{zk} A_k^- + jk^{k+i} A_i^+ e^{-jk_B z} + jk^{k-i} A_i^- e^{jk_B z} \end{cases} \quad (3)$$

式中： $A_i^+, A_k^+, A_i^-, A_k^-$ 分别为第 i, k 个正向和反向行波幅值； k^{i+k} 表示第 k 个正向波和第 i 个正向波的耦合系数； k^{k+i} 是第 i 个正向波和第 k 个正向波的耦合系数。

式(3)即为螺旋波纹波导内的行波幅值耦合方程，从式(3)可以得到：螺旋波纹波导属于非对称结构，对于每一个模式来说，都可能是顺时针或者逆时针方向旋转的波。根据模式耦合规则，由式(3)可得出螺旋波纹波导的色散方程式^[8]：

$$\begin{cases} (k_B - k_{zm} - \beta_z)(k_{zn}^2 - \beta_z^2) = 2k^{m+n} k^{n+m} k_{zn} \\ k^{m+n} = \frac{1}{2} \left[\frac{\mu_{cm}^2 \mu_{cn}^2 + r_0^2 i_m i_n (k_{cm}^2 + k_B k_{zm})}{\sqrt{k_{zm} k_{zn}} \sqrt{\mu_{cm}^2 - i_m^2} \sqrt{\mu_{cn}^2 - i_n^2}} \right] \frac{r_1}{r_0^3} \\ k^{n+m} = \frac{1}{2} \left[\frac{\mu_{cm}^2 \mu_{cn}^2 + r_0^2 i_m i_n (k_{cn}^2 + k_B k_{zn})}{\sqrt{k_{zm} k_{zn}} \sqrt{\mu_{cm}^2 - i_m^2} \sqrt{\mu_{cn}^2 - i_n^2}} \right] \frac{r_1}{r_0^3} \end{cases} \quad (4)$$

式(4)是耦合波的传播常数 β_z 的三次方程，它有 3 个根，分别代表螺旋波纹波导中的 3 个本征模式的传播特性。其中 i_m 是第 m 个波的角向变化次数， $\mu_{cm} = k_{cm} \cdot r_0$ ， k_{cm} 为截止波数，其余变量依次类推。

图 3 为螺旋波纹波导模式转换图，首先在圆波导端口输入 TE_{11} 模式，进入渐变波纹波导，耦合出 TE_{21} 模式，在规则螺旋波纹波导中这两种模式的波相互“耦合”着，为占主要地位的 TE_{21} 模和占次要地位的 TE_{11} 模，形成准“ TE_{21} 模”。在该过程中，电子注与工作模式进行相互作用，电子注通过把能量传输给高频场使得微波得到数倍的放大，之后通过螺旋深度逐渐减小段，微波信号再次转化成 TE_{11} 模，放大后的 TE_{11} 模最后通过圆波导输出。

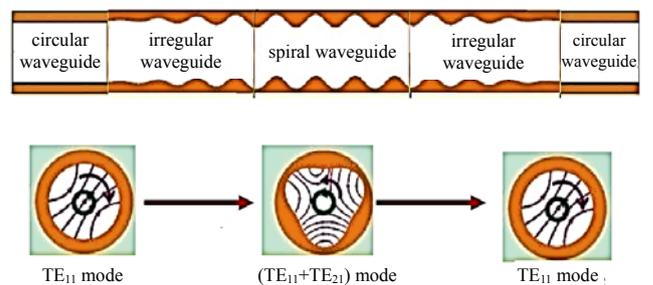


Fig.3 Pattern transition diagram of spiral waveguide
图 3 螺旋波纹波导模式转换图

2 数值计算

为了验证软件 HFSS 采用行波法得到的色散结果, 根据式(4), 对 Ka 波段螺旋波纹波导进行理论计算, 中心频率为 34 GHz, 得到理论情况下的色散曲线如图 4 所示。

