

引 言

一、船舶运输控制系统发展概况

船舶运输是发展历史最悠久的一种交通运输手段。有运输就有运输控制，要控制就离不开信息的接收和反馈；控制技术的进步，必伴随着运行机制的进步。由此促进船舶运输产业不断发展。

12 世纪中国指南针上船，发展了磁罗盘导航、海图应用、航路指南及天文定位导航等，使人类在船舶运输控制方面从被动转向主动，从定性转向定量，使中国的航海达到了“虽天际穷发不毛之地 无不可通之理”的境地。1798 年瓦特发明了蒸汽机，不久用它作为船舶动力，其调速器就应用了信息反馈原理，车速变快或变慢时，飞块的离心力作用使进汽阀门关小或开大，开创了船舶动力机械的自动调节。1837 年莫尔斯发明了无线电报，在此基础上船舶通信和船队控制开始发展。

20 世纪下叶，随着海运贸易的发展，航运竞争日趋激烈，对船舶运输的安全性、经济性和环保性能等的要求不断提高，船舶运输控制技术也随之迅速发展。

50 年代 各航运发达国家为了解决船员短缺 试图减少船员 降低运输成本 提出了“船舶自动化”概念。当时主要是将船舶机舱各种机械设备的集合，作为控制对象，研究开发机舱自动化系统。1961 年日本首先推出机舱集中控制系统，使万吨级远洋货船船员定额由 50 余人减少到 30 余人。1964 年丹麦首次实现机舱夜间 16h 无人值班，船员定额进一步减少到 20 余人，并加强了船舶机械维护保养，提高了轮机设备完好率和船舶营运率，经济和社会效益显著。此后，无人值班机舱成为船舶自动化的典型设计。

70 年代后期，船舶微机监控系统开始在船上应用。80 年代中期船舶微机监控向网络化发展。集成驾驶系统、货运监控系统和船舶管理信息系统与机舱自动化系统一同组成船舶微机控制、监测、管理局域网。德、美、日等国家发展了“未来型船舶”其主要特点为全船自动控制系统联成局域网；发展集成驾驶系统，实现一人驾驶，建立船舶操纵中心；在网络高层发展船舶管理信息系统，建立船舶管理中心；采取驾机两用船员编制。利用这样的控制系统，船员进一步减少，以大型集装箱船为例，船员定额减少到约 10 人。

船舶运输产业界还意识到，不仅需要发展单船控制——船舶自动化 以提高运输效益 更需要加强船队的信息化控制，在更大范围确保运输安全，提高运输效率，降低运输成本，提高揽货竞争力，以获得更大的效益。因此，船舶运输控制，在发展单船控制的基础上进一步向船队控制发展。

90 年代，由于信息技术在生产、经营、管理等过程中的作用日益增长，并由于 GMDSS 的实施，使建立船岸一体化管理成为可能。船舶运输控制系统在信息技术革命新形势下进入了最新发展阶段：在单船控制方面，进一步发展了一人驾驶系统，不仅用于白天航行，并延伸到夜间航行；采用电子海图显示信息系统；发展人工智能在驾驶避碰决策及机械故障诊断中的应用；

配置 INMARSAT C 标准船站，进行数据通信。在船队控制方面，发展了船岸数据通信网、岸上船舶气象导航服务、船队备件管理系统、船队故障诊断专家系统、电子邮件应用以及 EDI 在运输中的广泛应用等。

80 年代初，交通部上海船舶运输科学研究所自行研究开发了船舶无人值班机舱自动化系统及船舶微机监控系统，并不断采用先进的微机芯片，从 Z80、8088、8031、8098 至 80X86 研究开发符合船用条件的微机监控系统。90 年代开发了船舶微机实时监控局域网，将船舶主机遥控、电站自控及动力损管等系统联网。至今已研制了机舱自动化系统数百套，在沿海、远洋及江河各类舰船上应用。在船舶驾驶方面，研究开发了一些定位、导航、助航设备，如高精度自动定位导航成图系统、船用雷达、陀螺罗经、多普勒计程仪等。在船队控制方面，研究开发了全球船位动态标绘及搜救避台辅助决策系统、进行了国际集装箱运输系统（多式联运）工业性试验；远洋、沿海航运企业研究开发了各有关的船队调度管理信息系统。在箱务管理方面，中远总公司引进美国 GE 提供的集装箱管理系统（EMS）及通信网络，总公司箱管中心通过 EMS 与国内外 6 个箱管分中心及航线经营人进行信息交换和调箱管理。中远 EDI 传输系统在国外采用 GE 信息服务公司的 EDI★Express 系统，通过该系统将中远干线船的舱单信息、集装箱船的船图信息等传送到相关的港口及贸易伙伴。中远集团的企业管理广域网应用系统已大体形成，正成为支持该国际性大集团公司正常运转的基础设施之一。

1993 年是我国从发展船舶自动化系统明确转向发展船舶运输控制系统的关键性的一年。根据 1992 年国家计委关于国家工程研究中心管理办法，于 1993 年交通部上海船舶运输科学研究所提出了关于建立“船舶运输控制系统国家工程研究中心”的项目建议书，作为世界银行贷款科技发展项目，经世行官员视察评估和国家计委组织的国内专家评审，并由交通部上报国家计委批复认可。交通部上海船研所继而又编写了“船舶运输控制系统国家工程研究中心”可行性研究报告，于 1994 年通过国家计委委托中国国际工程咨询公司组织的专家评审，并得到国家计委批复认可。该项目于 1996 年 2 月 12 日正式生效，目前正按 1996 年国家计委、财政部关于世行贷款科技发展项目实施管理办法积极实施。

依托交通部上海船研所建立船舶运输控制系统国家工程研究中心具有下列重要意义：

其一，首次开展船舶运输控制技术的国家级工程化研究。我国船舶运输控制技术不断发展，特别在船舶自动化系统方面已取得了一系列科研成果，但其转化为生产力尚处在试验室生产阶段，未能转化为规模生产技术。现建立船舶运输控制系统国家工程研究中心开展工程化研究和验证，就是要对该领域的科研成果进行标准化、系列化、模块化及系统集成研究，形成先进的规模生产技术。由于该中心属国家级，随着经营机制的优化，它将成为一个能吸收全国各有关单位船舶运输控制科技成果进行后续工程化研究开发的通道，同时争取吸收国外有关技术进入该通道；并对所开发的技术建立符合 ISO、IEC 等国际标准的我国标准，其系列及模块等将具有广泛的通用性。中心除向高技术产业转让工程化研究开发的技术外，还可将中心开发的少量验证产品投入市场，以求中心本身运行的良性循环和发展。

其二，首次提出船舶运输控制系统新学科概念。根据我国加快国民经济信息化进程的方针和交通部有关提高运输管理水平、安全管理水平和运输装备水平的发展规划要点，交通部上海船舶运输科学研究所分析了船舶自动化和船队管理的相关性和发展趋势，从宏观上归纳了总体系统，从微观上分解了多层次的子系统，首次提出“船舶运输控制系统”新学科。通过船舶运输控制系统国家工程研究中心的建立，该学科体系正在不断地深入研究和实际开发中。

