

船用高温超导推进电动机技术与应用前景

中船重工集团公司武汉船用电力推进装置研究所 郭国才 何锡武 周平

摘要：在高温超导材料发现和研究近20年的时间里，高温超导技术的应用取得了令人瞩目的成就。尤其在舰船电力推进领域，兆瓦级甚至数十兆瓦级高温超导同步交流电动机已经或即将交付海军使用。新型的高温超导发电机正在研发之中。可以展望，在不久的将来，高温超导全电力舰船将出现在人们的视野中。

关键词：船舶 电力推进 高温超导电动机 高温超导发电机

Technology and Application Prospect of HTS Motors for Ship's Propulsion

WMEPRI, SCIS GuoGuocai, HeXiwu, ZhouPing

Abstract: Since high temperature superconducting(HTS) materials was discovered and have been developed during these 20 years, application of HTS technology has made remarkable achievements. Especially in field of marine electric propulsion, HTS synchronous AC motors of MW class or even tens of MW class have been or will be delivered to the navies. Furthermore, New HTS generator has been under development. It is supposed that all electric ships with high temperature superconducting technology will come forth in the near future.

Key Words: Ship Electric propulsion HTS motor HTS generator

1 高温超导旋转电动机的发展现状

因必须维持低温超导材料在超低温环境工作所遇到的能量消耗和制冷系统的复杂性等问题，低温超导技术对其在船舶推进领域中的应用，始终没有乐观的评估。

提高超导材料临界温度是超导技术广泛应用的必由之路。目前，新一代超导材料不仅远远超越了77K液氮禁区，而且电性能和机械性能等特性都得到极大的提升，使用高温超导材料而要考虑的制冷功率额定值要比低温超导材料低得多。与此同时，相对简单、费用较低、更效率的制冷系统的研发也获得重大进展。因此，这些因素使高温超导线材在电机商业开发和应用中，无论在技术上，或者在经济上都呈现出其适用性与可行性。

长期以来，许多国家对高温超导技术的研究一直给予极大的关注和支持。早在1987年，美国能源部就委托Rockwell自动化/Reliance电气公司就高温超导技术在工业电机领域应用的可能性进行研究。其目标锁定在研发1000马力以上的超导交流同步电动机系统技术，并使之商品化。

依据美国能源部的评估，1000马力电动机功率等级是工业应用最普遍的功率等级，这种功率等级的电动机耗能占了全美电能消耗的30%以上。从技术上看，这些电动机中的70%非常适合使用高温超导技术。如果由超导电动机代替传统的电动机，估计每年将节约6亿多美圆。对于全球，这种功率等级的高温超导电动机市场份额估每年计高达3亿美圆以上。

因此，1000马力的高温超导电动机就成了高温超导电动机市场化应用的里程碑。而且从技术层面上看，获得1000马力的高温超导电动机设计的技术经验，将预示着掌握了进入大功率高温超导电动机设计大门的金钥匙。

在美国能源部的支持下，Rockwell/Reliance公司的高温超导电动机项目迅速进入经济可行性研究阶段。1993年，建造了世界第一台2马力和5马力使用高温超导线圈的交流同步

电动机演示机。

1996年，美国能源部正式组建SPI项目组，研发1000马力以上的大型高温超导电动机。当年3月，SPI完成125马力旋转高温超导励磁绕组交流同步电动机的制造和演示。该电动机输出功率达到200马力，比设计指标高出60%。2000年5月，SPI项目组完成了首台1000马力高温超导电动机的研制、工厂试验，以及技术论证工作。最近获悉，通用电气公司已获得了一个为DoE-SPI设计和开发100MVA高温超导发电机的合同。

从1996年到2001年，SPI项目总投资达2050万美圆，私人 and 政府投资各占一半。从SPI125马力和1000马力电动机的制造和运行试验分析，高温超导电动机与当前工业界使用的同额定功率等级的高效感应电动机相比，损耗仅为50%，尺寸上也要小得多，适用于任何需要大功率电动机连续运行的场合的使用。

美能源部的SPI开发工作使人们清楚地看到了高温超导电动机的应用前景。随后，美国超导体公司与美国海军合作，开始船用推进高温超导电动机的研发。2003年，由该公司设计、用于船舶推进的5MW/230rpm高温超导电动机（模型）建造完毕，并成功地进行了无负载工厂试验。该电动机是为了论证用于建造25MW/120rpm高温超导全尺寸船用推进电动机的技术工艺而进行的中间论证环节。在此之前，美国超导体公司已建造了用于工业领域的5000HP/1800rpm工业电动机。当前，美国超导体公司已进入36.5MW/180RPM高温超导电动机和50MW/3600rpm高温超导发电机的设计开发工作。其中前者将于2006年年中交付海军使用。

