

专题: 量子光学原理与应用

奇异点传感及其发展简述*

张理达[†] 钮月萍[‡] 龚尚庆

(华东理工大学物理学院, 上海 200237)

(2025年10月19日收到; 2026年1月12日收到修改稿)

奇异点 (exceptional point, EP) 作为非厄米物理系统的属性, 因其对微扰的亚线性放大响应, 具有大幅度超越传统传感器灵敏度的潜力. 近年来, EP 传感已在光学、力学与量子等领域取得显著进展. 本文将简要回顾 EP 的研究历史以及其增强传感的物理机制, 进而介绍 EP 传感的现状, 包括在不同物理系统中验证 EP 增强信号响应系数、信噪比及灵敏度的能力. 在此基础上, 探讨了 EP 传感领域目前面临的主要挑战, 如噪声问题、稳定性等及其未来可能的发展方向.

关键词: 奇异点, 亚线性传感, 非厄米系统, 信号响应系数, 信噪比, 灵敏度

DOI: 10.7498/aps.75.20251419

CSTR: 32037.14.aps.75.20251419

1 引言

奇异点 (exceptional point, EP) 是近年来非厄米物理领域备受关注的的一个重要概念^[1]. 它指的是非厄米哈密顿量或算符的参数空间中, 两个或多个本征值及对应本征态同时发生简并的特征点^[2]. 与传统厄米系统不同, 非厄米系统因存在与外界的能量和信息交换, 具有复数本征谱与奇异的动力学现象, EP 正是这类系统中独特的临界态. EP 的本征谱对外界参数扰动呈现亚线性 (例如平方根) 敏感响应, 这种独特的物理特性为高灵敏度传感提供了理论基础和实验途径^[3].

传感技术是现代科学和工程中不可或缺的工具^[4], 其性能直接影响到信息获取的准确性和效率. 在基础研究层面, 传感技术结合新颖物理效应来提升对相位、频率、时间、场强等物理量的测量灵敏度与精度, 为验证物理规律和探索新物理现象提供更高水平的实验手段. 在应用层面, 传感技术有助于开发更灵敏的传感器件, 为构建新一代传感器网

络奠定物理基础, 对现代信息社会和智能化技术的发展具有重要意义. 传统传感器在灵敏度、分辨率及响应速度上不断面临物理和材料的瓶颈. 基于 EP 的传感理念, 借助非厄米系统在 EP 的非平凡特性, 可以实现对极微弱物理量扰动的放大和探测, 并大幅推进传感技术的极限^[3,5].

本文第 2 节和第 3 节简要地介绍 EP 传感的研究历史、理论基础和实验现状. 第 4 节重点梳理 EP 传感在不同物理系统中的实现方式及其性能表现, 探讨当前面临的关键挑战和技术瓶颈. 第 5 节展望未来发展趋势与应用前景.

2 EP 的研究历史

EP 始于对矩阵和算子的研究. 在 1960 年代, 数学家 Kato^[6] 在其著作“线性算子的微扰理论”中首次提出了 EP 概念, 明确了 EP 处矩阵不可对角化、只能约化成 Jordan 型矩阵的性质. 下面我们以最简单的 2×2 矩阵为例, 阐述 EP 的数学基础. 令:

* 国家自然科学基金 (批准号: 12374327, 12034007) 和上海市教委科研创新重大项目 (批准号: 2023ZKZD39) 资助的课题.

[†] 通信作者. E-mail: zhang_lida@foxmail.com

[‡] 通信作者. E-mail: niuyup@ecust.edu.cn

$$H = \begin{bmatrix} i\gamma_1 & J \\ J^* & i\gamma_2 \end{bmatrix}, \quad (1)$$

其中 J 为复数. 简单起见, 假定 γ_1 和 γ_2 为实数. 可以看到, H 是非厄米的, 也就是 $H \neq H^\dagger$. H 的两个本征值为

$$\lambda_{\pm} = i\frac{\gamma_1 + \gamma_2}{2} + \sqrt{|J|^2 - \frac{(\gamma_1 - \gamma_2)^2}{4}}, \quad (2)$$

其对应的本征右矢为

$$|\pm\rangle = e^{i\phi_{\pm}} \begin{bmatrix} \frac{J}{|\lambda_{\pm} - i\gamma_1|^2 + |J|^2} \\ \frac{\lambda_{\pm} - i\gamma_1}{|\lambda_{\pm} - i\gamma_1|^2 + |J|^2} \end{bmatrix}. \quad (3)$$

其中 ϕ_{\pm} 是任意的整体相位. 可以看到, 当满足条件 $|J|^2 = (\gamma_1 - \gamma_2)^2/4$ 时, $\lambda_+ = \lambda_-$ (如图 1(a), (b) 所示). 同时, $|+\rangle = e^{i(\phi_+ - \phi_-)}|-\rangle$, 可见 $|+\rangle$ 与 $|-\rangle$ 只差一个整体相位. 可以用 $|\langle -|+\rangle|$ 来表征两个本征右矢的非正交程度, 当 $|\langle -|+\rangle| = 0$ 时两个矢量正交. 如图 1(c) 所示, 当取 $\gamma_1 = -\gamma_2 = \gamma$ 且 $J/\gamma = 1$ 时, $|\langle -|+\rangle| = 1$, 表明两个本征矢相同. 因此, 在此条件下, H 的本征值和本征矢同时简并, 此条件即称为 H 的 EP. 可以检验, 处于 EP 时, H 不可对角化, 而只能约化成 Jordan 型矩阵.

