



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

航海类专业精品系列教材

# 轮机自动化

林叶锦 主编



大连海事大学出版社

普通高等教育“十一五”国家级规划教材  
航海类专业精品系列教材

# 轮机自动化

林叶锦 主编

大连海事大学出版社

## 内容简介

本书共21章,分为“轮机自动化基础”和“轮机自动化系统”上、下两篇。第1至5章为上篇,介绍反馈控制系统的概念、控制系统数学模型、调节器基本作用规律、传感器与变送器以及执行机构等轮机自动化基础知识;第6至21章为下篇,介绍船舶机舱典型的控制系统及其实例,包括船舶主机遥控系统,锅炉自动控制系统,冷却水温度自动控制系统,黏度控制系统,分油机、阀门、液位等辅助设备和参数的自动控制系统,以及机舱监视与报警系统。

本书是大连海事大学轮机工程专业本科教材,也可供船舶轮机人员及相关专业技术人员参考使用。

## 图书在版编目(CIP)数据

轮机自动化 / 林叶锦主编. —大连:大连海事大学出版社, 2009. 9

(航海类专业精品系列教材)

普通高等教育“十一五”国家级规划教材

ISBN 978-7-5632-2355-8

I. 轮… II. 林… III. 轮机—自动化—高等学校—教材 IV. U664.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 172219 号

## 大连海事大学出版社出版

地址:大连市凌海路1号 邮编:116026 电话:0411-84728394 传真:0411-84727996

<http://www.dmupress.com> E-mail: cbs@dmupress.com

大连美跃彩色印刷有限公司印装 大连海事大学出版社发行

2009年9月第1版 2009年9月第1次印刷

幅面尺寸:185 mm × 260 mm 印张:24.5

字数:602千 印数:1~3000册

责任编辑:姚文兵 封面设计:王 艳

ISBN 978-7-5632-2355-8 定价:42.00元

## 前 言

海上运输是交通运输的重要组成部分,在促进外贸运输发展和推动对外贸易增长等方面以其他运输方式不可比拟的优势发挥出越来越重要的作用。

大连海事大学作为我国唯一的国家重点航海类专业院校,多年来为我国乃至国际海上运输业培养了大量的航海类专业高级人才,对促进航运业的发展起到了重要作用。近年来,随着科学技术的进步和交通运输业的发展,学校针对航海类专业的鲜明特色,在人才培养方案、教学内容及课程体系改革等方面进行了一系列的研究和实践。在此基础上,我校组织编写出一套与新的培养方案、教学内容及课程体系相适应的航海类专业精品系列教材,旨在加强航海类专业建设,提高航海类人才培养的质量和水平,进一步推动高等航海教育的发展。

为了保证航海类专业精品系列教材顺利出版,学校在人力、物力和财力等方面予以充分保证。组织校内航海类专业的资深专家、骨干教师和管理干部做了大量工作,从筹备、调研、编写、评审直至正式出版,历时三载有余。2005年5月,学校先后组织召开了两次航海类专业教学改革研讨会,来自交通部海事局、辽宁海事局、中国远洋运输(集团)总公司、中国海运(集团)总公司、中国船级社等单位的专家为教材编写的筹备工作提出了中肯的意见和建议。2006年初,教材编写工作正式启动,确定重新编写航海类专业教材22种,其中航海技术专业教材13种、轮机工程专业教材9种。教材编写大纲先后征求了中国远洋运输(集团)总公司、中国海运(集团)总公司及大连海事大学等单位10多位专家的意见。学校组织教材主要编写人员分赴北京、天津、青岛、上海、广州、武汉及厦门等多家航运企事业单位进行调研,收集了大量的最新技术资料,同时听取了有关领导和专家的意见。2007年我校先后召开了五次评审会,来自交通部海事局、驻英大使馆海事处、中国海事服务中心考试中心、辽宁海事局、山东海事局、中国远洋运输(集团)总公司、中国海运(集团)总公司、大连港引航站、上海海事大学、海军大连舰艇学院、大连水产学院、集美大学、青岛远洋船员学院及大连海事大学等单位的多位专家对22种教材的初稿就内容、文字及体例等方面逐一评审,反复推敲,几易其稿,逐步完善,反复审核,最终正式出版。该套教材中共有16种教材入选普通高等教育“十一五”国家级规划教材。

这套航海类专业精品系列教材以履行修订后的STCW公约为前提,结合海上运输业发展的国际性和信息性等特点,以更新教学内容为重点,对原有教材做了大量的增删与修改,注重理论基础及内容阐述的逻辑性和准确性,力求反映国内外航海科技领域的新成就与新知识,适应21世纪海上运输业对航海类人才的知识、能力和素质结构的要求,兼顾各教材内容之间的衔接与整合,避免重复与遗漏。我衷心希望,通过全体编写人员的不懈努力,这套精品系列教材,能够进一步加强我校航海类专业的建设,为国内兄弟院校航海类专业的发展提供有益的借鉴,为我国高等航海教育发展尽微薄之力。

教材在编写和出版过程中,得到了方方面面领导、专家和同仁的大力支持和热心帮助(具体名单附后)。我谨代表大连海事大学及教材编写全体成员对以上单位和个人致以最诚挚的谢意。各位专家和同仁渊博的专业知识、严谨的治学态度、精益求精的学术风范以及细致入微

