DOI:10.3880/j.issn.1006-7647.2008.02.021

国外跨流域调水工程对南水北调中线运行调度的启示

王海潮,蒋云钟,鲁 帆,董延军

(中国水利水电科学研究院水资源研究所,北京 100044)

摘要:对国外著名跨流域调水工程的运行调度情况进行介绍,简要分析其健全的政策法规、统一的管理模式、先进的自动化调度系统、调节水库的工程保障和科学合理的调水计划等成功经验以及运行调度过程中关注的生态环境、水价问题。为实现南水北调中线水资源科学合理的运行调度,考虑中国国情,得到几点启示:国家应针对运行调度制定相关的、完善的法律法规,对调水工程实行统一管理,建立科学的水资源调度体系,开发自动化系统,避免其对生态环境的不利影响,探寻计划与市场相结合的水价模式。

关键词:跨流域调水;南水北调中线工程;水资源运行调度

中图分类号:TV68 **文献标识码**:A **文章编号**:1006-7647(2008)02-0079-05

Inspiration of inter-basin water transfer abroad on operation of middle route of South-to-North Water Transfer Project//

WANG Hai-chao, JIANG Yun-zhong, LU Fan, DONG Yan-jun(*Department of Water Resources, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing* 100044, *China*)

Abstract: Based on a brief introduction to the operation of some well-known inter-basin water transfer projects abroad, some operation and management experiences were summarized: effective policies, unified management pattern, advanced automatic operation system, safeguard for reservoir regulation, scientific and rational operation planning, problems related to the eco-environment and water pricing. In order to realize scientific and rational operation of water resources in the middle route of the South-to-North Water Transfer Project, several inspirations are drawn as follows: to enact and perfect relevant laws and regulations in China, to form a scientific operation system of water resources, to implement unified management of water resources, to develop an automated system, to avoid adverse influence on the eco-environment and to search for the water price mode based on planning and the market.

Key words: inter-basin water transfer; middle route of South-to-North Water Diversion; operation scheduling of water resources

河川径流是人类最早利用的水资源,但是由于水资源时空分布的不均,一些地区的水资源严重短缺,随着社会经济的发展,仅仅依靠当地的水资源已难以满足经济发展的用水需求。因此,为了缓解缺水地区的供需矛盾,实现缺水地区经济社会持续稳定的发展,世界上许多国家都兴建了跨流域调水工程,从丰水流域向缺水流域进行调水。本文对国外著名跨流域调水工程的运行调度情况进行简要介绍,重点分析其成功经验以及运行调度过程中主要关注的问题,试图从这些跨流域调水工程的成功经验和教训中探寻对我国南水北调中线运行调度的启示,以期为该调度的实践提供借鉴。

1 国外跨流域调水工程概况

据不完全统计[1-3],截至 2005 年,全世界已建的跨流域调水工程已达 160 多项,分布在 24 个国家,主要集中在美国、加拿大、印度、前苏联和巴基斯坦等 5 个国家,约占世界总调水量的 80% 以上,经济效益和社会效益明显。其中已建的跨流域调水工程中调水量较大的是巴基斯坦西水东调工程,年调水量 148 亿 m^3;距离较长的是美国加利福尼亚州北水南调工程,输水线路长 1 138 km,调水总扬程1 151 m,年调水量 52 亿 m^3。世界著名的跨流域调水工程如表 1 所示。

2 国外跨流域调水工程运行调度分析

跨流域调水工程是解决缺水问题的一个重要的战略措施和工程措施,其运行管理往往是一个比较复杂的系统工程,涉及的问题很多。国外在长距离跨流域调水工程的运行调度及管理方面已经积累了

基金项目:"十一五"国家科技支撑计划项目(2006BAB04A07)

作者简介:王海潮(1979—),男(满族),河北遵化人,博士研究生,从事跨流域水资源调度研究。E-mail:rover52019@163.com

表 1　世界著名的跨流域调水工程

工程名称	所在国家	引水流量/($m^3 \cdot s^{-1}$)	多年平均调水量/(亿 $m^3 \cdot a^{-1}$)	输水干渠总长度/km
加利福尼亚州北水南调工程	美　国	284	52	1 138
中亚利桑那调水工程	美　国	85/78/62*	18.5	539
魁北克调水工程	加拿大	1 590	252	861
伏尔加—莫斯科调水工程	前苏联	78	21	224
西水东调工程	巴基斯坦	614	148	622
雪山工程	澳大利亚		11.3	80

