

控制工程基础

上册

〔英〕J. Monk 等编

牛振冬 廖祖炜 王光曾 译

中央广播电视大学出版社

控制工程基础

(上册)

[英] J. Monk 等编

牛振冬 廖祖伟 王光曾 译

Bu 112/6



中央广播电视大学出版社

B015352

控制工程基础

上册

[英] J. Monk 等编

牛振冬 廖祖炜 王光曾 译

中央广播电视大学出版社出版、发行

国防科工委印刷厂印装

开本 787×1092 1/16 印张 23 1/4 字数 556,000

1982年第1版1982年12月第1次印刷

印数00,001—50,000

统一书号: 15300·1

定价 2.15元

译 者 的 话

为适应广播电视大学学生学习《自动控制原理》课程的需要,我们根据英国开放大学出版的《控制工程》(The Open University «Control Engineering»)这套教材的基本理论部分翻译了这本书,定名为《控制工程基础》。

本书分为十二个单元。第一单元介绍开环控制、顺馈控制和反馈控制,旨在使学生建立起“控制”的初步概念。第二、三单元介绍如何应用微分方程和频率特性描述和研究控制系统的动态特性。第四、五单元研究控制系统的稳定性及判断系统稳定性的方法。第六单元介绍应用根轨迹法研究系统瞬态响应的例子。第七单元介绍设计控制系统的一般步骤和基本方法。第八单元介绍调节器与补偿器在系统中的使用。第九单元讨论两个以上变量的控制问题。第十单元介绍非线性系统的处理方法。第十一和第十二单元分别介绍计算机控制和最佳控制的基本概念。

本书在阐明原理和分析实例时,着重于物理意义的解释,减少了数学推导,便于初学者自学。

本书第一至第五单元由牛振冬同志翻译,第六、七及第十二单元由廖祖炜同志翻译,第八至第十一单元由王光曾同志翻译。哈尔滨工业大学“控制理论”教研室李友善、庄显义、兰朴森等同志对译稿进行了校核,在此表示衷心感谢。

由于译者水平所限,译文中难免有错误和不妥之处。恳请读者批评指正。

目 录

第一单元 控制策略	1
目的与要求	1
学习指导	3
1. 单元简介	3
2. 控制	3
2.1 控制的原理	3
2.2 控制系统	6
2.3 课程	9
2.4 小结	9
3. 控制策略和简单模型	9
3.1 执行机构和信号	11
3.2 开环控制	12
3.3 调节器的实现	14
3.4 部件和扰动	17
3.5 顺馈的使用	19
3.6 反馈	21
3.7 反馈的性质	23
3.8 举例	25
3.9 反馈与阀杆定位	26
3.10 要注意的一点	27
3.11 小结	28
4. 实例研究介绍	28
4.1 天线的控制	28
4.2 发电	31
4.2.1 电网控制中心	32
4.2.2 发电	32
4.2.3 发电量的调节	33
4.2.4 对象所受的约束	34
4.2.5 压力控制与能量平衡	35
4.3 小结	37
5. 单元总结	37
自评题答案	38
第二单元 动态响应的模拟(I)——应用微分方程模拟动态响应	42
目的	42
要求	42
学习指导	44
1. 简介	44
2. 锅炉水位控制实例研究	45
2.1 控制问题	45
2.1.1 水位控制方案	47
2.2 一些简单模型	49
2.2.1 锅炉汽包	50
2.2.2 调节器	56
2.2.3 调节阀	57
2.3 闭环系统模型	59

