

数字计算机过程控制

SHUZI JISUANJI GUOCHENG KONGZHI

(美) C. L. 史密斯 著

石油工业出版社

数字计算机过程控制

〔美〕 C.L.史密斯 著

邵惠鹤 潘日芳 王宏臻 译

蒋 慰 孙 校

石油工业出版社

序

最近二十年来，为了把数字电子计算机用于过程控制，国内外都进行了大量工作，其间有不少经验，也有若干教训。电子计算机应用日益广泛，特别自微处理器问世以来，更成为人们公认的趋势。然而，在炼油、化工等过程工业中，计算机控制究竟实效如何？又应如何着手？至少在国内，至今仍有争论，问题不少。本书的翻译出版，主要目的是介绍国外在这方面的经验、概念和方法，作为我们的借鉴。

要搞好计算机控制，关键总不外乎硬件和软件两个方面。计算机的可靠性的确非常重要，是前提，否则不可能在工业中真正应用。但是，在有了可靠的计算机之后，如对控制方案、算法、程序等问题稍有缺憾或忽视，工作仍然不能成功。过去有些项目不能达到预期目标，后一方面的原因也同样重要。

本书作者C.L.史密斯是美国路易斯安那州立大学计算机科学系主任。他既有理论基础，又有实际经验。在这本篇幅不大的著作中，他总结了计算机控制的实践，以主要篇幅论述有关控制理论和方法的内容，他认为只有在很好解决这些问题时，计算机控制才能发挥应有的威力。

作者写的是理论，着眼在应用。因此，他把理论写得简单明了，数学上不深奥，比较好懂，而且把概念、观点、理论揉合在一起，不时发表一些经验之谈，所以读起来不枯燥，费时不多，收益却可不小。对于已经和准备从事计算机过程控制的同志，不论是搞系统的、搞工艺的、搞机器的、搞程序的都有参考价值。

这本书是1972年出版的。然而直到今天，国外文章仍经常作为参考文献加以引用，可见它的价值。书上提到的很多问题，对我们不仅有现实意义，而且有启发作用。

本书的译者是邵惠鹤、潘日芳和王宏臻三位同志。其中一至三章译者为邵惠鹤，四至六章为潘日芳，七至九章及附录为王宏臻，总的由邵惠鹤同志统稿。我抱着先睹为快的心情，通读了全文，并作了一些修订。

原书中有些笔误及错印之处，译者已经订正。但是，译本可能仍有缺点错误，欢迎指正。

蒋慰孙

序于上海化工学院

原 序

计算机控制将引向何处去？这个问题无疑已引起广泛的注意，对此题目再多谈些什么，似乎是不恰当的。然而，当写一本有关这个题目的教科书时，作者面临这些问题，以决定选用什么材料，删去什么材料。由于作者对于这个问题的看法会大大影响书的选材，因此，对此问题作一简要的回答，看起来很有必要。因为对此问题权威性的回答简直是不存在的，因而，应该强调“看法”这个词。

在美国旧金山化学工程师学会会议，（1971年12月）期间，把计算机在过程控制中应用的发展比拟为所谓“轮船”发展的曲线。随着十八世纪初蒸汽机的产生，很自然地想到采用蒸汽机作为船只的推动力，同时建造了若干艘轮船。但是，他们没有立即取得成功，主要是因为帆船制造商不断地改进他们的产品（例如，快船的产生），所以在市场上保持着竞争的地位。事实上，直到十八世纪后期以后，轮船才很快发展，几乎占领整个市场。而在这之前，一直只占一定的比重。

计算机控制是否也象“轮船”发展曲线那样？随着五十年代计算机的商品化，很快就指出计算机能够用于过程控制。五十年代末第一次应用于过程控制，随后在六十年代有更多的应用。但是由于常规控制硬件的制造商已经不断地改进他们的产品，而使计算机控制不能横扫整个市场。

六十年代末，随着小型计算机（以你喜欢的方式定义）的出现，使计算机硬件可能适用于更广泛的范围，这就提供给用户有更大的灵活性，这无疑将导致更多的运用；同时计算机成本也在连续不断地下降，这些因素是否将导致“横扫整个市场”？

