

# 高温超导磁通泵研究进展与发展趋势

翟雨佳<sup>1,2</sup>, 刘欣怡<sup>1</sup>, 汪   沅<sup>1</sup>, 刘建华<sup>2</sup>, 王秋良<sup>2</sup>

(1. 湖南大学电气与信息工程学院, 湖南 长沙 410082; 2. 中国科学院电工研究所, 北京 100190)

**摘要:** 高温超导磁通泵是一种基于电磁感应定律的高温超导磁体无接触式供电设备,可在没有任何直接电接触或物理接触下将磁通量泵入超导闭环线圈,以补偿高温超导磁体系统衰减的电流并确保磁体磁场稳定性,从而使高温超导磁体能够工作在持续电流模式下,为实现稳态强磁场提供技术支持。超导磁通泵未来能够替代昂贵的高温超导磁体电流引线,在减小体积和重量的前提下有效提高无线电源设备的能效及可靠性,降低超导磁体带材使用量及制冷机功率,极大地推动高温超导磁体的广泛应用,将对航空航天、国防军事、轨道交通、生物医疗、高能物理等工程应用领域的技术革新做出贡献。本文总结了不同类型高温超导磁通泵的设计方案、技术特点以及最新研究进展,对比分析了各类型超导磁通泵的优缺点与应用前景,阐述了磁通泵在超导磁体及超导电机等应用领域中的潜在发展趋势,为高温超导磁体无线直流电源技术提供了理论支持与技术展望。

**关键词:** 超导磁通泵; 高温超导磁体; 无接触式充磁技术; 无线直流电源; 闭环运行

**DOI:** 10.12067/ATEEE2106021      **文章编号:** 1003-3076(2021)11-0037-09      **中图分类号:** TM12

## 1 引言

近年来,随着第二代高温超导涂层导体性能及性价比的不断提升<sup>[1,2]</sup>,高温超导技术在物理、材料、电力、医疗、交通等领域中得到了广泛应用。与低温超导材料相比,实用化的第二代高温超导带材在高场下具有更高的电流传输能力和更优异的机械性能,且在低温环境下具有交流损耗小和轴向抗拉应力高等优点<sup>[3]</sup>,极大地推动了高温超导磁体技术的发展。基于高温超导带材绕制而成的高温超导磁体为实现稳态强磁场提供了技术支持<sup>[4,5]</sup>,对航空航天、国防军事、轨道交通、生物医疗、高能物理等工程应用领域的技术革新具有重要意义<sup>[6]</sup>。

高温超导磁体工作时由于存在磁通蠕动、接头电阻以及交流损耗,将导致电流衰减。然而采用传统励磁方法补偿电流热损耗功率较大、易诱发磁体失超,且制冷负担大、设备体积大、运维费用高,极大地阻碍了高温超导磁体的应用与发展<sup>[7,8]</sup>。例如,传统的电源直接驱动法需要使用电流引线,其跨接在室温环境和低温环境之间,会形成漏热源,对超导

磁体低温维持极为不利,通常需要使用大型制冷机进行制冷,进一步增加了运行成本且不宜远距离运输使用。基于磁通泵的新型无接触式直流电源技术是实现高温超导磁体在闭环恒流模式下高效稳定运行的理想方案。高温超导磁通泵技术利用变化的磁场把外部离散磁通逐步向高温超导带材累积,在带材内部感应出直流电流,从而实现高温超导磁体充磁,是一种在没有电接触的情况下将直流电流注入超导闭环线圈的无接触式充磁技术<sup>[9-11]</sup>,能够使高温超导磁体闭环运行在持续电流模式(Persistent Current Mode, PCM)下。磁通泵技术和传统电源直接驱动法相比有几个明显的特点:①磁通泵不和负载磁体直接相连,避免了供电大电流直接进入深冷区,显著减弱了传统引线的热源和热桥效应;②磁通泵运行功率较小,不需要复杂的供电及制冷设备,磁体适合远距离运输;③磁通泵更方便调节,可在补偿少量电流时使用;④磁通泵作为磁体电源制造成本低,且不需要 24 h 不间断工作,能够大幅降低磁体的运维成本。因此,高温超导磁通泵具有充磁效率高、释放能量快、易于控制、稳定性高、成本低等优势。

**收稿日期:** 2021-06-09  
**基金项目:** 国家自然科学基金青年科学基金项目(51907060)、湖南省自然科学基金优秀青年基金项目(2021JJ20013)  
**作者简介:** 翟雨佳(1990-),女,陕西籍,副教授,博士,研究方向为高温超导磁体及超导无线电能传输技术;  
刘欣怡(1996-),女,江苏籍,硕士研究生,研究方向为高温超导磁通泵。

点,方便实现高温超导磁体装置的轻量化、小型化和实用化,特别是对国防特种武器装备中的高场磁体从低温超导磁体走向高温超导磁体具有重要实际意义。

超导无接触式充磁技术的实现,意味着一种全新的磁体充磁方式成为可能<sup>[12,13]</sup>。高温超导磁通泵技术的成熟将推动高温超导磁体在磁共振成像(Magnetic Resonance Imaging, MRI)<sup>[14]</sup>、核磁共振(Nuclear Magnetic Resonance, NMR)、极端条件科学装备、超导风机<sup>[15,16]</sup>、粒子加速器、磁悬浮列车等众多领域中的无限发展和应用。经过几十年的不断发展,国内外已经研究出了多种不同类型的超导磁通泵,基于超导磁体运行温区可分为低温超导磁通泵和高温超导磁通泵,现有研究下低温超导磁通泵的基本物理机制清晰且技术成熟,但高温超导磁通泵的工作机理仍然不十分明确,尚待进一步细化研究,本文主要探讨高温超导磁通泵的最新研究进展及未来发展趋势。

