



项目引领 任务驱动

示范性高等职业院校课改规划教材



主机监测与控制

主编 乔红宇

HEUP 哈尔滨工程大学出版社
Harbin Engineering University Press

主机监测与控制

主编 乔红宇



哈尔滨工程大学出版社

内 容 简 介

本书从船舶轮机及电气管理的实际需求出发,对船舶主机的监测与控制系统进行了深入的论述。本书共两编。第一编为主机监测系统,分为第一、二、三章,主要介绍了自动控制的基本理论、主机运行参数的监测与控制以及主机运行工况的监测。第二编为主机遥控系统,分为第四、五、六、七、八、九章,主要介绍了船舶主机遥控基础、气动式主机遥控、电气混合式主机遥控、微机式主机遥控、PLC 式主机遥控、轮机模拟器中主机遥控系统等相关知识。

本书可作为轮机管理和船舶电气高职专业的专业教材,也可供相关技术管理人员学习参考。

图书在版编目(CIP)数据

主机监测与控制/乔红宇主编. —哈尔滨:哈尔滨工程大学出版社,2011.7

ISBN 978 - 7 - 5661 - 0188 - 4

I. ①主… II. ①乔… III. ①舰船发动机 - 监测 - 高等职业教育 - 教材 ②舰船发动机 - 控制 - 高等职业教育 - 教材 IV. ①U664.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 150853 号

出版发行 哈尔滨工程大学出版社
社 址 哈尔滨市南岗区东大直街 124 号
邮政编码 150001
发行电话 0451 - 82519328
传 真 0451 - 82519699
经 销 新华书店
印 刷 黑龙江省地质测绘印制中心
开 本 787mm × 1 092mm 1/16
印 张 19.25
字 数 477 千字
版 次 2011 年 8 月第 1 版
印 次 2011 年 8 月第 1 次印刷
定 价 36.00 元

<http://press.hrbeu.edu.cn>

E-mail: heupress@hrbeu.edu.cn

前 言

船舶主机的监测与控制是轮机自动化技术的重要体现。随着计算机技术的不断进步,船舶主机的监测与控制技术得到了长足的发展,体现为主机控制系统广泛采用微机(PC、单片机及 PLC)控制及监测技术,同时也对船舶主机控制与管理提出了新的要求。本书作为船舶类高职院校的专业教材,论述力求深入浅出、言简意赅,着力反应主机监测与控制技术的主流技术和发展趋势。在本书编写时,注重体现技术的新颖性,对现阶段广泛使用的新型控制系统详加介绍(如第五代集装箱船上配置的单片机式中央冷却水温度控制系统、AUTOCHIEF-IV 主机遥控系统、NK-100/PD-100 主机工况监测与诊断系统等)。同时,注重理论联系实践,重点介绍主机管理时的工作要点,切合高职教育的实践技能培养要求。另外,本书还增加了监测与控制系统的电路分析,以满足船舶电气专业的技能培养要求,这部分内容在轮机管理专业的教学中可供选学。

全书共分九章。第一、二、三、四、九章由南通航运职业技术学院乔红宇编写,第五、六、七、八章由南通航运职业技术学院王爱军编写,全书由乔红宇统稿。本教材由南通航运职业技术学院朱永祥副教授担任主审。在本书编写过程中得到了南通航运职业技术学院杨泽宇、沈苏海、王琪、陆虎、常鸿雁等老师的大力支持和帮助,在此表示诚挚感谢。

由于编者水平所限,不当之处乃至谬误在所难免,敬请读者批评指正。

编者

2011 年 3 月

目 录

第一编 船舶主机监测系统

第一章 参数的自动控制	3
第一节 自动控制系统的基本概念	3
第二节 控制对象的基本特性	8
第三节 调节器的调节规律	13
第四节 船用传感器	24
第二章 主机运行参数监测与控制系统	39
第一节 柴油机气缸冷却水温度自动控制系统	39
第二节 燃油黏度自动控制系统	60
第三节 曲轴箱油雾浓度监测装置	81
第四节 主机排气温度监测控制系统	92
第三章 主机工况的监测及故障诊断系统	98
第一节 NK - 100/PD - 100 主机热工工况监测与诊断系统	98
第二节 SIPWA - TP/MAPEX - PR 主机机械工况监测与诊断系统	129

第二编 船舶柴油机控制系统

第四章 主机遥控技术基础	145
第一节 概述	145
第二节 数字逻辑电路	153
第三节 常用气动元部件	161
第五章 气动式主机遥控系统	171
第一节 启动逻辑控制	171
第二节 换向和制动逻辑控制	177
第三节 转速与负荷控制	182
第四节 气动遥控系统实例分析(一)	189
第五节 气动遥控系统实例分析(二)	200
第六章 电气混合式主机遥控系统	210
第一节 电气混合式主机遥控系统概述	210
第二节 转速控制环节	211
第三节 AUTOCHIEF - III 系统逻辑程序控制	217
第四节 AUTOCHIEF - III 系统转速与负荷控制	226
第五节 电气混合式主机遥控系统管理要点	235

