

# 非厄米物理启发的高效无线电能传输\*

郭志伟<sup>†</sup> 陈鸿<sup>††</sup>

(同济大学物理科学与工程学院 上海 200092)

2023-10-07 收到

<sup>†</sup> email: 2014guozhiwei@tongji.edu.cn

<sup>††</sup> email: hongchen@tongji.edu.cn

DOI: 10.7693/wl20240104

## Efficient wireless power transfer inspired by non-Hermitian physics

GUO Zhi-Wei<sup>†</sup> CHEN Hong<sup>††</sup>

( School of Physics Science and Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China )

**摘要** 无线电能传输技术是指不需要线缆或者波导结构, 利用电磁波直接将电能从电源传输到负载的技术。作为能量传输的一种全新方式, 无线电能传输技术可以极大地提高供电设备的安全性、可靠性和便捷性, 其在消费电子行业、自动化工业车间以及人工智能平台等需要高自由度供能的场景中具有重要的应用价值。目前无线电能传输技术仍存在一定的局限性, 特别是对于广为关注的磁共振耦合无线电能传输技术, 面临着高效率 and 稳定性难以兼顾的巨大挑战。文章以近场无线电能传输技术为研究框架, 深入介绍非厄米新物理在无线电能传输系统中的调控机理, 及其在高效、稳定、待机功率损耗、电磁环境兼容等方面的突出优势, 最后对无线电能传输未来的研究方向进行了展望。

**关键词** 非厄米物理, 宇称—时间对称, 连续域束缚态, 无线电能传输

**Abstract** Wireless power transfer refers to the use of electromagnetic waves to directly transmit energy from a source to loads without the need for cables or waveguide structures. As a new way of energy transfer and utilization, this technology can greatly improve the safety, reliability, and convenience of power devices, and may be applied in scenarios that require a high degree of freedom, such as consumer electronics, automated industrial workshops, and artificial intelligence platforms. Nevertheless, there are some limitations; in particular, magnetic resonance wireless power transfer, the technology of prime interest, still faces significant challenges in balancing efficiency and stability. Within the framework of near-field resonance wireless power transfer, this paper describes the control mechanism of non-Hermitian physics, as well as its outstanding advantages with regard to efficiency, stability, idle power loss, electromagnetic environment compatibility, and other aspects. Finally, the future research directions of wireless power transfer technology are summarized.

**Keywords** non-Hermitian physics, parity-time symmetry, bound state in the continuum, wireless power transfer

\* 国家重点基础研究发展计划(批准号: 2021YFA1400602; 2023YFA1407600)、国家自然科学基金(批准号: 12004284; 12374294)资助项目; 上海市教育发展基金和上海市教育委员会“晨光计划”项目(批准号: 21CGA22)

## 1 引言

进入到21世纪后,随着科学技术的进步以及工业生产水平的日益提高,全球电子行业呈现了飞速发展。特别是现在处于信息化技术促进产业变革的智能时代,各种现代化的电子设备陆续走进了人们的日常生活,更大的用电需求对供电设备的安全性、可靠性和便捷性提出了更高的要求。然而传统的有线电能传输方式日渐捉襟见肘:各式各样的线缆不仅携带不方便,而且存在线头老化、磨损等一系列安全隐患;各种探测器、机械传感器、植入人体的各种微电子设备,定期更换电源的不便亟待解决;再比如日益兴起的新能源汽车、结构经常会变形的机器人、无人机等,其续航以及动态充电目前仍是一个巨大挑战。

近年来备受瞩目的一项新兴电能传输技术——无线电能传输(wireless power transfer, WPT)为克服传统有线电能传输方式的诸多瓶颈提供了可能,其在包括移动电话、植入式医疗设备以及电动汽车等诸多方面都具有重要应用价值<sup>[1]</sup>。作为一种非接触式电能传输方式,WPT这种直接将电能从电源传输到负载的能量传输方式最早由伟大的物理学家尼古拉·特斯拉提出<sup>[2, 3]</sup>。尽管WPT被提出后受到了科学家们的热烈追捧和跟进,但传统基于磁感应式的近场无线电能传输系统受到传输距离的严重限制,有效的传输距离只能达到毫米级或厘米级。当接收线圈与发射线圈的距离较远时,传输效率会大大降低<sup>[4]</sup>。

2007年,美国麻省理工学院(MIT)的Kurs等人提出一种有效的解决方案——磁共振式WPT,即在系统发射端和接收端使用两个共振频率相同的线圈进行磁场耦合,相关研究结果突破了传统WPT技术传输距离短程的瓶颈,利用直径60 cm的谐振线圈在2.4 m外点亮了一个60 W的灯泡,且传输效率达到了40%<sup>[5]</sup>。这项开创性的工作引起了人们的极大兴趣,尽管磁共振式无线电能传输可以有效地增加传输距离,但是却面临能量传输高效率 and 稳定性难以兼得的矛盾。当传输距离大于临界距离时,由于耦合劈裂效应,传输效率会

迅速下降,具体来说:(1)这种“共振—共振”WPT技术存在固有的“距径比”(传输距离和线圈半径之比)限制,通常传输距离一旦大于临界传输距离(接近线圈的半径尺寸)时,传输效率将发生显著降低,因此传输距离只能保持在线圈间强耦合的中短程距离;(2)在保证较高传输效率的同时,由于谐振线圈之间的强耦合效应总会导致系统工作频率发生模式劈裂,因此一旦传输条件改变,传输效率也将显著降低,严重地限制了WPT器件的稳定性<sup>[6]</sup>。鉴于此,一个长期困扰“共振—共振”WPT技术的问题是进行费力的工作频率劈裂跟踪,使系统在传输条件变化时保持稳定的能量传输。尽管研究者们提出了发射器、接收器和电源之间自动阻抗匹配的电路,当传输距离改变时可以有效地避免WPT传输效率的降低问题<sup>[7]</sup>,亦或是通过构建自动锁定的反馈电路来实时追踪最大传输效率对应的工作频率以实现动态的高效WPT<sup>[8]</sup>。但是这些基于电路方式进行技术优化的研究方法难以协助人们从科学角度认识WPT系统中包括“距径比”以及“定频”限制在内的传输特性,因此也无法从基础的物理原理角度出发来提出更为有效的解决方案。