* 中亚利桑那工程有 3 个输水渠段,各段引水流量不同。

较丰富的经验,为确保我国调水工程的正常运行,学习和借鉴国外跨流域调水工程的相关经验有重要意义。

2.1　成功的经验

国外基本上都针对跨流域调水工程制定了相关的法律,国家从法律层面上对调水工程进行约束。在国家法律的约束下,政府一般不直接介入工程,而是成立管理单位对调水工程进行统一管理,负责调水工程的建设、运行、管理。在统一管理模式下,通过调节水库的工程保障、科学合理的调度计划、先进的自动化调度系统等一系列措施保障调水工程的科学调度,在保证工程安全性的同时实现调水工程综合效益的最大化。

2.1.1　健全的政策法规

政策法规为调水工程的正常运行调度提供了保障。国外成功的调水工程基本上都有针对性地制定了相关的法律。譬如:①美国加利福尼亚州北水南调工程,联邦政府提供了立法保护[4-5]。工程设计完成后,加利福尼亚州议会以法律形式确定了工程建设、管理框架,确定工程的全部建设费用来自于债券和贷款,由工程的运营收入偿还全部债务与利息。②美国中亚利桑那调水工程,联邦政府通过了《科罗拉多河流域工程法》,并授权垦务局资助和兴建中亚利桑那调水工程,明确了调水工程的任务包括:负责输送中亚利桑那州从科罗拉多河分配的水;负责归还兴建中亚利桑那调水工程联邦政府所投入的资金。③巴基斯坦西水东调工程,按《印度河条约》解决拉维河、萨特莱杰河与比亚斯河下游的灌溉等用水问题。条约规定,巴基斯坦从西三河,即印度河干流、杰卢姆河、奇纳布河分水,每年有地表径流 1 665 亿 m^3,约占印度河径流量的 80%;印度从东三河,即腊维河、萨特莱杰河、比阿斯河分水,每年约分水 407 亿 m^3,并为巴基斯坦修建调水工程提供 6 206 万英镑补偿。

2.1.2　统一的管理模式

管理是调水工程运行调度的核心问题。调水工程涉及供水安全,生态环境,多部门、多地区、多层次的水量调配以及多目标、多准则调度问题,国外成功的调水工程大都在健全的政策法规制度基础上,以统一的管理机构采用统一管理的模式对调水工程进行调度。譬如:①美国中亚利桑那调水工程。中亚利桑那州的马里科帕、皮纳尔、皮马 3 个县成立了一个准政府实体——中亚利桑那水土保持管理局,负责中亚利桑那调水工程的管理和运行工作[6-7]。②澳大利亚雪山工程。整个系统跨越几个州,但在同一流域其调度的最高权力机构为墨累-达令河流域委员会(MDBC)。墨累-达令河流域委员会统一管理雪山工程,有权决定斯诺伊河向墨累河与马兰比吉河分水的流量,负责墨累河上各节制闸、各主要分水闸的调度;有权监督界河上各用水户的取水量;对水事纠纷进行调解;订立流域内有关的水资源管理条令和制度。③巴基斯坦西水东调工程。为开发利用印度河水电资源、发展经济,巴基斯坦于 1958 年成立水电开发管理局,负责实施印度河调水计划,包括西水东调工程,即从印度河及其支流杰卢姆河和奇纳布河向拉维河、萨特莱杰河、比亚斯河的调水计划。

