

高温超导电力应用的低温冷却系统及制冷机

毕延芳^{*}, 洪辉, 信赢

中国科学院等离子体物理研究所, 合肥 230031;

北京云电英纳超导电缆有限公司, 北京 100176

* E-mail: yfbi@ipp.ac.cn

收稿日期: 2012-12-13; 接受日期: 2013-05-20

摘要 在过去的十多年中, 高温超导(HTS)在电力应用的诸多方面, 如电力传输电缆、故障限流器、变压器、船舶推进马达、发电机和电感储能, 取得了很大的进展. 低温冷却系统是超导电力设备的重要组成部分, 对 HTS 电力应用的成败及产业化发展起重大影响. 低温冷却系统的稳定性、成本很大程度上是由制冷机的性能、价格决定的. 介绍各种 HTS 电力应用低温冷却系统的热负荷水平、冷却方式、致冷介质. 从制冷量、维护周期、价格、可靠性方面选择了几种适用于 HTS 电力设备的商用制冷机产品, 介绍其工作原理、性能参数、适用场合. 未来 HTS 电力应用对制冷机的要求主要集中在可靠性、效率、价格 3 方面: 可靠性要提高到 99.8%, 制冷机相对卡诺效率提高 30% 以上, 制冷机在 80 K 温度下制冷成本降低到 25 美元/W 以下. 此外, 对恒温器、低温管道、流体循环泵也作了简要介绍.

关键词
低温系统
高温超导
超导电力技术
制冷机

1 引言

2011 年是超导现象发现 100 周年. 其中前 70 年是低温超导应用的发展时期, 后 30 年是高温超导应用的快速发展阶段. 自 20 世纪 60 年代美国建成超导氦泡室磁体以来, 低温超导磁体已广泛地应用于高能粒子加速器、核聚变实验装置、强磁场装置、核磁共振仪、医用磁共振成像仪、大功率微波发射、磁分离、大直径单晶生长炉、超导量子仪等. 虽然在电力应用方面曾尝试低温超导电缆、大功率马达、发电机和大容量电磁储能等, 但都未实现产业化. 其原因之一是致冷成本太高、可靠性太低.

20 世纪 80 年代高温超导(HTS)材料的发现使人们重新燃起超导电力应用的热情, 而且将 21 世纪电力工业的发展寄托在超导技术应用上. 近十几年来

HTS 电力电缆、变压器(尤其是用于电力机车)、故障限流器、大型舰船推进马达、大型发电机都取得了重大进展. 低温超导磁体的电流引线采用 HTS 后, 系统的致冷负荷大幅度降低. HTS 电流引线已进入实用化阶段. HTS 能够成功应用于电力设备必须满足的基本条件是: 或具备经济性优势, 或体积小、重量轻, 或技术先进、优于常规技术. HTS 电力应用的运行温度取决于应用场合及磁场大小, 通常在 20~77 K (即液氮至液氮温度). 这比低温超导的 4.2 K 液氮温度高得多, 其致冷费用也相应大幅度降低, 而且降低了技术难度. 只要 HTS 线材的成本降低到合理的水平, 它的电力应用前景是令人乐观和值得期待的.

目前, 可以应用于电力设备或具有应用潜力的 HTS 材料主要有 Bi-2223, YBCO 和 MgB₂ 带材或线材.

Bi-2223 和 YBCO 的临界温度都高于液氮温度 77 K, 可以在液氮温区使用. 目前 Bi-2223 价格比 YBCO 便宜, 同样尺寸规格带材的临界电流也高, 是使用最为广泛的 HTS. YBCO 带材的原材料成本比以银作为主要原材料的 Bi-2223 带材低很多, 具有降低成本的较大潜力. YBCO 在垂直场下的临界电流衰减小于 Bi-2223, 在较强磁场方面应用具有优势. 虽然 MgB_2 的超导临界转变温度(39 K)远低于液氮温度, 但其物理、化学性能更接近于合金材料, 相对容易加工, 价格也比较便宜, 所以得到了人们的广泛重视.

图 1 给出了各种 HTS 电力应用的运行温度和热负荷水平. HTS 电力应用的运行温度集中在 20 和 77 K 两个温区附近. 其中电缆、变压器和故障限流器都运行在液氮温区(65~77 K). 对于电缆和限流器(包括电阻型和饱和铁心型), 超导材料所处的磁场较低, 一般可以采用 Bi-2223 带材. 变压器绕组内磁场略高些, 早期采用 Bi-2223 带材的超导变压器运行温度在 30 K 左右. 由于 YBCO 在垂直场下临界电流衰减很小, 在过冷液氮温度(如~65 K)就可以承载较大电流. 因此, 目前超导变压器较多设计采用 YBCO 带材. 超导贮能、超导电机的磁场较高, 运行在液氢液氦温区附近(20~35 K). 大型马达、发电机绕组通常采用液氮冷却, 运行在 25~35 K 温区. 未来大型超导贮能线圈有可能采用廉价又便于做成圆线电缆的 MgB_2 导体, 可运行在液氦温度(20 K). 若设计小型高贮能密度的线圈, 宜采用 YBCO 或 Bi-2223, 其运行温度可以提高至 25~30 K 水平, 由小型制冷机致冷.

不同 HTS 电力应用的热负荷范围也是不同的. HTS 电缆的恒温器热负荷和交流损耗水平为 3~5 W/m^[1]. 对于长度大于 1 km 的传输电缆, 其热负荷可达数十千瓦. 相比之下, 变压器和限流器的热负荷要小 1~2 个数量级. 马达和发电机的热负荷在数百瓦水平^[2, 3]. 对于贮存能量在 50 MJ~1 GJ 量级 MgB_2 磁贮能线圈, 由于体积庞大, 热负荷可高达数百瓦至千瓦水平^[4];

表 1 可用于 HTS 电力应用的各种致冷介质的部分热力学数据

	He	H ₂	Ne	N ₂	O ₂
液化温度 (K)	4.22	20.27	27.09	77.36	90.18
三相点温度 (液-固转变温度) (K)	-	13.8	24.56	63.15	54.36
三相点压力 (kPa)	-	7.2	43.2	12.85	0.152
气化潜热 (kJ/kg)	20.9	443	85.9	199.3	212.9
常压下(1 bar)液态密度 (kg/m ³)	125	70	1206	807	1141
常压下(1 bar)液态比热 (kJ kg ⁻¹ K ⁻¹)	5.47(气 He@20 K)	9.48	1.94	2.04	1.7

