

加强安全技术研究，提高船舶运输安全

胡以怀
上海海事大学 商船学院

前言

近 20 年来，我国船舶运输事业有了很大的发展，但交通安全的形势不容乐观。据我国海事局统计，1999 年共发生水上交通事故 832 件，死亡 769 人，沉船 249 艘，直接经济损失约 25100 万元。据挪威 DNV 船级社估计，世界船队每年的事故损失高达 100 亿美元，而伦敦 ILU 保险行的 1996 年统计，海上船员死亡当年高达 1190 人。

国际海事组织（IMO）自 1948 年成立以来，为保证海上船舶安全尽了很大努力，但世界船舶总吨全损长期徘徊在 0.2%~0.4% 之间。迹象表明，IMO 的努力被海事形势的复杂化所抵消。21 世纪后，高速船和滚装船会大量投入营运，无人驾驶船舶也开始出现，将使得海上安全形势更趋复杂。

本文从船舶机损案例分析、事故故障树分析及应急事件处理、设备状态监测和故障诊断、人因失误分析、船舶安全状态评估五个方面全面，全面介绍了我们再船舶安全技术的研究内容，并提出了今后船舶安全技术研究的主要方向。

一、船舶机损案例分析

近 3 年来，我们收集和整理了中远集装箱运输公司、中国海运集团公司和广州远洋运输公司近 30 年来发生的重大机损案例 400 多例，对故障类型和事故原因的统计分析如表 1。此外，对故障部件、故障类型、事故原因、故障机型、发生时间、发生区域、主要责任人和严重程度的统计分析如下：

（1）故障部件

从统计数据来看，主机事故 188 例，占 47.4%，电站事故 79 例，占 19.9%，辅机系统事故 74 例，占 18.6%。另外，轴系 14 例，舵机 8 例，锅炉 7 例，吊车 6 例，起货机 5 例，空调机 3 例，锚机 3 例，船体 3 例，焊接 3 例，货损 3 例，其它 1 例，占 14.1%，如图 1 所示。在主机事故中，

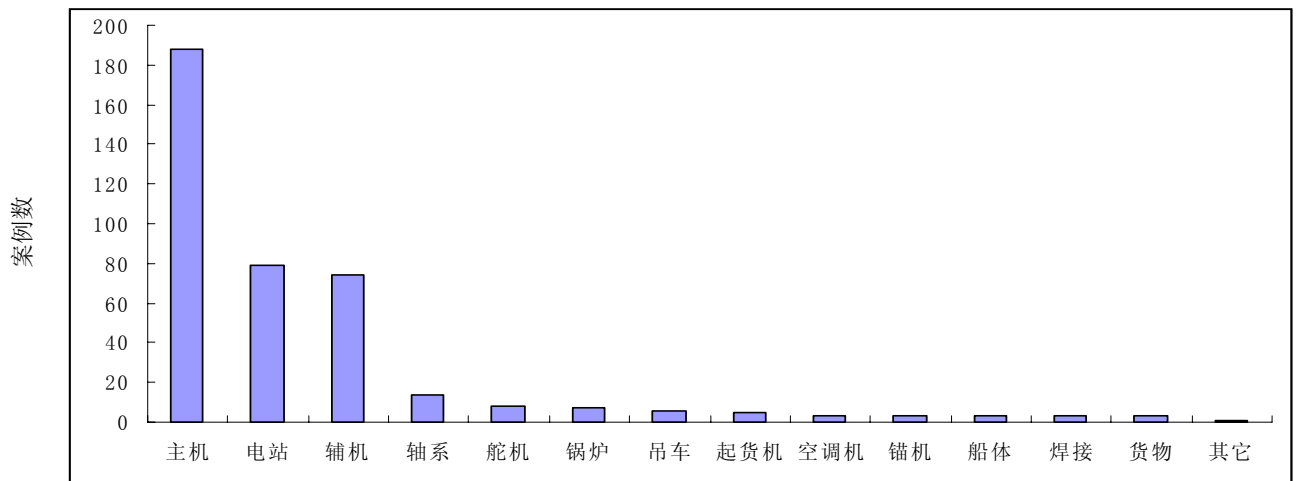


图 1 船舶机损案例的故障部件

活塞、缸套、曲轴、气阀故障 86 例，占主机事故的 45.7%，燃油喷射系统故障 36 例，占 19.1%，增压器故障 28 例，启动和换向系统故障 28 例，调速器故障 10 例。在电站事故中，发电柴油机故障 51 例，占电站事故的 64.6%，电机故障 23 例，配电板故障 3 例。在辅机系统事故中，润滑系统故障 29 例，冷却系统故障 28 例，燃油系统故障 9 例，压缩空气和净化系统故障 4 例。

表 1 船舶机损事故的故障类型及事故原因

类别和原因	故障类型	事故原因
-------	------	------

损伤部件		磨损或破裂	脏堵或脏污	松动或脱落	油水气漏泄	锈蚀或咬着	短路或烧损	异常关闭	失控或失灵	油品劣化	其它	日常维护	管理失误	操作不当	维修过失	专业技能差	设计不合理	安装不正确	加工不良	材质不佳	其它
主机	活塞、十字头	12	1	6	3	5					1	10	1	2	2	2	1	3	2	1	1
	缸盖、缸套	6	4	3	6	3					1	7	4	1	1	1	5		1		
	气阀机构	5	2	1	4	3		2			4	6	1	3	8		1		1	1	1
	连杆	8		2		3					3	4	1	1	4			5			
	曲轴、轴系	13	1	4	3	5						7	3	3	4		2	2	3	2	1
	增压器	10	5	5	1	2					2	9	1	1	4	2	2	3	2	1	
	空冷器		6		1	2						6	2				1				
	凸轮轴装置	5		8	2							2	4		3		4	1		1	
	调速器	5		6		2		2				7	2			2	2		2		1
	操纵系统	8	1	3	2	4			2		5	5	4	7	5	2	1	1	2	1	2
燃油喷射系统	9	1	3	5	6		1	1		1	6	7			2	3	1	2		1	
发电机组	副机	5	2	10	1	3	2				3	5	1	5	3	3	2	5	1	1	2
	发电机	4	3	2	1		4				1	4	6	2	2	1	1	1			
	配电板			1			3				3	1	1				1				
	电动机	1				1	4				4	3							1		1
辅机系统	冷却系统	3	8	3	4	4		3	1			5	8	3	3	1	2	2	1	2	1
	润滑系统	2	10	1	6	4		3			4	7	7	5	5	2	4				4
	燃油系统		4	1	3	1				7	1	3	10	1	1	1	1		1	2	
	压缩空气系统	2		1				1			1	2		1	1	1				1	
	净化系统		4	1	1						1		1	1	1	1	1				1
其它设备	锅炉				1		2	1			2	2	1	3	1		1				
	舵机	3			1			2				2	1	1	1						1
	吊车							1			1	1		1		1					
	锚机	1		1								2									
	空调机	2		2	1							2		1	1						1
	起货机	1		1			2	1			2	1	2	2		1					
	货物		1				1				3	2	2								1
	船体	2										1									
焊接										2			2								
小 记	102	53	65	45	46	18	16	8	7	38	111	70	45	41	23	35	23	19	15	19	
总计						401									401						