2.1.3　调节水库的工程保障

诸多的调节水库为调水工程提供了丰富稳定的水源。国外成功的调水工程输水沿线基本上都设有较多的调节水库,建立有稳定的水资源基地,为保障水资源重新调配提供了根本保障。调节水库的作用是储存雨季多余的水量,合理控制河水的下泄流量,保证水源区与受水区地表水与地下水的平衡,防止枯水季节和枯水年地下水的过分开采,真正做到了地表水、地下水综合利用,达到了以丰补欠的效果。譬如:①美国加利福尼亚州北水南调工程,其最成功的经验是依山傍水将三角洲地带多余的水资源通过蓄水水库、水渠等转运储存到不同的地方,工程水渠沿途有 20 座水库。从北至南纵观整个调水工程,大型水库布局合理,保障水资源供给;中部储存水库随时积蓄剩余的水量,以利于水资源的再分配。通过沿途诸多水库的调节,有效地提高了工程的供水保证率。②澳大利亚雪山工程,由沿线 16 座水库(总库容约 84.7 亿 m^3,有效库容 69.1 亿 m^3)及相关建筑物组成[8],平均每年向内陆输送水量 11.3 亿 m^3。干旱期间,通过电站保证下泄量和拟定的灌溉水量,经过大型水库的调节,可保证在最严重的干旱期间调水量不低于平均流量的 85%。由此可见,雪山工程供水系统中的诸多水库起着举足轻重的作用。

2.1.4 科学合理的调水计划

国外成功的调水工程通过制定、调整供水计划和需水计划,形成调水方案,建立了现代化的高效水量调度体系。如:美国加利福尼亚州北水南调工程,水量调度根据用户的需求、现有水资源、来水预测制定供水计划(包括年计划、周计划和日计划)。供水商从每年9月份开始制定下一年度的需水计划,12月1日上报加利福尼亚州水资源局。加利福尼亚州水资源局根据可供水量,对各供水商的需水进行平衡和削减,分配的水量完全根据供水商的供水协议确定。供水商承担的投资额决定其协议分水量的多少。调度中心根据气象、水文测验数据和历史资料预测下一年的来水量,以90%的来水量作为下一年的可供水量,然后根据供水量、需水量及水库蓄水状态制定年供水计划,1月1日起按新计划供水。每年的3月和4月底,供水商可以两次修改其年需水计划,调度中心也对年供水量作新的预测并修改供水计划。5月1日最终确定全年的供水计划。根据拟定的年供水计划再进行周供水计划的编制,即计算未来1周内每天的供水安排,尽量使月末的水库蓄水与年计划的月末蓄水目标一致。由此可见,加利福尼亚州北水南调工程以90%水平年来水量作为可供水量,其供水保证率很高;通过供水计划的实时修正,使得运行调度符合实际情况,更加合理可行。

2.1.5 先进的自动化调度系统

先进的自动化调度系统为实现调水工程的现代化调度控制提供支撑。国外成功的调水工程基本上都建立了现代科技手段的自动化控制系统以及水系统专用广域网络、专用数据库和专业系统。利用现代信息技术的实时监控技术、计算机技术、通信技术、3S技术等,通过先进的软件设施,提高了信息采集、传输、处理的实效性和自动化水平。譬如:①美国加利福尼亚州北水南调工程,具有一套现代化的通信系统与控制系统,并随着科技的发展不断进行更新。在对升级系统进行选择的过程中,以系统的成熟性、统一性、兼容性和简单性为原则,实践证明,这样可以有效地减少投资和运行维护费用。②美国中亚利桑那调水工程,利用了最先进的现代化数据信号遥测系统,该系统设置了300多个无线电装备的数据信号远程终端装置,以便收集原始数据。数据采集系统和通信系统将控制中心与所有泵站、节制闸和分水闸连接起来。中心对分水闸、泵站、节制闸进行调度,所有运行计划都是由计算机渠道控制软件模拟设置,保持渠道水面的稳定性,保证控制系统对渠道系统控制能力的快速响应,保证水量传输的可靠性,以及使水流断流时间达到最小,系统能长时期保持稳定运行。