此后的一段较长时期, EP 的研究主要局限在数学领域. 直到 1998 年, Bender 和 Boettcher^[7] 提出宇称时间 (parity-time, PT) 反演对称的非厄米哈密顿量, 并证明这类系统在某些参数区间内仍具有实数本征值谱, 越过 EP, 本征值谱变为复数. 此发现引发非厄米量子力学的热潮^[8-12], 随着理论深入, 人们发现在物理系统中利用等量的增益和损耗可以实现 PT 对称的非厄米哈密顿量. 2010 年前

后, 首次在耦合的光学波导系统中实验观测到 EP 及其对应的对称破缺现象^[13,14], 此类实验可以在上述哈密顿量 (1) 的基础上理解. 实验中考虑 $\gamma_1 = -\gamma_2 = \gamma$ 的特殊情形, 物理上对应一根波导存在损耗, 另一根波导存在等量的增益. 此时 H 满足宇称时间反演对称性, 也就是 $[H, \mathcal{PT}] = 0$, 其中 $\mathcal{P} = \hat{\sigma}_x$ 是宇称反演算符, $\hat{\sigma}_x$ 表示泡利矩阵. $\mathcal{T}: i \rightarrow -i$ 是时间反演算符. 当 $|J|^2 > \gamma^2$, 本征值 λ_{\pm} 是实数 (如图 1(a) 所示), $|\pm\rangle$ 同时也是 \mathcal{PT} 的本征矢, 此时称系统处于 PT 对称性未破缺相. 但是当 $|J|^2 < \gamma^2$, 本征值变为一对共轭的虚数 (如图 1(b) 所示), $|\pm\rangle$ 不再是 \mathcal{PT} 的本征矢, 此时称系统处于 PT 对称性破缺相^[13,14]. 在此意义上, EP 是 PT 对称破缺的临界点. 在实验中通过调节 J 和 γ 的相对大小, 即可以观察到对称破缺现象. 这些实验极大推动了非厄米系统中 EP 的研究, 在不同物理系统中如光子学^[1,15-28]、原子系综^[29-34]、离子阱^[35,36]、声学^[37-39]、固态体系^[40-46] 中均观察到类似的现象和 EP 的存在. 同时, EP 的其他特性也得到了进一步探索和发现, 例如单向隐身^[15-17]、耗散诱导的激光产生机制^[18-20]、手性态^[43,47,48]、量子关联效应^[49,50]、拓扑性质^[51-60]、快慢光^[61,62]、增强型传感^[5,23-27,34,63-84] 等.

EP 在传感中的潜力源于其频率或能级对系统参数扰动的亚线性响应. 2014 年, Wiersig^[63] 的开创性工作指出, 在 EP 附近, 本征频率的劈裂与微扰呈平方根依赖关系. 同样以上述哈密顿量为例, 简单起见考虑 $\gamma_1 = -\gamma_2 = \gamma$ 且 $\gamma > 0$ 及 J 为实数. 当给 J 施加一个微扰 ϵ , 也就是 $J \rightarrow J_{\text{EP}} + \epsilon$ 时, 此处 $J_{\text{EP}} = \gamma$, 本征值变为

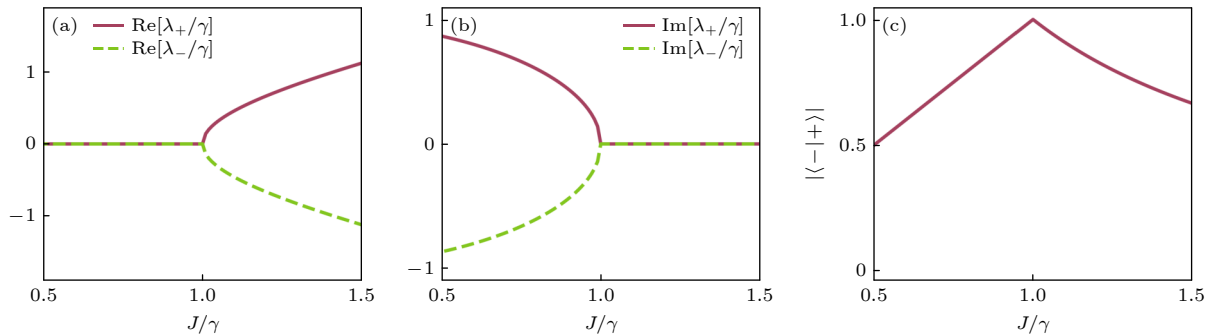


图 1 本征值实部 (a) 和虚部 (b) 随 J/γ 的变化; (c) 展示两个本征右矢的非正交程度随 J/γ 的变化, 由 $|\langle -|+\rangle|$ 表征. 图中参数 $\gamma_1 = \gamma, \gamma_2 = -\gamma$

Fig. 1. The real and imaginary parts of the two eigenvalues λ_+ and λ_- are plotted in (a) and (b) as a function of J/γ respectively; (c) while the non-orthogonality between the two eigenvectors, which is characterized by $|\langle -|+\rangle|$. Parameters are $\gamma_1 = \gamma, \gamma_2 = -\gamma$.

$$\lambda_{\pm} = \sqrt{\epsilon(2\gamma + \epsilon)}. \quad (4)$$

当 $|\epsilon| \ll \gamma$ 时, 可以发现 $\lambda_{\pm} \propto \sqrt{\epsilon}$, 也就是本征值劈裂与微扰 ϵ 成平方根关系. 平方根函数在接近零点时的斜率非常大, 这表示即使扰动 ϵ 极小, 导致的本征值分裂 λ_{\pm} 也相对较大. 通俗地说, 小幅度的变化经过平方根映射后被放大, 也就是更灵敏. 研究者们一般用所测物理量对微扰的导数绝对值来定义信号响应系数^[72]. 当所测物理量是上述本征值时, 可以定义信号响应系数为^[72]

$$S_{\epsilon} = \left| \frac{d\lambda_{\pm}}{d\epsilon} \right|. \quad (5)$$

由于 $\lambda_{\pm} \rightarrow \sqrt{\epsilon}$, 可知 $S_{\epsilon} \rightarrow 1/|\sqrt{\epsilon}|$. 在极小扰动情况下 ($\epsilon \rightarrow 0$), 相比传统系统中的线性响应, 信号响应系数可以得到显著增强 (如图 2(a) 所示). 这一发现成为基于 EP 设计高灵敏度传感器的理论基础. 除了可以通过本征值测量微扰, 根据本征值对应系统响应谱中的极值 (如谱峰), 更常见的是通过系统响应谱中谱峰之间的频率间距来测量微扰, 如图 2(b) 所示. 有必要指出的是, 目前灵敏度一词在不同文献中其物理含义不同, 存在两种不同的定义. 例如文献^[72]采用灵敏度指代信号响应系数, 即待测物理量相对于微扰导数的绝对值, 也即由 (5) 式定义. 另外, 灵敏度也常用来表示最小可探测扰动. 根据误差传播公式, 最小可测扰动由所测物理量的方差除以信号响应系数决定^[4]. 为避免歧义, 下文将 S_{ϵ} 称为信号响应系数, 而最小可测扰动称为灵敏度. 以上以二阶 EP (即本征值与微扰成平方根关系) 为例阐述 EP 增强传感的物理机

