

第 1 章

概 论

广义地说，为了补偿缺水（或引出多余的水）而更有效更完全地利用水资源^[1]，从任何一个水源（河流、水库、湖泊、海湾、河口）取水并沿着河槽、渠道、隧洞或管道，送给用户就叫做水资源区域再分配（径流调配），为此所兴建的工程叫做“调水工程”；而在两个或多个流域之间开挖渠道或隧洞，利用自流或抽水等方式，把一个流域的水输送到另一个流域或若干个流域，或者把若干个流域的水输送到一个流域，被称之为“跨流域调水”，为此所兴建的工程叫做“跨流域调水工程”。调水是解决水资源时空分布不均的最重要、最有效的方式。数千年来，自从河流和湖泊被用于灌溉、供水和航运以来，人类就实现了径流的再分配。随着时间的推移，调水工程越来越复杂了，具有越来越多的综合性，调水量越来越大，输水的距离越来越长。人类不仅学会充分利用或调配本流域的水资源，而且开创了跨流域调水的伟大壮举。跨流域调水可解决水资源与土地、劳动力等资源空间配置不匹配问题，实现水与各种资源之间的最佳配置，从而有效促进各种资源的开发利用，支撑经济发展。

1 调水工程所涉及的课题及其相互关系

本质上调水工程是将两个以上的流域耦合成一个水资源大系统^[2]，这就必然涉及许多学科的课题：在自然科学方面，它包括地形、水文、水质、水资源、生态、环境和水利工程；在社会科学方面，调水包括政治、行政、经济、规划和法律。要把这些学科的课题集成在一起研究，以便确定最佳的调水工程方案。由此

可见，调水工程是个系统工程。调水工程的规模越大，所涉及的学科就有可能越多。因此，国际应用系统分析研究所的戈罗彪夫Г·H·教授^[3]把水资源区域再分配这个总课题分成三个主课题（技术工艺、社会经济和自然生态环境保护）。它们的目的各不相同。技术工艺是研究调水工程的最佳设计方案并保证方案的实施；社会经济是研究水资源调配对全社会的利益，这时它不仅用金钱来表示调水工程的经济效益，而且要研究调水工程对其所涉及地区的社会进步所能做出的贡献；自然生态环境保护是研究保护自然生态环境的最佳条件、促进自然生态平衡发展的措施。这样，为了解决调水这个总课题，就必须采用系统方式。调水工程的实施历史也反映了这种情景。首先研究和讨论的是水资源再分配的技术工艺和工程方案，然后关注它的经济效益，现在必须要把它们与自然生态环境保护问题紧密地联系在一起。

在调水工程的三大主课题中，每一个主课题又可分成若干个子课题，而每个子课题还可分成若干更小的课题。本节先把调水工程这个总课题分解到如图 1-1 所示的一级、二级子课题，然后再把主课题与子课题之间的关系表示出来。下面我们根据戈罗彪夫Г·H·教授所划分的这些子课题，结合其他学者的研究成果，简要地介绍这些子课题的内容，并提出一些新的问题。

1. 技术工艺主课题

实现调水和保证其发挥作用的工程系统。这个主课题可分成

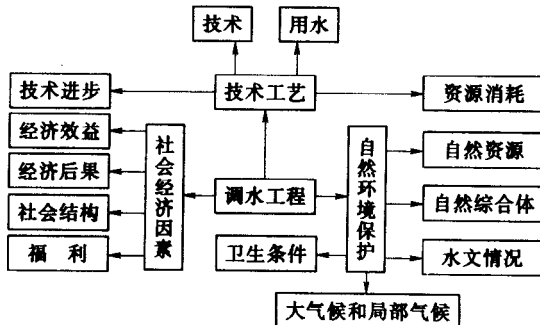


图 1-1 调水工程各课题的结构示意图

配水技术、技术进步、用水、资源消耗等子课题。

(1) 配水技术子课题。该课题是在具体的水文地理条件下，研究调水工程的技术方案，通过多种技术方案的比较，最终确定最佳的技术方案。

(2) 技术进步子课题。调水工程的建设已有 5400 多年的历史了。不要说 5400 年 就是 100 年前的水工建筑物也显然是老化了。科学技术在不断发展，最近 100 年来更是突飞猛进，技术进步必然带动调水工程的发展。这就产生了新的问题：在调水工程的设计中如何考虑技术进步的因素。