2.4	模型的阶跃响应	60
2.4.1	比例控制系统	60
2.4.2	积分项的作用	64
2.4.3	模型的瞬态特性	65
2.4.4	模型的表征	69
2.5	回到实际系统	71
2.5.1	对阶跃值变化的阶跃响应	71
2.6	小结	76
3	卫星跟踪天线分析	76
3.1	系统部件的模型	77
3.1.1	天线结构	77
3.1.2	驱动系统	81
3.1.3	电动机和放大器	82
3.1.4	电动机速度控制回路	85
3.1.5	跟踪接收器	87
3.2	部件之间的互相作用	87
3.3	稳态系统性能	90
3.3.1	恒速误差	90
3.4	小结	92
4	单元小结	92
附录		93
自评题答案		94
第三单元	动态响应的模拟(Ⅰ)——应用频率响应模拟动态响应	107
目的		107
要求		107
学习指导		108
1	简介	108
2	频率特性的基础	109
2.1	什么是系统的频率特性?	109
3	一些频率特性实验及如何作图	110
3.1	两个简单电路	110
3.1.1	可以模拟成一阶集中参数系统的电路	110
3.1.2	可以模拟成二阶集中参数系统的网络	113
3.2	画频率特性图的另一种方法——谐波响应轨迹	115
3.3	人眼的瞳孔控制系统——生物学系统	117
3.4	伯德图和分贝数	119
3.5	小结	122
4	形成闭环	122
4.1	闭环频率特性	123
4.2	尼柯尔斯图线	124
4.2.1	什么是尼柯尔斯图线?怎样使用这种图线?	124
4.2.2	关于尼柯尔斯图的附言	129
5	1至4节小结	129
6	线性系统频率特性计算	129
6.1	简介	129
6.2	微分方程的图示法	130
6.3	一种有用的新算子	133
6.3.1	引入 j	133
6.3.2	从 j 到复数	134
6.3.3	复数的加减	136
6.3.4	复数的乘除	136

6.4	回到频率传递函数	139
6.5	关于频率传递函数的一些说明	143
7	应用	144
7.1	简介	144
7.2	天线控制系统	144
7.2.1	天线结构和传动装置的频率特性模型	144
7.2.2	电动机控制系统的渐近伯德图	145
7.2.3	由串联元件组成的系统	145
7.2.4	建立前向通道的完整模型	148
7.3	生物学控制系统——用频率特性数据辨识系统	150
7.4	一个连自锅炉控制系统的例子——锅炉水位控制系统	153
8	总结	158
	附录	158
	自评题答案	160

第四单元 稳定性 (I) 177

目的	177
要求	177
学习指导	177
1. 简介	178
1.1 什么是稳定性?	178
2. 微分方程的应用	179
2.1 稳定性和给水控制系统	179
2.2 一个二阶系统	183
2.3 一个困难	184
2.4 高阶系统	188
2.5 小结	192
3. 频率传递函数的应用	193
3.1 特征方程的导出	193
3.2 互相连接的部件的稳定性	194
3.3 闭环系统	197
3.4 时间延迟	199
3.5 小结	200
4. 本单元总结	200
自评题答案	200

第五单元 稳定性 (II) 208

目的	208
要求	208
学习指导	209
1. 简介	209
2. 稳定性和频率特性之间的联系——一个数学推注	210
2.1 正弦和稳态响应	211
2.2 指数变化的正弦曲线和稳态	212
2.3 所得结果的作图表示法	214
2.4 表示得数的另一种方法	219
2.5 小结	222
3. 闭环系统	223
3.1 用代数法求闭环极点	223
3.2 一种图解法	225
3.3 小结	229
4. 频率特性与稳定性	229

4.1	尼柯尔斯图和奈魁斯特图	229
4.2	闭环极点的确切位置	236
4.3	无独立调节器的闭环系统——一个例子	237
4.4	稳定性和伯德图	242
4.5	关于奈魁斯特图和尼柯尔斯图的若干问题	247
4.6	小结	247
5.	锅炉汽包控制系统	248
5.1	系统的频率特性模型	248
5.2	控制回路的稳定性	249
5.3	改变积分时间	252
5.4	还能做些什么?	254
5.5	第5节小结	256
6.	总结	257
	自评题答案	258
第六单元 根轨迹与瞬态响应		264
	目的	264
	要求	264
	学习指导	266
1.	简介	266
2.	传递函数与系统响应	266
2.1	从 $j\omega$ 到 s ——稳态响应	266
2.2	极点和瞬态响应	269
2.2.1	复习和 S 平面	269
2.2.2	一阶瞬态特性	273
2.2.3	高阶系统	275
2.2.4	具有复极点的系统	276
2.2.5	具有重极点的系统	279
2.3	主导瞬态特性	281
2.4	极点位置和瞬态特性——小结	284
2.5	信号的表示	285
2.6	小结	290
3.	根轨迹	290
3.1	一阶根轨迹	291
3.1.1	与瞬态响应的联系	295
3.2	二阶的例子	295
3.2.1	二阶瞬态特性	297
3.2.2	设计约束	300
3.3	三阶根轨迹	301
3.3.1	极点位置与开环增益的关系	303
3.4	一些简单的根轨迹图线	306
3.5	小结	310
4.	单元总结	311
	附录	311
	自评题答案	312
第七单元 设计入门		335
	目的	335
	要求	335
	学习指导	336
1.	简介	336
2.	稳态性能	336