二、 学科定义和研究范围

船舶运输控制系统是对船舶运输过程有关的信息进行传输、接收、存取、变换和反馈 并不断对过程进行调整和优化的控制管理一体化的系统。它是一个大范围、多层次、多变量、结构复杂和功能综合的大系统。其中船队控制系统主要包括企管业务网和船岸通信网，实现船队控制管理功能；单船控制系统是一个船舶自动化局域网，并通过 GMDSS 通信系统 以单船作为一个结点，进入船岸通信网，实现船岸一体化管理。船舶运输控制系统应用系统工程、航海、通信、计算机、机电、自动控制、运输管理、船货代理、码头港务、商贸、金融及保险等专业技术 推动着船舶运输各分过程和总过程的发展。该系统在客观世界中又是一个开放系统，它与外部世界经常进行物质、能量和信息的交换，应用信息技术和系统工程方法，使运行过程得到不断调整 不断优化 提高船舶运输的安全性、环保性能、效率和揽货竞争力 降低运输成本 以获得最大的经济、社会效益。

船舶运输控制系统作为一门学科，其学科体系应含理论基础和应用系统两大部分；后者又分船舶自动化和船队控制两种系统。总体系统所应用的专业技术作为理论基础涉及面广，其中最主要的是系统工程学，这是船舶运输各种技术业务横向联系、高度综合，从总体上进行统筹优化的科学方法论；而在各具体系统研究开发中主要应用信息技术，包括自动控制理论应用技术、计算机控制技术和管理信息系统技术。

船舶自动化系统和船队控制系统，通过船岸一体化网络，实现公司接近实时地监控整个船队。图 0-1 和图 0-2 示出船舶运输控制系统船岸一体化网络示意图和船舶运输控制总体系统框图。

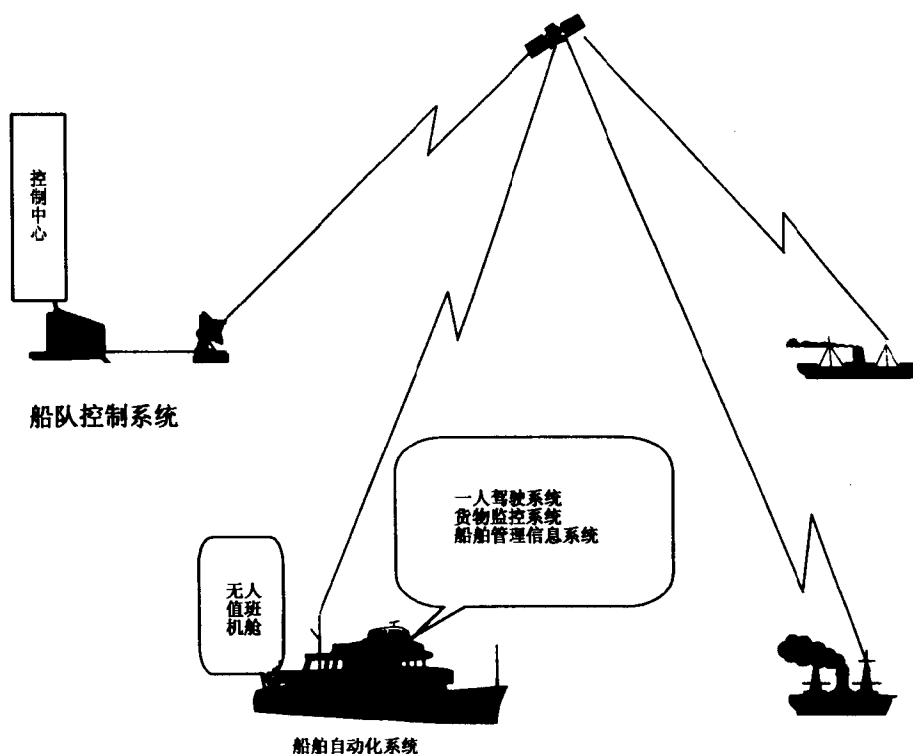


图 0-1 船岸一体化网络示意图

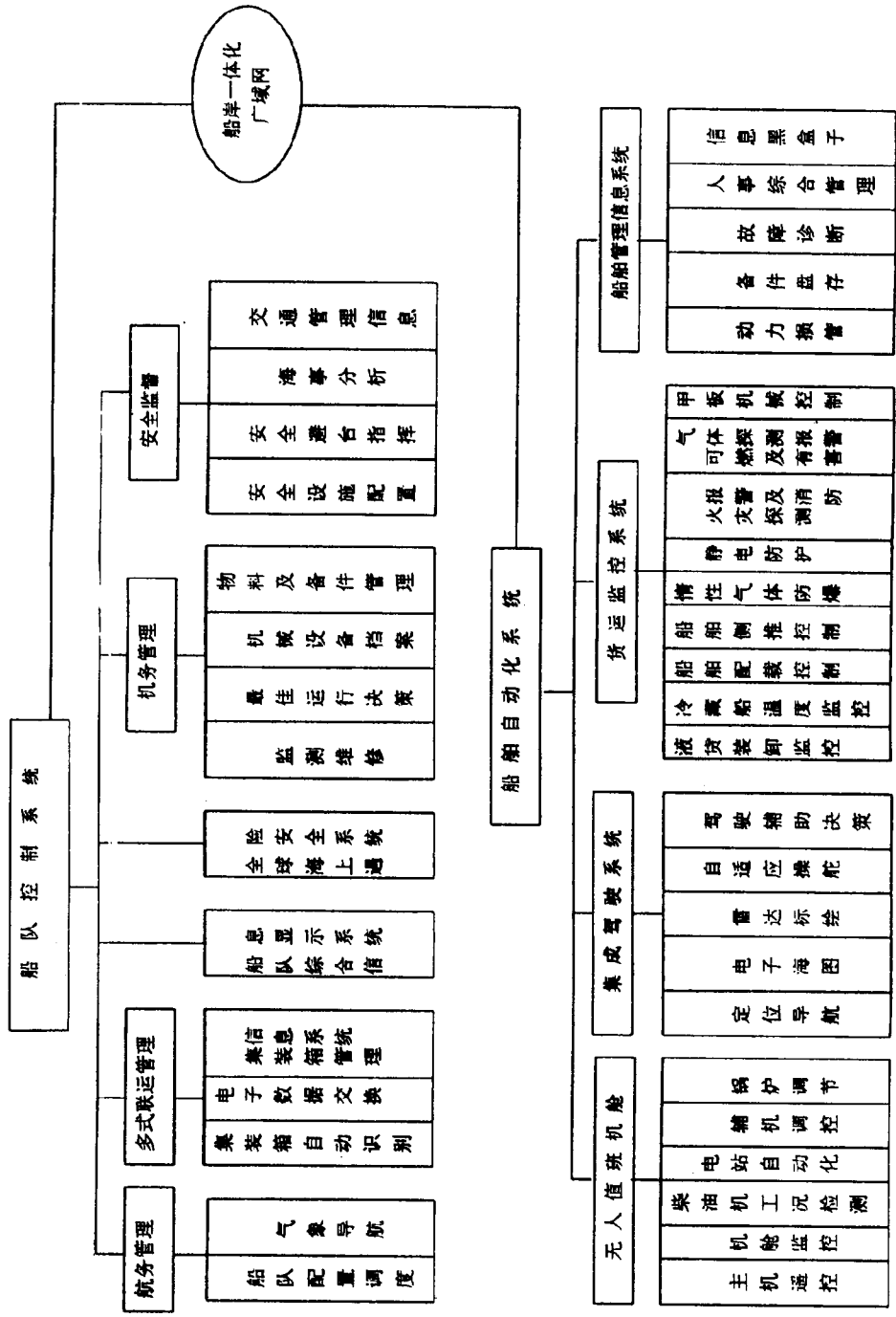


图 0-2 总体系统框图

三、标准和规范

船舶运输控制系统的研究开发 必须符合质量、海上人命安全、船舶操作安全、防污染及船舶入级等一系列标准、公约和规范。

在质量管理方面主要遵循适用于所有工业的 ISO9000 系列标准，这是国际标准组织于 1987 年正式颁发的质量保证要求和质量管理指南；对电气、电子工业主要在性能上须符合国际电工委员会 IEC 标准。

