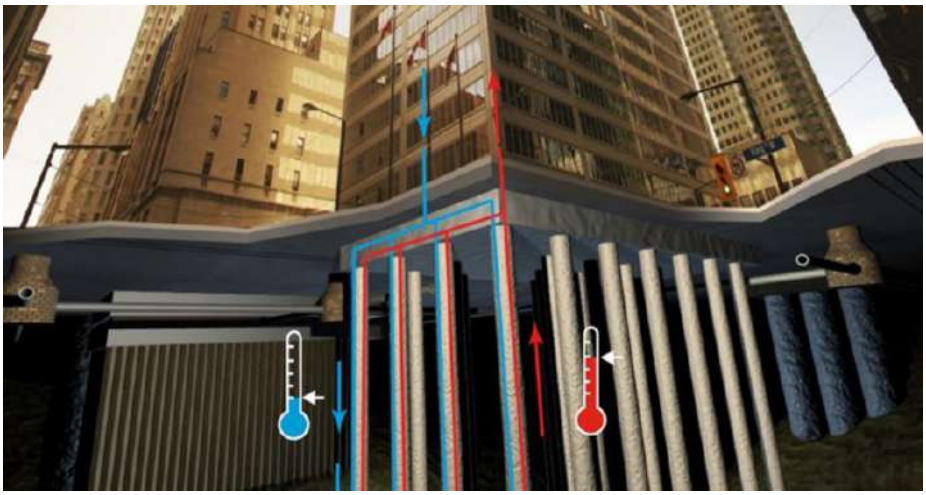
地热能，我们建筑下的绿色能源

作者：

迪·唐娜·爱丽丝（DI DONNA Alice），讲师，任职于土壤、固体、结构和风险实验室（3SR），法国格勒诺布尔阿尔卑斯大学（UGA）。



地下能源结构是低焓地热系统（即低温差）的一种现代应用，与旧系统相比，具有降低初始安装成本的巨大优势。其原理是在混凝土结构的加固笼内建立一个管道网络，在管网中循环的传热流体通过混凝土与地面进行热交换，热泵将地面温度调整到为加热或冷却建筑物所需的温度。这一系统必须满足能源效率标准（供热或制冷）和岩土结构标准（有限的附加应力和位移），这些都高度依赖于施工现场当地的条件。

地下能源结构完美契合能源需求不断增加，对绿色、本地和可再生能源的研究越来越重要的当今世界，它们代表着为**建筑**和基础设施**供暖或制冷**的一种创新的、前景光明的替代方案。

1. 什么是地下能源结构？

地下结构，即与地面接触的结构，且可用于与地面进行热交换[1]。更准确地说，“地下结构”一词涵盖用于深地基的**桩**、挡土**墙**、**隧道**衬砌段等。地面和这些混凝土结构之间的热交换由布置在结构内部的管道系统保障，并且在这个管道系统中循环着传热流体。

地下能源结构的原理是利用**浅层地热能**：底土温度全年保持稳定（除近地面5~8 米外），在冬季高于室外空气温度，在夏季则低于室外空气温度。利用这种温差可以在冬季将热量从地面提取并输入到建筑中（用于供暖），并在夏季将热量从建筑中释放到地层中（用于制冷）。这属于所谓的**“低焓”**地热系统的范畴，即位于地下 100 米以内，温度变化范围在 10~20 摄氏度左右。为了使热交换器的温度与建筑物供暖或制冷所需的温度相匹配，这类系统会与一个**热泵**（见“地热能：一种重要的能量来源”[https://www.encyclopedie-environnement.org/en/soil/geothermal-energy-significant-source-energy/]）链接。

