

时滞系统低阶控制器设计： 参数空间法

王德进 著



科学出版社

014010254

TP13
270

时滞系统低阶控制器设计： 参数空间法

王德进 著



科学出版社

北京



北航

C1696853

TP13
270

内 容 简 介

本书以作者的科研成果为主线,系统介绍了参数空间图解法在PID控制器和相位超前/滞后补偿器这两类应用广泛的低阶控制器设计中的应用。书中,第1章为绪论,介绍了PID控制器的发展史和展望;第2、3章阐述了两类低阶控制器的基本调节原理以及时滞系统的一些特点和稳定性分析方法;第4章介绍了参数空间法和图解稳定性准则;第5、6章为全书的重点内容,其中第5章针对各种不同类型的时滞系统模型,采用PID控制器,分别给出了比例增益的允许取值范围和在微分-积分增益平面上的参数稳定域,并在稳定域内进行系统性能设计,第6章则讨论了时滞系统相位超前/滞后补偿器参数稳定域的确定和性能设计问题;第7章给出了参数空间图解法在水箱液位控制系统中的应用。

本书可作为高等院校自动化及相关专业的教师和研究生、科研机构的研究人员的参考书,也可供从事自动控制相关工作的工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

时滞系统低阶控制器设计:参数空间法/王德进著. —北京:科学出版社, 2013

ISBN 978-7-03-038902-2

I. ①时… II. ①王… III. ①时滞系统-控制器-设计 IV. ①TP13

中国版本图书馆CIP数据核字(2013)第246258号

责任编辑:裴 育 / 责任校对:邹慧卿
责任印制:肖 兴 / 封面设计:蓝正设计

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

文林印务有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2013年10月第 一 版 开本:B5(720×1000)

2013年10月第一次印刷 印张:12

字数:232 000

定价:58.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

首先,本书界定的低阶控制器,是指 PID(proportional-integral-derivative)控制器和相位超前/滞后补偿器。这两类控制器(补偿器)阶次低、结构简单、易于实现,同时鲁棒性强,多数情况下控制效果好,在工业过程控制领域获得了广泛应用。

PID 控制技术自 20 世纪四五十年代发展成熟以来,一直在工业过程控制领域处于主导地位,其次是相位超前/滞后补偿器。在这期间,现代控制理论和后现代控制理论取得了令人瞩目的研究成果,但都没有动摇这两类控制器的统治地位。近二十多年来,PID 控制器在国际著名控制专家 Astrom 教授的倡导下,在理论方面又取得了长足进展,每年有关 PID 控制方面的文章不断涌现,呈递增的趋势。在应用方面,Astrom 教授指出,PID 控制器在未来的控制工程中仍将扮演重要的角色,将作为各种复杂控制系统的基本单元被广泛应用。同时,相位超前/滞后补偿器在国内外反馈控制方面的教科书中,一直作为一种校正网络而成为控制系统综合的主要内容,其综合方法为试凑法。为了克服试凑法的缺点,近些年来,各种解析设计法相继出现。另外,时滞现象在各种工业过程中普遍存在,时滞的存在往往导致控制系统性能的退化,严重时会使控制系统不稳定。对时滞系统采用低阶控制器进行控制,无疑具有理论意义与实际应用价值。

本书的主要内容是作者近年来在时滞系统低阶控制器参数稳定域研究领域成果的总结。研究低阶控制器参数稳定域的意义在于以下两方面:其一,传统的参数整定方法依赖于实验,而在一些场合(如不稳定过程),出于安全的考虑不允许实验;其二,知道完整的参数稳定域,对系统性能设计也是必要的。参数空间图解法是确定 PID 控制器和相位超前/滞后补偿器这类简单控制器(补偿器)参数稳定域的一种有效途径,它避免了其他方法(如 D-分解法)复杂的数学计算和稳定性检验的麻烦,而根据曲线的走向,直接识别出曲线的哪一侧为参数稳定域,简单且直观。

本书的内容分为两部分:

第一部分由前三章组成,主要起衔接作用。第 1 章较详细地介绍 PID 控制器的发展历程、参数整定方法以及未来的发展。第 2 章讲述两种低阶控制器的基本调节(补偿)原理和 PID 控制器经典的 Z-N(Ziegler-Nichols)参数整定方法,为初学者提供素材。第 3 章首先分析时滞系统的一些特点,指出时滞系统难于控制;然后介绍时滞系统的研究方法,特别是时滞系统稳定性的研究方法;最后通过一个实例,将时滞系统稳定性理论应用于镇定 PID 控制器的设计。