ISO9000 系列主要包括：

ISO9001 质量体系：这是设计、开发、生产、安装及服务的质量保证模式，是综合的质量标准，含 ISO9002 和 ISO9003 的要素。

ISO9002 质量体系：这是生产和安装的质量保证模式。

ISO9003 质量体系：这是最终检验和试验的质量保证模式，只适用于能用检验和试验决定的过程质量的检测和控制。

ISO9004 质量管理和质量体系要素：这是一套用来执行 ISO9001、ISO9002 和 ISO9003 要素的指导文件。

软件的质量管理和保证，于 1991 年 6 月 在 ISO9000 系列中以追加形式颁布了《ISO9000 - 3, ISO9001 在软件开发、供应和维护中的使用指南》。ISO/IEC9126 系列标准规定了软件产品的六个质量特性 功能性、可靠性、易使用性、效率、可维护性和可移植性。ISO/IEC14598 系列规定了软件质量评价管理和评价过程。

为了对 ISO9000 系列有一个大致的了解，首先必须理解其中有关质量的几个最基本的概念：

质量(quality)：这是一个广义的概念，定义为产品或服务满足明确或潜在需要的能力的特征和特征的总和，也可简明理解为“产品或服务满足需要”。

质量保证(quality assurance)：指为使人们确信某产品或服务能满足给定的质量要求所必需的全部有计划、有系统的活动。

质量管理(quality management) 指制定和实施质量方针的全部管理职能 包括策略计划、资源配备和其它与质量有关的活动。

质量体系(quality system) 指实施质量管理的组织机构、职责、程序、过程和资源。

质量方针(quality policy)：指公司或生产厂由最高领导人正式颁布的总的质量宗旨和方向，是企业总方针的一个组成部分。

国际上 要求达到质量认证和注册 需要通过下列六个步骤 内部审核确定准备就绪 公司进行预备活动；注册审核组进行文件复审；注册审核组进行评估复审；注册单位颁发证书；以及注册单位正式注册。

在美国，由美国质量控制协会(ASQC) 所属注册单位鉴定委员会(RAB) 负责进行质量认证和注册。

我国于 1993 年 1 月 1 日以 GB/T19000 系列等同采用了 ISO9000 系列。中国船级社于 1994 年 3 月 31 日获得了国际船级社协会(IACS) 正式颁发的“关于中国船级社质量体系符合 IACS QSR 质量体系要求及 ISO9001 适用条款要求”的质量体系合格证书。这说明中国船级社在开拓质量认证市场方面已得到国际权威组织的认可。

IEC 标准为电气、电子设备的系统设计、性能指标、安装要求、电磁兼容性能测试方法及等

级划分等提供了标准和依据，但无认证要求。

与船舶运输控制系统有关的 IEC 标准主要有：

IEC TC18 船舶电气设备技术委员会的标准，例如：IEC92 - 201 出版物规定的船舶配电系统电压、频率采用的基础标准。其中：

标准交流低压配电系统：

3相	120V	50Hz 或 60Hz
3相	230(220)V	50Hz 或 60 Hz
3相	400(380)V	50 Hz
3相	440V	60 Hz
3相	690(660)V	50Hz 或 60 Hz
单相	120V	50 Hz或 60 Hz
单相	230V	50 Hz或 60 Hz

括号内的数值为目前尚采用的数值。

标准交流高压配电系统：

3相	3000V	50 Hz 或 60 Hz
3相	3300V	50 Hz 或 60 Hz
3相	6000 V	50 Hz 或 60 Hz
3相	10000V	50 Hz 或 60 Hz
3相	13800V	50 Hz 或 60 Hz

标准直流配电系统：

24V 110V 220V

船舶交流配电系统接岸电时，当岸电频率低于用电设备额定频率时，则应降低供电电压。

供电电压 = 用电设备电压 × $\frac{\text{岸电频率}}{\text{用电设备频率}} \pm 10\%$

当 440V/60Hz 系统连接到 380V/50Hz 岸电时，一些设备将不能运行。但是绝大部分重要设备 诸如 电动机、继电器、照明设备 以及大部分电子设备 如监测报警装置、雷达 其数据处理装置可能不能很好工作) 和通信设备等仍能在稍减小容量情况下满意地运行。

对交、直流配电系统的质量要求，均有明确规定。

IEC92 - 502 出版物为油船电气设备标准。

IEC92 - 504 出版物为控制和测量仪表标准。

IEC533 出版物“船舶电气、电子设备的电磁兼容性”，对所有在船舶电磁环境中工作的电气、电子设备，提出了干扰抑制通则和安装措施，以达到所要求的 10kHz ~ 30MHz 范围的电磁兼容性 (EMC)，提供了标准的测试方法和指标要求；并将船舶电气、电子设备按其电磁干扰的敏感度或产生电磁干扰的能量分成五类：

A类：在窄带或正弦射频电压工作的无线电通信、定位、导航及电视分配系统。

B类：产生宽带连续谱干扰电压的半导体整流设备、大功率变换器、发电机、甲板机械、家用电器和荧光灯。

C类：用脉冲能工作的雷达和声纳。

D类：产生瞬态电压、电流的开关装置、控制机构、自动操舵装置、陀螺罗经、厨房恒温箱和加热设备。

E类：采用模拟和数字技术的自动控制电路。

对上述五类设备，分别提出了安装实施准则和极限，该极限值包括电源端子干扰电压电流极限、场强耦合衰减极限及抗干扰度极限等。并提出了测量方法和干扰抑制技术，以及对干扰抑制的元器件，包括电容、电感、滤波器及熔断器等的要求。

IEC TC65 工业过程测量和控制技术委员会，自 1984 年以来陆续出版的 IEC801 系列电磁兼容性 (EMC)标准，对各种电磁干扰 (EMI)考虑比较全面，测试各种抗扰度 (Immunity) 的要求更为严格，提出了试验严酷度 (Severity)概念，并对测试仪器本身的性能要求、校验和试验方法均作了详细说明。由于微电子技术、超大规模集成电路及高速元器件的发展，系统硬件越来越向小型化、低功耗、高速化和密集安装的方向发展，其电磁敏感度 (EMS)更为明显；而在周围环境中，电磁干扰日趋严重，频率范围达到 20Hz~1GHz 以上，许多干扰往往是随机的、短时的，包括瞬变在内，从不足 10ns 到几秒。该系列标准考虑到了这些情况，适用范围较广，实用性较强，因而已成为当今世界极有影响力的电磁兼容性国际标准。国际电工委员会有鉴于此，于 1992 年开始，已把它编制成 IEC 的基础标准，编号为 IEC1000—4 系列《电气和电子设备的电磁兼容性 第四篇测试技术》至今已出版了 12 种出版物，列举如下：