2.2 若干关注的问题

2.2.1 生态环境问题

国外调水工程由于建设初期对生态环境问题关注不够,在运行期间大都曾经对生态环境造成一定的负面影响。譬如:①美国加利福尼亚州北水南调工程,工程完工后对环境造成了不良的影响,破坏了加利福尼亚大自然几个"救命岛"(生物赖以生存的地方)中的一个,使该地区大量的鱼类资源消失;河道上游淤积带来了与之相关的许多不良后果;由于固体径流的减少和泥沙平衡的破坏,使下游河滩被破坏。②澳大利亚雪山工程,由于农牧业用水主要是农田灌溉与草场灌溉,引水量大,排出的水体把农药、化肥及有机物、盐分带往下游,因此州政府严格控制农牧业用水量增长。为了保证雪山工程供水系统中有诸多水库不受淤积的威胁,政府极为重视水土保持工作。澳大利亚地下水虽然很丰富,但大片土地受到盐碱化威胁,政府一方面严格控制农业用水量的增加,另一方面鼓励投资更新灌溉技术,严格控制河道取水,以保证河道有足够的流量冲洗盐分,降低土壤盐渍化。③巴基斯坦西水东调工程,改善了全国水资源配置状况,促进了经济和社会的发展,效益显著[9-10]。但工程运行后发现排灌系统规划不完善,输水损失严重,灌溉河道渗漏,大量河水流失,并造成大量土地完全或部分渍涝、土壤盐碱化发展等问题。巴基斯坦工程设计与施工部门随后采取了渠道防渗衬砌、土地平整、管井排水等措施,使印度河流域灌区面貌随之改观。巴基斯坦西水东调工程的开发经验教训及其对生态环境方面的影响,为发展中国家开发本国水电资源提供了有益的借鉴。

2.2.2 水价问题

国外成功的调水工程均对用户的取水进行收费,但其制定水价的方法不同。大多数调水工程均成立管理公司,以不盈利为原则,公司运行自负盈亏,政府不予以任何补贴。因此,如何合理地制定水价,是大多数调水工程都关注和考虑的问题。总体来说,水价是在考虑管理单位收入对水价影响的基础上制订的,一般包括基本水价和运行费。基本水价对于各用水户来说是相同的,而运行费则根据输水距离等因素而不同。如美国加利福尼亚州北水南调工程,建设资金主要来自向社会发行债券、加利福尼亚州水基金、联邦防洪工程拨款、加利福尼亚州旅游工程授款、水合同预付款等。投资分摊于工程的各个方面,要求工程受益者偿还工程全部建设投资及利息,并支付运行维护费,工程的主要偿还资金为水费。加利福尼亚州北水南调工程涉及州水资源局

和 29 个水管单位，均为公共事业单位，以不盈利为原则，但财务收支每年必须持平，自负盈亏，政府不给予任何补贴。加利福尼亚州的水价 = 基本水价 + 运行费。基本水价 = 20 美元/AF(1AF = 1 233.5 m^3)，而运行费 = 操作运行费 + 运行维护费 + 燃料动力费 + 折旧费。最小运行维护、电力消耗、更新改造费用用于回收输水设施不按实际输水量计算的运行费用(即基本水费)，可变运行维护、电力消耗、更新改造费用是回收输水设施与实际输水量有关并随之变化的运行费用(即计量水费)。根据实际情况，其水价每年核定 1 次。

3 对南水北调中线工程运行调度的启示

国外许多已建跨流域调水工程经过了比较长时间的成功运行，实践证明其运行调度有着许多值得学习和借鉴的地方，当然也存在着一些问题和需要思考的地方。我国南水北调中线工程有其自身特点，如：不仅跨流域而且还跨多个省(直辖市)；没有在线的调节水库；水源地丰枯变化较大，对受水区是补充水源等。其运行调度应在汲取国外跨流域调水工程成功经验的基础上，针对中国国情，提早考虑国外已建跨流域调水工程关注的问题，避免类似问题的发生，实现南水北调中线水资源科学合理地运行调度。从以上介绍的几个调水工程经验中，有以下几点启示：

a. 国家应针对运行调度制定相关的、完善的法律法规。如中线水量运行调度管理条例等，对工程的运行调度给予指导性意见，保障工程科学合理地运行调度。

b. 实行统一管理。从国外调水工程的成功经验来看，统一管理水资源很重要。目前，南水北调中线建设管理单位为中线干线建设管理局和中线水源公司，将干线和水源分开管理，这在建设期问题不大，但运行期会给调度带来矛盾。另一方面，从丹江口引水后，1 400 多 km 的输水线路上没有在线调节水库，两侧的水库除京石段应急供水工程中河北省的 4 座水库可与总干渠连接外，其他水库目前大都与总干渠无直接联系；而且这些水库的调度权均在地方。在中线运行调度中，目前的体制无法对中线干线及其沿线的水库进行水资源的统一管理。建议借鉴国外调水工程成功经验，研究中线工程管理体制机制，建立水资源统一管理的方案，通过中线干线、中线沿线水库、配套工程以及受水区的统一管理，提高中线供水保证率，充分发挥中线工程的效益。