第二部分包括后面的四章。第 4 章详细介绍参数空间图解法的基本概念、基

本原理,给出图解稳定性准则的证明和简单的应用,使读者能理解和掌握该方法。第5、6章为本书的核心内容,其中第5章应用参数空间图解法求解镇定PID控制器的参数集合。首先,针对工业过程控制领域各种常见的被控对象模型,分别证明比例增益的允许取值范围;然后,在微分-积分增益平面上绘制和识别参数稳定域;最后,将上述结果推广到一般形式的被控对象模型,并在参数稳定域内进行两种类型的系统性能设计,即经典的幅值裕度和相角裕度性能设计以及现代的 H_∞ 性能设计,实现了PID控制器参数的图解法整定。第6章讨论相位超前/滞后补偿器设计的参数空间图解法,在相位超前补偿器的场合,证明了补偿器增益的允许取值范围;在此基础上,在补偿器的两个时间常数构成的平面上绘制和识别出参数稳定域;进一步地,在稳定域内进行幅值裕度和相角裕度设计,完成了补偿器参数的整定;为了比较,同时还回顾了经典的试凑法,给出了一种解析设计方法。第7章是参数空间图解法在水箱液位控制系统中的应用。利用图解法设计PI控制器的参数,取得了较好的控制效果,并与Z-N参数整定方法的结果进行了比较。

本书的阅读路径分为两条:

PID控制器:2.1节、2.2节→第3章→第4章→第5章→第7章。

相位超前/滞后补偿器:2.3节→第3章→第4章→第6章。

另外,对应用领域的工程师来说,可以直接阅读第5、6章的一些结论,而略去复杂的证明,通过相应的例题来掌握这些主要结果的应用方法。

在本书撰写过程中,张江辉、高学利、蔡国娟、李玮和张富强等研究生协助进行了大量的仿真、实验、绘图和整理工作,我的妻子帮助打印了大部分书稿,在此一并表示感谢。

书中涉及的研究内容得到了国家自然科学基金的资助,在此表示感谢。

由于作者水平有限,书中不妥之处在所难免,敬请读者批评指正。

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 PID 控制器的发展史	1
1.2 PID 控制器的设计和参数整定	6
1.3 PID 控制器的未来发展	7
本章小结	8
第 2 章 低阶控制器的基本调节原理	9
2.1 PID 控制器的调节原理	9
2.1.1 反馈原理	9
2.1.2 比例环节的作用	11
2.1.3 PID 控制	13
2.1.4 积分环节的作用	13
2.1.5 微分环节的作用	16
2.2 Ziegler-Nichols 参数整定	19
2.3 相位超前/滞后补偿器的调节原理	22
2.3.1 相位超前补偿器	22
2.3.2 相位滞后补偿器	25
本章小结	27
第 3 章 时滞系统及其特性	28
3.1 概述	28
3.2 时滞系统的特点	31
3.2.1 时滞对系统的影响	31
3.2.2 时滞系统特征根的分布	33
3.2.3 滞后因子的 Pade 近似	35
3.2.4 时滞系统的 Nyquist 曲线	36
3.3 时滞特征方程的稳定性	38
3.4 在控制系统中的应用	41
3.4.1 稳定性分析	41
3.4.2 一个例子	45
本章小结	61

第 4 章 参数空间图解法	62
4.1 概述	62
4.2 参数平面稳定域	63
4.3 图解稳定性准则	66
4.4 PI 控制器参数稳定域	70
本章小结	73
第 5 章 时滞系统 PID 控制	74
5.1 概述	74
5.2 典型滞后过程 PID 控制	75
5.2.1 一阶滞后过程 PID 控制	76
5.2.2 具有实极点的二阶滞后过程 PID 控制	83
5.2.3 具有复极点的二阶滞后过程 PID 控制	89
5.2.4 高阶滞后过程 PID 控制	94
5.3 积分滞后过程 PID 控制	97
5.3.1 纯积分(链)滞后过程 PID 控制	98
5.3.2 一阶加积分滞后过程 PID 控制	104
5.3.3 一阶加双积分滞后过程 PID 控制	109
5.4 一般高阶全极点滞后过程 PID 控制	112
5.5 带零点的高阶滞后过程 PID 控制	119
5.5.1 问题的描述	120
5.5.2 函数 $\Delta_1(s)$ 的一些性质	122
5.5.3 参数稳定域	124
5.6 性能设计问题	133
5.6.1 幅值-相角裕度测试器	133
5.6.2 经典性能设计	135
5.6.3 现代性能设计	144
本章小结	149
第 6 章 时滞系统相位超前/滞后补偿	150
6.1 试凑法	150
6.2 解析法	151
6.2.1 参数整定方法	152
6.2.2 算例	155
6.3 图解法	157
6.3.1 问题的描述	158
6.3.2 参数稳定域	158

