

最佳的电力船推进方案

1. 引言

纵观造船的历史，面临的主要挑战常常是：如何面对一套既定的推进系统而建造合适的船舶，而不是为既定的船舶打造一套量制的推进系统。过去人们启用已有的最好的推进“引擎”时是如此，而今天使用柴油机、燃气轮机和电力混合系统又何尝不是这样。

当然，理想情况是根据市场的需要、而不是根据船舶推进系统所施加的诸多限制，来配置货轮空间、船舱空间、推进装置形状、甚至于船舶的线路情况。通往理想之路上依然存留的因素包括：整个宽广运行范围内化学能转换成机械能的潜在效率，以及以最有利的方式配置空间的能力。换句话说，如果你能奇迹般地改善船舶推进电动机和发电机的功率密度及效率，也即使其效率高得多、且在负载改变时更均衡，那么其他许多问题也将迎刃而解——同时船舶设计不再需要妥协。事实上，随着功率密度和效率的不断改善，电力驱动推进系统终将取代机械驱动系统，应用于更广的领域。

随着高温超导旋转电机的成熟，以及即将到来的由美国海军资助的5MW样机电动机的开发和试验，预示着基于高温超导的推进系统成为了这些长期挑战的一个近期的解决方案。与常规电机相比，使用高温超导线材的电动机和发电机，其尺寸非常紧凑，重量非常轻，能更有效地在各种负载工况下运行。这些特性使之易于在船上安置，易于实现船舶中更多的模块化结构，减少了船舶设计人员许多不希望的权衡和比较。军船建造师现在就可以开始运用这些推进系统的进步为船东和使用者带来利益。

2. 挑战

甚至在现代化的船舶中，推进系统如此之大、之重，以致于在许多船舶中，人们不得不把船内的其它部分勉强安置在其周围。机械设备的尺寸和位置也减少了船舶载货、载人的可利用空间，并妨碍了装载和卸载的效果。轴系可能延伸相当长的距离，以致于进一步影响空间的利用率。另外，在当今几乎所有的船舶中，不论是机械推进还是电力推进，其推进系统在较低速运行时效率都会降低——这会导致短途运输耗费过高，限制了船舶停靠港口的选择范围。

所有这些问题带来了相关的费用。过早地在造船初期安装推进系统，将增加资金投入、降低造船者采用更有效的造船手段的能力。较少的内部可用空间，会降低商船收入产出的潜在能力、以及军船的战斗性能。效率过低的载货和卸货，使船运周期加长，增加了港口费用，延误了进度。柴油机直接驱动和齿轮推进系统的运行时间加长，加上其低速的运行，增加了维修费用。船舶低速运行时会降低效率，与其它的运输方式相比，可能使某些船运线路失去竞争优势。

3. 柴油机电力推进系统：一个对于船舶设计者来说不完善的解决方案

电动机可以设置得更靠近船的尾部，使军船建造者免于“轴系束缚”，这在船舶设备布置上给设计人员几乎无限制的灵活性。传动系统的长度缩短了，而这正是维持从原动机到螺旋桨这段长长距离之间的严格轴系要求所需要的。对于安装有吊舱推进器的船舶，这个长度完全不存在了。这些外安装式电动机，使船舶的水动力效率达到最大，同时增大了的内部空间又使收入增加。吊舱推进器还通过在建造期间增强其模块性而降低造船成本。

与从前的船舶相比，今天的船舶更趋向于消费更多的电力。综合电力推进系统通过仅仅使用最少量的发电设备而维持运行工况的能力，优化了船舶操作的灵活性。发电机因此能够更接近满输出功率运行，而将不需要的发电机停机，这提高了整个系统的效率，并使维修要求降到最低。

正是由于这些优点，几乎所有的游船以及许多其他类型的船舶，如穿梭油轮、成品运输船、渡轮、破冰船、大陆架石油开采平台等，不论是内装的还是吊舱推进，都转而采用综合电力推进系统。另外，世界上有13家海军，不是拥有现代化的电力推进船（已在设计/建造电力推进船），就是已经宣布了这类建造计划。其中最引人注目的是美国海军，在2000年宣布了其下一代水面战舰将采用电力推进系统。

虽然电力推进系统超越了传统的推进方式，但是现代电力驱动仍然不能在广阔的应用范围内给造船者提供一个理想的推进方案。

较高功率级的电力推进电动机可能体积庞大而笨重，这限制了其在船内布置的灵活性。在推进吊舱应用中，这种大尺寸和重量给吊舱的适用性规定了上界，显然约20MW左右。另外，当今的电力推进电动机在较低船速运行时明显地降低了效率，因此不能充分发挥其主要品质之一的优点——即与低速柴油机在低功率级工作时相比，能降低燃料的消耗。

4. 关键问题：提高能量转换效率和电机功率密度

与重力或光速不同，机械/电力能量转换的效率不是一个恒量，而是一个数十年来已被公认的变量函数，变量包括电动机或发电机的几何结构、铁心在转子中出现与否、转子绕组的线材的材料成分等等。事实上发现，影响最大的变量是转子线圈绕组的材料。

