

# 高场超导磁体技术及其应用

曾鸿卓<sup>1</sup> 王秋良<sup>2</sup> 刘建华<sup>2</sup>

(1. 华北电力大学 102206; 2. 中国科学院电工研究所 100190)

## 一、何谓高磁场

磁体磁场强弱的评估需要在相同的磁场持续时间以及相同的应用场景下进行。脉冲磁体可以在极短的时间内将能量释放,从而产生高达70~100特斯拉(Tesla, T)的磁场,但这种高磁场持续时间极为短暂,仅在毫秒量级。如果需要更长的磁场持续时间,那么磁场强弱的评价标准也要有所降低。针对不同应用场景的磁体,受到磁体孔径、磁体长度等因素的限制,它们目前所能达到的磁场强度也存在显著的差异。对于医学中的磁共振成像系统(MRI),目前已经完成人体成像的最高系统主磁场为11.7T;然而,对于科研中使用的核磁共振成像系统,目前已经实现商业化的系统主磁场已经可以达到23.5 T了。为了产生强度更高的具有较长持续时间的磁场,目前主要的技术路线有两种,一种是采用常规-超导混合磁体,另一种则是采用全超导磁体。值得骄傲的是,中国在这两种技术路线上都处在世界领先地位。中国科学院合肥物质科学研究院强磁场科学中心设计制造的水冷(电阻式)-超导混合磁体,最高可以产生45.22 T的磁场;中国科学院电工研究所使用低温超导材料和高温超导材料建造的全超导磁体,最高磁场为32.35 T,相当于地球磁场的65万倍。尽管目前全超导磁体的最高磁场记录低于水冷-超导混合磁体,但是全超导磁体是未来实现高强度、高稳定性磁场更有吸引力的技术手段。由于超导磁体在正常运行时电阻等于零,一方面可采用超导接头技术,使得线圈脱离电源实现闭环运行,从而消除电源稳定性对磁场的影响;另一方面,由于基本没有焦耳热产生,所以正常

运行时不存在散热问题。然而对于常规电阻型磁体而言,当线圈电流较大时,其内部将产生大量焦耳热,如果产生的焦耳热无法被及时散出,将有可能导致磁体的热失控。相比之下,长时间运行工况时,超导磁体能够承载更多的电流,从而具有产生更高磁场的潜力。

## 二、高场超导磁体的“前世今生”

最先开始用于制作超导磁体的材料为低温超导体。1954年,科学家Yntema利用铌线材成功制造了中心磁场约为0.7 T的超导磁体,这极大地鼓舞了科学家们研制超导磁体的信心。随着20世纪60年代中期铌钛(NbTi)超导体被揭开面纱,人们发现这种材料具有较高的强度、高延展性、高临界电流密度和相对低的造价,非常适合用作超导磁体的制作。直到现在,NbTi仍然是制作超导磁体的主要材料。然而,人们发现要想进一步提升磁场,仅仅依靠NbTi材料已经不能满足要求,这就需要能够产生更高磁场的超导材料:如铌三锡或铌三铝,它们可以产生二十几特斯拉的磁场。作为低温超导体,上述材料在更高磁场工况下临界参数如载流性能等显著衰减,严重制约了其可以达到的磁场上限。20世纪80年代高温超导材料相继问世以后,多个科研单位相继研制出了磁场更高的超导磁体。由于低温超导材料相比高温超导材料具有更低的制作成本,而高温超导材料相比低温超导材料具有更高的临界磁场,为了充分发挥二者的优势,可在低温超导磁体孔的内部同轴放置高温超导磁体,两者产生的磁场相互叠加,从而可以产生成本更低的高稳定性的磁场。

### 三、螺线管高场超导磁体的制作工艺

#### 1. 基本绕制方法

超导磁体的绕制方式主要分为饼绕和层绕,基本思想都是通过增加线圈匝数来提高磁场。其中,饼绕方式是从最内层开始,沿螺旋方向逐渐向外绕制,最终形成类似于饼状的结构,多个饼状线圈同轴堆叠再通过接头连接是构成超导磁体的一种基本思路。另一种思路则是利用层绕的方法,先沿着轴线方向螺旋绕制完一层后,再继续绕制下一层,从而形成一个多层的螺线管结构。在实际工程中,具体采用哪种绕制方式将受磁体尺寸、目标磁场大小等因素影响。