这种情况是可能出现的，即计算机能以常规仪表同样的方式

对现场进行实际的控制。然而，计算机的能力在很多方面远远超过常规控制硬件，但这仍然不能摆脱计算机在实际中很少使用的局面。这是由于计算机本身虽然已经有了巨大的发展，而我们怎样充分地利用它的能力却还进展得很少。

当在过程控制中充分发挥计算机能力方面的研究有了显著的进展时，那么计算机将占领过程控制方面的市场，这就是作者的看法。因此，本书重点放在计算机控制的控制理论方面。用一章的篇幅来简要地描述计算机硬件、软件和接口。其余八章将讨论控制方法和概念的内容。作者不准备解答计算机怎样用于过程控制的所有问题，但是包括了相当广泛的内容，使读者能有某种程度的认识。

本书来自于作者在三个方面的工作。第一，虽然强调的是实际课题，但书却受到研究生和毕业生教学实践的很大影响。这本手稿曾是过去二年在美国路易斯安那州立大学(*Louisiana State University*) 研究生和毕业生选读的数字控制课程的课本。第二，作者曾参与了三十多期过程自动化和数字过程控制的工业专门短训班。在过去两年中手稿的一部分曾多次用作短训班的教材。第三，作者有作为过程控制方面顾问的实践经验。

Cecil L. Smith (史密斯)

目 录

第一章 计算机的作用	1
1-1 过程控制问题	2
1-2 常规控制系统	3
1-3 数据记录仪	5
1-4 直接数字控制 (DDC)	5
1-5 监督计算机控制	9
1-6 递阶的概念	12
第二章 计算机控制系统	15
2-1 数系	15
2-2 中央处理器 (CPU)	18
2-3 字长与性能的关系	20
2-4 中央处理器 (CPU) 的可选设备	24
2-5 输入/输出 (I/O) 结构	27
2-6 外围设备	28
2-7 计算机系统的典型结构	31
2-8 过程接口	34
2-9 软件	40
2-10 汇编程序	41
2-11 面向问题的语言	42
2-12 填入式系统	44
2-13 说明书	45
2-14 前台/后台操作	45
2-15 中断	47
2-16 管理程序	48
2-17 固件	51
第三章 监督计算机控制	53
3-1 模型的类型	53

3-2	约束	56
3-3	监督计算机控制的模型	57
3-4	精馏塔的最优控制	60
3-5	最优化方法	68
3-6	调优最优化方法	74
第四章	采样数据系统的数学	79
4-1	数字控制回路	79
4-2	数字控制回路的数学分析	81
4-3	z -变换	82
4-4	差分方程的 z -变换	84
4-5	脉冲传递函数	86
4-6	方块图分析	90
4-7	反变换	92
4-8	稳定性	94
4-9	具有纯滞后时间的系统	97
4-10	采样时刻之间的输出	99
第五章	频率域研究	103
5-1	采样信号的频谱	103
5-2	数据保持	108
5-3	采样与保持器的纯滞后时间近似法	113
5-4	采样函数的 s -平面特性	118
5-5	z -域中的稳定性	119
5-6	噪声抑制	120
第六章	控制算法	127
6-1	简单过程模型	127
6-2	用 z -变换设计控制算法	136
6-3	非周期算法	137
6-4	达林 (<i>Dahlin</i>) 方法	140
6-5	跳动	141
6-6	卡尔曼 (<i>Kalman</i>) 方法	144
6-7	模拟控制器的离散等效方法	148
6-8	对负荷变化的设计	149
6-9	标准算法的使用	154

