

重 复 控 制

中野道雄 井上 惠[・]著
山本 裕 原 辰次

吴 敏 译
桂卫华 校

中南工业大学出版社

重 复 控 制

[日] 中野道雄 井上 愿 著
山本 裕 原 辰次

吴敏 译 桂卫华 校

中南工业大学出版社

【湘】新登字 010 号

重 复 控 制

吴 敏 译 桂卫华 校

责任编辑:秦瑞卿

*

中南工业大学出版社出版发行

中南工业大学出版社印装

湖南省新华书店经销

*

开本:787×1092 1/32 印张:5.6875 字数:124千字

1994年12月第1版 1994年12月第1次印刷

印数:001—500

*

ISBN 7-81020-724-5/TP·052

定价:6.00元

译者的话

重复控制理论是在 80 年代根据生产过程控制的实际需要而提出来的控制系统设计理论,被认为是一种能很好地解决实际工业过程控制问题的实用控制方式。近年来,重复控制理论得到了广泛的重视,并取得了显著的理论和应用研究成果。1989 年,日本计测自动控制学会出版了《重复控制》一书,对作者提出的重复控制进行了全面的总结,介绍了重复控制系统设计的理论与方法,并列举了许多在实际中取得了很好应用效果的例子。该书的出版,在国际自动控制领域中产生了较大的影响。1993 年 9 月,本书的作者之一,日本东京工业大学控制工程系教授中野道雄博士访问了我国中南工业大学,并作了“重复控制”的专题报告。针对我国自动控制理论和技术的发展需要,该书的翻译出版,必将对我国自动控制领域的广大理论和应用研究的科技工作者在解决实际的自动控制系统设计和应用等方面有所裨益,同时也是作为中南工业大学与东京工业大学发展科技合作关系的一个重要部分。

本书的中译本由吴敏教授翻译,桂卫华教授审校。在翻译本书的过程中,得到了中南工业大学自动控制工程系主任沈德耀教授的大力支持,中野道雄教授和日本计测自动控制学

会也给予了热情帮助。日本东京工科大学机械控制工程系余锦华博士为本书的翻译做了不少工作。借此机会,我们向一切关心、支持和帮助本书翻译和出版的领导、专家和朋友们表示衷心的感谢。

由于译者水平有限,加之时间较为仓促,所以译文中错误在所难免,欢迎广大读者和专家批评指正。

译者

1993年12月

为中译本写的序

说起重复控制,那要追溯到大约15年前,它与位于筑波的文部省高能物理研究所内质子同步加速器主环电源的控制密切相关。质子同步加速器的最后阶段是在主环直径为105米的圆形轨道内对质子进行加速。为了质子的加速,必须在质子打入主环后很快地增强磁场。为此,一定要按照预先计算出来的变化曲线控制好励磁电流。具体地,要在3秒的时间内使电流由206A到3045A的变化跟踪预先决定的曲线。这时,要求的控制精度为 10^{-4} ,即对于被控制的量为3045A的电流值时,允许的误差只为 $\pm 300\text{mA}$ 。

当初,根据电源的实际运行情况,最大误差约为80A,要使这么大的误差缩小到 $\pm 300\text{A}$ 以内,首先可以想象这是不可能实现的。虽然试用了各种控制方法,但是如果按照以往的控制方法,即使经过了长达半年多的努力,也最多只能达到 10^{-3} 的控制精度,再也不能提高了。然而,只要从另一个角度去考虑,这个问题也是可以非常简单地解决的。就把人类当作例子来说吧。人们只要重复地做相同的工作,就能够渐渐地变得熟练,即使是开始考虑不到的事情,也能简单地处理它。也就是说,即使最初不熟练,但是经过重复地做那个工作,就能够通过学习而变得熟练。如果把这个作用引入到控制系统中,那么即使当初有80A的误差,也可以通有效地利用过去的经

验,把这个误差控制在 300mA 以下。事实上,过去经验的积累通过使控制系统中具有一个等于重复周期的时滞环节就可以简单地实现。对于质子同步加速器电源的控制,采用了这种控制方法以后,果然与预想的一样,误差逐渐减少,经过 20 次的运行后,达到了 10^{-4} 的控制精度。这就是重复控制的基本点。

