

802358

526
7233

环境系统工程概论

刘永淞 编



湘潭大学

5
33

说 明

环境系统工程是环境工程专业的选修课程，本书是供我校环境工程专业学生学习用的讲义。学时为40~50小时。

随着电子计算机技术的普及，开展环境的规划及环境污染的综合防治，取得更大的环境效益与经济效应，采用系统工程的方法分析和解决环境保护问题的条件更加充分。环境系统工程知识急待普及和发展。

目前，环境系统工程的研究可以说仍是处于初始阶段，我们做的工作就更少了。只是为了学生学习的需要，我们编写了这本讲义。从水平上和实用上肯定有许多问题，乃至有错误之处，敬请读者指正。

在编写过程中，编者认为有必要尽量保持系统工程学的基本体系，使学生能在这方面有一个基础，所以，讲义中专门在第三章介绍最优化技术。这方面一般学生接触得不多，比较全面学习一下是有必要的。

对于环境工程专业的学生，不同程度上接触过一些数学模型问题。由于环境污染中数学模型种类很多，不同的先修课程学习的深度和广度也不相同，所以，有关数学模型问题，我们仅作简单的介绍。在教学过程中可以根据具体情况作适当增删。

环境系统工程学内容十分庞杂，在一个比较短的时间和有限的篇幅内给以全面的叙述是有困难的。所以，有关应用问题，我们只在第四章中抽出几个问题作介绍，可以说是“括一而漏万”。其目的是从最优化的角度，分析几个典型问题作为引子。

目前有关环境系统工程学方面的教材不多，我们参考了一些书籍和文献，给我们这个讲义的编写帮助很大。特别值得提出的是，清华大学环境系统工程研究室编写的《水污染控制系统规划》（1982年），从水污染的角度谈系统工程问题，我们学习后认为是很好的。所以，本讲义从中引述了一些计算例，也借助了他们中的一些方法。为此，我们向他们表示感谢。

编者 1984.12.10

525
7233

号

525
7233

《环境系统工程概论》目录

前言	(1)
第一章 费用与收益分析	(6)
§ 1 几个基本概念	(6)
§ 2 费用函数	(12)
§ 3 费用—收益分析	(17)
第二章 环境数学模型与模型模拟	(21)
§ 1 模型的分类	(21)
§ 2 数学模型建立的原则	(22)
§ 3 废水处理过程数学模型简介	(25)
§ 4 河流水质模型及参数估值	(32)
§ 5 湖泊和海域模型简介	(67)
§ 6 大气污染物扩散模型及参数估值	(69)
§ 7 地下水水质模型	(86)
§ 8 模型模拟	(89)
§ 9 模型的灵敏度分析	(103)
第三章 最优法方法	(107)
§ 1 基本概念	(107)
§ 2 解析最优化方法	(119)
§ 3 线性规划概述	(121)
§ 4 非线性规划概述	(135)
§ 5 动态规划法简介	(165)
第四章 环境污染控制中几个最优化问题	(170)
§ 1 管道系统最优化设计计算	(170)
§ 2 活性污泥法系统的最优化设计	(173)
§ 3 水污染控制规划	(179)
§ 4 大气污染控制问题	(187)

绪 言

辩证唯物主义认为，物质世界是由无数相互联系、相互依赖、相互制约和相互作用的事物和过程形成的统一整体。我们处理问题不单要从一个事物或过程出发，更重要的是要从全局和整体出发。

环境问题是一个极为复杂的问题，它综合性强、牵涉面广。解决环境问题从根本上说，应从环境本身的特性、环境容量、环境变迁、生态平衡、环境污染因素以及经济发展方面，从工业、农业，从生物学、化学、物理学、地学、天文学、工程学、社会学、经济学等各个角度出发。环境污染问题已有一段比较长的历史，人类在控制环境污染方面也从事了不少工作。但是，实践证明，六十年代末期以前，国际上普遍采用的“排放口处理”三废的技术，在控制污染方面虽然取得了一定成绩，但由于它是孤立的，“就事论事”的方法，所以耗资巨大，收益却不大。有时，为了达到高深度处理，消耗过多的资源和能源，从而又形成新的更大的污染。因此，从环境的整体出发，建立系统的观念，综合分析和解决环境问题，成为环境污染控制的必由之路。正因为这样，以定量化形式处理复杂系统问题的系统工程学，自六十年代中后期开始，逐渐被应用到环境科学的范畴中来。七十年代以来所提出的“环境污染综合防治”就是一个典型的系统思想的产物。

一、系统与系统工程

在系统工程中所说的“系统”，是指由许多相互联系、相互依赖、相互制约和相互作用的事物和过程的综合体，它具有特定的功能。在系统内部，各事物和过程通过特定的方式进行信息、物质和能量输入、贮存、利用、输出及交换。各事物和过程的关系是协同的和有规律的。“系统”以外的部分，对“系统”说称之为“环境”。