2 高温超导磁通泵机理

近年来,利用高温超导磁通泵产生直流电压的技术可行性已得到实验验证<sup>[17,18]</sup>。然而,其物理机理引起了广泛的讨论,交变行波磁场如何在超导闭环线圈中注入净磁通量并产生直流偏置电压,这一现象无法用经典电磁学理论来完美解释。根据法拉第电磁感应定理和经典第二类超导体电磁场 Bean 模型,交变磁场应产生交变感应电压,而非直流感应电压。针对高温超导磁通泵运行机理,目前国际上讨论较多的主要有动态电阻理论<sup>[19]</sup>和宏观磁通量子耦合理论<sup>[20]</sup>,下面分别做简要介绍。

2.1 动态电阻理论

惠灵顿维多利亚大学 Geng 提出动态电阻理论,即 II 型超导体中的非线性电阻率是磁通泵开路电压直流分量的起源。II 型超导体的电阻率受外加场和电流的大小及频率影响,当外加交变磁场  $B_a$  应用于承载传输电流  $i$  的超导回路时,回路中电阻率会产生变化,如图 1 所示,分支上能够测量到远远大于磁体接头电阻值的动态电阻和开路电压,其中,  $v_1(t)$  与  $v_2(t)$  即为每个分支的感应电动势<sup>[21,22]</sup>。

感应电压  $v(t)$  中的直流电压为:

$$V_{DC} = \frac{1}{T} \int_0^T v(t) dt = \frac{1}{T} \int_0^T \frac{-d\Phi/dt}{R_1(t) + R_2(t)} R_2(t) dt$$

(1)

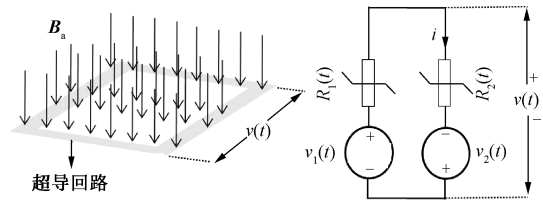


图 1 电压产生示意图<sup>[19]</sup>

Fig.1 Schematic diagram of voltage generation<sup>[19]</sup>

式中,  $T$  为周期;  $R_1(t)$ 、 $R_2(t)$  为分支的电阻;  $\Phi$  为施加到回路的总磁通量。

2.2 磁通量子耦合理论

剑桥大学 Archie Campbell 指出动态电阻与  $E$ - $J$  Power Law 曲线中的电阻无关,当超过临界电流时,动态电阻取决于标准的通量流阻,这并不能合理解释磁通泵中直流电压的产生原理<sup>[23]</sup>。如图 2 所示,四川大学王为提出了宏观磁通量子耦合效应以解释高温超导磁通泵的物理起源——短波行波磁场下,磁极耦合超导磁通量子形成磁通量子簇并拖动磁通量子簇在高温超导体内部移动,最终进入超导闭合回路内部形成超导磁体的捕获磁场。在此过程中,超导体内部存在感应直流电压且其大小与行波磁场梯度呈正相关<sup>[20]</sup>。

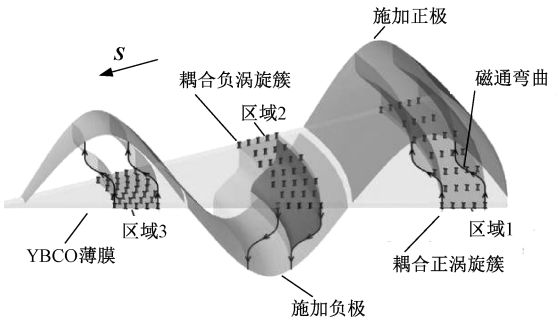


图 2 耦合特征示意图<sup>[20]</sup>

Fig.2 Schematic diagram of coupling features<sup>[20]</sup>

行进的磁通涡流在高温超导体中产生感应电场:

$$\boldsymbol{E} = \boldsymbol{S} \times \boldsymbol{B}$$

(2)

式中,  $\boldsymbol{E}$  为沿纵向方向的感应电场;  $\boldsymbol{S}$  为内部磁通流动的速度;  $\boldsymbol{B}$  为超导定子内部耦合磁通的密度。

3 高温超导磁通泵类型

高温超导磁通泵按其运行方式不同可分为行波磁场型磁通泵和开关型磁通泵,均能够很好地利用超导体的载流能力且具有实现高传输电流的潜力。下面对不同类型高温超导磁通泵的设计方案、技术特点以及最新研究进展做简要介绍。