电气损耗较低的陶瓷材料、即众所周知的高温超导线材已经成熟，这戏剧性地改良了旋转电机的效率，允许电机的设计得以改进提高，以致于现在制造的电机的尺寸和重量可以仅为原来的几分之一。正如光纤传输数据比铜线快得多一样，陶瓷导线导电性也比铜线好得多，所不同的是，光学系统必须接插专用的适配电子器件，而使用高温超导线材的电动机和发电机接到同一电网后，则以与铜导线电机完全一样的方式运行。

使用高温超导线材制造线圈的电力推进用电动机，在特定输出功率下，它非常轻便、小巧，这使得该电动机极易在船上安装，并允许船舶大规模的模块化建造，减少了许多船舶设计人员面临的种种费时费力的折衷和权衡。大功率等级的高温超导电动机极易安装在外部吊舱之中，这将极大地简化造船的过程。

对于这些高温超导电动机和发电机，需要考虑的仅仅是，它们需要有一个小型商用的冷却系统，以便冷却高温超导线材。这些制冷机与目前世界上成千上万的医疗机构所使用的医疗诊断设备中的制冷机类似，但更简单。

这些制冷压缩机给“可热交换的”术语赋予了新的含义，因为它们易于制备和更换场地，即使发电机或电动机正在运行中，或者它们只占据一个单抽屉文件柜大的空间。高温超导电动机和发电机被典型地设计成带有“n+1”冗余制冷系统，以便避免对船舶操作员出现操作局限。另外，相对于发电机或电动机的输出而言，这些制冷机的电力消耗可忽略不计。

高温超导电动机和发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，如图1所示。更大的电流意味着较大的磁通密度和更强大的磁场，对于电动机，则意味着单位质量能提供更大的转矩。

因此，高温超导电动机和发电机可以做得轻巧和小型得多，这不仅是因为其内部线材比较

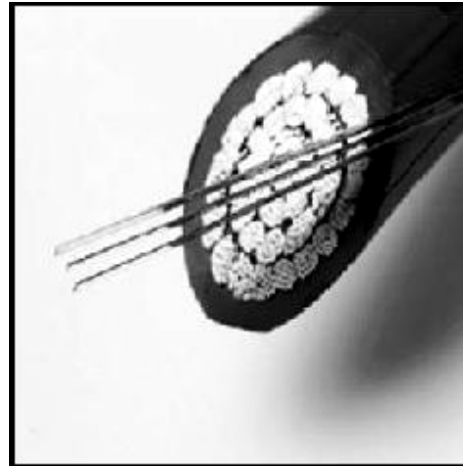


图1 细小的高温超导线材传输的电流与极粗重的铜导线所传输的电流相同

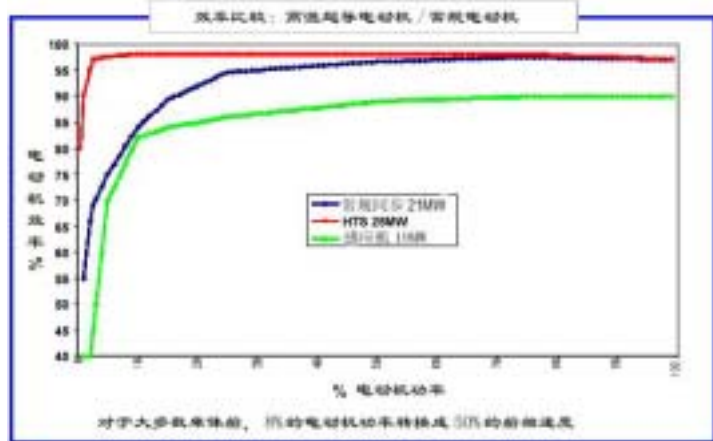


图2 相对于常规电动机，高温超导的效率优势在全负载下显著，而且在部分负载下则更大

轻、巧，还有一个原因就是它们产生的磁场更强大。

高温超导电动机还有另外一个优点，就是其高的效率事实上在整个功率范围内是恒定的。图2显示了典型的高温超导同步船用推进电动机与等值的常规船用推进同步电动机和感应电动机之间的计算效率的比较，该计算还包含了电动机冷却系统的损耗。这意味着电动机和发电机可以有效地在接近于最大值下运行，而不用顾及船舶的航速。研究显示，在一些假定情形下，高温超导电力推进系统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。

高温超导和常规同步电动机尺寸/重量/功率比较

对于造船厂而言，这些优点的意义深远——尤其是因为它们适用于发电机和电动机两者。我们来对某种高温超导电机和常规同步电动机、例如对其尺寸和重量作比较，它们的额定功率范围均为5--90MW，均为42KV电机，而且是船舶推进系统所要求的低速运行状态。图3显示了这两种技术的重量/功率比较。图4显示了其大小/功率比较。尺寸比较中也包含了维护的量值，对于高温超导电动机而言，是从机旁向外延伸1米（除机座以外），常规电动机则为机旁向外延伸2米（同样除机座以外）。