“系统”也是一个相对的概念，一个大系统中可以包括若干个系统(称之为“子系统”)，这个系统(子系统)也可以包括若干个“子系统”。例如对于一个水系流域系统中，可包括有许多个污水处理厂子系统，而一个污水处理厂子系统内也包括许多子系统，如废水处理系统和污泥处理系统，而废水处理系统又包括许多过程，活性污泥曝气池和二次沉淀池也组成一个子系统等等。可见，“系统”的概念是多层次的、多子系统和多因素的。各层次、各子系统以及各因素之间都是相互有机联系，使整个系统具有一特定的整体功能，它们之间的联系是协同的、有序的，它们的规律是能被人们所认识、能被人们控制和改造的。环境污染控制系统就是各种环境污染控制过程，按一定的方式组合，处于一定的外界环境约束之中，为达到总的环境控制目的而存在的有机整体。

“系统”具有几个明显的特性，即

- 集合性——系统是由两个以上相互区别的单元有机结合起来，完成某一功能的综合体；
- 相关性——组成系统的单元之间是有机联系和相互作用的；
- 目的性——系统是为达到某一个或某一些目的而建立的；

环境适应性——与环境发生物质、能量和信息的交换；

整体性——组成单元之间服从于整体要求，以整体的观念协调各个单元。

系统工程就是用现代数学方法对系统作分析、规划、设计、建造、组织管理和评价的技术科学，是用系统论的观点，控制论的基础，信息论的理论，现代数学的最优化方法，把电子计算机技术和工程技术相互渗透的一门学科。不同的工程技术问题有不同的系统工程，如生产企业或企业体系方面的系统工程，称为经济系统工程；信息编码、传递、存贮、检索、读出、显示系统的系统工程称为信息系统工程；环境保护的系统工程称为环境系统工程；化工生产设计与控制的系统工程称为化工系统工程；此外还有军事系统工程、社会系统工程、行政系统工程、农业系统工程等等。

系统工程学的共同理论基础是运筹学及计算科学，其核心是系统的最优化。由于不同系统有其固有的特性，不同的系统工程需要对不同的系统的特有性质加以研究。环境系统工程就要研究环境科学，环境科学就成为环境系统工程的专业基础。

系统工程的基本方法是模式化和最优化，通过确定系统因素和目标的关系，分析各种可能的方案的效用与收益，分析其可靠程度，从中获得决策所需要的资料，以便能作出最优的决策。

二、环境系统及环境系统工程

环境系统是由发生系统和消亡系统组成的，它们又包含有若干子系统。从环境污染与控制方面，环境系统可表示于图0—1。

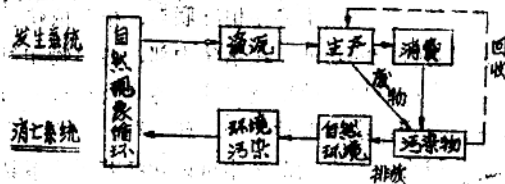


图0—1 环境系统（污染与控制）

环境系统工程是研究环境系统的规划、设计、管理方法和手段的技术科学。它以环境质量的变化规律、污染物对人体和生态的影响、环境工程的技术原理以及环境经济学等为依据，运用系统论、控制论和信息论，采用现代管理的数学方法和电子计算技术，对环境问题和污染防治工程进行系统分析，求得总体环境最优化。它的研究内容主要是环境系统的模式化和环境系统的最优化，目的是力求决策的科学化。

所谓环境系统模式化就是通过数学模式定量地描述环境系统的功能。所谓环境系统最优化，就是环境数学模式的最优化分析，就是在一定的约束条件下，当评价函数（或目标函数）达到最优时，一系列可调因素可获得最优解。通过分析各个可选方案，选择最优的污染控制方案，最经济最有效地改进污染控制系统的功能。

从环境要素及污染控制的涉及面，一般环境系统工程包括：河流（或水体）污染与控制

的模拟；河流（或水体）水质规划；区域水体规划的优化；污水系统规划的优化；污水处理厂的最优设计和控制；大气污染的控制模拟；固体废物物的输送与处置系统的优化；城市环境规划的优化；城市生态系统分析；城市环境、交通、能源的综合系统分析；环境信息及信息管理系统开发等内容。环境系统工程可用于整个环境系统，也可用于环境中的某一要素，也可用于某一治理项目。例如，根据大气质量要求，限制废气排放浓度；为了改善河流水质状况，压缩上游污水排放量及污染物排放浓度；在水资源规划中，合理布局污水排放口及布局污水处理厂的位置；在污水处理厂内合理分配各级的处理效率等。这些问题决不是单项治理工程所能解决的。

三、系统分析方法综述

系统工程所研究的是一个复杂的系统，系统内存在许多矛盾和不确定的因素，为了获得正确的和最优的决策，十分重要的一步是对问题进行系统分析。

所谓系统分析就是用科学的分析工具和方法对系统的目的、功能、费用、收益等作广泛和充分的研究，收集、分析和处理有关数据，并在此基础上建立若干个可替代的方案和相应的模型，并对模型作实际系统的模拟，计算分析各种结果，对模型和方案进行比较与评价，最后整理出完整的、正确的和可行的综合资料，提供决策者作最优方案选择的依据。由于分析着眼于系统，因此，分析内容不完全限于技术经济方面，还有政策、体制、信息等方面。

实行系统分析涉及一系列要素，这就是目标、可替代方案、费用与收益、模型、评价基准等。

目标——为了获得最优决策的信息，进行系统分析时，首要的任务是了解系统的目的和要求。例如一个环境规划问题，必须先了解任务、要求、规划环境的现状，环境功能和改善环境的目标。