这种控制方式目前已经应用到各个领域,并取得很大的发展,这是非常可喜的。1990 年,日本计测自动控制学会出版了专著《重复控制》。这一次,该书又翻译成中文,由中南工业大学出版社出版,为此我感到非常的荣幸。我衷心地感谢翻译了该书的中南工业大学吴敏教授和桂卫华教授,只有他们在这一方面倾注高度的热情和付出巨大的努力,才能完成该书的翻译工作。另外,在该书的出版过程中,得到了中南工业大学沈德耀教授和陈际达教授的大力支持,在此表示深深的谢意。

东京工业大学 中野道雄

前 言

近年来,“重复控制”得到了许多控制技术工作者的关注,作为提出这种控制方法的人员,对此感到非常高兴。值此之际,计测自动控制学会计划出版这本书。但是跟以往的书籍不同,要求我们着眼于及时地介绍新思想,而不是传授成熟的理论和技术。本书所述的内容是否很好地符合了这种要求呢?我们期待着读者的批评意见。如果重复控制这种新控制方式的思想、方法和应用技术等能起到那怕是一点点的作用,那么我们将深感荣幸。

本书由三个部分组成:A部分“绪论”;B部分“重复控制的理论”;C部分“重复控制的应用”。

在A部分中,首先叙述重复控制的发展背景,然后是为B部分作准备,从理论角度介绍有关伺服系统设计的基础知识(系统类型理论、内部模型原理和设计方法)。具有这些知识的读者可以跳过这一部分的内容。

在B部分中,系统地阐述了重复控制系统的理论。首先明确重复控制与内部模型原理之间的联系,然后详细地论述稳定性,并进一步介绍基于稳定性理论的几种设计方法,最后叙述了学习控制等有关的研究。

在C部分中,介绍应用重复控制的几个结果。虽然尽量努力做到与B部分的理论相吻合,但是在每个应用中,由于也考虑到要根据对象的具体情况进行分别的处理,因而也存在不一定都是一致的部分。然而,这是应用重复控制时所谓的技术部分,相信对其它的应用也有一定的参考价值。

最后,感谢给予编写这本书机会的计测自动控制学会前出版委员会委员长铃本隆先生(防卫大学)以及作为组织负责人提出了很好建议的美多勉先生(千叶大学),同时对一切与作者共同进行重复控制研究并在本书出版过程中提供了有益意见的研究人员表示深深的谢意。

目 录

A 部分 绪论

第 1 章 伺服系统设计与重复控制	(1)
第 2 章 伺服系统设计及内部模型原理	(5)
A. 2. 1 系统类型和内部模型原理	(5)
A. 2. 2 构成伺服系统的条件	(10)
A. 2. 3 伺服系统的设计方法	(13)

B 部分 重复控制的理论

第 1 章 重复控制的原理	(18)
第 2 章 重复控制系统的稳定性	(27)
B. 2. 1 (基于小增益定理的)输入输出稳定性	(27)
B. 2. 2 内部稳定性和可稳定化	(32)
B. 2. 3 改进型重复控制系统的稳定性	(35)
B. 2. 4 改进型重复控制系统偏差的渐近评价	(50)
第 3 章 重复控制系统的设计方法	(53)
B. 3. 1 设计步骤	(53)
B. 3. 2 基于状态空间描述的设计方法	(57)
B. 3. 3 基于互质分解描述的设计方法	(64)
B. 3. 4 离散时间重复控制系统的设计方法	(72)
第 4 章 有关的研究	(81)
B. 4. 1 关于重复控制的其它方法	(81)
B. 4. 2 与学习控制(反复控制)的关系	(83)

C 部分 重复控制的应用

第 1 章 数字重复控制系统的设计方法	(90)
第 2 章 在质子同步加速器电源控制中的应用	(99)
C. 2. 1 在电磁石电源控制中的应用	(99)
C. 2. 2 无功电力控制	(103)
第 3 章 重复控制的频域限制及在伺服控制中的应用	(110)
第 4 章 正弦波逆变器	(120)
C. 4. 1 利用反馈方法的正弦波逆变器	(120)
C. 4. 2 面向平均响应的重复控制在 PWM 逆变器中的应用	(127)
第 5 章 在抑制电动机旋转振动中的应用	(137)
C. 5. 1 电动机的旋转振动和控制系统的的基本结构	(137)
C. 5. 2 控制系统设计	(140)
C. 5. 2. 1 设计步骤	(140)
C. 5. 2. 2 基于采样器的稳定化	(141)
C. 5. 2. 3 利用相位超前补偿扩大抑制频域	(143)
C. 5. 2. 4 使用 PLL 处理稳态速度漂移	(144)
C. 5. 3 实验结果	(145)
第 6 章 在机械手轨迹控制中的应用	(148)
C. 6. 1 对于非线性系统的重复控制	(148)
C. 6. 2 机械手的轨迹控制	(151)
C. 6. 3 实验结果	(155)

