

# 发掘量子噪声的价值

王 垚 译<sup>†</sup>

(北京大学物理学院 北京 100871)

2018-09-24收到

<sup>†</sup> email: wangfa@pku.edu.cn

DOI: 10.7693/wl20181002

量子体系的噪声是否可以用来做功？Philip Ball观察了这种试图“将缺陷变成性能”的新的研究方向，这些研究工作有可能将量子力学和热力学在更基本的层次上联系起来。

噪声的“名声”不太好，但是物理学家早已经可以和噪声和平相处。通常噪声只是被看作轻微影响实验的、来自底层的、不可预测的东西，而且不可能真正被你了解，就像车轮上随机沾上的砾石。但是量子力学会产生另外一种噪声。它不仅是你现在所无法预知的，而且是你从原则上就无法预知的，因为量子理论的核心就包含了随机性。

自从二十世纪二十年代量子力学具有随机性的本质被量子力学的先驱们提出，这就是一个有争议的话题。最著名的故事是，爱因斯坦(Einstein)甚至于说“上帝不会扔骰子”来决定测量的结果。量子噪声直到今天都在吸引着研究者们，因为它看起来包含了理解这个令人困惑的量子理论究竟是什么的线索。

但是有些研究者认为量子噪声还有更高的价值。他们认为量子噪声也许可以作为能做功的资源——如果我们学会如何利用这种资源。这不仅建议了一些有趣的制造新型奇异微观热机的现实机会，而且提供了对于多种物理理论间深层联系的诱人一瞥：这包括量子与经典世界之间、信息与功之间、量子理论和热力学的统计定律之间的联系。

量子世界随机而充满噪声的本质来源于我们对它认知的局限性，Werner Heisenberg(海森伯)于1927年构建的不确定性原理就说明了这一点。这个原理声明，我们不能在同一时刻以无限精细的精度来确知一个量子体系的所有属性。这其中的一些属性——最有名的就是位置和动量——是“共轭变量”，即意味着它们被一个不确定性关系所关联。比如说，我们对一个量子粒子的位置知

道得越精确，那对这个粒子的动量就知道得越不精确。这两个不确定度的乘积正比于普朗克常数 $h$ ，这个常数是由Max Planck(普朗克)于1900年推测式地提出的用于测度量子作用量的标尺。

用更形式化的语言来说，不确定性关系来自于描述我们如何对量子体系的测量结果做出预测的数学结构。每一个可观测量有一个对应的“算符”：即一个应用于“波函数”的数学变换，这给出了测量可能产生的数值。在测量过程中，算符被认为会对波函数“投影”而得出这些可能数值中的一个。共轭变量对应的算符——如位置算符 $p$ 和动量算符 $q$ ——具有这样的特征，不同顺序的操作过程， $pq$ 和 $qp$ ，结果会差一个正比于 $h$ 的量。像这样 $pq$ 和 $qp$ 不等效的性质被称为不对易。

## 摇摆的余地

你也许很想把不确定性原理看成遮掩这些可观测量真实数值的一层模糊的面纱。但这并不是看待它的正确方法。按我们现在的理解，它其实是表示这些变量只能定义到海森伯极限所允许的精度。这给了量子世界一些摇摆的余地……而且在这个允许的范围内，它确实在摇摆。所谓的“量子涨落”——量子噪声的来源——随时都在发生。一个广为人知的例子是说，粒子和它的反粒子可以从真空中自发地成对产生和消灭，这种“量子背景噪声”使得真空也活跃了起来。

这些量子涨落是多种可观测物理效应的根源，包括“卡西米尔(Casimir)力”——使得靠近的两个表面互相吸引的力——和被认为是从黑洞视界流出的“霍金(Hawking)辐射”。这些涨落可

\* 原文编译自 *Physics World*, 2018年9月刊 “Noisy work in progress” 一文。

以驱动由量子效应占主导的不同新奇物态之间的低温“量子相变”。这类似于由热量造成的经典涨落所决定的“临界”相变，比如铁磁体在有序和有序态之间转换的相变。

量子噪声与经典噪声的区别在于，你可以用降低温度的办法来减少经典噪声——在绝对零度经典噪声就完全消失——但是你无法消除量子噪声。整个宇宙中总是活跃着量子噪声。“经典噪声通常被认为是‘信息的缺失’，意味着如果我们知道(每个粒子的)所有细节，那就没有噪声或热量”，英国牛津大学的量子理论学家 Vlatko Vedral 说道，“而另一方面，量子噪声的存在是本性的，意味着即使我们有体系的完整信息，也还是会有残余的一些量子不确定性。”