6-10	算法的整定	156
6-11	整定方法	160
6-12	采样周期的选择	166
第七章	在线识别方法	170
7-1	时间域识别的一般方法	170
7-2	用线性回归来估计参数	172
7-3	非线性“最小二乘方”回归法的推导	178
7-4	指数变换估计	182
7-5	离散设计方法	184
7-6	其它方法	185
第八章	新型控制方法	188
8-1	前馈控制	188
8-2	串级控制系统	197
8-3	多变量控制系统	199
8-4	自适应控制和在线整定	208
8-5	纯滞后时间的补偿	213
第九章	最优控制	219
9-1	反馈的情况	219
9-2	积分作用	222
9-3	状态方程	223
9-4	最优控制问题	226
9-5	最小值原理	227
9-6	最小值原理的应用	229
9-7	采用两次型性能准则的线性系统的最优控制	234
9-8	对于给定值变化的最优控制	237
9-9	对于干扰变化的最优控制	239
9-10	动态规划	244
9-11	简要的概括	249
附录 I	z-变换表	251
附录 II	习题	253

第一章 计算机的作用

在纪念美国仪器协会刊物《仪器应用工艺学》发行二十五周年(1970年1月)之际,读者们以压倒的多数确认数字计算机为前四分之一世纪中最重要的发展。而且,实际上所有专家都预料到将来数字计算机在过程控制的各个方面能发挥的越来越大的作用。

自五十年代后期开始,将数字计算机用于过程控制的工艺有了迅速的进展。使早期装置引起麻烦的硬件(*Hardware*)方面的限制问题大部分已经得到解决。软件(*Software*)的标准化和以硬件代替软件功能,使围绕计算机应用所遇到的软件困难正在得到解决。

也许最大的缺口在于有效的控制理论和控制概念应用于实际的问题。本书主要关心的是这样一个领域,即描述那些控制理论概念应用于实际控制系统中去的方法。

然而,只讨论控制理论而不叙述一点软件和硬件是不行的,因为这些问题在最终的安装中都交织在一起,是首先讨论硬件和软件,然后讨论控制理论(即计算机怎样用来控制一个单元)?还是先讨论控制理论,后讨论硬件和软件?显然这是个鸡生蛋、蛋生鸡的问题。

本书所采用的方法是有些折衷的。在第一章中,将讨论计算机与过程之间的一些共同关系,并指出计算机在调节过程中所起的作用。以这个为基础,将简要地论述硬件、软件和数字计算机控制系统所需的计算机/过程接口。本书其余部分将论述控制内容。

全书主要关心的问题是“怎样用计算机能使我们从过程中取得较大的经济收益?”在本章中,我们首先考察过程控制问题和过程控制的常规方法。然后,再考察数字计算机应用于过程控制

的四种方法：数据记录(*data logging*)，直接数字控制(DDC)，监督控制(*Supervisory*)和递阶控制(*Hierarchical*)。

1-1 过程控制问题^①

采用计算机控制系统已成功报道的工业过程有：鼓风机、石油和石油化工厂、造纸机以及纺织厂。它们各自都有本身的独特问题，因此这里的讨论，只能是一般性的内容。在所有这些过程中，变量可分为四类，如图1-1所示。

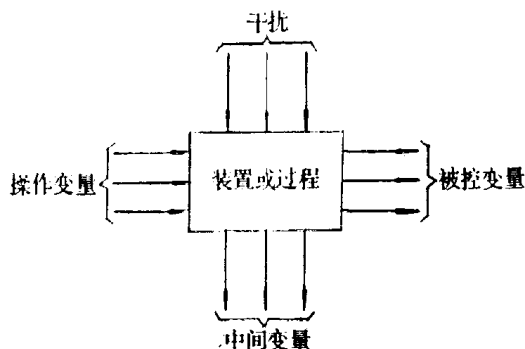


图 1-1 过程的一般描述

1. 操作变量 如输入的原料流量，容器中的蒸汽压力等，这些变量的值可以通过模拟（常规）或数字控制系统来调整。

2. 干扰 它们是一些会影响过程运用，而不能通过控制系统来调整的变量。例如原料的成分、环境空气温度，在这类变量中，有些变量是能够被测量的，而另一些则不能。

3. 被控变量 它们是能真正反映装置性能的变量。因而，控制系统必须保持这些变量的值为某个要求值（常称为给定值）。如生产率和产品质量。通常的控制问题是在出现干扰时，调整操

^① 这一节及本章其他各节的许多内容是取材于C.L. Smith, "Digital Control of Industrial Processes," *Computing Surveys*, Vol. 2, No. 3 (September 1970), pp. 211—241, with permission from the Association for Computing Machinery.