的工作作风为教材的顺利出版作出了卓越的贡献,在很大程度上可以说,这套教材的成功出版,是全体编写人员,各港航企事业单位的领导、专家和同仁共同努力的成果。

航海类专业精品系列教材的编写是一项繁重而复杂的工作,鉴于时间和人力等方面的因素,这套教材在某些方面还不是十分完善,缺点和不妥之处在所难免,希望同行专家不吝指正。同时,希望以此为契机,吸引更多航海技术领域的专家、学者参与到这项工作中来,为我国航海教育献计献策,为我国乃至国际海上运输事业培养出大量高素质的航海类专业人才。

大连海事大学校长



2008 年 3 月

对教材出版给予大力支持和帮助的单位及个人如下:(以姓氏笔画为序)

|     |          |                   |
|-----|----------|-------------------|
| 于晓利 | 教授       | 大连水产学院            |
| 于智民 | 高级船长、高工  | 中远散货运输有限公司        |
| 马文华 | 高工       | 大连远洋运输公司          |
| 方伟江 | 轮机长      | 中海国际船舶管理有限公司上海分公司 |
| 王 阳 | 高工       | 中海国际船舶管理有限公司大连分公司 |
| 王 健 | 高工、高级引航员 | 大连港引航站            |
| 王国荣 | 高级轮机长    | 中远散货运输有限公司        |
| 王征祥 | 船长       | 中远集装箱运输有限公司       |
| 王新全 | 高工、总轮机长  | 中国远洋运输(集团)总公司     |
| 车 毅 | 船长       | 大连远洋运输公司          |
| 叶依群 | 高级船长     | 中远散货运输有限公司        |
| 田喜林 | 高工       | 中海国际船舶管理有限公司大连分公司 |
| 石爱国 | 教授       | 海军大连舰艇学院          |
| 任辰西 | 高级船长     | 中远散货运输有限公司        |
| 刘 屹 | 高工       | 大连远洋运输公司          |
| 刘世长 | 船长       | 日照海事局             |
| 孙 广 | 高工       | 辽宁海事局             |
| 安 彬 | 高级船长     | 大连远洋运输公司          |
| 邢 钺 | 高工       | 中远散货运输有限公司        |
| 吴 恒 | 教授、博导    | 大连海事大学            |
| 吴万千 | 副教授      | 青岛远洋船员学院          |
| 张仁平 | 教授       | 驻英大使馆海事处          |
| 张文浩 | 高工       | 中远散货运输有限公司        |
| 张均东 | 教授、博导    | 大连海事大学            |
| 张秋荣 | 教授       | 上海海事大学            |
| 李 录 | 高级轮机长    | 广州远洋船员管理公司        |

|     |           |                   |
|-----|-----------|-------------------|
| 李志华 | 副教授       | 大连海事大学            |
| 李忠华 | 高工        | 珠海海事局             |
| 李恩洪 | 船长、高工     | 交通部海事局            |
| 李新江 | 副教授       | 大连海事大学            |
| 杜荣铭 | 教授        | 大连海事大学            |
| 杨君浩 | 轮机长       | 中海国际船舶管理有限公司上海分公司 |
| 沈毅  | 工程师       | 辽宁海事局             |
| 邱文昌 | 教授        | 上海海事大学            |
| 邱铁卫 | 高级轮机长     | 大连远洋运输公司          |
| 邵哲平 | 教授、船长     | 集美大学              |
| 邹文生 | 高级轮机长     | 大连远洋运输公司          |
| 陈志强 | 高级轮机长     | 中远集装箱运输有限公司       |
| 陈建锋 | 高工、高级船长   | 中远散货运输有限公司        |
| 周邱克 | 高工、高级船长   | 中海客轮有限公司          |
| 房世珍 | 大副        | 青岛远洋对外劳务合作有限公司    |
| 易金华 | 指导船长、高级船长 | 中海国际船舶管理有限公司广州分公司 |
| 林长川 | 教授        | 集美大学              |
| 金松  | 教授级高工     | 中国船级社大连分社         |
| 金义松 | 船长、高工     | 中海国际船舶管理有限公司      |
| 姚杰  | 教授        | 大连水产学院            |
| 姜勇  | 教授级高工     | 山东海事局             |
| 洪碧光 | 教授、船长     | 大连海事大学            |
| 赵金文 | 高工、轮机长    | 大连远洋运输公司          |
| 赵晓玲 | 副教授       | 青岛远洋船员学院          |
| 赵爱屯 | 高级船长      | 中海国际船舶管理有限公司大连分公司 |
| 夏国忠 | 教授        | 大连海事大学            |
| 徐波  | 高工        | 中远集装箱运输有限公司       |
| 敖金山 | 高级船长      | 枫叶海运有限公司          |
| 殷传安 | 高级轮机长     | 中海国际船舶管理有限公司大连分公司 |
| 郭子瑞 | 教授        | 辽宁海事局             |
| 郭文生 | 高级船长      | 广州远洋船员管理公司        |
| 顾剑文 | 高工        | 大连国际船员培训中心        |
| 崔保东 | 船长        | 青岛远洋对外劳务合作有限公司    |
| 黄党和 | 轮机长       | 中国海事服务中心          |
| 蔡振雄 | 教授        | 集美大学              |
| 魏茂苏 | 轮机长       | 青岛远洋对外劳务合作有限公司    |

## 编者的话

“轮机自动化”课程是航海类院校轮机工程专业的一门主干专业课,主要讲述现代船舶轮机自动化技术的基础理论和机舱常见自动控制仪表和控制系统的结构、原理及科学管理方法。

由大连海事大学编写的《轮机自动化》教材最早于1964年在大连海运学院(后改名为大连海事大学)以讲义的形式印刷,1980年由人民交通出版社正式出版,并分别在1982年、1987年和1998年进行了三次修订,一直是交通部(现交通运输部)指定的统编教材,且多次重印,在国内具有非常重要的地位和影响。随着船舶自动化技术的不断发展,许多当时的先进设备已逐渐淘汰,教材中的许多内容已不再适合当前的教学,需要更新和补充。