#### 2. 多宽度绕制技术

多宽度绕制技术借鉴了中国传统文化中“因地制宜”的指导理念,从字面上说,“因地制宜”就是人们根据环境的不同,采取不同的生活方式。这里的“环境”对应到超导磁体中就是空间中磁场的分布,“生活方式”则对应的是不同位置所选取的超导带材宽度。空间中的磁场,按照矢量分解,可以分为垂直于带材宽面的磁场和平行于带材宽面的磁场,其中的垂直分量对超导材料的临界电流有明显的削弱作用,而平行分量则影响不大。在空间的不同位置上,这两个磁场分量的大小是不同的。通常在靠近磁体端部的地方,垂直于带材宽面的磁场分量比较大,而在靠近磁体中心的地方,垂直于带材宽面的磁场分量比较小。在“环境险恶”的磁体端部,我们需要“派重兵把守”,即增加磁体端部超导带材的宽度,而在“风平浪静”的磁体中心,我们可以适当减小超导带材的宽度,在保证磁体安全运行的基础上兼顾了更高的材料利用率。此外,对于相同宽度带材绕制出来的线圈,它们的性能也会有很大的不同,这时就需要对线圈采用适当的排序策略,确保组装后的磁体能够良好运行,具体内容可参考文献[7]。

#### 3. 无绝缘绕制技术

无绝缘绕制是指利用没有绝缘材料的超导带材直接绕制线圈。尽管无绝缘线圈的匝与匝之间由铜、不锈钢等金属组成,但与处于超导态的超导层相比,它们的电阻率均高出好几个量级,所以在正常运行时相当于有绝缘的线圈,电流沿着绕制方向流动。在高磁场环境下,由于线圈将受到极端磁力的作用,有可能导致局部出现裂纹或分层,从而使局部临界电流下降,若临界电流下降到外加电流值以下,则该处的电阻率将会急剧增大。如果通过此处的电流长时间保持不变,将会在这个“坏点”上产生大量的焦耳热,从而破坏线圈的热稳定性,严重时将会造成线圈永久性的烧毁和损坏!但是在采用了无绝缘技术以后,由于“坏点”处的电阻率与匝间接触电阻率的数值可以比拟,此时一部分电流将会通过匝间接触电阻流到相邻匝,通过“坏点”的电流将会显著减少,与此同时,“坏点”处产生的热量也可以沿着匝间传播,因而有效降低了“坏点”处发生热失控的概率。除此以外,无绝缘技术还有其他的好处,由于常规的绝缘材料一般为有机材料,机械强度较低,当去除这些材料后,可以提高磁体整体的机械性能,同时提高了系统整体的紧凑性。值得注意的是,由于无绝缘线圈在瞬态过程中同时存在环向电流和径向电流,因此在线圈的有限元建模时需要作特殊的处理,具体可参考文献[8]。

#### 4. 接头技术

受到超导材料加工工艺的限制,实际的超导线材以及带材的长度有限,并不能满足实际的设计要求。因此需要采用接头技术将多根线材或带材连接起来,从而将短线变为长线。以高温超导带材为例,常见的连接形式包括搭接、对接、桥接,对于饼状线圈的绕制,一般采用搭接的接头形式,这种方式不会造成带材的明显变形。需要注意的是,接头本身存在电阻,它将造成线圈内的局部发热,因此我们需要不断改进接头工艺,尽可能地减小接头电

阻。目前,低温超导体的接头工艺已经相对成熟,然而对于高温超导体来说,接头技术仍处于研究探索阶段。

### 5. 外加预应力的绕制和组装技术

考虑到磁体的绕制与装配都在常温进行,而磁体实际运行却是在极低温、极高场、大电流的环境下,因此需要在绕制和装配过程中施加初始预应力,以抵消部分热应力和电磁应力,从而确保高场超导磁体在极端环境下磁体的机械结构稳定性。此外,适当的绕制预应力可以提高线圈的平整度和紧密程度,从而在浸渍时减小浸渍剂的渗入,使得在实际运行时尽可能减小因固化浸渍剂破裂而释放的扰动能量。然而,施加预应力并不是越大越好,过大的预紧力将导致结构失稳、导线的微屈服以及载流性能的下降,因此需要对绕制预应力、装配预应力继续开展深入的研究。