1.1. 运行模式

该系统既可用于建筑的供暖和制冷（**双向模式**），也可仅用于供暖或制冷（**单一模式**）。除此之外，运行模式的选择取决于当地**地下水流动**状况。

- 在地下水不流动或流动很弱的情况下，为了长期保持底土温度恒定，需要对土壤进行热补给。在这种情况下，强烈建议系统采用双向模式，以保证系统的效率。

- 另一方面，如果土壤具有足够高的渗透能力（砂土），并且地下水流速大于每天 0.5~1 米，那么土壤温度就会自动重新平衡，在这种情况下可以采用单一模式[2]。

在第一种情况下（无地下水流），**季节性蓄热**是可行的；在第二种情况下（大量地下水流），这是不可能的，提取热量与注入热量不偶联。

1.2. 技术渗透

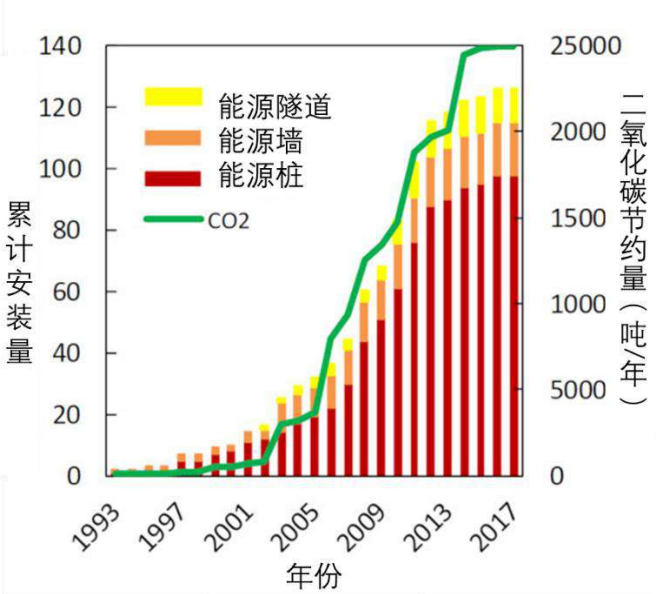


图 1. 地下能源结构的安装量和二氧化碳减少量的历史变化[来源：Di Donna 等人，2017（参考[3]）]

图 1 显示了过去十年地下能源结构安装数量的变化，以及相应减少的 **CO_2 排放**量[3]。现有的数据或许不够全面，但该图还是反映了人们对这项技术的兴趣及这项技术的好处。目前，能源桩仍然是最常见的应用形式。这种深层地基被广泛用于穿越力学性能差的土层，直至达到基岩。

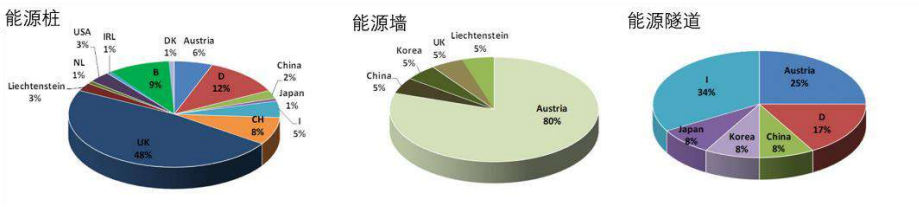


图 2. 地下能源结构在不同国家的使用情况[来源：©Di Donna]

自 **20 世纪 80 年代**以来，地下能源结构在欧洲和世界其他地区得到了发展。奥地利是第一批建设的国家，随后这项技术很快传播到了瑞士、德国和英国（图 2）。在其他一些国家，如法国和意大利，社会接受程度仍然有限，发展也比较缓慢。

最近，美国和亚洲也引入了地下能源结构。譬如中国的上海中心大厦，它是中国最高的摩天大楼，高 630 米，建立在 2000 根长 86 米、直径 1 米的基桩上，其中约 100 根是能源桩。

1.3. 一些案例

在欧洲，很多学校、私人建筑和公共建筑中已经采用了这类技术。

1.3.1. 能源桩

最有据可查的例子之一可能是**克洛腾机场（苏黎世）的 E 航站楼**，该航站楼自 2003 年开始运营。它由阿斯顿（Amstein）、沃尔特（Walthert AG）及 ARGE ZAYETA 联合设计，其建造在黏质和粉质土上，其地基位于 350 个钻孔桩之上，它们长 27 米，直径在 90 到 150 厘米之间，其中有 **306** 根为**能源桩**，能满足航站楼 **70%**的**供热需求[4]**。能源桩还能满足建筑物的冷却需求，自然冷却满足了 53%的制冷需求，另外 15%的制冷由热泵完成。在这个具体的案例中，安装能源桩产生的额外费用占**建筑成本的 0.3%**，在 **8 年内**就能收回。

1.3.2 能源墙

另一个经典案例是**维也纳的莱恩泽隧道**，这是一个采用随挖随填法构建的能源隧道，首先进行露天挖掘，然后再用混凝土板覆盖。在这种情况下，热量通过侧墙与地面交换，侧墙由长 20 米、直径 120 厘米的桩构成。每三个桩中就有一个为能源桩，即共有 **59 个热交换桩**。