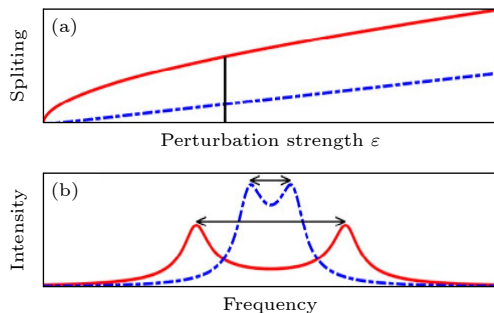


图 2 (a) EP 附近本征值与一般线性响应对应的本征值随微扰变化的比较; (b) 系统相应的强度出射谱峰间距的比较^[8]

Fig. 2. (a) Comparison of eigenvalues between the case of non-Hermitian system near the EP and that of a Hermitian system whose eigenvalues depend linearly on the perturbation; (b) the corresponding comparison of the spectral splitting between the two cases^[8].

制, 研究人员也进一步将注意力扩展至三阶以及更高阶 EP (其本征值正比于 $\epsilon^{1/n}$ ($n \geq 3$)) 的构造^[24,41,46,54,83,85-94], 期望通过更高阶 EP 实现灵敏度的进一步放大.

3 EP 传感现状

随着理论逐渐成熟, EP 传感已在光学等多种物理平台中得以实现与验证. 本节将系统介绍 EP 传感在主要物理系统中的实现方法及其发展现状, 分为两部分: 3.1 节概述利用 EP 增强信号响应系数的代表性实验工作; 3.2 节聚焦利用 EP 增强传感关键参数如信噪比、灵敏度等.

3.1 利用 EP 增强信号响应系数

光学系统因其高度可调控且制造工艺成熟, 成为 EP 传感研究的核心平台. 多个国际知名研究团队在非厄米光学微腔、光纤等结构中成功构建并操控 EP, 通过实验验证了 EP 的亚线性响应能够显著提升信号响应系数, 推动了该领域的发展^[23,24,26,95,96]. 这方面的工作通常通过耦合两个或多个微腔, 分别引入精确调节的增益与损耗, 构造 PT 对称或类似的非厄米等效哈密顿量, 在参数空间实现 EP. 系统本征频率或模式劈裂对微小扰动 (如折射率变化、纳米粒子的存在) 敏感, 响应呈平方根依赖关系, 从而显著提升传感灵敏度. 最早验证 EP 增强信号响应系数的实验是基于光学微腔^[23]. 2017 年, Chen 等^[23]使用两个纳米级散射体与回音壁微环腔耦合 (如图 3 所示), 精确调控系统至 EP. 随后, 将纳米尺度的待测目标物靠近腔体的倏逝场, 导致系统在 EP 发生频率劈裂, 其劈裂明显大于传统非奇异点传感方案中观察到的劈裂, 从而首次在实验上验证了 EP 增强传感的能力^[23]. 同年, Hodaiei 等^[24]通过在一个微环腔中引入增益并在另一个微环腔中引入损耗, 两个腔通过一个中间无增益损耗的微环腔连接, 构成 3 个微环腔耦合的体系^[24]. 他们在此体系中观测到了三阶 EP 导致的劈裂, 并证实了信号响应系数的提升. 此后, EP 传感被进一步应用于 Sagnac 效应. 例如, Hokmabadi 等^[95]在环形腔结构中利用二阶 EP 增强了 Sagnac 效应的信号响应系数. Lai 等^[26]在微腔布里渊陀螺仪中也观察到了 EP 增强的 Sagnac 效应. 这些微腔方面的工作为 EP 传感提供了确凿的实验证据, 为 EP 传感

的进一步发展奠定了基础。

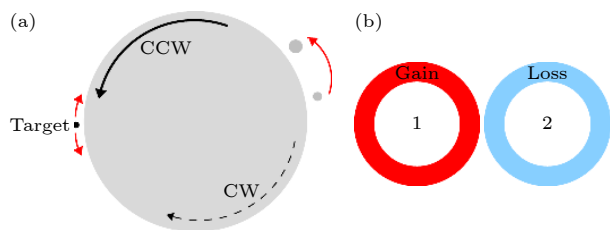


图 3 (a) 回音壁微环腔与右侧两个纳米级散射体耦合构成一个顺时针和逆时针腔模耦合的非厄米系统; (b) 等价于两个存在对等增益和耗散的双腔耦合模型. 通过调节参数, 可将系统制备在 EP, 图 (a) 中左侧的散射体引入微扰使得系统偏离 EP^[3]

Fig. 3. (a) A microdisk cavity coupled with two nanometer scatterers (on the right) to form a non-Hermitian system of two coupled clockwise and counterclockwise modes; (b) this is equivalent to a PT-symmetric system of two coupled cavities with equal gain and loss. After preparing the system at the EP, a target scatterer shown on the left is placed to introduce the perturbation to be measured near the EP^[3].

此后 EP 传感研究被拓展到波导系统中. 光波导系统具有结构简单、易于集成、损耗和耦合参数可控的特点, 可以方便地将 EP 传感新机制与现有的光纤传感器结合提升测量的信号响应系数. 此类结构因其高度可设计性和尺寸可控性, 在集成光学芯片传感中具有潜力. 2023 年, Li 等^[96] 验证了基于波导的 EP 传感. 他们在掺铒光纤中通过刻写 3 个级联布拉格光栅构成两个耦合的法布里-珀罗腔结构, 并通过控制泵浦功率调节两个腔中的增益与损耗使系统制备在 EP. 施加于增益谐振器上的弯曲力使系统偏离异常点, 导致频率劈裂, 且频率间隔与弯曲曲率成亚线性关系. 因此, 通过测量频率间隔, 可以增强曲率测量的信号响应系数. 这方面的工作结合 EP 和光纤传感, 为未来实现更灵敏的光纤传感器及其小型化和传感网络开辟了新的路径. 当然, 在真正应用之前, 仍需要大量的工作来验证实际应用场景中光纤 EP 传感的稳定性和可靠性.