西门子公司对高温超导电动机的应用方向是多方面的，并于2001年成功建造了一台550HP/1800rpm电动机试验样机。目前，西门子公司已经就开发4MW船用高温超导电动机展开了全面的工作。韩国国家科学技术部“21世纪前沿研发计划”组织数所大学和实验室承担国家高温超导电动机的研发工作，其高温超导同步电动机的理论研究和概念设计依托建造一台100HP/1800RPM高温超导电动机，已于2003年完成。韩国的最终目的是研发3000HP的高温超导同步电动机。法国和日本的研发工作也在各自的计划框架内进行，其目标都是将高温超导旋转电动机做为常规船用电动机推进替代产品来研发的。

2 高温超导电动机技术

2.1 高温超导旋转电动机拓扑

图1为一台个6极（3对）高温超导船用推进电动机的拓扑结构图。它使用空心电枢绕组和第一代HTS线材（BSCCO-2223）励磁绕组。

高温超导电动机的转子与传统电动机转子完全不同，其励磁绕组由高温超导材料制成，运行在封闭的低温（35-40K）环境中。转子总成包括高温超导励磁绕组、支架结构、冷却回路、低温恒温器和电磁屏蔽。该低温制冷装置模块设置在一个固定的构架上，氦气用来冷却转子上的部件。

定子绕组是经过改进的铜质导线绕组。定子总成包括交流定子绕组、机座铁芯、定子绕组支架、轴承和机壳。定子绕组不放在常规的铁心齿中，因为它们由高温超导绕组产生的强磁场而处于饱和状态。定子由淡水冷却。

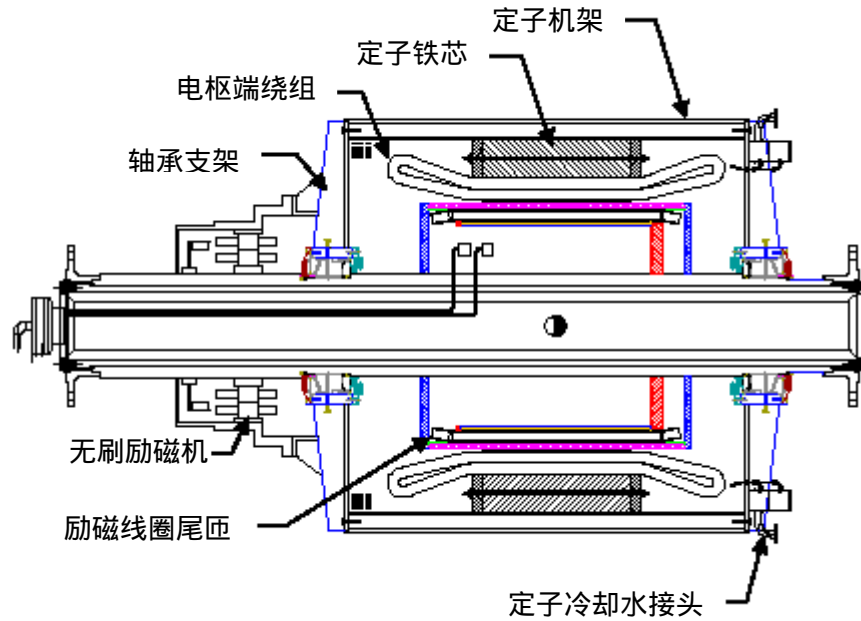


图1 典型6极高温超导船用推进电动机拓扑

2.2 能量转换效率和功率密度

高温超导电性的出现为大型电机的技术进步创造了先机,戏剧性地改变了旋转电机的运行效率。

众所周知,机械/电力能量转换效率是一个被公认的变量函数,变量包括电机的几何结构、铁心在转子中出现与否、转子绕组的线材成分等等。而诸多因数中,影响最大的变量是转子绕组的材料。

高温超导电机之所以如此高效,是因为高温超导线材可承载比相同尺寸和重量的铜导线高140倍的电流。更大的电流意味着更大的磁通密度和更强大的磁场,这直接地增加了电动机的磁剪切应力($T_a = \text{电枢周围电流载荷} A \times \text{中间气隙磁通密度峰值} B$),它意味着单位质量能提供更大的转矩(T_a)。尽管超导材料在维持低温环境时需要消耗能量,但低温冷却系统所需的功率却相当低,大约为常规转子铜损的10%左右。