2017年,美国斯坦福大学的Assaworrorat等人首次利用非线性增益饱和和电路元件,通过构建宇称—时间(parity—time, PT)对称非厄米系统,实现了“共振—共振”WPT技术的工作频率自动追踪,这一开创性的研究工作也为从非厄米新物理角度出发,探究WPT技术开辟了一条全新途径<sup>[9]</sup>。不过非线性调控的WPT方案虽然在接收器的位置或者大小改变时可以自动追踪并锁定相应的工作频率,并且在强耦合条件(近距离、距径比小)下表现出优异的传输性能,但是在弱耦合条件(远距离、距径比大)下,仍然因为系统不存在稳定的工作模式使传输效率受到限制<sup>[10]</sup>。从基本物理原理的角度来看,PT对称系统中的强耦合区受到了奇异点(exceptional point, EP)的限制,一旦传输距离增加或者距径比增大并超过系统临界条件EP时,其正好对应于非厄米系统从强耦合条件过渡到弱耦合条件,此时系统的本征值将变为复数,继而导致了WPT系统的传输效率降低<sup>[11—15]</sup>。

特别是在中远程消费电子产品<sup>[16]</sup>以及距径比失配严重的植入医疗设备<sup>[17]</sup>中, 由于PT对称非厄米系统的基本物理限制, 在弱耦合条件下无法通过较好的非线性和反馈电路来实现稳定高效的能量传输。此外, 从实际应用的角度来看, 具有非线性电路元件的WPT系统在技术上需要具有较高功率的输入信号, 并且它们通常难以用于高功率的应用场景。因此, 在基本的线性物理系统中实现高效稳定的WPT技术仍是目前亟待解决的科学以及技术难题<sup>[6, 18]</sup>。另外, MIT科学家基于共振—共振WPT技术在2007年成立了高技术公司, 并以此为基础在全世界范围, 特别是针对中国, 申请了大量相关专利, 形成了知识产权壁垒。

本文以近场WPT技术为基本框架, 首先介绍WPT系统的物理本质, 详细阐明具有强烈能量交换的开放耦合系统如何构建等效封闭的非厄米物理系统, 进而从本征值和本征态角度来重新认识WPT技术。之后详述从非厄米物理系统出发, 如何构建等效PT对称以及连续域束缚态(bound state in the continuum, BIC)高效稳定的WPT技术。最后介绍基于合成维度实现的反共振电路系统, 构建“反共振—共振”耦合的高阶反宇称—时间(反PT)对称系统, 实现高效稳定的WPT技术, 如图1所示。基于非厄米以及拓扑新物理的WPT研究, 不仅对拓展基础光物理领域有着重要的科学意义, 也有助于克服目前WPT技术的一些技术瓶颈, 其在航空航天、军事国防, 以及与人们生活息息相关的可穿戴设备、物联网等科技前沿领域均具有重要应用价值。

## 2 无线传能系统的物理特性

### 2.1 非厄米物理系统介绍

量子体系中可观测的物理量要用厄米算符来表示, 这是量子力学的一条基本假设。这是因为实验上可观测的物理量必须是实数, 而厄米性能够确保算符的本征值为实数。Bender和Boettcher研究发现, 满足PT对称的非厄米哈密顿量也可以得到纯实数本征值<sup>[9]</sup>。基于这一开创性的研究工



图1 利用非厄米物理系统构建高性能WPT系统的效果图

作, 非厄米物理的概念在国际学术界引起了广泛的关注。特别是近年来非厄米物理的研究范畴得到了极大的拓展。一方面, 非厄米光子系统中的PT对称、反PT对称以及BIC的调控丰富了人们对非厄米物理的认知<sup>[20-22]</sup>; 另一方面, 非厄米与拓扑物理的结合又可以产生许多有趣的现象, 比如基于拓扑边界态的非厄米系统<sup>[23-25]</sup>, 以及由非对称耦合构建的新奇非厄米趋肤效应<sup>[26-28]</sup>等。

### 2.2 共振耦合的传输特性

考虑如图2(a)所示的标准磁共振WPT方案<sup>[5]</sup>, 其由最左侧的源线圈输入能量, 利用近场耦合机制, 通过中间的共振发射线圈和共振接收线圈, 最终将能量通过负载线圈传输到用电设备。对于该共振WPT系统而言, 当频率为 $\omega$ 的谐波 $S_{T1} = S_{T1} e^{-i\omega t}$ 输入到系统中时, 耦合系统的动力学方程可以表示为<sup>[29]</sup>

$$\begin{aligned} \frac{da_1}{dt} &= [-i\omega_0 - \gamma_1 - \Gamma_1] a_1 - i\kappa a_2 + \sqrt{2\gamma_1} S_{T1}, \\ \frac{da_2}{dt} &= [-i\omega_0 - \gamma_2 - \Gamma_2] a_2 - i\kappa a_1. \end{aligned} \quad (1)$$

其中 $\omega_0$ 为发射和接收线圈的谐振频率,  $\gamma_1(\gamma_2)$ 表示源(负载)与发射(接收)线圈之间的耦合强度,  $\Gamma_j$  ( $j = 1, 2$ )分别表示发射和接收线圈中简谐模式 $a_j = A_j e^{-i\omega t}$ 的本征损耗,  $\kappa$ 表示发射与接收线圈之间的近场耦合强度, 其与线圈之间的距离有关。“共振—共振”WPT系统对应的等效电路图如图2