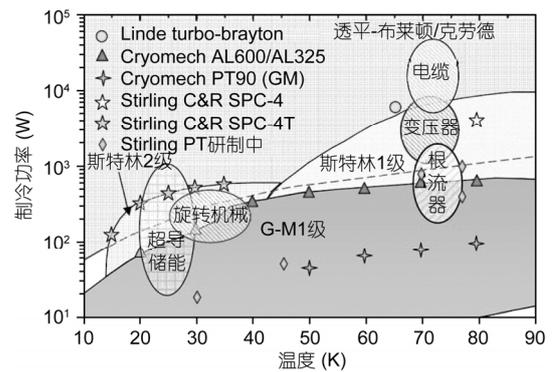


图 1 HTS 电力应用的运行温区、热负荷水平和各类现有制冷机的供冷温区及制冷量范围

比如最高磁场为 11 T 的 2.4 GJ YBCO 环形贮能线圈, 贮能密度高体积小, 设计制冷机配置为 4.8 kW@20 K +18 kW@77 K^[5].

2 低温致冷介质和冷却模式

除了固体传导冷却(仅适合于热负荷较小的场合), 大部分 HTS 电力应用要求低温致冷介质, 例如, 液氮、液氦、液氢或气氦, 直接接触传热并带走热量. 表 1 列出了与此相关的 5 种气体的液化温度(即大气压下沸点)、固化温度、气化潜热、液态密度和比热^[6].

氦的液化温度为 4.2 K, 大大低于 HTS 电力应用的运行温区(20~77 K), 但将超导材料温度降至并保持在液氮温度的成本太高, 致冷系统比较复杂, 可靠性较低, 在经济上不划算. 由于它的气相比热和液化温度低, 氦气成为大多数制冷机内部的工作气体.

氦气也可用于冷却 HTS 马达、发电机或贮能线圈, 只限于热负荷不大的部件. 因为它比液-固之间的传热系数小 1~2 个数量级(对于迫流氦气, 传热系数~300 W K⁻¹ m⁻²), 而且它又没有液体冷却时气化潜热可利用, 故远不如液体冷却下运行温度稳定.

液氢的液化温度为 20.3 K, 是超导贮能、超导体机较为理想的运行温度. 氢能是未来清洁能源之一, 也是重要的能源贮存和传输形式. 有人设想将液氢传输主干网与 MgB_2 超导电缆主干电网结合在一起, 构建未来能源传输主干网. MgB_2 贮能线圈也可利用液氢冷却^[4]. 使用液氢作为冷却介质应采取措施, 预防其爆炸的风险, 确保设备运行和人身安全.

液氦温度和液氢温度相差不多. 氦气是一种惰性气体, 其安全性比液氢高的多. 氦的单位体积气化潜热比液氮高 40 倍, 液氦冷却的 HTS 线圈运行温度十分稳定, 多数 HTS 马达和发电机的冷却采用液氦^[2,3]. 此外, 逆布莱顿(Inverse Brayton)循环制冷机若采用氦气作为工质, 则制冷效率会比氦气有所提高. 但氦气只能从空气中提取, 远远高于氮气的价格, 在 HTS 电力应用方面具有很大局限性.

液氮的液化温度是 77 K, 是最廉价的低温液体, 具有优良的电绝缘性能(与变压器油相差无几)和很高的气化潜热. 因此, HTS 电缆、变压器和故障限流器都选择其作为致冷介质. 通过减压降温, 可使液氮降温至 63.15 K. 由于目前 HTS 的价格很贵, 而降温能大大提高 HTS 的临界电流密度, 因此设计者都把运行温度降至尽可能低的水平, 变压器与限流器选择在 65~66 K, 电缆在 70 K.

液氮温度低于 63.15 K 时会变成固氮. 近年来还有人提出采用固氮冷却运行在 20~30 K 温区的 HTS 线圈. 利用在此温区固氮比热远远大于金属材料比热的特点, 固氮可成为大的热沉. 但是固氮的热导率较低, 使热沉难以如愿发挥作用.

氧的液化温度是 90 K, 稍高于液氮. 液氧也是一种来源广泛、价格低廉的低温液体. 由表 1 可见, 液氧的凝固温度比液氮大约低 9 K, 其压力也低得多. 然而液氧太活泼, 不宜直接采用. 它与液氮的混合物(氮组分 22%)可达到更低固化温度, 接近 50 K, 并且又不像纯液氧那么活泼, 有成为 HTS 电力应用冷却介质的可能性. 液氮含量与液相温区见图 2^[7].

HTS 电力设备的致冷模式可分为传导式和浸泡式两种. 传导式是用导热良好的铜将制冷机冷头与超导部件连接, 通过热传导吸收热量. 冷头和超导部件之间还需要用氮化铝来实现良好的导热和电绝缘. 传导式致冷模式不需要液体/气体致冷介质, 用制冷机就能实现致冷, 使用简单、方便. 但也存在降温速度慢, 温度均匀性差、抗热扰动能力低等缺点, 往往

应用于超导部件体积小、热负荷较低的情况, 如小型贮能线圈.

浸泡式致冷模式是用液体致冷介质浸泡超导部件, 利用致冷介质吸收、传递热量. 对于变压器、故障限流器, 制冷机冷头能直接安装在超导线圈杜瓦上, 通常采用过冷液氮浸泡冷却, 这是最简单而且有效的致冷模式. 电缆的长度比较长, 而制冷机只能布置在沿线的若干地点, 必须采用循环泵驱动液氮流动, 保证超导电缆温度的均匀性. 对于旋转电机和中等贮能线圈, 制冷机冷头不方便安装在超导线圈杜瓦上, 使用循环泵又会大大增加复杂性, 这时可采用热虹吸管辅助冷却. 其基本原理是: 来自再冷凝槽的低温液体借助于位差流向需冷却的 HTS 部件, 受热气化的冷蒸汽回流到制冷机冷头上的冷凝器被凝结液化. 热虹吸管方法能做到 HTS 部件与冷头之间的温差小于 1 K^[3]. 美国奥尔巴尼(Albany)电缆即采用热虹吸管将过冷槽液氮与斯特林(Stirling)制冷机耦合^[8]; 有人也将此法用于液氮冷却的 MgB_2 磁贮能线圈^[4].

