



引汉济渭跨流域 复杂水库群联合调配研究

李瑛 白涛 杜小洲 黄强 刘晋 刘登峰 等 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn



引汉济渭跨流域 复杂水库群联合调配研究

李瑛 白涛 杜小洲 黄强 刘晋 刘登峰 等 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

· 北京 ·

内 容 提 要

本书以引汉济渭工程为中心,开展了引汉济渭跨流域复杂水库群联合调度研究。本书主要内容包括:引汉济渭工程概况;分析了汉江与渭河的径流特征,揭示了引汉济渭工程调水区汉江流域与受水区渭河流域径流的丰枯遭遇规律;构建了工程调水区水库群联合调度模拟模型、单目标调度模型和多目标调度模型,制定了引汉济渭工程联合运行的调度图和调度函数,阐明了多年调节水库三河口年末水位的消落规律;通过受水区经济发展指标预测与水资源供需平衡分析,构建了受水区水资源配置方案,建立了单水源、多水源不同方案下的水资源配置模型,获得了引汉济渭工程受水区水资源配置成果;建立了多种方案的评价模型,评价了水库群调度方案、水资源配置方案和工程调度方案的风险。

本书供从事跨流域调水工程的规划设计与运行管理、水库群联合调度、水资源优化配置等相关专业的科研、设计和运行管理人员参考,也供大专院校水利类相关专业的师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

引汉济渭跨流域复杂水库群联合调配研究 / 李瑛等
著. — 北京:中国水利水电出版社, 2020.5
ISBN 978-7-5170-8562-1

I. ①引... II. ①李... III. ①跨流域引水—并联水库
—水库调度—研究—陕西 IV. ①TV697.1

中国版本图书馆CIP数据核字(2020)第079728号

书 名	引汉济渭跨流域复杂水库群联合调配研究 YINHANJIWEI KUA LIUYU FUZA SHUIKU QUN LIANHE DIAOPEI YANJIU
作 者	李瑛 白涛 杜小洲 黄强 刘晋 刘登峰 等 著
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路1号D座 100038) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn
经 售	电话: (010) 68367658 (营销中心) 北京科水图书销售中心(零售) 电话: (010) 88383994、63202643、68545874 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	清淤永业(天津)印刷有限公司
规 格	184mm×260mm 16开本 15.75印张 383千字
版 次	2020年5月第1版 2020年5月第1次印刷
印 数	0001—1000册
定 价	78.00元

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社营销中心负责调换

版权所有·侵权必究

前 言

陕西省是一个水资源短缺且分布不均衡的省份，全省 71% 的水资源分布在长江流域的陕南地区，而土地面积、人口、经济总量分别占全省 65%、77% 和 90% 的关中、陕北地区，水资源量只占全省的 29%，缺水成为制约陕西省经济社会发展和生态环境改善的重要因素。为了更好地解决关中、陕北地区的水资源短缺问题，实现水资源的优化配置，促进陕南、关中、陕北三大区域协调发展，陕西省决定从长江的最大支流汉江流域调水到黄河最大支流渭河流域的关中地区，兴建统筹三大区域、联通南北两大水系的引汉济渭水利枢纽工程（以下简称“引汉济渭工程”）。陕西省引汉济渭工程是国务院确定的 172 项节水供水重大水利工程之一。工程建设过程中不仅要首次穿越世界十大山脉之一的秦岭，还要攻克世界第一深埋的超长隧洞施工等诸多技术难题，更要同步解决工程生态环保及移民等诸多问题。因此，引汉济渭工程是陕西省历史上规模最大、影响最为深远的战略性、基础性和全局性水资源配置工程。引汉济渭工程跨黄河、长江两大流域，横穿秦岭，年均调水规模 15 亿 m^3 。竣工后，汉江水将通过秦岭输水隧洞调入关中各受水区，用以满足西安、咸阳等城市及沿线 6 个工业园区用水，惠及 2700 万人，可补充 500 万亩耕地的农业用水，是缓解关中渭河沿线城市和工业缺水问题的根本性措施。

引汉济渭工程分为一期工程（调水工程）和二期工程（输水工程）。调水工程包括黄金峡水利枢纽、三河口水利枢纽和 98.3km 的秦岭输水隧洞。汉江水通过秦岭输水隧洞调入关中后进入输配水工程，通过南干线和北干线输配到关中各受水区。目前，引汉济渭一期工程中三河口水利枢纽已下闸蓄水，正在进行表孔浇筑作业；黄金峡水利枢纽电站工程进行首仓混凝土浇筑；秦岭输水隧洞已掘进 93.5km，剩余 4.8km；顺利召开了引汉济渭二期工程可研报告评估会，为二期工程奠定了坚实的前期基础。随着引汉济渭工程实践工作的不断推进，为尽快发挥跨流域工程效益，亟须开展引汉济渭跨流域复杂水库群联合调度研究。

2012 年，西安理工大学水资源调控团队承担了陕西省水利科技计划项目《陕西省引汉济渭工程水资源合理利用和调配的关键技术研究》（项目编号：2012slkj-02）。2015 年，水利部将《引汉济渭跨流域复杂水库群联合调度研究》（2015—2017 年）批准列为最后一批水利公益性行业科研专项经费项目（项目编号：201501058），西安

