

# 超导“小时代”之十四两拨千斤

罗会仟<sup>†</sup>

(中国科学院物理研究所 北京 100190)

2016-05-29收到

<sup>†</sup> email: hqluo@iphy.ac.cn

DOI: 10.7693/wl20160610

他强由他强，清风拂山冈。他横任他横，明月照大江。  
——《九阳真经》(来自金庸《倚天屠龙记》)

正所谓：“温饱思哲学，哲学生物理”，古希腊繁荣的物质文明不仅催生了“科学和哲学之祖”泰勒斯，还涌现出如苏格拉底、柏拉图、亚里士多德、德谟克利特等多名哲学家。哲学(英文philosophy)在希腊语里就是Φιλοσοφία，意指“爱好智慧”，和探索万物之理的物理学颇有渊源。实际上，物理学一词(英文physics)就起源于亚里士多德的一本同名著作(希腊语Φυσική)，是哲学一词的变体<sup>[1]</sup>。古希腊最有名的物理学家，当属“力学之父”——阿基米德，在几何学、力学、天文学都做出了非常伟大的贡献。有关

阿基米德的科学故事，就总是充满浓浓的哲学味儿。比如他在洗澡时顿悟了浮力原理，然后大喊“εureka”(英文Eureka，即“找到了”)裸奔上街，玩起了类哲学家的行为艺术<sup>[2]</sup>。阿基米德对他从事的力学研究充满自信，曾豪言壮语道：“给我一个支点，我可以撬动整个地球!”这句话从物理原理上来说看似没有根本错误，但要真正实现却几乎天方夜谈。阿基米德显然没搞清楚地球到底有多大，——它可是一个平均直径12742 km、总质量约 $6 \times 10^{24}$  kg的大家伙!假设阿基米德是个体重100 kg的胖子，而且他还能不知从何处找到一根无比坚韧、无比纤长、无比轻巧的杠杆，加上一个无比坚实的支点。阿基米德在杆这头，地球在杆那头，都属于同一平直时空。那么，阿基米德要把地球移动1 mm，需要跑多远? $6 \times 10^{19}$  m，折合天文单位约为6300光年<sup>[3]</sup>!可怜的阿基米德，如果要从实验上验证他的理论，至少要以光速奔跑六千余年，天晓得要穿越到未来什么时代，更别提谁还能注意到把地球移动一毫米前后的区别。何况就是他想这么玩，老天爷也不忍心折磨他。公元前212年，古罗马军队攻陷叙拉古城，工作中

的阿基米德被某无名士兵捅了一剑，时年七十五岁，卒。难不成，阿基米德的杠杆宣言，就这样终结在哲学范畴?细观阿基米德撬地球的姿势，你或许还能领悟到另一层面的“哲学意义”。阿基米德攥拳扬起的左手和斜斜下压的右手，神似太极拳中的一招“白鹤晾翅”(图1)。太极拳术讲究借力打力和“四两拨千斤”，这或许就是阿基米德的杠杆原理精髓——不怕力小，只要原理恰当，用巧了可有大智慧。金庸武侠人物张三丰创立的太极拳法和剑法、张无忌练就的九阳神功和乾坤大挪移，都是“四两拨千斤”的典范。

哲学归哲学，武侠归武侠，咱们自己的现实生活中，有没有那么一种可能，实现“四两拨千斤”的即视感呢?有，肯定有!

2011年初，日本女孩林奈津美在东京各个角落拍了一组名为“今天的浮游”照片。照片中的她借助任何支撑，整个悬浮在空中，仿佛具有自我漂浮的力量。“东京漂浮少女”的名号，从此红遍网络<sup>[4]</sup>。女孩的秘诀在于单反相机的延时拍摄和不断地奔跑跳跃腾空，其实和印度街头僧人或魔术师们表演的“人体悬浮术”如出一辙，都是视觉



图1 阿基米德“四两拨千斤”之术  
(来自www.nipic.com)