第七章 微机式主机遥控系统	237
第一节 概述	237
第二节 AC-4 主机遥控系统组成和参数整定	240
第三节 数字调速器	253
第四节 主机安全保护装置	265
第五节 系统故障的诊断	267
第八章 PLC 式主机遥控系统	269
第一节 可编程控制器概述	269
第二节 PLC 控制的主机遥控系统	273
第九章 轮机模拟器中的主机遥控系统	288
第一节 轮机模拟器概述	288
第二节 2H-4000 轮机模拟器的主机遥控系统	291
参考文献	300

第一编 船舶主机监测系统

第一章 参数的自动控制

自动控制理论,特别是参数的自动控制,是轮机自动化的核心,也是主机监测与控制技术的基础,对于主机监测与控制的学习和管理是十分必要的。在船舶机舱设备中,常见的与主机有关的参数自动控制系统包括船舶主机冷却水温度控制系统、燃油黏度控制系统、曲轴箱油雾浓度控制系统、主机转速自动控制系统等。

本章主要介绍自动控制系统的基本概念、调节对象的基本特性以及调节作用规律等内容,并在此基础上介绍了船用主机传感器的主要类型及工作原理。

第一节 自动控制系统的基本概念

参数的自动控制系统是一个反馈控制系统,其主要任务是将机舱中的各种运行参数如温度、压力、液位、黏度等控制在所希望的最佳值(一般称为给定值)上。虽然这些自动控制系统的结构形式各异,但系统的基本组成部分和工作原理却大致相同。

一、自动控制系统的组成

自动控制过程实际上是对手动控制操作过程的模拟,图 1-1-1 画出了手动控制和自动控制柴油机冷却水温度的示意图,以进行比较。

如图,柴油机冷却水温度控制系统主要包括柴油机、冷却器、水泵、三通阀和温度计等组成。冷却水温度的控制方法是改变三通阀的开度,来改变经过冷却器的淡水量 Q_A 和旁通流量 Q_B 的分配比例。当经过冷却器的水量增加而旁通流量减小时,冷却水温度就会降低;反之,冷却水温度就升高。柴油机在运行过程中需要保持一个最佳的冷却水温度,这个最佳值是由柴油机厂家给出并由使用者设定的。

假如柴油机的冷却水温度最佳值是 $70\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。在手动控制时,管理人员需要用眼睛观察温度计,并把观察到的冷却水实际温度值报告给大脑,大脑对这个温度进行分析和计算,其内容包括冷却水的实际温度是否偏离了最佳值。如果偏离了最佳值,是高于最佳值(如 $75\text{ }^{\circ}\text{C}$)还是低于最佳值(如 $66\text{ }^{\circ}\text{C}$),离开最佳值的数值是多少,水温的变化速度是多少,并以此决定三通阀的开度具体应该是多少。大脑会把这个决定作为输出命令传递给手,然后手改变三通调节阀的开度,通过一次或多次调整,使冷却水的实际温度逐渐恢复到冷却水

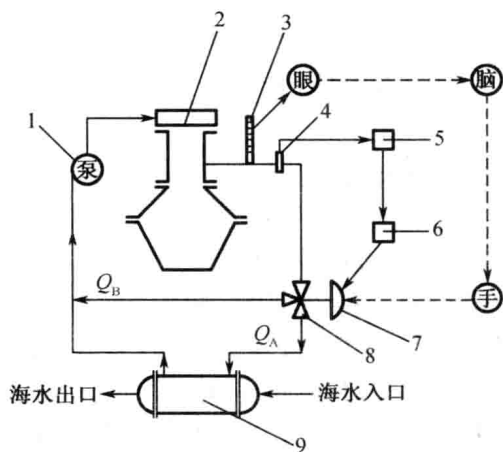


图 1-1-1 柴油机气缸冷却水温度控制过程示意图

- 1—淡水泵;2—柴油机;3—温度计;4—感温元件;
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

温度的最佳值 70°C 。

从以上分析可知,手动控制过程实际上包括以下步骤:观察冷却水实际温度(眼)→分析温度是否需要调节,怎么调节(大脑)→调节指令付诸实施,改变三通调节阀的开度(手)→观察冷却水实际温度(眼)→……其控制过程如图中虚线部分所示。如果想用自动控制系统来实现水温自动控制,就必须有能替代人的眼、脑、手功能的控制仪表。在图 1-1-1 中,由感温元件和温度变送器组成的测量单元可以替代人的眼睛,随时对冷却水的实际温度进行测量并将这个实际值输出至调节器。调节器根据最佳值和实际值的情况进行分析、判断和计算,给出一个调节指令,并将这个调节指令输出至执行机构。执行机构得到调节指令后输出调节动作,对三通调节阀进行开度的调节以改变冷却水温度的实际值。其控制过程如图 1-1-1 中实线部分所示。从以上分析可知,自动控制系统由四个基本单元组成,即控制对象、测量单元、调节单元、执行机构。