理工大学作为项目承担单位，会同陕西省引汉济渭工程建设有限公司、珠江水利委员会珠江水利科学研究院两家协作单位，历时3载共同开展了引汉济渭工程的复杂水库群联合调度和水资源配置的攻关研究工作。2019年11月，水利部国际合作与科技司组织有关技术专家，对《引汉济渭跨流域复杂水库群联合调度研究》进行了验收。经项目验收专家评估，项目综合评价7A，按期全面完成任务，项目取得突出进展，顺利通过验收。本书正是将近几年针对陕西省引汉济渭工程水资源利用与配置、水库群联合调度等研究所积累的科研成果，通过系统地总结和凝练撰写完成的，取得的科研成果，可为引汉济渭工程的调度和管理提供科学依据和技术支撑，将产生显著的经济效益、社会效益和生态效益。

全书共16章。西安理工大学李瑛、黄强撰写了第1章；陕西省引汉济渭工程建设有限公司杜小洲、陕西省水利电力勘测设计研究院马永胜撰写了第2章；珠江水利委员会珠江水利科学研究院刘晋撰写了第3、4章；西安理工大学白涛、刘登峰撰写了第5章；西安理工大学李瑛撰写了第6、9章；西安理工大学李瑛、白涛撰写了第7、8、11、12章；西安理工大学李瑛、黄河勘测规划设计有限公司张永永撰写了第10章；西安理工大学白涛，陕西省引汉济渭工程建设有限公司张中东、宋晓峰、肖瑜、徐国鑫撰写了第13章；西安理工大学白涛撰写了第14、15章；西安理工大学黄强、李瑛，陕西省引汉济渭工程建设有限公司杜小洲撰写了第16章。本书由西安理工大学白涛统稿，黄强教授审稿。

本书的出版得到了水利部国科司、陕西省水利厅、陕西省引汉济渭工程建设有限公司、珠江水利委员会珠江水利科学研究院等单位的大力支持，陕西省水利厅孙平安教高、陕西省引汉济渭工程建设有限公司苏岩教高、长安大学张洪波教授、西北大学蒋晓辉教授、西安理工大学王义民教授、畅建霞教授等专家、同行给予了长期指导和帮助，在此表示衷心的感谢。武连洲博士在全书修改、修订中付出了辛劳，在此一并表示感谢。

本书受到国家重点研发计划项目（2017YFC0405900）、水利部公益性行业科研专项经费项目（201501058）、陕西省自然科学基金基础研究计划-联合基金项目（2018JQ5145）、陕西省水利科技计划项目（2017slkj-16、2017slkj-27）和中国博士后科学基金项目（2017M623332XB、2019T120933）的资助，在此表示感谢。

限于作者的能力和水平，书中难免存在错误和纰漏，恳请读者斧正，可将有关意见和建议发送至电子邮箱：wasr973@gmail.com。

目 录

前言

1 绪论	1
1.1 研究背景及意义	1
1.2 研究进展	2
1.3 研究内容	8
1.4 技术路线	9
2 研究区域概况	10
2.1 流域概况	10
2.2 工程概况	13
2.3 本章小结	23
3 径流特征分析	24
3.1 径流特征分析方法	24
3.2 调水区径流特征分析	28
3.3 受水区径流量特征分析	36
3.4 本章小结	47
4 丰枯遭遇分析	49
4.1 丰枯遭遇分析方法	49
4.2 调水区水库间来水丰枯遭遇	52
4.3 受水区代表性站点间丰枯遭遇	64
4.4 调水区与受水区丰枯遭遇	78
4.5 本章小结	95
5 典型年选择	96
5.1 典型年选择方法	96
5.2 典型年的选取	99
5.3 推荐典型年	109
5.4 本章小结	110
6 引汉济渭水源区水库群联合调度模拟模型	111
6.1 水源区调度节点图	111
6.2 方案集设定	112
6.3 模拟调度模型的建立	112
6.4 模型求解方法——自迭代模拟算法	114

6.5	结果分析	115
6.6	本章小结	125
7	引汉济渭复杂水库群跨流域调水单目标模型	126
7.1	方案集设置	126
7.2	梯级电站多年平均发电量最大模型	126
7.3	梯级泵站多年平均耗能最小模型	126
7.4	约束条件	127
7.5	模型求解方法	128
7.6	结果分析	132
7.7	本章小结	138
8	引汉济渭跨流域复杂水库群多目标调度模型	139
8.1	问题描述	139
8.2	模型建立	139
8.3	求解方法	141
8.4	结果分析	144
8.5	本章小结	148
9	调水工程联合调度运行方式以及消落水位规律分析	149
9.1	调度图编制	149
9.2	水库联合调度函数	151
9.3	三河口年末消落水位规律	155
9.4	本章小结	164
10	引汉济渭工程受水区经济发展指标预测与水资源供需平衡分析	165
10.1	经济发展指标预测	165
10.2	供需水预测	166
10.3	供需平衡分析	168
10.4	受水单元水价制定	169
10.5	本章小结	169
11	引汉济渭工程受水区水资源配置方案及关键技术研究	171
11.1	水资源配置思路	171
11.2	水资源配置原则及蓄供水方式	171
11.3	引汉济渭工程受水区水资源系统网络节点图制定	172
11.4	引汉济渭受水区水资源合理配置方案设置	174
11.5	引汉济渭受水区水资源合理配置模型建立及求解	174
11.6	本章小结	183
12	引汉济渭受水区水资源合理配置成果分析	184
12.1	单水源方案下的水资源配置成果分析	184

