

# 梯级水电站群 多核并行优化调度技术

珠江水利科学研究院

水利部珠江河口动力学及伴生过程调控重点实验室

王森 李善综 石赞赞 熊静 编著



中国水利水电出版社  
www.waterpub.com.cn

# 梯级水电站群 多核并行优化调度技术

珠江水利科学研究院

水利部珠江河口动力学及伴生过程调控重点实验室

王森 李善综 石赟赟 熊静 编著



中国水利水电出版社

[www.waterpub.com.cn](http://www.waterpub.com.cn)

·北京·

## 内 容 提 要

本书针对梯级水电站群优化调度所面临的求解难度大、计算效率低的问题,以提高调度精细化水平为目的,在深入分析梯级水电站群优化调度特性的基础上,结合近年来兴起的 Fork/Join 多核并行框架,开展了多种粗粒度并行混合智能算法以及细粒度并行动态规划类方法的研究,显著提升了水电站群优化调度问题的求解效率,可为我国当前各大流域的大规模梯级水电站群优化调度提供参考和借鉴。

本书可供水文水资源、水利水电工程专业及相关行业的科研与管理人员参考使用。

### 图书在版编目(CIP)数据

梯级水电站群多核并行优化调度技术 / 王森等编著

— 北京: 中国水利水电出版社, 2017. 11

ISBN 978-7-5170-6081-9

I. ①梯… II. ①王… III. ①梯级水电站—水库调度  
IV. ①TV697.1

中国版本图书馆CIP数据核字(2017)第293027号

书 名	梯级水电站群多核并行优化调度技术 TIJI SHUIDIANZHAN QUN DUOHE BINGXING YOUHUA DIAODU JISHU
作 者	珠江水利科学研究院 水利部珠江河口动力学及伴生过程调控重点实验室 王森 李善综 石赟赟 熊静 编著
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 电话: (010) 68367658 (营销中心)
经 售	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	天津嘉恒印务有限公司
规 格	184mm×260mm 16开本 11.25印张 267千字
版 次	2017年11月第1版 2017年11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

近年来,我国水电事业的发展速度和规模突飞猛进,已跃居世界水电大国首位,并形成了或将形成一大批具有电站级数多、装机容量大、输电范围广等特点的大规模梯级水电站群。这类大规模梯级水电站群的优化调度问题具有非常显著的高维数、非线性、多阶段、约束强耦合等特点,动辄十几级甚至几十级电站规模使“维数灾”问题变得尤为突出,求解难度越来越大,计算效率越来越低。采用传统优化方法求解呈现一定的局限性,已无法满足电网和水电公司的精细化调度需求,探索合理高效的求解算法是水电调度工作亟待解决的重要课题。因此,本书针对我国水电快速发展所面临的“大规模梯级水电系统优化调度可建模问题”“大规模梯级水电系统优化调度求解效率问题”以及“响应极端干旱气候的梯级水电系统调度规则问题”三大科学问题,以西南地区大型流域红水河和澜沧江梯级水电站群为工程背景,在深入分析梯级水电站群长期优化调度特性的基础上,结合近年来兴起的 Fork/Join 多核并行框架,开展了粗粒度并行混合智能算法以及细粒度并行动态规划类方法的研究。

全书共 12 章,第 1~4 章主要阐述了我国水电发展概况、国内外研究进展、Fork/Join 框架简介以及工程背景等基础信息。第 5~7 章主要提出了 3 种新型混合智能算法及其粗粒度并行化设计模式。第 8~10 章主要提出了 3 种常规动态规划类方法的细粒度并行化设计模式。第 11 章对梯级水电站群长期发电优化调度应用系统的设计功能及要点进行了简要介绍。第 12 章对全书进行总结。最后在附录中提供了 Fork/Join 框架并行计算的实现代码以及对其阈值选取公式的改进建议。本书第 1、第 2、第 11、第 12 章以及附录与参考文献部分由水利部珠江河口动力学及伴生过程调控重点实验室王森主笔完成;