欺骗，仅此而已(图2)。

不过，莫灰心，悬浮并不是不可能。

如上一节《金钟罩、铁布衫》里讲到，超声波可以让小昆虫甚至小鱼悬浮起来，强磁场可以让青蛙悬浮起来。借助科技的力量，就可以创造奇迹！我们知道，电场和磁场的存在，可以让物体在不发生直接接触的情形下，就产生相互作用。磁铁的南极和北极相吸，同极则相斥。如果精细设计磁铁的形状，让磁性底座产生足够强的斥力，使另一个带有磁性的物体稳定地悬浮起来，就实现了“磁悬浮”。早在1922年，德国工程师赫尔曼·肯佩尔就提出了电磁悬浮原理。如今，这种磁悬浮早已不稀奇，在各大网络电商平台都可以轻松找到诸如“磁悬浮地球仪”、“磁悬浮音箱”等产品，而且价格不贵。俄罗斯的Kibardin Design工作室甚至异想天开发明了一种“磁悬浮鼠标”，它不仅无线，而且可以浮在半空中，电脑又多了一种酷玩法(图3)<sup>[5]</sup>。磁悬浮的力量是很强大的，利用磁铁线圈，可以产生几个特斯拉的磁场，足以把整个列车悬浮起来，有效克服了轨道摩擦带来的阻力，让列车可以跑得更快。2003年1月，开往上海浦东机场的高速磁悬浮列车正式运营，跑完全程30 km只需8分钟。2016年5月6日，世界上最长的中低速磁悬浮运营线在我国长沙开通。预计2017年，北京门头沟的磁悬浮S1线也将建成投入使用<sup>[6]</sup>。磁悬浮列车技术，正在不断蓬勃发展。也许您注意到了，现有的大多数磁悬浮列车速度都还不算快，顶多和高铁技术差不多(300 km/h)。这主要是因为采用常规导体电磁铁的磁悬浮轨道造价昂贵，稳定性、可靠

性、制动性都尚待改进，开快了容易失控，弄不好就要酿出车毁人亡的惨剧。这也是为何我国发展高速铁路运输首选了电动车组的高铁技术，而没有大面积推广常规磁悬浮列车的主要原因之一。

常规导体做成的电磁铁还具有电阻，耗电量大且存在严重的发热效应，能产生的磁场强度也十分有限，这都极大地限制了其应用。然而，倘若换成超导体，那效果将大有不同。超导体电阻为零，根本不存在任何电损耗和热效应，一旦在超导线圈通电并闭合，电流将持续稳定地存在于线圈内，节约了大量能源。超导体具有完全抗磁性，一旦进入超导态，外磁场的磁通线将统统排出体外，从而对外磁场存在最强大的斥力。如果外磁场因超导抗磁性对其产生的作用力足以平衡超导体的自身重力，那么就可以实现超导磁悬浮<sup>[7]</sup>。超导磁悬浮有多强？一块不到一平米见方的超导小板可以轻松悬浮起一位十几岁的小孩！这，才是名副其实的“四两拨千斤”顶级武功！超导的力量，不容小觑(图4)。

可是，为什么现有的磁悬浮列

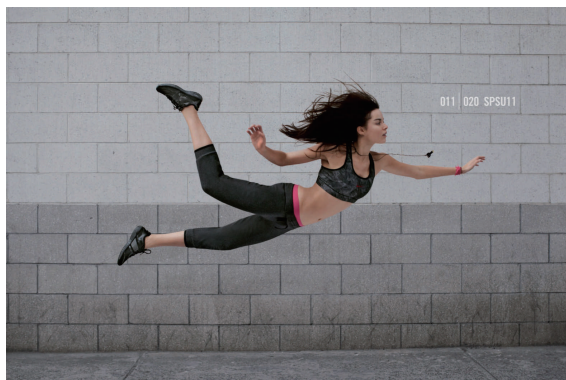


图2 人体“悬浮术”(来自 thesuiteworld.com)



图3 磁悬浮地球仪、音箱和鼠标(来自knewone.com和www.kafan.cn)



图4 超导磁悬浮(来自phys.org)

车不都采用强大的超导技术呢？原因有多个方面。其一是超导往往需要很低的温度才能实现，比如金属汞，临界温度仅有4.2 K，如此低的温度只能依赖液氦来维持。氦气作为稀有气体，目前只能从天然气或