### 6. 固化浸渍技术

为了进一步提升高场超导磁体的传热性能以及机械完整性,需要对磁体采取固化浸渍处理。常用的浸渍方法主要有两种,一种方法是在线圈绕制过程中将浸渍材料涂刷在导线表面,另一种则是在线圈绕制完成以后,将完整的线圈置入真空容器中、依赖大气压力将浸渍材料注入线圈完成填充及固化。浸渍材料的选择可以有很多种,常见的包括环氧树脂、石蜡、氰酸酯树脂等。在浸渍过程中,需充分考虑磁体的材料属性以及运行工况,尽可能避免热失配、浸渍剂开裂等情况的出现。对于高场高温超导无绝缘磁体,未来可采用导电材料浸渍的方法,导电浸渍剂为线圈提供额外旁路,从而提高磁体抵抗外界干扰的能力。

## 四、改善高场超导磁体的磁场品质

### 1. 磁场均匀度的提升

尽管电磁设计可以使磁体达到很高的磁场均

匀度,但在实际制造过程中,各种因素使得磁体线圈偏离理想位置,加之不可避免的计算误差,导致了磁场不均匀性的产生。磁场均匀度降低会使磁共振图像出现模糊或者错位,严重影响成像质量。匀场技术是提升磁场均匀度最直接、最主要的补救措施,其基本思路是通过附加有源线圈或者铁磁材料的方式来“抵消”主磁场当中的不均匀分量,在此过程中需要用到球面谐波正交基分解以及各种优化方法。在高磁场、大电流的环境下,线圈以及线圈的支撑结构将会受到极大的电磁作用力,从而导致结构的变形,进而影响空间中磁场的分布,极大地增加了匀场的难度。为了达到良好的匀场效果,需要各种匀场技术的紧密配合。常用的匀场技术主要包括被动匀场和主动匀场,其中前者主要依靠铁磁性材料在主磁场中磁化来产生附加磁场,而后者主要利用通电的超导线圈或电阻线圈来匀场。对于高磁场MRI/NMR超导磁体的匀场,一般首先采用超导匀场线圈来“抵消”大部分的磁场不均匀分量,再通过电阻匀场线圈和被动匀场技术来补偿剩余的不均匀分量。

对于由带材绕制而成的稳态高磁场超导磁体,当磁体线圈附近包含垂直于带材宽面的磁场分量时,将会导致线圈截面中的电流密度分布不均匀,进而导致成像区域中磁场的均匀度下降。为进一步提升磁场的均匀度,目前主要采用加热法、电流过充回降法以及磁场振荡法来减小或消除磁体电流中的不均匀分量。

### 2. 磁场稳定度的提升

一般情况下,标准电源最多只能实现 10 ppm/h ( $1 \text{ ppm}=10^{-6}$ ) 的稳定性,为进一步提升磁场稳定度,一方面可以采用场-频联锁系统,它是利用磁场与射频频率(视作不变量)的偏差信号,经过放大电路以后去校正磁场强度的变化;另一方面,可以在稳态高场超导磁体励磁结束后,通过超导接头和超导开关,脱离电源实现闭环运行,这种运行模式被称为闭环模式。在闭环模式下,可以实现比 0.01 ppm/h

更好的高场稳定性。然而,磁体的闭环运行对超导接头的要求非常高,它将直接影响电流的衰减速率。为了获得低阻超导接头,必须去除超导线上的铜稳定层(比如采用腐蚀的方法),基于单纯的超导丝通过超声波焊接、冷焊或其他技术进行连接。随后接头还需要加入稳定材料,与超导丝合在一起。该技术非常特殊,主要用于需要高磁场稳定度的NMR和MRI磁体,这些接头技术是被作为公司技术秘密严格保密的。自高温超导材料Bi2223和REBCO被尝试用于极高场NMR磁体的研究后,REBCO-REBCO、Bi2223-Bi2223、Bi2223-NbTi和REBCO-NbTi超导接头成为了有待攻克的新难题和超导接头研究的前沿热点。