12.2	多水源方案下的水资源配置成果分析·····	190
12.3	典型年调配成果分析·····	193
12.4	引汉济渭受水区“虚拟库容”的探讨与分析·····	196
12.5	本章小结·····	197
13	方案评价方法选取及模型建立·····	199
13.1	模糊优选法·····	199
13.2	基于非负矩阵分解原理的方案优选方法·····	202
13.3	投影寻踪法·····	204
13.4	多方法评价结果一致性分析·····	206
13.5	本章小结·····	206
14	引汉济渭水库群调度方案评价·····	207
14.1	评价准则及思路·····	207
14.2	评价指标体系构建·····	207
14.3	调度方案评价·····	208
14.4	本章小结·····	212
15	引汉济渭受水区水资源配置方案评价·····	213
15.1	评价准则及思路·····	213
15.2	评价指标体系构建·····	213
15.3	受水区水资源配置方案的评价·····	216
15.4	本章小结·····	232
16	引汉济渭工程调度方案风险评价·····	233
16.1	引汉济渭工程风险因子识别·····	233
16.2	水库调度方案风险评价·····	234
16.3	方案综合评价·····	238
16.4	本章小结·····	239
参考文献		240

1 绪 论

1.1 研究背景及意义

水是生命之源，同阳光、空气一样，是人类不可或缺、最基本、最必需的自然资源，是一切人类活动的基础。水资源作为自然基础资源，不仅对生态环境等方面起控制性因素，而且作为具有战略性的经济资源，已然成为一个国家综合国力的重要组成部分，更是当今各国政府乃至全球共同关注和讨论的重点议题之一。随着世界人口的增长和经济的快速发展，人类对于水资源的需求量日益增多。我国水资源稀缺、时空分布不均，导致供需矛盾十分突出，严重制约了部分地区社会、经济的可持续发展。

关中地区是陕西省的“工业走廊”和粮食主产区，在国家与陕西省经济社会发展中处于十分重要的地位。近年来，关中地区经济社会快速发展，对水资源的需求不断增加，造成关中地区地表水、地下水资源过度开发利用。关中地区经济社会用水主要水源是渭河，渭河也是沿岸地下水的重要补给源。渭河流域水资源严重短缺，造成水资源供需矛盾极为突出，流域地表水过度开发，地下水严重超采，城市用水挤占农业和生态用水严重，引发渭河干支流河道频繁断流，水污染不断加剧，生态环境问题日益突出，成为制约关中经济社会发展的重要因素。

陕西省引汉济渭工程是缓解陕西省关中地区水资源短缺的重要措施之一，充分利用汉江流域上游的水资源，将汉江流域的水引至渭河流域，称为陕西省的“南水北调工程”；引汉济渭工程可以有效缓解关中地区的水资源供需矛盾，改善渭河流域生态，保证农业用水和生态用水，降低渭河流域的缺水率，提高地区水资源的使用效率，是促进关中乃至全省经济与社会可持续发展的重要举措。引汉济渭调水工程主要包括黄金峡水库和三河口水库及其相应的电站、泵站。目前，两座水库已经在建，预计 2020 年三河口水库可以投入使用，先一步实现单库运行供水。

汉江水量丰富，但是引汉济渭工程建成后，汉江因而成为陕西省关中地区和国家南水北调中线调水工程的水源地。因此，汉江上的水量调度好坏直接决定了关中地区、南水北调中线工程调水以及汉江流域中下游的用水安全，黄金峡水库和三河口水库的联合调度显得尤为重要。目前，针对两座没有完工的水库的研究均停留在理论研究阶段，主要是针对引汉济渭工程受水区水资源配置方面的研究，对于如何使黄金峡水库和三河口水库更加高效的共同完成调水任务以及如何在满足调水任务的情况下，使发电量和耗能达到最优等泵站、水库的优化调度研究，均是目前调水区两座水库调度亟须解决的问题。

引汉济渭工程的总体布局为：在汉江干流修建黄金峡水库，并在其支流子午河上修建三河口水库，由黄金峡泵站自黄金峡水库抽水，提水后经秦岭隧洞（含黄三段和越岭段）输水至黑河金盆水库下游黄池沟；当黄金峡泵站抽水流量小于受水区需水要求时，由三河

口水库通过连接洞补充供水至秦岭输水隧洞；当黄金峡泵站抽水流量大于受水区需水要求时，富余的水量通过连接洞由三河口泵站抽水入三河口水库存蓄。

引汉济渭工程是缓解陕西省关中地区水资源短缺的重要战略性工程。该工程将陕南富集的水资源调入缺水的关中地区，适时调整省内水资源的时空分布，以缓解关中地区水资源分布与经济社会发展格局不协调的矛盾。随着引汉济渭工程的实践工作的不断推进，为尽快发挥跨流域工程效益，急需开展引汉济渭跨流域复杂水库群联合调度研究。

引汉济渭跨流域复杂水库群联合调度研究，可为引汉济渭工程的调度和管理提供科学依据和技术支撑，将产生显著的经济效益、社会效益和生态效益。具体来讲，可分为以下几个方面：①每年可增加 3%~5% 的有效供水量，相当于 0.45 亿~0.75 亿 m^3 的水量，若按 1 元/ m^3 计算，可产生 0.45 亿~0.75 亿元的经济效益；②提高关中地区的供水量和供水保证率，保障西安国际化大都市发展和供水安全；③回补地下水，改善渭河流域生态环境；④发展跨流域水库群联合调度的理论和技术。