HTS 电力设备的致冷系统可分成开式和闭式两类. 开式系统指的是将蒸发的氮气直接排放到大气中. 如液氮冷却的电缆、变压器和故障限流器, 若采用直接浸泡, 不安装制冷机, 气化的氮气自然或通过机械泵排放到大气中, 就可视为开式系统. 如果从工业界购买液氮方便, 价格又不高, 则开式系统是结构简单、投资少、可靠性高的选择. 尤其适用于实验室研究及中试阶段. 它也可作为闭式系统的制冷量备份或补充^[8]. 其缺点是冷蒸气至室温的显热被白白浪费, 且有定期运输和补充液氮的麻烦.

如果来自 HTS 部件的冷蒸气返回到冷箱, 并被制冷机重新液化后继续参与冷却循环, 则称为闭式系统. 其优点是系统运行易实现自动化. HTS 电力设

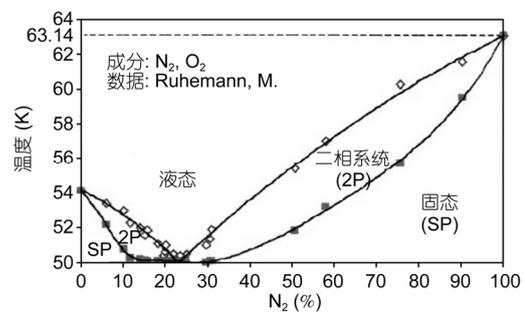


图 2 氧-氮混合液体的全液、液-固共存和全固相的温区^[7]

备产品都应该尽量采用闭式冷却系统, 尤其是采用氦、氖等昂贵介质的设备. 表 2 收集了近年来 HTS 电缆、变压器、故障限流器、旋转电机和贮能线圈冷却系统的冷却模式、运行温度、制冷量、制冷机等信息.

致冷系统通常由装有超导部件的恒温器、装有控制阀和液氮循环泵的杜瓦、低温管道、制冷机、控制系统和备用设备等组成. 图 3(a)是用于超导电缆实验研究的致冷系统主体部分: 一台斯特林制冷机与杜瓦相连, 接收蒸发的冷氮气, 并将再冷凝的液氮输回杜瓦内的液氮过冷槽, 杜瓦内的液氮循环泵把压力高于大气压(3~6 bar)的液氮通过低温管道与试验的电缆终端连接. 但另一些 HTS 电力应用, 如限流器、变压器、贮能线圈和旋转电机等, 不需要液氮循环泵, 可省去装液氮循环泵的杜瓦. 电阻型限流器属于此类型(见图 3(b)).

制冷机是 HTS 电力应用制冷系统中至关重要的部分. 其性能和超导电力设备的效率、成本、可靠性

有很大关系. 下面将介绍应用于超导电力设备的低温制冷机.

3 制冷机分类和制冷效率

制冷机的原理是利用电能、机械能做功, 从低温物体吸收热量, 并释放到高温物体. 制冷机是依靠制冷工质经历不同的循环来实现制冷功能的. 工质从室温变化到低温, 会放出热量; 从低温变化到室温, 会吸收热量. 高效率的制冷机通常具有换热器, 使得工质在室温和低温之间变化时放出的热量与吸收的热量产生传递. 根据工质内部热量传递方式的不同可分为间壁换热型(Recuperative)和回热型(Regenerative)两种类型^[11]. 图 4 为 5 种典型的制冷循环.

1) 间壁换热型制冷机: 主要有 J-T (Joule-Thomson)节流制冷机和逆布莱顿(Inverse Brayton)制冷机, 克劳德(Claude)制冷机是前两种的组合. 对流换热型制冷机的热工质流体和冷工质流体由固体壁面隔开,

表 2 典型 HTS 电力应用的低温系统重要特征和参数

应用项目	特征参数	运行温度	制冷量	冷却模式	制冷机
美国长岛电缆	138 kV/2.4 kA, 3×600 m, YBCO	70~72 K	12 kW@65 K	液氮迫流循环	逆布莱顿+液氮
美国 Albany 电缆, 三合一	34.5 kV/0.8 kA, 360 m, Bi-2223	70~72 K	8 kW@80 K	LN ₂ , 350 g/s @5 bar	2×斯特林, LPC-4
韩国电力公司电缆	22.9 kV/1.25 kA, 500 m, YBCO	< 73 K	10 kW@73 K	LN ₂ , 400~600 g/s	开式
日本九州大学变压器	4 MVA, 机车用, Bi-2223	66 K	7 kW@66 K	过冷液氮浸泡	-
美国 ORNL 变压器	18 MVA, YBCO	70 K	1.53 kW@70 K	过冷液氮循环	3×Cryomech AL600
北京云电英纳公司限流器	35 kV/1.5 kA, Bi-2223	77 K	-	液氮浸泡	开式
Siemens/Nexans 限流器	66 kV/0.9 kA, Bi-2223	72~74 K	-	过冷液氮浸泡 5 bar	与长岛电缆共用冷源
德国 KIT 限流器	24 kV/1.05 kA, 3 相, YBCO	77 K	600 W@77 K	液氮浸泡	Cryomech AL600
美国超导公司马达	36.5 MW, Bi-2223	27~30 K	376 W @30 K	热虹吸液氮	4×Cryomech AL330
美国 GE 公司发电机	100 MW, Bi2223	27.5 K	>60 W@27 K	热虹吸液氮	4×SHI G-M SRDK-400B
日本 ASPCS 超导磁储能	2 GJ, 540 A, 11 T, YBCO	20 K	~100 W	传导	G-M
日本 ASPCS 超导磁储能	50 MJ, 1 MW, 4 kA, MgB ₂	20 K	230 W 0.53 g/s	热虹吸液氮	开式

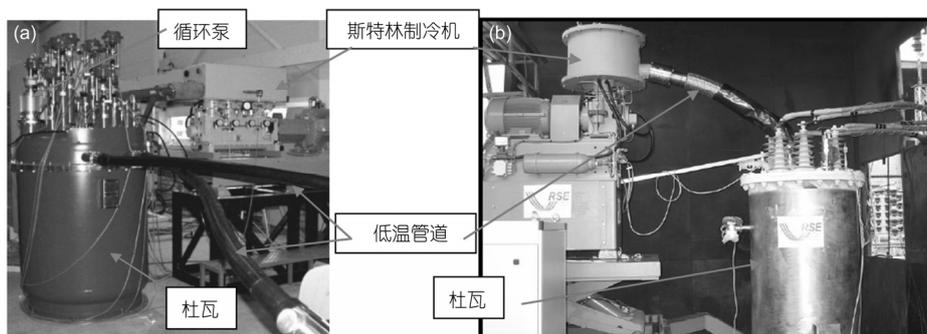


图 3 电缆和限流器试验的冷却系统

(a) 采用过冷 LN₂ 迫流冷却的 HTS 电缆^[9]; (b) 在 San Dionigi 电站的 Bi-2223 限流器^[10]