可替代方案——在概略设计阶段，制订出能达到同一目的的不同方案，在不同方案中有优劣时，应对各方案进行比较。

在评价方案时，如果只有一个因素，即所谓单因素问题时，情况比较简单，如果是多因素，在评价其优劣时就比较复杂，事实上大多数情况下都是多因素的。例如一个系统在工作稳定性、操作难易程度、产品性能、运转费用等都是根据不同的方案而不同的，所以因素总是多方面的。在多因素情况下，可将因素划分为主要的和次要的，以主要因素作评价优劣的依据。主要因素达不到标准的就不是最优方案，应予以抛弃。

有时在分析多因素时采用“功效系数”方法，假定有几个因素，每个因素有一定的“功效系数”，第 i 个因素的功效系数为 d_i ($0 \leq d_i \leq 1$)，则总功效系数是各个因素的功效系数的几何积，

$$d = \sqrt[n]{d_1 \cdot d_2 \cdots d_n}$$

可以通过比较不同系统的 d 。如 $d_i = 1$ 则表示第 i 个因素的效果好，如 $d_i = 0$ 则效果差。或者分得更细， $d_i = 0.3$ 为不可接受， $0.3 \leq d_i \leq 0.4$ 是边缘状态， $0.4 < d_i \leq 0.7$ 为可接受但效果稍差， $0.7 < d_i \leq 1.0$ 为效果好。显然，如果每一个 d_i 均为 1，则总的功效系数也必为 1。

$$d = \sqrt[1]{1 \cdot 1 \cdot 1 \cdots 1} = 1$$

其总效果是好的。这里每一个 d_i 可以通过与因素值的具体关系由经验式或图表法来表示，在分析时，根据抽样求出 d_i 值。

如果是相互矛盾的双因素，即一个因素沿一个方向变好，另一个因素随另一个方向变好，要求同时两因素都好是不可能的，此时，可放弃次要因素取主要因素，或采用折衷方案。例如，一条管道的计算，通过一定的设计流量时，管径越大，管道材料费用越大、安装费用也越大，但能耗费用也越小（图0-2），此时，可采用总费用为最小的折衷方案。

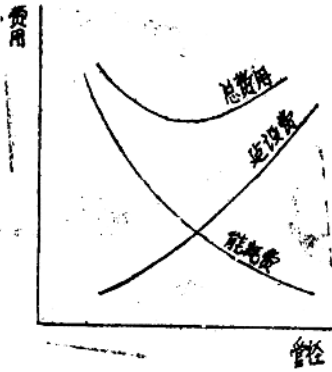


图0-2 折衷方案

替代方案的制定应该建立在广泛收集资料的基础上，可以通过有关人员，尤其是专家们的深入研究，能否作为替代方案，还应作分析，因为一些方案可以从工作经验和实际情况出发很容易判断其不可能性及非优，从而予以抛弃。

模型——建立替代方案后，即可建立相应的模型，以便对特定的因素作定量分析计算。所谓模型就是将系统的目标、约束、输入、输出等各种关系，通过数学方法表示出来，形成目标函数及约束条件，以便作数学计算与分析。模型可以是针对系统的全部，也可以是系统中的某一部分。

最优化及系统评价——用最优化方法对各种拟定的模型求最优解，最终定出最优方案，提供决策者使用的信息。如满意即可执行，如不满意，可对上述步骤作某些调整。

所有系统分析步骤，首先都要从认识目的入手，这是十分重要的。对功能及目的，应从总体及长远观点，做到技术先进，经济可行，要求对确定的因素和不确定因素等进行分析，尽可能考虑周全，同时要明确实现目的所需完成的事项及其他方面的约束条件（如投资、技术、期限等）都应提出相应的要求和措施。

例如，在上水道的综合管理系统的分析中，应考虑到，要经常保持水的正常稳定供应，必须做到（1）确保必要的水源；（2）向用户提供必要的水量、水质和水压；（3）整个上水道设施的安全控制与经济运行。从目的分析（图0-3）中可见，作为一个上水道综合管理系统是由最优设备计划、最优运行计划、漏水检查、安全控制、配水控制、维修计划、水质处理计划等所组成。为了保证供水，最优运行计划、安全控制和配水控制是尤其重要的。如果再进一步分析最优运行和控制所必要的功能和相应的技术，可表示于图0-4。从水源到配水管网都应加以全面考虑。