噪声通常被当作一种造成不便的东西——它可以干扰我们对系统的精确控制。在很长一段时间里，量子噪声也被认为是这样的。量子噪声“从量子物理的开端就为人所知”，Vedral 说，而且“被看作总是不好的东西。”但是现在情况发生了变化，他说，“我们现在对量子噪声有完全不同的想法，并正在探询如何驾驭它。”

## 做功的麦克斯韦妖

但是你要如何从随机涨落中获得有用的东西？其实早在十九世纪就已经有了一个这样利用经典噪声的方案。一个温热的环境具有充足的能量。但是这些能量是均匀分布的，看起来无法利用。热力学第二定律的一种解读就是，热量只会自发地从高温处传递到低温处。除非有温度的梯度，否则就没有可以利用来做功的能量储备（“热库”）。

James Clerk Maxwell(麦克斯韦)在1867年基于把热理解为分子随机运动的微观理论，提出了一个“蒙骗”热力学第二定律的办法。他构想了这样一个微小的存在——后来被称作“麦克斯韦妖”——它可以看到充满两个腔体的气体的每个分子。这个“麦克斯韦妖”选择性地打开或关闭连接两个腔体的阀门，使得运动较快的高能分子聚集到一侧，而运动较慢的分子聚集到另一侧。

这样就把开始时温度均匀的气体分为了热和冷的两侧，从而产生了温度梯度并且可以用来做某些类型的功。在这个假想过程中，系统的熵下降了——系统变得更不随机而更有结构，这违背了热力学第二定律所断言的，在任何自发过程中总的熵总会上升。

这里的关键是，麦克斯韦妖可以获得我们在宏观层次上缺乏的信息：它知道所有分子运动的细节。信息自身就成为了做功的资源。这种信息和能量之间具有等效性的观点已经得到了最近的实验证实。例如，日本科学家于2010年利用对溶液中粒子的精确观测来增加这些粒子的能量。芬兰阿尔托大学的研究人员于2016年构建了一个全自动的微电子器件，使得电子可以在“上坡”式的能量梯度(电压)下逆势而上——因此可以冷却这个器件——凭借对电子运动的探测以及根据探测结果对电压的调整。

但是麦克斯韦妖其实并没有避开热力学第二定律的限制，这个原因直到麦克斯韦提出这个假想实验一百年之后才被完全理解。问题在于，关于粒子运动的信息不可能不断地被收集到一个有限大小的麦克斯韦妖的记忆里。物理学家 Rolf Landauer 于1961年证明，擦除(旧的)信息会不可避免地产生熵的消耗，这会抵消麦克斯韦妖所能够提取的功。

## 量子矿藏

麦克斯韦妖从热噪声中发掘功的矿藏(但是最终还是遵守热力学第二定律)。对于量子噪声是否

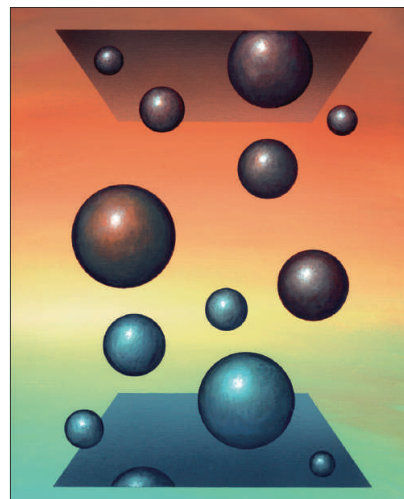


图1 麦克斯韦妖的阀门。假想的麦克斯韦妖从粒子的热运动中提取功，这似乎违背了热力学第二定律

有等效的对应物？第一眼看来，这个想法有个问题。麦克斯韦妖之所以可以把热噪声作为资源利用，是因为它可以获取隐藏于热噪声中的信息。但是量子涨落之中并没有隐藏的信息。并不是我们不知道隐藏在不确定关系背后的变量的“真实”数值，而是变量的“真实”数值这个观念就没有意义。

