

控制论方法 在化学和化工中的应用

〔苏联〕B.B.卡法罗夫

化学工业出版社

控制论方法 在化学和化工中的应用

[苏] B.B.卡法罗夫 著
陈丙珍 译

化学工业出版社

本书以通俗易懂的形式介绍了控制论的基本概念、控制论方法在化工过程中的应用、建立数学模型（传热、传质、搅拌、反应器数学模型）的方法、微观动力学和宏观动力学等。并叙述了从实验室设备放大到工业规模设备的有关问题，书中还列举了大量的例题。

本书是一本教材性质的入门书，涉及化学工程、应用数学、计算技术、控制论、信息论等方面知识，着重介绍有关的基本概念，内容较为丰富广泛。

本书可供从事化工设计、科研的技术人员参考，也可供有关高等院校的师生阅读。

В. В. Кафаров

**МЕТОДЫ КИБЕРНЕТИКИ В ХИМИИ
И ХИМИЧЕСКОЙ ТЕХНОЛОГИИ**

издательство «Химия»

Москва 1971

控制论方法在化学和化工中的应用

陈丙珍 译

化学工业出版社 出版

（北京和平里七区十六号楼）

冶金工业出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行

开本850×1168 1/32 印张16 5/8 字数441千字 印数1—4,300

1983年1月北京第1版 1983年1月北京第1次印刷

统一书号 15063·3421 定价2.05元

译 序

当前，化工生产的鲜明特点是日趋复杂化、大型化、自动化，从而在化工过程的开发、设计、控制、管理等方面都提出了一系列新的要求，这些要求不仅仅着眼于个别设备或个别环节的改善，更重要的是要使化工过程作为一个系统按预定的各项目标在整体上达到最优化。这就需要应用系统工程的方法借助电子计算机通过数学模拟进行系统分析和系统综合。系统工程的一般原理和化学工程相结合开创了化工系统工程这门新的学科。由于系统工程最重要的理论基础乃是控制论，因此在苏联往往泛称为控制论。

本书实际上是一本化工系统工程的入门书，它是苏联著名学者卡法洛夫根据其讲授多年的教材编写而成的。书中对控制论、信息论的基本概念、最优化方法、数学模拟、系统分析和系统综合作了全面的介绍，着重论述了流体力学、传热、传质、化学反应等化工典型过程模型的建立，还给出了大量的实例。这些内容虽不足以反映该领域的最新进展，但比较切合我国化工科技人员的实际需要。

在翻译过程中对原书印刷上的一些明显错误随手作了改正，一般不一一注出；对于重要的错误，则加了译注。

本书译稿的各章节分别承张能力、沈静珠、李有润、李端敏、谢树煜等同志细心审阅并提出了不少宝贵的意见，在此谨表衷心的感谢。

限于译者的水平，译文中错误和欠妥之处在所难免，热切期待广大读者批评指正。

译 者

原 序

在本书第一版(“化学”出版社, 1968年)问世后不久, 控制论方法已成为分析和综合化工过程的基本方法。如今很难设想, 稍具规模的研究实验室或化工企业不在运用数学模拟和控制论的技术手段——计算机。

在化工企业的所有等级上——从单个设备、车间到联合企业——都要用控制论方法实现控制和最优设计。化工这门科学正运用数学模拟方法进行有科学依据的预测和最优化。

根据时代的要求, 在第二版中对本书的一些章节作了重大修改。重新撰写了关于数字计算机和化工系统自动控制以及典型化工过程的数学模型、化工系统的综合和分析等章节。增加了用实验统计方法建立数学模型和统计最优化一节, 补充了数学模拟的几个阶段, 最优化(增加了几何规划)和微观、宏观动力学的研究诸章。对于存在微观水平和宏观水平混合条件下的多级反应器进行了计算等等。

作者谨对莫斯科门捷列也夫化工学院“化工过程控制论”教研室的同事们表示衷心谢意, 感谢他们的宝贵意见和参与本书第二版的准备工作。书中“用实验统计方法建立数学模型”一节是由该教研室的 A. И. 阿赫扎罗娃副教授执笔撰写的, 特此致谢。