作变量以使被控变量维持在规定的要求值上。有些被控变量能够直接被测量，但有些则必须通过其它变量的测量值来推算得到，这个任务用数字计算机来完成就比模拟式硬件要优越得多。

4. 中间变量 这些变量出现在过程的某些中间点。在决定应该采用什么控制作用时，控制系统常常能够有效地利用这些中间变量。例如水夹套中的温度和中间物料的组分。

因为一个典型的设备，在上述几类的每一类变量中都有几个变量，所以过程单元的控制不是一件简单的事情。更加复杂的是，由过程特性推导出过程数学模型极为困难。这方面的问题是，过程特性首先依赖于设备运行的稳定条件（即设备通常是高度非线性的），其次，即使运行的稳态条件不变，而设备的特性也随时间而改变（即设备是非平稳的）。

虽然安装计算机控制系统的事情弄得很复杂，但是这些却恰恰是需用较高级控制系统的基本理由。数字计算机在收集大量数据，加以分析，并根据所得结果作出逻辑判断方面的能力，使得计算机对过程控制的应用具有很大的吸引力。

1-2 常规控制系统

在探讨数字控制系统的特性之前，了解一下过程控制的常规方法是有益的〔1〕〔2〕。在常规（模拟）系统中，基本控制回路是简单的反馈回路，如图1-2所示。被控变量的值是由传感器或变送器（例如，测量温度时用热电偶）来检测，这个值与要求值即

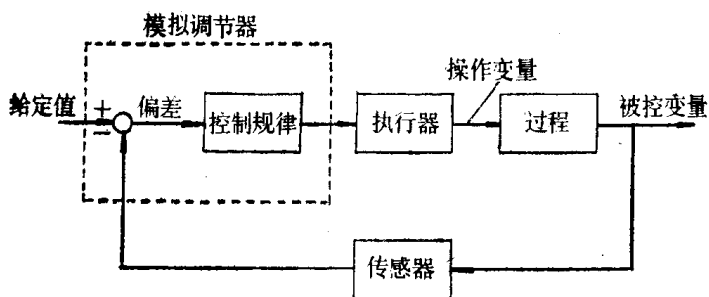


图 1-2 基本常规反馈控制回路

给定值进行比较,得到偏差。控制规律使操作变量变化,以使偏差趋于零。控制器输出通过执行器作用于过程,执行器常常是一个自动定位的阀门。

控制规律通常采用比例-积分-微分(PID)关系或由此作出的简化形式。操作变量 $m(t)$ 与偏差 $e(t)$ 的关系由下式给出:

$$m(t) = K_c \left\{ e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(\tau) d\tau + T_d \frac{de(t)}{dt} \right\} + m_R \quad (1-1)$$

式中: K_c ——比例增益倍数;

T_i ——重定或积分时间;

T_d ——微分时间;

m_R ——控制作用在初始时的参考值。

K_c , T_i 和 T_d 的调整通常是在调节器背面或侧面进行的。这些参数值的选择虽然已提出一些系统的方法[1,3~6],但是一般还是采用试差法,称为“整定”。在实际应用中,往往超过75%的场合是只用比例-积分(PI)项,这主要原因是由于PID(或三作用)调节器的整定有困难。

在一个典型的工厂中,有少则几个、多则到上百个或更多的调节器。在五十年代后期以前,这些调节器主要是气动的(用气压操作)。它们除了远比电子管的同类产品更为可靠外,当用于易爆的场合时,它们另有安全的优点。五十年代后期引进了固态电子调节器后,气动调节器才逐渐被取代。

不管是气动的还是电动的,常规模拟控制系统从根本上来说是缺乏灵活性。在控制回路的功能和为了实现这些功能的硬件之间几乎是一一对应的。这就给控制系统的设计者带来如下几个负担:

- 1.他的设计方案必须能用现有的模拟硬件来实现。
- 2.以后控制方案的修改就需要掉换模拟硬件。

在五十年代中期,控制系统的设计者开始希望将数字计算机作为克服上述这些问题的一种工具。这时,任何控制方案都可以程序化,而且,方案的各种修改只要简单地改变程序就可以了。