2.1	传递函数的利用	336
2.2	由变化率产生的稳态误差	339
2.3	扰动和稳态误差	341
2.4	小结	343
3.	调节器的增益, 积分器和稳定性	343
3.1	一个例子	344
3.2	小结	346
4.	稳定响应	347
4.1	速度反馈和记录仪	347
4.2	速度反馈和根轨迹	348
4.3	关于含零点的系统模型的根轨迹图的绘制	349
4.4	小结	353
5.	调节器与调节器的调定值	353
5.1	调节器	353
5.2	选择调节器的调定值	354
5.3	某些实际的约束	357
5.4	小结	357
6.	单元总结	357
	自评题答案	358

第一单元 控制策略

目 的

本单元的目的在于:

1. 介绍本课程和控制工程的主题。
2. 指出控制工程的应用范围。
3. 说明三种基本的控制策略。
4. 介绍控制工程的一些基本术语。
5. 介绍控制工程的一些基本符号并说明如何使用这些符号。
6. 介绍古典反馈模型及其性质。
7. 介绍本课程后面各单元将要用到的两个实例研究的例子。

要 求

按内容各部分范围, 你应该达到的要求如下:

内容范围

第2节

第3节

调节阀的操作

开环控制

要 求

学完本单元, 你应该能够:

讲明设计控制系统所采取的步骤。

讲明量测、模型和控制元件在开环控制方案中的作用。(自评题1和2)

讲明量测、模型和控制元件在反馈控制方案中的作用。(自评题2)

讲明量测、模型和控制元件在闭环系统中的作用。(自评题2)

识别下列术语的正确说明和错误说明: 增益、功率增益和控制元件。

识别阀门、带执行机构的阀门和远距离手控操作的相应符号。

画出串联元件的方框图并给出数值。在每个方框中建立信号之间的相互关系。(自评题3)

顺馈控制

当所需系统的总放大倍数已给定并且被控制装置的模型的放大倍数也给定时, 选择开环调节器的放大倍数。(自评题 4)

计算增益的变化对于开环控制精度的影响。

计算附加扰动对于开环控制的影响。(自评题 5)

给定受控装置模型和扰动的作用, 选择顺馈调节器的增益以消除扰动的影响。(自评题 6)

计算增益的变化对顺馈控制精度的影响。(自评题 7)

反馈控制

识别关于给定值术语的正确叙述和错误叙述。

给定含有一个反馈通道的方框图, 求两个变量之间的数学关系。

选择闭环调节器的增益以实现给定的误差指标。(自评题 9)

计算反馈控制系统中前向通道和反馈通道的增益变化的影响。

计算稳定的附加扰动对反馈控制系统精度的影响。

第 4 节

天线系统

认识轴、马达、齿轮箱和放大器的符号。说明怎样用具有一个反馈环的方框图来表示天线系统。(自评题 10)

发电厂

认识压力调节器和速度调节器的符号。

学 习 指 导

第1单元包括本册印刷教材和一个电视节目。教材第2节对控制作了一般介绍。你应该通读第2节并做有关的自评习题。第2节的内容很宽，如果你不完全理解这些材料也不必着急。在学过课程的大约一半以后，当你见过更多的控制和控制工程的例子时，你也许愿意回过头来再读这些材料的。