作者衷心欢迎广大读者提出建议和指正。

作 者

目 录

译序

原序

第一章 控制论的基本概念	1
1. 系统和过程	1
2. 模拟	5
物理模拟	6
数学模拟	7
3. 信息论的基本原理	13
4. 调节和控制理论的基本原理	21
5. 调节器的主要类型及其选用	26
6. 工业自动化控制-量测仪表的信息特性	29
7. 自动调节的类型和系统	35
8. 化工系统的自动控制	41
化工过程控制中的基本逻辑原理	42
化工系统自动控制的基本类型	60
企业运行管理的自动化系统	73
9. 计算机——控制论的技术手段	78
模拟计算机	78
数字计算机	86
参考文献	94
第二章 控制论方法在分析化工过程中的应用	96
1. 过程数学模型结构的确定	96
2. 设备中物流结构的典型数学模型	104
理想置换模型	104
理想混合模型	105
槽列模型	108
组合模型	112
3. 过程数学模拟的主要步骤	123
4. 应用数学模型进行过程的最优化	137
最优化的解析方法	139

数学规划法.....	142
梯度法.....	150
最大值原理.....	161
自动搜索最优值的方法.....	168
5. 用实验统计方法建立数学模型 统计最优化.....	171
基本概念和定义.....	171
回归分析和相关分析.....	174
实验设计法.....	189
参考文献.....	232
第三章 典型化工过程的数学模型	235
1. 传热过程.....	235
2. 传质过程.....	245
填料塔中的吸收.....	245
板式塔中的精馏.....	256
填料柱中的液-液萃取 	274
3. 在液体介质中用机械搅拌器混合.....	275
参考文献.....	285
第四章 化学反应器的数学模型	286
1. 化学动力学的基本概念.....	286
2. 等温反应器的数学模型.....	296
理想置换模型（管式反应器）.....	296
间歇式反应器.....	298
理想混合模型（带搅拌器的流通式反应器）.....	299
扩散模型（管式流通型混合反应器）.....	299
多级理想混合反应器的模型.....	301
3. 不考虑系统的宏观状态根据响应曲线计算反应器 反应器的 效率系数.....	307
4. 各种反应器的效率.....	312
5. 各种反应器的目标产品产率、选择性和转化率之间的关系.....	319
6. 置换-混合模型和混合-置换模型 短路效应.....	321
7. 根据响应曲线并考虑系统的宏观状态进行反应器的计算.....	329
8. 考虑传热的反应器的数学模型.....	343
非等温反应器模型的比较.....	351

反应器的组合模型.....	357
带旁路的理想置换反应器.....	361
9. 反应器的热稳定性.....	365
10. 确定非绝热变温反应器内的最优温度分布.....	380
11. 自热式反应器.....	382
参考文献.....	386
第五章 过程的微观动力学研究(在实验装置上获取有关化学过程的信息)	387
1. 积分法分析实验数据.....	392
2. 微分法分析实验数据.....	395
3. 微分-积分法确定反应级数(时间比法).....	399
4. 动力学评定法和复杂反应的选择性(双曲线法) 反应器模型的选择.....	404
5. 评定动力学的半对数变形法.....	409
6. 确定反应速度常数的温度关系.....	412
7. 研究化学反应动力学时的最优取样时间.....	412
8. 确定多相体系中过程的控制阶段.....	414
9. 测定多相催化反应的动力学.....	420
动力学方程的选择.....	421
最终验证求得的动力学方程.....	431
参考文献.....	434
第六章 过程宏观动力学的研究(在中间试验装置上获取过程的信息)	435
1. 一般性原理.....	435
2. 化学反应器的放大.....	443
3. 应用实验数据进行化学反应器工作条件的分析和最优设计.....	462
4. 反应器的控制.....	486
参考文献.....	496
第七章 化工系统的综合和分析	497
1. 化工系统综合任务的提法及其解决方法.....	499
2. 化工中的系统分析.....	515
参考文献.....	522

第一章 控制论的基本概念

控制论是一门研究以控制为目的接受、保存和处理信息的各种系统的科学。

因此，控制论包含了诸如系统、信息、信息的保存和处理以及系统的控制等这样一些概念。控制论广泛应用数学模拟的方法，通过数学模拟得到具体的结果，以便对所研究的系统进行分析和综合并预测系统的行为。

控制论方法可应用于任何系统，因此也能应用于化学和化工，借助于控制论的技术手段——电子计算机来实现。

下面我们仅限于讨论与化学、化工直接有关的工艺系统。

1. 系统和过程

系统 化工系统是指所进行的物理化学过程及其实现手段的总和。因此化工系统包括：化学过程本身；进行化学过程的设备；监测和控制过程的全部手段及其间的各种联系。所谓系统，都是由相互联系的部分组成，而且在一定意义上是一个闭合的整体，否则就不能称之为系统。