在本教材的编写过程中,作者进行了广泛的调研,充分征求了各大航运企业和同行专家的意见。在此基础上,对教材的体系结构进行了优化和调整,在内容选取上坚持理论与实践相结合的原则,对基础理论内容进行了精简,系统实例力求反映主流船舶自动化系统的现状,增强了教材的实用性。

本书共21章,分为“轮机自动化基础”和“轮机自动化系统”上、下两篇。第1至5章为上篇,介绍反馈控制系统的概念、控制系统数学模型、调节器基本作用规律、传感器与变送器以及执行机构等轮机自动化基础知识;第6至21章为下篇,介绍船舶机舱典型的控制系统及其实例。

全书由林叶锦策划和主编,李世臣、王冬捷和聂延生参编。其中,林叶锦编写了第1~5章、第6章第1节和第3节、第8章、第12章和第14~18章;李世臣编写了第6章第2节、第7章、第9章、第11章、第13章第3节和第4节;王冬捷编写了第10章和第19~21章;聂延生编写了第13章第1、2节。林叶锦对全书进行统稿,并对参编提交的部分内容进行了改写。

本教材的编写和出版得到了中国远洋运输(集团)总公司、山东海事局、大连远洋运输公司、集美大学、青岛远洋船员学院和大连海事大学有关专家的支持和帮助,在此表示感谢!其中,特别感谢张均东教授、吴恒教授、蔡振雄教授、赵晓玲副教授和姚文兵编辑对编者的悉心指导和帮助。此外,还要感谢大连海事大学轮机工程学院轮机自动化课程组全体同仁所给予的大力支持。

囿于时间和编者水平,书中难免存在错误和缺陷,敬请同行专家和读者批评指正。

编者

2009年8月

# 目 录

## 上篇 轮机自动化基础

|                        |      |
|------------------------|------|
| 第一章 反馈控制系统的概念 .....    | (1)  |
| 第一节 反馈控制系统的组成 .....    | (1)  |
| 第二节 反馈控制系统的动态过程 .....  | (7)  |
| 第二章 控制系统的数学模型 .....    | (13) |
| 第一节 传递函数的基本概念 .....    | (13) |
| 第二节 典型环节的传递函数 .....    | (21) |
| 第三节 控制对象的数学模型及特性 ..... | (26) |
| 第三章 调节器基本作用规律 .....    | (33) |
| 第一节 双位作用规律 .....       | (33) |
| 第二节 比例作用规律 .....       | (35) |
| 第三节 比例积分作用规律 .....     | (39) |
| 第四节 比例微分作用规律 .....     | (42) |
| 第五节 比例积分微分作用规律 .....   | (45) |
| 第四章 传感器与变送器 .....      | (52) |
| 第一节 船舶机舱常用传感器 .....    | (52) |
| 第二节 变送器 .....          | (58) |
| 第五章 执行机构 .....         | (68) |
| 第一节 气动执行机构 .....       | (68) |
| 第二节 电动执行机构 .....       | (69) |
| 第三节 电动和气动仪表组合 .....    | (72) |

## 下篇 轮机自动化系统

|                                 |       |
|---------------------------------|-------|
| 第六章 船舶冷却水温度自动控制系统 .....         | (73)  |
| 第一节 直接作用式冷却水温度控制系统 .....        | (73)  |
| 第二节 MR-II型电动气缸冷却水温度自动控制系统 ..... | (75)  |
| 第三节 采用智能调节器控制的冷却水温度自动控制系统 ..... | (84)  |
| 第七章 燃油黏度自动控制系统 .....            | (87)  |
| 第一节 NAKAKITA 燃油黏度控制系统 .....     | (87)  |
| 第二节 VISCOCHIEF 燃油黏度控制系统 .....   | (95)  |
| 第八章 分油机的自动控制 .....              | (104) |
| 第一节 FOPX 型分油机的基本工作原理 .....      | (104) |
| 第二节 FOPX 型分油机自动控制系统的组成 .....    | (106) |

|                                  |       |
|----------------------------------|-------|
| <b>第九章 船用燃油辅锅炉的自动控制</b>          | (113) |
| 第一节 船用燃油辅锅炉自动控制基本原理              | (113) |
| 第二节 货船辅锅炉的自动控制                   | (119) |
| 第三节 油船辅锅炉的自动控制                   | (126) |
| <b>第十章 阀门遥控及液舱遥测系统</b>           | (135) |
| 第一节 概述                           | (135) |
| 第二节 阀门遥控系统                       | (135) |
| 第三节 液舱遥测系统                       | (138) |
| 第四节 阀门遥控及液舱遥测系统实例                | (143) |
| 第五节 管理要点                         | (151) |
| <b>第十一章 主机遥控系统基础知识</b>           | (153) |
| 第一节 主机遥控系统基本概念                   | (153) |
| 第二节 主机遥控系统的主要气动元部件               | (159) |
| 第三节 车钟系统                         | (167) |
| 第四节 换向逻辑及其控制                     | (174) |
| 第五节 起动逻辑及其控制                     | (178) |
| 第六节 制动逻辑及其控制                     | (187) |
| 第七节 转速与负荷的控制和限制                  | (191) |
| 第八节 主机遥控系统的电/气转换装置和执行机构          | (206) |
| <b>第十二章 船舶柴油主机气动操纵系统</b>         | (215) |
| 第一节 MAN-B&W-MC/MCE 型主机气动操纵系统简介   | (215) |
| 第二节 MAN-B&W-MC/MCE 型主机气动操纵系统操作原理 | (215) |
| <b>第十三章 AUTOCHIEF-IV 主机遥控系统</b>  | (225) |
| 第一节 概述                           | (225) |
| 第二节 AC-4 主机遥控系统                  | (227) |
| 第三节 DGS8800e 数字调速系统              | (237) |
| 第四节 SSU8810 安全保护系统               | (249) |
| <b>第十四章 基于现场总线的主机遥控系统</b>        | (253) |
| 第一节 AC C20 遥控系统的结构组成             | (253) |
| 第二节 分布式处理单元                      | (255) |
| 第三节 车钟系统及操作部位切换                  | (258) |
| 第四节 AC C20 面板                    | (260) |
| 第五节 AC C20 的控制功能                 | (263) |
| 第六节 AC C20 的安全保护功能               | (269) |
| <b>第十五章 机舱监视与报警系统概述</b>          | (272) |
| 第一节 参数类型                         | (272) |
| 第二节 监测方法                         | (272) |
| 第三节 监视与报警系统的组成与功能                | (273) |

