

化工自动化丛书

前馈调节

吕勇哉 王静煦 张玉润 编著

化学工业出版社

化工自动化丛书

前 馈 调 节

吕勇哉 王静煦 张玉润 编著

化学工业出版社

内 容 简 介

《前馈调节》一书是《化工自动化》的一个分册，阐述前馈调节的基本概念、前馈调节系统的设计与分析以及实现调节的技术工具——前馈补偿装置。书中还介绍了前馈调节的工业应用实例及工程整定方法。

本书可供化工自动化和有关专业人员阅读，也可供大专院校有关专业师生参考。

化工自动化丛书

前 馈 调 节

吕勇哉 王静煦 张玉润 编著

*

化学工业出版社 出版

(北京和平里七区十六号楼)

化学工业出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行

*

开本 $787 \times 1092^{1/32}$ 印张 $7^{1/4}$ 字数158千字印数1—4,850

1980年5月北京第1版1980年5月北京第1次印刷

书号15063·3162定价0.76元

编写说明

近年来，随着化学工业和自动化科学技术的迅速发展，化工自动化技术有了新的进展。以现代控制理论为基础的各种新型控制方法和调节系统相继成功地应用于化工生产；新型的自动控制技术工具以及电子计算机也日益广泛地用于化工自动化领域。

为了总结交流我国化工生产应用自动化技术的经验，介绍新的调节理论和控制方法，提高从事化工自动化工作的工人和技术人员的理论和技术水平，促进化工自动化工作的发展，一九七五年在《炼油、化工自动控制设计业务建设会议》上，决定由化工部炼油、化工自动控制设计技术中心站负责，组织有关院校、科研设计单位和工厂，编写一套《化工自动化丛书》

《化工自动化丛书》是在普及基础上侧重提高的一套读物，主要包括经典和现代控制理论、各类调节系统和化工单元操作控制等方面的题材。“丛书”内容力求密切反映化工应用的特点，做到理论联系实际，既阐明基本概念，作出理论分析，又叙述工程应用方法和应用实例，说明具体实施方案和现场运行经验。

《化工自动化丛书》编审组成员

兰州化学工业公司设计院 (组长)

浙江大学化工自动化教研组 (组长)

兰州化学工业公司石油化工厂

上海炼油厂

北京化工学院

上海化工学院

化学工业部第三设计院

化学工业部化工设计公司

序

本书的主要目的在于向从事化工过程控制的设计、研究和运行人员介绍如何在生产实际中设计和分析前馈调节系统。

在本书的取材方面，除反映作者在实验室及工业应用方面所取得的研究成果外，同时吸取了部分国内外前馈调节成功的经验。全书共分四章。第一章叙述了前馈调节的基本概念。第二章介绍了前馈调节系统的设计与分析，对于如何正确设计、应用前馈调节和多变量前馈调节作了详尽的分析。第三章介绍了实现常规前馈调节的技术工具——前馈补偿器。第四章通过介绍国内外前馈调节工业应用的实例，进一步阐明前馈调节设计和运行中的有关问题，最后还介绍了前馈调节系统的工程整定。

本书在处理常规前馈和计算机前馈调节系统两者关系时，力求统一。重点介绍了由连续前馈模型到离散前馈模型的转换，以建立计算机前馈控制算式。

不变性原理是综合前馈模型的基础，关于不变性原理及其应用贯穿全书的始终。

由于作者政治、业务水平的限制，缺点和错误在所难免，恳请广大读者批评指正。

最后，对于蒋慰孙、俞金寿两位同志在审校书稿过程中所付出的辛勤劳动，作者谨致谢意。

作者

一九七九年于浙江大学

目 录

概 述	1
第一章 前馈调节的概念与系统结构	2
第一节 基本概念	2
第二节 前馈调节系统的几种结构形式	8
第二章 前馈调节系统的设计与分析	24
第一节 前馈调节规律的求取	24
第二节 前馈调节系统的稳定性	40
第三节 前馈-反馈调节与串级调节	47
第四节 对象具有大纯滞后的前馈-反馈调节	60
第五节 选用前馈调节的原则	66
第六节 多变量前馈调节	75
第七节 前馈调节系统实施中的几个问题	90
第三章 前馈补偿装置	101
第一节 前馈调节规律的几种形式	101
第二节 气动前馈补偿装置	105
第三节 电动前馈补偿装置	120
第四章 前馈调节系统工业应用举例	137
第一节 连续消毒塔温度的前馈-反馈调节系统	138
第二节 加热炉的前馈-反馈调节系统	146
第三节 锅炉给水系统的前馈-反馈调节系统	153
第四节 精馏塔的前馈调节系统	167
第五节 多效蒸发器的前馈-反馈调节系统	177