IEC1000—4—1 抗扰度测试 (Immunity Tests) 总论。

IEC1000—4—2 静电放电 (ESD) 的抗扰度测试。

IEC1000—4—3 射频辐射 (RF Radiated) 电磁场的抗扰度测试。

IEC1000—4—4 电快速瞬变脉冲群 (EFT Burst) 的抗扰度测试。

IEC1000—4—5 浪涌 (Surge) 的抗扰度测试。

IEC1000—4—6 由 9kHz 以上射频场感应引起的射频传导扰动 (RF Conducted Disturbance) 的抗扰度测试。

IEC1000—4—7 关于电源系统及设备互连的谐波和插入谐波 (Harmonics and Interharmonics) 的测量方法和测量仪器的导则。

IEC1000—4—8 工频磁场 (Power Frequency Magnetic Field) 的抗扰度测试。

IEC1000—4—9 脉冲磁场 (Pulse Magnetic Field) 的抗扰度测试。

IEC1000—4—10 衰减振荡磁场 (Damped Oscillatory Magnetic Field) 的抗扰度测试。

IEC1000—4—11 电压骤降、短时中断 (Voltage Dips & Interrupts) 的抗扰度测试。

IEC1000—4—12 100kHz 衰减环形波浪涌和 1MHz 振荡波 (Damped 100kHz Ringwave Surge and 1MHz Oscillatory wave) 的抗扰度测试。

国际海事组织 (IMO) 对船舶运输制订了两个强制性公约：1974 年国际海上人命安全公约 (SOLAS 公约) 和 1973 年国际防止船舶造成污染公约 (MARPOL 公约)。

SOLAS 公约全部覆盖海上安全要求，在实施中由 IMO 历届大会及其他会议不断通过修正案及大会决议等，使 SOLAS 公约不断完善。

研究开发船舶运输控制系统，必须遵守 SOLAS 公约，特别是下列有关部分。

第 II—1 章 E 部分，周期性无人值班机器处所的补充要求。

第 II—2 章 A 部分 通则 第 14 条，周期性无人值班机器处所的固定式探火和失火报警系统。

第 IV 章 1988 年修正案，C 部分 船舶要求 无线电装置 无线电设备——通则；无线电设备——A1 海区 无线电设备——A1 和 A2 海区；无线电设备——A1、A2 和 A3 海区；无线电设备——A1、A2、A3 和 A4 海区等。

1994 年 5 月 SOLAS 公约第二次外交大会审议通过新增第 IX 章 船舶安全营运管理 第 X 章

高速船安全措施 第 X I 章加强海上安全的特别措施。

第 V 章 1994 年扩大海安会 MSC 修正案增加了第 8-1 条，引入了船舶报告系统的强制要求，该系统通过无线电报告来提供、收集和交换信息，用于搜救、船舶交通管制、气象预报和防止海上污染，进入或使用报告系统的船舶必须报告其位置、识别号及其他信息，通过该系统能追踪到船舶在其航程中的航迹。

IMO“国际海员培训、发证和值班标准 STCW78 公约”1995 年修正案对船员培训、发证、船员素质提出了更高的要求。

IMO 历届大会决议涉及面广。1995 年第 19 届大会通过了 59 项决议，其中与船舶运输控制系统有关的主要有：

A·786(19) 船 / 岸联系战略计划

A·788(19) 主管机关执行国际安全管理规则 (ISM Code) 导则。

A·801(19) 全球海上遇险及安全系统 (GMDSS) 无线电服务的规定。

A·807(19) 能够进行直接打印通信的 INMARSAT - C 型船舶地面站的性能标准。

A·811(19) 用于 GMDSS 的船载综合无线电通信系统 (IRCS) 的性能标准。

A·817(19) 电子海图显示和信息系统 ECDIS 的性能标准

A·819(19) 船载全球定位系统 GPS 接收机的性能标准

上述 IMO A·786(19) 决议，关系到船岸一体化技术的发展，现摘录其原则要点：

大会认为，有关船舶和船员的国际公约均与港口的基础结构、上层建筑及操作有密切的关系。港口作为运输链的一个结点，能在提高海事安全、船舶环保及使航行便利等方面作出贡献。IMO 将在各政府的和非政府的国际组织之间进行协调，开展有关船 / 岸联系的活动，确定船、岸双方的课题领域，建立并定期更新各课题领域的目标，评估各课题领域的工作。邀请各政府成员参与船 / 岸联系战略计划，邀请各政府的和非政府的国际组织参加研究各有关问题的解决途径，指导各有关委员会的工作。

IMO A·817(19) 关于 ECDIS 的决议，引起了国际航运界很大的关注。该决议认为，ECDIS 应该是航行信息系统，它从海图数据库选出信息，综合定位传感器的数据，显示光栅航行海图，并满足 IMO 和 IHO 制订的技术规格 (试行) 只有这样才能满足 SOLAS 对 ECDIS 成为航海纸海图等效物的要求。

关于 MARPOL 公约在船舶运输控制方面的有关规定，在本套科技丛书的《船舶与港口水域防污染》一书中将有介绍，在本书中不再赘述。

船级社规范对船舶运输控制系统，如何满足船舶航行安全、系统质量和入级检验等的要求，具有指导、服务和基本保证作用。一般船级社规范均以 IMO 和国际船级社协会 IACS 的公约、规则和决议等的适用部分为主要依据制订。IACS 正式会员共有 11 个：

美国船级社 (ABS) 法国船级社 (BV)

中国船级社 (CCS) 挪威船级社 (DnV)

德国劳氏船级社 (GL) 韩国船级社 (KR)

英国劳氏船级社 (LR) 日本海事协会 (NK)

波兰船舶登记局 (PRS) 意大利船级社 (RINA)

俄罗斯船舶登记局 (RS)

联系会员 2 个：

印度船级社 (IRS) 克罗地亚船舶登记局 (CRS)

中国船级社《钢质海船入级和建造规范 1996》规定：

周期无人值班机器处所附加标志为 AUT—0；

驾驶室主机遥控、机器处所集中控制附加标志为 AUT—1。

其中第七篇轮机自动化，第三章周期无人值班机器处所附加 AUT—0 标志的自动化要求，明确规定：控制系统的控制品质要求；系统设计的故障安全原则，控制系统的独立性、检验及动力源；电子计算机系统的硬件、软件及电源的基本要求等。

中华人民共和国船舶检验局《船舶与海上设施法定检验规则》，作为法定的强制性要求，必须遵照执行。其内容分国际航行与非国际航行两大部分。

随着船舶运输控制技术的发展，规范也在不断更新。国际上，1990 年丹麦建成第一艘 24h 一人驾驶室控制的 84000t 级成品油船“Petrobulk Mars”由 DnV 入级，附加标志为 W1—OC (Watch 1—Ocean Areas and Coastal Waters)。GL 于 1991 年制订了一人驾驶入级规范，附加标志为“Nav—0”及“Nav—OC”。