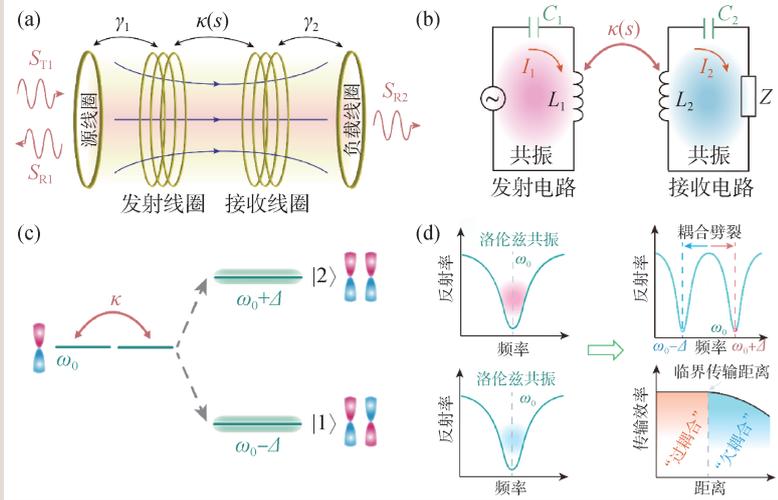


图2 共振耦合系统用于无线电能传输 (a)标准磁共振无线电能传输系统示意图；(b)开放耦合系统的等效电路图；(c)“共振—共振”耦合系统的能级示意图；(d)“共振—共振”耦合系统的频谱响应以及对传输效率的影响。其中，图2(d)左侧上图(下图)为发射(接收)线圈的频谱响应，右侧上图(下图)为耦合系统的频谱响应(传输效率随传输距离的变化关系)

(b)所示。发射线圈和接收线圈的共振耦合，会导致工作频率发生劈裂，系统对应的能级示意图如图2(c)所示。考虑系统的透射波为  $S_{R2} = \sqrt{2\gamma_2} a_2$ ，可以确定忽略本征损耗( $\Gamma_1 = \Gamma_2 = 0$ )时“共振—共振”WPT系统的传输效率为<sup>[6]</sup>

$$\eta = \left| \frac{2\sqrt{\gamma_1\gamma_2}\kappa}{\kappa^2 + [i(\omega - \omega_0) - \gamma_1][i(\omega - \omega_0) - \gamma_2]} \right|^2. \quad (2)$$

由公式(2)可以发现：1)当工作频率为中心频率  $\omega = \omega_0$  时，系统实现最佳传输效率(即  $\eta = 1$ )需满足关系式  $\kappa^2 = \gamma_1\gamma_2$ ；2)令  $\gamma_1 = \gamma_2 = \gamma$ ，系统实现最佳传输效率的工作频率需满足关系式  $\omega = \omega_0 \pm \sqrt{\kappa^2 - \gamma^2}$  且  $\kappa \geq \gamma$ 。具体来说，在“强耦合区”  $\kappa > \gamma$  时，系统的工作频率随耦合强度的变化而变化，因此需要调整工作频率以满足上述关系式。而在“弱耦合区”  $\kappa < \gamma$  时，系统将难以达到最佳传输效率(即  $\eta < 1$ )，而且传输效率会随着  $\kappa$  和  $\gamma$  的失配程度提高而逐渐降低。其中，当  $\kappa = \gamma$  时，系统处于强耦合和弱耦合的临界状态，系统在中心频率  $\omega = \omega_0$  处达到最佳传输效率。上述“共振—共振”耦合的频谱响应以及对传输效率的影响，如图2(d)所示。

## 2.3 非厄米物理本质

从图2介绍的开放能量传输系统的传输特性可以发现，当耦合强度变化时，系统应该存在一个相变，而且临界耦合即对应于相变点。非厄米物理的兴起为WPT系统的深入研究提供了清晰且直观的物理图像。对于零反射条件  $S_{R1} = -S_{T1} + \sqrt{2\gamma_1} a_1 = 0$ ，系统的动力学方程可以写为  $i \frac{d}{dt} |a\rangle = \mathbf{H} |a\rangle$ ，其中  $|a\rangle = (a_1, a_2)^T$ ，相应的等效封闭系统的哈密顿量可以表示为<sup>[6]</sup>

$$\mathbf{H} = \begin{pmatrix} \omega_0 + i\gamma_1 & \kappa \\ \kappa & \omega_0 - i\gamma_2 \end{pmatrix}. \quad (3)$$

当  $\gamma_1 = \gamma_2 = \gamma$  时，系统哈密顿量满足条件：

$$(\text{PT})\mathbf{H}(\text{PT})^{-1} = \mathbf{P}\mathbf{H}^*\mathbf{P} = \mathbf{H}. \quad (4)$$

因此开放的耦合WPT系统可以直接转化为一个具有二阶PT对称的封闭系统，如图3(a)所示。此时外部输入即表示为一种等效增益<sup>[30]</sup>，系统对应的等效电路图如图3(b)所示。通过求解本征方程  $|\omega\mathbf{I} - \mathbf{H}| = 0$  就可以直接得到该非厄米系统的本征值：

$$\omega_{\pm} = \omega_0 + i \frac{\gamma_1 - \gamma_2}{2} \pm \sqrt{\kappa^2 - \left(\frac{\gamma_2 + \gamma_1}{2}\right)^2}. \quad (5)$$

由公式(5)可以发现，当匹配条件满足  $\gamma_1 = \gamma_2 = \gamma$  时，非厄米系统的本征值变为  $\omega_{\pm} = \omega_0 \pm \sqrt{\kappa^2 - \gamma^2}$ 。从图3(c)给出的相图中可以发现，当处于“强耦合区”  $\kappa > \gamma$  时，系统存在纯实数的本征频率；当处于“弱耦合区”  $\kappa < \gamma$  时，系统存在复数形式的本征频率；当处于临界状态  $\kappa = \gamma$  时，系统存在本征频率从实数到复数的相变，此时系统的耦合强度为实现纯实数本征频率的临界耦合强度，对应于非厄米系统的奇异点(EP)。通过对比公式(2)和(5)可知，非厄米WPT系统的稳定传输条件等价于系统的等效哈密顿量取实数本征值，这也为从非