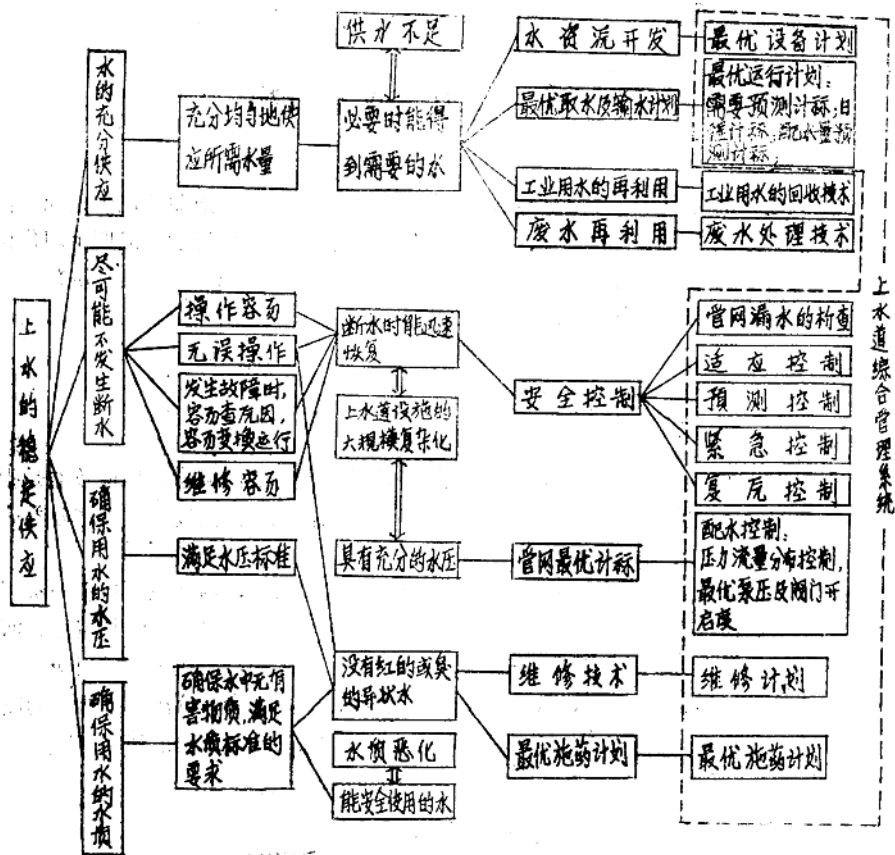


图0-3 上水道综合管理系统的目的分析

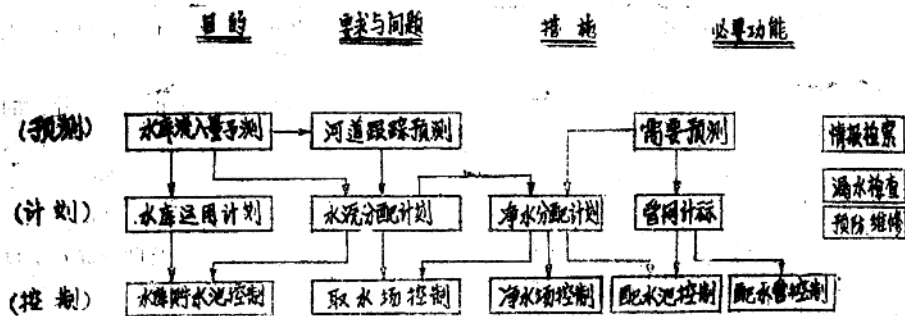


图0-4 上水道最优运行控制功能与技术

第一章 费用与收益分析

在社会主义建设的各个环节都要贯穿着经济效益，只要提高经济效益才能满足社会再生产的需要，才能有效地利用国家的资金、资源和人力，才能以更大的速度完成四个现代化的建设，我们规划一项工程和措施，都希望以最小投资、最短的时间取得最大的经济效果。

所谓经济效益(收益)是指“所得”与“所费”之比，或“产出”与“输入”之比，用数学表示为

$$\text{收益} = \frac{\text{价值}}{\text{成本}}$$

在环境保护工作中，我们经常用的环境效益和经济效益两方面的概念。环境效益是指在保护和改善环境中所得到的效果，评价环境效益是多方面的，包括污染物质、经济收益、社会效益等。

环境保护的经济收益也是多方面的，例如由于环境质量的改善，与环境质量有关费用开支的减少(赔偿费、治疗费、隔音费、个人防护费、下游给水污水处理厂处理附加费用、河道整治费、自然环境保护费等)。环境的经济效果计算是十分复杂的，一些国家采用费用—收益分析的方法评价环境工程的经济效果，即在环境工程项目中，净化单位污染物所得的收益和所需费用之比，若比值为最大，即可作为实施环境工程设施的经济效果最佳的方案。

§ 1 几个基本概念

一、基本建设投资及其类型

一项工程建设需要资金，资金的来源是多方面的，根据资金供应及偿还方式可分有无偿投资和直接偿还投资等。

无偿投资是一种不直接偿还的投资方式，主要是国家根据预算拨款对非生产性建设的投资，如兴建学校、文化、卫生事业、国防建设费用开支等，它是不可能直接从建设项目本身偿还给国家的。

直接偿还投资是通过银行贷款形式对生产性项目的投资方式，投资可以通过项目本身给予偿还。在直接偿还投资中，根据偿还方式可分为无息投资及有息投资。无息投资(无息贷款)只需要偿还本金的资金，不计算利息，偿还方式可通过利润、税收、固定资产使用费、设备基本折旧基金等形式。有息投资(有息贷款)的偿还，除了需偿还投资资金外，当需附加利息。利息也有单利和复利之分。所谓单利是只计算投资成本利息，利息本身再不生利息。复利是除投资成本计利外，利息也生利息，即所谓“利滚利”。