附录 书中用到的基础知识

附录 1	小增益定理	(160)
附录 2	最优调节器和圆条件	(161)
附录 3	中立型时滞系统	(162)
附录 4	基于互质分解描述的控制理论	(162)
参考文献		(164)

1部分 绪论

第1章 伺服系统设计与重复控制

在控制系统(伺服系统)设计中,所要求的指标基本上分为以下4个方面:

- (1)稳定性;
- (2)稳态特性;
- (3)过渡过程特性;
- (4)鲁棒性。

稳定性是控制系统设计中的最基本要求,大体上分有内部稳定性和外部稳定性(输入输出稳定性)。前者意味着从平衡点附近任意初始状态出发的轨迹在无穷大时刻收敛于平衡点。后者由于保证对有界的输入可得有界的输出,因而一般上是一个比内部稳定性弱的概念。因此,需要保证控制系统的内部稳定性,从响应性的观点来看则需要是指指数渐近稳定的。

所谓稳态特性,是要求对持续目标信号和干扰信号的稳态(在无穷大时刻)控制偏差为零。通常假设目标信号和干扰信号是阶跃的或斜坡的信号,但是在重复控制的情况下则是周期的信号。

过渡过程特性,则可有目标跟踪特性和扰动抑制特性。对于目标跟踪特性,上升时间、超调量、调节时间和耦合度等是

主要的设计指标,而扰动抑制特性则是扰动的暂态影响问题。

鲁棒性是指,即使控制对象的参数发生了变化,控制系统的特性也不会受到什么影响,而且均与上述三种特性有关联。也就是说,鲁棒稳定意味着参数发生变化时也能保证控制系统的稳定性。稳态鲁棒性则是不管参数如何变化也能保证稳态偏差为零。对于过渡过程特性的鲁棒性通常称为灵敏度特性,要求过渡过程响应不受什么影响。另外,这里所说的参数变化不仅包括实际参数发生变化的情况,也包括设计时使用的控制对象模型与实际对象之间的差异(例如模型的降阶和非线性特性的线性化所引起的差异)。下面根据这些情况来考虑重复控制。

提出重复控制的起因是高能物理研究所 12GeV 质子同步加速器主环电源系统中的电磁石电流控制^[4]。为了对质子进行

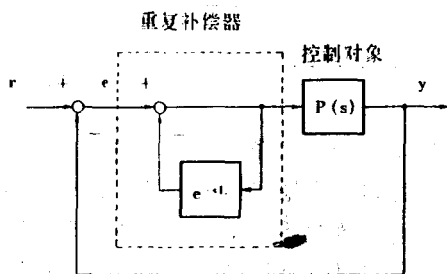


图 A.1.1 重复控制系统

加速,要求以 10^{-4} 的精度跟踪预先规定的电流曲线。所以,首先需要特别强调的一点就是所要求的绝对精度非常高。其次,由于要求电流曲线在三个范围内变化,因而在所有动作范围内并不能保证线性也是一个问题。

这样,对于控制上的严格要求,唯一的解决办法在于,当加速器开始运转一次后连续使用两个星期,而使目标的电流

曲线在这段时间内是相同的。如果注意到这一点,则可以认为,即使在运转开始时误差大,随着运转次数的增加,若确实能进入使误差减小的过程,那么在经过几次调整后即能达到所要求的精度。因此,需要预先把前一次运转时的误差存贮起来,并在当前一次运转时加进这种误差成分,因而加入了如图 A. 1. 1 虚线部分所示的重复补偿器。这个系统的定量分析如下所述。