同样在维也纳，**U2 地铁线路**的 4 个路段配备了**能源桩、能源转换和能源墙**，总生产供热功率达 449 kW，制冷量 231 kW。

1.3.3. 能源隧道

能源隧道尽管具有非凡的**热交换潜力**，但目前还属于最不成熟的技术应用。实际上，隧道衬砌的地热能活化（无论是通过使用隧道掘进机进行机械挖掘还是使用机械铲进行常规挖掘）都涉及到**更大体积的土壤**，因此通常比桩的交换表面更大。

能源隧道的第一个例子是在奥地利建造的 **Janbach 隧道**。最近，在意大利**都灵地铁**隧道进行了一项全面的实验测试。

1.4. 优点

1.4.1. 经济方面

与其他传统地热系统相比，地下能源结构的主要优点是，结构元件为建筑稳定性所必需的，因此在任何情况下都必须建造，同时又可以作为能源使用，这就**降低**了初始**安装成本**。经验表明，初始投资约为工程成本的 2%至 4%，投资回收期为 4 至 8 年。

1.4.2. 环境问题

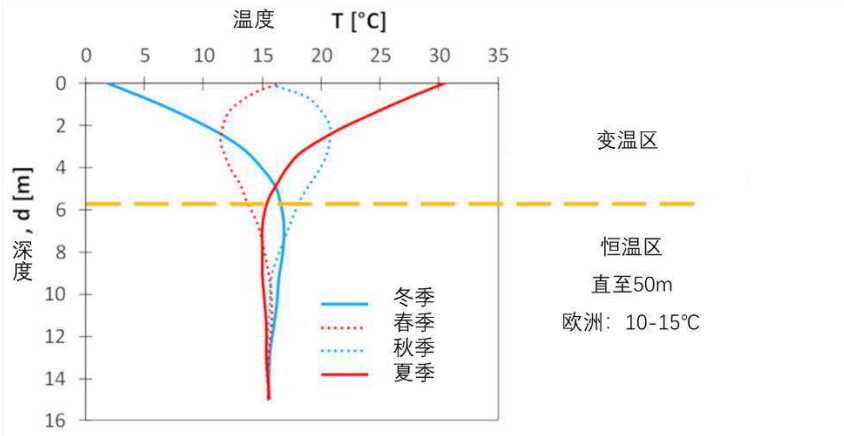


图 3. 地下温度随深度的季节演变。[资料来源：©Di Donna]

像其他传统的低焓地热系统（水平和垂直探测）一样，地下能源系统首先是一种本土的、可再生的绿色能源。能量是由**储存在土壤中的热量**产生的，这些热量一部分来自太阳（太阳辐射加热地球表面），另一部分来自地球本身（地核的热流），能量则是通过地下水流动来传递的。这些因素的结合导致地下几米的温度随外部空气温度（所谓的变温区）出现季节性波动。在更深的地方，温度则全年保持不变，直到约 50 米深（称为恒温区）。从这里开始，温度以深度每增加 100 米上升 3°C 的速度变化：这被称为地热梯度。地下能源结构运作在中间区域，即恒温区。在欧洲，该区域全年温度在 10 到 15°C 之间（图 3）。使用地下能源结构可以使建筑物的**二氧化碳排放量**减少约 320 千克/千瓦（见图 1）。

2. 能源效率

图 4、图 5、图 6 总结了在**运行的能源地下结构中**测得的**热交换**势，分别以每米桩长的瓦特数、每平方米墙壁和隧道表面的瓦特数表示。

2.1. 能源桩

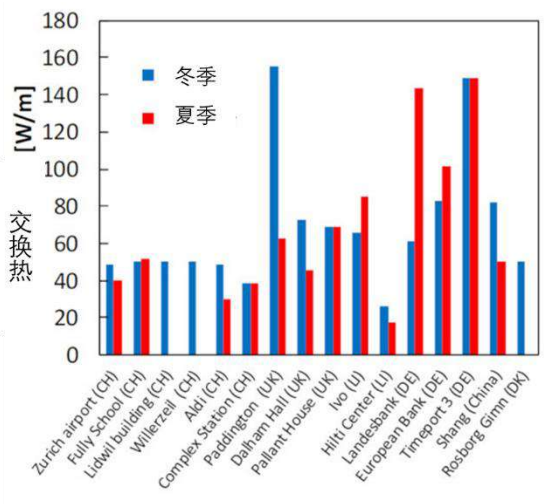


图 4. 能源桩的热交换[来源：Di Donna 等人，2017（参考文献[3]）]

根据这些数据，除极少数情况外，每米桩长的功率可达 20 至 100 瓦特，与英国标准（BS 15450）建议的数量级相同，该标准的建议功率是在细土（黏质、粉质土壤）中为 30 到 50 瓦特每米，在粗质土（沙子，砾石）中为 55 到 80 瓦特每米。能源桩与传统的地温探测仪几何形状相似，大量安装和运行的地温探测仪使人们能够准确了解能源桩的特性，并发展出了成熟的**分析方法**。