厄米物理视角看待 WPT 的传输特性提供了全新研究思路：满足匹配条件的“共振—共振”WPT 系统可以等效为理想二阶 PT 对称非厄米系统。特别地，开放 WPT 系统工作的强耦合区域( $\kappa > \gamma$ )对应于二阶 PT 对称系统的 PT 对称相，此时系统在纯实数本征频率( $\omega_{\pm}$ )下即可实现最佳传输效率。然而，该本征频率对耦合强度(或线圈之间的耦合距离)的变化非常敏感，当耦合距离发生变化时，工作频率应当做相应的调节以跟踪纯实数本征频率。相应的开放 WPT 系统工作的弱耦合区域( $\kappa < \gamma$ )和临界耦合区域，分别对应于二阶 PT 对称系统的 PT 对称破缺相以及 EP。

上述非厄米物理的启发不仅对电学研究 WPT 的传输现象进行了很好的物理解释，而且还为弱耦合(远距离)条件下实现高效 WPT 提供了有效解决手段。事实上，在一个增益和损耗不平衡的非理想二阶 PT 对称系统( $\gamma_1 \neq \gamma_2$ )中，在特定的匹配条件下，弱耦合区域也存在纯实数本征值，继而可以用来实现具有稳定传输性能的 WPT 技术。对于非理想二阶 PT 对称系统，其本征值可以表示为  $\omega_{\pm} = \omega_0 + i(\theta_a \pm \theta_b)$ ，其中  $\theta_a = (\gamma_1 - \gamma_2)/2$  表示非平衡的增益和损耗带来的净能量非厄米项，而  $\theta_b = \sqrt{\kappa^2 - (\gamma_1 + \gamma_2)^2}/4$  表示相干耦合  $\kappa$  小于非厄米强度  $(\gamma_1 + \gamma_2)/2$  导致的净耦合非厄米项。当  $\theta_a + \theta_b = 0$  时，净能量非厄米项和净耦合非厄米项会相干相消，因此系统在弱耦合区存在纯实数本征值，此时对应的本征态可认为是一种来自两通道相干相消的特殊 BIC<sup>[31]</sup>，如图 3(d)所示。所以受非厄米物理的启发(包括 PT 相变、奇异点、BIC 等全新的物理概念)，可以通过寻找开放系统的实数本征值以用于稳定的能量输运，这为突破传统共振 WPT 技术的诸多瓶颈问题提供了原理支撑和新的思路。

### 3 高阶反 PT 对称用于稳定高效的无线传能

#### 3.1 高阶反 PT 对称物理模型

正如前面介绍的，如何实现远距离、发射/接收端高面积比、低待机功率损耗、良好电磁兼容性以及多负载的稳定高效 WPT 仍是目前亟待解决的重要科学难题。在图 2(a)所示的共振 WPT 方案基础上，我们提出利用“反共振”发射线圈代替传统的“共振”发射线圈，进而设计了一种全新的“反共振—共振”型高阶反 PT 对称非厄米系统。与特定频率处产生振幅极大值(反射极小值)的共振现象恰好相反，反共振现象会在特定频率处产生振幅极小值(反射极大值)。如图 4(a)所示，其中耗散耦合与相干耦合的机制竞争会导致新奇的“能级钉扎”效应，并被用来实现稳定且高效的 WPT 技术。“反共振—共振”型反 PT 对称非厄米系统的能级示意图如图 4(b)所示。通过将反共振模式的“能级吸引”与反共振模式和共振模式的“能级排斥”结合，可以构建高阶

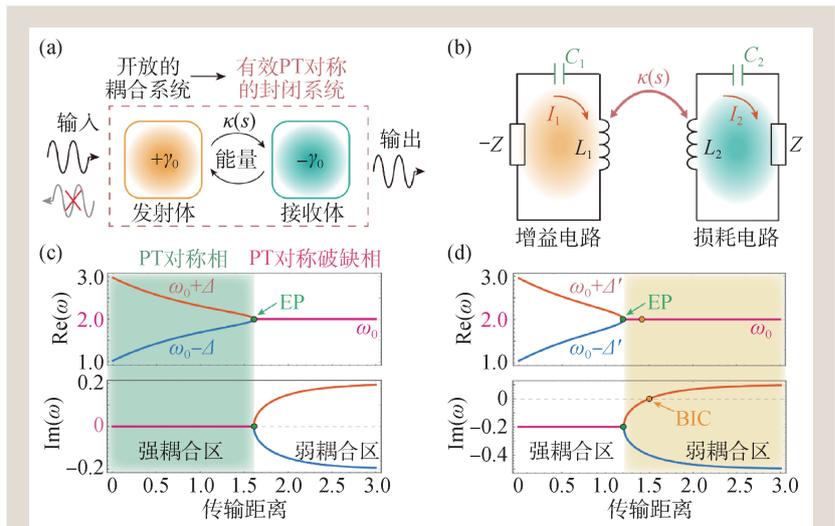


图3 无线电能传输的非厄米量子物理描述 (a)开放耦合系统等效具有 PT 对称封闭系统的示意图；(b)具有 PT 对称封闭系统的等效电路图；(c)理想二阶 PT 对称非厄米系统的相图，其中  $\Delta = \text{Re}(\sqrt{\kappa^2 - \gamma^2})$ ；(d)非理想二阶 PT 对称非厄米系统的相图，其中  $\Delta' = \text{Re}\left(\sqrt{\kappa^2 - \left(\frac{\gamma_2 + \gamma_1}{2}\right)^2}\right)$