可见，在船舶机舱设备中，主机系统仍然是事故发生率最高的部位，特别是活塞、缸套、气阀、喷油器这些燃烧室周围的部件，应该引起足够的重视。当然，由于主机是机舱中最主要的动力设备，由于其故障而引发的事故往往是较大事故，而船舶上报公司的也主要是一些大的事故，因此主机事故的比率高也是很自然的。根据其它的资料统计，主机（柴油机和废气涡轮增压器）各部件的损伤占机损事故的35%~45%，燃烧室周围的气缸盖、缸套以及活塞的损伤比例是高的。在二冲程柴油机中，活塞的损伤占全部损伤的30%左右，在四冲程柴油机中，曲柄销轴承以及主轴承的轴瓦磨损及擦伤等的报告，大多是润滑油管理不当造成的。近几年，因锅炉、发电机等辅机造成船舶不能自航或减速航行的比例在降低，而主机造成的事故比例却在上升。其中与过去相比，燃烧室周围部位（气缸组合件）的损伤比例有减少的倾向，曲柄或凸轮轴等的损伤几乎是稳定的，而增压器造成的事故则有所增加。

另外，船舶电站的事故率也较高，特别是发电柴油机，而电机的故障大多是由于短路引起的。辅机系统中以润滑和冷却系统的故障率最高，且这两个系统的故障会直接引发主机的较大事故，在日常检查和维护中应注意滑油和冷却水温度和压力的变化。总而言之，船舶柴油机由于其复杂的结构和恶劣的工作条件，是机舱设备中影响船舶安全航行的最大因素，做好柴油机的备件管理十分重要，而加强船舶柴油机故障诊断技术的研究将具有很大的实用价值。

(2) 故障类型

在所有故障类型中，磨损故障41例，加上疲劳、老化、变形、剥落、破损、断裂共106例，

占26.7%。可见，设备金属疲劳引起的故障仍较高，这主要是由于船舶设备的工作环境十分恶劣，一直处于高温、高压、高腐蚀、强振动和应力集中的工况中，才会出现频繁的断裂、磨损、烧损和碎裂等故障。另外，漏气、漏水、漏油等漏泄故障33例，脏污、脏堵故障37例，这说明了日常检修工作的重要性。其它故障类型详见表2。

表2 船舶机损事故的故障类型

故障类型	案例数	故障类型	案例数	故障类型	案例数
磨损	41	腐蚀或咬着	12	失中和转子失衡	6+4
疲劳	10	松动	31	漏油、漏水、漏气和漏泄	6+10+4+13=33
老化	8	卡死	9	堵塞和脏堵	6+31=37
破裂或破损	19	松脱或剥落	28	关小或关闭	8+8=16
断裂和损坏	23+5	缺水或缺油	6	燃油或滑油劣质	13
变形和错位	5+4=9	烧损和短路	5+3=8	参数失调	8
失调和失灵	7+7	超速和超负荷	3+3	触电和爆炸	1+1=2

(3) 机型分析

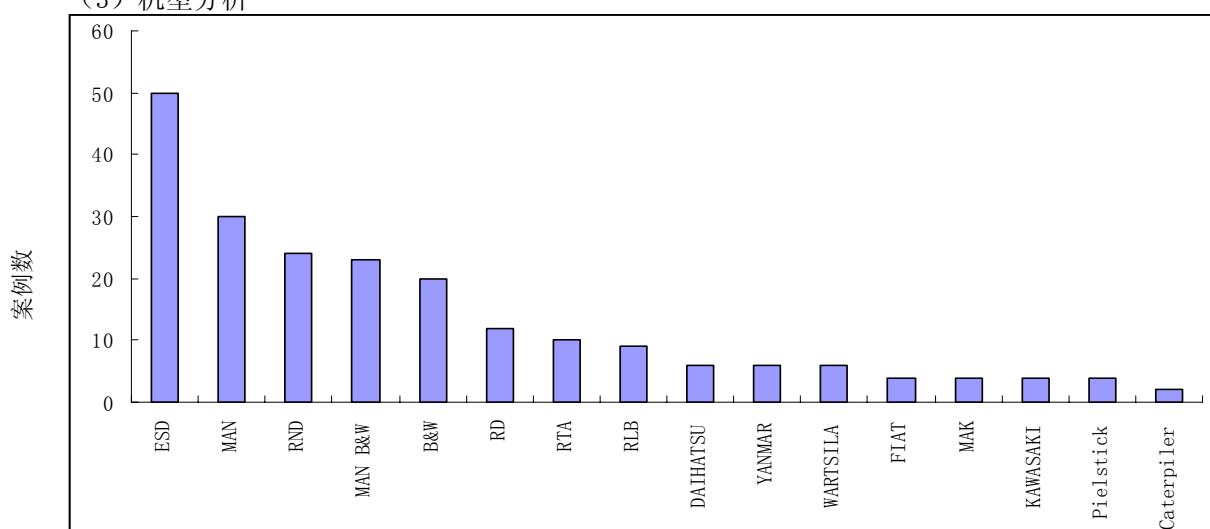


图2 船舶机损案例的柴油机机型

在所有可查清机型的案例中，不同故障机型的案例统计如图2所示。在这些案例中，国产低速柴油机的故障率最高，占23.3%，其次是MAN、RND、MAIN B&W和B&W机型，分别占14.0%、11.2%、10.7%和9.3%。当然，这并不意味着这些型号的主机质量不好。恰恰相反，由于这些机型的主机目前在远洋船舶上使用广泛，相应的故障率也就高于其它机型，但“文革”期间出厂的机型故障率确实较高。我们可以利用同型号、同系列主机的案例，把事故举一反三，向其它船舶推广，起到预防的作用。

(4) 事故原因

引发船舶机损事故的原因有很多，但归纳起来主要有船员、设备和环境三个方面的因素如表3所示。

表3 船舶机损事故的原因

事故原因		案例数	事故原因		案例数
船员因素 293例 73.8%	日常维护疏忽	103	设备因素 89例 22.4%	设计、结构不合理	28
	管理失误	63		安装不正确	26
	操作不当	48		材质不佳	15
	维修失误	37		加工不良	11
	专业技能差	23		设计、加工不合理	7
	责任心不强	9		金属疲劳	2
	运转检查不充分	6			
	接船检查疏忽	4	自然因素	4例3.8%	