6.3.3 曲线 C_m^+ 的性质和增益 K_c 的取值范围	161
6.3.4 幅值裕度和相角裕度设计	166
本章小结	171
第 7 章 在液位控制系统中的应用	172
7.1 单容水箱液位控制	172
7.1.1 单容水箱的数学模型	172
7.1.2 仿真与实验	175
7.2 双容水箱液位控制	177
7.2.1 双容水箱的数学模型	177
7.2.2 仿真与实验	180
本章小结	182
参考文献	183

第 1 章 绪 论

本章将对以 PID 控制器为代表的低阶控制器的发展史、参数整定方法以及未来的发展进行一定的综述。PID 控制器历经近百年的洗礼,经久不衰,即使当今各种先进控制算法不断涌现,PID 控制器仍以其结构简单、易于实现、鲁棒性强和便于操作等特点,被广泛应用于化工、冶金、机械、热工和轻工等工业控制系统中。特别是在分布式控制系统、现场总线控制系统和综合自动化系统中,PID 控制器仍存在于底层基础控制回路中,被人们形象地称为控制工程中的“面包与奶油”。

1.1 PID 控制器的发展史

1. 第一个时期:1900~1940 年

1) 气动放大器

美国的 Tagliabue 公司于 1907 年声称在纽约的一个牛奶巴氏消毒器上安装了世界上第一台气动温度控制器。该控制系统采用水蒸气作为热源,气动控制器利用测量元件检测蒸气压力的变化,通过转换器来直接操纵伺服阀,伺服阀再控制主阀来调节蒸气的流量,实现温度的控制。这种控制方式实际上是一种比例控制,但由于伺服阀设计上的问题,它经常工作于“开关”(on-off)控制状态,难于实现精确的控制。为了克服伺服阀的上述问题,1914 年 Foxboro 仪表公司的 Bristol 在气动控制系统中引入了一个关键的部件——气动放大器。但气动放大器的引入也带来了新的问题,它的高增益和非线性特性增加了系统的敏感性,以至于经常出现极限环。

在实际应用中,为了克服控制器(气动放大器)的高增益所带来的问题,许多仪表制造商推荐使用“旁路”(by-pass)控制机制,即被控制的媒介(如用来加热的蒸气)被分为两路,一路由自动装置来控制,另一路(旁路)则由手动阀门来控制。负载或给定值大的变化由手动调节旁路阀门来控制。另一条改进的途径是采用“两步”控制机制:对应于气动放大器的开关作用,最后一级的调节阀被设定在预先确定的两个固定位置间运动。

与此同时,气动控制系统也与机电控制系统间存在着竞争。例如,Leeds & Northrup 公司提供带有积分作用的机电式控制器。这种控制器可以给出零稳态

误差,但是,为了实现稳定操作,电机必须工作于低速状态,因此,对负载或给定值的变化响应较慢。Leeds (Leeds & Northrup 公司的创始人)于 1920 年获得了一项关于自动控制器的专利。该控制器的修正作用(控制信号)的变化率被设计成是误差信号的变化率,或者是误差信号本身,或者是两者组合的一个函数。利用这种分项操作的功能使得其应用范围比单纯的比例控制作用要广泛得多。开始时,将两种控制作用组合在一起有一定的困难,但到了 1929 年,组合获得了成功,并且公司已能提供 PI 控制器。