(3) 用水子课题。由于调水的直接和间接作用、经济的发展趋势以及技术进步，该课题研究用水的需求结构和用水量所要发生的变化。

(4) 资源消耗子课题。指劳动力资源、基建投资、能源、材料以及实施调水工程所必需的一切的总和。在评价未来要实施的设计方案时，这个子课题是非常重要的而且是决定性的。

2. 社会经济主课题

可分成经济效益、经济后果、社会结构、社会福利改善等子课题。该主课题是研究调水工程的经济效益和社会效益。

(5) 经济效益子课题。该课题是社会经济主课题的重要组成部分，是工程设计审查时的重要标准。世界各国公认的跨流域调水工程的经济分析准则就是对工程进行效益-成本费用分析。在别无其他方法可用的情况下，通过效益-成本分析，可以从各种抉择中找出对社会最有利的投资优化方案。

但是，采用这个“标准”来“衡量”巨型调水工程的经济效益是否够了呢？在经过较长时间演化过程中会表现出什么样的后果？如何评价设计中没有考虑的其他观点，包括自然生态环境保护的作用和后果的不确定性？

(6) 经济后果子课题。该课题与经济效益问题密切相关。会产生以下问题：主要和次要后果是什么？它们对地区、国家和国际范围内会带来什么影响和后果？

(7) 社会结构子课题。指无论是在调水工程的施工期间，还是在运行时，调水工程都将产生很大的影响，有可能导致社会结构发生变化，更有可能产生许多反馈关系，这对调水工程的其他课题也将产生很大的影响。

(8) 社会福利改善子课题。该课题是调水工程的最终目标。

调水工程的政治和法律观念在许多国家也是非常重要的。但是，目前，国外尚未把这些部门的观念直接列入基本子课题。根据这个原因，在调水工程这个总课题中可以将它们忽略不计，实际上在这方面的研究只走出第一步。

3. 自然生态环境保护主课题

包括人体健康、水文情况和气候、自然生态、自然资源等子课题。该主课题是研究调水工程对自然生态环境的影响，趋利避害，促进自然生态环境能够良性平衡地发展。

(9) 人体健康子课题。这既是自然生态环境因素也是社会因素作用的结果。这两组因素的变化将影响人体的健康。

(10~11) 水文情况和气候子课题。该课题描述水体和大气以及水圈、岩石圈和生物圈之间的相互作用过程。这里可以提出许多问题。水库是任何调水工程必不可少的组成部分。水库的形成与良田的损失、水质的恶化等有关。水量的再分配导致大气中水体交换过程的变化，亦即能引起气候的变化。但是，能变化到什么程度，需要进一步研究。

(12) 自然生态环境子课题。自然生态环境（包括地理生物系统）是由许多相互关联的因素组成的。其中一个或一组的变化将导致自然生态系统中的其他许多变化。在评价调水工程时自然生态环境本身的自然发展也非常重要。这就产生了问题：如何测量自然因素？如何看待不可比现象？如何预测既在短期（施工）作用又在长期作用下自然生态环境的变化？需要研究哪些还没有考虑到的变化？

(13) 自然资源子课题。该课题是研究自然资源与大型调水工程之间的关系。部分资源 木材、矿物资源等 将要用于工程建设中。

由于建筑新的水库等因素，在短时间内一些矿场和油田、大面积耕种土地可能被淹没和损失，水质发生变化。长时间演化变化，例如生物产品产量的变化，能够观测到这些自然变化。这就产生了问题：在这种情况下怎样确定调水工程所引起的自然资源总损失？