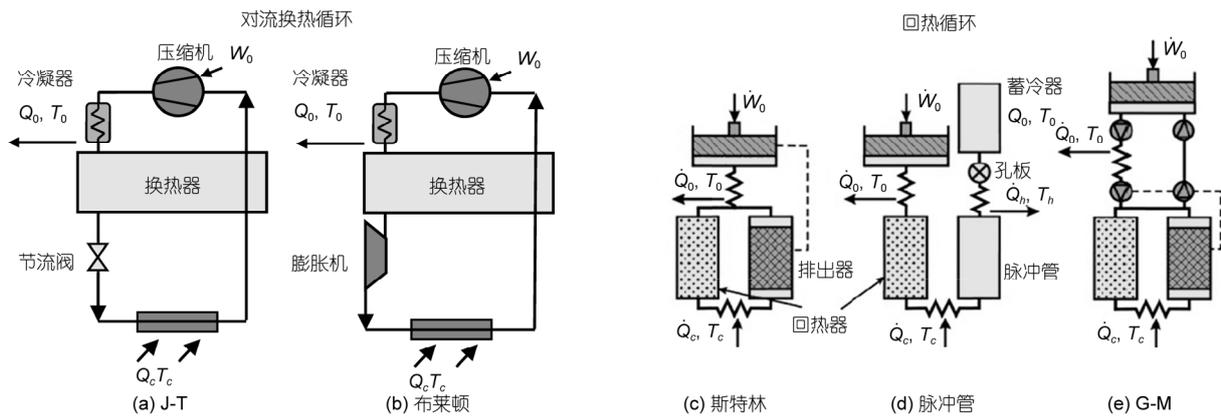


图4 对流换热和回热型制冷机的循环简图^[9]

分别在不同的流道中流动, 通过工质与流道壁面之间的对流换热进行热量交换. 间壁换热器内热流工质和冷流工质其压力与流量大致稳定, 流量、压力和热流-换热器-冷流三者之间热量传递等参数类似于直流电路的电流和电压. 间壁换热型制冷机工作过程是工质气体被压缩机压缩后变成高温高压工质, 进入冷凝器将热量散失至冷却水或空气中, 流经主换热器预冷后经节流阀(J-T)或膨胀机做工(逆布莱顿)获得制冷量.

制冷机的效率和制冷循环不可逆程度有关. 不可逆损失大, 制冷效率就越低. J-T节流制冷机的J-T节流是不可逆膨胀, 不可逆损失大, 故效率较低. 如果要达到低的温度, 其换热器效率必须足够高. 它的最大的优点是简单、可靠性高, 适合于小型制冷机. 逆布莱顿制冷机采用透平膨胀机代替J-T节流制冷机的节流阀, 将制冷工质的内能转化为有效功取出, 不可逆损失较小, 可达到高效率. 如果进一步采用磁轴承的无油透平压缩机, 则可靠性和维护周期都将大大提高. 逆布莱顿制冷机可提供最宽温区(4 K至>77 K)和最大制冷量(MW 水平). 在液氮温区和大制冷功率条件下, 逆布莱顿循环制冷机是各种制冷机中效率最高的. 对于大热负荷的 HTS 电力应用宜选择逆布莱顿制冷机, 尽管其价格比斯特林制冷机高得多. 美国长岛超导电缆项目长度较长, 电压等级较高, 所需制冷量也大, 低温系统采用了法液空公司生产的逆布莱顿循环制冷机.

2) 回热型制冷机包括 G-M(Gifford-McMahon)制冷机、斯特林制冷机、脉冲管(Pulse Tube)制冷机, 其特点是冷工质流体和热工质流体共用一个流道. 工

质周期性通过回热器, 并与回热器内的蓄热材料交换热量. 冷头内流体的压力、流量以及与回热器热量传递都以脉动和交变形式进行, 类似于交流电路. G-M 制冷机和 G-M 型脉冲管制冷机的震荡频率约为 1 Hz; 斯特林制冷机和斯特林型脉冲管制冷机震荡频率可高达 60 Hz. 除了回热器外, 斯特林和 G-M 制冷机还有类似于活塞的排出器. 在压缩机向冷头供气的前半周期, 回热器内气体被预冷和压缩, 排出器向冷头移动. 后半周期当进气回路关闭, 回气路开通后, 冷头内的气体膨胀、产生制冷量并返回压缩机低压侧, 气体冷却回热器. 由于回热器只需一个流体通道, 采用多孔网板及磁性蓄冷材料颗粒制成的回热器效率高达 95% 以上, 所以回热型制冷机易做到高效、结构紧凑, 制造简单和成本低. 斯特林制冷机的压力震荡由压缩机直接产生, 而 G-M 制冷机则依靠旋转阀门控制气流流向冷头或返回压缩机的低压侧. 气流经过阀会产生压头损失, 因此 G-M 制冷机的效率比斯特林制冷机低得多. 但 G-M 制冷机的压缩机高压相对稳定, 可利用活性炭吸附器除油, 从而可选用空调器大量使用的油润滑商用压缩机, 可靠性大大提高, 也降低了成本. 油吸附器的更换周期为 1~2 年, 压缩机与冷头由软管连接, 压缩机可远离冷头. 冷头运行的噪音小. 所以, G-M 制冷机在中、低制冷量要求场合比较受欢迎. 脉冲管制冷机的最主要特征是采用“脉冲管-孔板-贮气罐”组合取代排出器, 这样既降低了振动和制造成本, 又消除了运动件导致的磨损和不可靠性, 故属本征高可靠性机型. 脉冲管制冷机也分为斯特林型(无阀)和 G-M 型(有旋转阀), 但它们在大制冷量情况下实际效率都比有排出器的

制冷机低(见表 3), 尤其大制冷量(如 1 kW@77 K 或 400 W@30 K)的脉冲管制冷机都遇到了气流角分布不均匀和换热器内部流动不稳定的难题, 导致效率降低^[9, 12]. 脉冲管制冷机除了用普通的压缩机外, 还有利用热声发动机代替普通压缩机的热声型脉冲管制冷机. 热声发动机是利用热声转化效应将热能转化为声能, 没有运动部件. 热声型脉冲管制冷机的优点是完全没有运动部件, 理论上没有维护周期, 从长远看具有一定的应用前景. 目前热声型脉冲管制冷机产品在液氮温区为数十瓦量级, 百瓦级制冷机正在研制中. 热声制冷机的单台制冷量较低, 效率约为卡诺效率的 15%左右, 尚未应用在超导电力方面^[13]. 所以, 目前这 3 种回热型制冷机各有优缺点, HTS 电力应用可根据具体的使用要求和经费实力来选择合适的制冷机.