1-3 数据记录仪

如图1-3所示，数据记录仪没有直接参与过程的控制或调节，而只是在规定的時間间隔去记录重要的过程变量的数值。为记录仪所作的推销宣传变得有点象“记录所有恰当的过程变量的数据，就可使你得到很多有关你的过程的最优操作方案。”不幸的是，实际上并没有象宣传的那样简单。从正常工况或接近正常工况下取得的数据，大多数是多余的信息。过程模型需要谨慎地设计过程试验方案来获得必要的数。在这些试验中好的数据记录是十分重要的，但是仅数据记录本身是不够的。

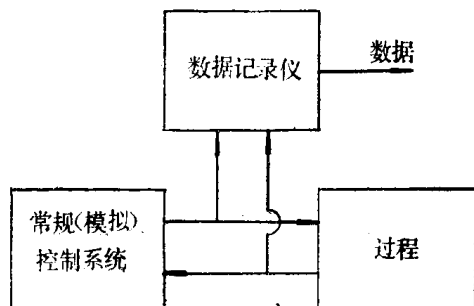


图 1-3 数据记录仪

除特殊情况外，数据记录不足以判断对数字计算机的需要性。事实上，惠里(Wherry)和帕森斯(Parsons)[7]曾对把数据记录加入其它三种类型（直接数字控制、监督或递阶）之一的过程控制系统表示过异议。核能发电厂和实验室自动化系统却是例外，因为原子能委员会要求核能发电厂保存某些记录，而对实验室自动化系统来说，数据是其主要产品。

由于上述原因，在本书中关于数据记录的讨论就此结束，不再另立篇章。

1-4 直接数字控制(DDC)

在直接数字控制[8~11]中，计算机直接根据给定值、被控变

量过程中其它的测量值计算出操作变量的值（亦即阀门的位置）。计算机的决策直接用于过程中，故称为直接数字控制或DDC，其方块图如图1-4所示。

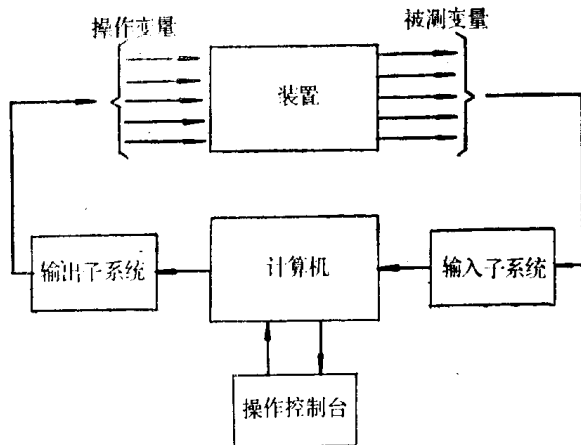


图 1-4 直接数字控制 (DDC)

由于操作变量的值是由计算机直接算出来的，因而上述常规的三作用调节器不再需要。它们的功能改为通过一些方程式来实现，称为“算法”计算机按照“算法”，可以从给定值和被控变量计算出操作变量。控制算法的一个例子就是连续调节器的方程式(1-1)的离散（有限差分）化，

$$m_n = K_c e_n + \frac{K_c T}{T_i} \sum_{i=0}^n e_i + \frac{T_d K_c}{T} (e_n - e_{n-1}) + m_R \quad (1-2)$$

式中： m_n ——第 n 个采样时刻的操作变量值；

e_n ——第 n 个采样时刻的偏差值；

T ——采样周期。

其它参数的定义如前所述。因为计算出的操作变量是绝对值，上式称为控制算法的位置式，典型的例子是阀门位置。如果为 m_{n-1} 写出式(1-2)，并从上面给出的式(1-2)中减去，可得

$$\Delta m_n = K_c (e_n - e_{n-1}) + \frac{K_c T}{T_i} e_n + \frac{T_d K_c}{T} (e_n - 2e_{n-1} + e_{n-2}) \quad (1-3)$$