### 3.1 开关型高温超导磁通泵

开关型磁通泵可在简单的结构修改和较小的损耗增幅下实现输出电流的大幅度提升,是现今研究较多的磁通泵类型<sup>[24,25]</sup>。其技术路线清晰,即通过给变压器一次绕组供电,在二次绕组中感应交流电流,利用开关对交流电进行整流从而产生超导负载所需的直流电<sup>[26]</sup>。开关类型主要分为电子开关、热开关、磁场开关和自开关<sup>[27]</sup>。电子开关可在高达 500 Hz 频率下工作,但存在导通电阻,若负载在准持续电流模式下工作会带来恒定的损耗,难以保持稳定的磁场。热开关通过将超导体加热至超过其临界温度来断开开关,可用于全波模式,但由于运行缓慢,只适用于低频环境。基于存在的问题,研究者们提出了更简单高效的开关控制电路<sup>[28]</sup>,因此本文主要介绍磁场开关及自开关型高温超导磁通泵。

#### 3.1.1 基于交流磁场开关

交流磁场开关型磁通泵基于动态电阻理论实现,如图 3 所示。其中, $N_1$  为一次侧匝数, $N_2$  为二次侧匝数, $\phi_m$  为铁心磁通量, $\phi_1$  为一次侧磁通量, $\phi_2$  为二次侧磁通量, $R_L$  为负载回路电阻等效值, $R_2$  为接触电阻, $R_s$  为动态电阻, $V_2$  为负载电压, $L$  为负载电感, $i_1$  为一次侧电流, $i_L$  为负载电流。钇钡铜氧(Yttrium Barium Copper Oxide, YBCO)带材回路在交流电场中感应低频交流电流,电桥短路超导线圈,间歇性垂直于桥施加高频交流磁场,桥两端产生直流电压,触发净磁通量流动,向负载磁体充电<sup>[29,30]</sup>。

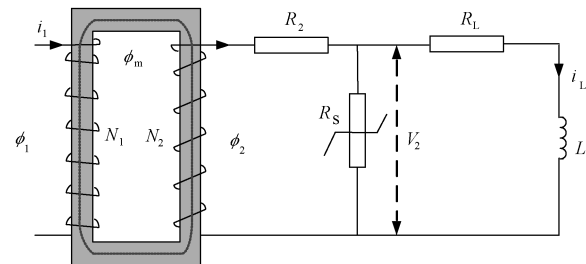


图3 交流磁场开关磁通泵原理图

Fig.3 Schematic diagram of AC magnetic field switching flux pump

研究表明,该类型磁通泵能够精确控制每个磁场周期的磁通量,稳定性高、超导损耗小,但由于装置运行需要高频磁场,更适用于负载电感较小的场景。基于动态电阻理论设计的磁通泵具有为恒流模式下的高场超导磁体供电的潜力。Gawith 发现使用双交流磁场开关半桥配置优于仅使用单个开关元件的磁通泵<sup>[31]</sup>;Geng 已成功设计出 1 kA 输出电

流的交流磁场开关型磁通泵<sup>[32]</sup>。

#### 3.1.2 自开关

如图 4 所示,Geng 优化了自开关式磁通泵,其具有结构简单、能量损耗小的优点。装置省去外设条件作为开关,电桥完全由超导体组成,通过向一次绕组提供不对称的电流波形  $i_1$  控制电桥。如图 5 所示,二次绕组感应电流  $i_2$  小于临界电流  $I_{c,s}$  时,电桥处于超导态,磁通泵不工作;感应电流大于临界电流时,电桥处于正常态,感应直流电压  $V_2$ ,  $i_L$  向负载磁体  $L$  充电。自开关式磁通泵很大程度上降低了系统的复杂性,理论上可实现 2 kA 输出电流,并且在变压器铁心中加入气隙后也能有效运行。但由于电桥控制方式的限制,不适用于需在全波模式下运行的场景<sup>[33]</sup>。

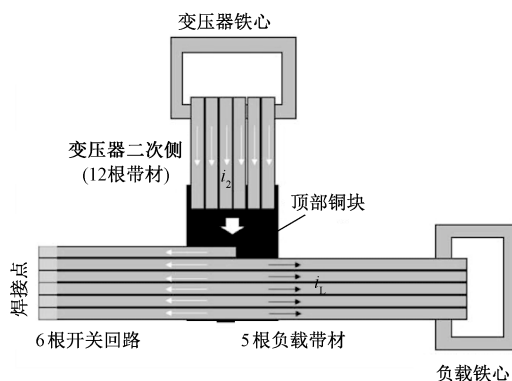


图4 自开关磁通泵结构图<sup>[33]</sup>

Fig.4 Self-switching transformer rectifier flux pump structure diagram<sup>[33]</sup>

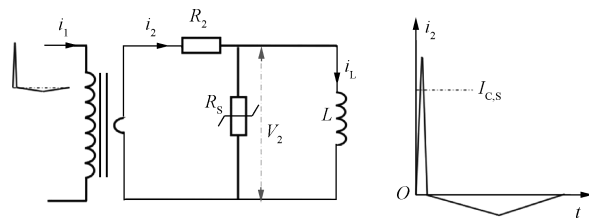


图5 自开关磁通泵电路原理图与二次侧波形图<sup>[33]</sup>

Fig.5 Self-switching transformer rectifier flux pump circuit principle diagram and secondary side waveform diagram<sup>[33]</sup>

### 3.2 行波磁场型高温超导磁通泵

基于行波磁场的高温超导磁通泵最先由剑桥大学 Coombs 提出。该类型磁通泵不依赖超导体正常态与超导态的切换来达到励磁的目的,而是通过在超导体上方产生行进的磁场,根据电磁感应原理在超导体中感应出直流电压,并实现有效的磁通泵浦。根据产生行波磁场的方式主要分为以下几种:



3.2.1 热激励高温超导磁通泵

Coombs 提出使用热磁材料产生行波磁场磁化超导体,这是最原始的基于行波磁场的磁通泵。如图 6 所示,利用稀土材料钆磁导率随温度变化的特性,产生相应随时间和空间变化的行波,通过加热与冷却热磁材料逐步实现超导体磁化。热激励磁通泵的泵浦效果与加热器的功率以及开关时间密切相关,控制较慢,通常超过几秒钟,严重限制了磁通泵的工作频率。Zhou 使用涂有超导体的圆柱体热磁材料进行优化,但存在工作效率低、消耗大的缺点;Zhai 使用了具有更好热磁转换效率的铁氧体进行升级<sup>[34]</sup>,使励磁速率得到提升。但热激励磁通泵由于装置复杂、控制繁琐及损耗大,其应用领域受到较大限制。

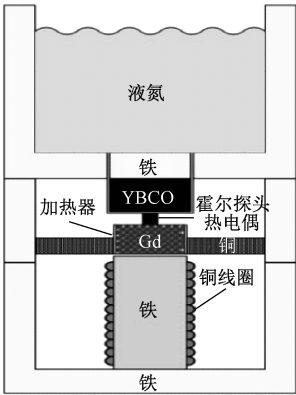


图 6 热激励磁通泵结构图<sup>[34]</sup>

Fig.6 Thermally actuated flux pump structure diagram<sup>[34]</sup>

3.2.2 旋转式磁通泵

Hoffmann 提出了基于旋转磁体的磁通泵,装置结构如图 7 所示。由电机轴驱动的圆盘上均匀地安装永磁体<sup>[35]</sup>,超导带放置于圆盘下方,与负载磁体焊接形成闭环电路。磁体在超导带上方旋转以产生行波磁场,由于场在空间上是不均匀的,可以拖动净通量。磁铁旋转时与带材的相对位置发生变化,改变了屏蔽电流的前向路径和后向路径,达到整流效果,带材两端即感应出直流电压,从而使负载侧超导磁体中电流逐渐升高至最高值,达到励磁的目的。

由于行波由旋转永磁体产生,更适合应用于自身旋转且不需要稳定磁场的动力转子,例如在电动机或发电机中<sup>[36-41]</sup>,鼠笼架构的发电机式高温超导磁通泵最大输出电流能够达到 1.3 kA<sup>[42]</sup>。Sung 完成了基于高温超导磁通泵的 12 MW 风力发电机模块的热损耗分析<sup>[15]</sup>,研究人员也一直致力于将旋转式磁通泵应用于超导风力涡轮机中<sup>[43,44]</sup>,已成功将磁通泵放置于低温装置外运行<sup>[45]</sup>。

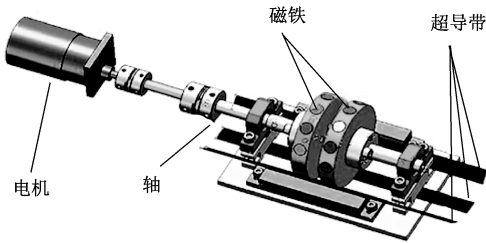


图 7 旋转式磁通泵装置图<sup>[35]</sup>

Fig.7 Rotating magnets based flux pump device diagram<sup>[35]</sup>

3.2.3 线性磁通泵

Matsude 及 Fu 设计了线性磁通泵,其具有工作时振动和电噪声小、无需开关和泵浦速度快的优点,最大泵浦电流可达超导临界电流的 92%,适用于需快速励磁的设备。如图 8 所示<sup>[46]</sup>,由多组驱动电路为上下平行排列的线性电磁铁供电,通过按顺序切换含铁心线圈产生行波磁场,用于感应的超导体放置于两组线圈之间以获取更高的磁场强度,施加电流的幅值和频率乘积恒定即可在小磁场、大频率下实现超导电流泵浦,但运行状态无法完全预测,因此其优化必须基于反复试验。此外,回路中 YBCO 带材的焊接工艺也是一个问题,尽管不断研究相关技术,但在连接到传输带材上时不可避免会增加电阻值。线性磁通泵现已经成功地将电流注入了超导负载线圈,泵浦电流高达线圈临界电流的 90%,实现了 1.5 T 的合成磁场。

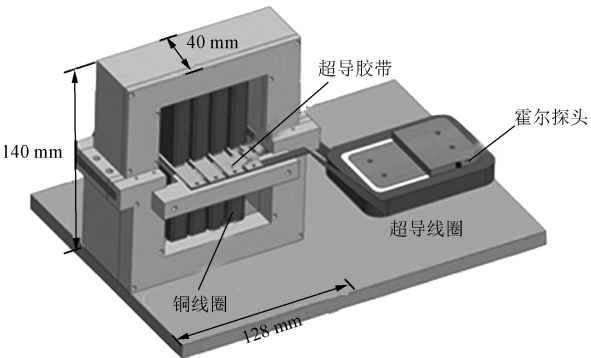


图 8 线性磁通泵示意图<sup>[46]</sup>

Fig.8 Schematic drawing of linear flux pump<sup>[46]</sup>

3.2.4 环形磁通泵

王为研究了用于磁化高温超导薄膜的循环式磁通泵<sup>[20]</sup>,将多匝绕组集中放置以产生圆形行波磁场,通过改变绕组之间的相位差改变磁场波的方向,研究超导薄膜内的微观效应。提出了超导薄膜中磁耦合现象,微观上解释了超导磁通泵的物理机理,如图 9 所示,其运行原理为:局部磁场的场不均匀性产