第六节 常压塔多变量前馈-反馈的计算机控制系统	184
第七节 前馈调节系统的工程整定	205
结束语	219
附录	221

概 述

随着化工、炼油等工业的日益发展，生产过程的大型化、连续化以及设备的不断更新，对生产过程的自动调节提出了更高的要求，以致在某些场合应用常规的比例、积分、微分调节规律往往难以满足工艺的要求。前馈调节就是人们在不断总结生产实践经验基础上发展起来的一种特殊调节规律。

所谓前馈调节，实质上是一种按照扰动进行调节的开环调节方式，它通过补偿装置补偿扰动量对被调量的影响，使得作用在系统的一个或几个扰动量与被调量完全无关或部分无关，而达到调节的目的。这种调节方式显著地提高了调节系统的精度。不变性理论是实现前馈调节的理论基础，经过三十多年的发展，至今已成为控制理论的一个分支。但是，自动调节技术史阐明了这样一个事实，即远在不变化理论产生之前，早已存在着按扰动进行调节的开环调节方法和原理，甚至较按偏差进行调节的反馈闭环调节方法出现得更早。如早在公元前一千多年就有按照外部负载力矩借改变风帆实现转速调节的风磨调速装置。经过漫长的道路之后，才开始在工程技术上获得应用，例如早期的蒸汽机的转速调节，陀螺调节等等。

但是，由于当时指导思想的错误——企图建立能使调节系统偏差恒等于零的“万能理想调节器”，以及在实现扰动补偿技术工具制作上的困难，导致了前馈调节在一段时间里发

展极其缓慢。

后来,随着军事、工业生产等领域对控制精度的要求不断提高。特别是近一、二十年来,不论在不变性理论方面,还是在以它为基础的前馈调节方面都得到了迅速的发展。目前在锅炉、精馏塔、换热设备、化学反应器等工业设备上已经获得了较为广泛的应用。调节方式已由单变量的前馈调节发展到按照数学模型,以计算机作为控制工具的多变量前馈调节。在实现前馈调节的自动装置方面,气动和电动的前馈补偿器也已研制成功,为应用前馈调节更好地控制生产过程创造了良好的条件。

第一章 前馈调节的概念与系统结构

第一节 基本概念

在过程控制领域中,“前馈”和“反馈”是两类并列的调节方式,为了分析前馈调节的基理,我们首先来阐明反馈调节的概念。

一、反馈调节概述

在过程控制中广泛应用的反馈调节系统是按照被调量偏差进行调节的,也即只有当被调量出现偏差后,调节器才产生校正信号,使调节阀动作,以消除被调量的偏差。图1-1所示的换热器的温度调节系统,用蒸汽来加热物料,使物料在换热器的出口温度 θ_2 保持恒定。当系统中出现影响被调量 θ_2 的扰动,如被加热的物料流量 Q ,入口温度 θ_1 ,或蒸汽压力 P_G 等变化,则经过一定的滞后时间,必然导致被调量 θ_2 开

始偏离给定值 θ_{2i} 。温度调节器按照被调量的偏差 ($e = \theta_{2i} - \theta_2$) 的大小及方向产生校正作用, 通过调节阀的动作来改变加热蒸汽的流量 G , 从而补偿扰动对被调量的影响。调节器校正作用的效果将不断通过比较测量值与给定值的偏差而获得检验, 检验的结果又反馈到调节器, 产生新的校正作用, 直至被调量 θ_2 回到给定值 (或与原给定值有一个静差——当采用比例调节器时)。这种按被调量偏差进行调节的方法就是反馈调节。