(1)控制对象 一般简称为对象,是指要求实现自动控制的机器、设备或装置。把所要控制的运行参数称为被控量,它同时也是自动控制系统的输出量。表 1-1 列出了轮机设备常见的控制对象及其被控量。

表 1-1 常见的控制对象及被控量

自动控制系统	控制对象	被控量
主机冷却水温度控制系统	淡水冷却器	冷却水温度
燃油黏度自动控制系统	燃油加热器	燃油黏度
曲轴箱油雾浓度控制系统	柴油机曲轴箱	油雾浓度
柴油机转速控制系统	柴油机	转速

(2)调节单元 调节单元是指具有调节作用规律的调节器,亦称控制单元,这个相当于人的大脑,是整个调节系统的核心。调节器有两个输入量,分别为给定值和测量值。给定值 $r(t)$ 是运行参数所希望控制的最佳值,测量值 $b(t)$ 则是测量单元测得的运行参数的实际值。被控量的测量值与给定值的差值称为偏差,用 $e(t)$ 表示, $e(t) = r(t) - b(t)$ 。 $e > 0$, 说明测量值低于给定值,为正偏差; $e < 0$, 为负偏差; $e = 0$, 为无偏差。调节器工作时,首先得到测量值与给定值之间的偏差,然后根据偏差的大小和方向,按设定的调节规律发出控制指令给执行器,使偏差值 e 不断减小,直到偏差等于零或接近零为止。在实际应用中,调节单元有位式调节器、比例调节器、比例积分调节器、比例微分调节器、比例积分微分调节器等,其具体工作规律与原理参见本章第三节。

(3)测量单元 用来测量被控量的大小和变化,并将其转换成统一的标准信号(与给定值信号同类型)送至调节器。在气动控制系统中,对应被控量的满量程,其统一的标准信号是 $0.02 \sim 0.1 \text{ MPa}$;在电动控制系统中,对应被控量的满量程,其统一的标准信号是 $4 \sim 20 \text{ mA}$ 或 $0 \sim 10 \text{ mA}$ 。对整个系统而言,测量单元的信号传输方向是从输出至输入,所以亦将其称为反馈单元,参数的自动控制系统一般都采用为反馈控制系统。

(4)执行机构 执行机构接受来自调节器输出的控制信号,其输出量是阀门的开度,从而可以改变流入控制对象的物质或能量流量,使之能符合控制对象负荷的要求,被控量会逐渐回到给定值或给定值附近。常用的执行机构包括气动调节阀执行缸液压油缸及伺服电机等。

以上四个基本单元是组成自动控制系统不可缺少的基本单元。除此之外,一个完整的控制系统还包括显示单元,用来显示被控参数的实际值和给定值;气动控制系统还应设有气源装置和定值器;电动控制系统需要设有电源等辅助装置。

二、自动控制系统传递方框图

为了清楚地表明各个单元在控制系统中的作用以及各单元之间的信号传递关系,我们把每个单元都用一个方框来表示,各方框之间用带箭头的信号线连接起来,这就构成了自动控制系统的方框图,如图 1-1-2 所示。这样的方框图适用于各种运行参数的自动控制系统,具有普遍性。通过传递方框图,要建立以下几个概念。

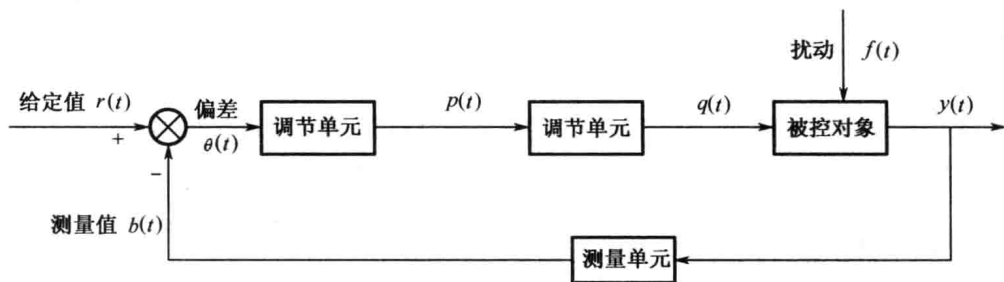


图 1-1-2 自动控制系统传递方框图

(1) 环节 在传递方框图中,代表实际单元的每个小方框称为一个环节,每个环节必定有输入量和输出量,并用带箭头的信号线表示。任何环节输出量的变化均取决于输入量的变化及该环节自身的特性,而输出量的变化不会直接影响输入量,即信号传递具有单向性。