生了耦合能量,由磁极产生涡旋及包含数百万个涡旋的涡旋团簇,涡旋团簇与外加磁极耦合,并一起运动。此外,只有施加的行波波长足够短并且场的幅值较大才能够有效地耦合。

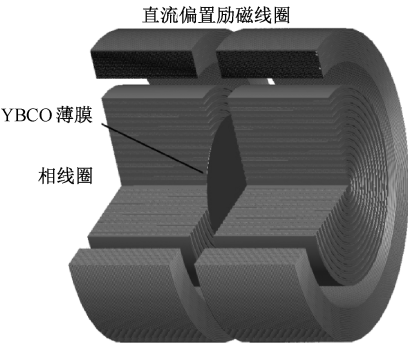


图9 磁通量子耦合原理图<sup>[20]</sup>

Fig.9 Schematic diagram of circular-type magnetic flux pump<sup>[20]</sup>

3.2.5 直线电机型磁通泵

在最近的研究报告中,王为对直线电机型磁通泵进行了优化提升<sup>[47-49]</sup>,结构如图10所示,其原理是利用三相逆变器连接三相绕组,在气隙中产生交流行波磁场,使用直流电源为直流绕组供电,提供直流偏置磁场,直流偏置的交流行波磁场将直流电流泵入超导磁体闭环系统<sup>[50]</sup>。直线电机型磁通泵通过改进磁设计使磁通泵更加稳定和灵活,减小了尺寸和噪音,结构简单,是目前体积最小的磁通泵,可应用于超导电动机无刷励磁及超导储能设备等。

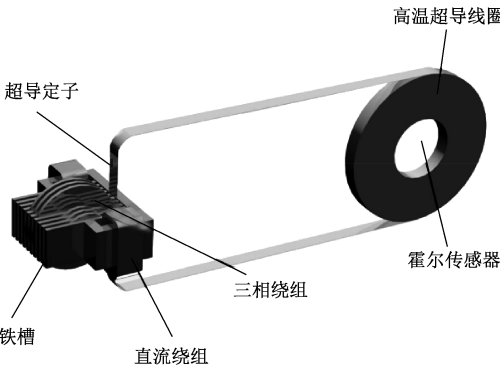


图10 直线电机型磁通泵示意图<sup>[47]</sup>

Fig.10 Schematic drawing of linear-motor type flux pump<sup>[47]</sup>

这项研究初步验证了宏观磁耦合效应理论,即超导定子内部的磁通流是一种引导磁通流,外加磁极与超导涡旋之间建立了磁耦合的关系,耦合强度则来源于场的不均匀性。也就是说,通过缩短磁场波长,可以增加场的不均匀性,从而增加耦合强度。

4 不同类型磁通泵对比

行波磁场型和开关型磁通泵对比见表1,两者均可在整流和逆变模式下运行,但在工作机理方面存在根本差异。行波磁场型磁通泵是所有类型中最简单的、不需要变压器且使用超导体最少的磁通泵,具有体积小、成本低的优点,适用于发电机、电动机、医疗器械等小型设备。但负载被处于行波磁场中的超导体短路,电流泵浦通过单一回路实现,感应电流即流入负载的电流,回路上电流产生的损耗无法减小,对工作电流的限制较大。开关型磁通泵可以通过减小流经桥部分的电流来使损耗最小化,能够更好地利用超导体的载流能力,适用于高场超导磁体等需要较大泵浦电流的设备。

表1 不同类型磁通泵优缺点对比

Tab.1 Comparison of merits and drawbacks of different types of magnetic flux pumps		
磁通泵类型	方式	优缺点
开关型 高温超导 磁通泵	电子开关	充电速度快;效率高;但存在恒定损耗
	热开关	可全波模式运行;但运行缓慢,只适用于低频环境
	交流场开关	可全波运行;能够精确控制;损耗小;稳定性高
	自开关	无需开关;能够实现大电流输出;但仅可半波运行
行波磁场型 高温超导 磁通泵	热激励	需要加热热磁材料至过渡点;控制慢;损耗大
	旋转式	原理简单;控制不灵活,应用场景受限,适用于电机
	线性	无需开关;振动、电噪声小;回路中损耗不可避免
	直线电机	体积小;结构简单;系统稳定灵活;需外加偏置磁场
	环形	用于超导薄膜;结构简单;可产生强非均匀性场

5 应用及未来发展趋势

高温超导磁体在持续电流模式下工作时,由于存在磁通蠕动效应和接头电阻,闭合超导回路中的电流不可避免地会产生衰减。对于具有高磁场强度的超导磁体而言,电阻性使其需要高功率的电源来补充电流衰减,电源与冷却成本巨大。基于高温超导磁通泵的无接触式直流电源技术是实现超导磁体在闭环恒流模式下高效稳定运行的理想方案,能够在提升效率的同时显著降低成本。高温超导磁通泵