图 4 中实线表示耦合后的色散曲线图, 虚线表示未耦合时的色散曲线。未耦合时两模式在图中有一个交点, 即虚线 TE_{11} 模和 TE_{21} 模的交点, 在该交点处他们的相速度相同, 此时两模式发生耦合的程度最大。耦合之后形成了本征模 1,2,3, 其中本征模 1 可看成是 TE_{11} 模负一次空间谐波受扰动形成的^[9]。由群速公式 $v_g = d\omega/dk_z$ 可知, 在 $k_z \approx 0$ 附近的区域里, 本征模 1 可近似为一条斜率为正的直线, 波的群速约为一常数, 这样, 当它和电子注作用时, 互作用频带范围较宽, 从而可以极大提高回旋行波管的工作效率。

2.1 螺线起伏程度对色散特性的影响

螺旋波纹波导几何尺寸的选取会对波导的色散特性和模式产生影响, 图 5 给出了不同螺线起伏深度下的色散曲线图: 当螺线深度 r_1 取值很小时, 本征模式 1,2 的分离程度变小, 电子注回旋模式很容易与本征模 2 发生作用, 从而在波导内导致不希望的模式参与作用; 随着螺线起伏深度的增大, 本征模式 2,3 和 1 的分离程度也逐渐增大, 在 $k_z \approx 0$ 区域内本征模 1 线性逐渐变好, 可以保证电子回旋模式和工作模式在较宽的频带范围内作用, 使得螺旋波纹波导的工作频带变宽, 这一特点对于拓宽回旋管的频谱有显著作用, 并且电子注回旋模式与本征模 2 分离程度变大, 只与本征模 1 作用, 这对于回旋行波管抑制模式竞争极为有利。

2.2 波导周期长度对色散特性的影响

图 6 为不同波导周期长度下的色散曲线。随着波导周期长度的增大, 由群速公式 $v_g = d\omega/dk_z$ 可知, 工作模式的群速也在增大。由于电子回旋模式需要与工作模式最大程度相切, 使得电子注的加速电压增大, 并且随着螺线周期长度的增大, 电子注回旋模式与工作模式 1 在较宽的范围内作用, 使得工作带宽变宽; 反之, 如果螺线周期太小, 工作模式 1 在 $k_z \approx 0$ 区域内其线性变差, 线性区域变窄, 限制了螺旋波纹波导回旋行波管增益的提高。

3 行波法仿真

行波法是基于测量波导系统两点间行波相位差即相移 ψ 的一种测量色散曲线方法, 不属于螺旋波纹波导理论体系^[10]。在周期性结构中, 这两点间的距离可以等于空间周期或周期的整数倍。通过改变波导的长度改变各频率点对应的传播相位, 测量不同频率点下的各相位, 利用逐差法即可求解相应的色散曲线。