从我们统计的数据来看，由于纯自然因素如机舱空气不足、冬季结冰等原因引发的事故只有4例，而日常维护疏忽引起的机损案例占了最大比例，其次是管理失误、操作不当和维修失误。如果将设备因素中安装不正确、加工不良的人为因素考虑在一起，则在所有案例中，人因失误的案例达330件，占全部案例的83.1%，与国内外公认的80%的人因失误比率非常接近，证实了船舶机损事故在许多方面与人的因素有关，人因失误是船舶机损事故的最主要成因。

从航运界的宏观环境来分析，频发船舶机损和海损事故主要起因于以下四个方面：

(1) 船舶老龄化

近些年来，商船老龄化的问题普遍比较突出。表面原因是船东要延长现有船舶的服务年限，而深层次原因是由于船多货少、经营成本提高和船价上涨而导致船东无力更新现有船舶。

在船多货少的情况下，海运市场竞争日趋激烈。船东为了降低成本，被迫压缩船舶维修保养开支，使船舶安全技术状况更趋恶化，使老龄船舶雪上加霜。加之造船材料的涨价，致使新船造价大幅度提高，船东无力更新船舶。这就是这些年来船舶老龄化问题几乎无法摆脱的怪圈。

(2) 船员素质下降，配员大幅度减少

在航运不景气的情况下，船东为了降低营运成本，除了减少维修保养开支，所要采取的另一重要措施就是降低船员支出，主要是两条：一是以低工资雇佣船员，二是减少配员。以低工资雇佣的船员由于缺乏充分的培训和足够的海上资历，或者由于健康条件差和语言不通，往往缺乏专业知识、技术能力和交流能力，因而导致了許多事故和险情。

配员减少导致某些船舶的船员疲劳过度。尽管现在船舶的自动化程度提高了，但船员的劳动强度却因裁员和船舶周转加快而大大提高。不仅使在航维修保养受到影响，也给船舶靠离码头和在港作业增加了很大的难度。由于船员过于疲劳而发生的事故世界上已有多起。

(3) 方便旗船、单船公司、无船公司与非标准管理

有些开放登记的国家，其主管机关缺乏足够的专业技术人员，管理能力较差，有的根本没有检验和监督管理机构，除了每年收取船舶登记费，很少实施船旗国管理，因而事故率明显高于其他国家。

单船公司由于新加盟海运或缺乏必要的岸上管理力量，与船旗国主管机关之间缺乏必要的联系。无船公司往往只负责经营而不负责安全和防污染管理，致使船舶经常处于租船人的越位冒险指挥之中。单船公司和无船公司由于实施非标准管理，安全在某种程度上是听天由命的。方便旗船、单船公司和无船公司对船舶的非标准管理，妨碍了强制性安全规定及规则的贯彻实施，已成为事故多发的重要原因之一。

二、 故障树分析及应急事件处理

船舶机损故障是多种多样的，按故障发生的原因可分为机械部分故障、液压系统故障、控制系统故障和电气故障等。每一部分还可以再分，如机械部分故障又可分为活塞组故障、缸套故障、进排气阀故障、曲轴故障、连杆故障以及配套附件如冷却液装置等的故障。一般来说，某种功能故障发生往往是由许多种故障模式中的一种或数种造成的。例如，放大器无输出的故障，可能对应于两种故障模式，即短路或断路中的一种。但是，短路或断路的位置(即故障部位)可以是输入端、输出端或放大器本身。因此，确定了故障模式，并不等于找到了故障部位。要证实故障的实际部位，还应进行故障的查找与分离。利用故障树分析法，就可以使管理人员从错综复杂的现象中一步步查找，最终确定故障源。因此，故障树分析法有很大的实用价值。

我们将船舶机舱系统分成船舶主机系统、辅机系统、电气系统和主机遥控系统。在分析大量的机损事故和现有的故障诊断知识的基础上，建立了各系统的故障树分析的树型关系，包括船舶主机不能启动、发不出功率、突然停车、转速不稳定、振动剧烈、排烟不正常、排温不正常、示功图不正常故障，辅机系统中滑油压力温度不正常、气缸油供应不足、滑油消耗量大、冷却水温不正常、泵浦异常，主机遥控系统中的主机不能换向、不能启动、不能调速故障和船舶电站中原动机故障、电动机故障、主开关和监控系统异常、用电设备故障的故障分析，运用数据库编程技术，建立了“船舶典型事故的故障树分析”。

以船舶电气设备为例。船舶电气设备从单台或数台发电机源源不断的发电到全船各处大大小小的电动机或其它用电设备长期稳定的安全运行，构成了一个完整的电器设备系统。这一系统是由各环节组成，可以大致分为：原动机→发电机→主开关板、电力输送、监视控制设备→电力负荷分配→各种用电终端。船舶电气设备在长期运行过程中由于受到内在因素(如设计，材料制造，

安装工艺等)和外部条件(如负荷突变,维护管理不到位,机舱环境异常恶劣海况等)的影响,可能使电器设备的使用性能或技术状态不断下降。电气设备故障先兆可以表现为:

- 功能异常:如发电机启动困难,功率不足,马达转速不稳等。
- 电流异常:电气设备工作电流超过正常标准,马达电流突然比平时增大较多。
- 温度异常:电气设备工作温度异常升高,发电机绕组高温,电动机轴承高温等。
- 声音异常:有各种不正常声音出现。
- 气味异常:有绝缘材料的烧焦味。
- 仪表指示不正常:可以帮助分析判断故障。

船舶电气设备的故障分为发电机的原动机系统故障和发电机故障,发电原动机故障包括滑油压力低、滑油温度高、冷却水压力低、冷却水温度高、排气高温、超速、主轴高温、启动失败等,发电机故障包括绕组绝缘低,电气击穿短路等、主开关板或监控子系统故障、各电力分配或电力输送故障、电动机不能转动或其它用电设备故障。图3是三相异步电动机不能转动的故障树结构图。