(2) 扰动 引起被控量变化的一切因素称为扰动。显然,扰动量是控制对象的输入量。扰动量可以分为两类:一类是轮机人员无法控制的扰动,称为外部扰动;另一类是轮机人员可以控制的扰动,称为基本扰动。例如,在主机冷却水温度的自动控制系统中,引起水温变化的扰动有主机负荷的变化和蝶阀开度的变化两种。主机负荷的变化是轮机管理人员无法控制的,属于外部扰动;蝶阀开度的变化是可以控制的,属于基本扰动。在图 1-1-2 中,有两个信号线指向控制对象,它们分别是基本扰动(执行机构的输出)和外部扰动。

(3) 闭环系统 在控制系统方框图中,前一个环节的输出就是后一个环节的输入,这样系统就形成一个封闭控制回路,称为闭环系统。反馈控制系统必然是闭环系统。

如果系统的输出量不被引回来对系统的输入部分产生影响(如没有反馈环节),这样的系统称为开环系统。开环系统结构简单,系统稳定性好,成本也低,但当动态过程受到各种扰动因素影响时,将会直接影响输出量,而系统不能自动进行调节。

(4) 反馈 在控制系统反馈图中,符号“⊗”是比较环节(它不是一个独立的环节,而是调节器的一个组成部分,为清楚起见,故单独画出),它随时把给定值 $r(t)$ 与测量值 $b(t)$ 比较得出偏差信号 $e(t)$ 。偏差信号是调节单元的输入量,其输出量 $p(t)$ 经执行单元产生调节信号 $q(t)$,使被控对象的被调量 $y(t)$ 发生变化,被调量 $y(t)$ 的变化经测量单元反送到控制系统的输入端,这个过程称之为反馈。反馈分为正反馈和负反馈两种。正反馈是指经反馈后可以加强闭环系统输入效应,亦即使偏差 e 增加。负反馈是指经反馈后可以减弱闭环系统输入效应,亦即使偏差 e 减小。显然只有负反馈才能随时对被控量的给定值和测量值进行

比较,使偏差 e 不断减小进而保持被控量的稳定在给定值或给定值附近。所以,自动控制系统实为负反馈控制系统,简称反馈控制系统。

三、自动控制系统的分类

自动控制系统按其所用能源、结构形式和特点等多种分类方法。

1. 按被控参数的名称分类

按照被控参数的名称分类是机舱自动控制系统最常见的分类形式。如压力自动控制系统、温度自动控制系统、液位自动控制系统等。

2. 按所用能源分类

可分为气动控制系统和电动控制系统。如果自动控制系统信号的传递以及执行器的动作是依靠压缩空气的动力,称为气动控制系统;如果采用电能,则称为电动控制系统。

3. 按被控参数给定值的变化规律分类

控制系统按被控参数给定值的特点可分为定值控制系统、随动控制系统、程序控制系统。

定值控制系统就是系统的给定值是某一确定值,希望系统的被控量也保持恒定不变。主机热工参数的控制大多属于这一类系统。例如,主机冷却水温度控制系统、主机燃油黏度控制系统、主机转速控制系统等都属于定值控制系统。

随动控制系统的给定值是预先不能确定的,其取决于系统外的某一进程,例如随动操舵系统跟踪船舶航向的变化、雷达控制系统跟踪目标的方位变化就是随机的。

程序控制系统则是指控制系统的给定值按照预先确定的规律进行变化,例如主机遥控系统中的转速加速速率控制便属于此类。

定值控制系统的任务是保持被控量不变,而随动控制系统和程序控制系统的任务是在给定值变化时,力求被控量随着给定值的变化而变化。

四、自动控制系统的动态过程

1. 动态过程特点

一个控制系统在运行过程中,若被控量不随时间变化,而是稳定在给定值或给定值附近,这种状态叫稳态,而被控量随时间变化的不平衡状态称为系统的动态。稳态是暂时的、相对的和有条件的,动态是普遍的、绝对的和无条件的。因为系统经常会受到扰动,系统的平衡状态因而会经常遭到破坏。由于控制对象有惯性,被控量不能突变,所以它在受到扰动的短时间内,偏差并不大。这样调节器输出的控制信号和经调节阀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,使偏差越来越大。随着偏差的增大,调节器输出的控制信号及由它所指挥的调节阀开度变化量都增大,在实际运行中,调节阀开度的变化量往往会过头,使被控量在向给定值恢复过程中,出现反向偏差,即被控量会围绕给定值上下波动,以后在调节器控制作用下,波动越来越小,最终被控量会稳定在新稳态值(给定值或给定值附近),系统达到一个新的平衡。所以,从受到扰动开始到达到新的平衡状态的过程就是动态过程,也称为过渡过程。