反PT对称的“能级钉扎”效应。具体来说，三能级非厄米系统由两部分耦合形成：左侧的发射端由一个反共振发射线圈(anti-resonance transmitter coil, ATC)实现，提供了两个频率为 $\omega_0 \pm \Delta$ 的失谐模式，从图4(c)给出的反射谱中可以看到，在工作频率 $\omega_0$ 处存在极大值，对应于“W型”反共振；而右侧的接收端由一个共振接收线圈(resonance receiver coil, RRC)实现，提供了一个频率为 $\omega_0$ 的共振模式，从反射谱中可以发现在工作频率 $\omega_0$ 处存在极小值，对应常规的洛伦兹共振。作为一个和外界有能量交换的开放物理系统，“反共振—共振”非厄米系统的动力学方程可以写成<sup>[32]</sup>

$$\begin{cases} \frac{da_+}{dt} = Aa_+ + \gamma a_- + i\kappa_+ a_0 + \sqrt{2\gamma_+} S_{+,T_1}, \\ \frac{da_-}{dt} = Ba_- + \gamma a_+ - i\kappa_- a_0 + \sqrt{2\gamma_-} S_{-,T_1}, \\ \frac{da_0}{dt} = Ca_0 + i\kappa_+ a_+ - i\kappa_- a_- \end{cases} \quad (6)$$

其中， $\gamma_j$ 和 $\Gamma_j$  ( $j = +, -, 0$ )分别表示谐波模式 $a_j = A_j e^{-i\omega t}$ 的耗散损耗和本征损耗。为了表示方便，这里设 $A = -i(\omega_0 + \Delta) - \gamma_+ - \Gamma_+$ ,  $B = -i(\omega_0 - \Delta) - \gamma_- - \Gamma_-$ , 以及 $C = -i\omega_0 - \gamma_0 - \Gamma_0$ 。  $\kappa_{\pm}$ 是反共振和共振结构之间的近场耦合系数。 $S_{+,T_1}$ 和 $S_{-,T_1}$ 分别表示反共振结构的失谐模式的外部入射波。考虑到零反射波

$S_{k,R_1} = -S_{k,T_1} + \sqrt{2\gamma_k} a_k = 0$  ( $k = +, -$ ), 系统中的动力学可以表示为 $HV = \omega V$ , 其中 $V = (a_+, a_0, a_-)^T$ 。考虑谐波模式的耗散损耗 $\gamma_+ = \gamma_- = \gamma_0/2 = \gamma$ 、近场耦合系数 $\kappa_+ = \kappa_- = \kappa$ 和本征损耗 $\Gamma_+ = \Gamma_- = \Gamma_0 = 0$ 的情况，具有反共振结构的非厄米系统的哈密顿量可以写成

$$H = \begin{pmatrix} \omega_0 + \Delta + i\gamma & -\kappa & i\gamma \\ -\kappa & \omega_0 - 2i\gamma & \kappa \\ i\gamma & \kappa & \omega_0 - \Delta + i\gamma \end{pmatrix}. \quad (7)$$

由公式(7)可以看到，“反共振—共振”非厄米系统满足三阶反PT对称性<sup>[33]</sup>：

$$(PT)H(PT)^{-1} = PH^*P = -H. \quad (8)$$

与传统的具有共振发射线圈(resonance transmitter coil, RTC)的“共振—共振”型WPT技术相比，“反共振—共振”型满足三阶反PT对称性，其用于WPT时具有更高的传输效率和稳定性。当从本征值角度分析工作频率稳定性，根据(7)式可以得到中心能级存在实数本征值 $\omega_1 = \omega_0$ 的条件为 $\Delta = \sqrt{2} \kappa$ 。ATC和RRC的相互作用导致在 $\omega_0$ 处存在“能级钉扎”效应，可以用来实现稳定的能量传输。

值得注意的是，图4给出的“能级钉扎”本质上源自两种近场耦合机制的竞争抵消：(1)反共振模式的“能级吸引”。随着发射端两个模式间的虚耦合 $\gamma$  (即耗散耦合)增强，失谐的两个模式(对应透射峰)逐渐接近，表现出“能级吸引”，其相应的本征值谱和传输谱分别如图5(a)和(b)所示；(2)反共振模式和共振模式的“能级排斥”。随着发射端—接收端两个模式间的实耦合 $\kappa$  (即相干耦合)增强，劈裂的两个模式(对应透射峰)逐渐远离，表现出“能级排斥”，其相应的本征值谱和传输谱分别如图5(c)和(d)所示。正是系统“能级吸引”和“能级排斥”的竞争抵消导致了新奇的“能级钉扎”效应。

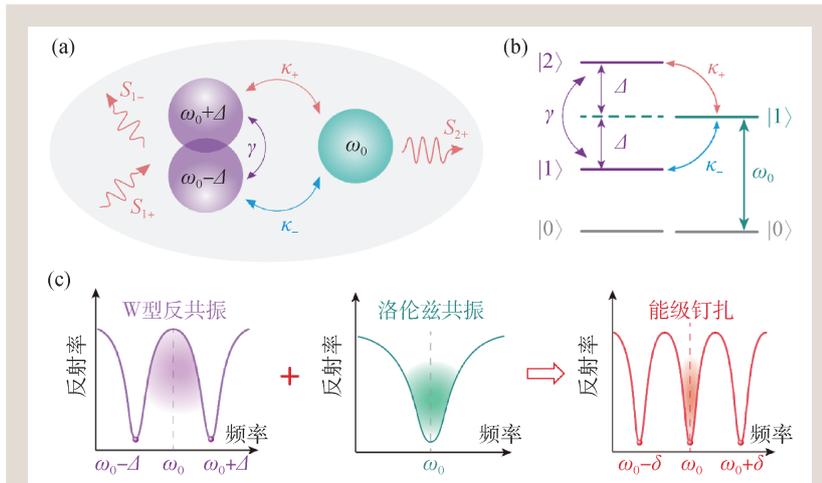


图4 高阶反PT对称非厄米物理系统构建<sup>[32]</sup> (a)由反共振发射端与共振接收端构造的非厄米系统；(b)“反共振—共振”耦合ATC系统的能级示意图；(c)W型“反共振—共振”耦合ATC系统的频谱响应，其中左图、中图和右图分别表示发射线圈、接收线圈以及耦合系统的频谱响应，其中 $\delta = 2\sqrt{\kappa^2 - \gamma^2}$