的发展潜力巨大还在于其未来能够极大地推动高温超导磁体在航空航天及国防军事领域的广泛应用。

对于一些较小的超导磁体而言,磁通泵给予了广泛的应用可能性,由于省去了大体积的供电电源,超导磁体可用于一些体积较小或便携式的设备,如小型发电机、电动机等。超导发电机是电机领域的一种新型电机,具有功率密度大、同步电抗小、效率高、维护方便等优点。磁通泵给超导电机提供了新的励磁思路,使用磁通泵则无需使用电刷,能够大幅度降低超导电机的制造成本、制冷负担与故障率,提升电机能效与可靠性。

高场核磁共振技术,例如 MRI 和 NMR,是高温超导磁通泵技术最具潜力的应用场景之一,也对磁通泵的研发提出了新挑战。目前,高温超导磁通泵能否广泛投入实际应用主要存在以下几点问题:①磁通泵自身的热损耗需控制在较低水平,不能影响负载磁体的正常工作;②磁通泵能否在无接触条件下实现 kA 级的输出电流,低成本、高效率地快速满足负载的充电需求;③磁通泵能否对充电电流实现高精度控制,根据负载需求响应合理的泵浦电流;④传输距离也是磁通泵能否投入应用的关键参数,研究表明,将磁通泵放置在低温系统外可降低磁体的运行温度,若放置在低温系统内,则磁通泵必须使用非磁性材料;⑤磁通泵作为超导磁体的供电电源,其稳定性是最重要的指标,为了超导磁体能够长时间的有效工作,其磁场稳定度需控制在  $10^{-6}$  的范围内。

下一步工作中将建立基于无液氮磁通泵励磁的高温超导磁体闭环运行系统,验证制冷机制冷条件下 30~50 K 温区磁通泵励磁的可行性。磁通泵选用旋转电机型与直线电机型,在励磁功率、励磁电流、励磁速率、磁场稳定性和磁通泵功耗等指标上做测试,旨在为未来高温超导磁体在国防军事、航空航天、轨道交通、生物医药、大科学工程仪器等领域的推广应用奠定理论基础与实验验证。

## 6 结论

稳态强磁场被广泛应用于物理、材料、医疗、交通、电力等诸多领域,使得能够承载强磁场的高温超导磁体成为工程应用领域的焦点,保证高稳定性和低运行成本是充分发挥其应用潜力的关键环节,将推动国家重大基础设施建设及国民经济的快速发展。高温超导磁通泵是一种基于电磁感应定律的无

接触式充电设备,可以在很大程度上降低高温超导磁体的运行成本和损耗,解决闭环模式下电流衰减问题,促进高温超导磁体的发展与大规模应用。

本文对高温超导磁通泵进行了较为全面的介绍与总结,并提出了该技术的未来发展趋势,有助于科研人员深入理解磁通泵技术中存在的基础科学问题,有针对性地促进高温超导磁体无线直流电源设备的研发。

## 参考文献 (References):

- [1] 蔡传兵,池长鑫,李敏娟,等 (Cai Chuanbing, Chi Changxin, Li Minjuan, et al.). 强磁场用第二代高温超导带材研究进展与挑战 (Research progress and challenges of second-generation high-temperature superconducting tapes for strong magnetic fields) [J]. 科学通报 (Chinese Science Bulletin), 2019, 64 (8): 827-844.
- [2] 张妍,诸嘉慧,陈盼盼,等 (Zhang Yan, Zhu Jiahui, Chen Panpan, et al.). 0~3.5 T 直流背景磁场下第二代高温超导带材临界电流各向异性测试与分析 (Test and analysis of critical current anisotropy of the second-generation high-temperature superconducting tape under 0~3.5 T DC background magnetic field) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2020, 39 (7): 24-29.
- [3] 刘建华,程军胜,王秋良,等 (Liu Jianhua, Cheng Junsheng, Wang Qiuliang, et al.). 高场超导磁体研究进展及其应用 (Research progress and application of high-field superconducting magnets) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2017, 36 (11): 1-13.
- [4] 肖立业,古宏伟,王秋良,等 (Xiao Liye, Gu Hongwei, Wang Qiuliang, et al.). YBCO 超导体的电学应用研究进展 (Research progress in electrical engineering applications of YBCO superconductors) [J]. 物理 (Physics), 2017, 46 (8): 536-548.
- [5] 李媛媛,陈伟,徐颖,等 (Li Yuanyuan, Chen Wei, Xu Ying, et al.). 超导电能存储技术及其发展前景 (Superconducting energy storage technology and its development prospects) [J]. 新材料产业 (Advanced Materials Industry), 2017, (7): 28-35.
- [6] Coombs T A. Superconducting flux pumps [J]. Journal of Applied Physics, 2019, 125 (23): 230902.
- [7] 王聪,崔春艳,胡新宁,等 (Wang Cong, Cui Chunyan, Hu Xinning, et al.). 超导磁约束系统中超导磁体涡流损耗的研究 (Study on eddy current loss of superconducting magnet in superconducting magnetic confinement system) [J]. 低温与超导 (Cryogenics & Super-