2. 评定控制系统动态过程品质的指标

一般,被控量变化的动态过程有以下几种。

(1) 发散振荡过程。被控量 $y(t)$ 的动态过程不但是一个振荡的过程,而且振荡的幅度越来越大,以致会大大超过被控量允许的误差范围,如图 1-1-3 线 1 所示,这是一种典型

的不稳定过程,设计自动控制系统要绝对避免产生这种情况。

(2)等幅振荡过程。被控量 $y(t)$ 的动态过程是一个持续振荡过程,且波动的幅度保持不变,始终不能达到新的稳态值,如图 1-1-3 曲线 2 所示。系统出现等幅振荡过程,这时执行机构将不断地来回动作,这是一种不稳定的系统,生产过程一般不允许这种情况的出现。

(3)单调过程(非周期过程)。被控量 $y(t)$ 单调变化(即没有“正”、“负”的变化),缓慢地到达新的平衡状态(新的稳态值),如图 1-1-3 曲线 3 所示,一般这种动态过程具有较长的动态过程时间,即其调节时间较长。

(4)衰减振荡过程。被控量 $y(t)$ 的动态过程是一个振荡过程,但是振荡的幅度不断在衰减,到过渡过程结束时,被控量会达到新的稳态值。如图 1-1-3 曲线 4 所示。

一般说来,自动控制系统如果设计合理,其动态过程多属于图 1-1-3 曲线 4 的情况。为了满足生产过程的要求,我们希望控制系统的动态过程不仅是稳定的,并且希望过渡过程时间(又称调整时间)越短越好,振荡幅度越小越好,衰减得越快越好。

综上所述,对于一个自动控制系统的性能要求可以概括为三个方面:稳定性、准确性和快速性。

(1)稳定性

稳定性是控制系统是否能实际应用的首要条件,即自动控制系统的最基本的要求是系统必须是稳定的,不稳定的控制系统是不能工作的。

对于定值控制系统,其稳定程度可以用“衰减率”来表示,所谓“衰减率”就是指每经过一个周期以后,波动幅度衰减的百分数,以 Ψ 表示,计算公式是

$$\Psi = \frac{A - B}{A} \quad (1-1)$$

式中 A 是指扰动出现后,被调量偏离给定值的最大值,即衰减曲线上所出现的第一个波的峰值; B 是指与第一个波峰同相的第二个波的峰值。如图 1-1-3 所示。

实际的调节过程一般希望 $\Psi = 0.75 \sim 0.9$ 。

对于改变给定值的控制系统,如图 1-1-4 所示,其稳定程度可以用“超调量”来表示,所谓“超调量”就是指在衰减振荡中,第一个波峰值减去新稳态值与新稳态值之比的百分数,以 σ_p 表示,如式 1-2 所示

$$\sigma_p = \frac{|y_{\max} - y(\infty)|}{|y(\infty)|} \cdot 100\% \quad (1-2)$$

σ_p 越小,系统动态过程波动越小,稳定性越好。但是如果 σ_p 太小,稳定性虽好,但是过渡过程时间会拖长。在实际动态过程中,要求 $\sigma_p < 20\%$ 。

振荡次数 N :指在动态过程中被控量振荡的次数,一般要求被控量振荡 2~3 次就应稳定下来。

(2)准确性

准确性是指调节过程中被调参数偏差的大小,它可由稳态偏差 ϵ 和最大动态偏差 $e_{\max}$ 衡量。

稳态偏差 ϵ 是指在扰动和调节的共同作用下,调节过程结束后,被调参数的新稳态值与给定值之间的偏差,也称为静差。显然,稳态偏差越小,系统的静态精度越高。

动态偏差是指在调节过程中被调参数偏离给定值的幅度,其最大值称为最大动态偏差,用 $e_{\max}$ 表示。调节系统应保证被调量的动态偏差即使在可能出现的最大扰动作用下,也不