1.2 研 究 进 展

1.2.1 水库联合调度

Masse 提出水库优化调度问题后，但直到 20 世纪 50 年代，系统分析、优化模型的引入以及计算机技术的发展才使得水库调度问题在理论和应用研究上取得很大的进步与发展。1955 年 Little^[1] 采用马尔科夫原理建立的随机动态规划调度模型为水库优化调度的研究打开了先河。1970 年 Loucks 等^[2,3,4] 提出策略迭代法求解马氏决策规划模型的。1974 年 Aslew^[5] 利用概率约束法替换机会约束法展开随机型模型研究。1977 年 Rossman^[6] 把 Lagrange 乘子理论与随机约束问题结合起来，得到动态规划解，使破坏的期望值被约束在一个常数以下。

随着水电的梯级开发，国外学者对梯级水库群优化调度展开了大量的研究。1981 年 Turgeon 等^[7,8,9] 集合随机动态规划算法和解集逼近法，求解出并联水库群水力发电系统的优化解。1983 年，Marino M 等^[10] 提出了基于机会约束线性规划（CCLP）和动态规划（DP）的多目标水库最优月出库可靠性规划模型。1988 年 Foufoula 等^[11] 应用梯度动态规划算法水资源系统的“维数灾”问题，使求解更加高效运行。1992 年 Karamouz 等^[12] 提出贝叶斯随机动态规划用来解决高维系统维数灾的问题，提高了计算效率。1997 年 Oliveira 等^[13] 利用 GA 生成并优化水库群系统的调度规则，提高水资源调配的效率。

20 世纪 60 年代，国内学者开始对水库优化调度展开研究。1960 年吴沧浦首次提出了年调节水库的最优运用 DP 模型^[14]。随后，谭维炎等^[15] 根据动态规划与 Markov 过程理论，建立了长期调节水电站水库的优化调度模型，并应用在狮子滩水电站的优化调度中。张勇传等^[16] 在建立柘溪水电站水库优化调度模型时，用时空离散简单 Markov 过程描述径流过程，面临时段入流则由短期预报提供，寻优方法采用可变方向探索法，虽绘制优化调度图仍用 Bellman 最优化原理，但由于引进了惩罚项，因而提高了调度图的可靠性。董

子敖等^[17]在研究刘家峡水电站水库优化调度时,提出了国民经济效益最大的目标函数,在寻优技术方面,采用了满足保证率要求的改变约束法,以控制破坏深度。

20 世纪 80 年代国内开始对水库群优化调度研究。1981 年,张勇传^[18]等建立了水库群联合调度分解协调模型,获得拓溪、凤滩两并联水电站的总体最优调度策略。1988 年胡振鹏^[19]提出基于动态大系统和多目标递阶分析理论的分解-聚合方法,解决跨流域水库群供水优化调度中存在的多层次、多目标和多时段复杂优化问题。1997 年黄强等^[20]建立了水库群优化调度的多目标多模型系统,继而提出了大系统分解协调算法。1983 年纪昌明等^[21]研究了基于 DDDP 法的混联水电站群动能指标和长期调度的优化。梅亚东等^[22]以黄河上游水库群为研究对象,提出了应用于水库群联合调度的 DP 与 DDDP 的组合求解算法,即先用 DP 获得初始可行解,再利用采用 DDDP 进行精细搜索的组合动态规划方法,具有一定的创新性和实际应用价值。2005 年李亮等^[23]对大系统分解协调方法和逐次优化法在梯级水电站联合调度问题进行了较深入的对比分析研究。水库调度决策与决策者的影响密不可分,故张勇传^[24]、吴信益^[25]将模糊数学理论引入水库优化调度中,降低人为因素的模糊性对水库调度的影响,随后王本德^[26]、程春田^[27]、谢新民^[28]等更深一步丰富了模糊数学理论在水库群优化调度研究中的实践,并将这些理论成功应用到防洪系统的优化调度中,均取得了很好的效果。

常见的单目标优化调度主要是围绕单一目标为目标函数建立调度模型,例如发电目标,防洪目标,生态目标,供水目标等,自优化调度出现以来,在国内外学者的共同努力下,在单目标优化调度在建模、求解方法和应用上取得很大的成就。线性规划,动态规划,遗传算法,粒子群算法等寻优求解方法已经广泛地应用在单一水库和水库群优化调度中,并取得了较好的效果。这里不再赘述。

最初,国内外学者是从单目标问题开始研究水电站水库群调度的,而水电站水库群是一个大型水利枢纽系统,通常需要兼顾发电、防洪、供水、灌溉等多种功能,其本质上是一个具有复杂约束条件的多目标优化问题。20 世纪 80 年代,国内外学者们开始研究水电站水库群多目标优化问题。水库群优化方法主要分为两大类:传统多目标优化方法和多目标智能优化方法^[29]。

1.2.1.1 传统多目标优化方法

最初多目标优化调度问题是以单目标优化为基础,以约束法、层次分析法、线性加权法、理想点法为主要的处理手段,根据决策者的主观因素,将多目标优化问题转化为单目标优化问题进行求解。因此,其本质上还是单目标优化问题,这种方法存在一些不足的地方,比如要求调度人员具有很高的专业水平,不利于工程实际应用。1979 年,George W 等^[30]将动态规划进行延伸引入多目标动态规划,成功克服了现有方法对多目标问题难以定量化分析的难题。1986 年,董子敖和阎建生^[31]提出了多目标多层次优化方法,即把水库群多目标问题经转化成为维度相对较低的子问题,通过对简单子问题模型的求解,克服“维数灾”的难题。同年,张玉新^[32]建立了多维决策多目标动态规划模型,并通过实例分析论证了其通用性和有效性。1992 年,林翔岳等^[33]采用多目标分层序列法把四目标五水库系统的多目标优化问题分解为双层单目标优化问题进行求解。1995 年,贺北方等^[34]