2.2. 能源墙和隧道

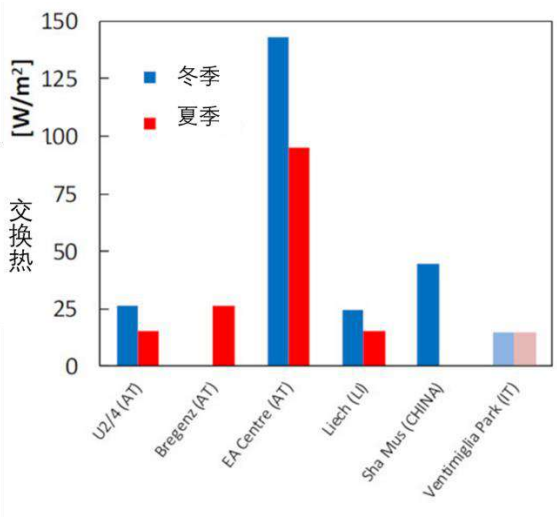


图 5. 能源墙的热交换[来源：Di Donna 等人 2017（参考文献[3]）]

挡土墙和隧道的案例较少。根据现有的数据，**每平方米**墙壁或隧道表面积交换功率达 **10 至 30 瓦特**是可能的，具体数值可能会因土壤性质（特别是地下水流量）、地基的几何形状和系统的运行条件不同而发生显著变化。

它们与地温探测仪有着本质上的不同，因而难以借鉴地温探测仪的数据直接分析这些构造的能量交换效率。两者的主要区别体现在边界的环境条件截然不同（例如挡土墙的一侧可能是停车场、隧道或车站），同时还必须考虑到墙体**与清空区内部空气的热交换**。此外，由于监测的案例数量有限，使得分析更加困难。

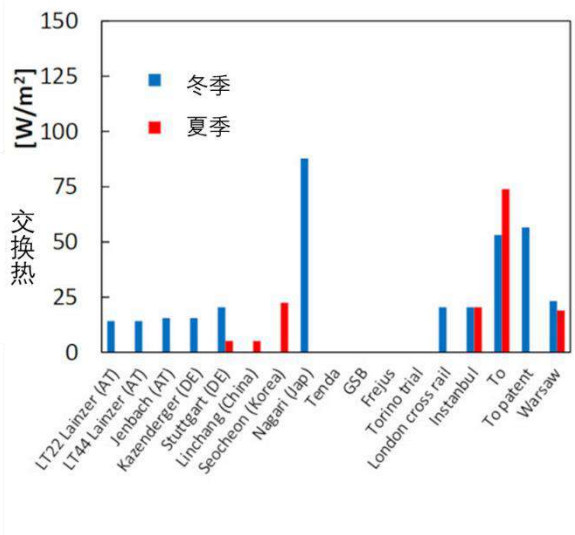


图 6. 能源隧道的热交换[来源：Di Donna 等人，2017（参考文献[3]）]

近年来的数值模拟研究表明，能源墙一侧地下空间内的空气与地面的温差对能源墙热交换有显著影响，在长时间尺度上影响更大。

3. 岩土方面

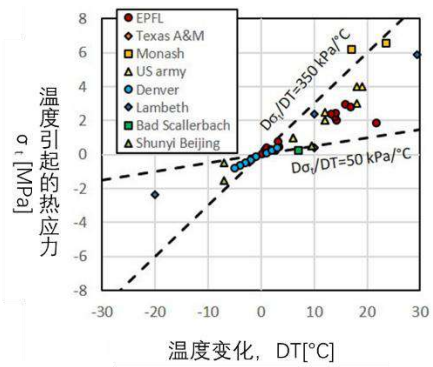


图 7. 原位测量的温度诱导应力[来源：Di Donna 等人，2017（参考文献[3]）]

能源地下结构的构造和岩土力学性能是决定其机械支撑作用的主要因素，因此确保其支撑强度具有根本重要性。基于此，许多研究通过施加周期性的温度变化，分析是否会影响其结构和岩土工程性能，进而判断能否将这些结构作为地热交换器使用。

换言之，使用地下结构作为地热交换器，是否会引起额外的位移或减弱它们的承载能力（即其承受建筑物的重量等荷载的能力）？需要再次强调的是，现有的实验和数值模拟都主要针对基桩结构。