第3节要求你做一些计算。你应该相信你能够做出这些计算并理解其含义。通过试做自评习题，你能够很好地估计你答题的能力。

第4节是介绍一些实例研究的例子。本课程较前部分用到了这些例子。你要搞明白这些例子的来龙去脉。但是，控制系统的细节将在后面的单元中研究。再者，当你学习后面单元时，你可能还会参考这一节。

1. 单元简介

本单元分成三个主要部分。第一部分介绍控制的概念，这对工程系统和非工程系统都适用。这一部分指出在设计控制系统时所要求的必须步骤，并研究适用于自动控制的策略。这一部分还略述了控制工程师的职责，并简要地观察了本课程中所涉及到的控制工程。

本单元第二个主要部分是定性地研究自动调节器中所体现的策略。这一部分利用作为许多控制系统的一个部件的调节阀这样一个工程实例，看不同策略的性质。

最后一部分介绍两个与后面单元有关的系统。这两个系统，一个卫星跟踪天线和一个发电厂被用来说明对控制工程师实用的技术和设计方法。这一单元集中说明为什么控制工程师专门研究这些系统和叙述系统工作的方式。

2. 控制

这一节的目的在于指出控制概念应用的广度。第一部分用选自不同领域的例子抽象出控制的原则和策略。接着研究控制工程师在设计和分析具体控制系统中的作用和责任。这一节还指出本课程中控制工程研究的范围。

2.1 控制的原理

控制的概念是我们日常生活的一部分。‘控制’一词被工程师、会计、将军、生产工程师、商店管理人员和许多其他人员所使用。尽管这些人来自不同的领域，处理不同的商品，有不同的目的并使用不同的方法，但他们在各自的领域内，都需要实行控制并且他们的控制的概念也具有内在的相似之处。

控制工程师也从事控制的应用，他们的工作同下面这些工程系统的控制有关：造纸机械，导弹，玻璃生产，卫星定位，面包和饼干生产机械，炼油厂，发电厂，柴油发动机，曲线记录仪和许多其他机械和过程。对于工程系统的侧重不是区别控制工程师和其他使用控制概念的人的唯一因素。控制工程师并不亲自控制炼油厂或导弹，他们关心的是进行控制的机器。控制工程师设计和实现自动控制系统。

任何人在对任何一种系统实行控制之前，他首先需要有一个控制目标。每个控制者都力求通过其作用达到一定的目标。会计的目标是平衡他的账目；生产管理人员必须保证他的产品能按时生产出来；将军需要战胜敌人；商店管理人员必须保证商品对顾客有用。

控制目标是必要的，但只有目标还不够。控制者应该有可能改变他所管理的系统。将军

给他的战士下达命令；商店管理人员需要从他的商品供应者那里得到新的存货。控制工程师的自动调节器也就应该能够对他所控制的系统产生调整。所有的控制者都起作用，而他们的作用导致实现他们目标的变化。

可惜控制者所能起的作用很少是完全自由的，因为经常有限制控制作用可能范围的约束。将军不能指望战士一直不睡觉；会计不能停止发放工资；生产管理人员不能指望新机器立即到货。要实现控制，就要考虑所有可能的约束。

对一个给定的调节器的约束的性质可能使得原先的目标不能直接实现。因此，现实的控制目标被阐述为根据在一段时间内测得的特性来规定的一个目标。会计应该在年底平衡他的账目；将军有若干天的时间打胜仗。

如果要使系统的控制成为可能，控制者应有机会采取产生调整的行动使系统发生变化。要实现控制，控制者必须考虑到可能对被控系统起作用的约束。

控制者不能改变现在，他只能采取对未来有影响的行动。因此，对一个控制者来说，如要实现控制，重要的是要能够预测可能的行为的各种后果，以便选择采取哪一种行动并决定何时采取这种行动。预测需要根据过去的经验建立的模型。建立模型甚至可能不是有意识的。模型本身也可能是天真地想像的，但它对于实现控制是非常重要的。商店管理员使用的模型包括对存货使用速度和供货商交付新产品所用时间的设想。将军使用的模型可以包括地形图，他的战士将一直服从他的命令这一信念，对他的武器系统的能力的认识，以及研究前面的战斗所得的结论。生产管理人员依靠他掌握的劳动力和机器的能力等数据，他的机器对于保养的要求以及他的产品中所使用的材料的了解。