铀矿石里提取。物以稀为贵，用于维持低温环境的液氦消耗远远大于超导节约下来的电能消耗，这种赔本买卖不好做。其二是超导体虽然电阻为零，但其能够承载的电流并非可以无限大，电流密度存在一定上限。一旦超过这个阈值，超体会瞬间恢复到有电阻的正常态，然后迅速发热，导致周围液氦急剧沸

腾，设备即刻失效，且存在安全风险。其三是超导体虽然具有完全抗磁性，也不永远是“金刚不坏之身”，其承受的磁场强度也同样存在一定上限。超过磁场上限，超体会同样会恢复到有电阻的正常态，危险依然存在。这意味着，要想超导体为我们安全稳定地服务，必须在足够低的温度、不太大的电流、不太强的磁场下才可以，这三个方面的阈值分别称为超导体的临界温度( $T_c$ )、临界电流密度( $J_c$ )、临界磁场( $H_c$ )。三者共同构成了超导体的三维“临界曲面”，只有在临界曲面内，超导态才可以稳定地存在，这就是制约超导应用关键因素(图5)<sup>[8]</sup>。

磁场攻破超导体的“金钟罩、铁布衫”之功的方式多种多样。整

体来说，可以根据不同磁场/温度下材料的行为，将超导体分成两大类：第I类超导体和第II类超导体。第I类超导体只有一个临界磁场 $H_c$ ，随温度升高而减小，当外磁场大于 $H_c$ 时，无电阻且完全抗磁的超导态就会恢复到有电阻且磁场全穿透的正常态。第II类超导体存在两个临界磁场：下临界场 $H_{c1}$ 和上临界场 $H_{c2}$ ，两者之间是混合态。在混合态中，外磁场可以进入到超导体内部，完全抗磁性被破坏。但是外磁场并不是全部穿透，而

是以一个个量子化的磁通进入的，磁通量子之外仍然存在许多超导电流通路，零电阻态仍然存在。混合态是超导材料特有的状态，只有外磁场超过上临界场 $H_{c2}$ ，零电阻态才会彻底被破坏，恢复到有电阻且磁场全穿透的正常态(图6)。常见的第I类超导体有汞、铅、锡、铝等单质金属。目前发现的大部分超导材料都是第II类超导体，包括部分单质如铌、钒等、部分金属合金、金属间化合物、氧化物等等。从超导材料对外磁场的响应，即磁化曲线的行为就可以判断出属于哪类超导体。理论上，可以通过超导相和正常相之间界面能来严格区分：第I类超导体界面能为正，第I类超导体界面能为负<sup>[9]</sup>。

利用磁光技术，可以直接观察到磁通线是如何进入超导材料内部的。注意对于第I类超导体而言，尽管没有混合态，但是由于边界效应，磁场在足够强的情况下也是可以渗入体内的。不同的是，它将在内部形成分层的正常相+超导相结构，内部磁通线就像树枝一样逐渐生长出来，这种状态又称为“中间态”(图7)，和第II类超导体中的混合态有着本质的不同。对于第II类超导体而言，磁场在混合态下的分布形式必须是一个个磁通量子。就像一个电子携带一个元电荷一样，一个磁通量子具有的磁通量 $\Phi_0 = h/2e$  ( $\sim 2 \times 10^{-15}$  Wb)，是磁通量的最小单位，仅受量子力学基本原理的限制。在磁光技术或扫描隧道显微镜下，可以直接“看”到磁通量子在超导体内的分布(图7)。大部分情况下，它们的分布并不是杂乱无章的，而是形成一个四方或三角形排列的格子。在某些温度/磁场区间，量子磁通格子也会发生融化，