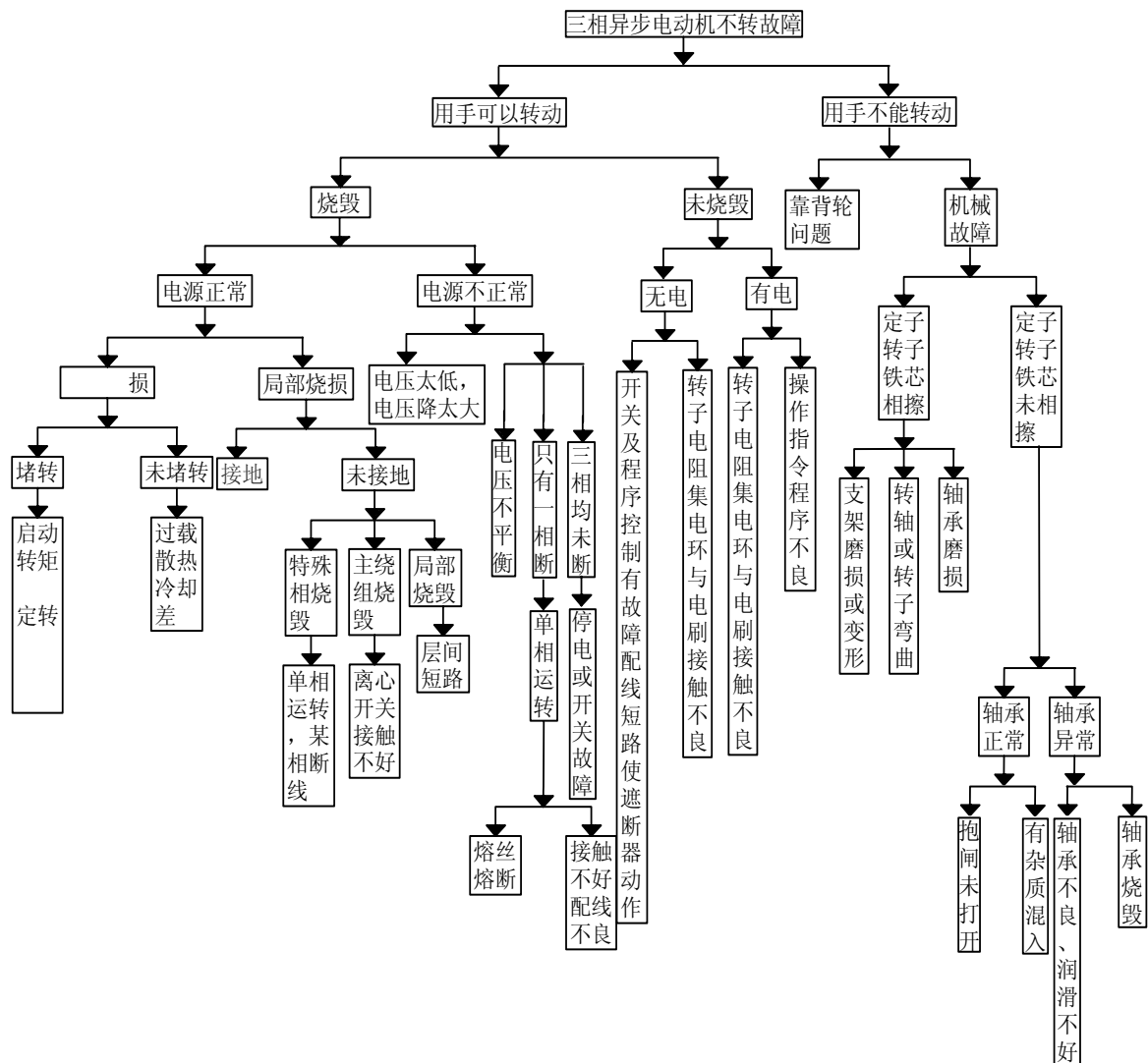


图3 三相异步电动机不转故障树分析

大型船舶特别是远洋船舶长时间航行在茫茫大海中,需要处理各种应急情况,如穿越战区、冰区、赤道,遭遇台风、巨浪、偷渡者和海盗的袭击,发生触礁、溢油、失火、爆炸、沉船以及各种设备的运行检查和破损维修等。由于远离陆地,船舶只能依靠自己的力量,应对各种紧急情况,才能避免事故的发生和扩大。我们总结了180条船舶在航行中的各种可能的应急事件以及处理措施,包括船舶柴油机、辅机系统、电站、锅炉、舵机的典型机损事故应急处理办法,柴油机、锅炉、舵机、电气设备的预防性检查内容,防火、防爆、防冻、中毒、触电的防范措施,近海和

港口防污染措施，弃船、战区、冰区、海损的应急工作内容，并运用计算机数据库编程技术，编制了“船舶应急事件处理”软件。

三、设备的状态监测及故障诊断

设备的状态监测及故障诊断技术在陆地的厂矿企业就已经得到了广泛的应用，在船舶动力装置方面也一直受到关注。但船舶动力装置又是一个集机、电、热、液为一体的复杂系统，故障激发源多，热工参数量大，关系错综复杂，且受到船体状况、航行条件、主机运行工况等因素的影响，要综合利用各种热工参数进行综合诊断难度很大。船舶机舱设备包括主机、副机、发电机、泵浦、电动机、应急发电机组、输配电设备、分油机、空调设备、伙食冷藏设备、锅炉、空压机（辅助设备）、（环保）生活污水处理装置、焚烧炉、油水分离器等。如此多的设备，它们的日常维护显得十分繁重。只有预先检测其存在的问题，及时采取维护措施，这样才能保证船舶设备安全、经济地运行。

我们根据船舶动力装置的工作原理和热力系统的层次关系，以主机为核心，采用分类诊断模型，建造了简便、实用的船舶机舱状态监测系统。船舶主机作为船舶动力装置的核心，其状态不仅受其自身部件的影响，还受到其它系统的制约如图 4 所示。因此，只要进行恰当的划分，并选择合理的层次诊断特征参量，可以迅速了解整个系统的运行状态，从而大大提高监测效率。我们以 COSCO 集团的 6 艘 5250 箱位的集装箱船为例，结合中国船级社钢质海船入级建造规范，确定了各系统的监测参数和监测界面，图 4 是船舶电站系统的部分监测参数。