此外，国际上还有各种各样的专业技术标准，条目繁多。在信息技术方面，与船舶运输控制系统有关的标准，主要有：

IEEE802.1 LAN/MAN 桥接和管理协议

IEEE802.2 逻辑链路控制协议

IEEE802.3 CSMA/CD 存取方法协议

IEEE802.4 令牌总线存取方法协议

IEEE802.5 令牌环存取方法协议

IEEE802.6 DQDB 分布式排队双总线存取方法协议

IEEE802.8 集成服务协议

IEEE802.10 LAN/MAN 安全性协议

IEEE802.12 请求优先权存取方法协议

X·25 控制分组交换网络的 CCITT 协议

X·400 控制国际电子邮件传输的 CCITT 协议

ISDN 传送语音、数据、传真及视频信号的综合服务数字网络的 CCITT 协议

OSI 开放系统互连模式数据通信的 ISO 标准

TCP/IP 美国高级研究计划署创议的传输控制协议和国际互连网络协议

10BASE—T 采用 24 号无屏蔽双绞线 波特率为 10Mb/s 的 IEEE 以太网的一种实施方案。

VHDL 甚高速 IC 硬件描述语言 IEEE 标准

IGES 基本图形转换规范，ANSI 标准

STEP 产品模型数据转换标准，ISO/IEC 标准

船舶运输控制总体系统及各子系统，包括船舶自动化系统、船岸一体化广域网及船队控制系统，以及更下层次的子系统，都必须符合上述各有关的国际性标准、公约及规范等，以达到系统的通用性和开放性。但由于船舶运输控制系统正在逐步形成，还有许多概念创新、研究开发及系统集成等工作要做，因此，至今尚未出现从总体上针对船舶运输控制系统的标准或规范。纵观科学技术的发展，总是先通过实践总结、概念创新，再实践提高，以至飞跃发展的过程。在这过程中总结出具有普遍意义的规律，在这基础上制订出标准或规范，进一步指导科学技术的发展。船舶运输控制系统，在其发展过程中同样必须制订出针对该系统本身的标准或规范，进一步促进其发展。

第一章 系统工程概念与船舶运输控制

船舶运输 (shipping) 作为一个整体, 即为一个系统 (system)。系统的观点就是统观全局的观点。从全局观点出发 应用控制论、信息论、计算机科学、运筹学、管理科学等学科知识 对船舶运输系统进行控制和管理, 达到总体系统有序、优化的方法学 (methodology) 体系, 即为系统工程学 (system engineering), 也称系统工程。首先讨论系统, 并根据船舶运输系统的性质和特点, 讨论大系统概念, 然后讨论对系统进行控制、管理的系统工程方法。

第一节 典型的大系统

一、系统

系统一词由来已久, 在各种专业和学科领域中广泛应用。但由于专业或学科的不同, 对系统表述的出发点不同, 对系统含义的解释有所不同, 因而至今还没有统一的定义。现试综合前人对系统的解释, 并考虑了较广的适用性, 提出系统的定义如下:

系统是由若干相互联系、相互作用、相互制约的要素组成的有机整体。它具有一定的结构和运动秩序, 以实现特定的功能和目标。其组成要素可以是自然物质、生态主体或人工产物, 实体或概念、静态现象或动态现象、确定因素或随机因素等。通常一个系统包括上述多种要素, 主要包括人员、设备、方法、技术和软件等。客观世界中普遍存在的系统是开放系统, 每时每刻都在与外界进行能量、物质和信息的交换。系统本身往往又从属于一个更大的系统, 因此, 所研究的系统应是在特定范围有一定边界的系统。

二、大系统概念

由于经济和社会的发展, 特别是向信息化的发展, 在工程技术、社会经济及生态环境等领域中, 出现了许多规模越来越大的系统。70年代以来, 许多控制理论和系统科学方面的专家、学者纷纷从事大系统问题研究。但由于大系统的复杂性、不确定性、不确知性、人的因素以及在较长时间系统运行过程中环境条件的变化, 使大系统难以应用传统的分析方法和控制理论进行分析、研究和控制。因而, 大系统理论至今尚未有所突破, 还要创新。这里仅讨论大系统概念。大系统具有下列共性:

- (1) 规模庞大。它包含多层次的子系统, 占有空间大、经历时间长、涉及范围广。
- (2) 结构复杂。各子系统之间的相互关系、人与人的关系、人与物的关系 以及能量流、物质流及信息流之间的关系, 形成错综复杂的结构。
- (3) 因素众多。大系统是多变量、多输入、多输出、多参数、多干扰的系统, 有物的因素、人的因素、技术因素、经济因素、自然因素等。
- (4) 功能综合。通常大系统具有多种目标, 实现多种功能。每个子系统都有其独特的功能, 而在总体上要综合多种功能, 而且综合功能应远远大于各子系统功能的总和, 实现综合性

的总体目标。

船舶运输系统，从其船队配置及航程范围之大，航次时间之长；运输系统及运输管理的层次和机构之多，各方面关系之复杂，技术、经济、社会、人为、自然及风险等因素之众多，航行及货运等控制管理功能之综合，提高揽货竞争力、安全性、经济性、先进性、环保性能、降低成本、达到最大限度盈利及信誉等目标的高度综合性，足以说明船舶运输系统是典型的大系统。

三、大系统控制的一般方法

系统工程学的对象主要是大系统，换言之，对大系统进行控制的方法属系统工程学。系统工程方法学体系，以美国电话研究中心霍尔（A. D. Hall）于 1969 年提出的三维结构具有代表性，见图 1-1。

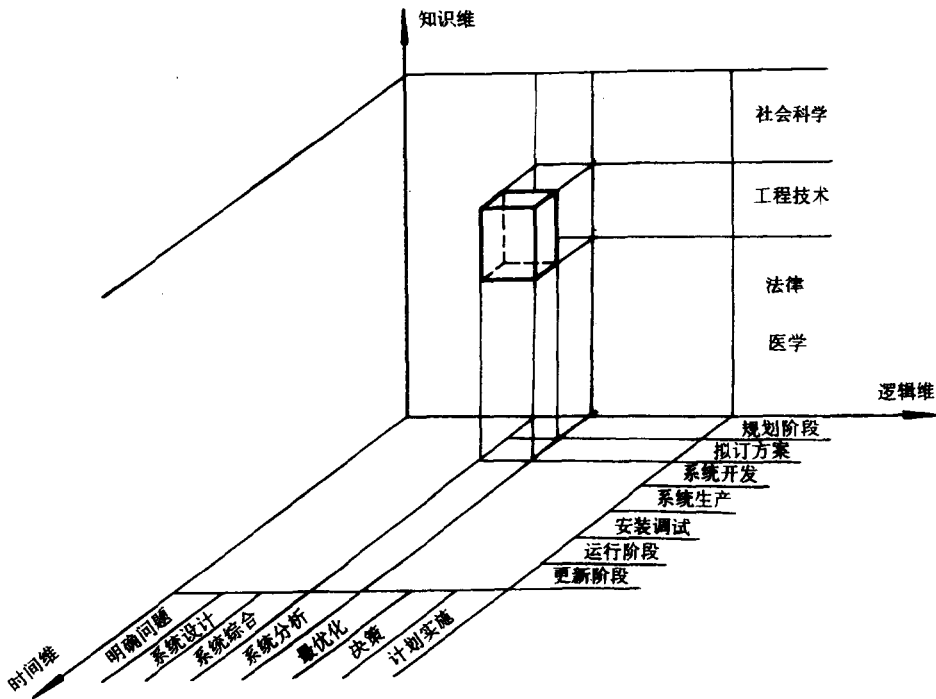


图 1-1 霍尔三维结构

三维结构的逻辑维表示实施系统工程，在某工作阶段所要做的相应的步骤；时间维表示系统工程的各工作阶段；知识维表示完成上述各阶段有关步骤所需要的各专业知识和学科技术，但各种不同的系统工程应有不同的专业基础知识。