不过变量的数值可以被赋予含义：借助“测量”。测量是波函数所包含的概率性的未知量(或者说，不可知量)塌缩到特定值的方式。所以原则上量子涨落可以借助观测而变成确定的信息。但是为何可以用这个过程做功？这是有可能的，因为最近一些研究者证明，测量某些量子可观测量可以增加系统的平均能量。这在下面这种特殊情形下发生，即量子可观测量对应的量子算符(它从波函数中投影出这个可观测量的一个数值)和系统的能量算符(又称哈密顿量)不对易——换句话说，这个可观测量和能量组成共轭变量，就像位置和动量那样。

在这种情况下，系统“多出来”的能量来自测量仪器。就像在经典的情况中，测量降低熵并构成“可以被热机转换为功”的能量的来源，位于西班牙马德里的康普顿斯(Complutense)大学的Juan Parrondo这样解释说。但是经典的麦克斯韦妖是从周围环境的“热库”中发掘功，量子的情况下并没有实际的热库——只有储藏在测量仪器

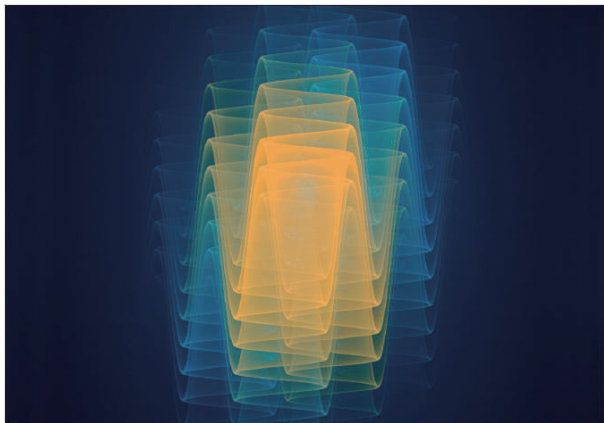


图2 量子模糊。在量子力学里，波函数包含了关于一个体系状态的最多的信息。薛定谔方程告诉我们如何计算那个体系的波函数以及它如何随时间演化

中的能量，而测量仪器是在测量过程中与被测量的体系发生耦合。“你可以把测量看成以随机(像噪声一样)的方式提供能量的电池，”德国奥格斯堡(Augsburg)大学的Peter Talkner这样说。从根源上讲，这是时间与能量间不确定关系的一个后果。在量子体系和测量仪器有限的相互作用时间里(测量就在这段时间进行)，能量的量子噪声泄露到了体系之中。

## 热的比特

上述原理可以用于通过测量将能量引入量子体系。想法是将一个量子体系——比如说一个简单的量子比特，它可以存在于两种状态——以可以做功的方式耦合到某个系统上。将量子比特初始化为一个叠加态，这样对它的状态做测量就会增加它的平均能量。你可以说测量使得这个量子比特变得“更热”。这种热能可以被用来做功：这就构成一个“量子热机”。2011年Talkner和Juyeon Yi一起在理论上证明，对一个量子粒子位置的反复测量可以把这个粒子驱动到一种“无限高温”的状态，即这个体系以相同的概率占据了所有可能的能量状态。

一些研究者已经提出了几种通过测量来利用量子噪声的量子热机。不同于经典热机，这些量子热机不需要从热库或者温度梯度中提取能量。当测量进行完毕后，反馈信号可以将量子比特重置到初始的叠加态而且不需要消耗能量——但是和经典体系一样，要完全完成这个热机循环，测量的结果必须被擦除：测量仪器需要以不依赖于测量结果的方式被重置。这会有熵的消耗，所以并没有“免费”的能量产生——热力学第二定律仍然被遵守。

法国国家科学研究院位于格勒诺布尔(Grenoble)的奈尔(Néel)研究所的Alexia Auffèves和她的同事们提出，用超导电路来构建一个量子热机，而不是用其他量子计算机原型方案中的量子比特。这个“量子热机”的输出将是一些有用的光子，比如说可以用来开关一个光学器件(Phys.