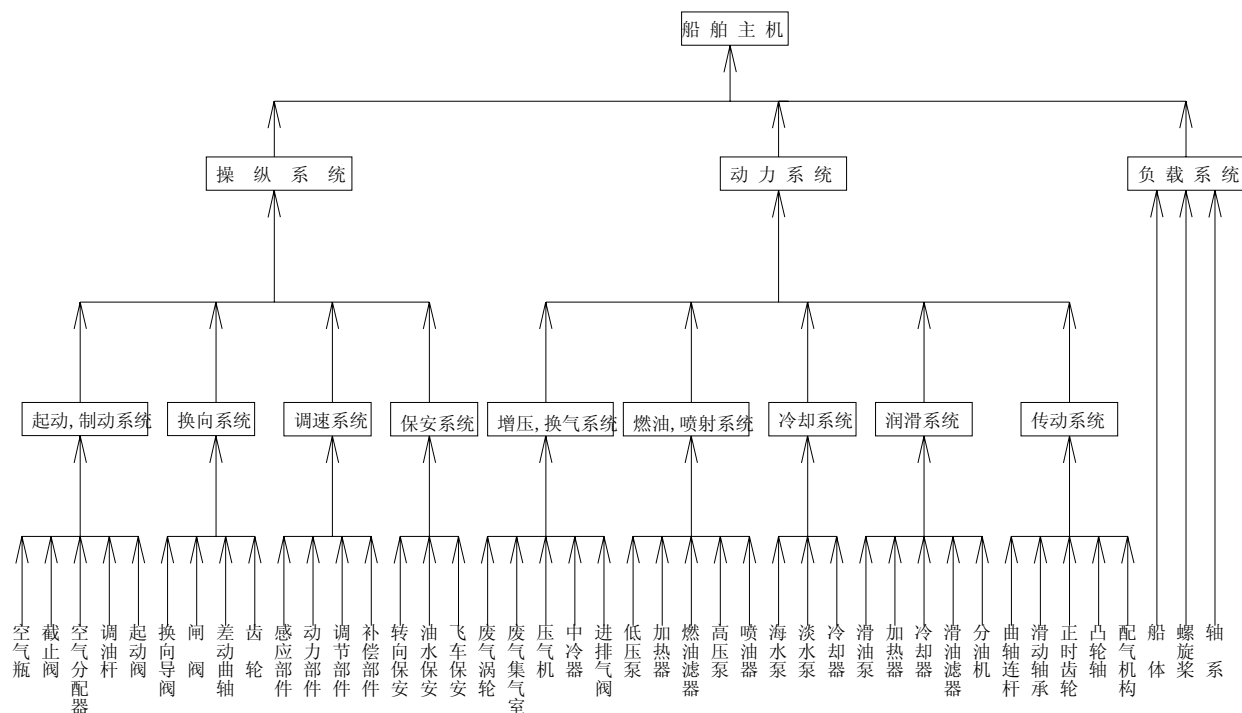


图 4 船舶动力装置关系图

表 4 电站系统的部分监测参数

报警内容	报警限值	单位	报警类别
主汇流排电压	H 400	V	1 级
主汇流排频率	H 61.5	Hz	1 级
发电机功率	H 1000	kW	2 级
发电机电流	H 1600	A	2 级
发电机频率	H 55	Hz	2 级
发电机电压	H 400	V	2 级
发电机定子绕组温度	H 150	°C	2 级
发电机跳闸	TRUE	/	2 级
发电机自动同步失灵	TRUE	/	2 级

主配电板 440V 绝缘	L 0.12	M Ω	2 级
主配电板 220V 绝缘	L 0.1	M Ω	2 级
应急配电板 440V 绝缘	L 0.5	M Ω	3 级
应急配电板 220V 绝缘	L 0.1	M Ω	3 级
副机高温冷却水进口压力	L 2.50	Kg/cm ²	3 级
副机高温冷却水出口温度	H 105	°C	3 级
副机滑油进口压力	L 3.0	Kg/cm ²	3 级
副机滑油进口温度	H 90	°C	3 级
副机曲柄箱油雾浓度	H 95	%	3 级
副机滑油进口压力	H 4	Kg/cm ²	3 级

四、船舶事故的人因失误分析

船舶复杂的人-机-环境系统中人为因素和机电设备两个方面是造成船舶事故的主要原因。随着科技的发展和进步，船舶的可靠性不断提高，使人为因素的影响越来越大。根据国际海事组织的统计分析，80%以上的船舶事故均是人因失误所致，这一点也已经成为海运界的共识。

在船舶事故中，人因失误是一个比较复杂的故障源，定量评价人的可靠性的方法兼受心理、生理、时间、空间的影响，人的行为是其行为形成因子（P与F）集合的函数。按照一般的可靠性理论可知，衡量人机系统优劣的重要因素是其可靠度（可靠性的度量） R_s ，它与机器的可靠度 R_m 和人的操作可靠度 R_h 的关系式为：

$$R_s = R_m \times R_h \quad (1)$$

机器可靠度在产品生产制造时就已确定了，在其可靠性使用期限内可作为人机系统的不变量。所以，人机系统的可靠度随人的操作可靠度的变化而变化。例如，某人机系统中机器的可靠度 $R_m=100\%$ ，（但实际上是没有这么高的），人的可靠度为 44%，则这个人机系统的可靠度为：

$$R_s = R_m \times R_h = 100\% \times 44\% = 44\%$$

而且，人的可靠性对人机系统可靠性的影响往往会更大一些。如人机系统的误差 δ_s 与人的误差 δ_h 及机器的误差 δ_m 的关系式为：

$$\delta_s^2 = \delta_h^2 + \delta_m^2 \quad (2)$$

表 5 人、机性能对系统性能的影响。

方案类型	人的误差	机器的误差	系统误差	误差减少	性能提高 (%)
原方案	20	10	22.36	—	—
第一改进方案	20	0	20.00	2.36	10.5
第二改进方案	10	10	14.49	7.87	35.1

由表 5 可知，机器的失误即使全部减为零（当然这在工程实现上要付出巨大代价），系统的整体性能也只能提高 10%左右。但当人的失误减到 10 后，系统的整体性能就可提高到 30%多。因此，人的可靠性，势必直接影响到整个人机系统的可靠性。从这个角度来看，对于造成船舶机损事故的研究，进行人为因素的分析非常重要。

船舶既处在海洋、江河、港湾等宏观环境里，它本身内部又有许多中观、微观环境；船舶既为人所操纵，船员又以船舶为其工作、生活的空间。因此可以说，船舶是一个典型的复杂的人-机-环境系统，正是这些特有的、复杂的环境构成的心理和行为方式成为船舶机损事故发生的源泉。

分析表明，船舶事故的原因主要有：（1）心理压力，有不安定、不安全感；（2）生活环境不稳定，没有固定的节假日。生活环境变化，船舶摇晃、振动、噪声的影响；其中

高噪声会导致：

- 心算速度降低；
- 反应时间延长；
- 记忆力减弱；
- 思路破坏，遗漏和差错增加。

强振动易导致：

- 注意力分散；

- 易疲劳；
 - 休息不安宁。
- 高温 (>30℃)、污染可引起：
- 耐受力和工作效率下降；
 - 精神过早疲劳（有强烈气流时）；
 - 热量散失过多，有害健康。

沉重的工作环境主要是由于：

- 单性世界的枯燥、单调；
- 生活天地固定、狭小；
- 长期固定不变的职能和角色；
- 工作、生活、娱乐区分不明显；
- 没有社交活动；
- 跨时区，生活节律紊乱；
- 运动不足，使身体素质下降。