2) 镇定气动放大器

20 世纪 20 年代末,一些仪表公司的研发人员开始注意到气动控制系统的镇定问题。通过引入适当的反馈信号,设计气动放大器,使闭环系统稳定地工作,进一步取得一定的闭环行为。1928 年, Mason 和 Frymoyer 分别获得了气动过程控制方面的专利, Frymoyer 的控制器相对较简单,其传递函数为

$$\frac{K}{1+Ts}$$

而 Mason 提出的控制器的传递函数可描述为

$$\frac{K(1+aTs)}{1+Ts}$$

它具有相位超前/滞后补偿器的形式,其中 a 为一个常数。Mason 发明的控制器被生产并被安装在了一个炼油系统中,声称取得了好的控制效果,但由于不断的伸缩运动,导致阀的膜片总是破碎,最后,不得不将控制系统拆除。

1930 年, Mason 获得了另一项气动控制机制的专利,其中采用了新的气动信号反馈方式。反馈信号由一个气动网络进行修正,使得总体效果是使操作变量(控制器的输出)与总误差和误差的积分成比例。Mason 的这项发明与后来 Black 发明的电子式负反馈放大器已经很接近了,它们都可以通过接在反馈通路上的元件来实现对闭环系统行为的成形。

上面这种机制被 Foxboro 公司称为模型 10 Stabilog 的控制器所采用,该控制器于 1931 年开始生产。开始的时候, Stabilog 控制器的销售并不是很好,因为需要对用户进行培训。1934 年它被重新投放市场,配备了一个产品手册来说明其工作原理和应用它的好处。该控制器获得成功的关键因素在于使用了当时最新的气动阀门,阀的膜片能够容忍不断的伸缩运动。这种新的控制方式(反馈控制),在反馈信号没有引入明显的时间滞后的情况下,具有明显的优点,许多相互竞争的仪表公司都认识到了这一点,所生产的气动控制器除了提供 PI 控制功能外,都试图引入适当的反馈,来实现镇定控制,取得好的控制效果。

3) 微分作用

早在 20 世纪 20 年代,就有了大量关于控制器应能预测误差的增加的讨论,也

有大量关于使控制器能响应被测变量的变化率的建议。但由于执行机构引进了一个积分项,大多数的控制机制并没有提供微分控制作用。

真正的微分作用是由 Taylor 仪表公司在人造丝生产过程的控制中所引入的。生产过程要求温度保持恒定,由于工艺上的特点,使得温度转换器的有效时间常数比较大,使用 PI 控制,系统会产生振荡。Taylor 仪表公司的 Clarridge 在处理这一问题时,做了一个实验。通过在比例控制器的反馈支路引入一个约束(实际上就是微分作用),他观察到当给定值突然改变时,输出响应会很大,也就是控制器具有预测误差信号变化的能力。他随后决定在生产人造丝的纤维素装置的控制器上试验这种约束,1935 年试验获得成功,系统工作良好。Taylor 公司的工程师将这种作用命名为“预作用”,只要他们认为某过程适合这样做,就将安装这种“预作用”作为一种特殊服务。

Foxboro 公司也在它们的标准 Stabilog 控制器上安装了一种被称为“脉冲器”的装置,该装置将一个与误差的变化率成比例的脉冲施加于伺服阀。将微分作用加于标准的 Stabilog 控制器上是 Philbrick 在 1937~1938 年所做的工作。在此期间,Philbrick 还开发了一种电子模拟器,这是一台硬件模拟计算机,它能用来模拟过程回路(包括过程 and 控制器)。过程可以包含多达 4 个时间延迟,而控制器可以组成 P、PI 或 PID。

4) 理论研究的发展

在 20 世纪 30 年代之前,学院和主要的专业研究机构几乎无人关注过程控制器的发展。也许是由于缺乏关注,导致 Ivanoff 写下这样一段话,“温度的自动调节理论现在处在一种异常的状态,就是在几乎没有理论的基础上建立了大量的实践体系”。如果将“理论的基础”解释为基于数学的分析,那么,Ivanoff 的话就是对的。但是,不应该认为“实践体系”没有基础,实际上,它是建立在现在可以称之为“智能控制”的基础上的,也就是建立在基于观察手动操作员的启发式控制基础上的。早在 1912 年,Leeds 就认为控制器在预测误差的增加与减小和补偿恒值误差两方面都应该像一个好的操作员那样来控制。类似地,Sperry 也将模仿手动操作员的行溶进了他的船舵自动导航仪和飞行器功能模块中。