|              |                            |       |
|--------------|----------------------------|-------|
| <b>第十六章</b>  | <b>单元组合式监视与报警系统</b>        | (277) |
| 第一节          | 报警控制单元的组成原理及功能             | (277) |
| 第二节          | 用继电器组成的监视与报警控制单元           | (279) |
| 第三节          | 用集成电路组成的监视与报警控制单元          | (280) |
| <b>第十七章</b>  | <b>微机控制的监视与报警系统</b>        | (284) |
| 第一节          | 模拟量输入                      | (284) |
| 第二节          | 开关量输入                      | (290) |
| 第三节          | 数字量输出                      | (293) |
| 第四节          | 监视与报警系统的信息传输               | (294) |
| <b>第十八章</b>  | <b>网络型监视与报警系统</b>          | (313) |
| 第一节          | DC C20 监控与报警系统的结构组成        | (313) |
| 第二节          | 分布式处理单元 DPU                | (315) |
| 第三节          | 网关                         | (318) |
| 第四节          | 远程操作站 ROS 及系统功能            | (319) |
| 第五节          | K-Chief 500 监视与报警系统        | (329) |
| 第六节          | DC C20/K-Chief 500 的管理维护要点 | (335) |
| <b>第十九章</b>  | <b>火灾监控系统的自动控制</b>         | (337) |
| 第一节          | 典型的火灾过程                    | (337) |
| 第二节          | 火灾自动报警系统的基本类别及基本功能         | (338) |
| 第三节          | 火灾探测方法及探测器                 | (340) |
| 第四节          | 火灾探测器的故障分析                 | (347) |
| 第五节          | 几种典型火灾报警系统                 | (349) |
| 第六节          | 干货舱自动探火及报警系统               | (354) |
| <b>第二十章</b>  | <b>油分浓度监视报警器</b>           | (357) |
| 第一节          | 油水分离器工作系统的组成               | (357) |
| 第二节          | 油分浓度监视报警器                  | (358) |
| 第三节          | 自动排油的控制原理                  | (364) |
| <b>第二十一章</b> | <b>曲柄箱油雾浓度监视报警器</b>        | (366) |
| 第一节          | Mark5 型油雾浓度报警器概述           | (366) |
| 第二节          | Mark5 型油雾浓度报警器工作原理         | (367) |
| <b>参考文献</b>  |                            | (377) |

# 上篇 轮机自动化基础

## 第一章 反馈控制系统的概念

反馈控制系统属于人们通常所说的自动控制系统中的一个分支。所谓自动控制,是指在没有人直接参与的情况下,利用外加的设备或装置,使机器设备或生产过程的某个工作状态或参数自动地按照预定的规律运行。这些外加的设备或装置称为自动控制装置,它们和控制对象一起形成自动控制系统。例如,船舶机舱的辅锅炉自动控制、分油机自动控制、起货机自动控制和柴油主机遥控等都是自动控制在船上的典型应用。

反馈控制系统专门研究机器设备或生产过程的参数自动控制,其目标是把机器设备或生产过程各种运行参数,如温度、压力、液位、黏度和转速等控制在所希望的最佳值上。在“自动控制原理”课程中,也习惯地将参数控制系统称为过程控制系统或自动控制系统。

自动控制作为一门工程科学已广泛地应用于工农业生产、交通运输以及国防建设中,从简单的家用电器到复杂的机器人,从船舶操纵到宇宙航行都离不开自动控制。特别是随着计算机技术的迅猛发展,自动控制技术的应用已经非常普及。根据自动控制技术发展的不同阶段,自动控制理论一般可分为“经典控制理论”和“现代控制理论”两大部分。

经典控制理论主要以传递函数为基础,研究单输入、单输出一类自动控制系统的分析和设计问题。由于发展较早,现已成熟。在工程上,相当成功地解决了大量实际问题,因此它是研究自动控制系统的重要理论基础。

现代控制理论主要以状态空间法为基础,研究多输入、多输出、定常数或变参数、线性或非线性一类自动控制系统的分析和设计问题。随着现代科学技术的发展,还出现了最优控制、模糊控制、系统辨识、自适应控制等一些新的控制方式。因此,它也是研究庞大的系统工程和模仿人类的智能控制等方面必不可少的理论基础。