运用自优化模拟技术解决两库多目标优化调度问题,实践证明,该方法是克服高维系统“维数灾”的有效途径。1997年,黄强和沈晋^[35]在探讨黄河干流水库调度相关问题的基础上,建立了基于多目标的模型系统及相应求解方法,对解决复杂河流水库群联合优化调度具有实际参考价值。1998年,杨侃和陈雷^[36]把多目标分层排序网络分析模型拓展到多目标梯级水电站调度的网络分析中,建立了梯级水电站群多目标网络分析模型。2004年,陈洋波等^[37]以发电量和保证出力为目标函数,建立了的清江流域梯级水电站多目标联合优化调度数学模型,并提出了求解多目标优化模型最优解的交互式决策偏好系数法。2008年,高仕春等^[38]采用约束法将多目标转化为系统发电效益最大的单目标,建立了优化调度模型,较大程度上提高了系统经济效益,可为相似流域提供参考。

1.2.1.2 多目标智能优化算法

目前,计算智能技术正处于快速发展阶段,对智能模拟方法的研究也已经取得了显著成果。但是,由于各智能算法本身的限制,使得多目标调度在实际的工程应用中存在的问题,因此,需要将各种智能模拟算法结合起来,弥补彼此缺陷的同时发挥各自的优势,得到更好的解决问题的方案。多种计算方法的结合为该技术在工程实践中的广泛应用带来了光明的发展前景,其中,进化算法在水库的多目标调度中取得了较大的研究成果。

进化算法是将每一个可能的解作为群体中的个体元素,通过简单的交叉、变异等操作对群体进行进化,把生存和繁殖的机会留给适应性较强的个体。它包括遗传算法、蚁群算法、粒子群算法等。与其他智能计算方法相比,进化算法更适合用于处理那些不能用传统方法求解的复杂优化问题。随着智能计算的发展,具有并行特性的进化算法体现出对解决多目标优化问题具有很大优势。有进化多目标优化始于1967年,Rosenberg^[39]提出了使用遗传算法解决多目标优化问题,但是当时多目标优化被表述为单目标问题,并没有建立实际的多目标优化算法,采用遗传算法进行求解。1984年,David^[40]提出第一个设计多目标进化算法——向量评价遗传算法。21世纪以来,很多学者将多目标进化算法用于解决梯级水电站水库群多目标优化问题,并取得了一些成果,但仍处于初步研究阶段。2004年,朱仲元等^[41]利用基于目标序列的排序矩阵评价个体适应度的多目标遗传算法,制定了串联水库系统的优化运行方案,并说明了多目标遗传算法的优势所在。2006年,Kim等^[42]针对Han River流域的四水库两目标调度问题,利用NSGA-II算法进行求解,获得了令人满意的效果。2007年,Janga和Nagesh^[43]提出一种用于求解水库群多目标调度问题的多目标差分进化算法,取得比NSGA-II更好的优化效果。2007年,Li Chen等^[44]提出了一种用于确定以用水和发电为目标的综合利用水库调度图的基于宏进化的多目标遗传算法。同年,杨俊杰等^[45]提出了一种新的基于自适应网格技术的多目标粒子群优化算法,为求解大规模多目标优化问题提供了一种有效手段。2008年,Alexandra和Darrell^[46]建立了基于多目标粒子群算法的水库群优化调度模型,并指出该模型的缺点如对算法参数的选择较为敏感等。综合以上研究,目前,比较成功的多目标进化算法有NPGA、NSGA、SPEA,PAES和MOPSO。

1.2.2 水资源配置

国内对于“引汉济渭”工程的研究主要以受水区的水资源配置为主。2010年,张永

永等基于大系统分解协调理论建立了引汉济渭工程受水区水资源优化配置模型,考虑工业节水和引汉济渭不同调水量,得出引汉济渭工程是解决关中地区水资源短缺的重要保障。2011年,畅建霞等^[47]建立了引汉济渭受水区用户、供水系统的水资源配置仿真模型,论证了调水工程对缓解受水区水资源短缺、保证城市用水、改善渭河河道生态环境方面的主要作用。2012年,杨晓茹等^[48]基于系统分析方法,建立了引汉济渭受水区的大系统分解协调模型,以供水区综合效益最大、缺水量最小为全局最优解,得到了2020年、2030年调水工程所调水量的优化配置方案。2013年,黄强^[49]以缺水量最小为目标建立目标函数的陕西省南水北调受水区水资源优化配置进行研究,推荐了2020年、2030水平年的水资源配置最优方案。2014年,付晓杰等^[50]考虑再生水、地表水、地下水和引汉济渭水等多水源联合调度,构建了引汉济渭受水区多水源联合调度模型,分析了不同调蓄水库组合参与调度对各水厂供需平衡的影响。2015年,杨柳等^[51]建立了陕西省引汉济渭与黑河引水工程联合供水系统,绘制水资源系统网络结构图,搭建了水量仿真调度模型,论证了引汉济渭配水的城市用水户供水顺序。

针对“引汉济渭”工程的其他研究体现在调水方案优选、无压隧洞断面优化设计以及秦岭隧洞岭南TBM施工岩爆防治等方面。2012年,李万绪^[52]分析了引汉济渭工程对各相关水电站入库径流量和年发电量的影响。2014年,王佐荣等^[53]从涌水量测算分析、排水方案比选与设计、抽排水系统总体方案设计、实施效果等方面介绍秦岭输水隧洞出口段抽排水方案研究与设计,为秦岭输水隧洞下一阶段的施工积累了经验。