首先，从以上所分解的子课题来看，仍不尽完善，还可以增加若干子课题，如在技术工艺主课题中还应增加施工技术子课题和运行管理子课题。施工技术子课题是研究调水工程各种建筑物的施工方法和施工技术；运行管理子课题包括多方面的内容^[4]。在“软件”方面，主要有管理体制与管理办法、经济与财务、政策与法规等。在“硬件”方面，主要有输水工程管理、水量与水质监测、通讯及信息处理系统等。在自然生态环境保护主课题中至少还应增加两个子课题，一是自然生态环境预测评估方法子课题，因为预测评估方法是否得当将直接影响生态环境预测评估的结果；二是调水水质子课题，它是研究调水工程对水质的要求和输水过程中有可能影响调水水质的情况。

其次，这里所研究的每一个子课题还可以再分解成若干个小课题，这是显而易见的，因此不再赘述。

在与调水工程总课题有关的主课题之间有许多比值关系，整个课题可以看成是个三面锥体。它的每一个侧面都是一个主课题（技术工艺、社会经济、自然生态环境保护）。根据课题的聚合水平，每个课题的综合可以分支，而这些分支既在同一个主课题中又在各子课题之间具有许多联系。所以，调水课题实际上是跨学科的课题。

有人试图标出各子课题之间最重要的联系并评价它们的复杂性。结果用矩阵的形式表示（表 1-1）。表中纵行的序号与横行的序号相同。其相关程度用以下方式表示：关系最密切的用 *** 表示，而最不紧密的（但仍然有明显的关系）用 * 表示，介于两者之间的关系用 ** 表示。

从矩阵分析中可以做出两个结论：在三个主课题中的每一个主课题范围内存在着稳定的相互关系，子课题之间的关系也很稳

定。这样，如果利用鉴定式评审方式，作为认识和评估调水工程设计费用的工具，必须不仅要在一个知识领域，而且要在不同领域之间的初始相互关系上组织鉴定工作。

表 1-1 调水工程综合评价中各因素之间的相互关系

项 目	技术工艺			社会经济					自然环境保护				
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
技术工艺													
1. 配水技术			**	***	***				*	*	***	***	**
2. 技术进步	*		**		**	*							
3. 用水	*	*			***	**	*		*		**	***	*
4. 资源消耗	**	*			***	**		*					**
社会经济													
5. 经济效益	***	**	***	***		**		***				**	**
6. 经济后果		*	**	*	**		**	**	*				*
7. 社会结构			**	*									
8. 社会福利	**	*	**	*	*	*	**		**			*	*
生态环境													
9. 人体健康	*		**					**					
10. 气候									*		***	**	*
11. 水文情况	**		*		**				*			**	*
12. 生态系统					**						**		**
13. 自然资源	**			**	**	*					*	***	

大规模调水工程设计的各方面评估问题是个非常复杂的问题，在实践中没有现成的方法实例，只能根据工程的原体条件和数据，分学科分课题地进行研究论证，然后综合各个课题的研究结果，进行综合评估。在综合评估过程中，现有的一些正反两方面的经验和实例是非常宝贵的。

2 调水工程最优方案的分析

正如上节所述 跨流域调水工程设计通常有许多不同的方案，

而各种设计方案的评估是个非常复杂的问题。显然，从工程投资、社会效益和生态环境保护费用三方面考虑，并非所有方案都同样地引人注目，问题是要寻求最优方案。然而往往引起应该考虑的方案的数目与每个方案评估中能达到的详细程度之间存在矛盾。如果有大量可供选择的方案，或者所涉及的处理过程很复杂，折中方案不一定总是适用的。就水资源而论，有大量的选择方案，其相互影响复杂，任何单一的分析方法都不大可能具体确定其实际运行的最优开发策略。