当船上人员的能力低于成功完成任务所需要的能力，则会发生人为错误。这可能是由于缺乏能力，更为普遍的是因为当时的能力遭受不利的情况的妨碍。人为失误主要包括：

个人因素：

- 减小能力，例如减小视力或听力；
- 缺乏积极性，例如由于缺乏做好工作的刺激；
- 缺乏能力，例如缺乏航海技艺，对设备不熟悉，船上用语不流利
- 疲劳，例如由于缺乏睡眠或休息，进食不规律；
- 紧张因素。

组织和领导因素：

- 不恰当的船舶管理，例如不恰当的工作监管，缺乏工作的协调配合，缺乏领导；
- 不恰当的船东管理，例如航线和程序不合适，缺乏维护用的物资，缺乏安全操作用的物资，船舶组织的不恰当重复；
- 不恰当的人员配备，例如船员太少，船员未培训；
- 不恰当的程序，例如航行、机舱操作、货物装卸、维修、应急准备。
- 任务复杂性和任务负荷，即任务太重而难做，或任务太轻而引起厌烦；
- 对任务不熟悉；
- 任务目标不明确；
- 不同的任务竞相引起注意。

船上工作条件：

- 来自例如：噪声、振动、海上运动、气候、温度、有毒物质、恶劣的环境负荷、夜视等的人体的压力；
- 人类工程条件，例如不适用的工具，不适用的照明，不合适的或意义不明的资料、不良设计的人—机接口；
- 社会因素，例如通信不畅，缺乏合作；
- 环境条件，例如能见度受限，交通密度高，航道受限。

因此，要减少人为失误，保证船舶运输安全，应该注意以下几个方面：

(1) 管理系统：(a) 适时评价和始终保持管理方法本身的科学合理。政府和船公司均应建立和运行安全管理系统，将“人(M)-机(M)-环境(E)-管理(M)”系统的要素及其关系置于有效的控制之下；建立、运行和保持有效的应急反应体系，包括文件、人员及组织、应急设备和应急通信系统；完善海事统计、调查、分析、处理、公布、纠正制度；对MMEM系统各要素及其任何组合采用适当的评价技术；健全国内海事立法体制并依法行政；(b) 在从事的一切管理活动中促进安全文化和环境保护意识；确保有效地统一履行IMO的海运安全和环境保护标准；避免制定过多的管理规则；加强与IMO的整体性技术合作。

(2) 管理与人：全面重视人的因素。建立从业人员质量保证体系，控制人为失误，包括规范船员及公司相关人员的职业资质和行为质量，提高船旗国海事官(FSCO)和港口国检查官

(PSCO) 的素质并规范其职业资质和行为；积极在陆地采用模拟仿真技术和案例训练手段提高船员的操作技能和处理疑难问题的能力。

(3) 管理与机：保证船舶检验规范和检验行为的质量，积极采用有利于航行安全的新技术和新设备，特别是可靠性好的智能技术；加强对船舶技术状况的安全监督；保证对危险性大和安全要求高的船舶、危险度高的货物运输提供有效的安全保障；建立统一的船舶状态评价和船舶退役标准。

(4) 管理与环境：改善船舶运作环境。提供必要的船舶定线制度；提供良好的航道、航标、导航和定位条件；提供适当的航海图书资料、气象水文信息、航道信息；提供充分的区域交通状况信息；建立必要的 VTS 系统；对妨碍航行安全的浅滩、礁石、水道、恶劣天气、异常水流等予以充分标识和对船舶及早提供充分的警示，保证船上船员具有适当的工作和生活环境。

五、船舶运输的安全状态评估

安全意味着远离危险和事故，船舶运输安全的直接目标是避免进入临近事故状态（险情）。了解船舶运输的安全状态，可以预测或及早发现威胁和危险，以便消除和控制事故隐患，避免人的违章操作和机器的不安全状态。只有这样，才能从本质上有效地避免事故。

安全评估方法是以数据统计为基础，建立评估对象的影响因素集，并确定它们的影响程度等级和权重实施计算。通过系统工程的方法，考察各系统组成要素的相互作用以及对船舶事故发生发展的影响，做出对整个船舶事故的安全性能评价。

船舶人机系统包括“硬件”和“软件”两大部分。船舶“硬件”（即技术和工程系统）是整体系统的中心，“硬件”整体地与“软件”（即乘客和船员）相关。而软件是人行为的函数，“软件”与组织和管理基础以及有关船舶、船队操作、维护和管理人员相互影响。这些系统与外部环境有关，受到航运界利益各方和公众压力和影响的支配。这些系统中每方面都受其他方面的动态影响。

一般来说，构成综合安全评估问题的要素有：（1）评估指标。每个设备的运行状况可用一个向量 x 来表示，其中的每个分量 x_m 都从某一个侧面反映设备的现状；（2）权重系数。相对于某种评估目的，评估指标之间的相对重要性是不同的，而评估指标之间的这种相对重要性的大小，可用权重系数来刻画，若 w_j 是评估指标 x_m 的权重系数，一般应有 $w_j \geq 0$ ($j = 1, 2, \dots,$

m)， $\sum_{j=1}^m w_j = 1$ ；（3）综合评估模型。所谓综合评估模型，就是指通过一定的数学模型或算法将多个指标值“合成”为一个整体性的综合评估值。也就是说，在获得某个设备的评估指标值 $\{x_m\}$ ($m = 1, 2, \dots, n$) 的基础上，如何选用或构造综合评估函数 $y = f(w, x)$ ，式中 $w = (w_1, w_2, \dots, w_m)^T$ 为指标权重向量， $x = (x_1, x_2, \dots, x_m)^T$ 为系统的状态向量。

综上所述，综合评估的一般步骤是：①明确评估目的；②确定被评估对象；③建立评估指标体系（包括收集评估指标的原始值、评估指标的若干预处理等）；④确立与各项评估指标相对应的权重系数；⑤选择或构造综合评估模型；⑥计算系统的综合评估值并进行分类。

（1）评估指标的确定

以船舶机舱为例，我们将其分为船舶电力系统、船舶推进系统、船舶辅助机械和安全设备四大部分，每一个部分的安全评估都离不开“人、机、环境、管理”四个因素。因此，对船舶某一设备的安全评价指标就可以是：①不同类型的工作人员（指业务素质、安全意识、生理保健，其影响因素有技术职务、任职时间、心理和生理状态）；②设备机械状态（机器的运行参数记录、已使用时间/正常寿命、曾经发生故障时间/正常使用时间）；③环境状况（指工作环境和海上自然环境，其影响因素有船龄、船型、船舶摇摆、航区、值班时间、机舱温湿度、机舱照明、机舱振动和噪声）；④公司和船舶的管理水平（其影响因素包括安全教育、安全管理、安全组织、规章制度、预案演练等），进而可以得出它们各自的安全度分值（每个评价指标的安全度分值满分为 100）。