减少损耗是人们从事超导电力应用的重要目的之一. 超导材料能减少电能传输损耗, 但维持超导材料低温环境需要依靠制冷机来吸收超导电力设备的热负荷(包括环境漏热及焦耳热). 制冷机是以消耗电能为代价产生制冷量的. 计算超导电力设备的损耗时, 必须把制冷机的耗电考虑进去. 制冷机的耗电占超导电力设备损耗的绝大部分(80%以上). 提高制冷机效率将大大减低超导电力设备的运行成本及增强竞争力.

根据热力学第二定律, 在热源、冷源温度确定的情况下, 理想逆卡诺循环的制冷效率是所有制冷循环所能达到的理论最高效率. 实际制冷机的制冷效率只能低于逆卡诺循环效率. 逆卡诺循环制冷效率 COP 为

$$COP = \frac{T_c}{T_h - T_c}, \quad (1)$$

其中 T_h 和 T_c 分别是制冷循环的热源和冷源温度. 制冷量除以 COP, 即等于制冷机的耗电. 由(1)式可知, COP_{卡诺}的大小与热端、冷端温度有关. 表 4 为热端温度为 303 K, 不同制冷温度(20~77 K)下的逆卡诺循环及实际制冷机的 COP 值. 从表 4 看出, 随着制冷温度的降低, 理想 COP_{卡诺}大大减小. 在热负荷不变的情况下, 如果能把运行温度从 20 K 提高至 77 K, 理想情况下制冷机的耗电将减少 80%.

实际制冷机的 COP 也随着温度的减低而减少, 且减少幅度远大于 COP_{卡诺}. 这说明运行温度越低, 实际制冷机的不可逆损失增多, 耗电急剧增加.

实际中, 人们将制冷机的制冷效率与逆卡诺循环的理想制冷效率的比值(百分比)称为制冷机的相对卡诺效率. 相对卡诺效率表示的是实际制冷机与理想制冷循环的相差程度. 由于压缩机效率、回热器/换热器效率、气流的压头损失、环境对制冷机的漏热和各种不可逆过程因素影响, 使得相对卡诺效率只能小于 1. 图 5 和 6 给出了相对卡诺效率与制冷量和制冷温度的相关性. 对于制冷温度~80 K 大型制冷机(>几千瓦), 相对卡诺效率可望达到卡诺效率的 25%~30%. 比如 Stirling C&R 公司的 SPC 和 LPC 系列产品在 80 K 制冷温度下已达到卡诺效率的 28%, 相当接近目标值(≥30%@80 K), 其压缩机的驱动功率超过 10 kW. 但是在 20 K, 斯特林制冷机的效率还难以达到卡诺效率的 10%(图 6).

4 当前相关制冷机产品及主要参数

目前商业低温制冷机发展已经较为成熟, 各种类型制冷机在市场上均有现成产品, 制冷量从 10 mW

表 3 可用于 HTS 电力应用的商用制冷机产品参数

生产商和型号	机型	MTBM (h)	耗电功率 (kW)	制冷量及温度 (W)	COP	相对卡诺效率 (%)
Stirling C&R SPC-4	斯特林	6000	40	4000 W@80 K	0.100	28
Stirling C&R LPC-4	斯特林	6000	60	2800 W@65 K	0.047	17.1
Stirling C&R SPC-4T	斯特林	6000	40	320 W@20 K	0.008	11.3
AISIN SEIKI SC1501	线性斯特林	7500	14	1000 W@77 K	0.071	20
Qdrive 2S362	斯特林型脉冲管	无维护	22	1000 W@77 K	0.045	13.3
CRYOMECH AL600	G-M	10000	13	600 W@80 K	0.046	12.9
CRYOMECH AL325	G-M	10000	11.2	230 W@50 K 100 W@25 K	0.021 0.018	10.4 9.9
CRYOMECH AL330	G-M	10000	8.0	40 W@20 K	0.005	7.1
CRYOMECH PT90	脉冲管	~20000	5.5	48 W@50 K	0.009	4.4

表 4 运行温度 20~77 K 的理想 COP_{卡诺}和实际 COP_{实际}

运行温度 (K) (假设 $T_h=303\text{ K}$)	COP _{卡诺}	COP _{实际} (设热负荷 >100 W)
77	0.34	0.05~0.08
50	0.22	0.03~0.04
40	0.18	0.02~0.03
30	0.13	0.01~0.02
20	0.09	0.005~0.01

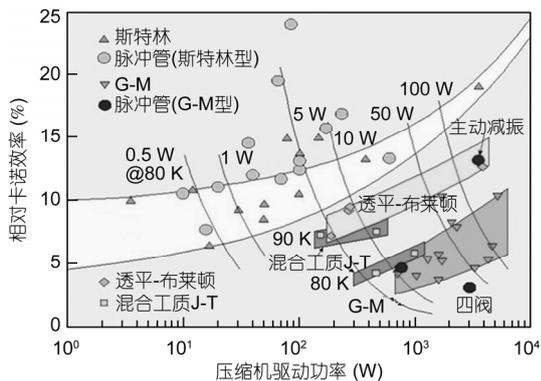


图 5 制冷机效率与制冷量的相关性^[14]

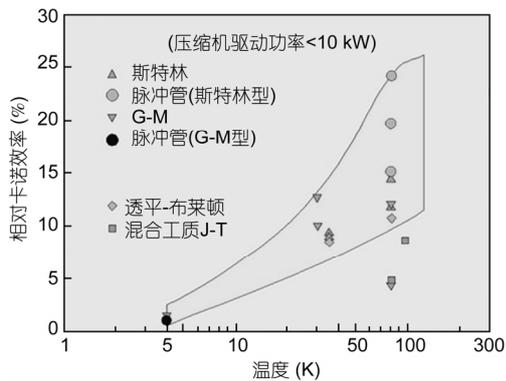


图 6 制冷机效率与温度的相关性^[14]