除光学系统外, EP 增强传感同时也被拓展到等离子结构中. 2020 年, Park 等^[44] 研究了金属等离子体纳米共振腔阵列构成的耦合双层等离子结构中的二阶 EP. 他们从理论上计算了 EP 与阵列周期以及层间相对位移的关系, 并通过实验进行了验证. 在此基础上, 他们将其应用于免疫球蛋白浓度测量, 发现 EP 可以增强信号响应系数. 这方面的工作开启了 EP 生物传感的可能性, 未来也许可

以进一步拓展到其他特征生物大分子的高灵敏度测量, 这将在病毒监测方面具有巨大价值.

3.2 利用 EP 增强测量信噪比和灵敏度

信号响应系数的提升并不必然意味着测量灵敏度的提升. 这是因为, 从测量的角度看, 决定测量灵敏度的因素除了信号响应系数, 还有因为噪声导致的测量误差. 前期工作验证了 EP 可以提高信号响应系数后, 人们进而追问 EP 是否可以提高表征传感的核心参数, 例如信噪比或灵敏度. 这些参数不仅和信号响应系数有关, 同时也取决于系统对应的噪声. 后续的研究发现^[65-67], EP 在提高信号响应系数的同时, 也同等地放大了噪声, 从而使得不管是信噪比还是灵敏度都没有得到提升. 例如, 2018 年 Langbein^[65] 发现 EP 无法提高灵敏度. 2020 年, Wang 等^[27] 在布里渊型激光陀螺中的实验发现在 EP 附近测量本征频率劈裂时, 频率测量过程中的噪声被放大, 并随着靠近 EP 急剧增大, 且其放大倍数等于信号放大倍数, 完全抵消了信号放大效应, 使得测量信噪比以及灵敏度均没有得到提升.

直到 2022 年, Kononchuk 等^[72] 在经典电路结构中构建 EP, 并在 EP 附近测量加速度, 实验结果显示不仅提高了信号响应系数也提高了信噪比, 他们利用经典的电阻电感电容电路构成共振器, 并将两个共振器通过一个电容耦合到一起, 耦合电容的一端与一个质量为 m 的物体相连. 根据耦合模理论, 两个耦合的共振器构成一个简单的 PT 对称系统. 实验中通过给物体施加一定的加速度从而给系统造成扰动. 实验上通过测量系统出射谱的两个峰劈裂之间的间距, 可以得到物体的加速度. 他们发现由于 EP 的存在, 峰劈裂间距与加速度造成的微扰成根号依赖关系. 但是由于系统额外的耗散, 出射谱的峰简点与 EP 并不重合, 而是稍微偏离 EP. 并且他们从理论上发现并从实验上证实峰简并点的信号放大倍数略大于噪声放大倍数, 从而不仅提升了信号响应系数也同时得到了增强的信噪比. 这是实验上第一次基于 EP 传感获得了增强的信噪比, 是 EP 传感研究领域具有转折性意义的一个代表性实验.

通过测量出射谱峰劈裂而不是本征频率劈裂为 EP 传感提高信噪比及灵敏度提供了新的思路. 这一思想被进一步拓展到纳米位移测量和基于磁

光效应的磁力仪中^[81,82]. 2024年, Xu等^[81]在光学腔中加入可在纳米尺度上移动的反射镜, 反射镜将光学腔分为两个子腔. 通过在其中一个子腔内加入掺铒吸收体来调节其耗散, 可将系统制备在出射谱劈裂的简并点上. 此时给反射镜施加一个纳米级位移扰动, 出射谱发生劈裂, 而且其劈裂间距和纳米级位移存在平方根关系, 由此他们在实验上观测到了纳米位移测量的信号响应系数增强, 其增强幅度将近两个数量级. 同时, 出射谱劈裂简并点虽然靠近 EP, 但是并不重合, 意味着噪声放大效应没有被同等放大, 实验上也得到了 5 倍的信噪比增强. 此后, Ruan等^[82]在光学腔中引入法拉第磁光材料耦合腔的两个水平和垂直偏振本征模式, 此外通过放入液晶材料调控两个偏振模式的耗散. 当耗散不相同, 系统中存在 EP 以及出射峰简并点, 两者靠近但并不重合. 在出射峰简并点给磁光材料施加磁场时, 峰劈裂间距与磁场成平方根关系, 从而可以通过观察出射谱峰劈裂测量所加磁场. 由于平方根关系, 实验上观测到了增强 10 倍的信号响应系数. 此外, 由于在出射峰简并点附近的噪声放大倍数较 EP 小, 同时也得到了 3 倍增强的信噪比.

目前, 证实 EP 传感可以提高信噪比的实验还局限于上述电路和光学系统中. 然而, 这些先驱实验为 EP 传感增强信噪比奠定了坚实的基础, 另一方面, 也为 EP 传感开启了新的篇章. 可以预见, 在不久的将来, EP 传感增强信噪比也会在其他物理系统中得到证实. 事实上, EP 已在其他不同物理系统中观测到, 这些体系中利用 EP 传感来增强测量各类物理量的信噪比和灵敏度有待挖掘.

4 EP 传感研究面临的主要挑战

EP 传感研究取得了长足的进展, 也面临着不少的挑战, 简述如下.

1) 噪声放大与信噪比限制. EP 传感的核心优势源于系统本征频率对微小扰动具有亚线性响应, 即使极微弱的物理量变化也能引起显著频率劈裂. 然而, EP 不仅放大了信号, 同时也放大了系统中的噪声. 虽然可以通过调节系统耗散使得 EP 劈裂偏移输出谱劈裂, 使得噪声放大倍数略小于信号放大倍数, 从而获得有限的信噪比提升, 但是目前线性系统中基于增益和耗散制备 EP 的方式因为噪声放大的关系, 其信噪比提升倍数远小于信号放大

倍数, 不能充分利用 EP 增强传感性能的优势, 因此如何抑制 EP 传感中的噪声问题是目前面临的主要挑战之一.