任何系统都有输入和输出（图 I-1）。输入可能是所要加工原料的流量，原料的组成，温度等等；而相应的输出可能是加工好的产品的流量，产品的质量，温度等等。系统通常都受到干扰，因此要用控制作用补偿这些干扰。

系统的例子很多，比如在对象（反应器）中进行的受控化学过程（图 I-2）就是一个系统。在这个系统中过程的进行情况由发送器 A 进行监测，从发送器出来的信号由专门的放大器 B 放大，输到信号变换器 C（例如将电信号变换成机械信号），变换了的信号作用于调节器 D，调节器把信号输给执行机构 E（原料

或载热体输入线上的阀门)，使原料量或载热体量按执行机构的动作增减。

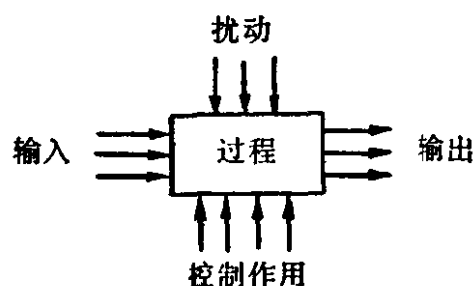


图 I-1 系统最简单的结构

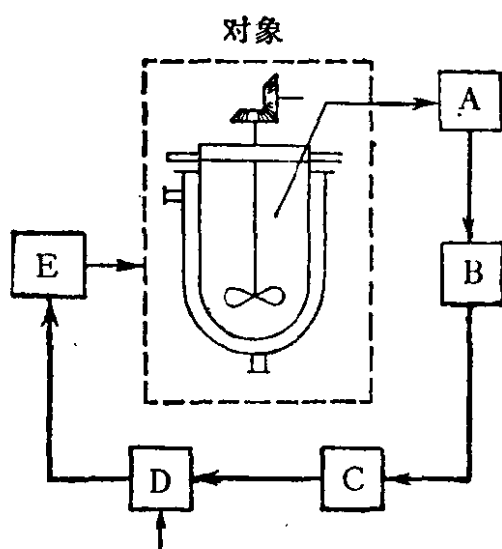


图 I-2 受控化学过程——系统的一个实例

所有系统可分为小系统和大系统。

小系统是由过程的性质单值地决定的，以一个典型过程、过程内部联系和设备结构的特点为条件。

大系统是小系统的组合，与小系统有着量和质上的区别。大系统具有：1) 一定的目的性——有共同的目的和用途；2) 很大的规模，众多的功能；3) 复杂的行为；4) 很多矛盾的、竞争的因素（系统中可能进行方向相反的、使其效率趋于减小的过程）〔4〕。化工车间或化工厂就是大系统的例子。

过程 必需指出，任何化工生产，任何工艺回路，都可以分解为一定数量的典型工艺环节，其中进行着典型的化工过程：吸收、精馏，化学反应等等。

在一定类型的设备中进行的典型工艺过程，同时也是典型的控制对象。过程属于哪种类型主要看它们的物理化学特性，亦即按其相同的物质和能量的内部联系而定。典型过程包含着所有必要的和充分的特征，我们根据这些特征并考虑过程的目的和用途，就可将典型过程从大量的、多种多样的物理化学现象中辨认出来。

按照物质、能量内部联系的性质，所有的化工过程一般可分

为下列几类：流体力学过程，传热过程，扩散过程，化学过程和机械过程。

上述各类过程又可按其目的、用途以及实现时的特点分为许多典型过程。例如，扩散过程可分为：吸收（解吸），精馏，萃取，吸附（解吸），溶解（结晶），干燥，离子交换等等。

按其性质，过程还可分为确定过程和随机过程。

在确定过程中，输入值是按完全确定的规律连续变化的。此时表征过程的输出值与输入值有单值的关系。确定过程可用经典的解析方法和数值方法描述。带搅拌器的混合均匀的流通式反应器就是确定过程的一个例子。

在随机过程中，输入值的变化是不规则的，且往往是不连续的。此时，输出值与输入值并无一定的对应关系。描述随机过程要用概率统计的方法。接触催化过程就是随机过程的例子，在接触催化过程中，产品的产率随催化剂的活性而变，而催化剂的活性与它的老化程度有关。