在这方面英国学者 D·G·詹姆森^[5]提出了一个名为“分阶段近似法”的方法。该方法起一个筛子的作用，仅让最有希望的方案通过，到后面的阶段再作进一步详细的研究。近似法有 3 层结构：规划模型、设计模型和运行模型。

(1) 规划模型。可在全国范围内考虑跨流域调水，规划过程的特征是筛选大量方案，确定以下目标：应当开发哪些水资源；应当修建哪些调水联接；选择开发时间和顺序。

以上目标确定以后，就需要将来需水量（供水、水电）、各地不同规模的水源输出量、水源和需水中心可能的调水联接以及施工和运行费用等资料。

为使水资源与需水量相适应，面对大量可供选择的方案时，如果要确定最经济的方案，则需用系统研究程序。一种可能使用的是很合整数规划，其中费用项目中包括：

$$(\min) \sum_i \sum_t C_{it} S_{jt} + \sum_k \sum_t P_{kt} l_{kt} + \sum_k \sum_t q_{kt} m_{kt} + \sum_k \sum_t v_{kt} f_{kt} \dots$$

式中： C_{it} 为在 t 时段内修建 i 水库的费用现值； S_{jt} 为零一变量，若 在 t 时段内修建 j 水库，则取 1，否则取 0； P_{kt} 为在 t 时段内修建 k 联接的零一变量； q_{kt} 为在 t 时段内 k 联接的比例费用现值； m_{kt} 为在 t 时段内修建 k 联接建设能力的联接变量； v_{kt} 为在 t 时段内通过 k 联接的单位输水费用现值； f_{kt} 为在 t 时段内 k 联接的流量的连续变量。

显然，可通过扩充水处理费用项考虑水质的影响。但是，混合整数规划与线性规划比较，其主要优点是对投资的“是否”靠

使用“零一”变量决策，可避免不允许的小数值。

(2) 设计模型。使用线性规划或其他类似的方法筛选了一系列方案后，下一阶段就是以最优方案为基础进行系统设计。目的是在预定的轮廓范围内，准确决定各组成部分的规模，如水库、调水联接和抽水容量等，以便可靠地满足规划要求。但其规模可能从全国范围减少到某个地区，尽管如此，各组成部分之间仍错综复杂、互相干扰，因而模拟可能是当前适合于分析这种形式的惟一方法。

由于系统的可靠性通常是极端事件的函数，而不是一般情况的函数，因此需要长系列水文测验记录，所以，对这种类型的综合性资料公式化生成技术，做了大量工作，其公式如下：

$$Q_i = f\{(T_i), (H_i), (S_i), (A_i), (e_i), \Phi\}$$

式中： Q_i 为流量； T_i 为趋势； H_i 为持续时间； S_i 为季节性； A_i 为自回归移动平均部分； e_i 为随机变量； Φ 为从历史资料导出的模型参数组。

这种近似法已经扩充到不仅考虑水量；而且考虑水质。其主要优点是利用所有的实测结果，而不是仅利用极限值，并能够根据有限的历史记录来检验优选方案是否正确。

建立设计模型，一大优点是采用程序块结构进行模拟，从而可以迅速有效地评估各种系统的轮廓。各组成部分的模型，代表组成地区水资源系统的不同单元。该模型能对复杂的组合进行公式化，然后通过建立专用的与零的优点联接，来描述较简单的变量。

根据传统观念，系统“失事”意味着完全放空库容，有时，在发生失事以前，采取措施消除这种可能性。如果将“失事”重新定义为限制用水，则用水户大概会比中断供水常常更能容忍些。所以，该方法不仅可以给定的历史资料对系统的可靠性作更可信的估计，而且还可考虑不同等级的限制用水。例如，在市政供水情况下，设计说明书可分别满足如下要求：98%的时间供水完全不受限制，98.5%的时间仅有极少限制，如花园浇水，99%的