2) 统一的理论框架. 一方面, 根据具体的测量方案, 目前已在经典体系中通过测量本征频率或者出射谱劈裂的方法证实 EP 传感可以提高信噪比和灵敏度^[72,81,82]. 另一方面, 根据全量子模型中的参数估计理论, 人们发现线性非厄米系统的 Fisher 信息不能超过对应的厄米系统, 也就意味着利用线性非厄米系统测量的灵敏度不会超过对应的厄米系统^[66,67,78]. 此外, 特定条件下非线性厄米量子系统中的 Fisher 信息在 EP 可以达到极大值^[74,83], 展现出 EP 在厄米系统中提高灵敏度的潜力. 从不同模型和角度出发得出迥异的结论, 如何在统一的理论框架下分析和研究 EP 传感也是挑战之一.

3) 系统稳定性挑战. EP 对应的是非厄米系统中本征值和本征模的同时简并, 系统对参数扰动极度敏感. 虽因此灵敏度提升, 但稳定性下降^[73]. 制造误差、温度波动甚至环境震动等均可能导致系统偏离 EP, 使得灵敏度急剧下降. 这种极致的参数敏感使得 EP 传感器在实际应用受限. 设计具有自适应调整和错误容忍能力的非厄米结构 (如 Exceptional surface^[97,98]), 发展稳定性调控和自恢复机制, 是实现 EP 传感器实用化的关键.

5 EP 传感的未来发展方向

从 2014 年理论上提出利用 EP 增强传感至今不过十余年, EP 传感不管是实验上还是理论上都已取得了巨大进展. 当然也应看到, 如上所述, 对 EP 传感的深入研究也引入了新的挑战. 这一方面表明 EP 传感仍然是一个充满机会的研究领域, 同时也为未来的 EP 传感研究指明了方向. 结合其他领域的发展推进 EP 传感的研究, 将是 EP 传感研究有可能取得突破的重要方向, 例如:

1) EP 传感与量子效应结合. 量子噪声是限制 EP 传感性能的关键因素^[66,67,78]. 目前实验进展展示了 EP 传感可以小幅度增强测量信噪比, 但由于增益或损耗导致的放大的真空量子噪声, 使得测量噪声远高于标准量子极限. 进一步提升信噪比和灵敏度是决定 EP 传感未来的关键因素, 其中一个可能的发展方向是利用量子效应来抑制 EP 传感过程中的量子噪声. 目前已有研究发现非线性量子光学系

统中例如压缩态过程中存在 EP^[74,76,99-102], 在此基础上, 可以研究利用压缩态过程中的 EP 抑制传感噪声. 另外, 结合量子光学中已有的测量手段来抑制 EP 传感噪声也是可能方向之一, 例如针对目前 EP 传感中测量强度谱的方式, 可以探索利用单光子探测^[103,104]、符合测量^[105-107]等方式降低强度噪声.

2) 利用 EP 测量动态微扰. 目前 EP 传感方面的研究, 不管是理论还是实验都只考虑静态微扰, 也就是微扰不随时间变化的情况. 然而实际应用中更常见的场景是需要测量随时间变化的动态微扰. 这方面最典型的例子就是引力波测量^[108], 周期性的引力波引起激光干涉仪中腔长微小的周期性随时变化. 如何拓展 EP 传感使其适用于更广阔的应用场景可能是 EP 传感未来的发展方向之一. 在这一方向上, 作为初步的可行性验证, 可以考虑在目前已实现的 EP 传感的物理平台例如光学系统中加入随时间缓慢变化的动态微扰, 在远小于其变化的时间范围内完成 EP 传感. 此后可以逐步研究提高动态微扰的时间分辨率.

3) 器件微型化与集成化. 推动 EP 传感从实验室原理演示走向实际应用需要实现器件的微型化和系统集成. 目前基于光学微腔和波导的 EP 传感已为 EP 传感器件奠定了良好的开端, 在此基础上, 可以进一步解决 EP 传感在特定应用场景中的稳定性. 此后, 利用先进的微纳加工技术、集成光电子芯片及柔性材料, 实现体积小、成本低、功耗低且灵敏度高的集成 EP 传感器, 是未来 EP 传感技术走向实用的必经之路.

6 总结

EP 传感代表了非厄米物理与传感技术的深度融合, 因其非厄米临界点带来的亚线性响应, 显著提升了微扰检测的信号响应系数. 过去数十年间, 从早期非厄米量子力学理论出发, 发展至光学、力学、声学及量子系统中的广泛实现, EP 传感已展现出跨学科、不同物理量检测的强大潜力.

当前, EP 传感技术虽然取得了令人瞩目的进展, 包括增强的信噪比及灵敏度, 但噪声放大、系统稳定性和实际应用集成等问题仍是其通向实际应用过程中需要解决的主要瓶颈. 未来通过发展稳定性调控和回馈机制、结合量子效应与工程微纳技

术的联合发展, EP 传感有望实现从实验室走向产业化, 推动精准传感技术进入新纪元.