目前国内投资一般按年计算利息，通常年利率为3%，需按时偿还，如不能偿还则加倍

收利。对一些部门（如煤矿、建材等），利息方面采取优惠政策，年利率低于3%。利润较高的行业，年利率高于3%，偿还方式采用折旧基金方法，年折旧率一般为6%。

二、利息及本利和的计算

由于投资贷款存在利息，在比较和决定方案时，应考虑利息的计算问题，同时，工程的经济分析，由于存在利息，就显得较为复杂。

计息时一般采用利率的概念，所谓利率就是在计算利息周期内，所增加的利息金额与原投资金额的比（%），如计算利息周期为一年，即称为年利率。

根据支付利息的形式不同，利息计算方法也不同。单利利息及本利和：

单利利息 = 本金 × 利率 × 计算利息周期数

单利利息计算的本利和

$$= \text{本金} \times (1 + \text{利率} \times \text{计算利息周期数})$$

例：投资本金100万元，年利率为3%，贷款年限为5年，予期偿还的利息和本利和为

$$5\text{年总利息} = (100 \times 3\%) \times 5 = 15\text{万元}$$

$$5\text{年本利和} = 100(1 + 3\% \times 5) = 115\text{万元}$$

复利的利息及本利和计算：

$$\text{复利利息} = \text{本金} (1 + \text{利率})^{\text{计算利息周期数}} - \text{本金}$$

$$\text{复利本利和} = \text{本金} (1 + \text{利率})^{\text{计算利息周期数}}$$

例：如上题，按复利计息则

$$5\text{年总利息} = 100 \times (1 + 3\%)^5 - 100 = 15.927\text{万元}$$

$$5\text{年本利和} = 100 \times (1 + 3\%)^5 = 115.927\text{万元}$$

三、不同时间货币的价值

由于存在利息，同一资金在不同时间，其价值不同，正如上面计算例所示，现时100万元，五年后应相当于115万元（按单利计），或者说，同时是贷款100万元，贷款一年和五年，其消耗的价值是不同的。

为了进行方案的经济分析，在经济费用上有可比性，引入下面一些概念。

时值：货币在某一时间的价值，它是一个瞬时价值。如现在投资100万元，年利率为3%，一年后的时值为103万元，或者说一年后103万元的时值相当于现在100万元的时值。不同时间货币的时值不同，随着时间的延长，货币的时值是增值的。

终值：货币经一定时间的增值后所形成的新值或称未来值，也就是指定时间的本利和。如上面例，100万元在五年后的终值为115.927万元。

按单利计算时的终值

$$F = P(1 + i \cdot n)$$

按复利计算时的终值

$$F = P(1 + i)^n \quad (1-2)$$

其中, F = 终值,

P = 现值,

i = 利率,

n = 计算利息周期数

折现: 一定时间期限所需支付的货币折算为现时的价值, 也称为现值。

按单利计的折现

$$P = F \left(\frac{1}{1 + n \cdot i} \right) \quad (1-3)$$

按复利计的折现

$$P = F \left(\frac{1}{1 + i} \right)^n \quad (1-4)$$

采用折现的办法可对不同工程方案取得同一比较标准, 每个方案所需支付费用全部折现为现值, 以进行互相比。

例, 某工程分三年施工, 每年投资为100万元, 利率为3%, 每年投资费折现为现值分别为 (按复利计)

$$\text{第一年 } P_1 = 100 \left(\frac{1}{1 + 0.03} \right) = 97.09 \text{ 万元}$$

$$\text{第二年 } P_2 = 100 \left(\frac{1}{1 + 0.03} \right)^2 = 94.26 \text{ 万元}$$

$$\text{第三年 } P_3 = 100 \left(\frac{1}{1 + 0.03} \right)^3 = 91.51 \text{ 万元}$$

总折现为282.86万元

另一项工程分两年建设, 每年投资150万元, 各年折现为

$$\text{第一年 } P_1 = 150 \left(\frac{1}{1 + 0.03} \right) = 145.63 \text{ 万元}$$

$$\text{第二年 } P_2 = 150 \left(\frac{1}{1 + 0.03} \right)^2 = 141.39 \text{ 万元}$$

总折现为287.02万元

四. 存入和支出计算

由于资金的存入和支出的形式有多种, 实际计算资金的方法也就不同。上面所讲的是按利息一次支付的方式, 即一次存入, 一次支付的方法, 可以通过一次支付求出一投入资金或一次投入后计算一定时间后一次支付的资金。例如, 为五年后一次取得1000元, 现需一次存入现值 (按年利率3%, 复利计算)

$$P = 1000 \left(\frac{1}{1 \times 0.03} \right)^5 = 783.53 \text{元}$$

又如，一次存入现值100元，5年后可取得终值

$$F = 100 \times (1 + 0.03)^5 = 115.93 \text{元}$$

实际情况会比这些计算复杂，因为存入和支付除了一次型式外，还有均匀型式的，如建设项目的分期投资或企业向国家的分期偿还等，因此还需要引入其他计算方式。

1. 偿还基金因子——即为获得最后终值F，所需均匀存入的资金数(A)

$$A = \left[\frac{i}{(1+i)^n - 1} \right] \cdot F \quad (1-5)$$

此时现金流图可表示如下。



例如：在五年后需偿还时值10万元，如年利率为10%，则每年应均匀存入资金

$$A = \left[\frac{0.1}{(1+0.1)^5 - 1} \right] \times 10 = 1.638 \text{万元}$$

2. 复本利和因子——它与偿还基金因子相反，表示在均匀存入A时所得最后终值F。

$$F = \left[\frac{(1+i)^n - 1}{i} \right] A \quad (1-6)$$

如：每年均匀存入A = 300元，利率5%，五年后可一次支付终值本利和

$$F = \left[\frac{(1+0.05)^5 - 1}{0.05} \right] \times 300 = 1657.69 \text{元}$$

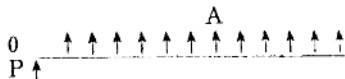
3. 资金回收因子——以均匀支付的方式偿还现值P，每年支付金额A。

$$A = \left[\frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1} \right] P \quad (1-7)$$