应超过允许的变动范围,否则,有可能破坏设备或生产工艺的正常进行。

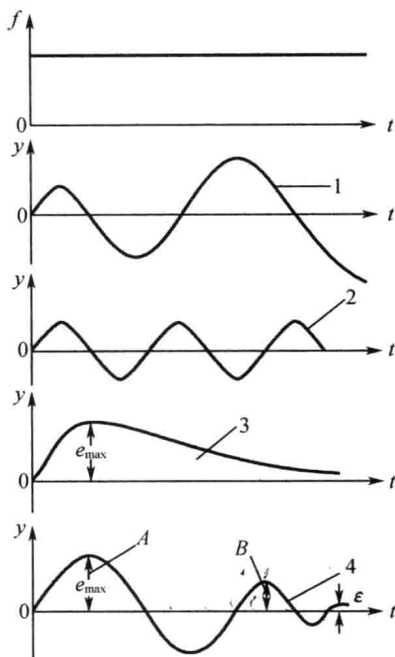


图 1-1-3 定值控制系统的动态过程曲线

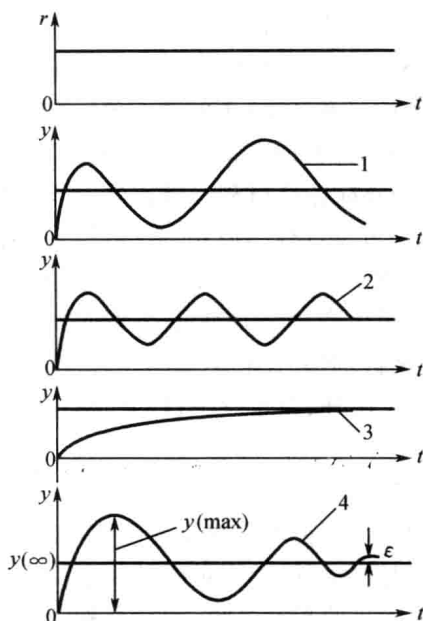


图 1-1-4 改变给定值的控制系统动态过程曲线

(3) 快速性

快速性可用过渡过程时间 t_s 、振荡周期 T_w (频率 f_w) 来表示。

过渡过程时间 (亦称调节时间) t_s 指系统从受到扰动开始到被控量重新趋于稳定建立新的平衡状态为止所经历的时间。从数学上来讲,过渡过程时间应该是无穷大。在工程上,是这样定义过渡过程时间:在大于某一时刻后,被控量的波动范围就始终在最终稳态值的 2% (或 5%) 之内,从开始到这一时刻之间的时间就是过渡过程时间。

振荡周期 T_w 是指过渡曲线上从第一个波峰到第二个波峰之间的时间;其倒数称为振荡频率 f_w 。在保证一定衰减率的条件下,一般希望周期越短越好,这意味着,过渡过程时间短,快速性好。

稳定性、准确性和快速性三个指标常常是相互制约的。例如稳定性提高后,会使动态偏差增大、动态过程变得缓慢。所以,应根据被调对象的不同要求做出合理的选择,在稳定性、准确性和快速性之间合理权衡,找到各方面指数都适当的最佳过渡过程。

第二节 控制对象的基本特性

在机舱中,控制对象的种类很多,常见的有柴油主机、柴油发电机组、锅炉、冷却器、空气瓶、水柜等。所有的控制对象都有一个共同点,即都有储存物质或能量的能力;当控制对象受到扰动后会伴随有物质和能量的流入或流出;物质或能量在流动过程中会受到阻力;物质或能量在流动中和信号在传递过程中会存在时间上的迟延。所以自动调节系统能否得到满

意的调节品质指标,不仅取决于调节器,同时还取决于调节对象的特性。研究调节对象特性的目的,就在于能正确地选择、使用调节器,对调节器进行参数整定,改善调节质量。

一、单容控制对象的动态特性

1. 单容控制对象的动态过程

单容控制对象是指只有一个储蓄物质或者能量容积的控制对象。在机舱中,水柜、油柜以及以水位为控制量的锅炉都属于单容控制对象。下面我们以单容水柜为例,来说明其动态特性。

在图 1-2-1 中,当流入水柜的流量 Q_1 与流出水箱的流量 Q_2 相等时,水柜处于平衡状态(即静态),这时水位 h 保持不变。设在 t_0 时刻以前对象处于平衡状态,即初始流量 $Q_{10} = Q_{20}$,水位稳定在 h_0 高度上。在 t_0 时刻,突然改变进口阀的开度(如开大),则流入量 Q_1 就有了变化,因此 Q_1 就不再等于流出量 Q_2 ,液位 h 也随着变化。假如在 dt 这段时间内液位增高了 dh ,那么这段时间内的流入量和流出量之差 $(Q_1 - Q_2)dt$ 应该等于水箱内增加的水量 $F \cdot dh$,则有

$$(Q_1 - Q_2)dt = F \cdot dh \quad (1-3)$$

显然,随着液位 h 的升高,流出量 Q_2 也会逐渐加大。出水阀关得越小,即阻力越大,流出量 Q_2 就越小。当水位变化不大时,可以近似认为 Q_2 与 h 成正比、与出水阀的阻力 R_s 成反比,亦即

$$Q_2 = \frac{h}{R_s} \quad (1-4)$$

为简便起见,设各变量的起始稳态值为起算点,即令 $Q_{10} = Q_{20} = 0, h_0 = 0$ 。在初始平衡状态下,若给水阀 A 突然开大(阶跃变化),阀 A 的流量系数是 K_μ ,则流入水柜的流量 Q_1 也会阶跃增大,且 $Q_1 = K_\mu \cdot \Delta\mu$ 。将 Q_1 和 Q_2 的表达式代入式(1-3),可得