c. 建立科学的水资源调度体系。南水北调中线线路长，跨越若干个不同气候区，水源区与受水区受气候、流域水文特性及人类活动等影响，流域水文特性存在随机性、不确定性和准周期性等多种变化，降水和径流特征亦表现为丰枯交替变化，年际、年内变化较大，其需水也相应存在一定的不确定性。南水北调运行调度过程中，如何在以城市生活和工业供水为主的基础上同时兼顾生态用水，减少地下水的开采，实现对地下水的回补，控制地面沉降，逐步改善受水区的生态环境；如何将原来城市用水中挤占农业的水量归还农业，并且利用经处理后的部分或全部调水的回归水解决农业用水不足等问题，是关系到中线供水目标能否全面实现的重要问题。因此，需要研究水源区与受水区不同丰枯组合条件下的水资源调度和南水北调中线工程给农业、生态环境相机供水的机制和准则。在此基础上，制定科学合理的供水计划(年计划、月计划)以及运行调度中分水闸、泵站、节制闸的调度计划，为南水北调中线运行调度提供支撑。

d. 开发自动化系统。南水北调中线分水口门的规模差别很大，有的几十个流量，有的才一个流量，在运行调度时要求节制闸和分水闸是联动的，这就使得闸门的控制需要精细的操作。南水北调中线贯通后，需要应用科学的调度系统进行水资源调度。南水北调中线水资源调度系统应具有快速完成各类调水业务信息收集处理、编制科学有效的水资源调度方案以及应付各种险情的应急调度方案、实时控制监视调度方案的实施、对水资源调度过程进行滚动评价并能实时迅速地修正调度方案、为南水北调中线水资源调度管理各项工作提供信息服务和分析计算手段等功能。这些功能的实现离不开完善的自动化系统。因此，在工程建设的同时应通过沿途铺设光缆、布设检测器材等手段，做好工程的软件系统建设，最终运用高科技手段在工程运行调度时随时掌握调水工程的运行状况，有效地对调水工程进行控制。

e. 避免对生态环境的不利影响。南水北调中线工程建成后，库区及上游地区如不按污染防治规划实现水资源保护，其点源污染和面源污染对水源区的影响在短期内不会减轻。因此，应同步实施污染防治规划，以减少调水的影响。对于汉江中下游地区，水库下泄的造床流量减少，水位下降，河道可能产生萎缩，水的环境容量变小，进一步影响水的物理自净能力，虽有汉江治理 4 项措施可以弥补，但在运行调度中还应密切关注。南水北调中线工程将有效地增加受水区的可供水量，但废污水的排放量也将明显增加，这些废污水如果不进行有效处理，将会对受水区造成严重的“二次污染”，恶化环境。因此，

南水北调中线工程的运行可能会对水源区、受水区产生一些不利的影响，应尽早采取适当的措施减少南水北调中线工程对生态环境的影响，避免与已建调水工程发生类似的生态环境影响。

f. 探寻计划与市场相结合的水价模式。南水北调中线干线建设所需资金较多，国家并没有实行全额拨款，而是采用多元化、多层次、多渠道的方式进行资金筹措，地方资金在总体投资中占有一定的比例；对于配套工程，基本由地方筹措资金。多元化的投资主体必然带来多元化的产权，产权关系的多元化使得运行调度中的水价问题变得复杂。在实际的运行调度中应把政府宏观调控、民主协商和水市场紧密结合起来，制定合理的水价，必要时进行水市场交易，确保南水北调中线工程建设费用能够收回，维持管理企业的正常运行，同时避免水资源的浪费。

4 结 语

南水北调中线工程是一项涉及多部门、多区域、多流域的大型调水工程，其运行管理与调度十分复杂。鉴于其问题的复杂性，南水北调中线工程的运行调度应充分吸收国外跨流域调水工程成功的经验，提早考虑其在运行调度过程中关注的问题。本文针对国外跨流域调水工程的共性，根据我国南水北调中线工程自身的特点，分析对南水北调中线工程运行调度的有利启示，为南水北调中线工程运行调度提供借鉴，以期最终实现南水北调工程科学合理的运行调度。

参考文献：

[1] 杨立信. 国外调水工程[M]. 北京：中国水利水电出版社，2003.