## 五、高场超导磁体失超及其保护技术

磁体失超原因有很多,如磁热不稳定性、较低的预应力、环氧的突然破裂等,这些因素直接或间接导致了线圈临界电流的下降或者局部电流密度的增加。超导材料的临界电流会随着磁场的提高而逐渐降低,对于各向异性的超导材料而言,这种效应在磁体端部尤为明显。并且,在高磁场、大电流的工况下,线圈承受极高的应力应变,这将进一步降低超导材料的临界电流。同时,极高的不平衡应力会使得层状超导材料发生分层以及微裂纹扩展,严重时将造成超导材料临界电流的断崖式下降。对于无绝缘超导磁体,虽然它具有较高的稳定性,但是当电源因故障突然断电或者充电速度过快时,流经匝间接触电阻的电流将会陡然上升,短时间内产生的大量焦耳热将使线圈出现急剧温升,一方面温度升高本身就会使临界电流下降,另一方面急剧的温升会带来极高的热应力,从而进一步削弱磁体线圈的临界电流。此外,线圈局部的高电流密度也是造成磁体失超的关键原因:由于高磁场超导磁体通常采用具有带状结构的高温超导材料,因此即使是在稳态情况下,线圈截面的电流密度分布依旧不均匀。当电源故障时,这种不均匀分布将会更加明显,致使局部出现极高的电流密度。在先前报

道的高磁场超导磁体失超事件中,大部分都是发生在磁体充电或放电过程中的。此外,当外部磁场突然变化(如背场磁体失超)时,为了阻碍磁通的变化,线圈内部将产生大量感应电流,这会显著增加线圈电流密度,进而造成磁体的失超。对于无绝缘线圈,由于匝与匝之间通过接触电阻构成额外的闭合回路,局部电流密度峰值将会变得更大。高磁场磁体失超通常从局部某一点或者线圈某一匝开始,通过电磁耦合和热扩散作用,使得周边原本处于超导态的线圈转变为正常态,如果不采取有效的保护措施,最终失超将如同雪崩一样扩散到整个磁体,整个过程中产生的巨大能量足以烧毁磁体。

失超保护技术的思路有三:其一是将失超能量快速地转移到其他回路中,其二是将失超能量尽可能快地“平摊”到更大的范围,其三则是尽量减小失超能量释放的速率。对于低温超导磁体,当系统检测到失超时,会立即切断电源电流,同时将与磁体并联的加热器回路和电阻回路导通。其中,加热器回路是为了提高失超的传播速度,让失超能量“平摊”到更大的范围;电阻回路可以在吸收部分磁体失超能量的同时,还可以起到降低磁体两端电压,防止绝缘击穿的作用。对于无绝缘高温超导磁体,虽然它的稳定性好、通流能力强,但是前面已经谈到,这种磁体依然存在失超的风险。当它发生局部失超时,由于高温超导材料的固有属性,失超传播的速度非常慢,这将导致失超能量在局部不断累积,进而使局部温度急剧上升直至发生烧毁,但是在这个过程中,由于线圈中大部分区域依然处于超导态,因此线圈的整体参数并不会出现明显变化,这对失超检测来说无疑是一大挑战。因此对于无绝缘高温超导磁体,需要引入不依赖于检测系统的失超保护技术。一种是附加额外的耦合线圈,当磁体失超时,线圈磁场会逐渐减小,耦合线圈中产生感应电流。这样,一部分的失超能量将从磁体转移到耦合线圈中;另一种则是在无绝缘线圈表面附着焊锡作为分流器,当线圈失超时,分流器分担了部分匝间电流,使得单位时间内在匝间接触电阻上产

生的焦耳热减少,从而降低了失超能量的释放速率,使热量能够有充分的时间释放到环境中去。采用适当的失超保护技术,能够有效防止线圈在失超过程中因过热或过应力而发生损坏。目前,低温超导磁体的失超研究已经比较成熟,然而对于高温超导磁体,其失超检测和保护技术依然存在很多问题有待探索。