### 3.2 高阶反PT对称实现稳定高效的无线电能传输

由电源、电阻、电容、电感等元件组成的所有参数都分布在空间节点的电路模型称为集总电路。在集总电路中，各电子元件的特征尺寸远小于工作波长，因此被称为集总元件。对于集总电路，集总元件的电磁特性始终保持固定，几乎与频率无关。在物理机制分析方面，由基尔霍夫定律唯一地确定了集总电路的结构约束(又称拓扑约束，即元件间的联接关系决定电压和电流必须遵循的确定关系)，可以容易地确定系统的物理特性。

具有集总元件的电路基系统为构建各种光子人工结构以及满足具有特殊对称性的非厄米系统提供了灵活的研究平台。上述理论模型可以借助LRC电路实验进行构造与验证。通过改变发射端与共振接收端的线圈尺寸比 $R/r$ 从而调节实耦合 $\kappa$ 的强度，如图6(a)所示。同时可以借助集总电容元件构建“超构线圈”来调节虚耦合 $\gamma$ 强度。不同于传统RTC，图6(b)给出的基于旁路电路合成维度的ATC设计打破了 $n$ 阶系统需要 $n$ 个谐振线圈的固有思路，有效地提升了系统集成度，ATC的等效电路图如图6(c)所示。对比图6(d)给出的相同参数下RTC型与ATC型WPT方案的相图，可以发现前者在强耦合区( $R/r < 1.98$ )的本征频率劈裂为 $f_{2+}$ 与 $f_{2-}$ 两支，后者则始终具有一个与耦合无关的本征频率 $f_{10} = 225$  kHz，图6(d)的实验结果很好地验证了“反共振—共振”型WPT的“能级钉扎”效应。

根据耦合模理论可以方便地计算“反共振—共振”WPT系统的传输效率：

根据耦合模理论可以方便地计算“反共振—共振”WPT系统的传输效率：

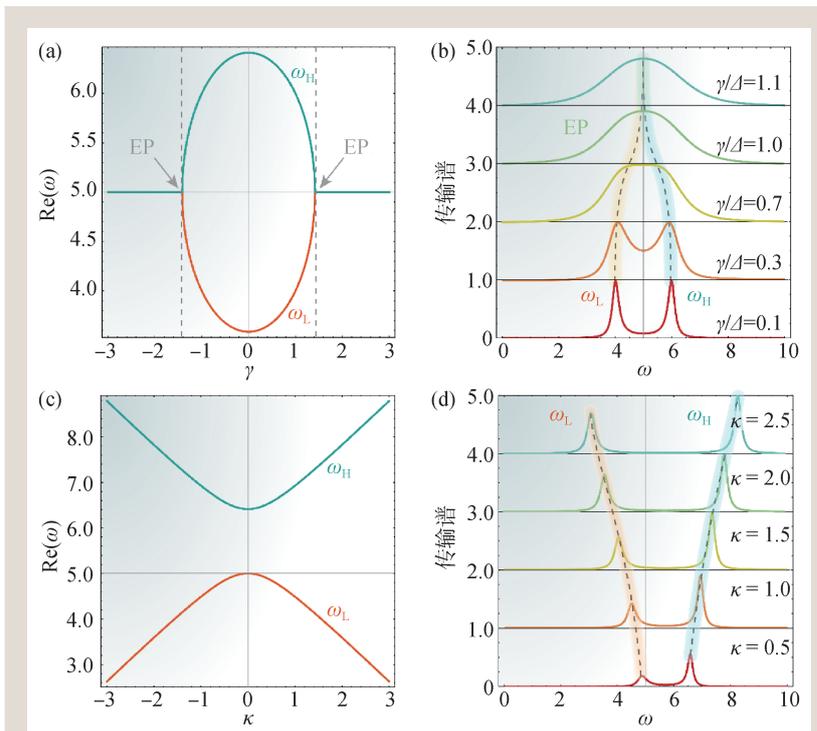


图5 高阶反PT对称非厄米系统的“能级钉扎”效应<sup>[32]</sup> (a)反共振发射线圈的本征实部随 $\gamma$ 变化情况，其中 $\omega_H$ 和 $\omega_L$ 表示耦合劈裂后的高模式和低模式；(b)反共振发射线圈中不同的归一化耗散耦合强度 $\gamma/\Delta$ 对应的传输谱；(c) $\omega_0$ 和 $\omega_0 + \Delta$ 耦合系统的本征值实部；(d) $\omega_0$ 和 $\omega_0 + \Delta$ 耦合系统中不同的实耦合强度 $\kappa$ 对应的传输谱

$$\eta = \left| \frac{S_{2+}}{S_{1+}} \right|^2 = \left| \frac{(2\sqrt{2}\gamma_0\Delta\kappa)/[\gamma_0 - i(\omega - \omega_0)]^2}{\Delta^2 + 2\kappa^2 - (\omega - \omega_0)(i\gamma_0 + \omega - \omega_0)} \right|^2 \quad (9)$$

根据公式(9)，当满足匹配条件( $\Delta = \sqrt{2}\kappa$ )时，总是可以在固定的谐振频率( $\omega = \omega_0$ )下实现优化的传输效率 $\eta = 1$ 。换句话说，在这种匹配条件下，反PT对称WPT系统可以实现与耦合参数无关的稳定高效的WPT。所以基于ATC的WPT系统中的稳定能量传输正好对应于反PT非厄米系统的有效哈密顿量的实本征值。从理论计算的传输效率来看，“反共振—共振”方案在满足反PT对称的条件时传输效率将明显优于传统“共振—共振”方案，如图7(a)所示。特别是图7(b)显示了即使在系统偏离反PT对称的完美匹配条件下，ATC方案对比RTC同样有更好的表现，再次验证了“反共振—共振”方案构造的高阶反PT对称系统用于高效WPT的鲁棒性。