图 A. 1. 1 中虚线部分的传递函数 $F(s)$ 为

$$F(s) = \frac{1}{1 - e^{-sL}} \quad (\text{A. 1. 1})$$

在频域的传递数为

$$F(j\omega) = \frac{1}{1 - e^{-j\omega L}} = \frac{1}{1 - \cos\omega L + j\sin\omega L} \quad (\text{A. 1. 2})$$

另一方面,对于图 A. 1. 2 中周期为 L 的重复波形,所包含的频率成分为

$$\omega = \frac{2\pi}{L} \quad (\text{A. 1. 3})$$

其中 $k=0, 1, 2, 3, \dots$ 是整数。把(A. 1. 3)式代入(A. 1. 2)式得

$$F(j\omega) = \infty \quad (\text{A. 1. 4})$$

若该系统是稳定的,对于(A. 1. 3)式的频率成分,可以使系统具有优良的稳态特性。具体地,对于具有(A. 1. 3)式所示频率成分的输入,可以使偏差为零,并且可以保证对具有(A. 1. 3)式所示频率成分的扰动具有稳态鲁棒性。这种情况从理论的角度上加以概括就是经典控制理论中的系统类型理论和现代控制理论中的内部模型原理。这是伺服系统设计基础的重要理论,下一章将详细叙述。

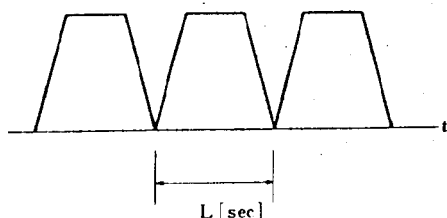


图 A. 1. 2 重复波形

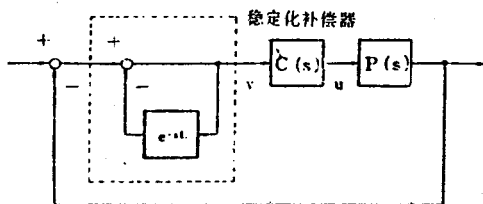


图 A. 1. 3 重复补偿器

实际上,插入图 A. 1. 1 中的补偿器后,重复补偿器具有比控制对象的延迟还大的滞后时间 L ,而且是通过正反馈来构成的,因而这样很难获得稳定的特性。因此,为了获得稳定的系统,还必须插入稳定化补偿器 $C(s)$,如图 A. 1. 3 所示。 $C(s)$ 的选取方法是实现重复控制中极其重要的问题,这一点在 B 部分将从理论的观点进行论述,而在 C 部分则从应用的角度加以考察。

更进一步的就是重复控制究竟经过多少次的运转后才能实现优良的稳态特性。这个过程说起来就是如何实现重复控制中的过渡过程特性,这一点在重复控制中也是重要的问题。

第 2 章 伺服系统设计及内部模型原理

A. 2.1 系统类型和内部模型原理

这里说明构成控制系统(称为鲁棒伺服系统)的条件和设计方法,它满足上一章所述指标中的两个指标:

- (1)内部稳定性;
- (2)稳态鲁棒性。

也就是从理论的观点叙述伺服系统设计及其基础的内部模型原理。这一章是为 B 部分“重复控制的理论”作准备的。对控制理论非常熟悉的读者可以跳过这一章。

首先从简单的例题出发,考察这两个设计指标。

考虑如图 A. 2.1 所示的反馈控制系统。在这个反馈系统中,假设 $P(s) = 1/(s^2 + 3s + \alpha)$, $C(s) = k$, 则从目标输入 R 到输出 Y 的传递函数为 $k/(s^2 + 3s + k + \alpha)$, 其中 α 是控制对象的变动参数。由此可知,这个闭环系统的稳定性条件是 $k > -\alpha$ 。当 $\alpha = 1$ 且使 k 发生变化时的阶跃响应如图 A. 2.2 所示, k 越大,响应就越快,稳态偏差也就越小,但响应是振荡的。不管怎样,输出的稳态值并不等于 1,而是存在稳态偏差。这就是说,虽然稳定性得到满足,但是作为第二个指标的稳态特性这一指标并没有得到满足。因此,为了修正稳态增益,考虑附带目标值滤波器的控制系统,如图 A. 2.3 所示,其中假设 $G_F(s) = (k+1)/k$, 则当 $\alpha = 1$ 时没有稳态偏差。但是,当控制对象的参数发生变化,假设 α 由 1 变化到 0.2 或 0.5 时,正如图 A.