时间可在没有严重破坏的情况下供水。

模拟是一种估算程序，而不是一种设计方法，往往用来专门计算参数，以确定各组成成分的规模，以最小费用满足所需性能要求。从理论上来说，模拟应当能够合理可靠地确定各组成成分的规模，使模型本身定出合适的水库、调水联接和抽水容量。为这类模型建立通用数值优化程序包的努力已经组合成功。对一个工程轮廓，虽能对优化过程进行有效地公式化，但同一程序很难用于其他系统。

(3) 运行模型。定出系统的轮廓和各组成成分的规模后，下一步就要考虑系统的运行方式。在这方面，水资源管理的各部门，如供水部门和污水处理部门，不仅在利益上有冲突，而且对运行性能的评价标准也不相同。所以，提出跨区域调水“最优运行规则”也许是不合适的，而应该采用“满意”方案。在此方案中，只要每项功能均在可接受的范围内，就认为各用水部门对系统的状态是满意的。这个范围根据可量测的参数如流量、水深、分解氧和硝酸盐浓度等确定。如果系统的状态在此范围内，则目标是使运行费用最小。然而，如果某一特殊限制条件被突破或可能被突破时，则有关该任务的特殊目标将要优先处理。例如，当洪水即将来临（地面排水的上限可能被突破）时，则使损失最小的减洪目标优先于最小运行费用目标，当河道水深不足（低于航深下限）时，供水就得从水库引水或使用替代水源，即使这样做运行费用很高。只有当一个以上的限制条件可能同时被突破时（即航运水深不足，又无替代水源供水），才应当指定优先处理的项目。

当前，实际上能够较详细提出工程规模，分析问题可能受限于个别的子系统，如联合运用的水库群或河道上控制水流的堰坝，即使是单个流域也包括许多这样的子系统。河流开发系统的真正规模可能支配着进行控制的局部研究。当然，应该理解的是，即使所有单个子系统都以最优方式运行，也并不一定使整个系统受到最优控制。尽管如此，能够满足由较有综合性的控制策略所确定目标的子系统，其最优或接近最优控制，可使整个系统最优控

制，以达到差异很小或没有实际差异。

后来，提出了一种分层控制大型水资源系统运行的原理。而战略决策却受限于所确定的目标，因此，确定必须完成的项目及如何达到战略决策的目标，均由控制子系统的联机计算处理。将决策机构公式化，通过预定的拉格朗日算法，以解决多功能非线性优化问题。战略决策时，并不是对不同位置的同一子系统反复建立相类似的程序，而是对通用控制程序块公式化，只需极小的修正就能用于全地区。

控制每个子系统的小型计算机的作用是探索遥测系统，以查明调水系统的现有状态，预报未来状态，确定达到目标的最优或接近最优的方式并在重复整个程序以前，完成布线工作。由此可见，运行决策是根据预测系统的未来状态，而不是已知的现有状态。由于预报不可能十分准确，必须具有自校措施，以纠正预报中不可避免出现的偏差。

水资源管理运行决策并不简单，最优化则更为罕见。某种动态规划也许是实时控制的最通常提出的决策机构。但是，同其他最优控制方法一样，考虑问题的范围常受到有限计算设备能力的限制。在某项研究规划中，实际上减洪算法应有 5 个状态变量，2 个决策变量。在不降低可信度的情况下，能减为 5 个状态变量，1 个决策变量，即：

$$f_m(s, q, r) = \min\{\max[R(s), E(q), f_{m-1}T(s, q, r, Id)]\}$$

式中： $f_m(s, q, r)$ 为现在到预计时间内的可能最小损失费用； s 、 q 、 r 分别为库水位、下游流量和水库泄量； $R(s)$ 、 $E(q)$ 为易受破坏地方的费用损失函数； $T(s, q, r, Id)$ 为按决策变量 d 修正的 s 、 q 、 r 值。