因高温超导电动机而得到重量减轻的这一优点，尤其有利于吊舱应用。评估证实，对于每艘500吨的较轻量的集装箱船，可装载40多个集装箱，这样，一艘使用高温超导吊舱推进器的集装箱船就可以多装载2.5%到4%的集装箱。

高温超导和常规电机体积比较

高温超导电动机凭借其轻的重量和紧凑的尺寸，可以被优化到人们所希望的尺寸要求，这些要求可以包括：使推进电动机的直径最小化，以便使推进吊舱的水动力性能最佳，或者在船/较低甲板上增加载货容积，或者使机械的效率最大。设备缩小尺寸后，节约了空间和甲板，提高了利用率，这是所有类型的船舶----包括军船和商船都所希望得到的结果。

同样地，与常规的发电机相比，高温超导发电机要小得多、轻得多。事实上，高温超导发电机具有另外的优势：它们比传统的发电机的运行效率要高得多，即使将冷却系统考虑了进去。

使用如此小尺寸的电动机和发电机，对船舶机舱空间配置的限制就少得多，这增加了空间余度，并允许对船舶进行更高度的创新设计。如考虑使用一台25MW的高温超导发电机，它与一台重约17吨的船用燃气轮机原动机连接，整个系统重量可能低于50吨。对一些船舶来说，这个系统可能是足够轻了，由此能将系统安装到舱面船室。这给下层提供了更多的空间，提供了更高的燃气轮机效率，以及更好的维修途径，在一些情况下，还可能弥补燃气轮机环境友好但工作效率低的缺陷。

这样轻巧的高温超导电动机，能够使用更高效率的电力驱动泵-喷系统和水动力优化了的吊舱驱动装置，这比常规电动机获得了更好的效率和更高的功率。

高温超导系统在任何转速下有效均衡地运行

正如所述，高温超导推进系统额外的优点是，即使降到低速，电机同样能够高效地运行。这个特性对游船、海岸商船和军船非常重要，因为这些船大部分时间运行在部分负载工况下。总地来说，因高温超导电机的效率增益而节约的燃料，取决于操控情况，但初步的计算表明，不管是什么类型的船，燃料的节约预计每船每年为100000到500000

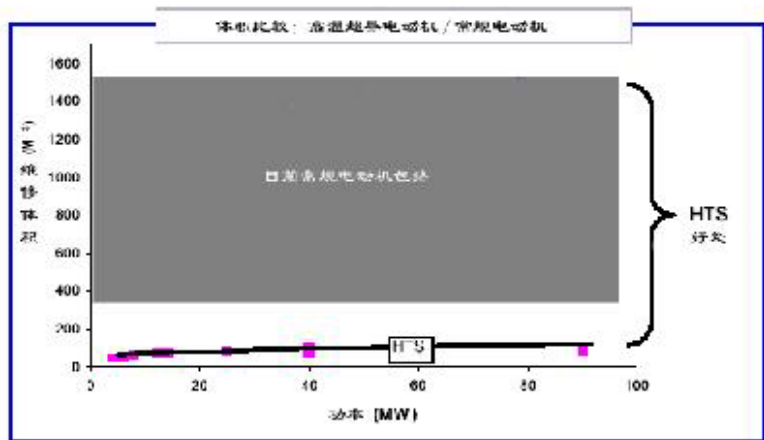


图4 高温超导电动机和常规电动机比较：大小比功率

美圆。

高温超导的其他优点

高温超导电机还有另外一些长处。由于在电动机或发电机的磁路里没有或只有很少的铁芯，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（电和声两方面），较轻的发电机转子也使噪声变得很小。

其他方面，高温超导电机工作像常规电机一样。万一系统出现故障，它们的磁场可以像常规同步电动机或发电机一样被迅速切断。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。

电机本身较轻的重量和较小的尺寸，有利于其完整地运输和安装，而不需要在工厂制造和测试后，拆装运输到船厂，然后在船厂重新组装和测试，再安装。

初期定价评估显示，高温超导电动机和发电机在商业上与常规电机的价格相当，而且易于安装，且安装费用较低——它们可在船舶建造后期进行安装。

结论：在给船舶用途做最佳匹配设计时，使用高温超导船用推进系统，可使造船工程技术人员比使用常规动力技术减少不少的约束。

展望

那么，高温超导下一步将面临什么？它要多久才能广泛应用呢？高温超导线材已经在海军和商业实验室得到广泛验证，其坚固性也得到证明。额定功率为5000HP/1800RPM的高温超导电动机已建成并试运行成功，试验中，它的持续额定功率达到了5900HP。

由美国海军船舶研究局资助的5MW、230RPM船用推进系统原形机已于2003年3月在美国超导体公司建成和通过工厂无负载运行。在2003年下半年，该电动机接受了海军当局的严格评估。由美国能源部资助的100MVA商业超导发电机也正在通用电气公司开发。这些高标准的观点，表明基于高温超导技术的推进系统将是下一代船舶推进系统的改良产品。舰船建造师现在就可以开始演绎这种推进系统，为船东和船舶运行人员提供更多的利益。

郭国才、石 艳编