由于自动控制技术所涉及的内容相对广泛,这里主要介绍反馈控制系统的基本概念、组成环节和系统的动态过程。

随着应用场合的不同,反馈控制系统的具体用途和实现形式也不尽相同,但组成这些控制系统的基本单元及其工作过程是大致相同的。

### 第一节 反馈控制系统的组成

#### 一、反馈控制系统的组成

反馈控制系统对机器设备或生产过程参数的控制过程实际上是直接模拟人的手动操作过程,图 1-1-1 画出了手动控制和自动控制柴油机气缸冷却水温度的示意图。

柴油机在运行过程中需要保持一个最佳的冷却水温度。假如冷却水出口温度应为  $80^{\circ}\text{C}$ ,

则在手动控制时,操作人员要用眼睛观察温度表,并把观察到的冷却水实际温度反映给大脑。大脑对这一水温进行分析(温度的实际值是否偏离了最佳值)、判断(实际水温是高于最佳值还是低于最佳值)和计算(实际水温离开最佳值的数量),然后输出一个控制指令给双手,用双手来改变三通调节阀的开度,即改变旁通水量和经冷却器冷却后的冷水流量,从而可改变气缸冷却水的冷却强度,使冷却水的实际温度逐渐恢复到冷却水温度的最佳值上。

例如,当冷却水实际温度升高时,大脑通过眼睛从温度表上观察到这一信息,为了维持希望的温度值,必然指挥双手关小旁通水量。而旁通水量关小的结果势必使实际温度下降,并且在温度表上得到体现。眼睛再把这一调节结果传递给大脑,以便大脑作出下一步判断和进行下一步动作。这个过程一般都要反复进行,直至实际温度恢复到希望的温度值为止。其中,眼睛把调节结果传递给大脑的过程就叫做反馈。显而易见,正因为利用了反馈,控制的最终目标才能得以实现。

在自动控制过程中,由于不需要人来干预控制过程,因此,必须采用相应的自动化仪表来代替人的功能器官。比如可用温度传感器和变送器来代替人的眼睛,随时测量冷却水的实际温度并把该值送给调节器。调节器代替人的大脑,并对冷却水实际温度进行分析和计算,然后输出控制信号给执行。执行机构代替人的双手,改变三通调节阀的开度。不论是手动控制,还是自动控制,反馈的作用都是存在的。我们把包含反馈作用的控制过程称为反馈控制过程。

其实,对任何其他运行参数进行控制也都具有类似的过程。分析上述实例不难发现,组成一个反馈控制系统,必须有四个最基本的环节,即控制对象、测量单元、调节单元和执行机构。

### 1. 控制对象

控制对象是指所要控制的机器、设备或装置,而所要控制的运行参数则称为被控量。例如,在图 1-1-1 所示的柴油机气缸冷却水温度自动控制系统中,柴油机是控制对象,冷却水温度是被控量;在锅炉水位自动控制系统中,锅炉是控制对象,水位是被控量;在锅炉蒸汽压力控制系统中,锅炉是控制对象,蒸汽压力是被控量;在燃油黏度自动控制系统中,燃油加热器是控制对象,燃油黏度是被控量;在柴油机转速的控制系统中,柴油机是控制对象,转速是被控量,等等。控制对象也可称为被控对象。

### 2. 测量单元

测量单元的作用是,检测被控量的实际值,并把它转换成统一的标准信号,该信号称为被控量的测量值。在气动控制系统中,对应被控量的满量程,其统一的标准气压信号是  $0.02 \sim 0.1 \text{ MPa}$ ;在电动控制系统中,对应被控量的满量程,其统一的标准电流信号是  $0 \sim 10 \text{ mA}$  或  $4 \sim 20 \text{ mA}$ ,使用  $4 \sim 20 \text{ mA}$  居多。测量单元一般包含两部分,即传感器和变送器,传感器用于对物理量进行检测,变送器则将传感器的输出转换为调节器能够接受的信号。例如,在温度自

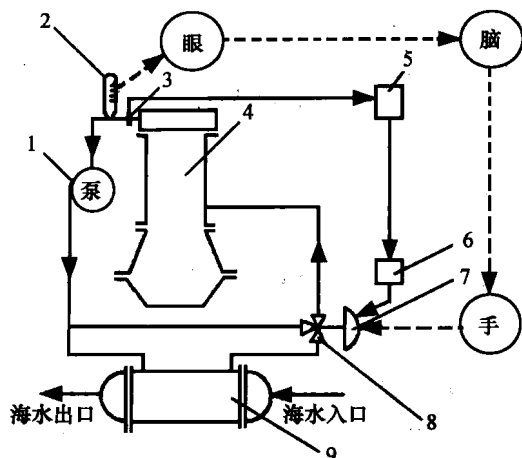


图 1-1-1 柴油机气缸冷却水温度控制过程示意图

1—淡水泵;2—温度表;3—感温元件;4—柴油机;5—温度变送器;6—调节器;7—执行机构;8—三通调节阀;9—淡水冷却器

动控制系统中,测量单元常采用温度传感器和温度变送器;在压力自动控制系统中,测量单元常采用压力传感器和压力变送器;在锅炉水位控制系统中,测量单元常采用水位发讯器(参考水位罐)和差压变送器,等等。

### 3. 调节单元

调节单元是指具有某种调节作用规律的调节器。调节器接收测量单元送来的被控量测量值,并与被控量的希望值相比较得到偏差信号,再根据偏差信号的大小和方向(正偏差还是负偏差),按照某种调节作用规律输出一个控制信号,送给执行机构,对被控量施加控制作用,直到偏差等于零或接近零为止。

在反馈控制系统中,一般把被控量的希望值称为设定值,被控量的测量值与设定值之间的差值称为偏差值。若将设定值表示为 $r$ ,被控量的测量值表示为 $z$ ,偏差表示为 $e$ ,则有

$$e = r - z. \quad (1.1)$$

若 $e > 0$ ,则说明测量值低于设定值,称为正偏差;