总的来说，非厄米物理为WPT提供了全新的

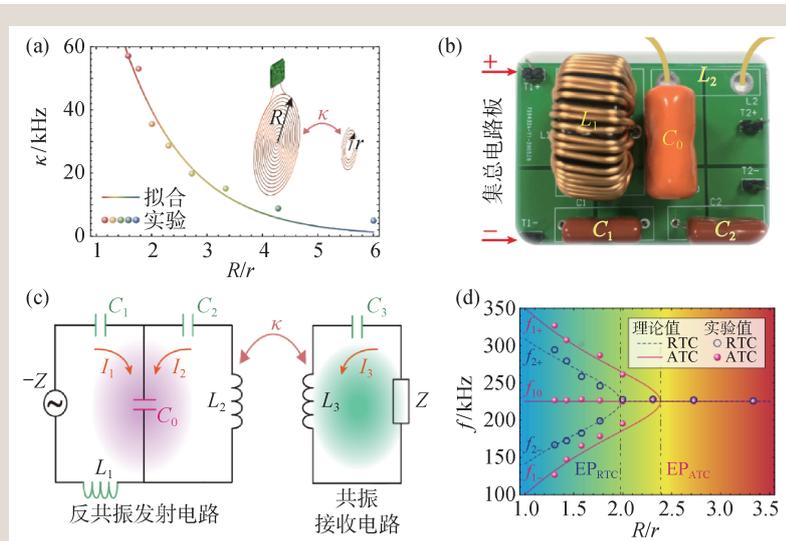


图6 在高阶反PT对称电路系统中“能级钉扎”效应可以实现高效WPT<sup>[32]</sup> (a) ATC和RRC的耦合强度随R/r比值变化; (b)合成ATC用的电路板示意图; (c)合成高阶反PT对称系统的等效电路图; (d)高阶反PT对称系统与RTC系统的相图对比

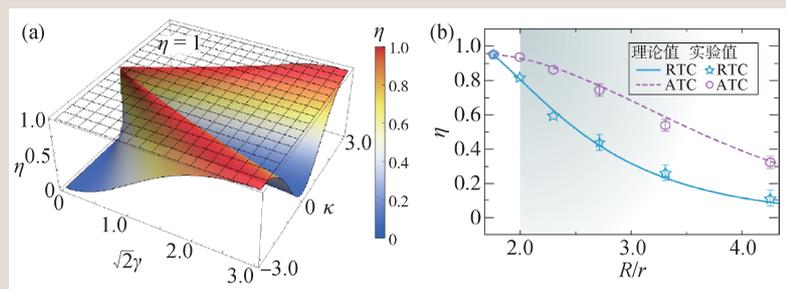


图7 (a)理论对比含有ATC和RTC的WPT系统在固定工作频率 $\omega_0$ 下的传输效率。其中,上方黑色网格面表示ATC的传输效率,中间彩色实体面表示RTC的效率; (b)含有RTC(ATC)的WPT系统传输效率在固定工作频率198.3 kHz (225 kHz)的实验和理论对比

研究思路。特别是基于集总电子元件的超构谐振线圈而构造的非厄米系统,其不仅为丰富的非厄米物理研究提供了一个良好的应用平台,而且有望推广到其他一些突破传统共振机制的近场调控应用中,如无线传感、无线通信、共振成像、光子路由等。

#### 4 总结与展望

将开放的耦合WPT系统等效为封闭的非厄米系统,并通过哈密顿量的本征值以及本征态分析WPT系统的传输特性(效率、待机功率损耗、电磁兼容等)是将非厄米物理作为基本工具解决能量

传输的实际瓶颈,从基础科学走向技术应用的成功典范。本文以经典“共振-共振”WPT系统为参照,详细探讨了二阶PT对称、三阶反PT对称、BIC所实现的高性能WPT新技术。

然而,在WPT技术的实际应用方面,还有尚需解决的诸多问题,如线圈以及集总电路元件本征损耗的影响;主动调控等效增益及其在大功率充电场景中的应用;弱耦合条件下的自动匹配高效能量传输等。基于非厄米物理的WPT技术研究方兴未艾,对拓展光学系统中的新物理概念和研制新型能量传输器件具有重要指导意义。特别是在非厄米物理与拓扑结合方面,利用拓扑模式为长程WPT提供了一个具有拓扑保护的通用平台<sup>[34-37]</sup>,有可能探索具有更复杂、功能更加丰富的能量传输器件,比如在二聚体链中引入非对称耦合时,拓扑系统中经典的体一边对应关系将被打破<sup>[26]</sup>。此时,所有体态坍塌,都从扩展态变为指数衰减的局部态,

利用这一新奇的非厄米趋肤效应可以实现宽带的鲁棒性WPT。此外,考虑高维以及高阶光学拓朴结构,比如利用高阶拓朴结构中的拓朴角态和棱态有望实现多负载的鲁棒性无线电能传输<sup>[38]</sup>。

**致谢** 感谢与同济大学江俊博士、祝可嘉博士、孙勇教授、李云辉教授、江海涛教授、羊亚平教授的有益讨论和在相关研究中的合作。

#### 参考文献

[1] Song M, Belov P, Kapitanova P. Appl. Phys. Rev., 2017, 4: 021102  
 [2] Tesla N. Electr. World Eng., 1904, 43: 23760  
 [3] Brown W C. IEEE Microw. theory., 1984, 32: 1230  
 [4] Sun K, Fan R, Zhang X *et al.* J. Mater. Chem. C, 2018, 6: 2925