$$(K_\mu \cdot \Delta\mu - h/R_s)dt = F \cdot dh \quad (1-5)$$

令 $T = FR_s, K = K_\mu R_s$,则有

$$T \cdot \frac{dh}{dt} + h = K \cdot \Delta\mu \quad (1-6)$$

式(1-6)称为单容水柜在阶跃扰动下的微分方程,如果对该微分方程求解,便可获得该水柜对输入的响应 $h(t)$

$$h(t) = K \cdot \Delta\mu (1 - e^{-\frac{t}{T}}) \quad (1-7)$$

上式反映了被控量水位随时间变化的规律。可见,在单容控制对象施加阶跃扰动后,被控量不会突变,而是按照指数曲线变化,其变化曲线如图 1-2-2 所示,此指数曲线称为单容控制对象的飞升曲线。

2. 单容控制对象的特性参数

式(1-7)中包含了两个参数,即放大系数 K 和时间常数 T ,它们是表示动态特性的两个重要参数。下面具体分析一下这两个重要参数的物理意义及其对动态特性的影响。

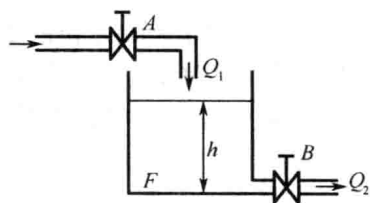


图 1-2-1 单容水柜控制对象

F —水箱的截面积; h —液面高度;

Q_1 —流入水箱的流量; Q_2 —流出水箱的流量

(1) 放大系数 K

K 是控制对象受到扰动后,被控量从初始平衡状态到达新稳态的变化量把扰动量放大的倍数。在对控制对象施加扰动 $\Delta\mu$ 的瞬间 $t=0$ 时, $h(t)=0$, 即水位还没有变化。以后随着 t 的增加, $h(t)$ 不断增大。当 $t=\infty$ 时, 被控量达到新的稳态不再变化, 可见水箱受到阶跃扰动后, 水位就要上升, 其最终变化量为 $h(\infty)=K\cdot\Delta\mu$ 。如果把水箱看作一个环节, 那么, 它的输入量改变 $\Delta\mu$ 时, 它的输出量最终要改变 $K\Delta\mu$ 那么多。好比输入量的变化值经过水箱这个环节放大了 K 倍, 因此把 K 称为放大系数或静态放大系数。

放大系数 K 表示反映了调节对象对于扰动作用的敏感程度。对于相同大小的扰动量, 如果放大系数 K 大, 水位 h 的最终变化也大; 如果放大系数 K 小, 水位 h 的最终变化也小, 系统甚至可以不用调节, 水位的变化也不会很大。所以放大系数 K 大的调节对象, 调节比较灵敏, 但稳定性差; 放大系数 K 小的调节对象, 调节不够灵敏, 但稳定性好。从稳定性出发, 一般都希望对象的放大系数 K 小一些为好, 不同 K 值对系统动态过程的影响如图 1-2-3 所示。

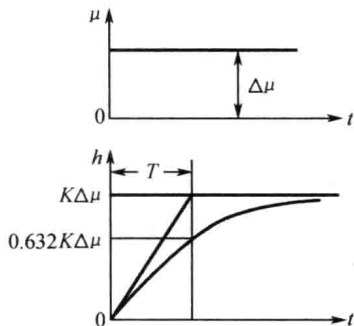


图 1-2-2 单容水箱阶跃响应的飞升曲线

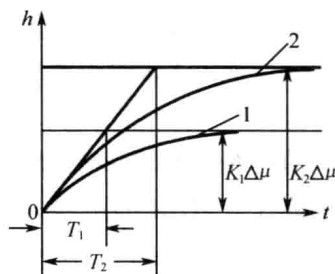


图 1-2-3 K 值变化对动态过程的影响

(2) 时间常数 T

T 是反映控制对象惯性大小的动态特性参数。在刚加上一扰动的瞬间, 即 $t=t_0=0$ 时, 水位的变化速度是多大呢? 将初始值 $h(0)=0$ 代入式(1-6), 可得

$$\left. \frac{dh}{dt} \right|_{t=0} = \frac{K\Delta\mu}{T} \quad (1-8)$$

从图 1-2-2 上可以看出, $t=0$ 时, 曲线的切线在新的稳态值上截得的一段时间就等于 T 。也就是说, 如果水位一直保持以 $t=0$ 时的最大速度变化, 则经过一个 T 的时间就可以达到新的稳态值。但是实际上水位变化速度是越来越慢的, 所以水位变化到新的稳态值实际所需的时间就要比 T 长得多。从理论上讲, 这个时间是无穷长的。根据式(1-7)容易得到: $t=T$, $h(T)=0.632K\Delta\mu$; $t=2T$, $h(2T)=0.86K\Delta\mu$; $t=3T$, $h(3T)=0.95K\Delta\mu$; $t=4T$, $h(4T)=0.982K\Delta\mu$ 。显然, 从扰动开始后经过 $(3\sim 4)T$ 的时间, 水位的变化过程就基本结束了。因此, 工程上一般取 $(3\sim 4)T$ 作为动态过程的时间。显然, 时间常数 T 可以表示扰动发生后被控量完成变化过程所需要的时间的长短, 可以反映控制对象惯性的的大小。 T 越大, 表明动态过程所需时间越长, 飞升曲线越平坦, 控制对象的惯性也越大; T 越小, 表明动态过程所需时间越短, 飞升曲线较陡, 控制对象的惯性较小。图 1-2-4 示出了不同时间