参考文献

- [1] Miri M A, Alù A 2019 *Science* **363** eaar7709
- [2] Heiss W D 2012 *J. Phys. A Math. Theor.* **45** 444016
- [3] Wiersig J 2020 *Photon. Res.* **8** 1457
- [4] Degen C L, Reinhard F, Cappellaro P 2017 *Rev. Mod. Phys.* **89** 035002
- [5] Wiersig J 2020 *Nat. Commun.* **11** 2454
- [6] Kato T 1966 *Perturbation Theory for Linear Operators* (Berlin, Germany: Springer). Chap. 2.1
- [7] Bender C M, Boettcher S 1998 *Phys. Rev. Lett.* **80** 5243
- [8] Bender C M, Brody D C, Jones H F 2002 *Phys. Rev. Lett.* **89** 270401
- [9] Mostafazadeh A 2010 *Int. J. Geom. Methods Mod. Phys.* **07** 1191
- [10] Brody D C 2013 *J. Phys. A Math. Theor.* **47** 035305
- [11] Gong J, Wang Q H 2013 *J. Phys. A Math. Theor.* **46** 485302
- [12] Bender C M, Hook D W 2024 *Rev. Mod. Phys.* **96** 045002
- [13] Guo A, Salamo G J, Duchesne D, Morandotti R, Volatier-Ravat M, Aimez V, Siviloglou G A, Christodoulides D N 2009 *Phys. Rev. Lett.* **103** 093902
- [14] Rüter C E, Makris K G, El-Ganainy R, Christodoulides D N, Segev M, Kip D 2010 *Nat. Phys.* **6** 192
- [15] Lin Z, Ramezani H, Eichelkraut T, Kottos T, Cao H, Christodoulides D N 2011 *Phys. Rev. Lett.* **106** 213901
- [16] Regensburger A, Bersch C, Miri M A, Onishchukov G, Christodoulides D N, Peschel U 2012 *Nature* **488** 167
- [17] Feng L, Xu Y L, Fegadolli W S, Lu M H, Oliveira J E B, Almeida V R, Chen Y F, Scherer A 2013 *Nat. Mater.* **12** 108
- [18] Liertzer M, Ge L, Cerjan A, Stone A D, Türeci H E, Rotter S 2012 *Phys. Rev. Lett.* **108** 173901
- [19] Brandstetter M, Liertzer M, Deutsch C, Klang P, Schöberl J, Türeci H E, Strasser G, Unterrainer K, Rotter S 2014 *Nat. Commun.* **5** 4034
- [20] Peng B, Özdemir Ş K, Rotter S, Yilmaz H, Liertzer M, Monifi F, Bender C M, Nori F, Yang L 2014 *Science* **346** 328
- [21] Zhen B, Hsu C W, Igarashi Y, Lu L, Kammer I, Pick A, Chua S L, Joannopoulos J D, Soljačić M 2015 *Nature* **525** 354
- [22] Doppler J, Mailybaev A A, Böhm J, Kuhl U, Girschik A, Libisch F, Milburn T J, Rabl P, Moiseyev N, Rotter S 2016 *Nature* **537** 76
- [23] Chen W, Kaya Özdemir S, Zhao G, Wiersig J, Yang L 2017 *Nature* **548** 192
- [24] Hodaie H, Hassan A U, Wittek S, Garcia-Gracia H, El-Ganainy R, Christodoulides D N, Khajavikhan M 2017 *Nature* **548** 187
- [25] Mortensen N A, Gonçalves P A D, Khajavikhan M, Christodoulides D N, Tserkezis C, Wolff C 2018 *Optica* **5** 1342
- [26] Lai Y H, Lu Y K, Suh M G, Yuan Z, Vahala K 2019 *Nature* **576** 65
- [27] Wang H, Lai Y H, Yuan Z, Suh M G, Vahala K 2020 *Nat. Commun.* **11** 1610
- [28] Wang C Q, Jiang X F, Zhao G M, Zhang M Z, Hsu C W, Peng B, Stone A D, Jiang L, Yang L 2020 *Nat. Phys.* **16** 334
- [29] Cartarius H, Main J, Wunner G 2007 *Phys. Rev. Lett.* **99** 173003