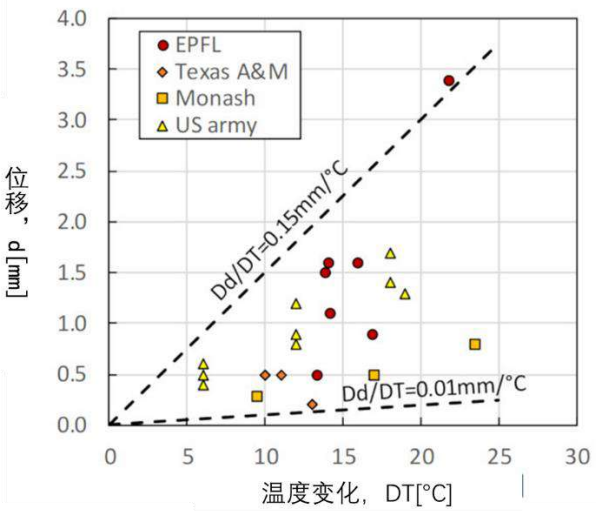


图 8. 原位测量的温度诱发位移[来源：Di Donna 等人，2017（参考文献[3]）]

作为一级近似处理，一根桩可以当作一个均匀的直杆。我们想象对它加热，若它能完全自由形变，它就会基于其**热膨胀系数**相对于其中心膨胀。为了有一个数量级的概念，让我们设想一根 30 米长、可自由形变的混凝土桩，其热膨胀系数约为 10^{-5} °C^{-1}，30°C 的温度变化将从桩顶到桩底均匀地（因此特别是在桩头）引起 4.5 mm（**0.15 mm/°C**）的位移。

而在现实中，桩体不能自由膨胀，其形变至少**部分**受到周围土壤和上部结构的**阻碍**，这减弱了其自由形变以及**其顶部的位移**，但会引起额外的**热应力**（在桩加热的情况下为压缩**应力**）。附加应力可以用混凝土弹性模量（见“物质如何变形：流体和固体”（https://www.encyclopedie-environnement.org/en/physics/how-matter-deforms-fluids-and-solids/））和形变减少量的乘积的一阶近似来计算。若混凝土的弹性模量为 30 GPa，假设**桩**被**完全禁锢**（不能发生任何热变形），则桩的内部会承受附加应力为 9 MPa，即为 300 kPa/°C。

当然，这是两个极端的例子。实际情况**介于两者之间**，但总体而言，可以认为，桩自由膨胀的程度越大，就会在顶部产生更为显著的位移以及更小的热应力，反之亦然。冷却时也可以做类似的推测。

图 7 和图 8 显示了在**实物试验**中，温度变化时能源桩上产生的应力和位移值。该类实验中可测试一个数量级的温度变化对真实能源桩的岩土工程性能的影响大小。值得注意的是，虽然热应力看似很大，但实际上远低于混凝土强度。

4. 需记忆的要点

- 地下能源结构是一种**绿色、可再生的本地能源**，用于建筑物供暖和制冷。

- 由于直接利用了建筑本身需要建造的支撑结构，因而与其他传统的封闭式地热系统（探测器）相比，地下能源结构的主要优势是**显著降低**了**初始**安装**成本**。

- 这项**技术仍处于发展阶段**，但在欧洲，应用热交换桩的结构和建筑数量呈指数增长，目前尚未出现增长减缓的迹象。

- 能源**墙**和能源**隧道**的应用仍不太成熟，但已经有许多项目正在测试这类结构，以便更好地了解它们的性能和能源效率。

参考资料及说明

封面图片：Laloui, L., and Di Donna, A. 2013. Energy geostructures: innovation in underground engineering. ISTE Ltd and John Wiley & sons Inc. [Source: © EPFL-LMS /M. NUTH 2010]

[1] Laloui, L., and Di Donna, A. 2013. Energy geostructures: innovation in underground engineering. ISTE Ltd and John Wiley & sons Inc.

[2] AIS. 2015. Use of ground heat by concrete foundation and support structures. Guide for design, implementation and maintenance. Swiss Society of Engineers and Architects. SIA DO 190 documentation.

[3] Di Donna, A., Barla, M., M., and Amis, T. 2017. Energy geostructures: a collection of data from real applications. In 15th IACMAG, Wuhan, China.

[4] Pahud, D. 2002. Geothermal energy and heat storage. SUPSI – DCT – LEEE Laboratorio di Energia, Ecologia ed Economia: 1-133.

译者：陶鸣鸣　　审校：　崔骁勇　　责任编辑：胡玉娇