## 六、高场超导磁体的应用

### 1. 磁共振成像(MRI)以及核磁共振成像系统(NMR)

MRI主要用于生物组织的成像,当特定的一些原子核置于均匀的静态磁场中时,会出现能级分裂现象。并且,当主磁场提高时,能级之间的能级差增大,也就是说原子核要从低能级跃迁到高能级需要“翻过”更高的“壁垒”,可以想象,此时低能级原子核所占的比例将会增加。因此,当外加适当的激发脉冲时,将会有更多的原子核从低能级跃迁到高能级,与此同时,当关闭激发脉冲时,也将有更多原子核从高能级回落到低能级(以下将这些原子核简称为有效原子核),从而释放出更多的有效信号。可以看到,提高主磁场强度将从两个方面提升有效信号强度:一方面是提高了有效原子核的数量,另一方面则是提高了能级差,从而提升每个有效原子核所释放的能量,两个方面的共同作用使得有效信号强度近似与主磁场强度的平方成正比。尽管磁共振系统中的噪声信号也会随着主磁场的增加而增加,但增加幅度远不如有效信号的增加幅度大,所以更高的主磁场将对应更高的信噪比,而更高信噪比的磁共振系统将会产生更高质量的磁共振图像。与MRI的原理类似,NMR也是基于原子核在外加主磁场下的能级分裂现象,并且更高的主磁场强度将对应更高的系统信噪比,只不过NMR系统的应用场景与MRI系统有所不同,核磁共振系统主要用于物质结构的分析研究,而后者则更多用于医

学治疗。当外加同一均匀的静态主磁场时,不同原子核对主磁场的响应不同,具体体现在它们之间的共振频率有所不同,并且主磁场越高,这种差异就越明显。因此,对于高场NMR系统,它可以区分出两种具有微小差异的结构,从而具备更敏锐的物质分辨能力。除此以外,更高的磁场强度通常需要同步缩短信号的采集时间,在保证信号质量的同时进一步提升了研究分析的效率。

### 2. 粒子加速器

高能量粒子在物质结构研究、宇宙来源探索、癌症治疗、材料加工、环境监测等领域有着广泛的应用。粒子加速器则是产生高能量粒子最直接、最主要的手段。目前,常见的粒子加速器包括回旋粒子加速器和同步粒子加速器。对于回旋加速器,其中包含交变电场区和恒定磁场区,交变电场区的主要作用是给带电粒子加速,而恒定磁场区主要是为了让带电粒子束发生偏转,使其重新进入到电场区进行加速。加速的次数越多,粒子的速度或能量就越高,相应地,在磁场强度不变的情况下,粒子的轨道半径就会越大,所需的粒子加速器尺寸也会相应增加。然而,受到场地空间、经济成本等因素的限制,粒子加速器的尺寸不可能无限制扩大。为了进一步增加粒子速度或能量,我们需要提高对粒子的“约束力”,从而将粒子的运动路径限制在更小的范围。“约束力”大小与带电粒子的电荷量、速度和外加磁场强度成正比,对于指定的粒子种类和速度,提高外加磁场强度是实现更大“约束力”的唯一途径。需要指出的是,随着粒子速度的不断增加,回旋加速器中的粒子将会出现相对论效应。由于粒子质量发生了变化,其绕行周期将会变长,并逐渐与交变电场的频率失配。针对此问题,研究人员提出了同步加速器的概念,通过优化磁场分布和实时调控交变电场频率,实现粒子速度及能量与电磁场变化的同步。同步加速器一般为环形管状结构,在使用同步加速器对粒子加速之前,需要对粒子进行预加速,从而使粒子有能力进入到具有较大轨道半

径的同步加速器中。同步加速器中主要包含两种磁体,一种称为二极磁体,它主要给粒子提供向心力,相当于粒子的“领航员”;另一种为四极磁体,它主要实现粒子的聚焦,相当于粒子的“对焦仪”。两种磁体共同决定同步加速器的性能。磁体的磁场强度越高,对粒子的聚焦和偏转能力就会越强,因此高能加速器中的磁体需要尽可能地用到超导技术。未来,随着超导磁体磁场的不断增加,一方面可使粒子能量进一步提升,另一方面可为加速器的紧凑化、小型化提供可能。