1934 年,Hazen 在一篇关于伺服机理的文章综述部分引用了 Minorshy 的工作,Minorshy 在 1922 年将舵手操纵船舵行为写成数学形式,其结论是一个恰当的自动控制器应该包含等价于 PID 控制器的控制作用。

然而,那时许多在仪表公司和过程工业工作的工程师已经发现了负反馈所能带来的好处。他们也试图建立一套能对未来设计问题有所帮助的理论体系。美国 Dow 化学公司的 Grebe 及其同事以及英国的 Ivanoff 分别在 1933 年和 1934 年发表了这方面的文章,成为领路者。然而,主要工作却是开始于 1936 年。在 Smith 的推动下形成了 ASME 工业仪表和调节器委员会。在这之前,关于工业仪表及其

使用的最早信息出现在一本名为《仪表》的杂志上,该杂志的主编 Behar 是一位热心的和不知疲倦的应用自动控制的倡导者。在英格兰,化学工业委员会的化学工程部于 1936 年组织了一次为期一天的自动控制方面的会议。与实验化学学会合作,Hartree 和他的同事利用 Manchester 大学的微分分析器研究了过程系统行为。对科学和工业中的仪表的重要性的完全认识开始于 1942 年,当时美国科学进展协会选择仪表这一主题作为 Gibson 岛会议的一个分会。参加会议的人员都是被邀请的,遗憾的是没有发表会议论文集。

2. 第二个时期:1940~1990 年

1) 巩固期(1940~1955 年)

PID 控制器在一些难于控制的系统中的应用已经证明了它的价值。到了 1940 年,Foxboro 和 Tayler 这两个主导仪表公司开始销售气动控制器,但是,要想在工业领域大面积推广应用,还需要做大量的工作。主要有三方面的问题:第一个问题是找到控制器合适的参数设置,提供一种简单的参数调整方法。在设备的成套安装中,控制器的参数由厂家设置。第二个问题是使工艺设计人员设计出可控的装置。第三个问题是使控制器的操作尽可能不依赖于复杂易损的机械联动装置。

第一个问题很快被解决。1942 年,Taylor 仪表公司销售工程部的 Ziegler 和工程研究部的 Nichols 在著名的文章“Optimum settings for automatic controller”中,给出了确定合适的控制器参数的两种方法。一年后,Ziegler 和 Nichols 撰写了另一篇文章,涉及第二个问题。文中他们评述到“装置在运行,但没有达到预期的效果,这种现象是非常常见的”。工程师认识到一定是某种因素被忽略了,但又无法确认丢失了什么。他们论证说,“这个丢失的特性可以被称为可控性,也就是过程达到和保持在平衡点的能力”。

第三个问题较难处理,特别是由于第二次世界大战的爆发,工程上的努力和资源都转向了战争。战后,Foxboro 和 Tayler 仪表公司对已有的设计做了一些微小的改变,改进了机械结构和控制器参数整定方法。先后推出了模型 40 Stabilog (1948) 和模型 58 Consotrol (1950) 等改进型控制器。

在同一时期,Taylor 仪表公司开发出了新产品,被称为 Transet Tri-act 控制器。这种 Tri-act 控制器包含两级气动放大器,见图 1.1.1。第一级放大器有一个固定的比例增益和一个可调的微分作用,它们的输出给第二级放大器,该级放大器

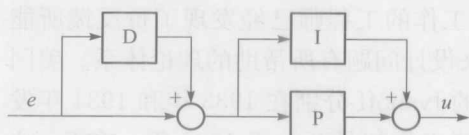


图 1.1.1 串联 PID 控制器结构

包含可调的比例增益和可调的积分增益。通过引入这种两级调节过程,可以实现调节积分增益而不影响微分作用。这就使得控制器能实现干扰抑制性能和目标值跟踪性能分别整定参数,而先

前的控制器微分与积分作用之间存在相互作用,往往只能实现干扰抑制或目标值跟踪的单独整定参数。

20 世纪 50 年代初期,随着人们对频率响应法强大作用的不断深入的认识,频率响应法被引入过程控制应用领域的研究中。实验化学公司装配了一台频率响应分析仪来获得对象的数据,进而来验证利用频率响应的方法确定控制器的参数。这种方法的特点是它相当于在一台模拟计算机上进行仿真,对不同的过程特性(如一阶过程、二阶过程和一阶加滞后过程等)来研究控制器的行为。