有许多方法可以实现控制。由一个也许根据类似系统的经验建立的模型，以及由对于对象和约束条件的认识，控制工程师，将军，会计都可以产生一个策略——一个行动计划。这也可能不是有意识的行动，但是在每种情况下总要求有一个范围，在这个范围内做出决定和选择适当的行动，以便保证控制的质量。这个策略可以支配将军下达的命令，或者可以支配控制工程师用以连接装置以实现自动控制的方法。

我们将要研究的第一种策略需要一个仅仅根据对控制行动的可能结果的认识而做出的计划或方案。图1说明其原理。生产管理人员根据生产水平得出一个需求，然后他利用根据工厂过去的情况作出的计划选择他采取的行动。合并计划在计划中的模型可以预测控制作用的结果。这模型还可以用来搜寻实现要求的结果所需的控制作用。然后可以把这些控制作用应用到被控制系统上，以实现控制目标。这种策略依赖于对描写控制作用对被控系统影响的模型精度的完全信任。它还假设外部的影响可以忽略不计。对结果不作检验。

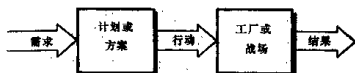


图1 简单控制策略

会计有理由相信，当他建立消费限额时，这些限额将不被超过。将军可以假定，当他发出命令时，这个命令会被执行。在上述两种情况下，大概都会有总的检验，以保证所采取的

控制作用是有效的。然而，在局部情况下，也可采取一定的控制作用，而对其结果不作检验也不提误差要求。在这些情况下，命令一传达下去马上就被执行。这种策略叫做开环控制。

如果已知外界环境的变化对被控制系统有影响，控制者如果忽视这些影响就是愚蠢的了。要消除或减小这种影响也许是可行的，但如果这样还不够，就需要另一种策略。应该改进和扩充模型，使得能够预测外部影响或扰动的作用。应该算出并执行抵消扰动影响的作用。图2表示这种系统是怎样工作的。

外部的影响（例如缺乏原料）影响生产，但是可以通过计划采取校正行动（例如定代用的材料）。

在外部影响明显的场合，抵消其作用的策略显然比不考虑外部影响要好。但是，为了实行这种策略，应该把外部影响量化并准确地扩充计划或方案。对于有监测外部影响，选择控制作用，使之在外部影响引起偏离目

标的严重偏差之前就抵消这种影响的策略，使用了反馈控制这个术语。

如果有少量且可方便测量的扰动，反馈可以是实际的解决办法。但是，如果要对付的扰动或影响太多，或是如果产生未预见到的扰动，这种策略就不是实用的解决办法。在这种情况下，可以采用另一种策略，这种策略还包括测量。采用这种策略时，不是观察外部影响，而是测量由这些外部影响引起的整个系统的输出同规定的需求值之间的偏差。当产生偏差时，就计算出并施加校正作用。图3表示这种策略的原理。外界影响仍然存在并且会影响输出。不过，如果输出不符合要求，这种不符合就会被检测到，并且将采取行动力求把结果恢复到所需要的那样。

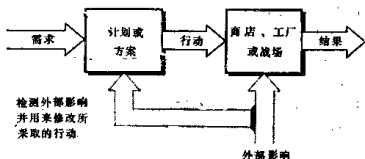


图2 考虑外部影响的策略

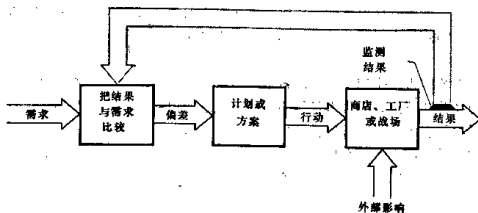


图3 测量扰动的影响并计算这种影响

这一策略包含与控制目标值有关量的测量与比较。商店管理员必须保持有存货；他可以通过计算来测量存货，当存货不足时，他可发出定货单。会计可以查看银行账目，计算他的公司的实际消费率，并加以必要的预算上的限制。