式中 $\Delta m_x = m_x - m_{x-1}$ 是操作变量的增量值，因此称为增量式算法。式(1-2)和式(1-3)之间主要的差别在于式(1-3)是增量算法，不包含 m_R 项。 m_R 是此控制回路投入自动（即计算开始）时的操作变量的值。如果使用式（1-2）时，计算机必须能够读出阀位，以保证从手动到自动的平滑过渡，即所谓无扰动切换。当使用式（1-3）时，不用读出 m_R 就能实现无扰动切换的目的。

上述的差分算法等效于三作用模拟调节器，所以绝大多数应用中都采用上述算法。但是，还有一些其它的算法，其效果要超过上述算法，两类方法都将在第六章中讨论。

提出DDC系统的一个动机是经济上的节约。其基本思想是一部计算机能提供与若干个模拟调节器同样的功能，因此，总会在某一点上，若干个模拟调节器的成本等于数字系统的成本。早期估计，应被替代的控制回路数至少到50个，但遗憾的是还不能证明这种说法是正确的。有两个问题似乎被忽略了：

1. 程序的成本 如没有以前的经验，没有DDC软件包或经过考验的管理程序，程序工作量远远超过所预料的工作量。

2. 后备硬件 万一计算机完全失灵，操作人员仍应能够有效地控制设备。由于这一事实就必须考虑后备硬件问题。在许多场合，这个后备硬件是完整的模拟系统，这样就排除了硬件的任何节省。

本质上讲，模拟系统是非常可靠，而且是比较便宜的，结果就没有模拟系统的成本与代替它们的数字系统的成本相等的、所谓得失相当的转折点。有少数是例外的情况，例如在几个几乎相同的单元上，用单一的数字系统代替几个几乎相同的模拟系统。

虽然减少人力是对采用DDC系统另一个有力的论据，但是这毕竟已证实是难以做到的。实际上，大多数过程单元已经采用最少的操作人员，而计算机的添置常常需要配备高级技术人员，这样做，往往会引起成本的增加而不是减少。

无论什么样的应用，不管是会计还是过程控制，采用数字计

算机和采用“常规”方法来完成同样的任务，两者相比较，前者总要增加成本。因此，论证应该从数字系统性能的改善上来探求。对于直接数字控制计算机而言，我们将在第五章说明。简单地以等效的离散控制算法代替常规模拟调节器不可能增加控制系统的基本运行性能，这就是说，同样的任务由数字系统完成和用模拟系统完成相比较，是不可能产生明显的经济收益，即使是有，也不会很多。数字计算机价格之所以高昂，主要是由于它的众所周知的计算能力。为了证实有必要化费这样大的资金，则必须充分发挥计算机的计算能力，实现那些由模拟硬件不能实现或难以实现的控制方案。

另一种方法是用第六章所介绍的 z -变换方法来设计算法。虽然在所有实际情况中，这些算法的性能都超过PID算法，通常大约改善30%，但对一个典型的过程来讲，这些还不足以证明采用一个数字系统是有利的。有一些是例外的，对于具有大“纯滞后”时间的系统，例如造纸机，就是如此。这里的改善确实很大。

从这些理由可以引出如下结论，在很多情况下，最好的方法就是仅在对控制性能有显著改进的控制回路采用数字系统，而其余的控制回路仍采用模拟控制系统。这就是所谓过程控制的混合方法，它随着小型计算机的出现变得越来越为人们所重视。除了基本反馈系统外，用数字系统实现自适应系统、解耦控制、在线整定、纯滞后补偿和其它在第八章所介绍的那些类似的方法都是具有吸引力的。再者，经济上的论证必须从用模拟硬件难以实现或根本不可能实现的那些控制方案的执行情况来考察。

虽然，DDC系统的论证不容易，但在某些场合，这些系统是极有吸引力的。例如，具有大量程序和逻辑判断的间歇反应器的操作，用数字系统就很理想。同样在启动与关闭时需要逻辑决策的场合，采用数字系统比采用模拟系统容易实现得多。

帕森斯，奥格尔斯比(Oglesby)和史密斯^[12]发表了如下DDC使用情况：

过程：菲利浦石油公司在得克萨斯州斯维尼(Sweeny)