至 10 kW, 运行条件、使用寿命、维护周期也不尽相同. 适用于超导电力应用的制冷机应满足以下要求. 首先, 制冷量足够大. 超导电力设备的体积大, 传输电流大, 热负荷也比较大, 一般为 10^2 W (20 K) 或 10^3 W (77 K) 量级. 如果单台制冷机制冷量太小, 需要多台制冷机同时工作, 会占用太多空间, 增加系统复杂性, 减低可靠性. 从目前项目经验来看, 单台制冷机制冷量应大于 $30\text{ W}@20\text{ K}$ 或 $100\text{ W}@77\text{ K}$. 其次, 制冷机的制冷效率要高. 采用高效率的制冷机, 对超导电力

设备的经济性能是非常重要的. 最后, 需要制冷机维护周期及使用寿命长, 维护简便. 制冷机是超导电力设备的重要部件. 一旦制冷机发生故障或检修, 会对超导电力设备正常运行造成影响, 甚至导致设备停运. 制冷机维护时如果要拆卸冷头, 会影响超导电力设备的正常运行. 应选择冷头无需维护或少维护的制冷机. 表 3 收集了可提供 20~80 K 低温、制冷量较大的商用制冷机产品及其主要参数. 下面对其性能、厂家进行介绍.

荷兰 Stirling C&R 公司生产的斯特林制冷机制冷量大于其他厂家的产品^[15]. 制冷量最高的 SPC-4 型制冷机制冷量达 $4000\text{ W}@80\text{ K}$, 相对制冷效率高达 28%, 但不足之处是维护周期较短, 只有 6000 h. 图 7 为该型号制冷机的照片. 该制冷机冷头与压缩机是一体的, 使用时需要使用管道将冷头与冷箱进行连接.

日本 AISIN SEIKI 公司的线性马达驱动的斯特林制冷机(图 8)虽然维护周期增加至 7500 h, 但效率



图 7 Stirling C&R 公司的 SPC-4 制冷机



图 8 AISIN SEIKI 公司的 SC1501 型斯特林制冷机

降低很多^[16]。冷头与压缩机是不可分离的。如果采用 Stirling C&R 和 AISIN SEIKI 公司的制冷机, 需要对制冷机维护问题有一个较好的应对方案。

美国 Cryomech 公司生产的 G-M 制冷机(图 9)在 0~40 K 温区效率与 Stirling C&R 公司的斯特林制冷机相近, 其维护周期 1~2 年, 远远大于斯特林制冷机, 而且冷头与压缩机可拉开较大距离^[17], 冷头可直接安装在杜瓦上, 比较适合用于电缆、电机和贮能线圈。

美国 Qdrive 公司的 2S241 型(图 10)脉冲管制冷机, 制冷量只有 220 W@77 K, 其效率比 Stirling C&R 公司斯特林制冷机低, 只比 Cryomech 公司的 G-M 制冷机略高一些, 其原因之一是大制冷量脉冲管内气流沿角向分布不均匀, 使效率远远低于一般斯特林制冷机。2S241 型制冷机最大的优势是无需维护^[18]。

美国 Praxair 公司、美国国家标准技术研究所(NIST)与 Qdrive 公司合作研发 1 kW@77 K 和 500 W@30 K 的斯特林型脉冲管制冷机。利用 Qdrive 公司的 2s362K 型压缩机, 已经完成两台 1 kW@77 K 样机(图 11)的研制, 并应用于美国哥伦布超导电缆示范项目。该制冷机同样无需维护。500 W@30 K 制冷机尚在研究当中, 未投放市场。

图 12 是法液空为美国长岛 138 kV/2.4 kA 电缆 II 期设计的集成式 22 kW@71 K 逆布莱顿制冷机, 不仅

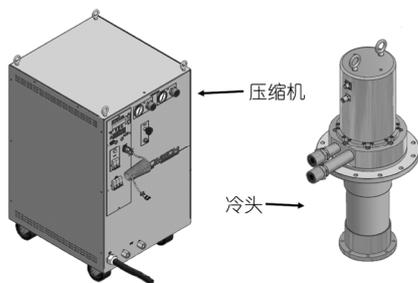


图 9 Cryomech 公司的 G-M 制冷机



图 10 Qdrive 公司的 2S362 型脉冲管制冷机

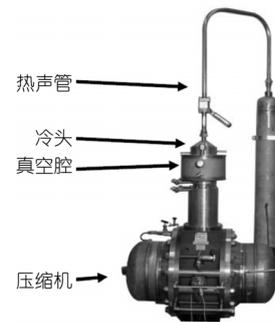


图 11 普莱克斯公司斯特林型脉冲管制冷机

制冷量大幅度增加、效率提高、可免维护, 而且非常紧凑, 只占一个 40 ft 集装箱体积。该制冷机应用了磁浮轴承、高速马达、透平压缩机和透平膨胀机能量回收等技术, 价格较昂贵。

日本 SHI 公司是世界著名的低温制冷机制造公司, 其 G-M 型制冷机销量排名世界第一。CH110 型制冷机(图 13)是该公司在 77 K 下制冷量最大的制冷机, 冷头维护周期约为 13000 h, 压缩机维护周期约为 20000 h。

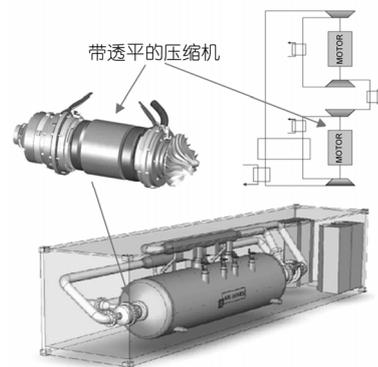


图 12 法液空公司逆布莱顿制冷机



图 13 SHI 公司的 CH110 型 G-M 制冷机

5 对未来制冷机的基本要求及其发展趋势

1997 和 1998 年, 美国能源部组织部分国家实验室、大学、设备制造企业和电力部门的相关专家召开了两次研讨会, 认为当时制冷机的技术水平和超导电力应用的要求存在较大差距; 并提出未来十几年内, 超导电力应用对制冷机的要求主要有 3 点.

1) 可靠性提高到 99.8%. 电力工业可靠性要求高达 99.8%~99.9%, 因此超导电力设备的可靠性应大于 99.9%, 其中也包括低温系统. 按此可靠性要求, 每年容许的制冷机停机维护的时间只有 8 h. 决定制冷机长久运行可靠性的重要因素是平均维护周期 (MTBM). 制冷机的平均维护周期越长, 则其长久运行的可靠性越好.