人的因素，一般来说有经验的轮机人员，其得分为 80~100；一般轮机人员，其得分为 60~80；有经验的机工，其得分为 40~60；一般的机工，其得分为 0~40。船员生理和心理状态可以按 SCL-90 的人体生理和心理评估标准评分。人的因素总的评分模型中可参照表 6 进行总体计算：

表6 人的因素评估标准

影响因素	业务技能（工作时间）	生理与心理
各项得分	x_1^1 ，该项总分 100	x_1^2 ，该项总分 100
得分计算公式	$x_1 = 0.6 \times x_1^1 + 0.4 \times x_1^2$	

设备机械状态可以分为已使用时间/正常寿命、曾经发生故障时间/正常使用寿命、当前运行参数三个大方面。已使用时间/正常寿命，当已使用时间/正常寿命 <0.4 ， x_2^1 得分 70~100；当 $0.4 < \text{已使用时间/正常寿命} < 0.8$ ， x_2^1 得分 40~70；当已使用时间/正常寿命 >0.8 ， x_2^1 得分 0~40；中等，其得分为 0~40。曾经发生故障时间/正常使用寿命，当曾经发生故障时间/正常使用寿命 <0.4 ， x_2^2 得分 70~100；当 $0.4 < \text{已使用时间/正常寿命} < 0.8$ ， x_2^2 得分 40~70；当已使用时间/正常寿命 >0.8 ， x_2^2 得分 40~70。机器当前的运行记录可根据所选的状态监测参数设定，按照监测等级分别给出该项 x_2^3 得分为 95、75、55、35、15。另外，安全设备的评分可参照中国船级社安全设备评定等级进行。机器运行记录具体评分模型中可参照表 5-3 进行总体计算：

环境状况，按船龄，超过 15 年的得分不超过 10 分，超过 10 年而低于 15 年的得分不超过 50 分，超过 5 年而低于 10 年的得分不超过 80 分，低于 5 年的得分为 100 分。对于航行区域，当航行区域是港区、近港区或靠近海岸时，该项得分 50；当航行区域是大洋或远离海岸时，该项得分为 80。白班或夜班，当责任人处在白班时，得分为 100，处在夜班时，得分为 50。海况，当海况恶劣如海浪大，船体摇晃剧烈，该项得分为 0~20；当海况较好时，风浪较小，船体摇晃不大，该项得分为 20~60；当海况很好时，如天气晴朗、风平浪静，船体轻微摇晃，该项得分为 60~100。具体评分过程中可参照表 7 进行总体计算：

表7 环境状况的评估标准

影响因素	航行区域	白班或夜班	海浪或晴朗
各项得分	x_3^1 ，该项总分 100	x_3^2 ，该项总分 100	x_3^3 ，该项总分 100
得分计算公式	$x_3 = 0.3 \times x_3^1 + 0.5 \times x_3^2 + 0.2 \times x_3^3$		

公司和船舶的管理水平包括于公司的人事管理、海务管理、机务管理和船舶机舱的技术管理。公司的管理和机舱的技术管理的评分可参照相关的标准^[1]进行。

(2) 权重系数的确定

现假设某一设备的各评估指标的权重系数分别为 w_1, w_2, \dots, w_j ，且 $\sum_{j=1}^m w_j = 1$ 。现将这 j 个权重系数进行两两比较判断，比较判断的全部结果可写成矩阵形式即：

$$A = \begin{pmatrix} \frac{w_1}{w_1} & \frac{w_1}{w_2} & \Lambda & \frac{w_1}{w_m} \\ \frac{w_2}{w_1} & \frac{w_2}{w_2} & \Lambda & \frac{w_2}{w_m} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{w_m}{w_1} & \frac{w_m}{w_2} & \Lambda & \frac{w_m}{w_m} \end{pmatrix} = A (a_{ij}) \quad (3)$$

若用权重向量 $w = (w_1, w_2, \dots, w_m)^T$ ，右乘判断矩阵 A ，则得矩阵 A 的特征方程：

$$Aw = m w \quad (4)$$

式中 m 为矩阵 A 的特征值。根据线性代数的知识，通过求解特征值问题 (5-2) 式，可得判断矩阵 A 的与特征值 m 相对应的特征向量 $w = (w_1, w_2, \dots, w_m)^T$ ，并将其归一化即得这个设备的各权重系数 w_j ($j = 1, 2, \dots, m$)。

判断矩阵 A 中的元素 a_{ij} 表示指标 x_i 与指标 x_j 关于某评估目标的相对重要性程度之比的赋值, 这些赋值的根据或来源, 可以由决策者直接提供, 或由决策者同分析者对话来确定, 或由分析者通过各种技术咨询而获得, 或者通过其他合适的途径来酌定。一般地, 判断矩阵应由熟悉问题的专家独立地给出。 a_{ij} 的赋值标准可参考表 8。

表 8 a_{ij} 的赋值标准

赋值 (w_i/w_j)	说明
1	表示指标 x_i 与 x_j 相比, 具有同样重要性
3	表示指标 x_i 与 x_j 相比, 指标 x_i 比指标 x_j 稍微重要
5	表示指标 x_i 与 x_j 相比, 指标 x_i 比指标 x_j 明显重要
7	表示指标 x_i 与 x_j 相比, 指标 x_i 比指标 x_j 强烈重要
9	表示指标 x_i 与 x_j 相比, 指标 x_i 比指标 x_j 极端重要
2、4、6、8	对应以上两相邻判断的中间情况
倒数	指标 x_i 与 x_j 比较得判断 a_{ij} , 则指标 x_j 与 x_i 比较得判断为 $a_{ji}=1/a_{ij}$

我们曾经汇总了一个关于不同类型的工作人员 X_1 (其权重系数为 w_1)、机器的运行记录 X_2 (其权重系数为 w_2)、环境状况 X_3 (其权重系数为 w_3)、公司的管理水平 X_4 (其权重系数为 w_4) 这四个评价指标权重两两比较判断值, 如下:

$$\begin{aligned} \frac{w_1}{w_2} &= 3 & \frac{w_1}{w_3} &= 6 & \frac{w_1}{w_4} &= 8 \\ \frac{w_2}{w_1} &= 1/3 & \frac{w_2}{w_3} &= 5 & \frac{w_2}{w_4} &= 7 \\ \frac{w_3}{w_1} &= 1/6 & \frac{w_3}{w_2} &= 1/5 & \frac{w_3}{w_4} &= 3 \\ \frac{w_4}{w_1} &= 1/8 & \frac{w_4}{w_2} &= 1/7 & \frac{w_4}{w_3} &= 1/3 \end{aligned}$$