20 世纪 40 年代末到 50 年代初,人们对控制器已经进行了详细的分析,并且 PI 和 PID 控制器的安装也呈现不断增长的趋势,但并没有人提及积分饱和的问题。Astrom 指出,生产商已经完全知道积分饱和的问题,但出于商业考虑,不愿泄露解决这一问题的秘密。

2) 电子时代

到了 20 世纪 50 年代中期,自动控制器被广泛地应用到了各种工业控制领域,控制单元可以是机械式的、液压式的、气动式的或者是电气式的。气动式在技术上是最先进的,可靠性也较高。据资料估计 90% 以上的已安装的控制单元是气动式的。与此同时,人们也在持续关注电子式控制器以及对过程动态的认识。

从 20 世纪 30 年代末,美国、英国和德国的一些公司就已经开始生产包含电子放大器的控制器。电子式仪表不但能完成先前的气动仪表的全部功能,而且除了 PID 控制之外,还可以进行加法运算、乘法运算、开方运算和其他的数学运算。那时,仪表生产商也完全知道运用晶体管的可能性,并正在开发相应的新产品。

1955 年,Mathewson 利用气动和电子部件的频率响应分析来试图证明这样的事实,就是用电子式控制能消除时间滞后,从而改善低频和低频控制性能。同时,电子式控制器能更容易地与数字式显示和记录系统相连接。然而,过程控制工程师对电子管的可靠性深表怀疑,直到固态电子控制器的出现,电子式 PID 控制器才逐渐被人们接受。此时,数字计算机也正式开始应用于过程控制领域。

3) 数字计算机

第一台专门为在线控制而设计的数字计算机(打算应用于飞行控制系统)出现于 1953 年。1955 年,《仪表》杂志开辟了一个关于数字自动化和过程记录系统的专栏。从 1955 年到 1959 年,关于数字计算机如何可以应用于工业过程控制领域的讨论以及它们在该领域应用的描述开始出现在文献中。1960 年召开的第一届 IFAC 世界大会列出 80 余篇这样的文章。

第一台由数字计算机构成闭环控制的工业对象是 1959 年美国 Texas 的一个催化聚合装置。第一个专业直接数字控制(direct digital control, DDC)项目于 1962 年在英国完成,并运行了三年。

许多主流控制仪表公司迅速做出反应,到了 1960 年,它们已能提供基于计算

机的控制系统。对计算机应用的需求正在迅速增加,到了 1965 年,全世界已有多达 1000 余台过程对象上安装了计算机控制系统。许多早期的 DDC 系统对关键的控制回路都包含备份模拟控制器,只要数字计算机在一段时间内无法更新控制器的输出,PID 控制就被迅速地切换到模拟备份上。

到了 20 世纪 70 年代,大规模集成电路成为了数字计算机的基础元件,基于微处理器的数字式控制器作为模拟控制器的替代产品,具有精度高、价格低等优点,而且容易构成多回路控制,实现过程的优化。1975 年,Honeywell 公司推出了总体分布式控制(total distributed control, TDC)系统结构。从此,进入了分布式控制系统(distributed control system, DCS)时代。随后,在 20 世纪 80 年代中期又产生了现场总线控制系统(fieldbus control system, FCS),到了 90 年代,现场总线技术已经成为工业控制领域的热门技术。这些都标志着控制系统向数字化实现方向的转变。当然,这种转变也带来了一些新的问题需要人们去面对和思考。

1.2 PID 控制器的设计和参数整定

PID 控制器广泛应用于各种工业控制系统中,但是 PID 控制器的参数整定却是一个令人困扰的问题。许多实际控制系统无法取得令人满意的控制效果,很大一部分原因是由于 PID 控制器的参数没有整定在最佳位置。自从 1942 年 Ziegler 和 Nichols 发表了关于 PID 控制器参数整定方法的文章之后,PID 控制器的设计和参数整定一直是一个很大的研究领域。在设计 PID 控制器时,有许多方面的问题需要考虑,包括:

(1) 所设计的控制器必须满足所提出的设计指标。这些指标应能反映如下一些要求:系统对负载扰动的响应、对量测噪声的响应、对给定值的响应,以及对模型不确定性的鲁棒性等。