上述七个时间阶段，所需经过的七个逻辑步骤，在具体系统工程项目中必须适当组合，即构成所谓系统工程活动矩阵。以某项系统工程为例，其系统工程活动矩阵见表 1-1 其中 a_{ij} 表示在 i 阶段需要做 j 步骤的工作。

从上述霍尔三维结构及活动矩阵可以看出，综合各种专业知识，在各时间阶段，适当进行必要的逻辑步骤，是大系统运行取得成效的一般方法。正如我国著名学者钱学森等在《组织管理的技术——系统工程》所指出“把极其复杂的研制对象称为‘系统’即由相互作用和相互依赖的若干组成部分结合成的具有特定功能的有机整体，而且这个‘系统’本身又是它所从属的一个更大系统的组成部分。……系统的‘总体方案’是实现整个系统的‘技术途径’。……总体

设计部的实践，体现了一种科学方法，这种科学方法就是‘系统工程’。‘系统工程’是组织管理‘系统’的规划、研究、设计、制造、试验和使用的科学方法，是一种对所有‘系统’都具有普遍意义的科学方法。”

某项目的系统工程活动矩阵

表 1-1

逻辑维步骤 j		时间维阶段 i						
		1	2	3	4	5	6	7
		明确问题	系统设计	系统综合	系统分析	最优化	决策	计划实施
1	规划阶段	a_{11}	a_{12}					
2	拟订方案			a_{23}	a_{24}			
3	系统开发		a_{32}			a_{35}	a_{36}	a_{37}
4	系统生产							a_{47}
5	安装调试				a_{54}			a_{57}
6	运行阶段	a_{61}						a_{67}
7	更新阶段	a_{71}	a_{72}			a_{75}	a_{76}	a_{77}

四、大系统的分解、综合和递阶控制

大系统的控制需要进行模型化，通常采用“演绎——归纳”建模法。由于实际的大系统往往由若干相互联系的子系统组成，因此，一个大系统总可以演绎分解成若干子系统；而对各子系统进行归纳综合，根据其相互联系，又可建立各子系统之间的“关系模型”，从而得到构成大系统全局的“总体模型”。船舶运输控制系统总体框图（图 0-2）就是由多层次子系统的分解及综合组成的。

大系统的控制方案通常采用“递阶控制”结构方案，也即采取“上级一下级”的递阶。下级为分散的局部控制器；上级为协调控制器。协调控制器通过对各局部控制器进行协调控制，对大系统进行集中式全局控制，从而实现大系统的集中分散递阶控制（图 1-2）。

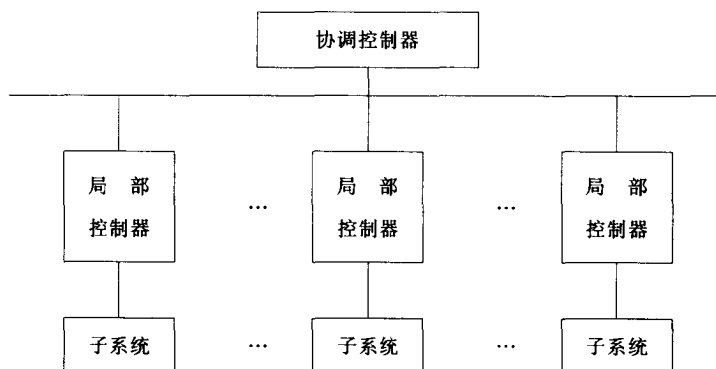


图 1-2 大系统集中分散递阶控制示意框图

五、大系统控制的稳定性

大系统控制的稳定性，其必要条件是各子系统的稳定性，也即各子系统应具备平衡态稳定性和输入/输出稳定性。

(1)平衡态稳定性——内稳定性

若处于平衡态的动态系统，受到外界扰动后偏离平衡态，而当外扰消失后，系统经过自由运动，又能恢复其平衡态，则称系统的平衡态是稳定的。否则，是不稳定的。可用描述自由运动的齐次状态方程进行稳定性分析。

线性动态系统的齐次状态方程为：

$$\dot{X} = AX \quad (1-1)$$

式中： X —— n 维状态矢量， $x \in R^n$ ；

A ——系统矩阵。

若系统的特征方程

$$\Delta = |sI - A| = 0 \quad (1-2)$$

的全部特征根 $s_i = \sigma_i \pm j\omega_i$, $i = 1, 2, \dots, n$ 均具有负实部 $\sigma_i < 0$ ，则系统的自由运动是稳定的。相应地由系统的稳态方程令 $\dot{X} = 0$

$$AX = 0 \quad (1-3)$$

所描述的平衡态是稳定的。

(2) 输入 / 输出稳定性 —— 外稳定性

若动态系统的输入是有界的，通过系统的传递和变换后，所产生的输出也是有界的，则称系统是“输入 / 输出”稳定的，或称系统是有界稳定的。否则，系统是不稳定的。

线性动态系统的“输入 / 输出”的传递关系

$$Y(t) = KU(t) \quad (1-4)$$

式中： $Y(t)$ ——系统输出；

$U(t)$ ——系统输入；

$K(p, t)$ ——线性系统传递算子。

若算子 K 在任意有限时间区间 ($0 < T < \infty$) 内都是一致有界的 即其范数

$$\|K\| < K(0 \ll \infty) \quad (1-5)$$

则系统对任意有界输入 $U(t)$ 所产生的输出都是有界的，其范数为

$$\|Y(t)\| = \|K\| \cdot \|U(t)\| \quad (1-6)$$

也即系统是“输入 / 输出”稳定的。

从应用的观点，上述二种稳定性概念是不同的。平衡态稳定性取决于系统内部的自由运动，故又称“内稳定性”；而输入 / 输出稳定性取决于系统的传递特性所呈现的外部表现，故又称“外稳定性”。