第3、第4、第10章由水利部珠江水利委员会技术咨询中心李善综主笔完成；第5~7章由珠江水利科学研究院石贇贇主笔完成；第8、第9章由珠江水利科学研究院熊静主笔完成。全书由王森构思、编写提纲、统稿及定稿，并在珠江水利科学研究院马志鹏博士以及华北水利水电大学李保健老师的指导下完成。同时，在本书的出版过程中，得到了珠江水利科学研究院、水利部珠江河口动力学及伴生过程调控重点实验室各级领导的大力支持和帮助。另外，本书由国家重点研发计划“珠江流域水资源多目标调度技术与应用”（2017YFC0405900）、水利部公益性行业科研专项“珠江河口咸情变化及抑咸对策研究”（201501010）以及国家自然科学基金“珠江河口咸潮上溯和调水抑咸动力响应机制”（51409286）资助。在此，向所有支持和帮助过我们的领导、同事、朋友表示由衷的感谢！

由于大规模梯级水库群优化调度问题本身的复杂性，加之经费、条件以及编者水平等因素所限，书中不足乃至错误之处在所难免，敬请读者批评指正。

编者

2017年8月于广州

# 目录

# CONTENTS

## 前言

<b>1</b>	<b>我国水电发展概况及研究意义</b> .....	<b>1</b>
1.1	我国水电发展概况 .....	1
1.2	水电站群优化调度的意义 .....	7
1.3	面临关键科学技术问题 .....	8
<b>2</b>	<b>梯级水电系统优化调度方法研究进展</b> .....	<b>10</b>
2.1	总体概述 .....	10
2.2	优化调度方法研究进展 .....	13
2.3	并行计算在水资源管理领域的应用 .....	22
<b>3</b>	<b>Fork/Join 多核并行框架</b> .....	<b>24</b>
3.1	Fork/Join 基本原理 .....	24
3.2	Fork/Join 实现方式 .....	25
3.3	Fork/Join 软件安装 .....	27
<b>4</b>	<b>工程背景、模型描述及测试配置</b> .....	<b>37</b>
4.1	工程背景 .....	37
4.2	模型描述 .....	43
4.3	测试配置 .....	46
4.4	小结 .....	47
<b>5</b>	<b>梯级水电站群优化调度并行自适应混合粒子群算法</b> .....	<b>48</b>
5.1	基本粒子群算法 .....	48
5.2	自适应混合粒子群算法 .....	50

5.3	并行自适应混合粒子群算法 .....	54
5.4	应用实例 .....	55
5.5	小结 .....	63

## 6 梯级水电站群优化调度并行自适应混沌整体退火遗传算法 .....

64

6.1	基本遗传算法 .....	64
6.2	自适应混沌整体退火遗传算法 .....	66
6.3	并行自适应混沌整体退火遗传算法 .....	68
6.4	应用实例 .....	69
6.5	小结 .....	75

## 7 梯级水电站群优化调度并行混沌模拟退火差分进化算法 .....

76

7.1	基本差分进化算法 .....	76
7.2	混沌模拟退火差分进化算法 .....	78
7.3	并行混沌模拟退火差分进化算法 .....	81
7.4	应用实例 .....	82
7.5	小结 .....	87

## 8 梯级水电站群优化调度并行离散微分动态规划方法 .....

89

8.1	动态规划方法 .....	89
8.2	离散微分动态规划方法 .....	90
8.3	并行离散微分动态规划方法 .....	93
8.4	应用实例 .....	96
8.5	小结 .....	103

## 9 梯级水电站群优化调度并行随机动态规划方法 .....

105

9.1	随机动态规划方法 .....	105
9.2	并行随机动态规划方法 .....	109
9.3	应用实例 .....	111
9.4	小结 .....	119

## 10 梯级水电站群优化调度并行机会约束动态规划方法 .....

120

10.1	机会约束动态规划方法 .....	120
10.2	并行机会约束动态规划方法 .....	122

10.3	应用实例 .....	125
10.4	小结 .....	132

## **11** 梯级水电站群长期发电优化调度应用系统 ..... 133

11.1	系统设计 .....	133
11.2	系统实现方法 .....	143
11.3	系统应用实例 .....	145
11.4	小结 .....	146