- [5] Kurs A, Karalis A, Moffatt R *et al.* Science, 2007, 317: 83
- [6] Zeng C, Guo Z W, Zhu K J *et al.* Chin. Phys. B, 2022, 31: 010307
- [7] Beh T C, Kato M, Imura T *et al.* IEEE Trans. Ind. Electron., 2013, 60: 3689
- [8] Li H, Li J, Wang K *et al.* IEEE Trans. Power Electron., 2015, 30: 3998
- [9] Assawaworrarit S, Yu X, Fan S. Nature, 2017, 546: 387
- [10] Assawaworrarit S, Fan S H. Nat. Electron., 2020, 3: 273
- [11] Kim H, Yoo S, Joo H *et al.* Sci. Adv., 2022, 8: eabo4610
- [12] Wu Y, Kang L, Werner D. Phys. Rev. Lett., 2022, 129: 200201
- [13] Huo X, Yin K, Zou J *et al.* Phys. Rev. Lett., 2023, 130: 077202
- [14] Wu L H, Zhang B, Zhou J L. IEEE Trans. Power Electron., 2020, 35: 12497
- [15] Wei Z, Zhang B. IEEE Trans. Power Electron., 2021, 36: 11135
- [16] Kim S, Ho J S, Poon A S. Phys. Rev. Lett., 2015, 110: 203905
- [17] Mei H, Irazoqui P P. Nat. Biotechnol., 2014, 32: 1008
- [18] Song M, Jayathurathnage P, Zanganeh E *et al.* Nat. Electron., 2021, 4: 707
- [19] Bender C M, Boettcher S. Phys. Rev. Lett., 1998, 80: 5243
- [20] Li Y, Peng Y G, Han L *et al.* Science, 2019, 364: 170
- [21] Liu W W, Zhang Y C, Deng Z H *et al.* Laser & Photon. Rev., 2022, 16: 2100675
- [22] Li A, Wei H, Cotrufo M *et al.* Nat. Nanotechnol., 2023, 18: 706
- [23] Guo Z W, Zhang T Z, Song J *et al.* Photon Res., 2021, 9: 574
- [24] Lu C, Yuan H Y, Zhang H Y *et al.* Chip, 2022, 1: 100025
- [25] Guo Z W, Xue H R, Long Y *et al.* Front. Phys., 2023, 11: 1177898
- [26] Yao S, Wang Z. Phys. Rev. Lett., 2018, 121: 086803
- [27] Xie L, Jin L, Song Z *et al.* Sci. Bull., 2023, 68: 255
- [28] Zhu W, Gong J. Phys. Rev. B, 2023, 108: 035406
- [29] Guo Z W, Jiang H T, Li Y H *et al.* Opt. Express, 2018, 26: 627
- [30] Sun Y, Tan W, Li H Q *et al.* Phys. Rev. Lett., 2014, 112: 143903
- [31] Yang Y, Wang Y P, Rao J W *et al.* Phys. Rev. Lett., 2020, 125: 147202
- [32] Guo Z W, Yang F, Zhang H *et al.* Natl. Sci. Rev., 2023, nwad172
- [33] Yang Y, Xie X, Li Y *et al.* Nat. Commun., 2022, 13: 7678
- [34] Jiang J, Guo Z W, Ding Y *et al.* Opt. Express, 2018, 26: 12891
- [35] Song J, Yang F Q, Guo Z W *et al.* Phys. Rev. Appl., 2021, 15: 014009
- [36] Zhang L, Yang Y H, Jiang Z *et al.* Sci. Bull., 2021, 66: 974
- [37] Yang F, Song J, Guo Z *et al.* Opt. Express, 2021, 29: 7844
- [38] Guo Z W, Hu S Y, Zhang H Y *et al.* Acta Opt. Sin., 2023, 43: 1623011

· 物理新闻和动态 ·

## 陨石坑残留“旋转”的痕迹

数值模拟显示，撞击坑的形状取决于撞击物的旋转及其内部结合的松紧。

20世纪初，商人 Daniel Barringer 因未寻获铁陨石而丢了一笔财富，他笃信那颗铁陨石就藏在亚利桑那陨石坑的下面。虽然鲜有大型陨石撞击（这值得庆幸）发生，但是物理学家认为 Barringer 的努力是徒劳的：那颗陨石在撞击时基本上蒸发了！不过我们对陨石残骸分布的细节仍知之甚少，包括撞击时陨石坑如何成形。巴西 Campinas 州立大学的 Erick Franklin 合作组模拟了陨石的撞击过程，发现其动力学取决于撞击物的



结合强度及其旋转。他们的研究结果有助于解释太阳系行星和卫星上形形色色的陨石坑。

Franklin 与同事模拟了葡萄柚大小的球状投射物，它由近两千粒毫米尺寸的小球组成。模拟中，投射物撞击松散颗粒的表面，设定它的自转轴垂直于该表面，可以改变它撞击和旋转的速度及其内部小球之间结合的强度。

对于撞击后粉碎的投射物，平均而言，旋转较快时产生的碎片抛得更远，但撞击深度会浅些。此外，陨石坑的形状也跟内部结合强度和旋转速度有关：松散结合的投射物会塑造宽而浅的陨石坑，而快速旋转时形成的陨石坑更宽。内部结合弱的撞击物产生的碎片会残留在表面，于陨石坑边缘处堆成峰。这些知识有助于确定陨石坑的物质来源，也许会避免人们蒙受一个世纪前 Barringer 那样的损失。

(徐仁新 编译自 *Physics*, November 22, 2023)

# 安捷伦科技

## HGC-536 便携式真空计套装



支持多种单位,可记录压力曲线

Micro USB 和 5 号电池双电源供电

带背光 LED 显示屏

经济耐用可替换的全金属热电偶真空规管

带磁铁和支架,可吸可立,使用方便

带柔软垫层的手提箱,坚固耐用,方便运输、携带

柔软橡胶保护套,握感舒适,皮实耐摔



安捷伦科技(中国)有限公司 真空产品热线:  
800 820 6778 (固定电话拨打) 400 820 6778 (手机拨打)

了解更多,请扫描左侧二维码阅读介绍文章,或登陆安捷伦官方网站:[www.agilent.com](http://www.agilent.com)  
(搜索“HGC-536”)。