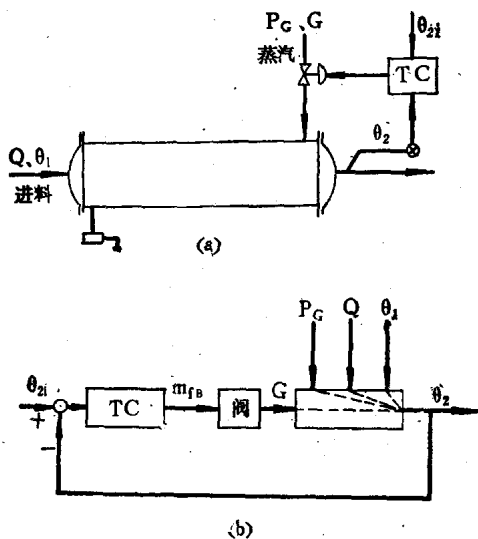


图 1-1 换热器温度的反馈调节系统及其框图

反馈调节规律的一般形式可以表示为:

$$m_{fB} = f(e, t) \quad (1-1)$$

即调节器的输出 m_{fB} 是调节器输入 e (被调量给定值与测量

值的差值) 和时间 t 的函数。最常用的比例、积分、微分(以后简称PID) 调节规律为:

$$m_{FB} = K_c \left(T_d \frac{de}{dt} + \frac{1}{T_i} \int edt + e \right)$$

相应的传递函数为:

$$\frac{M_{FB}(s)}{E(s)} = K_c \left(T_d s + \frac{1}{T_i s} + 1 \right) \quad (1-2)$$

由反馈调节规律的表示式(1-1)、(1-2)可以看出被调量的偏差 e 是调节器校正作用的依据。

反馈调节在工程上的广泛应用已经有了几十年的历史, 由于它能获得较高的调节精确度, 调节的结果又能通过反馈获得检验, 故在过程控制范畴里是一种应用最普遍的调节方法。

但是, 不少工业对象具有较大的滞后(容量滞后与纯滞后), 例如大型的加热炉、精馏塔、部分化学反应器和相当数量的萃取装置等。因此, 当被调量出现偏差后才开始进行校正, 往往很不及时, 使调节过程有较大的偏差和偏差持续时间。当工艺对调节精度要求十分严格时, 有些场合反馈调节便难以满足工艺的要求。此外, 控制方法上随着单参数控制逐步过渡到多参数或反映工艺过程机理的综合指标的控制, 这种仅仅按照被调量偏差进行调节的方法往往不能适应控制方法的变革, 有些调节系统除了测量被调量偏差的信息外, 还需要测量有关的扰动量, 然后经过一定的运算后再去实现对调节参数的校正。有时在设计调节系统时还需要考虑系统间的动态联系, 例如在锅炉的燃烧调节系统中, 燃料量与风量这两个流量调节系统之间应保持具有一定逻辑关系的动态联系等等。这样, 与反馈调节方式并列的另一种调节方

式——前馈调节便逐渐获得发展，并在过程控制领域中受到人们的日益重视。

二、前馈调节的概念

在概述里我们已经提到了前馈调节是一种按照扰动进行调节的古老开环调节方法，这一节要进一步阐明前馈调节的基本概念。

我们仍以图1-1所示的换热器温度调节系统为例来说明前馈调节方法。为了便于说明问题，先来回顾一下人工操作的方法。换热器的操作者为了控制物料在换热器出口温度恒定，最简单的方法是不断观察出口温度 θ_2 ，然后与温度的给定值 θ_{2i} 进行比较，最后按照两者差值的大小及方向去操纵蒸汽阀门，蒸汽流量的改变将使温度 θ_2 变化，不断重复上述步骤，力求使 θ_2 等于 θ_{2i} 。假如用自动调节器来模仿上述的人工操作，便构成了按照偏差进行调节的反馈调节系统。长期的操作经验告诉我们，为了控制换热器出口温度的平稳，仅仅按照 θ_2 的变化来进行调节，往往不能达到良好的效果。因为，当发现 θ_2 已经偏离了给定值 θ_{2i} 后再进行调节时，由于蒸汽量的改变到被调温度 θ_2 的变化需要滞后一段时间，调节的结果往往会产生较大的偏差，有时甚至引起振荡， θ_2 长时间不能平稳。