## **12** 总结 ..... 147

附录 A	Fork/Join 实例程序代码 .....	150
------	------------------------	-----

附录 B	Fork/Join 阈值选取公式的改进建议 .....	154
------	-----------------------------	-----

参考文献 .....	158
------------	-----

# 1

## 我国水电发展概况及研究意义

### 1.1 我国水电发展概况

我国是世界上水能蕴藏量最丰富的国家。根据 2005 年全国水力资源复查结果<sup>[1]</sup>，在只统计理论蕴藏量 1 万 kW 及以上河流和单站装机容量 0.05 万 kW 及以上水电站的前提下，我国大陆水力资源理论蕴藏量装机 6.94 亿 kW，理论蕴藏年发电量为 6.08 万亿 kW·h，技术可开发装机容量 5.42 亿 kW，技术可开发年发电量 2.47 万亿 kW·h，经济可开发装机容量 4.02 亿 kW，经济可开发年发电量 1.75 万亿 kW·h。与 1980 年普查成果相比，理论蕴藏量与技术可开发装机容量分别增加了 2.7% 和 43.4%，按年发电量则分别增加了 2.7% 和 28.6%，技术可开发水力资源有较大幅度的增加。我国水力资源可开发量主要集中在大中型水电站（5 万 kW 及以上），技术可开发装机容量和年发电量分别为 4.76 亿 kW 和 2.18 万亿 kW·h，占总额的 87.8% 和 88.3%；经济可开发装机容量和年发电量分别为 3.44 亿 kW 和 1.50 万亿 kW·h，占总额的 85.6% 和 85.7%。另外，根据 2009 年水利部发布的中国农村水力资源调查评价成果<sup>[2]</sup>，小水电装机容量 0.01 万~5 万 kW 的水电技术可开发装机约 1.28 亿 kW，年发电量 0.54 万亿 kW·h。因此，我国 100kW 及以上的水电站技术可开发装机容量总共达到 6.04 亿 kW，年发电量 2.72 万亿 kW·h。尽管丰富的水能资源为我国大力开发水电提供了必要的物质基础条件，但是，由于我国水电事业发展起步较晚，水能资源的开发利用程度仍然处于相对较低水平<sup>[3]</sup>。

我国水电建设事业的开展最早始于 1910 年云南昆明石龙坝水电站的开建。自新中国成立以来，我国一直非常重视水电建设。但是，由于前期历史、资金短缺等因素，水电发展速度受到限制。直到 20 世纪 90 年代初，国家从经济快速发展、环境保护、能源可持续供应以及西部大开发等发展战略考虑，制定了优先发展水电开发的政策方针，积极促进水电建设事业的快速发展。特别是 21 世纪以来，大批水电站相继建成和投产运行。截至 2015 年年底，全国已建成各种类型水库共 97988 座，包括 707 座大型水库、3844 座中型水库以及其他小型水库，水库总库容合计 8581 亿 m<sup>3</sup>。其中，大型水库和中型水库的总库容分别为 6812 亿 m<sup>3</sup> 和 1068 亿 m<sup>3</sup>，分别占总库容的 78.8% 和 12.8%，与 2001 年相比，水库总数和大型水库数均大幅提升，水电建设事业发展非常迅猛。全国历年已建水库数量信息见表 1.1。

表 1.1

全国历年已建水库数量信息

年份	已建水库		大型水库		中型水库		小型水库	
	数量/座	总库容/亿 m <sup>3</sup>	数量/座	总库容/亿 m <sup>3</sup>	数量/座	总库容/亿 m <sup>3</sup>	数量/座	总库容/亿 m <sup>3</sup>
1973	72131	3650	283	2767	1833	436	70015	447
1974	74712	3549	290	2644	1860	488	72562	417
1975	73650	3624	300	2667	1982	504	71368	453
1976	78473	3888	304	2879	2057	331	76112	678
1977	81501	3948	308	2887	2129	558	79064	503
1978	84585	4012	311	2896	2205	585	82069	531
1979	86132	4081	319	2945	2252	593	83561	543
1980	86822	4130	326	2975	2298	605	84198	550
1981	86881	4169	328	2989	2333	622	84220	558
1982	86900	4188	331	2994	2353	632	84216	562
1983	86567	4208	335	3007	2367	640	83865	561
1984	84998	4292	338	3068	2387	658	82273	566
1985	83219	4301	340	3076	2401	661	80478	564
1986	82716	4432	350	3199	2115	666	80251	567
1987	82870	4475	353	3233	2428	672	80089	570
1988	82937	4504	355	3252	2462	681	80120	571
1989	82848	4617	358	3357	2480	688	80010	572
1990	83387	4660	366	3397	2499	690	80522	573
1991	83799	4678	367	3400	2524	698	80908	580
1992	84130	4688	369	3407	2538	700	81223	581
1993	84614	4717	374	3425	2562	707	81678	585
1994	84588	4751	381	3456	2572	713	81635	582
1995	84775	4797	387	3493	2593	719	81795	585
1996	84905	4571	394	3260	2618	724	81893	587
1997	84837	4583	397	3267	2634	729	81806	587
1998	84944	4930	403	3595	2653	736	81888	599
1999	85119	4499	400	3164	2681	743	82038	592
2000	83260	5183	420	3843	2704	746	80136	594
2001	83542	5280	433	3927	2736	758	80373	595
2002	83960	5594	445	4230	2781	768	80734	596
2003	84091	5657	453	4279	2827	783	80811	595
2004	84363	5541	460	4147	2869	796	81034	598
2005	84577	5623	470	4197	2934	826	81173	600
2006	85249	5841	482	4379	3000	852	81767	610