反馈控制这一术语就是用以说明这种策略的。控制作用产生一个结果,这个结果被测量,当产生偏离目标的偏差时,把测得的值送回去计算出新的控制作用。这叫做**环路**,因为控制作用导致一种结果,而这种结果又被用来计算出新的控制作用。有时又用“**闭环控制**”这个术语代替反馈控制。

反馈控制策略不要求精确的模型,因为像扰动的影响被减小一样,由于对被控制系统认识不正确而在控制作用中引起的误差也被减小了。但是,只有在产生了误差并检测到误差以后才能产生校正作用。

在采取控制作用和控制作用显示出效果之间,往往有时间延迟。如果模型不具有这些延迟,控制作用可望立即产生影响。由于有延迟,不能立即检测到响应,而这个没有响应的表面现象就使得控制者(器)增加控制作用。增加控制作用的后果是最终出现过头的结果。补偿这种过头结果的企图2导致在相反的方向采取过头的控制作用。这样一种循环不停地进行,结果将出现波动。这显然是不希望有的。一个会计,如果他在大量借支和资金过剩之间来回摆动,他就会受到申斥。商店管理员如果由于没有考虑到从定货到交货之间的时间延迟,他的决策就产生剧烈的存货波动。这种由于应用反馈控制的结果而引起波动的可能性是控制工程师最为关心的。

原则上有三种控制策略,即开环控制、顺馈控制和反馈控制。开环控制假定扰动的影响和模型中的变化都忽略不计。顺馈控制力求通过测量扰动并预测抵消扰动的控制作用来校正那些扰动的影响。反馈控制通过首先测量扰动的影响,然后计算出校正控制作用来校正扰动的影响。

2.2 控制系统

控制工程师设计自动调节器。在设计控制系统时,控制工程师首先必须搞清楚自动控制要达到什么目的。对于控制目标,通常只简单地规定,解释清楚却不容易。使用导弹的目的是清楚的,即摧毁目标。管理工厂可能希望加上自动控制来提高利润率,增加生产,减少劳动力或满足新法规的要求。目标可能是多种多样的。

其次,控制工程师应该把这些目标归纳成可以用对象或装置的术语来说明的形式。要做到这一点,重要的是他不仅要了解过程和机构是怎样工作的,而且要了解有关它们的经济学、法规和运行人员。

可以拿磨面粉作为一个例子。目的是增加出粉量,从而增加磨面粉的利润率。由磨坊主几百年积累的经验知道,谷物含水量影响面粉产量,所以在谷物混合成磨料前先湿润。存在着一个谷物出粉最多的湿度。假定在评价新的计划是否会增加利润率时,已包括了控制的成本,那末增加磨粉利润率的这个目标,部分地简化为要保持一定的湿度这个目标。

控制工程师的首要职责是确定他的控制系统的目标,并以一种方式表达那些目标,这种方式使他能够应用控制理论进行实际的设计。

对于谷物湿度控制系统,谷物湿度可以通过加水来调整。如图4所示,水流可以来自水龙头。如果能够自动地调整水龙头,那末它就可以用在自动控制系统中。能够使自动调节器对控制系统产生调整的装置常常称为**控制元件**。如要采取行动实现控制,有控制元件是极为重要的。

由一个特定的龙头给谷物加水,存在一个最大速率;谷物含水量只能通过水龙头加进来而不能被减掉。这对控制系统的可能的作用是个限制。有了控制对象和采取自动控制作用的

能力，并对限制条件有了了解，控制工程师然后就需要一个被控制装置或过程的模型。模型可以是粗略的，也许控制工程师需要的最简单的模型就是说明什么样的变化影响他所控制的量。加水将会增加谷物的水分。