对于大的化工系统，事件间的联系很少用单值的确定性而更多的是用较为自由的、多值的、随机概率的图景来描述。与旧的物理科学（牛顿力学）相比，这是新的物理科学（量子力学等等）的共同特点。科学上的这一深刻变化，已有很多论述〔4〕。这是因为，我们从研究简单系统和单一现象发展到了研究复杂系统和错综的现象。这时重要的已不是个别事件的结果，而是大量事件的总的效果。

系统的等级 任何化工生产都是连贯的三种基本操作：原料准备，化学变化本身和目标产品的分离。这个操作顺序体现在统一的复杂的化工系统（XTC）中。现代化工企业（联合企业或工厂）作为一个大系统，是由许多相互联系的子系统构成的。子系统之间有着相互从属的关系，即分为三个基本等级（图 I-3）。较低等级的系统一起完成从属于下一个较高等级的子系统的所有功能。化工企业的每个子系统都是化工系统与自动控制系统（CAY）的组合，它们作为一个整体来生产某些产品或半成品。

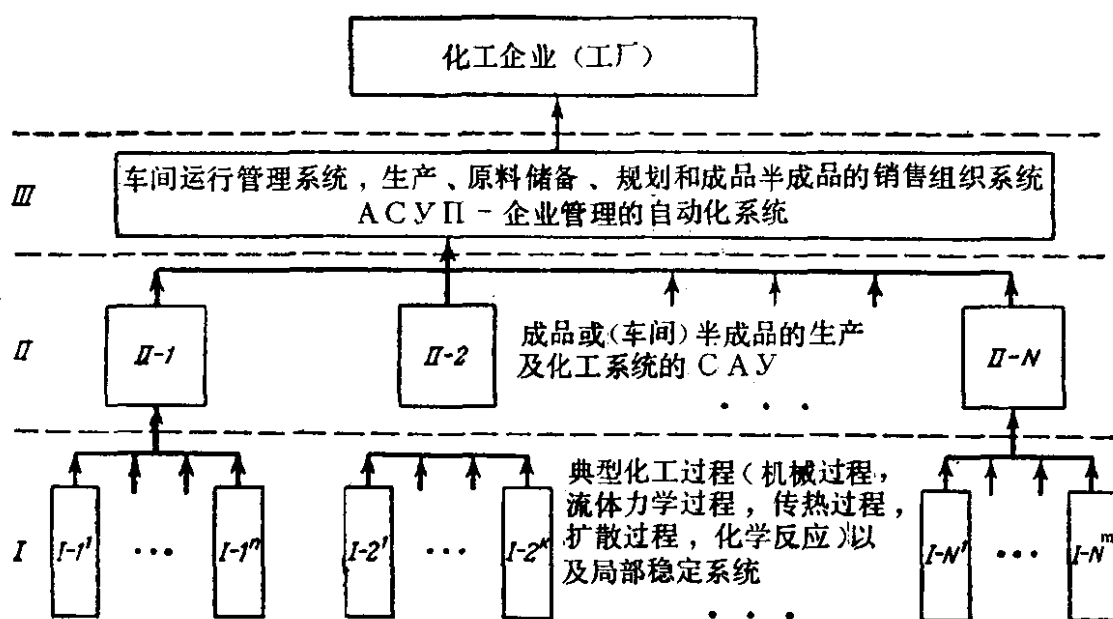


图 I-3 化工生产的等级

化工企业等级结构中的最低等级是由一定设备结构中的典型化工过程（机械过程，流体力学过程，传热过程，扩散过程和化学反应）以及控制这些过程的局部系统构成的。每个典型过程或相互有关的典型过程的组合，可以看作具有某种输入和输出的一个系统或子系统（见图 I-1）。

输入或输入变量，这是原料的定量特性（流量、组成、温度等等）。输出或输出变量，这是制成的产品及半成品的定量特性（流量、组成、温度等等）。

分析系统的功能时，输入变量可分为扰动变量和控制变量（作用）两种。扰动变量是外部和内部扰动的定量特性，这是任何系统都会碰到的（如原料的流量和组成的变化，设备中温度的变化等等）。干扰总是不利于我们所希望的过程的进程，使过程偏离给定的方向。为了使系统工作时输入变量符合给定的值而不致在扰动变量的影响下发生偏离，必需对系统施加控制变量。控制变量是系统控制作用的定量特性（改变原料的流量、组成以及其它特性）。