船用推进高温超导电动机的转矩可参考下式得出:

$$T_a = D/2Kh$$

式中, D 为中间气隙直径, K 和 h 则为材料的重量密度和径向高度的乘积。由此可见磁剪切力对低速推进电动机所起的作用。

重要的是,高温超导电动机在其整个运行的功率范围内,都始终保持极高的效率。大型高温超导电机在全负载工况运行时的效率高达99%以上。图2为一台典型的高温超导同步船用电机效率/输出功率曲线。该计算结果包含了高温超导电机的冷却系统的功率损耗。曲线显示高温超导电机几乎有效地接近于最大值工况运行,而完全不用顾及船舶的航速。研究还显示,在一些假定情形下,高温超导电力推进系统甚至可以达到与柴油机直接推进船舶一样的燃料和滑油消耗水平。

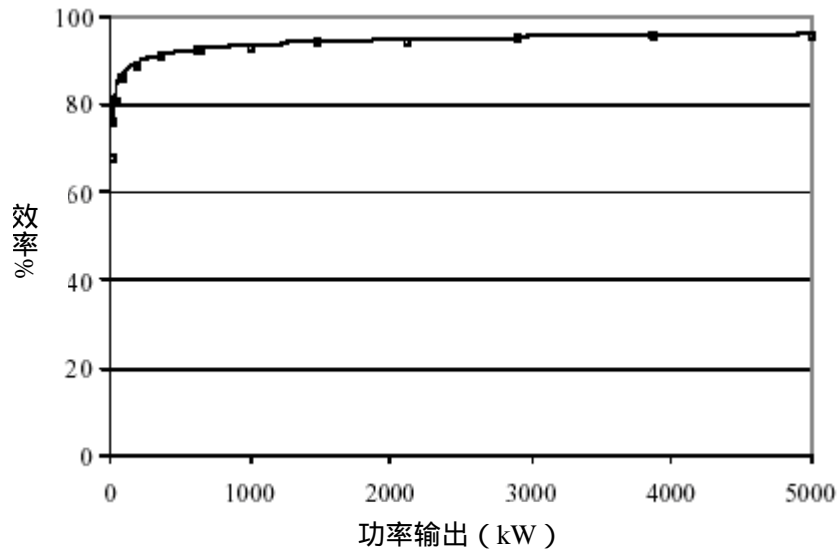


图2 典型的船用HTS电机运行效率

2.3 技术先进性

新颖的高温超导体转子

高温超导电机的新颖之处在于它使用高温超导材料的转子部分，这也是高温超导电机的优势所在。

首先，紧凑的HTS励磁绕组具有较高的B磁场，使电枢绕组区域的磁通密度达到2倍于常规永磁体的磁通密度，强度接近2.0特斯拉。它使电动机具有较高的电流密度。电机所产生的高气隙磁通密度将直接转换成剪切力（ $F = B \cdot I \cdot l$ ）。

另外，转子周围由非磁性低热导材料组建成，最大限度地阻隔了传向HTS线材的热，基于高温超导线材电机几乎无转子 I^2R 损耗。

电枢绕组与噪声

高温超导电动机电枢绕组是一个改良空心电枢绕组，虽然有限地增加了电枢绕组里铜的使用量，但它由此提高了定子电流载荷（A），增加了磁剪切力。

高温超导电机没有磁齿，不存在在常规电机上因此而引起的主要电机损耗和振动噪声源。由于在电机的磁路里没有或只有很小的铁芯，所以电源畸变很小，且来自电动机的噪声反馈亦很小。这些优点可简化对供电系统的要求，并使电机做得格外安静（电学和声学两方面），较轻的电机转子也使噪声变得很小。因此，高温超导电机是一种相当安静的电力终端设备。

低功率因数 与常规电机相比，高温超导电机可在较低的功率因数下运行。这种特性可以提供超前或滞后VAR一直到其额定负载值。高温超导电机具有低同步电抗(0.32-0.53)的特点，瞬态和次瞬态电抗类似于传统电机。这种较低的同步电抗使高温超导电动机非常适合于在较低负载角工作，给电机并网运行提供了较大的同步空间。电机在满负荷和无负荷运行之间转换，不会出现较大的电压差，使控制变得极为简单。

控制

高温超导电机对驱动和控制装置没有特别的要求。高温超导电机可使用现有的同步变频器、周波变频器或者PWM变换器，虽然为了获得较低畸变的优点，有可能的对这些系统做一些简化。