(2) 设计工作应基于可获得的关于过程的知识来进行。对过程的知识可以分为两类,一类就是过程模型。模型可以是 Ziegler-Nichols 参数整定所使用的简单的一阶加滞后模型,也可以是高阶传递函数。另一类是不需要明确的数学模型,只需测量频率响应曲线上的一些点,或测量过程的输入输出数据,来获得关于过程的知识。然后,通过优化某一目标函数(如相角裕度、幅值裕度、误差积分性能指标等)就可获得 PID 控制器参数。近年来所提出的一些基于智能进化算法的 PID 参数整定方法就属于此类,如遗传算法、蚁群算法等。

(3) 设计工作也必须考虑计算能力和可用的设计资源方面的限制。

以上介绍的是 PID 控制器参数的人工整定问题。对实际生产过程来说,大多数都是非线性的,控制器参数与系统所处的稳态工作点有关。工作点改变时,控制器参数的“最佳”值就不同。另外,大多数生产过程的特性随时间变化,按过程参数

的标称值整定的控制器,当过程特性变化时,一般会导致控制性能的恶化。以上两点都意味着需要适时地调整控制器参数。因此,近年来控制器参数的自整定成为过程控制领域的热门课题,众多专家学者做了大量工作并取得一定成果。

参数稳定域的研究近年来也逐渐引起众多学者的关注。我们知道,不稳定性是反馈控制的缺点。当使用反馈控制时,就存在闭环系统可能成为不稳定的危险。因此,稳定性是对反馈系统的一个基本要求。通过绘制和分析参数稳定域,可以获得对 PID 控制的更加深刻的认识。所谓的参数稳定域,就是能导致闭环系统稳定的控制器的参数集合。参数稳定域是通过图解法给出 PID 控制器参数整定的一种方法,比较直观和灵活,可实现多目标设计,而且该方法能很容易地处理时滞问题,这是它的一个优点。本书就是针对时滞被控对象,应用一种图解稳定性准则,来研究 PID 控制器和相位超前/滞后补偿器的参数稳定域。

1.3 PID 控制器的未来发展

谈到 PID 控制的发展,就是要回答如下诸类问题:PID 控制器会被继续使用,还是将被其他形式的反馈控制所取代?希望在 PID 控制器中增加什么附加的特点?在 PID 控制中有什么基础性的研究课题?Astrom 等基于对 PID 控制当前的研究现状和应用状况,对上述问题进行了预测。

首先,可以肯定地回答 PID 控制器将来仍会被继续使用。如前所述,反馈控制在它所应用的领域已经产生了革命性的影响,而且仍将产生影响。PI(D)控制是最基本的反馈形式。它被广泛而有效地应用于各种领域,特别是参数自整定所显露出来的特点极大地简化了 PID 控制的应用。

20 世纪 80 年代,尽管当时控制理论已经取得了超常规的发展,但工业界的工程师认为这些理论很神秘,与工业控制问题毫不相干。那时,许多教科书中只给出几页的空间来描述 PID 控制。在研究界,人们认为 PID 控制是一个几乎没有机会的研究领域。直到 80 年代中期,Astrom 等将理论研究转向了 PID 控制,唤醒了人们对 PID 控制的研究兴趣。此后,关于 PID 控制的研究论文开始逐年递增。

当然,这些年来随着控制理论的发展和过程复杂性的增加,许多新的控制方式也已经应用于过程控制领域,成为了 PID 控制器的替代产品,主要有:

- (1) 离散时间线性多输入单输出控制器;
- (2) 状态反馈和观测器;
- (3) 模型预测控制(model predictive control, MPC)。

模糊控制也经常被认为是一种 PID 控制的替代方式。模糊控制的主要优点是使用方便以及它是非线性的。许多模糊控制器也被用在级联控制结构中,其中在较低层使用 PID 控制器。

模型预测控制的典型用法是工作在管理模态,其中在基础层使用的是 PID 控制器。在过程工业中,MPC 控制性能的改善实际上多数是来自于基础回路的参数整定的改进。

尽管其他控制方式的应用在增加,PID 控制肯定会被继续使用。只要使用得当,它是实现反馈控制的非常有效的方式。如果性能要求不是很苛刻,通常都能取得好的控制效果。PID 控制器也将在更复杂的控制器中作为一个模块使用。多数动态矩阵控制(dynamic matrix control,DMC)控制器实际上是将目标值跟踪的任务交给了 PID 来完成。显然,这些 PID 控制器的良好的性能是基础性的。在其他方面也有 PID 控制的扩展,如两自由度 PID 控制、Smith 预估器、增益调度(gain-scheduling)和振荡系统的滤波器设计等。