1.2.3 水资源调配方案评价

水资源调配方案评价经历了60多年的创新发展,已经取得了大量的研究成果,涉及的研究内容主要分为以下两个方面:一方面是研究评价方法,另一方面则是确定指标权重,这两方面相互影响、共同提高^[54]。方案评价过程中必然存在着模糊性、不确定性和随机性,所以人们的研究集中在模糊类的评价方法,主要有模糊综合评价法^[55]、灰色系统理论方法^[56]、可拓评价法(物元分析法)^[57]、投影寻踪法^[58]及集对分析法等。确定评价指标权重时的常用方法有层次分析法^[59]、熵权法、主成分分析法等。

国外最早开始水资源调配方案评价模型的研究,1965年美国加利福尼亚大学自动控制专家L. A. Zadeh在*Information and Control*杂志上刊出了一篇创新性科研论文《模糊集合》,从此诞生了模糊数学。之后,由模糊理论为基础出现了模糊综合评判法^[60]。美国匹兹堡大学学者T. L. Salty在20世纪70年代提出了层次分析法(Analytic Hierarchy Process, AHP),该方法对不同方案的决策基于其对预达成目标的重要程度,并得出定量结果,根据结果进行方案优选。美国著名学者A. Charnes和W. W. Cooper等于1978年提出了基于线性规划的数据包络分析(DEA)方法,得到广泛应用。1981年,Hwang和Yoon提出了逼近理想点的排序方法(TOPSIS),被广泛应用于有限个方案的多目标决策分析。神经元的数学模型在20世纪80年代中后期得到迅速发展,并被用于方案决策。1901年,卡尔和皮尔逊提出了主成分分析法(PCA),实质是通过数学变换将多指标变化为少数几个综合指标,极大地简化了方案信息获取过程,并于1993年应用到随机变量领域。1994年,Chen等提出了用于决策分析的Vague集理论,它是对模糊集的扩展^[61]。

2000 年, Bender 等将模糊综合评判法用于不确定性规划中的决策分析, 允许集体意见的主观性差异^[62]。2008 年, Fu 针对模糊环境下多准则决策问题, 提出了一种基于理想解和负理想解的模糊优化方法, 来解决多准则决策问题, 并应用于三峡水库的水库防洪调度^[63]。2011 年, Bahrain 等提出 ELECTRE - TRI 方法, 它是一种多目标评价方法, 解决了决策者偏好不同的问题, 在水库多目标优化调度方案的风险评价中效果良好^[64]。

我国方案评价的研究在 20 世纪 80 年代之后得到迅速发展, 出现了一大批优秀学者。1982 年, 华中理工大学的邓聚龙提出了基于数学理论的灰色系统概念, 并由此得到灰色关联分析法^[65]。1983 年, 我国数学家蔡文基于物元分析提出了物元模型, 实现了定量与定性的结合, 进而衍生出可拓决策方法。1988 年, 陈守煜等^[66]最早提出层次分析模糊优选模型, 为以后的水利工程方案优选提供了一种常用方法。1994 年, 王本德等^[67]在研究梯级库群多目标调度问题时, 针对洪水调度方案提出了切实可行的用于水库多方案决策的模糊优选模型。同年, 黄志中等^[68]提出水库防洪系统的多方案决策模型, 以防洪效果确定评价指标, 充分考虑了防洪系统特点。1996 年李荣钧在《模糊多准则决策理论与应用》中介绍了模糊决策理论基础、模糊多属性决策、模糊多目标决策等最新研究成果^[69]。同年, 邱菀华将熵学理论应用于多准则管理决策中, 建立了管理决策熵学、群决策熵模型分析集结理论。2002 年郭亚军在基于功能驱动原理、差异驱动原理以及综合集成原理提出了一种新的权重系数确定方法, 该方法原理简单、直观易懂, 在动态综合评价方面取得了实际性的成果^[70]。由于不同学科存在交叉和融合, 各学科领域的评价方法存在相似点。2004 年, 陈衍泰等^[71]将综合评价方法归纳、分类, 指出了目前综合评价方法存在的问题, 提出了基于方法集的组合评价新思路。2005 年, 吴泽宁^[72]在黄河流域水资源调控中将效用理论、人工神经网络理论和理想点技术结合, 建立评价模型, 提出了流域水资源调控方案可持续发展评价的准则和量化评价方法。2006 年, 陈守煜等^[73]在水库群联合电力调度多方案优选中提出可变模糊优选模型, 提高了优选决策的可信度, 并应用于松山、小山联合调度方案优选, 同时说明此方法也适用于其他系统优选决策。2009 年, 屈吉鸿等^[74]利用投影寻踪模型对水资源配置方案矩阵进行降维处理, 利用粒子群算法优化投影指标函数, 得到各方案的最佳投影值, 并验证了模型的合理性。2012 年, 田玉浩、韩勇^[75]采用《水库洪水调度考评规定》对水库防洪调度方案进行评价, 证明了方案在预报和调度中可行性。2013 年, 费振宇等^[76]由区域背景特征、水利工程条件、经济社会发展水平、科技生产水平、抗旱组织管理水平 5 个子系统建立抗旱能力评价系统, 用组合赋权法确定指标权重, 用集对分析法建立模型。2015 年, 薛联青等^[77]以叶尔羌河流域作为研究对象, 应用综合效益满意度法和灰色关联度法分别对四种水资源配置方案进行了评价。