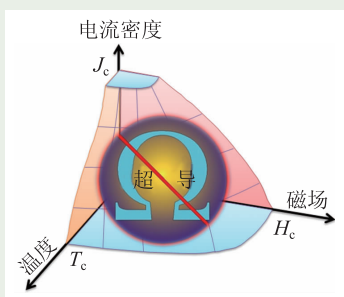


图5 超导的临界参数和临界曲面

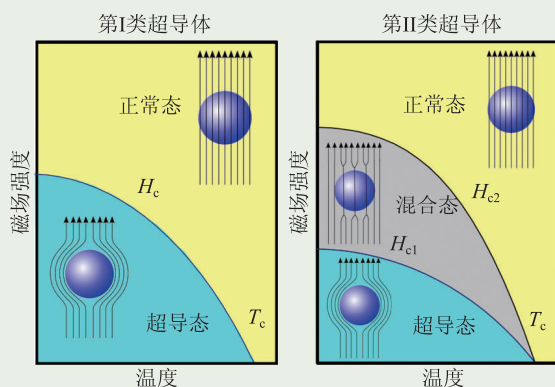


图6 超导体的分类：第I类超导体和第II类超导体

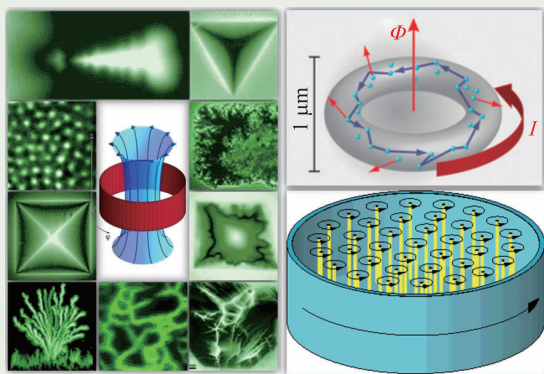


图7 (左)超导体内的磁场穿透；(右)磁通量子与磁通格子 (来自奥斯陆大学物理系主页 www.mn.uio.no/fysikk/english/)

磁通会出现钉扎、跳跃、蠕动、流动等多种行为，统称为超导体的磁通动力学。理解磁通动力学的行为对第II类超导体的应用研究极其重要，毕竟绝大多数情形下都是有外磁场存在的<sup>[10]</sup>。

一般来说，第I类超导体的 $H_c$ 不高，尽管它们具有完全抗磁性，原则上也可以用于实现超导磁悬浮，却和常规导体磁悬浮具有同样的缺点——稳定性和可靠性较差。况且第I类超导体的 $T_c$ 也很低，实际应用成本要高不少。因此，超导磁悬浮实际上都是采用第II类超导体来实现，它们的下临界场 $H_{c1}$ 比较小，基本上都是在混合态下用于悬浮技术。此时，因为磁通线部分进入超导体内部并未彻底破坏超导的抗磁性，它仍然对外磁场存在排斥力；而由于量子化磁通的存在，会出现所谓“量子锁定”现象——磁通量子被牢牢钉在了超导体内部，超导体同时会对外磁场产生一种吸引力<sup>[11]</sup>。排斥力和吸引力的同时存在，意味着无论超导体靠近还是远离外磁铁过程，都能及时地hold住重力，实现稳定可靠的磁悬浮，——这才是超导磁悬浮的不可替代优势！确实，演示实验中的超导磁悬浮小车既能够在磁铁轨道上方悬浮运动，也能在轨道侧面、甚至下面“悬挂”运动，发生脱轨的风险大大降低。超导磁悬浮列车还具有良好的制动性能，一旦列车上的低温环境丧失，超导体变成正常导体，列车将直接和轨道形成有摩擦的接触，达到迅速制动的目的。日本从20世纪70年代开始从常导型转向超导型磁悬浮列车的研究。1972年12月就达到试验时速204 km/h，1982年11月成功进行载人试验，1995年时速高达411 km/h。2015年4月，日

本JR超导磁悬浮列车测试速度进一步提升到603 km/h，并计划在不久的将来正式投入运营<sup>[12]</sup>。在我国，1994年10月，西南交通大学建成了首条磁悬浮铁路试验线，并于2000年进行了载人试验，2014年5月开展了首个真空管道的高速磁悬浮试验。理论上，超导磁悬浮的速度最高可达3600 km/h，是民航客机速度的3—4倍，但是实验上还有很长的一段路要摸索(图8)<sup>[13]</sup>。在如今日新月异的科技时代，超高速的超导磁悬浮，也许并不只是梦想。

以超导线圈为基础的超导磁体是超导电磁应用的另一个重要方面。如前面提到，超导体电阻为零，回路中通入电流后没有电能和热能损耗，其承载的电流密度比常规超导要大得多。因此，超导线圈有体积小、能耗低、磁场稳定度和均匀度高等优点，已经在医疗卫生、科学研究、工业生产等多个方面有重要应用。比如，高分辨核磁共振成像仪的关键在于磁场的强度和均