低温系统维护的主要任务是清洁和更换磨损的零部件, 这是增加可靠性、减小故障的必要手段. 增加可靠性的另一个方法是设置冗余机或贮液氮备份, 如果单个制冷机的可使用率为 90%, 则理论上增加一台冗余制冷机可将可使用率提高到 99%. 当然, 如此将导致投资大幅度增加. 对于开式液氮冷却系统可采用较大的贮罐的方法来提高冗余度.

提高可靠性的最佳途径是尽可能去除运动部件和有摩擦的零件^[19]. 脉冲管制冷机的冷头无运动部件, 从而可避免移动活塞产生的振动和磨损. 如果再配用声驱动压缩机, 则可以做到无需维护. 所以它是未来制冷机的发展方向. 美国 Praxair 公司与 Qdrive 公司合作研发的斯特林型脉冲管制冷机能做到无需维护. 对于逆布莱顿制冷机, 如果高速透平压缩机采用气体轴承或磁轴承(图 14), 且与透平膨胀机同轴相连, 则可提高效率, 并实现维护周期大于 3 年^[21, 22].

2) 制冷机的相对卡诺效率提高到 30%. 提高制



图 14 采用气体轴承或磁轴承的制冷机^[20]

冷效率的关键在于提高压缩机的效率, 减少不可逆损失. 研制大功率制冷机也是提高制冷效率的方法之一, 单台大功率制冷机的制冷效率优于多台总制冷量相同的制冷机效率.

3) 80 K 制冷机的成本降低到 25 美元/W 以下. 目前制冷机还相当昂贵, 这制约了 HTS 电力应用和推广. 表 5 给出了 2004 年的典型制冷机的单位制冷量的价格水平. 从表 5 数据可见, AL330 是性价比较高的 25 K 制冷机, 而 LPC 斯特林制冷机的性价比和效率皆优. 近年 HTS 线材价格仍然相当高, 其大规模应用于电力系统的条件并未成熟. 所以, 为此服务的制冷机市场还不大, 生产制冷机主要依靠小企业, 价格较高, 目前的价格与 2004 年差异甚小. 降低制冷机成本的主要手段之一是提高制冷机的市场需求. 据估计, 一旦制冷机规格形成系列化和标准化零部件, 其产量达到每年 10 万台以上时, 则价格可望下降 5~10 倍^[1].

目前, 制冷机的耗电占超导电力设备耗电的绝大部分, 而且制冷机的成本较高. 因此, 制冷机直接影响超导电力设备的初投资及运行成本, 从而影响超导电力设备的经济性. 在上述 3 点要求中, 可靠性不直接影响超导电力设备的经济性, 但对用户的说

表 5 部分商用制冷机单位制冷量的价格和效率(2004 年数据)^[3]

制造商	型号	机型	制冷量 (W)	耗电量 (kW)	比价格: 美元 (W) _{制冷量}	@25 或 77 K	COP
25 K							
Stirling C&R	SPC-1T	双级斯特林	50	11	1600		0.0045
Stirling C&R	SPC-4T	双级斯特林	200	44	800		0.0045
Leybold	120T	单级 G-M	25	6.3	720		0.0040
Cryomech	AL 330	单级 G-M	50	7	1000		0.0071
77 K							
Cryomech	AL 300	G-M	340	7	83		0.0486
Stirling C&R	LPC-1	单级斯特林	1000	11	77		0.0909
Cryomech	PT-60	G-M 型脉冲管	60	3	285		0.0200

服力、应用前景起着非常重要的作用。效率及价格对不同的超导电力设备经济性影响是不同的。超导电缆、超导变压器主要与常规电缆、变压器竞争, 节能是竞争优势之一。制冷机的效率及价格严重影响设备的经济性, 尤其对于制冷量需求大、制冷机成本占总成本比重较大的超导电缆来说。超导限流器没有常规的竞争设备, 尤其在高电压等级。电网用户为了解决日益严重的短路问题, 能够接受较高的价格。而且超导限流器所需制冷量不大, 制冷机成本占总成本比重较低。制冷机的效率及价格对超导限流器的经济性影响很小。短时间内制冷机的性能很难有非常大的提高, 从这一点考虑, 超导限流器的市场前景更为光明。

6 恒温器、低温管道与液氮循环泵

除了制冷机, 恒温器、低温管道和循环泵也是超导电力设备冷却系统的主要部件。恒温器和低温管道的漏热是超导电力设备热负荷的主要组成部分, 其绝热性能对降低致冷系统的设备投资和运行制冷能耗十分重要。对于超导电缆, 因为其长度很大, 所以电缆本体恒温管的单位长度静态热负荷应尽可能小。高真空多层绝热方式是在恒温器的内外夹层之间抽真空并安装多层绝热材料, 能够隔绝传导漏热及对流漏热, 并最大可能减少辐射漏热, 是效果最好的绝热形式。目前, 用于超导电力应用的恒温器和低温管道均采用这种绝热形式。其中大部分恒温器表面有效热导率为 $10^{-5} \text{ W K}^{-1} \text{ m}^{-1}$ 。低温管道(包括电缆的本体恒温器)由于在内外管之间采用支撑管增加了漏热, 加上距离较长, 抽真空阻力大, 表面有效热导率高于恒温器, 达到 $10^{-4} \text{ W K}^{-1} \text{ m}^{-1}$ 量级。大多数的恒温器和低温管道一般用不锈钢来制作。但对于变压器, 若其产生的交变磁场穿过金属恒温器, 会产生涡流损耗。因此, 变压器用一般用非金属恒温器。图 15(a)是德国西门子公司研发的机车变压器; (b)是新西兰工业研究公司(IRL)设计的 1 MVA 试验变压器。从恒温器内部结构可以看到, 超导线圈浸泡在环氧树脂制成的环状液氮容器中, 外真空容器也采用玻璃纤维加强的环氧树脂。

液氮循环泵对于冷却 HTS 电缆是不可或缺的。相对制冷机的压缩机来说, 液氮循环泵的转速很高, 轴承更容易磨损, 维护周期更短。在超导电缆冷却系

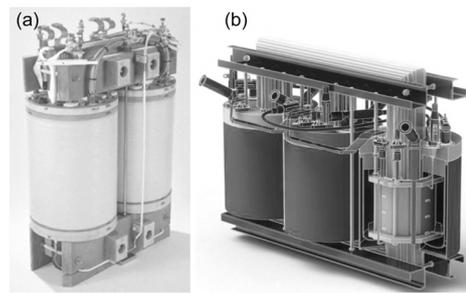


图 15 变压器所用的非金属恒温器
(a) 西门子变压器; (b) IRL 1MVA 变压器^[23]