### 3. 磁约束可控核聚变装置

由于核聚变反应的温度通常在数千万到上亿摄氏度,我们无法找到一个“容器”来直接“盛装”核聚变等离子体。磁约束可控核聚变装置利用磁场对核聚变等离子体产生的洛伦兹力,让等离子体“悬浮”在容器中,从而不与反应器壁接触。为了让聚变反应自持地进行下去,根据劳逊判据,除了需要有足够高的温度,还需要有较长的约束时间,其中,约束时间与纵向磁场正相关。在相同条件下,若提升聚变装置中超导磁体的磁场,那么将更容易达到“聚变点火”条件,未来,聚变工程师们将不断减小装置的体积与造价,以推动实用化聚变装置的早日实现。

### 4. 超导电动磁悬浮

在超导电动磁悬浮系统中,车载超导磁体与8字形悬浮导向线圈相互作用,可以让车体在一定的悬浮间隙下保持稳定,从而消除了轮轨摩擦带来的阻力和损耗。车体的运行依赖车载超导磁体与推进线圈的作用,当列车加速(减速)时,根据列车的实时位置和速度,在推进线圈中通入适当频率和相位的交流电流,确保驱动力始终与运动方向一致(相反)。车载超导磁体是超导电动磁悬浮系统中的核心部件,提高超导磁体的磁场可以有效提升车体的悬浮稳定性以及车体的运载能力。与此同时,在更大驱动力的作用下,车体将具有更高的加速度。目

前,仅有日本研发出了可实用化的超导电动磁悬浮列车,其余各国的研究尚处于试验阶段。

### 5. 风力发电

目前,超导磁体在风力发电中主要有两方面的应用:风力发电机以及超导磁储能。对于风力发电机,当超导磁体的磁场提高以后,磁力线切割导体将产生更高的感应电动势,从而可以提高发电机整体的输出功率,或大幅减小发电机的体积。由于自然风力资源在时间尺度上分布极不均匀,为了保证电功率输出的稳定性,可以利用储能系统进行动态调节。更高的磁场强度,可以有效提升超导磁储能系统的储能密度,实现储能总量不变的前提下提高系统的紧凑性。

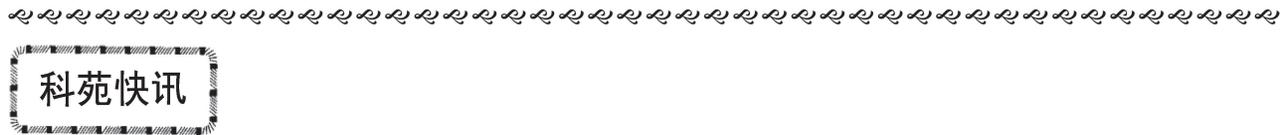
## 七、结语

可探致病凶手、可揭微观面纱、可束粒子神通、可跃万里河山,高场超导磁体在科学研究、医疗诊断、交通运输、能源电力等各个方面都在散发着自身的能量,为人类生产生活作出了巨大的贡献。习近平总书记指出,大国重器必须掌握在我们自己手里。虽然我国在高场超导磁体方面起步较晚,但是起点高、发展快,目前无论是磁场的强度还是强磁场应用的范围在世界范围内都已经进入国际第一梯队。随着国家对超导基础及应用方向的持续投入,我国有望在高场超导磁体技术方面取得更大的进展!

### 参考文献

- [1] 匡光力. 稳态强磁场磁体技术研究进展[J]. 科技导报, 2023, 41(19): 66-75.
- [2] 王秋良. 高磁场超导磁体科学[M]. 科学出版社, 2008.
- [3] 王秋良. 磁共振成像系统的电磁理论与构造方法[M]. 科学出版社, 2018.
- [4] 刘建华, 程军胜, 王秋良, 等. 高场超导磁体研究进展及其应用[J]. 电工电能新技术, 2017, 36(11): 1-13.
- [5] 11.7 Tesla: First images from the world's most powerful MRI scanner. <https://healthcare-in-europe.com/en/news/11-7-tesla-first-imag->