在一定条件下可以证明，同一个动态系统，其“内稳定性”与“外稳定性”是等效的，本质上是一致的。若系统内稳定，则系统外稳定。若系统内不稳定，则系统外不稳定。

例如，一个线性定常系统 其状态方程 —— 内模型为

$$\begin{aligned} \dot{X} &= AX + BU \\ Y &= CX \end{aligned} \quad (1-7)$$

在零初始条件下，传递函数矩阵方程 —— 外模型为

$$Y(s) = K(s)U(s) \quad (1-8)$$

系统的传递函数矩阵

$$K(s) = C(sI - A)^{-1}B \quad (1-9)$$

可以证明，系统内稳定性与外稳定性都取决于系统的特征方程

$$\Delta = |sI - A| = 0 \quad (1-10)$$

若全部特征根为负实部 则系统内、外稳定。

多变量协调控制系统的控制目标是保持各变量之间的协调关系，如函数关系。

常见的是比例关系

$$\mu_1 y_1 = \mu_2 y_2 = \cdots = \mu_n y_n \quad (1-11)$$

式中： μ_i ——比例系数， $i = 1, 2, \cdots, n$ ；

y_i ——被控量。

例如，连续轧钢机、橡胶帘子布浸胶机等生产机械设备中，各机架、各分部电动机速度之间，要保持某种比例关系；在化工、轻工等生产过程中，要保持各种反应物质或原料成分之间的配料比例关系；在电力系统中，要保持各电站或发电机组之间的负荷分配比例关系等。

在多变量协调控制系统稳定性分析中，对于“大一小系统”的稳定性关系问题，即若各小系统稳定，如何组合才能使所组成的大系统也是稳定的。通常采取组合稳定化的方法，也即将各小系统集结为大系统时，根据相互联系应满足的条件，设计组合方式与关联结构，选择组合强度与关联参数，实现大系统的组合稳定化。

第二节 控制论和信息论的应用

一、控制管理一体化是控制论发展的必然规律

二次大战后 40 年代后期自动控制和通信工程已有了很大发展，计算机技术已经出现，以诺伯特·维纳 (Norbert Wiener) 为首的一批科学家，综合研究了通信系统和控制系统的共同特点，以及生物系统和非生物系统在信息传输方面的共性，创立了控制论 (Cybernetics)。1948 年维纳出版了“控制论”一书。控制论的观点认为：

(1)一切控制过程都是信息的接收、存取、变换和反馈的过程。

(2)一切系统都具有不确定性和统计性质，提出了控制系统“熵 (entropy)”的概念 控制系统接收和加工的信息具有一定的随机性质，也即有某种统计分布；用统计方法可以由过去推知未来 预测未来。

(3)一切有生命与无生命系统都是信息系统。

(4)一切有生命与无生命系统都可通过随意反馈和姿态反馈达到稳定。

控制论突破了工程技术与生物科学之间的传统界限，跨越了两大领域的“鸿沟”，在学术界引起了巨大震动和反响。之后，根据科学技术发展规律，又分化发展了许多控制论的学科分支。1954 年，我国科学家钱学森发表了名著《工程控制论》，这是控制论学科分化发展的第一个新学科。其后，又相继出现了生物控制论、经济控制论、社会控制论及人口控制论等。

从控制理论的重要发展划分阶段，1958 年以前属经典控制理论。1959 年以卡尔曼 *Kalman* 为代表的一批数学家首次提出了控制系统的状态空间描述法，进入了现代控制理论发展阶段。70 年代后期以来，随着计算机技术、通信技术和现代数学的发展，以及经济和社会的需要，现代控制理论以线性系统、随机控制、最优控制和自适应控制等理论为

基础，各种新学科不断出现，不胜枚举。船舶运输控制系统就是以控制论的观点，应用各种控制理论及管理科学，贯穿信息技术主线，发展起来的管理一体化系统。

二、信息技术必将贯穿船舶运输全过程

信息论 Information Theory 是本世纪 20 ~ 40 年代形成的理论。1924 年奈奎斯特 Nyquist)

解释了信号带宽与信息速率之间的关系。1928年哈特莱(Heartley)提出了消息(message)与信息(information)的区别,指出消息是信息的载体,消息是代码、符号和序列,而信息是包含在具体消息中的抽象量,并首次提出了信息量的概念。提出用消息出现概率的对数来度量其中所包含的信息,也即信息“熵”的概念。香农(Shannon)受哈特莱的影响,分别于1948和1949年发表了“通讯的数学理论”和“在噪声中的通讯”两篇文章,标志着信息论这一学科的诞生。在这同一时代,美国统计学家费希尔(Fisher)从统计理论角度研究了信息问题,提出了广义信息论,在信息的传输及其在工程、医学等领域的应用方面,得出了与香农、维纳相同的结论,而把控制包含于广义信息论之中。当前已进入信息时代,在推动当代社会进化的能量流、物质流和信息流中,信息流起着越来越重要的作用。通过发展与实践,人们越来越明确,信息技术是指信息的获取、传递、加工、再生和使用等功能的一类技术,由感测、通信、智能(包括计算机硬件、软件及人工智能)和控制四个基元组成。信息技术不仅作为一项独立的技术而存在、发展,而且广泛渗透于各个高技术领域,以及科研、生产、经营、管理等过程。可以理解,船舶运输产业的发展必须十分重视信息技术的发展,信息技术必将贯穿船舶运输的全过程。船舶运输的实力不仅以拥有船队大小规模来衡量,而且还必须考虑信息的获取、分析、处理;计算水平;通信容量及可靠性等信息技术所产生的能力。

三、熵的概念

1. 控制系统的熵

在社会、经济、科研、教学等一切领域中,各种系统都必须有序(order),也即有组织性和目的性,才能发挥应有的作用。一个孤立系统的自发过程是向无序,也即向无组织程度增加方向发展的。这种无组织程度与古典热力学“熵”的概念是一致的。

热力学第二定律:在热力系统中,衡量不能利用的热能的度量为熵,它的数学意义是所获得的热能 Q 被温度 T 除得的商。熵用 S 表示,其一般数学表达式为:

$$dS = \frac{\Delta Q}{T}$$

维纳认为熵是系统无组织程度的一种测度。一个控制系统不是一个孤立系统,而是一个与周围环境密切联系的系统,特别是控制系统通过自己的反馈机构可以减少系统的无组织程度,因此,在控制系统中经常发生熵减少的过程,也即更序的过程。

生物系统是自有序系统,生物系统通过与周围环境的交换,可以使序变得更序。

自适应系统能适应环境的变化,进一步提高为自学习、自组织系统,能使系统变得更序。

从理论上说,船舶运输控制系统就是要在船舶运输的机制、经营、调度、运行等各方面通过控制管理,使所投入的力量,包括物质、能源及信息,得到有效的利用,在大市场中发挥应有的作用,统计出其所占的市场份额、效益和影响,以当时应有的规模效应为基准估计出船舶运输系统的熵值。控制管理得好,可以使系统的熵值减小,使系统更序。

2. 信息熵

一个系统的运作,需要从各种信源获取信息。在信息的定义中,信息的获得被看作系统中不确定性的减少,也即信息蕴含于不确定性之中。不确定性在概率论中是用随机事件或随机变量来描述的,如果随机变量取值于一个离散集合,则称该集合为离散信源。 $A = (a_1, a_2, \dots, a_n)$ 为信源符号表。如果这些符号 a_1, a_2, \dots, a_n 的出现是相互独立的,则称该信源为离散无记忆信源。如果出现这些符号的概率分别为 p_1, p_2, \dots, p_n ;把上述符号表和各符号出现的概率