- conductivity), 2020, 48 (3): 1-5, 29.
- [ 8 ] 耿国丽, 方进, 杨艳芳, 等 (Geng Guoli, Fang Jin, Yang Yanfang, et al.). 高温超导储能磁体导冷片涡流损耗分析 (Analysis of eddy current loss of cold conductive fin of high temperature superconducting energy storage magnet) [J]. 低温与超导 (Cryogenics & Superconductivity), 2018, 46 (2): 34-38.
- [ 9 ] Zhai Y, Tan Z, Liu X, et al. Research progress of contactless magnetization technology: HTS flux pumps [J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2020, 30 (4): 1-5.
- [ 10 ] Lee S, Kim W S, Kim Y, et al. Persistent current mode operation of a 2G HTS coil with a flux pump [J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2016, 26 (4): 1-4.
- [ 11 ] Campbell A. A circuit analysis of a flux pump [J]. Superconductor Science & Technology, 2019, 32 (11): 115009.
- [ 12 ] 焦开洲, 戴银明, 王秋良, 等 (Jiao Kaizhou, Dai Yin-ming, Wang Qiuliang, et al.). 磁场感应式高温超导磁通泵分析 (Analysis of magnetic field induction high temperature superconducting flux pump) [J]. 低温与超导 (Cryogenics & Superconductivity), 2017, 45 (7): 43-47.
- [ 13 ] Badcock R A, Phang S, Pantoja A E, et al. Impact of magnet geometry on output of a dynamo-type HTS flux pump [J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2017, 27 (4): 5200905.
- [ 14 ] Niu C, Wang L, Wang Y, et al. Numerical analysis of eddy current induced by z-gradient coil in a superconducting MRI magnet [J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2020, 30 (4): 4400606.
- [ 15 ] Sung H J, Badcock R A, Go B S, et al. Design of a 12-MW HTS wind power generator including a flux pump exciter [J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2016, 26 (3): 1-5.
- [ 16 ] Sung H J, Go B S, Jiang Z, et al. Heat loss analysis-based design of a 12 MW wind power generator module having an HTS flux pump exciter [J]. Physica C: Superconductivity and its Applications, 2016, 530: 133-137.
- [ 17 ] Bumby C W, Jiang Z, Storey J G, et al. Anomalous open-circuit voltage from a high-T-c superconducting dynamo [J]. Applied Physics Letters, 2016, 108 (12): 122601.
- [ 18 ] Geng J, Shen B, Li C, et al. Voltage-ampere characteristics of YBCO coated conductor under inhomogeneous oscillating magnetic field [J]. Applied Physics Letters, 2016, 108 (26): 262601.
- [ 19 ] Geng J, Matsuda K, Fu L, et al. Origin of DC voltage in type II superconducting flux pumps: Field, field rate of change, and current density dependence of resistivity [J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2016, 49 (11): 11LT01.
- [ 20 ] Wei Wang, Tim Coombs. Macroscopic magnetic coupling effect: The physical origination of a high-temperature superconducting flux pump [J]. Physical Review Applied, 2018, 9 (4): 044022.
- [ 21 ] Geng J, Matsuda K, Fu L, et al. Operational research on a high-T-c rectifier-type superconducting flux pump [J]. Superconductor Science & Technology, 2016, 29 (3): 035015.
- [ 22 ] Ainslie M D, Bumby C W, Jiang Z, et al. Numerical modelling of dynamic resistance in high-temperature superconducting coated-conductor wires [J]. Superconductor Science & Technology, 2018, 31 (7): 074003.
- [ 23 ] Campbell A M. A finite element calculation of flux pumping [J]. Superconductor Science & Technology, 2017, 30 (12): 125015.
- [ 24 ] Mato T, Kurauchi T, Noguchi S. Effectiveness of filter inductor of rectifier transformer flux pump in energizing multi-stacked no-insulation REBCO pancake coils [J]. Journal of Physics: Conference Series, 2020, 1590 (1): 012047.
- [ 25 ] Geng J, Coombs T A. Modeling methodology for a HTS flux pump using a 2D H-formulation [J]. Superconductor Science & Technology, 2018, 31 (12): 125015.
- [ 26 ] Li C, Yang J, Shen B, et al. A HTS flux pump simulation methodology based on the electrical circuit [J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2020, 30 (4): 4702905.
- [ 27 ] Zhou P, Ma G, Deng Y, et al. A contactless self-regulating HTS flux pump [J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2020, 30 (4): 3603006.
- [ 28 ] Gawith J, Geng J, Ma J, et al. HTS transformer-rectifier flux pump optimization [J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2019, 29 (5): 5501605.
- [ 29 ] Li C, Geng J, Shen B, et al. Investigation on the transformer-rectifier flux pump for high field magnets [J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2019, 29 (5): 4301105.
- [ 30 ] Geng J, Matsuda K, Shen B, et al. HTS persistent current switch controlled by AC magnetic field [J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2016, 26 (3): 6603304.
- [ 31 ] Gawith J D D, Geng J, Li C, et al. A half-bridge HTS transformer-rectifier flux pump with two AC field-controlled switches [J]. Superconductor Science & Technolo-