续表

年份	已建水库		大型水库		中型水库		小型水库	
	数量/座	总库容/亿 m <sup>3</sup>	数量/座	总库容/亿 m <sup>3</sup>	数量/座	总库容/亿 m <sup>3</sup>	数量/座	总库容/亿 m <sup>3</sup>
2007	85412	6345	493	4836	3110	883	81809	626
2008	86353	6924	529	5386	3181	910	82643	628
2009	87151	7064	544	5506	3259	921	83348	637
2010	87373	7162	552	5594	3269	930	83552	638
2011	88605	7201	567	5602	3346	954	84692	645
2012	97543	8255	683	6493	3758	1064	93102	698
2013	97721	8298	687	6528	3774	1070	93260	700
2014	97735	8394	697	6617	3799	1075	93239	702
2015	97988	8581	707	6812	3844	1068	93437	701

与此同时,我国水电事业取得了多个具有里程碑意义的成就。截至2004年年底,我国水电装机容量规模超过1亿kW,超越美国,首次成为世界上水电装机容量最大的国家。截至2010年年底,我国水电装机规模超过2亿kW,是水电装机容量世界第二的美国的2倍多。截至2013年年底,我国水电装机规模达到2.8亿kW,当年的水电新增装机容量近3100万kW,约等同于水电装机世界排名第八的挪威水电装机容量,是我国有史以来水电装机容量增长最快的年份。截至2016年年底,我国水电装机规模达到3.32亿kW(含抽水蓄能2669万kW),约占全球水电总装机的1/4,是当之无愧的世界超级水电大国。中国水电的未来发展,必然牵动着全球水电乃至能源界的眼光。水电装机容量世界前十国家排名见表1.2。

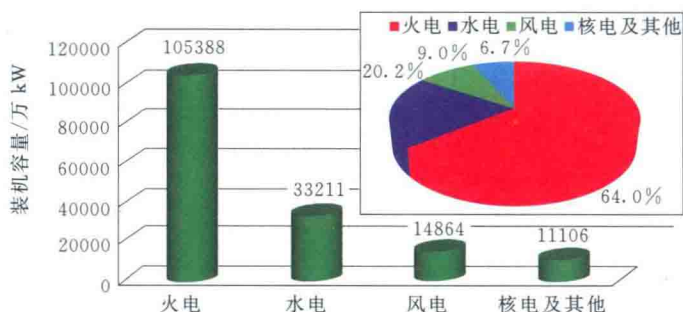
表 1.2 水电装机容量世界前十国家排名

国家	中国	美国	巴西	加拿大	俄罗斯	日本	印度	挪威	瑞典	委内瑞拉
装机容量/万 kW	33200	9990	8420	7700	4760	4600	4320	3030	1600	1570