2.4 经济性

降低能源费用

高温超导电机可以较高效率方式和低功率因数方式运行（超前功率因数和滞后功率因

数)。与常规电机相比，一台100MVA的高温超导电机因效率因素，年节约费用就可能高达近百万美元，因此，高温超导电机的运行成本相对比常规电机低，从而在其生命周期中节约了能源费用。

降低制造和安装费用

由于高温超导电机的功率密度大，可以做得非常紧凑（仅为常规电机的1/3左右），因此，降低了建造费用安装费用。如在舰船上应用，则可缩短造船周期，节约建造费用。同样，小尺寸也降低了运输成本。

降低维护维修费用

高温超导电机采用全新的转子和输出轴设计、制造概念，在其运行中，几乎不需要进行日常的维修。

“伊丽莎白女王2号”豪华邮轮是一个典型的例子。该船的电力推进系统使用两台44MW常规电动机，电动机重400多吨/台。她的姊妹船“玛丽女王2号”于2004年完成了她的处女航，“玛丽女王2号”的推进功率为84MW。如果这样的邮轮使用现在正在建造的36.5MW电动机作为推进电动机的话，两台电动机的功率正好满足她对动力的要求，而重量却只有常规电动机的1/5。仅仅推进电动机一项，高温超导电动机将会给船舶运营商带来多大的经济效益！

美国海军估计，使用高温超导推进电动机，美国海军DDG-51型电力船在正常运行状态下每年每船可节约450 000美圆的运行。

3 超导电动机与常规电动机技术比较

比较美国超导体公司的5MW高温超导电动机和其它等值功率的大型电动机，可以发现高温超导电动机的系统效率高于常规同步电动机和先进感应电动机。尤其是在低功率输出时，其效率依然很高，几乎没有什么变化（图4）。高温超导电动机的这种特性，恰恰满足了舰船推进系统的运行工况需求。

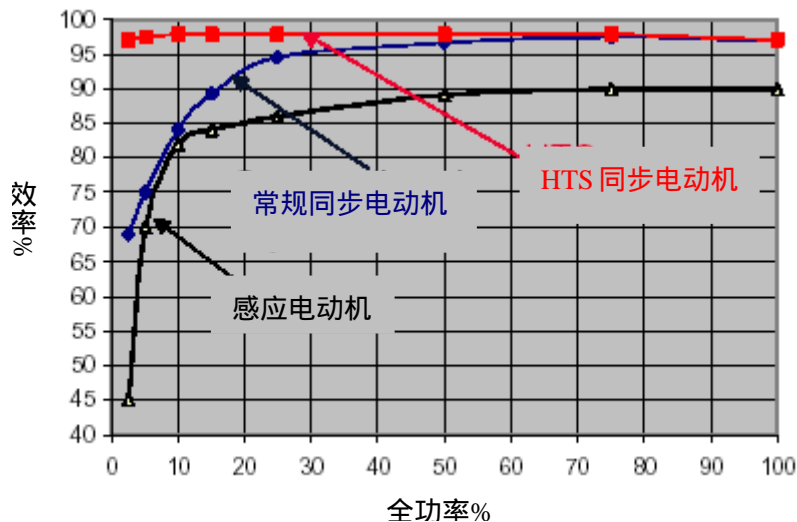


图4 不同类型船用推进电动机功率与效率关系曲线

图5反映了高温超导电动机与目前常规电动机的重量/功率关系比较。图6反映了高温超导电动机与目前常规电动机体积/功率关系比较，在这个比较中，还包含了维护的量值。基于设备本身的外型尺寸和其工作状态，高温超导电动机只需向外延伸1米，而常规电动机则必须向外延伸2米。