因此，一个有经验的操作者，为了力求 θ_2 的平稳，除了不断观察 θ_2 的变化趋势外，还必须经常观察那些影响 θ_2 的扰动量——物料入口温度 θ_1 及流量 Q ，蒸汽压力 P_0 等参数的变化。当这些扰动量一产生变化，尽管尚未引起 θ_2 的变化，便提前改变蒸汽量 G ，以补偿扰动量对被调量的影响。如果使蒸汽量 G 的变化适当的话，便可以大大地减小扰动对被调量 θ_2 的影响。假如用自动装置来替代这种人工的操作，即构成

了前馈调节系统。假设换热器的物料流量 Q 是影响被调量 θ_2 的主要扰动，也即进料量 Q 变化频繁、幅值大且对 θ_2 影响最为显著。当采用前馈调节方法时，可以通过一个流量变送器测取进料流量 Q ，然后将流量变送器的输出信号送到一个前馈补偿器（有时也称作前馈调节器），前馈补偿器按照其输入信号经过一定调节规律的运算来操纵调节阀，从而改变蒸汽量，以补偿物料流量 Q 对被调温度 θ_2 的影响。例如，当流量 Q 增大时，将使出口温度 θ_2 下降，而前馈补偿器的校正作用在测得流量 Q 增大时，按一定的规律增大加热蒸汽量 G ，以保证出口温度 θ_2 的平稳。只要蒸汽量改变的幅值和动态过程合适的话，就可以显著的减小由于换热器进料量波动所引起的出口温度的波动，这便是一种简单的前馈调节系统，如图1-2所示。由图中的方块图结构可以看到前馈调节系统是

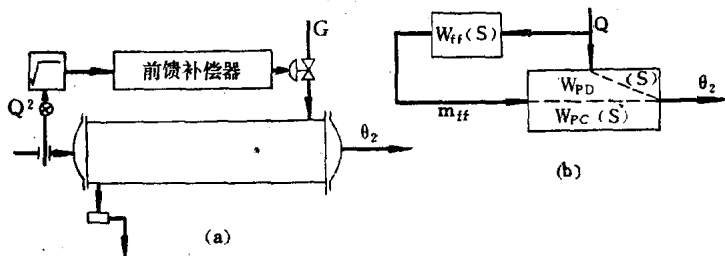


图 1-2 换热器的前馈调节系统及其方块图

一种开环调节回路，它不存在被调量的给定值与测量值的比较，因此，其调节的效果并不通过反馈来加以检验，这是前馈调节的一个重要特征。

前馈调节规律通常可以表示为下列形式：

$$m_{ff} = f(D, t) \quad (1-3)$$

也即前馈补偿器的输出 m_{ff} 是进入前馈补偿器的扰动量（即前馈补偿器的输入） D 和时间变量 t 的函数。在图1-2所示的换热器实例中，前馈补偿器的输入变量便是流入换热器被加热物料的流量 Q 。

由前馈调节规律的表示式（1-3）可以清楚地看到：前馈补偿器仅仅对进入前馈补偿器的扰动量产生校正作用，而对于一切未被引入前馈补偿器的扰动量不产生任何校正作用，处于没有调节的状况。此外，前馈的校正作用与被调量的偏差完全无关。在图1-2所示的换热器温度调节系统中，也就是说前馈调节系统仅仅对物料流量 Q 的变化产生相应的校正作用——加大或减小蒸汽量，来克服流量 Q 的变化对被调温度 θ_2 的影响。而对那些未被引入前馈补偿器的扰动量，例如物料的入口温度 θ_1 、加热蒸汽的压力 P_G 等的变化，前馈补偿器是无能为力的，它们对被调温度 θ_2 的影响同没有前馈补偿器时是完全相同的。这是前馈调节系统的另一个重要特征。