- [30] Peng P, Cao W X, Shen C, Qu W Z, Wen J M, Jiang L, Xiao Y H 2016 *Nat. Phys.* **12** 1139
- [31] Liang C, Tang Y, Xu A N, Liu Y C 2023 *Phys. Rev. Lett.* **130** 263601
- [32] Zhang Z, Zhang F, Xu Z, Hu Y, Bao H, Shen H 2024 *Phys. Rev. Lett.* **133** 133601
- [33] Kopciuch M, Miranowicz A 2025 *Phys. Rev. Res.* **7** 033187
- [34] Zhang J, Li E Z, Wang Y J, Liu B, Zhang L H, Zhang Z Y, Shao S Y, Li Q, Chen H C, Ma Y, Han T Y, Wang Q F, Nan J D, Yin Y M, Zhu D Y, Guo G C, Ding D S, Shi B S 2025 *Nat. Commun.* **16** 3511
- [35] Ding L, Shi K, Zhang Q, Shen D, Zhang X, Zhang W 2021 *Phys. Rev. Lett.* **126** 083604
- [36] Chen Y Y, Li K, Zhang L, Wu Y K, Ma J Y, Yang H X, Zhang C, Qi B X, Zhou Z C, Hou P Y, Xu Y, Duan L M 2025 *Nat. Commun.* **16** 7478
- [37] Shi C Z, Dubois M, Chen Y, Cheng L, Ramezani H, Wang Y, Zhang X 2016 *Nat. Commun.* **7** 11110
- [38] Lü H, Özdemir S K, Kuang L M, Nori F, Jing H 2017 *Phys. Rev. Appl.* **8** 044020
- [39] Zhang J, Peng B, Özdemir S K, Pichler K, Krimer D O, Zhao G, Nori F, Liu Y X, Rotter S, Yang L 2018 *Nat. Photonics* **12** 479
- [40] Stehmann T, Heiss W D, Scholtz F G 2004 *J. Phys. A Math. General* **37** 7813
- [41] Xiao Z, Li H, Kottos T, Alù A 2019 *Phys. Rev. Lett.* **123** 213901
- [42] Gao T, Estrecho E, Bliokh K Y, et al. 2015 *Nature* **526** 554
- [43] Gao T, Li G, Estrecho E, Liew T C H, Comber-Todd D, Nalitov A, Steger M, West K, Pfeiffer L, Snoke D W, Kavokin A V, Truscott A G, Ostrovskaya E A 2018 *Phys. Rev. Lett.* **120** 065301
- [44] Park J H, Ndao A, Cai W, Hsu L, Kodigala A, Lepetit T, Lo Y H, Kanté B 2020 *Nat. Phys.* **16** 462
- [45] Wu Y, Liu W Q, Geng J P, Song X R, Ye X Y, Duan C K, Rong X, Du J F 2019 *Science* **364** 878
- [46] Wu Y, Wang Y H, Ye X Y, Liu W Q, Niu Z B, Duan C K, Wang Y, Rong X, Du J F 2024 *Nat. Nanotechnol.* **19** 160
- [47] Heiss W D, Harney H L 2001 *Europ. Phys. J. D* **17** 149
- [48] Peng B, Özdemir Ş K, Liertzer M, Chen W, Kramer J, Yılmaz H, Wiersig J, Rotter S, Yang L 2016 *PNAS* **113** 6845
- [49] Cao W, Lu X, Meng X, Sun J, Shen H, Xiao Y 2020 *Phys. Rev. Lett.* **124** 030401
- [50] Huang R, Özdemir S K, Liao J Q, Minganti F, Kuang L M, Nori F, Jing H 2022 *Laser Photonics Rev.* **16** 2100430
- [51] Dembowski C, Gräf H D, Harney H L, Heine A, Heiss W D, Rehfeld H, Richter A 2001 *Phys. Rev. Lett.* **86** 787
- [52] Dembowski C, Dietz B, Gräf H D, Harney H L, Heine A, Heiss W D, Richter A 2004 *Phys. Rev. E* **69** 056216
- [53] Xu H, Mason D, Jiang L Y, Harris J G E 2016 *Nature* **537** 80
- [54] Ding K, Ma G, Xiao M, Zhang Z Q, Chan C T 2016 *Phys. Rev. X* **6** 021007
- [55] Leykam D, Bliokh K Y, Huang C, Chong Y D, Nori F 2017 *Phys. Rev. Lett.* **118** 040401
- [56] Shen H T, Zhen B, Fu L 2018 *Phys. Rev. Lett.* **120** 146402
- [57] Hassani Gangaraj S A, Monticone F 2018 *Phys. Rev. Lett.* **121** 093901
- [58] Zhou H, Peng C, Yoon Y, Hsu C W, Nelson K A, Fu L, Joannopoulos J D, Soljačić M, Zhen B 2018 *Science* **359** 1009
- [59] Yoon J W, Choi Y, Hahn C, Kim G, Song S H, Yang K Y, Lee J Y, Kim Y, Lee C S, Shin J K, Lee H S, Berini P 2018 *Nature* **562** 86
- [60] Okuma N, Kawabata K, Shiozaki K, Sato M 2020 *Phys. Rev. Lett.* **124** 086801
- [61] Goldzak T, Mailybaev A A, Moiseyev N 2018 *Phys. Rev. Lett.* **120** 013901
- [62] Zhu Y C, Hou J K, Geng Q, Xue B Y, Chen Y P, Chen X F, Ge L, Wan W J 2024 *Nat. Commun.* **15** 8101
- [63] Wiersig J 2014 *Phys. Rev. Lett.* **112** 203901
- [64] Wiersig J 2016 *Phys. Rev. A* **93** 033809
- [65] Langbein W 2018 *Phys. Rev. A* **98** 023805
- [66] Lau H K, Clerk A A 2018 *Nat. Commun.* **9** 4320
- [67] Chen C, Jin L, Liu R B 2019 *New J. Phys.* **21** 083002
- [68] Zhang M, Sweeney W, Hsu C W, Yang L, Stone A D, Jiang L 2019 *Phys. Rev. Lett.* **123** 180501
- [69] Yu S, Meng Y, Tang J S, Xu X Y, Wang Y T, Yin P, Ke Z J, Liu W, Li Z P, Yang Y Z, Chen G, Han Y J, Li C F, Guo G C 2020 *Phys. Rev. Lett.* **125** 240506
- [70] Qin G Q, Xie R R, Zhang H, Hu Y Q, Wang M, Li G Q, Xu H, Lei F, Ruan D, Long G L 2021 *Laser Photon. Rev.* **15** 2000569
- [71] Geng Q, Zhu K D 2021 *Photonics Res.* **9** 1645
- [72] Kononchuk R, Cai J, Ellis F, Thevamaran R, Kottos T 2022 *Nature* **607** 697
- [73] Duggan R, Mann S A, Alù A 2022 *ACS Photonics* **9** 1554
- [74] Luo X W, Zhang C, Du S 2022 *Phys. Rev. Lett.* **128** 173602
- [75] Wang J, Mukhopadhyay D, Agarwal G S 2022 *Phys. Rev. Res.* **4** 013131
- [76] Wong W C, Li J 2023 *New J. Phys.* **25** 033018
- [77] Zhang X D, Hu J B, Zhao N 2023 *Phys. Rev. Lett.* **130** 023201
- [78] Ding W K, Wang X G, Chen S 2023 *Phys. Rev. Lett.* **131** 160801
- [79] Mao W, Fu Z, Li Y, Li F, Yang L 2024 *Sci. Adv.* **10** eadl5037
- [80] Loughlin H, Sudhir V 2024 *Phys. Rev. Lett.* **132** 243601
- [81] Xu J P, Mao Y H, Li Z P, Zuo Y L, Zhang J F, Yang B, Xu W, Liu N, Deng Z J, Chen W, Xia K Y, Qiu C W, Zhu Z H, Jing H, Liu K 2024 *Nat. Nanotechnol.* **19** 1472
- [82] Ruan Y P, Tang J S, Li Z, Wu H, Zhou W, Xiao L, Chen J, Ge S J, Hu W, Zhang H, Qiu C W, Liu W, Jing H, Lu Y Q, Xia K 2025 *Nat. Photonics* **19** 109
- [83] Shi M W, Bao G Z, Guo J X, Zhang W P 2025 *Phys. Rev. Res.* **7** L022034
- [84] Zheng X, Chong Y D 2025 *Phys. Rev. Lett.* **134** 133801
- [85] Mandal I, Bergholtz E J 2021 *Phys. Rev. Lett.* **127** 186601
- [86] Wiersig J 2022 *Phys. Rev. Res.* **4** 023121
- [87] Tschernig K, Busch K, Christodoulides D N, Perez-Leija A 2022 *Laser Photonics Rev.* **16** 2100707
- [88] Wiersig J 2023 *Phys. Rev. A* **108** 033501
- [89] Liao K, Zhong Y, Du Z, Liu G, Li C, Wu X, Deng C, Lu C, Wang X, Chan C T, Song Q, Wang S, Liu X, Hu X, Gong Q 2023 *Sci. Adv.* **9** eadf3470
- [90] Wang K, Xiao L, Lin H, Yi W, Bergholtz E J, Xue P 2023 *Sci. Adv.* **9** eadi0732
- [91] Kullig J, Grom D, Klemmt S, Wiersig J 2023 *Photonics Res.* **11** A54
- [92] Li Z Z, Chen W, Abbasi M, Murch K W, Whaley K B 2023 *Phys. Rev. Lett.* **131** 100202
- [93] Han P R, Ning W, Huang X J, Zheng R H, Yang S B, Wu F, Yang Z B, Su Q P, Yang C P, Zheng S B 2024 *Nat. Commun.* **15** 10293
- [94] Wiersig J, Chen W 2025 *Phys. Rev. Res.* **7** 033034
- [95] Hokmabadi M P, Schumer A, Christodoulides D N,