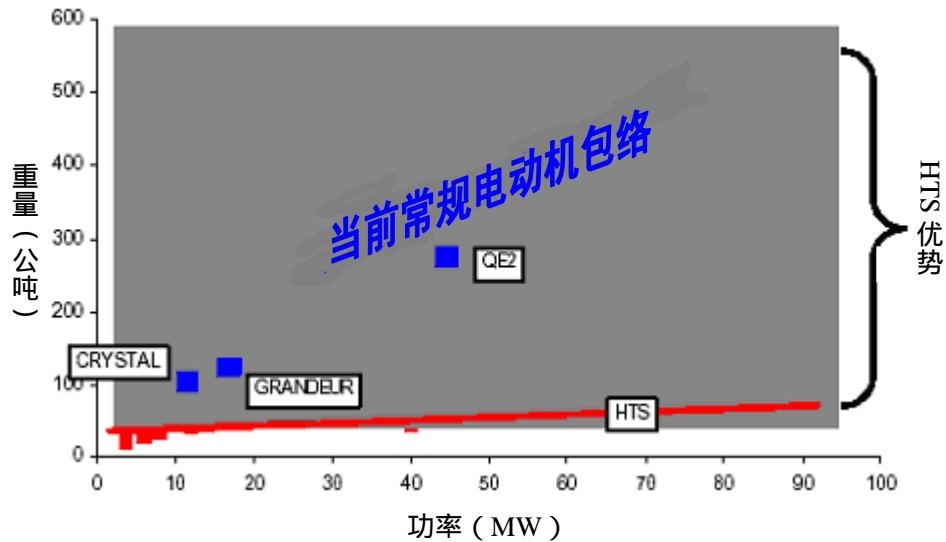


图5 高温超导电动机与常规电动机重量/功率关系比较

推进电动机的体积和重量对于船舶设计和建造具有重要影响。如果一台新型电机具有与常规电动机相同的功率，而其重量或体积仅为后者的一半或三分之一，对与军船来说，它就意味着更快的速度，更长的续航力和更加强大的火力，乃至可靠的生命保障。而对于民船而言，则意味着更大有效舱容量和更大的经济利益。

高温超导电动机所具有的重量轻、体积小这样的优点，极有利于船舶吊舱推进应用。假如一艘500吨的轻量的集装箱船可装载40多个集装箱，如果使用高温超导吊舱推进器，那么这个同样大小的集装箱船就可以多装载2.5%到4%的集装箱。

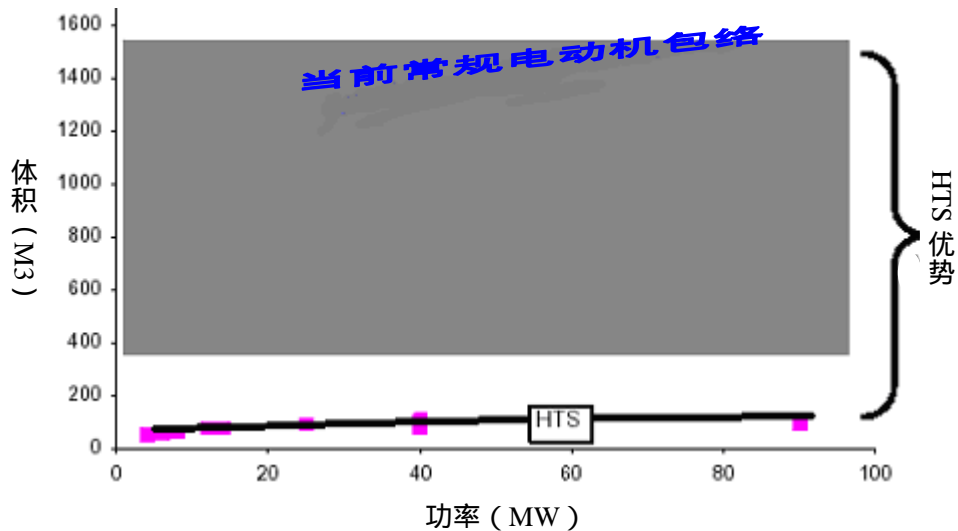


图6 高温超导电动机与常规电动机体积/功率关系比较

4 未来船舶电力系统配置

在船用推进领域，高温超导电动机所具备的轻重量，小尺寸，更大的功率密度，以及较高的部分负载效率等特性，对商船和军船来说是非常重要的，符合这些船舶运行工况特点。

另外，高温超导电动机励磁绕组的内在设计柔性直接惠及到船舶推进系统的配置，船舶使命和运行的各个方面。具体地说，高温超导电动机既可以安装在舱内，也可以作为吊舱推进系统配置。