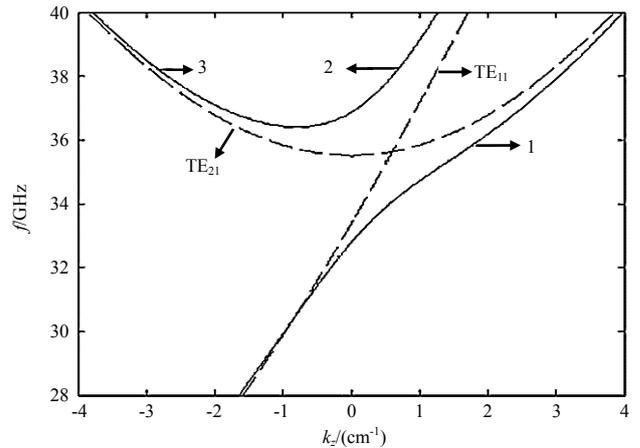


Fig.4 Spiral waveguide dispersion curves
图 4 螺旋波纹波导色散曲线图

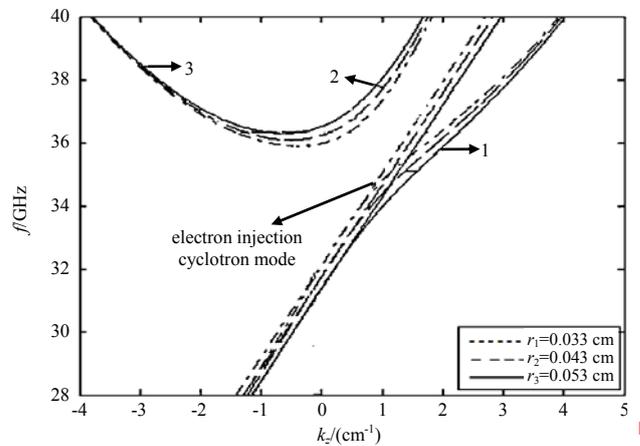


Fig.5 Different thread rolling depth dispersion curves
图 5 不同螺线起伏深度色散曲线图

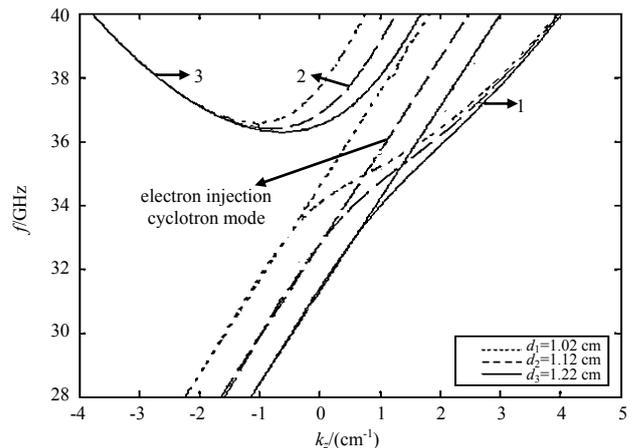


Fig.6 Different waveguide cycle length dispersion curves
图 6 不同波导周期长度色散曲线图

由于螺旋波纹波导输入的模式为 TE_{11} 模，因此在模拟仿真中，需要将规则的螺旋波纹波导两端渐变为圆波导，通过圆波导输入 TE_{11} 模。在渐变波导段内，由 TE_{11} 模耦合出 TE_{21} 模，在规则螺旋波纹波导段内，出现了由 TE_{11} 模与 TE_{21} 模相互耦合而产生的本征模式。所以在用 HFSS 仿真时，分别在螺旋波纹波导两端添加周期渐变波导和圆波导，如图 7 所示。

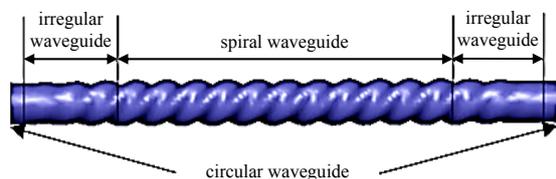


Fig.7 Traveling wave method spiral corrugated waveguide
图 7 行波法螺旋波纹波导

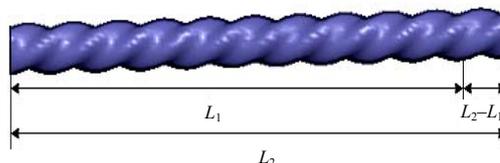


Fig.8 Schematic diagram of traveling wave method
图 8 行波法示意图

图 8 为螺旋波纹波导行波法原理示意图，采用行波法测量仿真螺旋波纹波导色散曲线，在计算相位差 $\Delta\phi$ 时，根据公式 $\Delta\phi = (\phi_1 - \phi_2)\pi / 180$ 将角度转换为弧度，由于相位是按照 $0^\circ \rightarrow 180^\circ \rightarrow -180^\circ \rightarrow 0^\circ$ 规律变化的，依据文献 [11-12] 所给方法，求解得到各频率下的 $\Delta\phi$ 值。根据式(5)^[10] 可得各频率下 k_z 值。

$$k_z = \frac{|\phi_1 - \phi_2|}{|L_2 - L_1|} \times \frac{\pi}{180} = \frac{\Delta\phi}{\Delta L} \times \frac{\pi}{180} \quad (5)$$