若 $e < 0$ ,则说明测量值大于设定值,称为负偏差;

若 $e = 0$ ,则说明测量值等于设定值,称为无偏差。

在实际应用中,调节器一般有位式调节器、比例调节器、比例积分调节器、比例微分调节器和比例积分微分调节器等5种。根据控制对象特性的不同及对被控量控制精度的要求,控制系统可选用不同调节作用规律的调节器。

### 4. 执行机构

执行机构接受调节单元输出的控制信号,并将该信号转换为作用到控制对象的实际控制作用。调节单元输出的控制信号一般都要经过执行机构才能作用到控制对象上,从而改变流入控制对象的物质或能量流量,使之能适应控制对象的负荷变化。在气动控制系统中,执行机构一般是气动薄膜调节阀或气动活塞式调节阀;在电动控制系统中,一般采用伺服电机。

以上四个单元是组成反馈控制系统必不可少的基本单元。但对于一个完整的控制系统,一般都还会有若干辅助单元,例如,用来指示被控量给定值和测量值的指示单元和设定给定值的给定单元等。另外,对气动控制系统来说,还应设有气源装置;对电动控制系统还应有稳压电源等辅助装置。

## 二、反馈控制系统传递方框图

为了分析反馈控制系统工作过程方便起见,可把组成反馈控制系统的四个基本单元分别用一个小方框来表示,并用带箭头的信号线来表示各单元之间的信号传递关系。这样就构成了如图1-1-2所示的反馈控制系统传递方框图。通过传递方框图,需要明确以下几个概念。

### 1. 环节

在控制系统传递方框图中,代表实际单元的每个小方框称为一个环节。每个环节都有输入量和输出量,并用带箭头的信号线来表示。其中箭头指向该环节的信号线为输入量,箭头离开该环节的信号线为输出量,在信号线上可标明输入和输出量的名称,也可以不写。任何环节输出量的变化均取决于输入量的变化以及该环节的特性,而输出量的变化不会直接影响输入量;另外,如果信号线在某处出现分支,则各个分支的信号具有等值特性。

### 2. 扰动

控制对象作为反馈控制系统的组成环节,其输出量是被控量,而引起被控量变化的因素统称为扰动。显然,扰动量是控制对象的输入量,具体包含两类,即基本扰动和外部扰动。

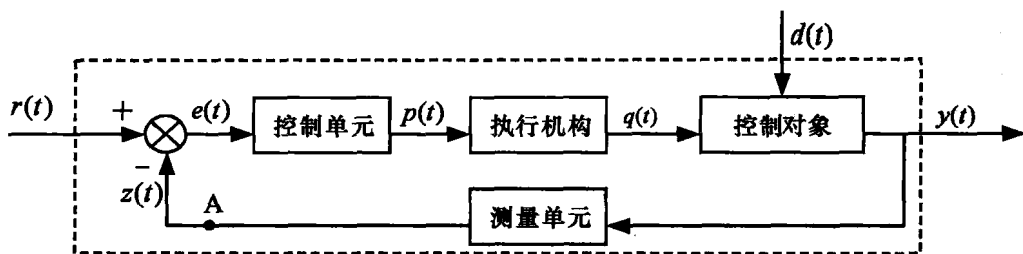


图 1-1-2 反馈控制系统传递方框图

$r(t)$ —设定值; $z(t)$ —测量值; $e(t)$ —偏差值; $y(t)$ —被控量; $q(t)$ —执行量; $p(t)$ —控制量; $d(t)$ —外部扰动值

基本扰动是指来自控制系统内部控制通道(调节通道)的扰动。例如,在水位控制系统中,给水调节阀开度的改变将引起水位的变化;在冷却水温度控制系统中,三通调节阀开度的改变将引起水温的变化,等等。这种扰动通过系统内部的调节通道,改变流入控制对象的物质或能量的流量,从而影响控制对象的输出。因此,基本扰动通过调节通道影响被控量。

外部扰动是指来自系统外部环境的扰动。例如,以锅炉为控制对象的水位控制系统,水位是被控量,锅炉负荷(外部用汽量)的变化将引起水位的变化;在柴油机气缸冷却水温度控制系统中,水温是被控量,柴油机负荷的变化、海水温度的变化、淡水冷却器中水管结垢的多少等都会引起冷却水温度的变化。这种扰动是由于设备负荷或外界环境的变化而导致控制对象内部的能量平衡遭到破坏而引起的。因此,外部扰动通过扰动通道影响被控量。

在图 1-1-2 中,有两个信号线的箭头指向控制对象,它们分别代表基本扰动(执行机构的输出  $q$ ) 和外部扰动(控制对象负荷或环境因素的变化  $d$ )。

### 3. 系统的输入与输出

前面提到的输入和输出的概念都是针对环节而言的,若从系统的角度来看,则可将图 1-1-2 所示的各个基本环节看作一个整体,如图中的虚框所示。不难看出,作为一个整体,系统具有两个输入,即设定值和外部扰动,以及一个输出,即被控量。

### 4. 反馈

在控制系统传递方框图中,符号“ $\otimes$ ”是一个比较算子(它不是一个独立环节,而是调节器中的一个组成部分,为清楚起见,单独画出),它对被控量的给定值  $r$ (旁标“+”号)和测量值  $z$ (旁标“-”号)进行比较,得到偏差值  $e = r - z$ ,作为调节器的输入值。调节器的输出经执行机构改变控制强度,即改变流入控制对象的物质或能量的流量,引起被控量变化(即系统输出变化),而系统输出的变化经测量单元又送回到系统的输入端,这个过程叫反馈。只有通过反馈才能不断地对被控量的给定值和测量值进行比较,只要存在偏差的变化,调节器就会指挥执行机构动作,直到测量值回到给定值或给定值附近为止(偏差是否为零取决于调节器所采用的调节规律)。这时调节器的输出不再改变,执行机构的输出正好适应负荷的要求,控制系统达到一个新的平衡状态。不难理解,这是一种根据偏差来进行控制的控制系统。