图8 高速行驶的超导磁悬浮列车(来自 phys.org)



图9 核磁共振成像仪(来自 phys.org)

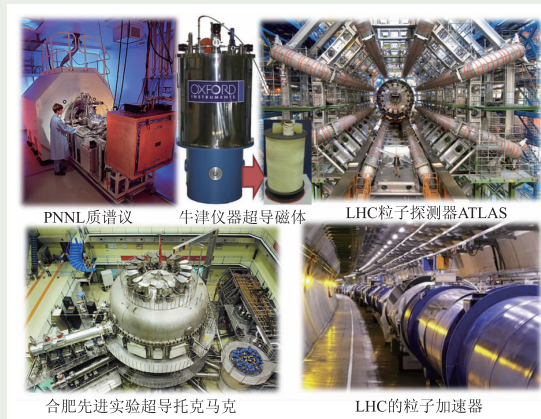


图10 超导磁体在科学研究中的应用

匀度，如今各大医院核磁共振仪很多都采用超导磁体，成像清晰度和辨识度获得了极大提高，成本却从





## 微弱信号检测 半个世纪的骄傲

Model 7124  
精密锁相放大器

低温物理  
设计极致



Model 5186  
差分前置放大器



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: infosi@ametec.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

数年前的上万元一次检测降至如今千余元的一次检测费用,还不考虑物价上涨因素。目前,采用最强超导磁体的核磁共振成像技术,能够把人脑中的860亿根神经元全部都清晰测量出来,做成令人惊叹不已的“人脑神经地图”(图9)<sup>[14]</sup>。在科学实验中往往需要强磁场的环境,在普通实验室里,超导磁体就可以提供高达18 T的强磁场;在质谱仪中,高精度的元素甚至同位素分辨能力需要依赖于高强度的超导磁体;对于大型粒子加速器,超导磁体是加速粒子和探测粒子的有

效工具,欧洲大型强子对撞机LHC之所以能发现希格斯粒子,其上9300余个超导磁体功不可没;对于人工可控核聚变装置,超导磁体提供的强磁场是用于约束聚变反应使其持续进行的神兵利器,这个叫做超导托克马克的装置还有个名号,称为“人造小太阳”,是未来能源危机的有效解决途径之一(图10)<sup>[15]</sup>。

超导电力、超导磁悬浮、超导磁体等都是在承载大电流或强磁场情况下的超导应用,又统称为超导强电应用。对应的,还有超导的弱电应用,主要利用了超导材料内部电子的量子特性,将在下节为您详细介绍。

### 参考文献

- [1] 亚里士多德(古希腊)著,张竹明译. 物理学. 北京:商务印书馆,1982
- [2] Biello D. Fact or Fiction?: Archimedes Coined the Term "Eureka!" in the Bath. Scientific American, 2006-12-08
- [3] 林革. 学与玩, 2015, (1): 40
- [4] <http://yowayowacamera.com/>
- [5] <http://www.kibardindesign.com/products/in-progress/the-bat-levitating-kibardin/>
- [6] 黄文艳. 磁悬浮时代的到来. 中华铁道网, 2016-03-15
- [7] Moon F C. Superconducting Levitation: Applications to Bearing and Magnetic Transportation. Wiley-VCH, 2004
- [8] Poole Jr C P, Farach H A, Creswick R J *et al.* Superconductivity(3rd edition) Elsevier, 2014
- [9] Tinkham M. Introduction to superconductivity (2nd edition). New York: Dover Publications Inc., 2004
- [10] 闻海虎. 物理, 2006, 35 (1): 16; 2006, 35 (2): 111
- [11] <http://www.quantumlevitation.com/>
- [12] Justin M. Japan's Maglev Train Breaks World Speed Record with 600 km/h Test Run. The Guardian (U.S.ed.) (New York), 2015-04-21
- [13] 丁峰. 中国西南交大:真空管道超高速磁悬浮列车相关技术尚处于试验阶段. 新华网, 2014-05-13
- [14] Smith K. Nature, 2012, 484: 24
- [15] [http://www.hfcas.ac.cn/xwzx/tpxw/201305/t20130508\\_3834306.html](http://www.hfcas.ac.cn/xwzx/tpxw/201305/t20130508_3834306.html)