此外，还建立了闸门启闭的物理限制条件，从而通过不用全部解完动态规划方程来进一步简化决策机构，有利于达到最优控制。

用分阶段近似法管理水资源具有很大的优越性。在规划阶段，线性规划保证能考虑各种水资源的组合、渠槽和联接，以推求满

足现有需水量的最小费用方案。在已选定的系统轮廓范围内，利用模拟来客观地确定各组成部分的规模，以便按需要可靠地实施。最后，提出了分层控制方法作为整个系统最优控制的手段。采用这种近似法，与非定型逐项考虑的方法相比，不仅能减少工程费用，而且能改善运行性能。三个阶段分别采用不同的分析方法，这些方法是互相补充而不是互相对立的。

3 调水工程的分类

现在，世界上已建和在建的许多调水工程，就其规模、容量、用途、技术方案、控制区域的自然地理条件来说真是千差万别。但是，目前世界上不仅还没有调水工程分类的专门方法，而且在这方面已有的意见分歧很大。评价调水工程大小的标准，大部分研究人员采用流量法，其中有些人还考虑了调水距离，但无论是前者还是后者，在做出评价时，仍然各行其道。例如：考虑到调水渠道开挖的可能情况，有人提出渠道应根据渠底宽和水深来分类，按照这种分类，底宽 $b=10\sim 12\text{m}$ ，水深 $H=5\sim 8\text{m}$ 的渠道就可算做大型渠道。 b 和 H 值更大时，就是特大型渠道。还有些研究人员认为，大型调水渠道的长度应为数百公里，流量为 $1000\sim 2000\text{m}^3/\text{s}$ ；也有人认为流量应为 $50\sim 400\text{m}^3/\text{s}$ ，长度为 $50\sim 1100\text{km}$ 。

希克洛曼诺夫 И·А·等人在其《世界的用水保障与调水问题》专著^[1]中指出，为了便于进行与调水工程有关的水文研究，最好将各种各样的调水工程按照不同的标准（指标）进行分类。

(1) 按照水文地理标准（河系之间的水流再分配性质）。可以把调水工程分成三大类：局域的、流域内的和跨流域的。

1) 局域（地区）调水工程。这是在同一条河流流域内进行的工程。通常这样的工程调水量不大，从河流中取水送到所灌溉的农田或送到城市供水系统。地表水的这种区域再分配在干旱地区最常用。一些大型的改良沼泽化土壤的排水渠道以及各种向最近的水道干线排放城市和居民点区域洪水的管渠系统也归属于此

W

L

$\text{m}^3 \text{ a}$)

$(\text{km} \quad WL = (\text{m}^3/\text{a}) \cdot \text{km}$

1-2)。

1-2

调水类别	调水量 W (亿 m^3/a)	调水线路长度 L (km)	调水规模的综合指标 $WL = (\text{m}^3/\text{a}) \cdot \text{km}$
小型 (小规模)	< 10	< 100	< 1000
中型 (中等规模)	10~25	100~400	1000~10000
大型 (大规模)	25~50	400~1000	10000~50000
特大型 (特大规模)	50~100	1000~2500	50000~250000
巨型 (巨型规模)	> 100	> 2500	> 250000

B · B ·

[6]