反馈有正反馈和负反馈之分。正反馈是指加强系统输入效应的反馈,它使偏差  $e$  增大;而负反馈是指减弱系统输入效应的反馈,它使偏差  $e$  减小。显然,按偏差进行控制的系统必定是一个负反馈控制系统。但是,在自动化仪表中,特别是在调节器中,为实现某种作用规律和功能,常采用复杂的正、负反馈回路。

### 5. 前向通道与反馈通道

在控制系统传递方框图中,从系统的输入端沿信号线方向到达系统输出端的通道称为前向通道;而相反方向的通道则称为反馈通道。

### 6. 闭环系统

在反馈控制系统传递方框图中,前一环节的输出就是后一环节的输入,系统的输出又经反馈通道送回到系统的输入端。这样,控制系统就形成了一个封闭的控制回路,称为闭环系统。反馈控制系统必定是闭环系统。如果在闭环系统的某处把回路断开,例如在图 1-1-2 中的 A 点断开,那么该系统就由闭环系统变成了开环系统。开环系统不再是反馈控制系统,无法根据偏差来实现设备或生产过程的参数自动控制。

## 三、反馈控制系统的工作过程

根据前面介绍的概念,反馈控制系统的工作过程可以描述如下:设系统处在平衡状态(即系统稳定运行)时突然受到一个外部扰动,被控量将离开初始稳定值发生变化,测量单元将被控量的实际值送至调节器,在调节器内部,被控量的给定值与测量值进行比较,得到偏差值  $e$ ,调节器依据偏差值的大小和方向按照某种调节作用规律输出一个控制信号,通过执行机构改变流入控制对象的物质或能量流量,被控量朝着偏差减小的方向变化,这一信号又通过测量单元送至调节器,重复上述过程,最终使被控量又回到给定值或给定值附近,系统达到一个新的平衡状态。

当改变给定值时,系统的工作与上述过程类似。

## 四、反馈控制系统的分类

反馈控制系统按其用途、形式和特点有多种分类方法,通常有以下几种分类。

### 1. 按所用能源分类

反馈控制系统按所用能源分为气动控制系统和电动控制系统。在气动控制系统中,用压缩空气作为能源,气源压力是 0.14 MPa,各种气动仪表的输入和输出信号为标准的气压信号,即 0.02 ~ 0.1 MPa。在电动控制系统中,用电能作为能源,各种电动仪表的输入和输出信号是标准的电流信号 0 ~ 10 mA 或 4 ~ 20 mA。

### 2. 按仪表的结构形式分类

按仪表结构形式可分为单元组合仪表和基地式仪表。若组成控制系统的各个单元都分别制成一台独立的仪表,各仪表之间用标准的统一信号联系起来,叫单元组合仪表。若把测量单元、调节单元和显示单元组装成一台仪表,这种仪表则叫做基地式仪表。在基地式仪表中,虽然仍有测量、显示和调节等功能,但在结构上,它们已是不可分割的整体,因而它们之间也不用标准信号加以联系。

### 3. 按给定值的变化规律分类

按给定值变化规律控制系统可分为定值控制系统、程序控制系统和随动控制系统。在定值控制系统中,给定值是不变的。当系统受到扰动后,被控量的测量值会离开给定值出现偏差,控制系统的作用是逐渐消除偏差,使被控量最终回到原来的给定值上或给定值附近。机舱中大多数运行参数的自动控制系统均属于定值控制系统。一般在调节器上都有一个给定值调整旋钮,可以对给定值进行人工整定。当旋钮的位置固定以后,控制系统的给定值就不再改变。例如,在燃油黏度控制系统中,若把给定值设定在某个希望值上,控制系统的任务就是在系统受到扰动后,最终要把燃油黏度控制在这个值上。

在程序控制和随动控制系统中,给定值是变化的。控制系统的作用是,使被控量始终跟踪给定值,随给定值变化而变化。两者的区别在于,程序控制系统给定值的变化是按人们事先安排好的规律进行变化,一般情况下是一个时间的函数,如柴油机在高负荷区加速时的转速控制。随动控制系统给定值的变化是任意的,不可能用事先安排好的规律来描述。例如,在船舶舵机的随动控制系统中,舵角的设定值往往是随机的。

#### 4. 按信号特征分类

按照系统中信号的变化是连续变化还是断续变化可以分为连续系统和离散系统。所谓连续系统指的是系统各部分信号都是模拟的连续函数。目前,工业中普遍采用的常规 PID 调节器控制的系统均属于连续型系统。所谓离散型指的是在系统中采用脉冲开关或采样开关,将连续信号转变为离散信号,使得系统的某一处或几处信号以脉冲序列或数码的形式传递。例如,采用计算机控制的系统一般都是离散型系统。

此外,按照系统的数学模型特点还可以分为线性系统和非线性系统;按照输入和输出变量的个数可分为单输入单输出系统和多输入多输出系统;按照系统功能可以分为以各种功能名称命名的系统,如温度控制系统、转速控制系统、液位控制系统和压力控制系统等。

### 五、自动控制系统的其他形式

反馈控制系统由于其输出信号经过反馈回路送回到系统的输入端,形成了一个封闭的回路,因此也叫做闭环控制系统。闭环控制只是对被控量进行有效控制的一种基本手段,在实际系统中通常还有开环控制与复合控制两种形式。