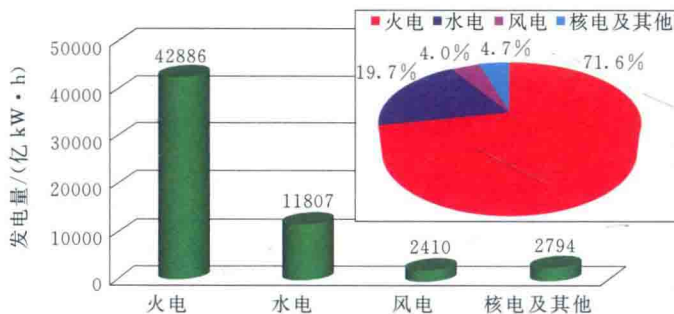
注 中国统计数据截至2016年,其他国家统计数据截至2013年。

目前,水电是我国电力系统的第二大主要供应能源,在清洁无污染的可再生能源中装机容量比重最大。截至2016年年底,全国发电总装机容量达到16.5亿kW,非化石能源总装机5.92亿kW,占总装机比例36%,清洁能源发展势头超过火电。其中,非化石能源装机主要包括水电3.32亿kW,风电1.49亿kW,核电及其他1.11亿kW,占总装机比例分别为20.2%、9.0%、6.7%,见图1.1(a)。全国累计总发电量59897亿kW·h,其中水电11807亿kW·h,火电42886亿kW·h,风电2410亿kW·h,核电及其他2794亿kW·h,分别占总发电量的19.7%、71.6%、4.0%、4.7%,见图1.1(b)。而且,水电发电量超过世界水电发电总量的20%,稳居世界第一。随着我国西部水电基地大型梯级水电站群的持续滚动开发,我国水电装机规模及所占比例将不断增大。预计到2020年,我国常规水电总装机规模将达到3.5亿kW;2030年,我国水电总装机规模将达到4.3亿kW;2050年,我国水电总装机规模将达到5.1亿kW<sup>[4]</sup>,水电开发建设将基本完成。虽然截至2016年年底,我国水电装机容量已达到3.32亿kW,水电年发电量

11807 亿  $\text{kW} \cdot \text{h}$ ，但是按技术可开发年发电量计算（2.47 万亿  $\text{kW} \cdot \text{h}$ ），水能资源开发利用率仅约 47.8%，相比世界水电发达国家，如法国（约 97%）、挪威（约 71.5%）、日本（约 70.3%）、美国（约 53.6%）等，仍存在较大的差距。因此，我国水能资源的开发利用仍然具有非常巨大的潜力和广阔的发展前景。



(a) 2016 年我国能源装机容量



(b) 2016 年我国能源年发电量

图 1.1 中国 2016 年电源结构

在我国水电快速发展的 16 年里，出现了有别于其他世界水电大国的新特点，主要体现在以下几方面。

(1) 装机规模高速增长。我国水电装机容量从 2001 年的 8300 万  $\text{kW}$  增长到 2016 年的 33200 万  $\text{kW}$ ，总增幅约 24900 万  $\text{kW}$ ，年均装机容量增长约 1550 万  $\text{kW}$ ，年均增长率约 9.05%。无论是总装机规模、年均装机容量增幅，还是年均装机容量增长速度，中国这种水电集中建设、密集投产、规模如此庞大的情况，均创造了世界水电发展的历史之最。中国水电历年装机容量及发电量统计见表 1.3。

(2) 集中程度非常高。我国水电主要集中在大江大河的干流，便于集中开发。十三大水电基地按规划装机容量从大到小排名分别是金沙江、怒江、长江上游、澜沧江、大渡河、雅砻江、黄河上游、东北、南盘江红水河、乌江、闽浙赣、湘西以及黄河北干流。总规划装机容量则达到 32813.9 万  $\text{kW}$ ，占经济可开发装机容量的 81.6%，占技术可开发装机容量的 60.5%。其中，规划装机容量最大的金沙江为 7743.5 万  $\text{kW}$ ，最小的黄河北干流为 596.8 万  $\text{kW}$ 。目前，位于东中部的东北、闽浙赣和湘西水电基地以及位于中部的长