И · А ·

概

我们根据所收集到的资料进行了统计，截止到 2002 年，在所统计到的国外 345 项调水工程中有 85 项为中型工程 [综合指标为 $1000 \sim 10000 (\text{m}^3/\text{a}) \cdot \text{km}$]，21 项为大型工程 [综合指标为 $10000 \sim 50000 (\text{m}^3/\text{a}) \cdot \text{km}$]，7 项为特大型工程 [综合指标为 $50000 \sim 250000 (\text{m}^3/\text{a}) \cdot \text{km}$]，其余均为小型工程。从调水量来说，加拿大 20 世纪 70~80 年代建成的跨流域工程（从丘吉尔河向纳尔逊河调水 240 亿 m^3/a 和从伊斯特梅恩河和卡尼亚皮斯科河向拉格朗德河调水 500 亿 m^3/a ）是世界上最大的，但是他们的线路长度仅为 30~40km。从调水线路长度来说，世界上最长的调水工程是利比亚的大人工河工程，其输水距离为 4500km，但调水量仅为 25 亿 m^3/a 。墨西哥西北统一水利系统为 1500km，调水量为 75 亿 m^3/a ，原计划 2000 年竣工，但至今未见竣工报道。不是所有调水量大的工程都具有很长的输水距离，按照综合指标，巴基斯坦的西水东调工程是世界上已建工程中最大的工程 [调水量 $W=148$ 亿 m^3/a ，线路长度 $L=1105\text{km}$ ，规模综合指标为 $WL=163540 (\text{m}^3/\text{a}) \cdot \text{km}$]。参数与巴基斯坦西水东调工程相接近的是印度的萨达尔萨罗瓦工程 [$W=350$ 亿 m^3/a ， $L=458\text{km}$ ， $WL=160300 (\text{m}^3/\text{a}) \cdot \text{km}$]。土库曼斯坦的卡拉库姆运河 [调水量 $W=120 \sim 130$ 亿 m^3/a ，线路长度 $L=1300\text{km}$ ，规模综合指标为 $WL=156000 \sim 169000 (\text{m}^3/\text{a}) \cdot \text{km}$]。加拿大最大的调水工程的规模指标为 $10000 \sim 20000 (\text{m}^3/\text{a}) \cdot \text{km}$ ，而美国最大的调水工程——中央河谷工程扩建成功后为 $60000 (\text{m}^3/\text{a}) \cdot \text{km}$ （尚在扩建中）。

4 调水工程的技术特性

一般来说，任何调水工程都是由水源工程、输水工程和供水工程所组成的，亦即都包括取水、输水和向用户供水的各种水工建筑物。根据调水量、调水距离、用途、实现调水区域的自然地理条件，调水系统某些环节的工程技术方案可能很不相同。调水系统的特性也随着时间、大型水工建筑物施工经验的积累以及工程技术可能性的增大而改变。

4.1 水源工程

通常取决于取水区的自然地形条件、水文特性、取水量等因素。若地形许可，来水量又大，一般仅设置取水建筑物即可。调水工程的取水建筑物结构很不相同，但是在任何情况下，他们应当保证设计容量和调水工况，并满足生态环境保护的要求，在从自然调节度很高的多水水源取水时，常用无坝式取水建筑物或者用低坝取水建筑物和埝堤，以使供水水道（水域）的自然生态环境少受破坏。在平原的多水地区，一般不建筑造成大面积淹没并促使沼泽化发展的高坝。

在人口稠密的欧洲国家，水利枢纽常建在河口范围内以调节河川径流而不淹没土地。根据这个想法，美国和原苏联^[1]研究了从海湾向缺水地区调水的许多方案。原苏联从多瑙河向第聂伯河调水的方案就是其中之一。它用堤坝分隔黑海海湾的浅水区和德涅斯特漓漫。这些设计的主要问题是海水淡化的时间很长。对此，要形成最有效的水流情势并使淡水和海水混合。

在供水河流不能保证所需要的调水量的情况下，要建造水库甚至是梯级水库，以便进行季调节和多年调节河川径流。例如，澳大利亚的雪山工程^[7,8]，其取水区径流调节达到极高的程度。它的水库系统甚至可以在最干旱的年份和季度通过墨累河流域的分水岭向斯诺伊河供水，其流量不少于斯诺伊河多年平均流量的85%。

若调水工程的取水建筑物位于水库的下游，一般在水库大坝上还应设置水电站，让水流经水电站作过功后再自流进入输水渠。这样，调水工程会有更好的经济效益。

当然，用形成水库特别是大型水库的方法从河流中取水供给调水系统，对供水河流及其流域的水文情势和自然生态条件会造成很大的影响。这种影响是水库的传统效应以及调水的取水后果叠加所造成的。