图 9 为采用行波法模拟计算得到的结果，发现由行波法计算得到的各频率点与理论分析计算的结果吻合度良好，整个仿真计算过程不涉及波纹波导理论，不存在谐振点选择问题，计算过程相比传统谐振法更简洁。

4 结论

利用阻抗微扰法对螺旋波纹波导的色散理论进行求解，分析了波导尺寸的改变对色散特性的影响，并提出了采用行波法这种不属于螺旋波纹波导理论体系的新方法对其色散曲线进行软件仿真。研究结果表明，当螺旋深度变大时，螺旋波纹波导中的工作模式与非工作模式分离程度变大，对克服模式竞争比较有利；当螺导周期长度变大时，工作模式 1 的线性变好，与电子注回旋模式在较宽范围内作用，提高了螺旋波纹波导回旋行波管的工作带宽。相比谐振法，采用行波法模拟测量螺旋波纹波导色散曲线时，不存在模式分割和共振点选择问题，计算过程相比传统谐振法更简洁，仿真计算得到的色散曲线与理论计算结果相吻合。通过采用行波法对螺旋波纹波导色散曲线进行仿真，为螺旋波纹波导色散曲线在实际工程中的测试提供了一种新的方法。

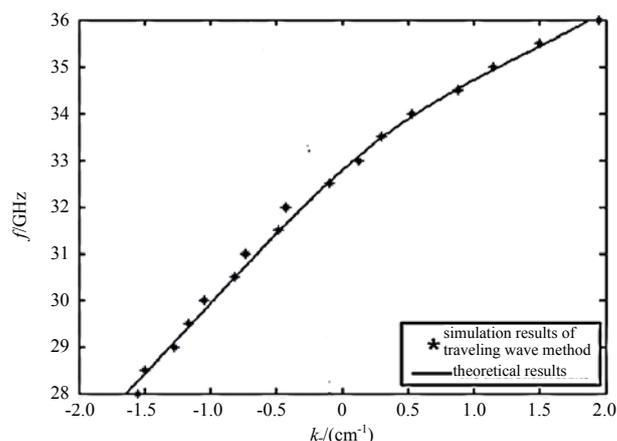


Fig.9 Simulation results of travelling wave method
图 9 行波法模拟结果

参考文献：

- [1] DENISOV G G, BRATMAN V L, PHELPS A D R, et al. Gyro-TWT with a helical operating waveguide: new possibilities to enhance efficiency and frequency bandwidth[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 1998, 26(3): 508-518.
- [2] DENISOV G G, COOK S J. Linear theory of a wide-band gyro-TWT amplifier using spiral waveguide[J]. IEEE Transaction on Plasma Science, 1998, 26(3): 519-530.
- [3] 牛新建, 李宏福, 喻胜, 等. 8 mm 高功率过模弯曲圆波导 TE_{01} - TM_{11} 模式变换[J]. 物理学报, 2002, 51(10): 2291-2295. (NIU Xinjian, LI Hongfu, YU Sheng, et al. The TE_{01} - TM_{11} mode transformation of high power over mode curved circular waveguide with 8 mm[J]. Acta Physica Sinica, 2002, 51(10): 2291-2295.)
- [4] 雷文强, 杨中海. 8 mm 回旋行波管和返波管的三折螺旋波纹波导色散分析[J]. 强激光与粒子束, 2006, 18(12): 2057-2060. (LEI Wenqiang, YANG Zhonghai. The three-fold spiral waveguide dispersion analysis of the 8 mm Gyro-TWTs and Gyro-BWOs[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2006, 18(12): 2057-2060.)
- [5] 刘亚军, 罗勇, 周钱科. 螺旋波纹波导回旋行波管和返波管的色散特性研究[J]. 现代电子技术, 2010, 33(7): 6-9. (LIU Yajun, LUO Yong, ZHOU Qianke. Study on the dispersion characteristics of helical waveguide for Gyro-TWTs and Gyro-BWOs[J]. Modern Electronic Technology, 2010, 33(7): 6-9.)
- [6] 黄宏嘉. 微波原理(卷 I)[M]. 北京: 科学出版社, 1963. (HUANG Hongjia. Microwave principle(volume I)[M]. Beijing:

Science Press, 1963.)

- [7] 钱景仁,来芒,黄宏嘉. 阻抗微扰概念在计算中继圆波导不规则性中的应用[J]. 电子学报, 1967(1):67-72. (QIAN Jingren,LAI Mang,HUANG Hongjia. The application of impedance perturbation concept in calculating the irregularity of circular waveguides[J]. Acta Electronica Sinica, 1967(1):67-72.)
- [8] 王峨锋,李宏福,李浩. 螺旋波纹波导研究[J]. 物理学报, 2005,54(1):5339-5342. (WANG E'feng,LI Hongfu,LI Hao. Study on the spiral waveguide[J]. Acta Physica Sinica, 2005,54(1):5339-5342.)
- [9] 王峨锋. 螺旋波纹波导回旋行波管[D]. 成都:电子科技大学, 2006. (WANG E'feng. Spiral corrugated waveguide gyroscopic wave tube[D]. Chengdu,China:University of Electronic Science and Technology of China, 2006.)
- [10] 张兆镗. 微波高频系统的测量[M]. 北京:国防工业出版社, 1982. (ZHANG Zhaotang. Measurement of microwave high frequency system[M]. Beijing:Defense Industry Press, 1982.)
- [11] 王峨锋,曾旭,孙昊,等. 回旋行波管介质加载结构色散特性测量实验研究[J]. 微波学报, 2015,31(6):27-30. (WANG E'feng,ZENG Xu,SUN Hao,et al. Experimental study on the dispersion characteristics of the medium loading structure of a Gyrotron wave tube[J]. Journal of Microwave Science. 2015,31(6):27-30.)
- [12] ZHANG Jingjun,WANG E'feng. Analysis of the test method for the helical waveguide dispersion characteristics of Ka band[C]// 2018 IEEE International Vacuum Electronics Conference(IVEC). Monterey,CA,USA:IEEE, 2018:389-390.

作者简介:



张景俊(1994-),男,甘肃省会宁市人,在读硕士研究生,主要研究方向为高功率回旋器件及太赫兹技术.email:1910511449@qq.com.

王峨锋(1968-),男,昆明市人,博士,研究员级高级工程师,主要研究方向为高功率微波、回旋器件及太赫兹技术.

邬显平(1940-),男,浙江省奉化市人,研究员,博士生导师,主要研究方向为太赫兹真空电子器件研制.

雷达学报第五届青年科学家论坛通知

由内蒙古工业大学信息工程学院和《雷达学报》编辑部共同主办的“雷达学报第五届青年科学家论坛”拟于2019年8月15日-16日在呼和浩特市内蒙古工业大学举办。论坛将在相互启迪、开拓视野、深入探讨的基础上,为雷达领域青年才俊提供一个学术交流、合作创新的平台。

本届论坛主题:雷达成像技术与微波遥感应用,论坛主席:黄平平。

论坛日程包括:特邀专家报告、青年专家报告、学术讨论和实验室参观。具体内容请待下一轮通知。

本届论坛免收会议费,有意参会者请于5月31日前报名申请。报名申请或了解详细信息请点击下面的“阅读原文”。

联系人:高华,010-58887063,radars@mail.ie.ac.cn