1.2.4 水库调度风险决策

风险是相对于可靠性对立互补的概念, 最初的研究始于 20 世纪 30—50 年代, 提出于军工生产部门, 运用概率论研究机器设备维修问题。之后, 经过几十年的发展已经渗透到了各个行业, 并且形成了理论与方法较为完善的边缘科学, 不论是单学科还是综合应用中都取得了重大成就。自 20 世纪 50 年代后期风险被引入水资源领域后, 其应用涉及内容广

泛,包括水文风险^[78]、经济风险^[79]、社会风险^[80]、环境风险^[81]等一系列问题,在其理论发展的同时也给水资源利用带来巨大实际效益。而水库调度中的风险概念和分析方法从20世纪七八十年代才被提出^[82],之后就得到了迅速发展,研究主要集中在风险因子识别、风险分析方法和风险决策等方面。

在水库管理过程中,风险因子的识别与分析是实现之后风险估计与管理的基础,国外关于这方面的研究涉及方面包括水文、环境和工程结构等因素^[83],最早且考虑最多的主要是水文的不确定性,如降水、水库入流等^[84]。在考虑水文影响因子对水库调度风险的影响时,1996年王本德等^[85]提出利用24h降雨预报的水库防洪调度的风险指标及其近似求解方法,即利用蒙特卡罗和观频率假定法。同年,杨百银等^[86]从单库入手结合分析影响梯级水库泄洪风险的不确定性因素,对这两种可靠度和风险分析模式进行了探讨,用求解多变量联合分布函数的方法对洪水本身的不确定性、水库水位等多种因素进行综合分析,计算风险值。20世纪以来,随着风险理论的成熟,调度需要考虑到风险因子不断增多,不仅涉及水文、环境、工程、经济、人为等因素,而且拓展到了气候变化^[87]、时间等因素。但对于不同的水库、大坝等工程,考虑所有可能的风险因素显得不切实际,所以首先要对水库调度可能产生的主要影响因子进行识别后再分析,风险因子识别的方法主要有专家分析法^[88]、事故树法^[89]、幕景分析法、层次分析法、灰色优势关联分析模型^[90]、多元相关分析模型^[91]等,应用这些方法能剔除不重要的影响因素,只需要对主要的风险因子进行量化分析,以便减少风险分析工作,降低分析的难度。例如,吕周洋等在南水北调东线工程中运用等级全息建模方法和鱼骨图等识别了跨流域复杂水利系统中的社会风险因子,归纳了已有的水利工程风险因子识别方法^[92]。

在水库调度的风险估计(分析)研究方面,是从水库大坝的安全风险和洪灾风险研究开始的。1975年,Szidarovszky等^[93]利用线性回归模型、联合概率分布等计算堤防系统的失效概率。20世纪美国、加拿大、澳大利亚等国家的大坝建设如火如荼,因此,在其安全评估等方面做了许多研究工作,大坝风险估计的理论和方法大量涌现,在防洪风险和大坝设计标准制定方面也取得了丰富的研究成果^[94,95]。瑞典政府已经考虑建立大坝安全法规,将风险分析应用于大坝安全隐患加固^[96]。1987年,郭仲伟^[97]做了一系列风险分析与决策的讲座,指出了风险的普遍性、风险分析、风险辨识等理论,促进了水利工程建设风险分析理论的发展。从20世纪50年代风险估计理论开始发展到现在,国内外的方法研究成果有以下几种:直接积分法、均值一次二阶矩法(MFOSM)、改进的一次二阶矩法(AFOSM)、JC(Joint Commission)法以及蒙特卡罗法(MC)等。

在水库调度的风险评价与决策方法研究方面,最初是以单目标研究为主^[98,99],到80年代,水库多目标优化决策问题的研究才引起国内外学者们的关注^[100]。最初多目标决策问题的研究以单目标优化决策理论为基础,以逼近于理想解法、支持向量机法、AHP法、模糊综合评判等方法,将多目标风险决策问题简化为单目标,利于问题的求解。20世纪90年代中期以来,我国有关水库调度风险管理决策方面的研究逐渐出现,同时调度过程中考虑的风险因素也在不断增加^[101],涌现出了许多新的技术和理论方法^[102]。1998年,田峰巍等^[103]提出了水库调度决策中的风险和风险传递的计算方法,统计了水库调度风险决策方法,为决策者提供决策依据;同年,黄强等^[104]对水库调度风险管理的基本模式进

行了研究,为进一步开展水库调度风险管理研究奠定了基础;2002年,李万绪^[105]针对水库风险调度问题,从风险的各个方面进行了论述总结,讨论了风险调度的基本程序;2005年,纪昌明等^[106]通过选取防洪工程体系的典型风险指标,同时结合可拓理论及物元分析方法,建立了综合评判物元模型对防洪工程体系进行风险评价;同年,许新发等^[107]模型以万安水库为研究对象,将发电优化调度模型与随机模型相结合,获得时段末水库蓄水目标和发电目标不能实现的概率,为水库发电调度的风险分析提出了新思路;2006年,李继清等^[108]为解决水电站中长期风险调度问题,应用集对分析理论具体分析,并用一次二阶矩法进行求解,从效益与风险的定量关系确定风险;2010年,段金长等^[109]借助东北电网水调自动化项目,选取了调度过程中的风险指标,采用蒙特卡洛随机模拟的方法建立了发电调度风险分析模型,同时研发了相应的风险分析软件;2014年,王丽萍等^[110]构建了水库调度风险评价指标体系,基于逼近理想解的排序方法和风险的定义式进行了调度方案优选,形成了水库调度风险分析基本模式。