一定设备结构中的典型过程，最常见的是确定系统，它的输出变量和所有的输入变量是预先已知的，并且它们之间有单值的

函数关系。在化工企业最低等级上对表征子系统功能的信息进行结构方面的概括，控制子系统的任务主要是使典型过程的工艺参数局部稳定化。

生产车间和车间的自动控制系统是化工企业的第二等级。车间是相互有联系的各典型工艺过程和设备的组合。这些过程和设备的相互作用会引起干扰，这种干扰是随时间变化、按统计规律分布的，也就是说，在子系统的输入和输出变量之间有着随机的相互联系。分析第二等级子系统的功能时，需要运用概率统计的方法。一些比较新的数学分支，诸如马尔科夫链理论，图论，公用事业理论等已得到广泛应用。在这一等级上对信息进行统计方面的概括，在控制子系统时，对设备运行的最优协调和设备间负荷的最优分配进行最优化和规划。

化工企业等级结构的最高级，即第三等级（图 I-3）是车间组合运行管理系统，生产、原料储备、计划和成品销售的组织系统。在这一等级上对信息进行语意方面的概括，并进行态势分析和整个企业最优管理。解决这些问题需要运用系统方法的数学模型——博弈论、信息论、运筹学、公用事业理论等，需要经济学、运筹学、生产组织和管理等方面专家的合作。

2. 模 拟

现代化工过程是在多相体系中在高温和高压条件下以很高的速度进行的，其特点是极端的复杂性。

这种复杂性表现在：有大量的过程参数；参数之间有数目众多的内部联系，彼此相互影响；同时，一个参数的变化会引起其它参数的非线性变化。此外，参数之间存在许多反馈（见21页），过程有正有反，这就使过程更加复杂。化工过程还受到随时间按统计规律分布的扰动。

化工过程可提供的信息，其数量是极大的。为了使信息能通过极窄的接收通道，我们必须有所取舍，可通过模型来认识过程。所谓模型，是指简化了的系统，它们所反映的现象，只是所

考察的过程中的一部分现象。

信息流的分析分为两步：第一步是将模型与现象进行比较，如果差距不大，就可认为该模型是满意的；第二步是用模型来预测结果。这个过程叫模拟。

模拟有物理模拟和数学模拟两种形式。

物 理 模 拟

物理模拟是在不同规模上再现某个现象，分析其物理特性和线性尺寸的影响，可对所研究的物理过程（即实体过程）进行直接的实验。实验数据处理成无量纲数群关系式的形式，这些无量纲数群是由各种物理量和线性尺寸构成的，一般叫做相似准数，由微分方程或通过量纲理论得到。同一个准数关系式可适用于彼此相似的现象。所谓相似的现象，是指起决定作用的准数相等的现象。

物理模拟可使模型和研究对象中起决定作用的相似准数保持不变。实际上这意味着，把所研究的物理过程在几个阶段上再现，亦即有规律地改变起决定作用的线性尺寸，规模由小到大地实现该物理过程（相似论）。

因此，物理模型的失真可直接发生在进行着物理过程的研究对象上。这种方法要求再现过程的规模很大（直到工厂规模），并再现象化工那样的复杂系统。

对于比较简单的系统（例如，只有单相流的流体力学系统或传热系统），相似论和物理模拟是有效的，因为所用的准数个数有限。但是在复杂系统和用复杂方程组描述过程的情况下，就有一大套的相似准数，这些准数往往不能同时并存，因之模拟也就无法实现。在分析由经典力学所描述的过程和有固定边界的（一般是固体壁）单相体系的过程时，相似论是正确的，但在分析现象之间有着多值随机联系的不确定过程，特别是在分析有着自由表面的两相体系和因存在化学反应而复杂化了的过程时^[7]，应用物理模拟是有困难的。

数 学 模 拟

数学模拟是用所谓的数学模型定量地和定性地描述过程的方法。

建立数学模型是把实际现象简化、公式化，根据现象的复杂性把得到的概括形式用某种数学工具加以描述。

研究成果的大小以及得出结论的价值取决于模型的选择，取决于模型在多大程度上能正确反映所考察的过程的特征。

模型中应考虑最重要的影响过程的因素，但不应被许多细小的次要因素弄得过于复杂。考虑这些次要因素，只能使数学解析复杂化，使研究变得十分繁琐。

模型结构的数学描述，根据过程的不同可用反映各种参数相互影响的差分方程组或微分方程组表示，而且一种类型的方程（如差分方程）并不排除还可能存在另一类型的方程（如微分方程）。