- es-world-most-powerful-mri-scanner.html.
- [6] 蒋晓华,薛芑,黄伟灿,等.14 T 全身超导 MRI 磁体的技术挑战——大规模应用强场超导磁体未来十年的发展目标之一[J].物理学报,2021,70(1):160-169.
- [7] Zhou B, Ji X, Wang L, et al. Study on the Arrangement of REBCO Double-Pancake Coils with Different Critical Currents in 30-T Superconducting Magnets[J]. Journal of Superconductivity and Novel Magnetism, 2024, 37(2): 369-378.
- [8] Chen Y, Wang Q, Wang K, et al. 2D axisymmetric electromagnetic modeling of HTS coils based on TA formulation with modified Newman boundary conditions[J]. Superconductor Science and Technology, 2024.
- [9] 张涵,马光同,李兴田,等.高温超导涂层带材接头工艺研究进展[J].低温与超导,2016,44(4):43-54.
- [10] 李兰凯,王厚生,倪志鹏,等.超导线圈绕制过程的力学行为研究[J].物理学报,2013,62(5):516-522.
- [11] Feldman J, Stautner W, Kovacs C, et al. Review of materials for HTS magnet impregnation[J]. Superconductor Science and Technology, 2024, 37(3): 033001.
- [12] Zhou B Z, Wang L, Chen Y, et al. Screening current in ultra-high-field non-insulated superconducting magnets[J]. Science China Technological Sciences, 2024: 1-19.
- [13] 黄兴,张子立,胡新宁,等.核磁共振磁体超导接头工艺研究进展[J].波谱学杂志,2021,38(3):424-432.
- [14] Wang K, Chen Y, Wang Q, et al. Electromagnetic and Thermal analysis of an Intra-layer no-insulation coil during Quench[J]. Physica C: Superconductivity and its Applications, 2024, 619: 1354477.
- [15] Qin L, Liu J, Wang L, et al. A high efficiency protecting scheme for hts inserts in case of background magnet quenches[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2021.
- [16] 徐庆金. 粒子加速器中的超导磁体技术[J]. 现代物理知识, 2022, 34(2): 37-41.
- [17] 刘士菟,王磊,王路忠,等.电动悬浮列车及车载超导磁体研究综述[J].西南交通大学学报,2023,58(04):734-753.



## 天文学家首次发现黑洞三重系统

美国麻省理工学院(MIT)和加州理工学院(Caltech)发现了一个黑洞三重系统,这是人类首次观察到这种结构。位于天鹅座的这个黑洞很早就被命名为天鹅座 V404,但是其三重系统此前一直未被发现。

与典型的双星系统不同,该系统包括吞噬附近一颗恒星的中心黑洞和一颗遥远的恒星。这种不寻常的设置表明,黑洞是通过直接坍缩而不是剧烈超新星爆发形成的。这挑战了关于黑洞起源的主流理论,并强调了宇宙中可能存在更多未被发现的三重系统。

此前发现的黑洞都是双星系统,比如一颗恒星与一颗致密中子星或一个黑洞,黑洞强烈的引力将其捆绑形成紧密的轨道关系。

该系统的特点是,中心黑洞消耗附近的一颗小恒星,该恒星每 6.5 天绕黑洞运行一次,类似于已知的双星系统。然而,值得注意的是,一颗遥远的恒星也在绕黑洞运行,研究人员估计其每 7 万年绕黑洞一周,距

离黑洞 3500 个天文单位(1 天文单位是地球与太阳之间的距离),相当于冥王星到太阳距离的 100 倍。

如果黑洞是由一颗典型的超新星形成的,那么在坍缩前释放的能量会将外围所有松散束缚的物体踢走,那么外层的遥远恒星就不可能还在附近游荡。因此,研究组怀疑该黑洞是通过一个更温和的“直接坍缩”过程形成的。形成黑洞的过程中,恒星只是自己坍缩,而没有最后的高光爆闪。这种温和的黑洞起源过程,几乎不会扰动任何关系松散的天体。而这个三重系统,可能是黑洞更温和形成过程的第一个证据。

物理学家观察到,外围恒星恰好正在变成红巨星的过程中,这是恒星生命即将结束的一个阶段。研究组据此确定,外恒星约有 40 亿年历史。考虑到邻近恒星大约在同一时间诞生,研究组认为这个黑洞三重系统也已有 40 亿年历史。

(高凌云编译自 2024 年 10 月 25 日 SciTechDaily 网站)