现在我们讨论前馈调节是如何实现对扰动量补偿的。图1-2所示的温度前馈调节系统中，假设物料流量 Q 产生一个阶跃变化，在不加调节作用的情况下，温度 θ_2 的阶跃反应如图1-3中曲线（a）所示。在前馈调节情况下，前馈补偿器得到了物料流量 Q 的阶跃变化信号，然

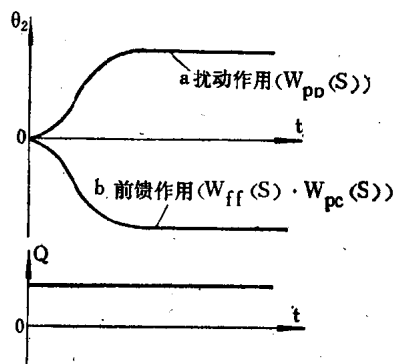


图 1-3 前馈调节的补偿作用

后按照一定的动态过程去改变蒸汽流量 G ，使这一校正作用

引起温度 θ_2 的变化恰好同物料流量 Q 的阶跃反应曲线(a)的幅值相等、符号相反,如图1-3中曲线(b)所示。这样便实现了对扰动 Q 的完全补偿,也即在流量 Q 变化的情况下,通过前馈补偿器对加热蒸汽量 G 的校正,使出口温度 θ_2 几乎不受扰动 Q 的影响。实现这种补偿问题的关键在于,前馈补偿器应该按照怎样的调节规律去改变加热蒸汽量 G 。显然,前馈调节规律与调节对象的动态特性是密切相关的,它们间的具体关系将在以后讨论。

第二节 前馈调节系统的几种结构形式

在实际生产过程中应用的前馈调节系统,按其结构形式来分类,种类甚多。这里我们仅介绍其中几种典型的结构形式。

一、静态前馈调节系统

如前所述,前馈补偿器的输出是其输入(即进入前馈补偿器的扰动量)和时间的函数,即前馈补偿器的输出与输入间的关系是一个随时间因子而变化的动态过程。所谓静态前馈调节系统,实际上是(1-3)式所示的前馈调节规律的一种特殊形式,也就是前馈补偿器的输出 m_{ff} 仅仅是其输入量 D 的函数,而与时间因子 t 无关,相应的调节规律便简化为:

$$m_{ff} = f(D) \quad (1-4)$$

在许多工业对象中,为便于工程上的实施,这种关系可以近似的表示为线性关系:

$$K_f = \frac{\Delta m_{ff}}{\Delta D} \quad (1-5)$$

式中 K_f ——前馈补偿器的比例系数

Δm_{ff} 、 ΔD ——分别表示前馈补偿器的输出变化量及输入变化量

图1-2所示换热器的前馈调节系统，当采用静态前馈调节方法时，可表示为图1-4的形式。这时前馈补偿器校正作用的变化增量 Δm_{ff} （即相应于加热蒸汽的变化增量 ΔG ）与扰动 Q 的变化增量 ΔQ 成比例关系，它们的比值即为前馈补偿器的比例系数：

$$K_f = \frac{\Delta m_{ff}}{\Delta Q} \quad (1-6)$$

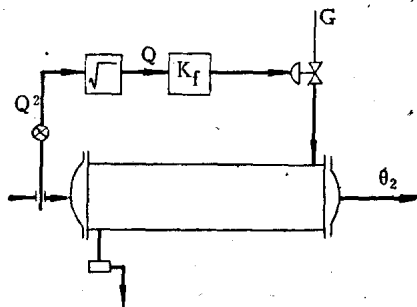


图 1-4 换热器的静态前馈调节系统

显然，(1-6) 式所示的 K_f 并不是在前馈补偿器设置的实际比例系数，这里面还存在着一个标度换算的问题。

这种静态前馈调节系统实施起来相当方便，不需要特殊的调节装置，一般的比值器、比例调节器均可作为前馈补偿器，而且它能满足相当数量工业对象的要求，因此在工程上获得十分广泛的应用。

在炼油、化工生产过程中，经常需要两种物料以一定的比例混合或参加化学反应。例如图1-5所示的丁烯洗涤塔的