Rev. Lett., 118, 260603)。Talkner 和 Yi 描述了一种不需要反馈步骤的量子热机，这个反馈步骤就像对于经典麦克斯韦妖的记忆的擦除(Phys. Rev. E, 96, 022108)。但在这种情况下仍然没有“免费的午餐”：热力学第二定律仍然受到保护，因为热机在下一次循环中重置时会产生熵。这个重置过程是将这个量子热机和一个恒温热库达到热平衡，这会将测量产生的任何信息完全清洗掉。

## 物理的基础

从麦克斯韦妖的角度来考虑量子涨落不仅提升了对量子涨落进行有益利用的前景，还建议了一条将这种基本量子现象和热力学联系起来的路径。Auffèves 相信量子涨落应该被视作一种从本质上和热能导致的经典涨落不同的噪声来源。但是这种噪声究竟是从何而来？这当然可以被归结为量子算符的不对易——但那只是一种抽象的数学结构，并不提供多少对物理的洞察。我们是否可以量子随机性提供直观的解释？

这个问题直接触及量子理论的核心。Erwin Schrödinger(薛定谔)于1924年提出的描述量子“粒子波”的波动方程给了我们一个波函数，量子体系所有可观测的性质都可以根据这个波函数来预测。但薛定谔方程预测结果的方式不同于牛顿力学对经典体系进行预测的方式；波函数只是提供我们可能观测到的结果的概率。一般情况下，在测量之前，我们并不确定地知道将测量到什么数值。量子力学明显地具有一种本质上的随机性，这是量子理论对爱因斯坦造成深刻困扰的原因。

量子理论基础中一个重大而没有解决的问题是，这种给出准确预测的不可能性究竟是真正根本性的，还是来自我们对“事情的真实状态”的无知。后一种可能性类似于我们因为无法看到每一个分子于是就认为经典噪声是随机的。而前一种可能性则认为根本就没有背后的“事情的真实状态”。

不论量子随机性的准确起源是什么，我们都

可以理解为什么量子随机性必须存在。1935年当爱因斯坦在普林斯顿大学工作时，他和两个较年轻的同事，Boris Podolsky 和 Nathan Rosen，提出了一个据他们认为对量子力学的“完备性”提出质疑的假想实验，并且支持了关于量子随机性来自我们无法获知事情背后真实状态的想法，按这个想法，每个变量有一个确定的数值，只是这些隐藏的数值无法被直接观测。这个“EPR”实验似乎意味着，如果量子力学是完备的理论，粒子将可以跨越空间距离瞬时互相影响——这个可能性被爱因斯坦的狭义相对论所排除，狭义相对论禁止任何因果性的影响以超越光速的速度传播。

基于北爱尔兰物理学家 John Bell(贝尔)20世纪60年代期间的工作，我们现在已经根据实验得知，爱因斯坦的“隐变量”几乎肯定不存在。但是瞬时“超距作用”也并不存在：量子随机性保证了宇宙中没有超过光速的通信——这也因此挽救了因果律。

## 情境是关键

但这仍然没有告诉我们量子随机性从何而来。Auffèves 和她在巴黎-萨克雷大学的同事 Philippe Grangier 最近提出一个他们认为可以解释这个问题的理解量子理论的思路——始于一个长期以来为人所知的事实，量子测量的结果取决于测量的情境。这是20世纪60年代贝尔(对于量子理论)的又一项深刻的洞察，虽然这个所谓的“量子情境性”通常被归功于数学家 Simon Kochen 和 Ernst Specker，他们和贝尔几乎同时导出了这个结果，并于1967年更早地发表。这个 Kochen—Specker 定理——过去二十年间已经被实验证实——认为一般来说对于量子系统问“变量  $x$  的值是多少？”是毫无意义的。我们应该问“在情境  $y$  之下  $x$  的值是多少？”如果进行测量的情境不同于  $y$ ，我们有可能得到  $x$  的一个不同的值，而且这没有任何理论上的不自恰。

Auffèves 和 Grangier 认为一个量子态——用一个波函数定义，并且能够被实验所讯问——只

能在一个给定的情境下定义。这与经典系统形成了对比，经典系统中一个状态——比如说一个小球运动的有多快——不取决于提出问题的情境。研究者们把系统的某些属性在基于特定情境的测量下的可能结果称为“模态”。这些模态是互斥的：如果你观察到了其中的一个，就不可能观察到另外一个。对任一个系统有确定个数的模态：比如，一个光子碰到了半反射分束器，那它只能被反射或者透射，没有别的可能。按Auffèves和Grangier的说法，这种离散且互斥的模态的存在才是刻画量子系统的特征。