在水源工程中，根据地形条件，有时需要设置水泵站提水进入渠道，用水泵汲水来克服水头差。如埃及的新河谷干渠^[9,10]，在

干渠渠口建立一个特大型提水站，每日可将 2500 万 m^3 的水从海拔 147m（这是纳赛尔湖的最低水平面）提高到海拔约为 201m 的山丘上，然后自流注入运河渠道。光是这个提水泵站就要花费 37.5 亿人民币，工期为两年。又如哈萨克斯坦的额尔齐斯-卡拉干达运河^[11]，在河槽基岸上设置第一级提水泵站，提水高度 17m，然后进入输水渠道。

4.2 输水工程

从取水点输水送给用户可以用不同的方法来实现：用渠道、隧道、地面或地下（或水下）管道、沿着河道、逆河道、用形成水库链的方法靠壅水高差把水送到上游；用水泵克服水头差。在许多情况下；无论是调水系统的造价还是它对自然生态环境的作用程度都取决于输水方式的选择。现在用渠道输水是最常用的方式，特别是长距离输水更是这样（表 1-3）^[1,12,13]

表 1-3 国外大型输水渠道的特性^[1,12,13]

工程名称	长度 (km)	最大过流能力 (m^3/s)	渠道坡度	比降	平均流速 (m/s)	平均水深 (m)	底宽 (m)	提水高度 (m)	防水层形式
卡拉库姆运河	1300	510	挖深 3m 1:3, 3~8m 1:4, 8m 以上 1:5	0.00012 ~ 0.00016	0.2~ 0.3	10~ 15	抛物线 型断面		没有防水层
阿姆布哈尔运河	230	325	绒沙和软粘土 1:5~1:6, 风化岩 1:1.5		0.7~ 0.8	5~6	7~14	115	某些渠段 用混凝土 护面
南机械草原运河	127	300	多角断面 1:4, 1:2.5, 梯形 断面 1:3, 1:2		0.8~ 0.9	6~7	2~18		混凝土护面 (23km)
卡尔希干渠	177	314				7~10	20~40	132	土工膜, 混 凝土护面 (100km)

续表

工程名称	长度 (km)	最大 过流 能力 (m ³ /s)	渠道坡度	比 降	平均 流速 (m/s)	平均 水深 (m)	底宽 (m)	提水 高度 (m)	防水层 形式
额尔齐斯- 卡拉干达 运河	460	75	软土 1:2.5 ~1:3, 强风 化岩土 1:2, 岩土 1:1~ 1:0.5	粘土和亚粘 土 0.000035 ~0.000065, 岩土 0.0001 ~0.0002	0.4~ 0.9	5~10	5~4	418	碎石护面
大斯塔夫 罗波尔 运河	480	180	多角断面 1:8			5~10	4~6		混凝土 加土工膜 护面
北克里木	400	294			0.6~ 0.7	3~6			混凝土护面 (50km)
第聂伯- 顿巴斯	263	120	水上 1:3, 水下 1:4	零比降	0.65	5~10	18~20	265	
莫斯科 运河	128	夏季 145 冬季 97	背水坡 1:4, 填土 1:2.5, 砂土 1:2, 亚 粘土 1:1.5			5.5	46	38	全部用 混凝土护面
萨达尔- 萨哈亚克	260	650	1:2	1:10000		7.0~ 6.8	48~23		素混凝土 垫层(厚 10cm)等
萨达尔萨 罗瓦 总干渠	458	1 133	1:0.5	1:12500 1:15500		7.6~ 4.4	73.1~ 10.3		M-15 级 混凝土衬砌

根据目标用途,渠道有多种,有灌溉渠道、通航运河、引水发电渠道、输水渠道、引水渠道和排水渠道等。一般,现代大型调水系统的干渠具有综合用途,而整个调水系统可能包括各种用途的渠道。关于调水渠道的最佳尺寸等问题,文献^[13~15]有详细论述,这里不再详谈。

从保持调水水质和水量以及保护生态环境的角度来看,渠道