如能找出起决定作用的参数和待定参数之间的显函数形式的关系式，那么对于任何一组参数值都可根据数学方程利用算法求出待定参数。

模型必须如实描述被模拟过程的定性和定量的关系，即模型应适用于所模拟的过程。为了检验数学模型对于实际过程的适用性，应该在过程的进程中将测量结果和在相同条件下（在一定的参数值条件下）模型预测的结果进行比较。

这样，反映着相应的物理化学过程的模型可用一定的数学式表示，把实验事实统一起来，并确定所研究的过程各个参数之间的相互联系。这时要运用理论方法和必要的实验数据。建立数学模型的最终目的是预测过程进行的结果和提出如何消除对过程可能发生的影响。如果对所研究的现象缺乏充分的数据，可从建立最简单的、但并不破坏过程基本特性(定性的)的模型开始研究。

从上面的介绍中可以看出，数学模拟包含三个阶段：1) 对所研究的过程进行抽象——写出它的模型的数学描述；2) 建立

能模拟被研究过程的算法；3）确定模型对所研究对象的适用性。

进行数学模拟时，过程模型的失真不象物理模拟时那样要在物理模型上进行研究，而可用电子计算机直接用数学模型进行研究。

数学模拟方法结合现代化的计算手段可在物质耗费不大的情况下，研究设备和结构的各种方案，研究过程的基本特点以及挖掘革新的潜力。在所用的模型范围内，总能找到最优解。

应该指出，数学模拟和物理模拟是毫不矛盾的，而是数学描述和数值计算的手段充实了物理模拟。实质上，物理模拟方法的基础就是过程的数学描述和物理模型的同一性。但是物理模拟方法并不考虑数学描述的具体性质，而只限于在一般数学方程中某些起决定作用的准数进行比较的基础上判断各个对象的同一性。

物理模拟方法在目前赋有了新的性质：用它可找出数学模型方程中各个参数的失真界限，可对数学描述的过程进行放大并确定模型对所研究的对象的适用性。

数学模拟方法可用来研究数学描述的过程的性质。从数学描述的完整程度来说有两种极端情况：a）描述过程的所有基本方面的方程组及这些方程中所有的系数值均为已知；b）没有完整的数学描述。后一种情况对于解决某些控制论问题来说是很典型的，例如，对于所研究的对象以及对它作用的干扰缺乏充分的信息的条件下进行过程的控制。这时，在解决模拟问题的同时还要完成建立模型的任务。这种情况与模拟用数学式描述的过程有很大的区别。

进行数学模拟时，过程是在计算机上研究的，改变数学模型中有关的各个参数值就能很快得到不同方案的资料。重要的是，在比较短的时间内可以再现模型的最优方案，换句话说就是实现数学模型的最优化，从而也就是过程本身的最优化。不论从费用来说还是在时间上，数学模拟都比物理模拟节省。

进行数学模拟时，各种物理性质不同的现象也可应用数学模

型的同构性原理。下面是描述这些现象的微分方程：

能量传递（摩擦力）

$$\tau = -\mu \frac{dw}{dx} \quad (\text{牛顿定律})$$

热量传递（热流）

$$q = -\lambda \frac{dt}{dx} \quad (\text{傅里叶定律})$$

质量传递（物流）

$$q_B = -D \frac{dc}{dx} \quad (\text{菲克定律})$$

电荷迁移

$$i = -\frac{1}{\rho} \frac{dV}{dx} \quad (\text{欧姆定律})$$

不难看出，上述所有方程中都包含梯度：速度梯度 dw/dx ，温度梯度 dt/dx ，浓度梯度 dc/dx 以及电位梯度 dV/dx 。显然，如果引入相应的换算系数，上述几种现象都可用电荷迁移来模拟。

借助这个模拟原理解决一个具体问题后就可获得一系列用类似数学描述表示的有关对象性质的信息。这样，从一些对象上得到的结果可用来研究另外一些对象，甚至是属于不同学科领域的对象。上述情况是数学模拟最重要的成果之一。模拟各种物理化学过程的模拟计算机就是建立在模拟原理之上的。

数学模型的主要类型 数学模型的类型由选定的设备中实现过程的具体条件所决定。

如果过程的主要变量随时间和空间而变，或只随空间而变但空间的维数大于 1，则描述这些过程的模型叫做分布参数模型，用偏微分方程表示。

假若过程的主要变量只随时间而变，则描述这类过程的模型叫集中参数模型，以常微分方程的形式表示。