例如，银行对某项工程投资100万元，利率为3%，需10年内均匀回收资金作偿还，每年回收资金额为

$$A = \left[\frac{0.03 \times (1+0.03)^{10}}{(1+0.03)^{10} - 1} \right] \times 100 = 11.72 \text{万元}$$

现金流图形式如下：



4. 现值因子——与资金回收相反，每年需支付A，需一次投入现值P

$$P = \left\{ \frac{(1+i)^n - 1}{i(1+i)^n} \right\} A \quad (1-8)$$

例如，20年内，每年需支付资金600元，如利率为5%，需一次投入现值

$$P = \left\{ \frac{(1+0.05)^{20} - 1}{0.05(1+0.05)^{20}} \right\} \times 600 = 7477.33 \text{元}$$

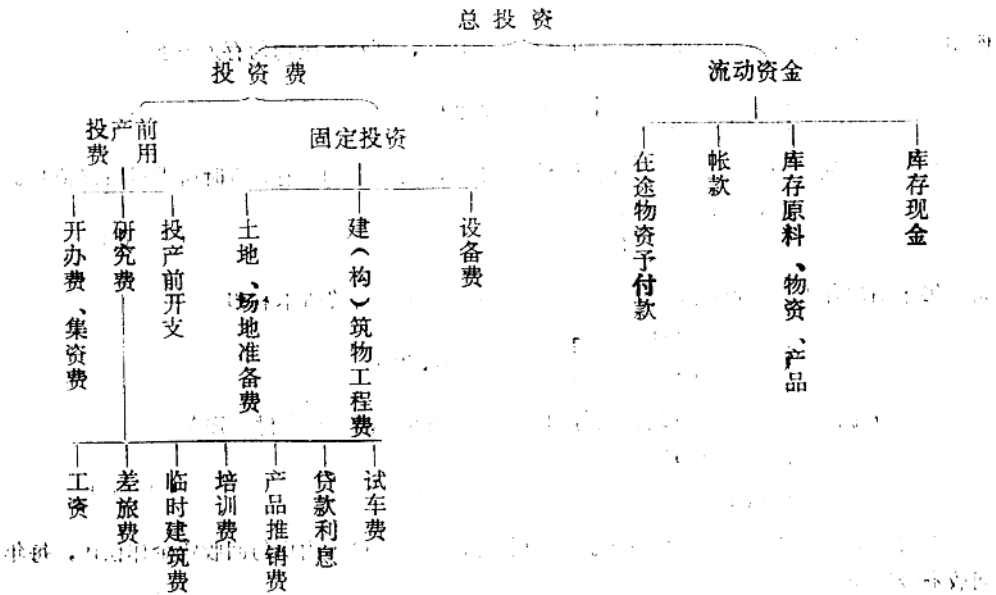
上述四种因子中，前两种是均匀存入，以终值形式一次支付的，后两种是均匀存入，以现值形式支付的，根据所需计算资金存入、支付形式，可选择不同的计算因子。

五、工程费用

一项工程其费用是多方面的，包括基本建设投资、维修、更新、运转管理等运行费用。

1. 投资

基本建设投资资金包括投资费及流动资金，投资费又包括主体设备及同步建设项目的建设费用，流动资金是运行前所需的周转费用，这两部分费用是保证工程项目获得正常运行前全部投入的资金。总投资的组成如下