统设计时, 要充分考虑液氮循环泵的这一特点。

常用的离心式液氮泵分为两种: 长轴型和短轴型。长轴型液氮泵的室温电机和低温叶轮通过薄壁长轴连接在一起, 轴的材料为高强度、低热导率的不锈钢, 具有漏热小的特点。由于轴比较长, 在叶轮附近安装有低温轴承。如果低温轴承采用自润滑滚珠轴承(图 16), 其寿命只有半年。为避免更换轴承影响电缆的冷却和运行, 可采用多台泵, 增加冗余。另外, 研发液氮动压轴承也许可实现免维修。

短轴型液氮泵的轴比较短, 主要通过叶轮和电机之间的防辐射屏来减少辐射漏热和对流漏热。有的短轴型液氮泵采用复合材料来制作转动轴, 利用复合材料的低热导率来减少传导漏热。轴及叶轮外安装有真空夹套, 减少环境对低温液体的传热。由于轴较短, 短轴型液氮泵不需要安装低温轴承, 转速比长轴型更高, 连续运行时间更长。短轴型液氮泵维护时可以把电机及叶轮从真空夹套取出, 不影响液氮的循环, 维护更加方便。

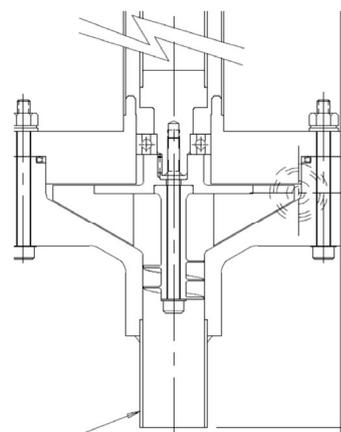


图 16 采用滚珠轴承的液氮泵

7 结论

超导电力技术的应用必将促进 21 世纪电力工业产生革命性的发展, 而 20~77 K 低温系统是这一发展不可或缺的条件。由于近几十年来在医用磁共振仪、航天探测、天然气液化等需求的促进下, 各种微型和小型制冷机得到了商业化应用。这些制冷机也被用于目前各种 HTS 电力应用(如电缆、变压器、故障电流限制器、电机和电感储能等)的研发或示范项目, 但它们的可靠性、制冷效率和价格等仍与 HTS 电力技术的大规模应用的要求有较大差距。

冷却系统的长期可靠运行及其设备投资成本的大幅下降是实现大规模商业化 HTS 电力应用的前提条件。要做到冷却系统长期可靠运行首先设法通过技术进步延长制冷机、液氮泵等设备的维护周期, 然后通过增加冗余度和优化设计来提高系统的可使用率。降低设备成本方面一是靠技术进步降低单台设备的制造成本, 二是靠增加市场的销售量来降低单台设备的非制造成本。

相信随着应用规模的扩大, 超导电力设备的冷却系统的成本会大幅度下降, 运行可靠性也会显著提高。

参考文献

- Gouge M J, Demko J A, McConnell B W, et al. Cryogenics Assessment Report. Final version. ORNL and University of Wisconsin, 2002
- Felder B, Miki M, Tsuzuki K, et al. A 100-W grade closed-cycle thermosiphon cooling system used in HTS rotating machines. AIP Conf Proc, 2012, 1434: 417-424
- Gromoll B. Technical and economical demands on 25 K-7 K refrigerators for future HTS-series products in power engineering. AIP Conf Proc, 2004, 710: 1797-1804
- Shintomi T, Makida Y, Hamajima T, et al. Design study of SMES system cooled by thermo-siphon with liquid hydrogen for effective use of renewable energy. IEEE Trans Appl Supercon, 2012, 22: 5701604
- Shikimachi K, Hirano N, Nagaya S, et al. System coordination of 2 GJ Class YBCO SMES for power system control. IEEE Trans Appl Supercon, 2009, 19: 2012-2018
- Weisend II J G. Handbook of Cryogenic Engineering. London: Taylor & Francis, 1999
- Fleck U. Cooling of HTS applications in the temperature range of 66 K to 80 K. AIP Conf Proc, 2002, 613: 188-198
- Lee R C, Dada A, Ringo S M. Cryogenic refrigeration system for HTS cables. IEEE Trans Appl Supercon, 2005, 15: 1798-1801
- Karlsruhe institute of technology. World's Longest Superconductor Cable. <http://www.kit.edu>
- Radebaugh R. Cryocoolers: The state of the art and recent developments. J Phys-Condens Mat, 2009, 21: 164219
- Hill K N. Cryogenic Refrigeration Costs and Prospects. www2.mmae.ucf.edu, 2003
- Lee R C, Dada A, Garacia E L, et al. Performance testing of a cryogenic refrigeration system for HTS cables. In: Proceedings for 2005 Cryogenic Engineering Conference. Keystone, 2005
- 周远, 罗二仓. 热声热机技术的研究进展. 机械工程学报, 2009, 45: 14-26
- Radebaugh R. Refrigeration for superconductors. Proc IEEE, 2004, 92: 1719-1734
- Stirling Cryogenics BV. Product list. <http://www.stirlingcryogenics.com/products>
- 爱信精机株式会社. 斯特林型脉管制冷机. <http://www.aisin.co.jp>
- Cryomech Inc.. Product list. <http://www.cryomech.com/gmcryorefrigerators.php>
- Qdrive Inc.. Cryocoolers-2S362. <http://www.qdrive.com>
- Willems D W J. High-Power Cryocooling. Eindhoven: Technische Universiteit Eindhoven, 2007
- Yoshida S. New design of neon refrigerator for HTS power machines. AIP Conf Proc, 2010, 1218: 1131-1138
- Schmidt F, Maguire J, Welsh T, et al. Operation experience and further development of a high-temperature superconducting power cable in the long island power authority grid. Physics Procedia, 2012, 36: 1137-1144
- Potratz S A, Abbott T D, Jonson M C, et al. Stirling-type pulse tube cryocooler with 1kW of refrigeration at 77 K. AIP Conf Proc, 2008, 985: 42-48
- Staines M, Pannu M, Long N J, et al. The development of a roebel cable based 1 MVA HTS transformer. Supercond Sci Technol, 2012, 25: 1024-1030