- gy, 2018, 31 (8): 085002.
- [32] Geng J, Painter T, Long P, et al. A kilo-ampere level HTS flux pump [J]. *Superconductor Science & Technology*, 2019, 32 (7): 074004.
- [33] Geng J, Bumby C W, Badcock R A. Maximising the current output from a self-switching kA-class rectifier flux pump [J]. *Superconductor Science & Technology*, 2020, 33 (4): 045005.
- [34] Zhai Y, Matsuda K, Coombs T A. Modeling and simulation of thermomagnetic materials for thermally actuated magnetization flux pumping method [J]. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 2016, 26 (4): 0605505.
- [35] Ma J, Geng J, Gawith J, et al. Rotating permanent magnets based flux pump for HTS noinsulation coil [J]. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 2019, 29 (5): 1-6.
- [36] Pantoja A E, Storey J G, Badcock R A, et al. Output during continuous frequency ramping of a dynamo-type HTS flux pump [J]. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 2018, 28 (3): 5202205.
- [37] Jeon H, Lee J, Han S, et al. PID control of an electromagnet-based rotary HTS flux pump for maintaining constant field in HTS synchronous motors [J]. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 2018, 28 (4): 5207605.
- [38] Jeon H, Lee J, Han S, et al. Methods for increasing the saturation current and charging speed of a rotary HTS flux-pump to charge the field coil of a synchronous motor [J]. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 2018, 28 (3): 5202605.
- [39] Ghabeli A, Ainslie M, Pardo E, et al. Modeling the charging process of a coil by an HTS dynamo-type flux pump [J]. *Superconductor Science & Technology*, 2021, 34 (8): 084002.
- [40] Kulkarni R, Prasad K, Lie T T, et al. FEM and performance analysis of 10 kW HTS generator with flux pump excitation [A]. 2016 IEEE International Conference on Power System Technology (POWERCON) [C]. Wollongong, NSW, Australia, 2016. 1-6.
- [41] Bumby C W, Phang S, Pantoja A E, et al. Frequency dependent behavior of a dynamo-type HTS flux pump [J]. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 2017, 27 (4): 1-5.
- [42] Hamilton K, Pantoja A E, Storey J G, et al. Design and performance of a “squirrel-cage” dynamo-type HTS flux pump [J]. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 2018, 28 (4): 1-5.
- [43] Bumby C W, Badcock R A, Sung H J, et al. Development of a brushless HTS exciter for a 10 kW HTS synchronous generator [J]. *Superconductor Science & Technology*, 2016, 29 (2): 024008.
- [44] Jiang Z, Bumby C W, Badcock R A, et al. A novel rotating HTS flux pump incorporating a ferromagnetic circuit [J]. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 2016, 26 (2): 84-89.
- [45] Bumby C W, Pantoja A E, Sung H J, et al. Through-wall excitation of a magnet coil by an external-rotor HTS flux pump [J]. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 2016, 26 (4): 0500505.
- [46] Fu L, Matsuda K, Lecrevisse T, et al. A flux pumping method applied to the magnetization of YBCO superconducting coils: Frequency, amplitude and waveform characteristics [J]. *Superconductor Science & Technology*, 2016, 29 (4): 04LT01.
- [47] Zhang Y, Wang W, Ye H, et al. Compact linear-motor type flux pumps with different wavelengths for high-temperature superconducting magnets [J]. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 2020, 30 (4): 5000305.
- [48] Li H, Wang W, Gao Y, et al. Charging test of a YBCO racetrack coil for an synchronous motor with a linear-motor type flux pump [A]. 2020 IEEE International Conference on Applied Superconductivity and Electromagnetic Devices (ASEMD) [C]. Tianjin, China, 2020. 1-2.
- [49] Wei J, Wang W, Ye H, et al. Optimizing the charging parameters of linear motor flux pump with BP neural network and genetic algorithm [A]. 2020 IEEE International Conference on Applied Superconductivity and Electromagnetic Devices (ASEMD) [C]. Tianjin, China, 2020. 1-2.
- [50] Ye H, Wang W, Zhang Y, et al. Measuring the output voltage of a linear-motor type flux pump with an insulated HTS coil [J]. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 2020, 30 (4): 3800105.



## Research progress and development trend of high temperature superconducting flux pump technology

ZHAI Yu-jia<sup>1,2</sup>, LIU Xin-yi<sup>1</sup>, WANG Feng<sup>1</sup>, LIU Jian-hua<sup>2</sup>, WANG Qiu-liang<sup>2</sup>

(1. School of Electrical and Information Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China;

2. Institute of Electrical Engineering, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

**Abstract:** The high-temperature superconducting (HTS) flux pump is a contactless charging device for high-temperature superconducting magnets (HTSM) based on the law of electromagnetic induction. The magnetic flux can be pumped into the superconducting closed loop coil without any direct electrical or physical contact to achieve the purpose of compensating for the current attenuation of the HTSM system and ensuring the stability of the magnet's magnetic field. Thus, the HTSM can work in persistent current mode and provide technical support for the realization of steady state strong magnetic field. Superconducting flux pumps can replace expensive HTSM current leads in the future, effectively improving the energy efficiency and reliability of wireless power supply equipment under the premise of reducing size and weight, and reducing the use of 2G HTS tapes and the power of refrigerators. It will greatly promote the wide application of HTSM, and will contribute to technological innovation in aerospace, national defense and military, public transportation, biomedicine, high-energy physics and other engineering application. This paper summarizes the design schemes, technical characteristics and the latest research progress of different types of HTS flux pumps. The advantages and disadvantages of various types of superconducting flux pumps and their application prospects are compared and analyzed. The potential development trend of the magnetic flux pump in the application fields of superconducting magnets and superconducting motors is described, which provides theoretical support and technical prospects for wireless DC power technology of HTSM.

**Key words:** superconducting flux pump; high temperature superconducting magnet; contactless magnetization technology; wireless DC power supply; closed loop operation