投资费用绝大部分是工程费用，可以通过概算求得，或参考同类型工程项目费用决定。从一项工程规模的费用估算另一规模工程的投资资金，可近似采用下式

$$\frac{Y_2}{Y_1} = \left(\frac{X_2}{X_1} \right)^{0.6} \quad (1-9)$$

其中 Y_1 、 Y_2 分别为第一、二种规模的设备投资费。

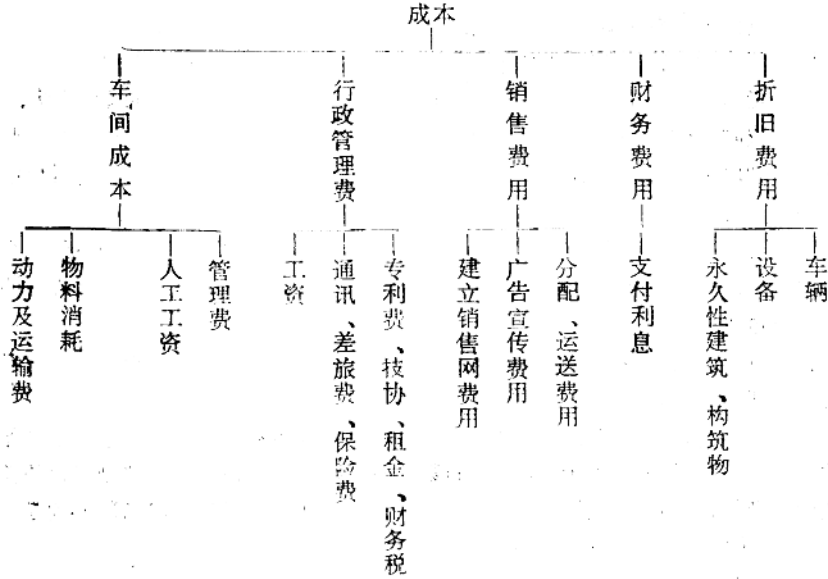
X_1 、 X_2 分别为第一、二种规模的大小。

2. 流动资金

流动资金是工程建设的另一项重要物质条件，没有流动资金，工程项目不可能投入正常运行，但占用过多的流动资金，也影响工程项目的经济效果。

六、生产成本

生产成本是工程项目投资后单位产品的工资、原料（原材料、燃料、水、电、蒸汽等）、费用（折旧费、修理费、车间经营费、企业管理费等）的消耗，可参考同类型项目并结合本项目的特点予以估算。成本的组成如下：



其中折旧费是固定资产按折旧率扣除的费用，一般按4.5%，对新企业一般为6%。

七、利 润

利润是项目从产品销售收入中扣除税金、成本之后余下的那部分积累，它表示项目经营管理的好坏。

利润指标通常有两个，一个是产品的销售利润。

$$\text{产品销售利润} = \text{产品销售收入} - \text{产品销售成本} - \text{产品销售税金}$$

由于国家在一定时期内税率是不变的，所以销售利润的大小，主要取决于产品销售收入的多多少以及产品成本的高低。

另一个指标是利润总额，

$$\text{利润总额} = \text{产品销售利润} + \text{其它销售利润} + \text{营业外收支净额}$$

这里，其他销售利润指销售废料、转售原材料或外购商品的利润以及各种运输装卸的劳务收入中所得利润，营业外收支净额指在营业范围之外收入与支出的差额，其中收入包括出租包装物、设备，劳务支援等的收入减去应支付部分的差，支出部分如企业搬迁费、劳动保险费、编外人员工资等费用和因各种原因而停工所造成的生产损失、新产品试制失败的损失等。

利润总额反映项目财务成果。

§ 2 费用函数

费用函数是反映项目花费的费用与工程参数的关系的一种数学表达式，在经济分析中常把费用函数作为目标函数，把目标函数最优（费用函数为最小）的方案作为最优方案。

在环境工程范围内，费用有不同的类别，可包括内部费用和外部费用。

内部费用指环境污染物控制项目本身的费用，包括上述的投资及运行费用；

外部费用是指项目以外由于环境污染形成的费用支付，如：污染致病的治疗费、赔偿费、劳动力损失或减弱的额外开支（劳动力补充的工资、丧葬、抚恤等）；民用及工业用水额外处理费、水利用可能性减低形成的损失，由于大气污染形成建筑、设备、材料使用寿命缩短所形成的损失等等。

上述费用都可以通过货币形式表示。此外还有一些由于生态破坏，野生动植物减少，资源耗竭、游览地的破坏及文物的破坏等，并不能完全可以用货币形式表示的，这方面的分析主要取决于决策过程。

费用的计算方法，根据费用形式的不同而不同，内部费用可通过方案设计图及方案的运行要求求得。外部费用一般应通过实际调查统计求得。

在环境工程学本身，过去多采用图表法表示费用和工程参数的关系，近十年来开始研究用数学方法推求污染物处理能力与费用关系的数学模式，但是，由于污染控制工程的任务、规模、性质的复杂性，不可能得出一个十分令人满意的通式。一般的费用函数形式是

$$C = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$$

大多数采用的是线性多项式或指数函数式。

如1969年美国曾收集城市污水处理资料，得出污水处理厂建设费 C_c 和年运行费用 C_o 的函数式分别为

$$C_c = aP^b$$

$$C_o = dP^e$$

式中， P 为服务人口数， a ， b ， d ， e 为特定常数。

1969年Michel根据1500个城市污水处理厂的四年资料得出平均流量的运行费用（包括劳动工资、公用事业、药剂费用等）的函数形式

$$\log C = \frac{1}{a - b \log V}$$

式中， V —每日流量（百万加仑/天）；

a ， b —特定系数。

1970年Shah及Reid根据污水处理厂调查资料，总结出污水处理厂费用函数

$$C = KP^m E^{-n}$$

式中 C —美元/磅 $BOD_5 \cdot$ 日；

P —设计人口；

E —原污水的 BOD_5 ；

K—系数

1970年Smith得出污水管道投资费用函数

$$C = aP^{-b}$$

P为人口密度。

关于工业废水方面的费用函数也曾报导有

$$C_0 = aQ^b$$

其中, C_0 —吨一年费用; Q —吨一年的容积。

费用函数的建立, 目前还只能靠经验模式来处理, 建立费用函数时, 应大量收集费用资料, 建立费用矩阵, 经过数据的整理、统计、加工而成。

例如, 对同一类型污水的处理厂而言, 其费用(建设投资、年费用)可以作为单位时间去除污染物数量的函数, 即可表示为处理污水量及处理效率的函数。

$$C = f(Q, \eta) \quad (1-10)$$

其中, Q 为处理水量, η 为处理效率。

目前, 由于污水处理厂的数量还不多, 很难从实际费用资料中求取费用函数。为此可以采用系列设计法, 预先假定一个污水处理厂的系列, 然后, 对每一种规模进行一级处理(效率30~35%)、二级处理(效率85~90%)、三级处理(效率95%)的设计, 求得其费用值。然后, 对一特定流量及效率的情况下, 将流量分配为不处理、一级处理、二级处理及三级处理的几部分, 使其总效率与所要求的处理效率相同, 从而建立起不同处理效率情况下的费用。