写到一起，即为被测量信源。

$$X = \left\{ \begin{matrix} a_1, a_2, \dots, a_n \\ p_1, p_2, \dots, p_n \end{matrix} \right\}$$

这是一个概率空间。A 又称有限事件集， $P = (p_1, p_2, \dots, p_n)$ 称为概率空间的概率矢量。

假设信源输出 N 个消息 其中有 n 个不同的消息 第 i 个消息 $i = 1, 2, \dots, n$ 重复 h_i 次，比值 h_i/N 为输出第 i 个消息的频率，可用概率表示 $h_i/N = p_i$ 。

定义第 i 个消息的自信息为：

$$I_i = \log_2 \frac{1}{p_i} = -\log_2 p_i \quad (1-12)$$

信源输出消息的平均信息量表示为：

$$\begin{aligned} I_m &= \frac{h_1 I_1 + h_2 I_2 + \dots + h_n I_n}{N} \\ &= -\sum_{i=1}^n p_i \log_2 p_i \end{aligned}$$

香农将所得的数值称为熵，用 $H(x)$ 表示 单位为比特/符号 即

$$H(x) = -\sum_{i=1}^n p_i \log_2 p_i \text{ (bit/symbol)} \quad (1-13)$$

互信息在信息论中也是一个重要的概念。如果随机变量 X 和 Y 分别取值于两个离散集合 $A = \{a_1, a_2, \dots, a_n\}$ 、 $B = \{b_1, b_2, \dots, b_m\}$ 。而且 X 与 Y 是相关的 构成了一个复合事件集 这是一个二维乘积概率空间，即

$$Z = X \cdot Y = \left\{ \begin{matrix} C_{ij} \\ r_{ij} \end{matrix} \right\}$$

$$i = 1, 2, \dots, n \quad j = 1, 2, \dots, m$$

其中 C_{ij} 是 a_i 是 b_j 构成的复合事件， $C_{ij} = a_i \cap b_j$ 。从 X 与 Y 中各取一个元素，总共可组成 $m \times n$ 个元偶， r_{ij} 是元偶的概率

$$r_{ij} = p(a_i \cap b_j) = p_i P_{ji}$$

$$P_{ji} = P(b_j | a_i)$$

可以推出，已知 a_i 条件下， b_j 的条件概率的熵 即

$$\sum_{i=1}^n p_i H_m(p_{1i}, p_{2i}, \dots, p_{mi}) = H(Y | X)$$

这个熵还是个随机变量，它随 a_i 的取值而变化，即不同的 a_i 有不同的 p_{ji} 组。按照熵函数的总体平均性， X 与 Y 的联合熵为

$$H(X, Y) = H(x) + H(Y | X)$$

同理

$$H(Y, X) = H(Y) + H(X | Y)$$

经变换得 X 与 Y 的互信息为

$$I(X; Y) = H(X) - H(X | Y) = H(Y) - H(Y | X) \quad (1-15)$$

由此可知 互信息 $I(X; Y)$ 是 X 的熵与已知 Y 的条件下 X 的条件熵之差。其物理意义可这样理解， X 是系统输入， Y 是系统输出，由输出端已知 Y 的情况下， X 的不确定性减少了。图 1-3 给出 $I(X; Y)$ 、 $H(X, Y)$ 、 $H(X | Y)$ 、 $H(Y | X)$ 、 $H(X)$ 及 $H(Y)$ 之间的关系。

3. 马尔可夫信源的熵

(1) 随机过程

一个系统中各种事件的发生，都有一个从样本空间取值的问题，该样本空间即信源符号表。事件的取值是随机的，但对每个符号的取值都有相应的概率，也就是说，这些符号是随机变量。如果这些随机变量是随时间变化的，那就成为随机过程，也即一个随机过程是两个自变量的函数 $\{X(t, s), t \in T, s \in S\}$ 。其中 S 为样本空间； $T = \{0, t_1, t_2, \dots\}$ ，这里指的是离散时间过程。对于固定的 $t \in T, X(t, \cdot)$ 就是一个随机变量，而对于固定的 $s, X(\cdot, s)$ 却是一个时间函数。表示一个整体，是变化的。

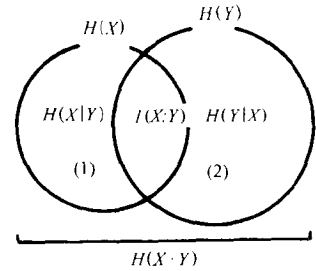


图 1-3 互信息、联合熵及条件熵之间的关系

(2) 马尔可夫过程

如果一个随机过程，在某时刻发生的事件，只在有限时间内发生影响，或者说，某时刻事件的发生仅受有限时间内已发生的事件的影响，则该随机过程为马尔可夫过程。

设 t_i 和 t 是指标集 T 的元素，并满足 $t_1 < t_2 < \dots < t_k < t$ 的一个随机过程 $\{x(t), t \in T\}$ 如果

$$\begin{aligned} P\{x(t) \leq \xi \mid x(t_1), x(t_2), \dots, x(t_k)\} \\ = P\{x(t) \leq \xi \mid x(t_k)\} \end{aligned} \quad (1-16)$$

则该随机过程叫做马尔可夫过程。

式中 $P\{\cdot \mid x(t_k)\}$ 表示在 $x(t_k)$ 下的条件概率。如果已知 $x(t_1)$ 的概率分布即起始概率发布

$$F(\xi_1 \cdot t_1) = P\{x(t_1) \leq \xi_1\} \quad (1-17)$$

和转移概率分布

$$F(\xi_1 \cdot t \mid \xi_s \cdot s) = P\{x(t) \leq \xi_1 \mid x(s) = \xi_s\} \quad (1-18)$$

可求出随机变量 $x(t_1), x(t_2), \dots, x(t_k)$ 的分布函数。因此马尔可夫过程是由两个函数确定的，它们是绝对概率分布和转移概率分布，后者为条件概率。

(3) 马尔可夫信源

在马尔可夫过程中，信源的输出符号间是相关的，其概率分布是根据前边的符号决定下一个符号的概率分布也即第 i 个符号的概率分布由前边已发出的 q 个符号决定。这样的信源就是马尔可夫信源。

设信源符号表为 $S = \{s_1, s_2, \dots, s_r\}$ 产生符号 s_i 的条件概率为

$$p(s_i \mid s_{j_1}, s_{j_2}, \dots, s_{j_k}, \dots, s_{j_m}) \quad (1-19)$$

$$i = 1, 2, \dots, r; \quad k = 1, 2, \dots, m$$

由上述条件概率所规定的信源为 m 阶马尔可夫信源，其最大可能的状态数是 r^m 个。马尔可夫信源随着时间的变化，由一个状态转移到另一个状态，通常用马尔可夫状态图表示。这种马尔可夫信源模型是香农提出的，因此称香农线图 (Shannon diagram)。

例如信源符号表为 $S = \{0, 1\}$ 的一阶马尔可夫信源，其条件概率为：

$$\begin{aligned} p(0 \mid 0) &= 0.25 & p(1 \mid 0) &= 0.75 \\ p(0 \mid 1) &= 0.5 & p(1 \mid 1) &= 0.5 \end{aligned}$$

其状态转移线图如图 1-4 所示。