在这个理论体系里，量子态自身并没有什么不确定性的或概率性的因素——量子态是完美的客观存在，反映了爱因斯坦对于物理实在的观念。“我们从爱因斯坦式的确定性出发，而不是从概率出发，”Auffèves说道。但是至关重要的区别在于，量子态不再是直接针对它背后的量子体系，而是指向量子体系及其情境的整体。“虽然量子体系和情境可以独立存在，并且最终是由相同的东西构成，”Auffèves说，“只有把它们放在一起才能给出对应于可重复的确定现象的量子态。”她说，认为体系自身具有状态是我们从经典世界里带来的旧的习惯。

按这种观点，量子力学的概率特性并不是量子态的本征属性，而是从我们对它做预测的行为

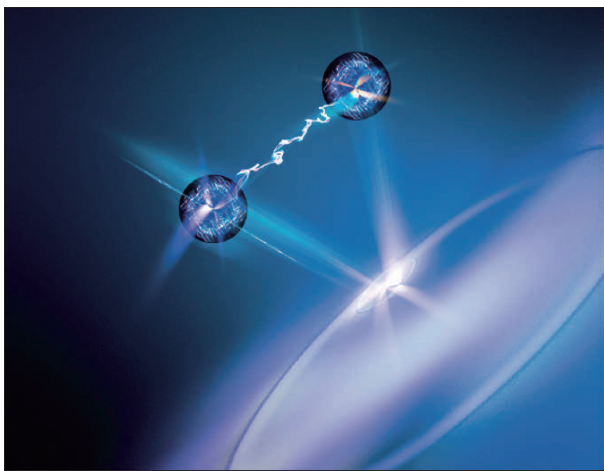


图3 被贝尔所拯救。爱因斯坦和他的同伴们断定量子纠缠是“幽灵般的超距作用”，而贝尔确定了量子纠缠的粒子间有超过经典物理所允许的关联——这是量子领域固有的属性

中产生。当我们对体系进行观测时——这需要一个特定的情境——就实现了可能模态中的一个。如此一来，量子力学不再是一个关于基本体系自身的理论，而是一个处理基本体系所产生的模态的形式方法。这两个研究者(Auffèves和Grangier)把这称为“情境—体系—模态”(CSM)方法(*Phil. Trans. A*, 10.1098/rsta.2017.0322)。

Auffèves和Grangier证明，给定这些公理，他们的方法就可以得出量子力学的所有特征，比如叠加态和计算概率的玻恩(Born)规则。然而这里有一个问题。一个体系有确定个数的模态，但是我们可以应用到测量中的情境的个数多于满足这些模态的情境个数。用另一种方式来说，我们对一个量子体系可以提出的问题多于这个体系可以重复确定给出的答案。你可以说这些确定的模态被“用完”了，以致任何附加的模态——进一步探测这个体系的结果——以随机的方式给出。这种随机性被感受为量子噪声。

## 有限的信息

这种看待量子力学的观点目前还是猜测性的，但它的基本想法和之前提出的一些想法形成了共鸣。例如维也纳大学的量子物理学家Anton Zeilinger于1999年建议，量子理论的一条可能的公理是，基本个体(不管它们可能是什么)只能携带一比特的信息(*Found. Phys.*, 29, 631)。换句话说，这些基本个体只能对一条是或否的问题给出确定答案。

Zeilinger和他的同事Časlav Brukner解释了这个条件如何能给出与众不同的量子行为，如EPR测量的结果：两个纠缠的粒子的属性有关联，尽管这些属性的数值在测量之前不确定。从本质上讲，加上有关联的条件耗尽了这两个粒子的“信息携带”的能力，以致它们的单个变量(比如说，自旋)的实际数值必须是随机的。“本质上，主要的想法是量子系统不能回答不兼容的问题，因为它只有有限的信息内涵，”维也纳大学的Borivoje Dakić说道。“因此，当我们对一个体系提出它没

有能力回答的问题，量子随机性就自然的出现。”

这个想法被 Brukner, Zeilinger, Dakić(arXiv: 0911.0695)和其他一些人(arXiv: 1511.01130)发展为对量子理论的一个完整的“重构”，基于信息如何被量子粒子携带和共享的一些简单公理。Dakić说这个量子重构理论和CSM方法非常相似。

Auffèves 承认有和她们的CSM方法极为相似的思路。“我很确定我们可以比较数学结构并且互相启发，”她说，“但是初始的包装和哲学上的选择不同。”不过，Dakić承认，目前对于不能给出确定答案就必然导致随机结果这一条还没有坚实可靠的理由。“对于我来说，体系以概率方式答复的原因并不清楚，”他说，“我可以设想这个体系保持沉默，或者给出某些不确定的答案。我认为这个问题仍然有待解决。”