常数 T 的飞升曲线。

求取时间常数 T 有两种方法。其一是过 $t=0$ (坐标原点) 点作飞升曲线的切线, 该切线交于新稳态值点的横坐标就是时间常数 T 。它的物理意义是: 从对控制对象施加阶跃扰动瞬间开始, 被控量以最大的变化速度达到新稳态值所需要的时间就是 T 。另一种方法是当 $t=T$ 时, $h(T) = K \cdot \Delta\mu (1 - e^{-1}) = 0.632K \cdot \Delta\mu$, 所以 T 的物理意义也可以表述为: 控制对象受到扰动后被控量变化到新稳态值的 63.2% 时所需要的时间。

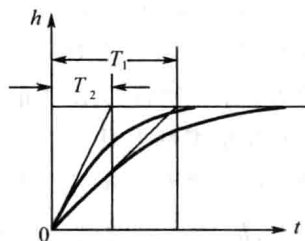


图 1-2-4 T 变化对动态过程的影响

(3) 纯迟延 τ_0

控制对象的迟延包括纯迟延和容积迟延, 它是控制对象的极为重要的动态特性参数, 对控制系统的动态过程具有重大影响。单容控制对象只有纯迟延, 多容控制对象除了纯迟延外, 还有容积迟延。

由于结构上的限制等原因, 执行机构 (如阀门、挡板等) 的安装位置与控制对象有一定的距离, 使控制对象在动态过程中表现出滞后的特性。从图 1-2-5 中看到, 调节阀 1 与水箱之间有一段较长的管路, 所以当调节阀 1 的开度改变 (即 Q_1 改变) 后, 流进水箱的水量 Q'_1 不会立即改变, 而是要经过一段时间以后 Q'_1 才能发生变化, 水箱水位也才能随之变化。这是因为液体流过一段距离 (或能量的传递) 需要一定的时间, 这就是对象的滞后。上面说的这种滞后是工质或能量在传递过程中产生的, 故称为纯迟延 (或传递迟延)。具有纯迟延特性的系统, 其控制对象的飞升曲线如图 1-2-5 所示。设在 $t=0$ 时刻, 调节阀的开度突然增大, 流入量在同一时刻也有相应的增量 ΔQ_1 , 如果此增大后的流量立即流进水箱, 则水位在 $t=0$ 时开始变化, 飞升曲线为图中的虚线 1。实际上 Q_1 必须通过一段较长的管道才能流进水箱, 所以水位滞后到 t_1 时刻才开始变化, 飞升曲线如图中的实线 2, τ_0 就是纯迟延时间。

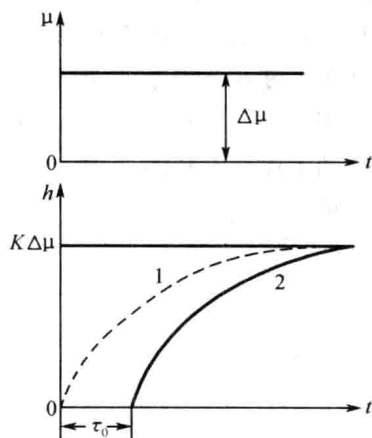


图 1-2-5 具有纯迟延的单容控制对象的飞升曲线

τ_0 的大小由系统的具体布置而定。很显然, 在 τ_0 时间内, 调节器是无能为力的, 从而使偏差越来越大。迟延时间一过, 调节器指挥调节阀开度会过头, 造成动态过程振荡倾向明显, 降低系统稳定性, 迟延越长, 这种影响越明显。纯迟延降低了对象的控制性能, 因此, 应尽量减小纯迟延 τ_0 以保证控制系统的稳定性。

二、多容控制对象的动态特性

在机舱中, 多数控制对象都具有两个或两个以上储蓄物质或能量的容积, 称为多容控制对象。多容控制对象可以近似看成是若干单容控制对象按不同方式组合而成的。因此分析单容对象的方法也适合于多容对象。但由于多容对象增加了储蓄容积和阻力因素, 使得被控量的变化规律与单容对象不同。以下以由两个水箱组成的双容控制对象为例进行分析。