例如某一污水厂要求流量为 $1.6 \text{米}^3/\text{秒}$, 处理效率为70%, 其效率相应于全部流量通过一级处理后, 部分污水进行二级处理。假想的通过二级处理的水量为

$$\frac{70 - 30}{90 - 30} \times 1.6 = 1.07 \text{米}^3/\text{秒}$$

这样, 原问题变成成为 $1.6 \text{米}^3/\text{秒}$ 的一级处理和 $1.07 \text{米}^3/\text{秒}$ 的二级处理的情况。

通过系列设计和流量折算可得获得不同流量、不同处理效率下的费用矩阵。

η	Q	Q_1	Q_2	Q_m
η_1		C_{11}	C_{12}	C_{1m}
η_2		C_{21}	C_{22}	C_{2m}
\vdots		\vdots	\vdots		\vdots
η_n		C_{n1}	C_{n2}	C_{nm}

由所得费用矩阵求取污水处理厂的费用函数。费用函数的一般形式可写为

$$C = \alpha Q^\beta \quad (1-11)$$

式中, Q —流量; $\alpha = K_1 + \gamma \eta^\sigma$, 因此一般污水处理厂的费用函数可写为

$$C = K_1 Q^k + K_2 Q^k \eta^{k'} \quad (1-12)$$

在流量为一定时，上式可简化为

$$C = K_1' + K_2' \eta^{k'} \quad (1-13)$$

其中

$$K_1' = K_1 Q^k$$

$$K_2' = K_2 Q^k$$

$$K_4' = K_4$$

这是一曲线方程，为了能用线性规划求解，可以采用多段线性近似法，用多段直线近似地描述此曲线。当然，为使费用函数为最小也可采用非线性规划及其他求优法。

多段线性近似法是将 η 从 0 到 1 分为 n 段，每段用直线描述该范围内的曲线，直线的斜率为 a_i 。每段直线的函数为：

$$\text{第一段} \quad C_1 = K_1 + a_1 (\eta - \eta_0) \quad (\eta_0 \leq \eta \leq \eta_1) \quad (1-14)$$

$$\text{第二段} \quad C_2 = C_1 + a_2 (\eta - \eta_1) \quad (\eta_1 \leq \eta \leq \eta_2) \quad (1-15)$$

$$= K_1 + a_1 (\eta_1 - \eta_0) + a_2 (\eta - \eta_1) \quad (1-16)$$

$$\text{第三段} \quad C_3 = C_2 + a_3 (\eta - \eta_2) \quad (\eta_2 \leq \eta \leq \eta_3) \quad (1-17)$$

$$= K_1 + a_1 (\eta_1 - \eta_0) + a_2 (\eta_2 - \eta_1) + a_3 (\eta - \eta_2) \quad (1-18)$$

$$\text{第 } i \text{ 段} \quad C_i = K_1 + \sum_{j=1}^{i-1} a_j (\eta_j - \eta_{j-1}) + a_i (\eta - \eta_{i-1}) \quad (1-19)$$

$$= K_1 + \sum_{j=1}^{i-1} a_j (\eta_j - \eta_{j-1}) + a_i (\eta - \eta_{i-1}) \quad (1-19)$$

为了使线性化后所得线性式与原函数相近，要求直线段与原函数曲线所夹的面积为最小。

假定在 η 轴上一点，效率为 η 处取 $d\eta$ 宽度的一微元段，此处原函数的值为

$$K_1' + K_2' \eta^{k'}$$

相应的线性化线段上的函数值为

$$K_1 + \sum_{i=1}^{i-1} a_i (\eta_i - \eta_{i-1}) + a_i (\eta - \eta_{i-1})$$

在微元段内曲线与直线所夹的面积为

$$A = \left[K_1 + \sum_{i=1}^{i-1} a_i (\eta_i - \eta_{i-1}) + a_i (\eta - \eta_{i-1}) - (K_1' + K_2' \eta^{k'}) \right] \cdot d\eta \quad (1-20)$$

为使 A 不为负，令

$$dZ = \left[K_1 + \sum_{i=1}^{i-1} a_i (\eta_i - \eta_{i-1}) + a_i (\eta - \eta_{i-1}) - (K_1' + K_2' \eta^{k'}) \right]^2 \cdot d\eta \quad (1-21)$$

在某一区间 $\eta_{i-1} \leq \eta \leq \eta_i$ 内求 $Z = \int_{\eta_{i-1}}^{\eta_i} dz$ 令

$$\frac{dZ}{da_i} = 0 \quad (1-22)$$

可求得不同区间内线段的斜率 a_i