#### 1. 开环控制

在图 1-1-1 所示的缸套水温度控制系统中,如果操作人员根据不同的温度设定值,按照某种方式操作旁通阀,例如对应不同的温度设定值控制不同的旁通阀开度,然后就不再管它了,那么,这就是一种开环控制。对于人的这种操作方式,同样可以采用相应的控制仪表来实现,其传递方框图如图 1-1-3 所示。由于是按照不同的给定值来确定不同的旁通阀位置,因此这是一种按照给定值操作的开环控制系统。

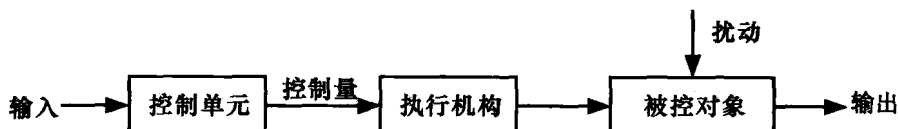


图 1-1-3 按给定值控制的开环控制系统传递方框图

这种控制方式对来自外界的干扰没有任何补偿作用(即控制作用),要想在外部环境发生变化时缸套水温度能得到相应的控制,可采用如图 1-1-4 所示的方式。当外部环境发生变化,例如柴油机的负荷发生变化或海水温度发生变化时控制单元将根据测量单元输出的扰动量测量值按照一定的控制规律驱动执行机构改变旁通阀的位置,对缸套水温度的变化起到一定的补偿作用。由于是按照不同的外部扰动来确定不同的控制量,因此,这是一种按照扰动进行补偿的开环控制。但这种补偿只对某些可测量扰动有效,对于一些不可测量或未测量的扰动则不起补偿作用。

开环控制是一种最简单的控制方式,其特点是,在控制器与被控对象之间只有前向控制作用而没有反馈控制,即系统中信号的流动未形成闭合回路,系统的输出量对控制量没有影响。

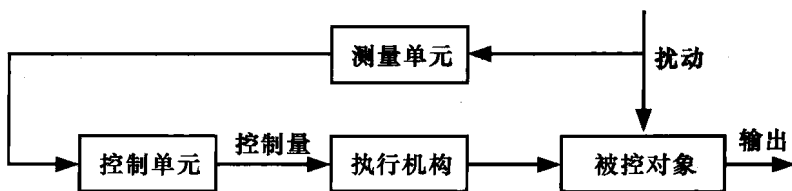


图 1-1-4 按扰动值控制的开环控制系统传递方框图

## 2. 复合控制

所谓复合控制是指在一个控制系统中同时包含有开环和闭环控制方式。图 1-1-5 所示就是一个复合控制系统的例子，该系统在闭环控制的基础上分别增加了按给定值控制和按扰动值控制的开环控制手段。当给定值  $r(t)$  或外界扰动  $d(t)$  发生变化时，控制系统均能够立即改变执行机构的输出  $q(t)$ ，使被控量  $y(t)$  迅速按照给定值变化的方向变化，或者对外界扰动及时地进行补偿，抑制被控量的变化。但这两种开环控制作用在系统中只起粗调的作用，无法消除偏差。消除偏差的任务只能通过闭环系统完成。

应当指出的是，图 1-1-5 所示的例子只是为了说明复合控制系统的概念，在实际应用中，根据控制任务的不同，往往只在闭环控制的基础上增加一种开环控制。

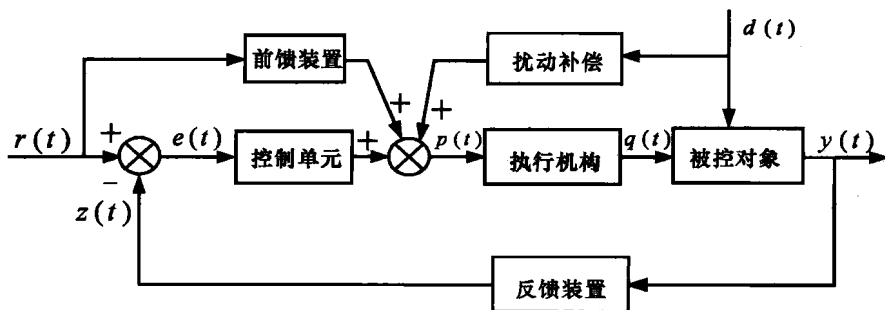


图 1-1-5 复合控制系统传递方框图

## 第二节 反馈控制系统的动态过程

### 一、控制系统动态过程的概念

一个控制系统在运行过程中，若输出量（被控量）不随时间变化而是稳定在给定值上或给定值附近，则系统的这种状态叫稳态。

稳态是暂时的、相对的，因为系统经常会受到扰动，受到扰动后系统的平衡状态（稳态）就会遭到破坏。系统受到扰动后，由于控制对象有惯性，被控量不能突变。因此，在受到扰动的短时间内，偏差不大，这样调节器输出的控制信号及经执行机构流入控制对象的物质或能量流量的改变量都不大，不足以克服扰动，偏差会越来越来。一方面，随着偏差的增大，调节器输出的控制信号也增大，克服扰动的能力增强。另一方面，控制系统在实际运行中，同样由于惯性的原因，执行机构的动作变化量往往会过头，使被控量在向给定值恢复过程中，会出现反向偏差。

综上所述，系统在受到扰动之后，被控量将围绕给定值产生波动。在调节器的控制作用下，波动会越来越小，最终被控量会稳定在新稳态值（给定值或给定值附近）上，系统将达到一个