表 1.3 中国水电历年装机容量及发电量统计表

年份	装机容量 /万 kW	新增 装机容量 /万 kW	发电量 /(亿 kW·h)	发电量 年增长率 /%	年份	装机容量 /万 kW	新增 装机容量 /万 kW	发电量 /(亿 kW·h)	发电量 年增长率 /%
1949	36.0		12.0		1983	2416.5	120.6	863.6	16.1
1950	36.2	0.2	13.2	10.0	1984	2560.0	143.5	867.8	0.5
1951	37.8	1.6	14.9	12.9	1985	2641.5	81.5	923.7	6.4
1952	38.5	0.7	18.3	22.8	1986	2754.2	112.7	944.8	2.3
1953	53.0	14.5	25.5	39.3	1987	3019.3	265.1	1002.3	6.1
1954	60.6	7.6	32.0	25.5	1988	3269.8	250.5	1091.8	8.9
1955	69.5	8.9	34.0	6.3	1989	3458.3	188.5	1184.5	8.5
1956	91.4	21.9	47.1	38.5	1990	3604.6	146.3	1263.5	6.7
1957	101.9	10.5	48.2	2.3	1991	3788.3	183.7	1248.4	-1.2
1958	121.6	19.7	41.1	-14.7	1992	4068.1	279.8	1314.7	5.3
1959	162.0	40.4	43.6	6.1	1993	4489.3	421.2	1516.0	15.3
1960	194.1	32.1	74.1	70.0	1994	4906.1	416.8	1667.9	10.0
1961	233.3	39.2	74.1	0	1995	5218.4	312.3	1867.7	12.0
1962	237.9	4.6	90.4	22.0	1996	5557.8	339.4	1869.2	0.1
1963	243.0	5.1	86.9	-3.9	1997	5972.6	414.8	1945.6	4.1
1964	268.3	25.3	106.0	22.0	1998	6506.5	533.9	2043.0	5.0
1965	302.0	33.7	104.1	-1.8	1999	7297.1	790.6	2129.3	4.2
1966	363.8	61.8	126.2	21.2	2000	7935.2	638.1	2431.3	14.2
1967	383.9	20.1	131.4	4.1	2001	8300.6	365.4	2611.1	7.4
1968	438.8	54.9	115.0	-12.5	2002	8607.4	306.8	2745.7	5.2
1969	505.3	66.5	160.1	39.2	2003	9489.6	882.2	2813.3	2.5
1970	623.5	118.2	204.6	27.8	2004	10524.2	1034.6	3309.9	17.7
1971	780.4	156.9	250.6	22.5	2005	11738.8	1214.6	3964.0	19.8
1972	870.0	89.6	288.2	15.0	2006	12857.0	1118.2	4167.0	5.1
1973	1029.9	159.9	389.0	35.0	2007	14526.0	1669.0	4867.0	16.8
1974	1181.7	151.8	414.4	6.5	2008	17260.4	2734.4	5655.5	16.2
1975	1342.8	161.1	476.3	14.9	2009	19629.0	2368.6	5716.8	1.1
1976	1465.5	122.7	456.4	-4.2	2010	21340.0	1711.0	6863.1	20.1
1977	1576.5	111.0	476.5	4.4	2011	23051.0	1711.0	6626.0	-3.5
1978	1727.7	151.2	446.3	-6.3	2012	24890.0	1839.0	8641.0	30.4
1979	1911.0	183.3	501.2	12.3	2013	28002.0	3112.0	8963.0	3.7
1980	2031.8	120.8	582.1	16.1	2014	30183.0	2181.0	10661.0	18.9
1981	2193.3	161.5	655.5	12.6	2015	31937.0	1754.0	11117.0	4.3
1982	2295.9	102.6	744.0	13.5	2016	33000.0	1063.0	11807.0	6.2

注 表中数据来源于《中国水力发电年鉴》(第九卷)以及中国电力企业联合会官方网站,所有数据不含港澳台。

江上游、乌江和南盘江红水河水电基地开发程度较高，水电站群已基本开发完毕。位于西部的雅砻江、大渡河、澜沧江、怒江、金沙江、黄河等水电基地则相对开发利用程度较低，已建成的水电站较少，大部分仍处于规划或在建，这些水电基地的开发利用是我国未来水电建设的重点。十三大水电基地分布情况见表 1.4。

表 1.4 十三大水电基地分布情况表

水电基地名称	规划电站数目 /座	规划装机容量 /万 kW	水电基地名称	规划电站数目 /座	规划装机容量 /万 kW
金沙江	25	7744	东北	39	1865
怒江	13	3630	南盘江红水河	11	1568
长江上游	5	3354	乌江	9	1133
澜沧江	16	3139	闽浙赣	59	1114
大渡河	27	2637	湘西	33	901
雅砻江	22	2596	黄河北干流	6	597
黄河上游	16	2534			

(3) 干流梯级水电站级数多。位于我国西南地区的大渡河、金沙江、雅砻江、澜沧江、怒江、南盘江红水河干流梯级水电站级数非常多（见表 1.4），规划开发电站个数分别为 27、25、22、16、13、11。若考虑支流梯级水电站群，单一流域梯级调节性能好的大中型水电站数目更加庞大，在世界现有的水电系统中也是非常见的。

(4) 巨型电站多。我国水电不仅装机规模增长迅速，而且拥有了多座在建或已建的世界级巨型水电站。目前，我国已建、在建和规划建设中的超过 100 万 kW 的水电站超过 110 座，超过 300 万 kW 的水电站超过 20 座，而且随着 2013 年溪洛渡水电站的投产运行，在装机容量世界排名前十的已建水电站中，我国已占据三席，分别是三峡、溪洛渡、向家坝水电站，分别排名第 1、3、9 位。这些巨型水电站的运行方式极大不同于以往中小容量水电站。中国装机容量排名前十水电站见表 1.5。