于是，量子随机性和量子噪声的存在似乎与信息如何被量子个体携带和分配这个问题构成了联姻关系。但是不同于经典的麦克斯韦妖，这里的信息并不是关于我们可以多细致地观察一个体系的问题。而是取决于我们如何观察。这就好像，信息作为某种资源存在，而我们，基于选择的测量方式，可以将其导入(体系的)某一个属性或者其他的属性。

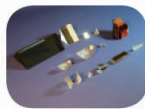
这就是为什么量子力学，在它被构想出来一百年之后，仍然让我们挠头不解。看起来我们的干预(测量)不知为何把现实的元素转化成了真实存在——这并非是以某种“量子的恳求”的态度实现，而是以一种有规则限制而且可以量化的方式完成。Auffèves和Grangier的CSM理论是否对这个谜题提供了正确的思路还有待观察。但是也许真相就是，在开始认清它真正的形状之前，我们需要以许多种方式来对待这个奇怪的量子理论。

## 标准光学元件库存---供您随时选用

总量多达10万片，  
超过700个品种规格的透镜，  
棱镜，反射镜，窗口，  
滤光片等常用光学器件；  
涵盖紫外，可见，  
近红外，  
红外等光学应用领域。



光学透镜



光学棱镜



可见光学元件



红外元件



颜色滤光片



窄带干涉滤光片



北京欧普特科技有限公司  
Beijing Golden Way Scientific Co.,Ltd

地址：北京市朝阳区酒仙桥东路1号M7栋5层东段  
电话：010-88096218/88096099 传真：010-88096216  
邮箱：optics@goldway.com.cn



## 微弱信号检测 半个世纪的骄傲

Model 7210  
多通道锁相放大器

全球唯一  
通道之最



Model 197 光学斩波器



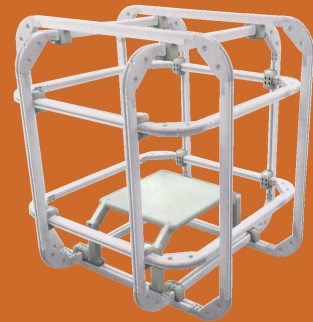
生产商：阿美特克商贸(上海)有限公司北京分公司  
电话：010-85262111-10 传真：010-85262141-10  
Email: info@ametek.cn  
网址: www.signalrecovery.com.cn

中国代理商：北京三尼阳光科技发展有限公司  
电话：010-65202180/81 传真：010-65202182  
Email: sales@sunnytek.net  
网址: www.sunnytek.net

# 磁场仪器

## 赫姆霍兹线圈系统

- 500mm和1m直径线圈
- 直流补偿设备
- 500mm线圈直流时产生磁场500 $\mu$ T,在5kHz时可达100 $\mu$ T
- 可选不同轴数的功率放大器和控制器



## Mag-03三轴磁场探头

- 低噪声版： $<6\text{pTrms}/\sqrt{\text{Hz}}$  at 1Hz
- 标准噪声： $6$  到  $\leq 10\text{pTrms}/\sqrt{\text{Hz}}$  at 1Hz
- 基础噪声： $>10$  到  $20\text{pTrms}/\sqrt{\text{Hz}}$  at 1Hz，
- 带宽典型为3kHz，量程从 $\pm 70\mu\text{T}$  到  $\pm 1000\mu\text{T}$



## Mag628/Mag629和Mag669宇航认证的三轴磁力仪

- 量程： $\pm 75\mu\text{T}$
- 感应轴共点
- 工作电源：28V (Mag629)
- 连续工作温度范围： $-55^{\circ}\text{C}$ 到 $55^{\circ}\text{C}$
- 依据MIL-STD-810 (振动和冲击)和MIL-STD-202 (热冲击)设计，适于集成到机载平台
- 低噪声：在1Hz时， $<8\text{pTrms}/\sqrt{\text{Hz}}$  (Mag628/Mag629)或在1Hz时， $<4\text{pTrms}/\sqrt{\text{Hz}}$  (Mag669)



北京优赛科技有限公司  
地址：北京市石景山区八角东街65号融科创意中心A座1403室  
电话：010-68487691 传真：010-68700626  
E-mail:sales@eusci.com 网址：www.eusci.com



www.bartington.com  
**Bartington**<sup>®</sup>  
Instruments