根据美国超导体公司方案，未来的船舶电力系统，以及电力推进系统不仅仅是一个全电力系统，更是一个全高温超导电力推进系统。整个电力系统由高温超导发电机供电模块，通

用高温超导工业电动机用户模块和高温超导电动机推进系统模块构成（图7）。

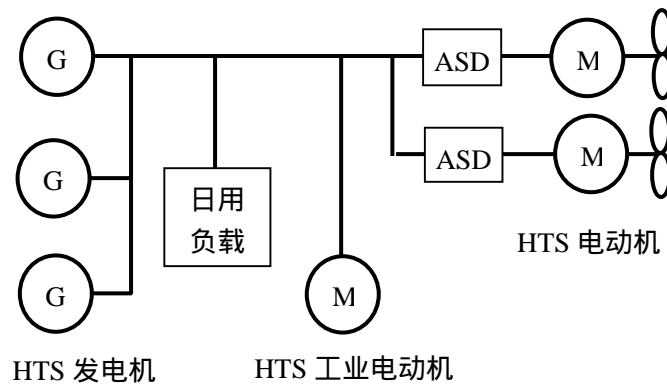


图7 全高温超导电力船动力系统拓扑

高温超导发电机与高温超导电动机具有类同的特性，各种损耗极小，包括冷却系统的功率损耗，整个系统的损耗只是常规发电机的一半。这使超导发电机的效率提高0.5%~0.8%（超导发电机的效率高达99%）。超导发电机的同步电抗也很小，稳定性好。由于省去了铁芯，降低了电枢绕组对地绝缘的要求，因此可采取电枢绕组，省去升压变压器，可直接投入现有电网运行。权威人士认为，超导同步发电机是未来电站的主力。继5000HP高温超导工业电动机和5MW高温超导船用推进电动机之后，美国超导体公司目前正在设计开发高温超导同步发电机，旨在全电力船上得到应用。

在船上，高温超导电动机和发电机能与现有的军船高电压、低电流体系结构相兼容。电动机的控制完全可以利用现有的同步/循环，或PWM变频器技术，而无须进行新的研发工作。整个电力系统也非常安静。

高温超导发电机可以作为船上电网无损效率峰化机组来使用。在未来的大型水面舰艇上，可能装备各种电磁武器（电磁弹射、电磁炮等）设备，高温超导发电机必定会发挥极为重要的作用。

4 高温超导电动机应用前景及建议

业内专家称，2002年用于船舶电力推进系统装备的电动机和发电机的全球市场总价值为四亿美圆，而这个市场还会在今后十年中上升到20亿美圆。从近十年来商业游轮、货轮和军船建造情况来看，人们更趋向于使用电力推进方式。

根据超导电动机的工作特性，其最初应用可能会出现在驱动等运输领域，尤其会被用于大型军船、商船或海洋工程等的电力推进系统。这是因为高温超导电动机在尺寸和重量和效率等方面固有的优势，这些优势为提高船舶设计柔性提供显著的成效，最能有效地体现各种舰船的运行使命要求，也为船舶的生命周期费用产生了深远的影响。

随着高温超导材料工业的进一步发展，价格进一步下降，高温超导电动机也将成为泵、风机、压缩机、增压机，以及皮带驱动等应用途径的理想动力，特别是那些有连续工作需要的应用领域，如轧钢、制浆、造纸、化工、石油和天然气精炼、采矿，以及其他重工业应用。

由此可见，无论是国防工业的急迫需要，还是籍于长远的能源考虑，高温超导电机的研究开发工作都应该上升到国家能源战略，以及21世纪先进技术储备的高度来考虑，统筹计划，力争早日获得关键技术的突破。

5 参考文献：

- [1] Development Status of Superconducting Rotating Machines Swarn S. Kalsi American Superconductor Corporation, Westborough, MA 01581 IEEE PES Meeting, New York, 27-31 January

2002

- [2] High Temperature Superconducting Motor Power Density Improvements Christopher T. Farr and Raymond M. Calfo Curtiss-Wright, Electro-Mechanical Corporation Cheswick, PA 15024
- [3] 5mw High Temperature Superconductor Ship Propulsion Motor Design And Test Results P. W. Eckels and G. Snitchler American Superconductor Corporation Westborough, MA
- [4] Superconductor Generators Promise Higher Reliability And Ease Of Operation Swarn S. Kalsi American Superconductor Corporation Westborough, MA
- [5] Design and Electrical Characteristics Analysis of 100HP HTS Synchronous Motor in 21st Century Frontier Project, Korea Hyun-Man Jang, Itsuya Muta, Tsutomu Hoshino etc.
- [6] 国外船用高温超导同步电动机及其系统的研制状况 郭国才 李亚旭等 中船重工集团公司第七一二研究所2004年情报研究报告之二
- [7] 世界民船电力推进技术应用调研及对我国发展民船电力推进技术的建议 郭国才 石 艳 王屈平等编写 赵建华 王志华 审核 中船重工集团公司第七一二研究所2003年情报研究报告