[2] 郑连第. 世界上的跨流域调水工程[J]. 南水北调与水利科技，2003，1(增刊)：8-9.

[3] 姿广艳，周孝德，韩娜娜. 调水工程的发展及趋势[J]. 水利发展研究，2004(9)：43-45.

[4] GILL G S，GRAY E L，SECKIER D. The California water plan and its critics，a brief view [C]//SECKIER D. California Water：a Study in Resource Management. Berkeley：University of California Press，1971.

[5] 皮钧，熊雁晖. 加利福尼亚调水工程对我国调水工程的启示[J]. 南水北调与水利科技，2004，2(4)：50-52.

[6] Central Arizona ater Conservation District (CAWCD). Central Arizona Project[EB/OL]. [2002-12-18]. http://www.cap-az.com.

[7] 李运辉，陈放耘，沈艳忱. 美国中亚利桑那调水工程[J]. 水利发展研究，2003(3)：55-58.

[8] 中华人民共和国水利部赴澳大利亚雪山工程考察团. 澳大利亚雪山工程[C]//中华人民共和国水利部. 国(境)外水利水电考察与学习报告选编. 北京：海潮出版社，2000.

[9] The Pakistan Water and Power Development Authority (WAPDA). Water wing[EB/OL]. [2002-12-16]. http://www.pakwapda.com/htmls/water-index.html.

[10] 魏昌林. 巴基斯坦的西水东调工程[J]. 世界农业，2001(6)：26-28.

(收稿日期：2007-03-29 编辑：高建群)

(上接第 78 页)

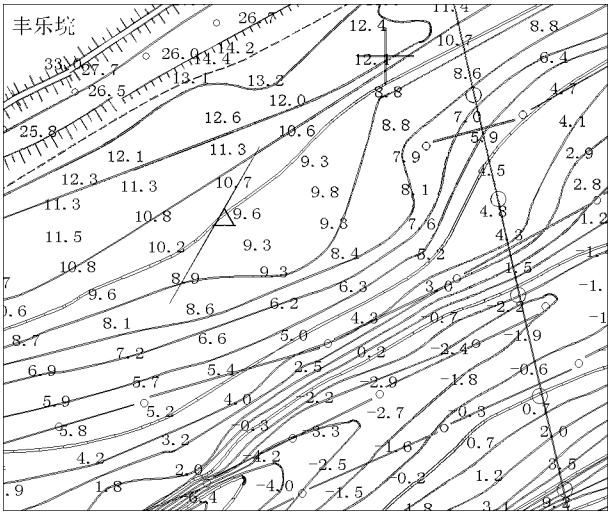

图 3 王家渡水道地形示意图

条件限制，实现了从数据采集至最终数字地形图生成的自动化，大幅度减轻了测量人员的内、外业劳动强度，能充分发挥快速和高精度定位的优势。

b. 测试结果表明，SF-2050G 型星站差分 GPS 有独特优势。星站差分 GPS 初始化成功后，定位精度可小于 15 cm，而且随着时间的增长其定位精度可收敛至 5 cm，较传统 RTD 伪距差分 GPS 的亚米级精度大幅度提高，接近 RTK GPS 的厘米级精度，满足《河道观测规范》和《工程测量规范》的限差要求，适用于不同比例尺的水下地形测量。

c. 星站 GPS 的差分改正值通过 Inmarsat 同步卫星传播，所以用户可以单机作业，不必建立本地基准站，即能广泛应用于北纬 76°到南纬 76°的江、河、湖、海的各种水下地形测量，大幅度提高了测量效率与精度。

参考文献：

[1] 杨飞，马耀昌. GPS 在水下地形测量中的应用研究[J]. 地理空间信息，2006，4(3)：20-22.

[2] 董世伟. SF-2050 测试报告[R]. 上海：SDS 公司，2003.

[3] 何江，杨正金. 星站差分 GPS 培训及基本理论[R]. 上海：上海天测科技有限公司，2003.

(收稿日期：2007-11-24 编辑：高建群)