1.3 研 究 内 容

引汉济渭跨流域复杂水库群联合调度研究项目由西安理工大学牵头负责组织项目实施,珠江水利委员会珠江水利科学研究院和陕西省引汉济渭建设工程有限公司作为协作单位参与项目实施。本书以陕西省引汉济渭跨流域调水水库群联合调度开展研究,研究任务包括以下四部分:

(1) 水库群入库径流丰枯遭遇分析。对跨流域调水工程所涉及的水源区、受水区水库的入库径流进行频率分析,并进行各水库的丰枯遭遇分析,进而获取各水库的丰枯过程。

(2) 复杂水库群系统网络图和调度原则研究。针对跨流域调水复杂网络系统,对系统进行概化,构建系统网络图;针对跨流域供水水库群联合调度问题存在的主从递阶结构,构建调水规则和供水规则相结合的跨流域供水水库群联合调度规则,建立确定水库群调水、供水规则的二层规划模型。

(3) 复杂水库群联合调度模型建立及求解。跨流域调水水库群的联合调度,其目标函数往往不止一个,根据调水主要目标,建立受水区缺水量最小为目标的复杂水库群联合优化调度模型,确定约束条件和模型参数。采用人工智能算法遗传算法对调水控制线和供水调度图进行分层优化,最终得到满足上、下层决策要求的跨流域供水水库群联合调度规则。

(4) 水库群多目标调度方案的评价及优化调度方案推荐。结合跨流域调水工程实际情况及其所涉及区域的社会、经济、生态环境等方面的发展需求,通过跨流域调水水库群联合调度方案的合理性分析和优化调整,通过多次反馈调整,得到合理的调度方案。提出跨流域调水工程水资源调度方案评价目标,构建方案合理性评价指标体系及评价模型,对方案进行评价和优选。识别调水风险因子,如工程风险、水文风险、经济风险等,对水资源调配方案进行风险评估,并制定风险应对策略。给出最终的水资源调度推荐方案。

1.4 技术路线

引汉济渭跨流域复杂水库群联合调度研究总体技术路线图如图 1-1 所示。

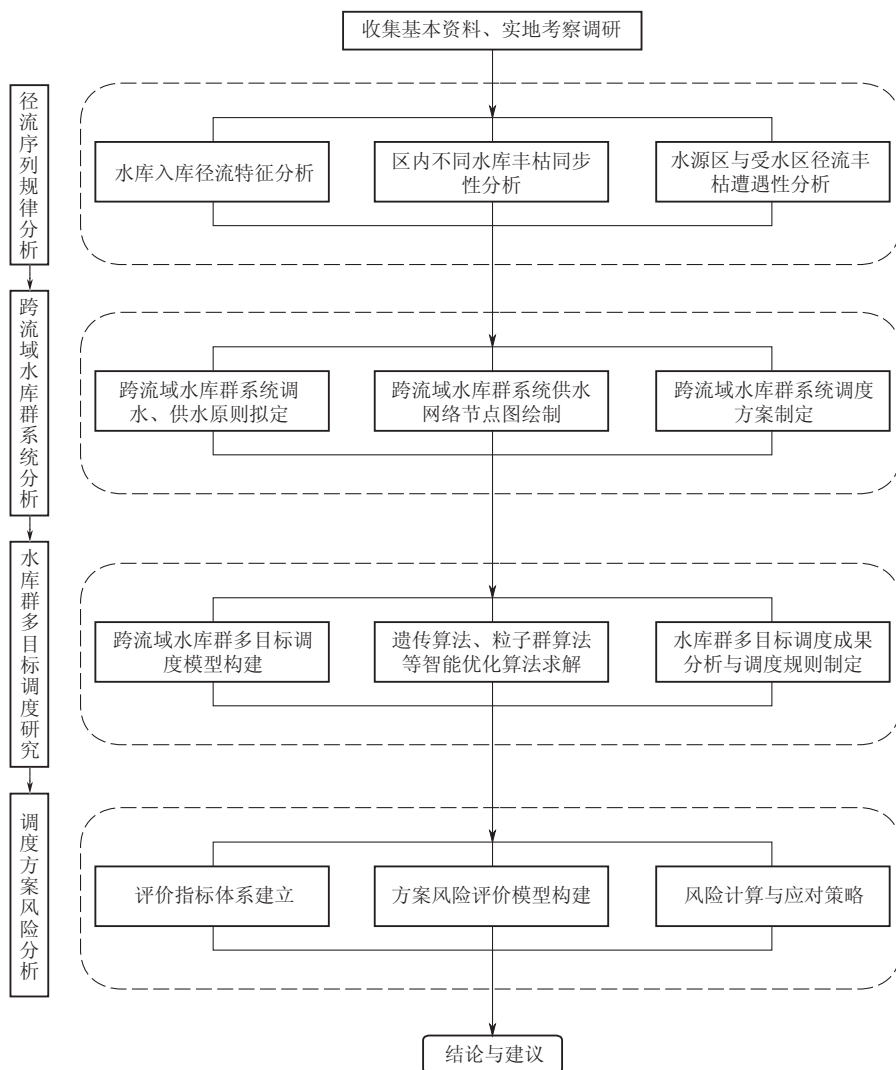


图 1-1 研究总体技术路线图