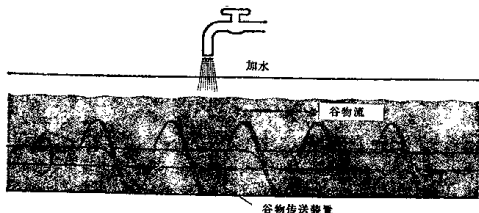


图4 给谷物加水

控制工程师可以通过使模型精确化来提高控制的质量。这并不意味着控制工程师要找到最复杂的模型。模型应该是简单的，这样他可以使用简单的设计程序，但是，模型应该足以使得所设计的调节器满足控制系统的技术要求。

对于谷物湿度控制系统的设计，可以通过建立谷物中的水分与加水流量之间的关系来改进模型。假定谷物流量不变并且谷物进来以前的水分是固定不变的，那末，由模型可以估算出能够产生设计湿度的稳定的加水流量。模型的第二部分可以把龙头整定值同水流量联系起来。对于一个要求的水流量，可以求出一个相应的龙头整定值。要获得要求的水分含量，可以调节龙头加入正确的水量。

自评题 1

图5表示所提到的谷物湿度控制系统。它代表下面系统中的哪一种？(a)开环控制系统，(b)顺馈控制系统；(c)反馈控制系统。图5所示的策略为什么可能不足以控制湿度？



图5 谷物湿度控制系统

试回答下列问题：

如果已知存在着输入谷物水分变化，谷物流量变化和水压变化等，顺馈能否改善谷物湿度控制？如果要自动地做到这一点，控制设备应包括何种功能？

如果测得这些量，可以用测量的结果计算出对龙头整定值的调整，以保证最后的谷物含水量是所要求的。要想能够自动地做到这一点，就应该自动地进行谷物流量、输入谷物湿度和供水压力等的测量。如果给定谷物湿度的测量值，调节器应自动求出龙头整定值是怎样时才能达到必须的水流量。

同样，对于谷物流量和水压的变化，调节器也应该能够计算出调整量。这些调整量可以利用模型计算出。因此调节器应该根据模型进行计算。最后一点，调节器应能够自动地操作龙头。

在加上顺馈控制之前，需要测量输入谷物水分含量。测量应该是自动的，并且应该能够操作自动装置。有一个传感器，它能够给出一个代表谷物水分含量的电的输出信号。现在，通过使用模型，可以把调节器设计成根据传感器输出调整水流量。这样做对于输入谷物湿度的变化给出调整，但对于谷物流量的变化或供水压力的变化都没有给出调整。也可以用变换器测量水压和输入谷物流量，但是这样就包括了三个参数，实现控制所需要的调节器就会很复杂。

在这些情况下，控制工程师将努力消除其他扰动的起因，他可以在上部加一水箱以保证供水压力不变，可以加上一个送料漏斗以维持谷物流量不变。但是要保持谷物流量不变是不太可能的，并且还可能有其他未预见到的扰动。反馈控制能够补偿未预见到的或被忽略的扰动。它还可以补偿模型的误差。要实行反馈控制，就需要对控制作用的结果进行测量。这意味着必须测量输出湿谷物的湿度。

最终用于控制谷物湿度的控制系统使用了一个顺馈和一个反馈的策略：顺馈用以调节输入谷物湿度的变化，反馈调节其他的变化。

这个方案示于图6。有一个传感器测量输入谷物湿度，还有一个传感器测量最后的谷物湿度。调节器把来自两个传感器的信号结合起来，给出正确水流量所必须的自动阀门整定值。

自评题 2

对于(a)开环控制；(b)反馈控制；(c)顺馈控制，下列各项中哪些是需要的？

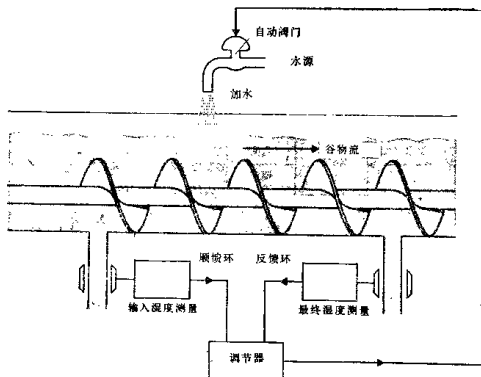


图6 谷物湿度控制方案