- Khajavikhan M 2019 *Nature* **576** 70
- [96] Li Z, Chen J X, Li L Z, Zhang J J, Yao J P 2023 *Opto-Electron. Adv.* **6** 230019
- [97] Zhou H, Lee J Y, Liu S, Zhen B 2019 *Optica* **6** 190
- [98] Soleymani S, Zhong Q, Mokim M, Rotter S, El-Ganainy R, Özdemir Ş K 2022 *Nat. Commun.* **13** 599
- [99] Miri M A, Alı A 2016 *New J. Phys.* **18** 065001
- [100] Jiang Y, Mei Y F, Zuo Y, Zhai Y H, Li J S, Wen J M, Du S W 2019 *Phys. Rev. Lett.* **123** 193604
- [101] Wang Y X, Clerk A A 2019 *Phys. Rev. A* **99** 063834
- [102] Roy A, Jahani S, Guo Q, Dutt A, Fan S, Miri M A, Marandi A 2021 *Optica* **8** 415
- [103] Hadfield R H 2009 *Nat. Photonics* **3** 696
- [104] Hadfield R H, Leach J, Fleming F, Paul D J, Tan C H, Ng J S, Henderson R K, Buller G S 2023 *Optica* **10** 1124
- [105] Galinis J, Karpiński M, Tamošauskas G, Dobek K, Piskarskas A 2011 *Opt. Express* **19** 10351
- [106] Hloušek J, Grygar J, Dudka M, Ježek M 2024 *Phys. Rev. Appl.* **21** 024023
- [107] Kong L D, Zhang T Z, Liu X Y, Zhao X, Xiong J M, Li H, Wang Z, Xie X M, You L X 2025 *Nat. Photonics* **19** 407
- [108] Tse M, Yu H C, Kijbunchoo N, et al. 2019 *Phys. Rev. Lett.* **123** 231107

SPECIAL TOPIC—Principles and applications of quantum optics

A brief introduction to exceptional-point sensing*

ZHANG Lida[†] NIU Yueping[‡] GONG Shangqing

(School of Physics, East China University of Science and Technology, Shanghai 200237, China)

(Received 19 October 2025; revised manuscript received 12 January 2026)

Abstract

Exceptional points (EPs), appearing in non-Hermitian systems as a specific class of spectral degeneracy at which the eigenvalues and eigenvectors coalesce, have been extensively studied in the last decades due to their peculiar properties. In particular, around the EP, the spectral splitting scales sublinearly with the introduced perturbation, resulting in divergently increased signal responsivity. And due to its amplified response to perturbations, it may significantly exceed the sensitivity of traditional sensors. In the last decade, EP sensing has gone from theoretical conception to experimental implementation. Since the first experimental demonstration of improved signal responsivity in optical systems, EP sensing has made remarkable advances in achieving enhanced signal-to-noise ratio and measurement sensitivity, which are key parameters characterizing the sensing performance. In this paper, we first briefly introduce the history of EPs and the physical mechanisms underlying their enhanced sensing capabilities. We then review the current status of EP sensing, including the improvements in signal sensitivity, signal-to-noise ratio, and measurement sensitivity on various physical platforms including optical, mechanical, and quantum systems. Afterwards, the main challenges faced by EP sensing including noise amplification and system stability are discussed. Finally, we point out possible solutions to address these limitations by using quantum effects such as quantum squeezing, and outline potential future development directions.

Keywords: exceptional points, sublinear sensing, non-Hermitian systems, signal responsivity, signal to noise ratio, sensitivity

DOI: 10.7498/aps.75.20251419

CSTR: 32037.14.aps.75.20251419

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 12374327, 12034007) and the Key Project of Shanghai Municipal Education Commission for Scientific Innovation, China (Grant No. 2023ZKZD39).

[†] Corresponding author. E-mail: zhang_lida@foxmail.com

[‡] Corresponding author. E-mail: niuyup@ecust.edu.cn

奇异点传感及其发展简述

张理达 钮月萍 龚尚庆

A brief introduction to exceptional-point sensing

ZHANG Lida NIU Yueping GONG Shangqing

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 75, 040605 (2026) DOI: 10.7498/aps.75.20251419

CSTR: 32037.14.aps.75.20251419

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.75.20251419>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

实验观测非厄米系统奇异点的手性翻转现象

Experimental observation of chiral inversion at exceptional points of non-Hermitian systems

物理学报. 2022, 71(13): 131101 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20220842>

两量子比特系统中相互作用对高阶奇异点的影响

High-order exceptional point in a quantum system of two qubits with interaction

物理学报. 2022, 71(13): 130303 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20220716>

原子-光子相互作用下耗散光腔中的量子相变和奇异点

Quantum phase transition and exceptional points in dissipative optical cavity with nonlinear atom-photon interaction

物理学报. 2025, 74(13): 130301 <https://doi.org/10.7498/aps.74.20250075>

线性调频激光回馈粒度探测灵敏度提升方法

Sensitivity enhancement in laser self-mixing nano-particle sizer with linear current tuning based frequency shifting method

物理学报. 2023, 72(16): 169501 <https://doi.org/10.7498/aps.72.20230569>

基于超导单光子探测器的红外光学系统噪声分析和优化

Noise characteristics analysis and suppression of optical system based on infrared superconducting single-photon detector

物理学报. 2024, 73(6): 068501 <https://doi.org/10.7498/aps.73.20231526>

自适应门控低信噪比非视域成像

Adaptive gating for low signal-to-noise ratio non-line-of-sight imaging

物理学报. 2025, 74(4): 044202 <https://doi.org/10.7498/aps.74.20241535>