由式 (3) 可写成下列矩阵:

$$A = \begin{pmatrix} \frac{w_1}{w_1} & \frac{w_1}{w_2} & \frac{w_1}{w_3} & \frac{w_1}{w_4} \\ \frac{w_2}{w_1} & \frac{w_2}{w_2} & \frac{w_2}{w_3} & \frac{w_2}{w_4} \\ \frac{w_3}{w_1} & \frac{w_3}{w_2} & \frac{w_3}{w_3} & \frac{w_3}{w_4} \\ \frac{w_4}{w_1} & \frac{w_4}{w_2} & \frac{w_4}{w_3} & \frac{w_4}{w_4} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 3 & 6 & 8 \\ 1/3 & 1 & 5 & 7 \\ 1/6 & 1/5 & 1 & 3 \\ 1/8 & 1/7 & 1/3 & 1 \end{pmatrix} = A (a_{ij})$$

又由式 (4), 求出矩阵 A 的特征值, 即为这四个评价指标的权重系数:

$$w_1=0.4969, w_2=0.2636, w_3=0.0797, w_4=0.0396 \quad (5)$$

(3) 综合评估模型的确定

船舶“人、机、环境、管理”是海上安全的四大基本要素, 作为船舶设备安全评估的四项指标, 这几项评估指标间是相互独立的, 各评估指标对综合评估水平的贡献彼此是没有什么影响的。这样, 线性加权综合法就是应用线性模型:

$$y = \sum_{j=1}^m w_j x_j \quad (6)$$

来进行综合评估的。式中 y 为系统 (或被评估对象) 的综合评估值, w_j 是与评估指标 x_j 相应的权

重系数 ($0 \leq w_j \leq 1 (j=1, 2, \dots, m), \sum_{j=1}^m w_j = 1$)。

借鉴中国船级社 CCS 的文件，船舶状态评估可以按下述标准分成 5 个等级：

一级：最佳状态，综合评估值 y 在 80~100 分之间。

二级：正常状态，综合评估值 y 在 60~80 分之间。

三级：轻微不良状态，很容易改进，综合评估值 y 在 40~60 分之间。

四级：不良状态，在航途中或下一港口可由船员修好，综合评估值 y 在 20~40 分之间。

五级：最差状态，超出船员自修能力，要求开航之前修好，综合评估值 y 在 0~20 分之间。

船舶安全评估系统将船舶机舱机电系统划分为船舶电站、辅助系统、船舶推进和安全设备四个部分如图 5 所示，建立了这四大系统的机舱设备状态监测数据库，可根据监测参数的变化和数据库的知识给出系统的运行状态，并根据上述的评估模型，对该系统的包括轮机管理人员、机舱环境和设备在内的人机系统给出一个安全评估指标。必要时，可以输入定时采集的机电设备表面敏感测点的振动信号和滑油油液分析参数。

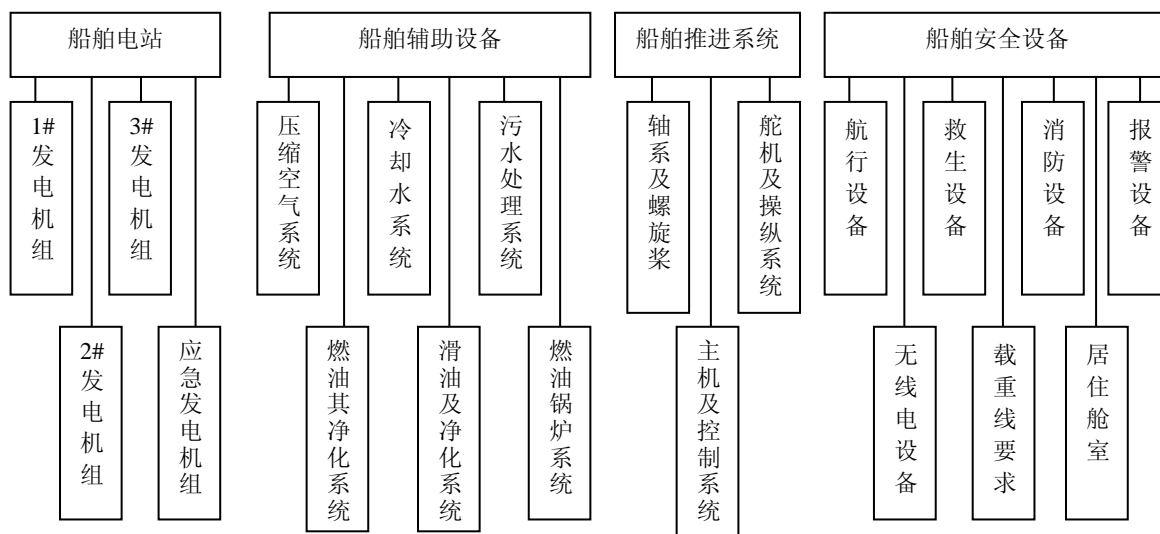


图 5 船舶机舱机电系统的构成

六、研究设想

到目前为止，我们已经建立了国内最大的船舶机损事故案例库，并基本上完成了船舶机舱安全评估系统的结构框架，包括振动信号输入、油液参数输入、船员心理评估、设备状态监测、备件管理、维修管理、报表管理、机损案例库、应急事件处理知识库和故障树分析 10 大模块。该系统的成功开发和应用，对减少我国船员在船舶技术管理中的人因失误，促进船舶运输的管理现代化，提高船舶运输效率，保证船舶运输安全，保护海洋环境都将具有很大的实用价值。

当然，要使该系统真正能投入实船应用，还要进行以下的研究：

- (1) 船舶机械振动信号的数据采集器的研制和振动信号的试验建模研究；
- (2) 船舶动力装置热工参数的标准建模研究；
- (3) 船舶设备状态监测及远程诊断技术的研究；
- (4) 船舶管理信息系统的标准化研究。

参考文献

- [1] 胡以怀，陈宝忠，邹建军. 船舶机损案例的人因失误分析. 中国航海，2004 年第 3 期。
- [2] 邹建军，胡以怀. 船舶机损事故中人为失误的分析. 上海海运学院学报. 2003 年第 2 期。
- [3] 马红涛，胡以怀. 船舶机舱人-机系统的安全评估. 上海海运学院学报. 2003 年第 3 期。
- [4] 陈伟炯，胡以怀. 国际海运安全策略研究. 2003 年航海学会论文集。