控制问题是广泛的,因此也要求广泛的参数整定技术。已经有许多可用的新的参数整定方法。事实上,Ziegler-Nichols 方法早就该被取代了。我们很容易证明,任何恰当整定的控制器都会优于 Ziegler-Nichols 方法整定的 PID 控制器。实际上,只要将 PID 控制器的参数进行很好的整定,许多其他控制策略完全可以不用。

友好的软件开发是必须研究的另一个领域。人们强烈期望有这样的软件,使得稍有这方面知识的人都能进行 PID 控制实验。建模工具和参数自整定方法也应该是这种软件的一部分。目前市场上出现若干工业自适应/自整定控制器,如 Foxboro 公司的 Exact 和 Honeywell 公司的 VDC5000 等。许多计算机控制系统中也具有实现参数自整定的功能模块。

值得一提的是,PID 控制器并不是在所有场合都可以获得好的控制效果。对下列四种控制系统,如果控制性能要求较高,就应考虑对 PID 的功能进行扩展和改进或采用其他的控制策略。这些系统是大时滞系统、具有振荡模态的系统、多变量系统和非线性系统。

本章小结

本章介绍了 PID 控制器的过去、现在和未来,其中发展史部分占用的篇幅较大,因为它从一个侧面也反映了过程控制系统的发展历程,读者可以从中对过程控制系统的发展窥见一斑。关于 PID 控制器的参数整定,其方法有很多,本书中没有一一提及,有兴趣的读者可以阅读其他参考书。本章的内容主要取材于文献[1]和[2],同时,也参考了文献[3]和[4]的绪论部分。

第2章 低阶控制器的基本调节原理

为了满足初学 PID 控制器和相位超前/滞后补偿器读者的需要,本章比较详细地介绍以上两种低阶控制器(补偿器)的基本调节原理。同时,掌握它们的调节原理,也是学习后续章节所必需的。PID 控制是三种基本控制作用的组合,即比例作用 P(proportional)、积分作用 I(integral)和微分作用 D(derivative),本章将对每一种控制作用进行分析。一个很自然的问题就是在实际应用中,对于不同的被控对象,每一种控制作用的强弱应如何选取,才能使控制效果最佳?这就是 PID 控制器的参数整定问题。本章也将对著名的 Ziegler-Nichols 给出的两种参数整定方法进行介绍。相位超前补偿器和相位滞后补偿器也是常用的简单控制器,实际应用中,主要是利用它们来改善(补偿)系统的相角稳定裕度(phase-margin, PM)和幅值稳定裕度(gain-margin, GM)等频域性能指标。

2.1 PID 控制器的调节原理

2.1.1 反馈原理

反馈的思想看似简单,实际上其作用却非常强大,对技术的发展产生了深远的影响。本节分析反馈原理在控制系统中的应用。简单起见,假设一个过程的过程变量(输出变量) y 随操作变量(控制变量) u 的增加而增加,那么,反馈原理可以表述如下:当过程变量小于给定值(参考输入)时,应增大操作变量,而当过程变量大于给定值时,则应减小操作变量。这种类型的反馈称为负反馈,因为操作变量总是向着与过程变量相反的方向运动。负反馈原理可以用图 2.1.1 所示的方框图来表示。图中,过程 and 控制器分别用方框表示,箭头代表输入、输出信号的流向,用一个特殊的符号表示信号的求和运算,符号反向框表示对过程变量 y 的反馈是负反馈。于是有控制误差 $e=r-y$,其中 r 为参考输入(给定值)。图 2.1.1 表示过程和控制器以闭合反馈回路的形式连接在一起,构成一个反馈环。

研究反馈控制系统的目的在于尽管有外界干扰的存在和过程特性的变化,反馈仍能使过程变量接近于给定值。

反馈可以用各种不同方式来实现。最简单的一种反馈机制可以描述如下:

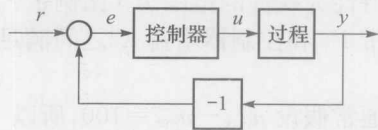


图 2.1.1 反馈控制系统方框图