表 1.5 中国装机容量排名前十水电站

水电站	装机容量/万 kW	所属流域	拟建/已建	世界排名
三峡	2250	长江	已建	1
溪洛渡	1386	金沙江	已建	3
白鹤滩	1200	金沙江	在建	—
乌东德	740	金沙江	在建	—
向家坝	640	金沙江	已建	9
龙滩	630	红水河	已建	—
糯扎渡	585	澜沧江	已建	—
锦屏二级	480	雅砻江	已建	—
拉西瓦	420	黄河	已建	—
小湾	420	澜沧江	已建	—

(5) 单机容量大。我国大型水电机组单机容量已从 30 万 kW、40 万 kW、55 万 kW 逐步发展到 70 万 kW、77 万 kW 以及 80 万 kW，与国外水电单机最大容量 70 万 kW 相比，我国已达到世界领先水平。目前，已投产的 70 万 kW 及以上发电机组总共达到 79 台，包括向家坝 8 台 80 万 kW、溪洛渡 18 台 77 万 kW、三峡 32 台 70 万 kW、龙滩 9 台 70 万 kW、拉西瓦 6 台 70 万 kW 以及小湾 6 台 70 万 kW。100 万 kW 以上机组也在研究开发中，未来随着西藏水电的开发，机组规模将与规划的特大型水电站相匹配。

(6) 发电水头高。我国西南地区水电基地已建或规划的水电站群包含很多巨型水电站，它们普遍具有高水头特性，绝大多数发电水头超过 100m，200m 以上发电水头也不少见。比如龙滩最大发电水头为 125m，糯扎渡为 215m，溪洛渡为 229m，小湾为 251m。这些电站的运行方式与中低水头电站有极大不同，往往存在机组多振动区问题，进一步加剧了干流梯级水电站群运行与管理的难度。

(7) 集中调度控制。不同于其他水电发达国家，我国水电的调度管理模式（图 1.2）采用国家、区域、省级、集控中心多级水电系统运行协调管理体系，肩负着区域、省级间、省内电网的电力平衡与协调，调度任务非常复杂。

面对我国水电如此高速发展的形势，对于如何保证水电系统运行和管理的科学性、安全性、经济性问题，将面临前所未有的难度和挑战。

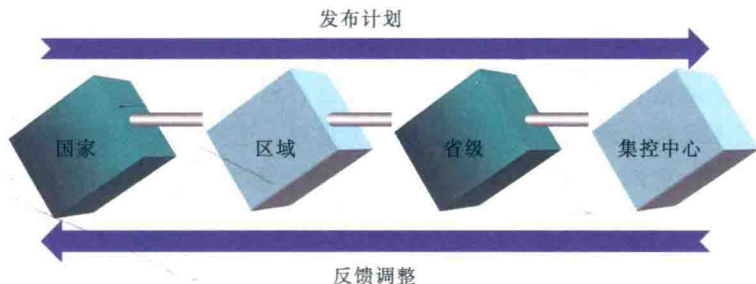


图 1.2 我国水电的调度管理模式

## 1.2 水电站群优化调度的意义

水电是通过将水的势能和动能转化为电能的一种清洁无污染可再生能源<sup>[5,6]</sup>。相比其他可再生能源（如风电、太阳能等），水电具有可开发程度高、技术相对成熟等优势。因此，大力发展水电一直处于世界能源发展战略中的优先地位<sup>[7-11]</sup>，也是我国实现“节能减排”和“西电东送”战略方针的强有力措施。

水电站群优化调度是系统工程优化调度领域最经典的问题之一，其主要内容为：充分利用水电站群的天然来水以及已有库容，以系统综合调度效益最大为目标，运用现代计算机技术和优化调度技术或方法，求解水电站群最优调度决策，指导水电系统科学、安全、经济运行。随着水电系统电站级数越来越多，装机规模越来越大，水电站群优化调度的作用愈加明显，主要体现在能够有效地利用各水库之间的水文及库容特性，通过调节性能好的水电站对整个水电系统进行丰枯期水文补偿和电力补偿，提高

水能利用率,减少不必要弃水,从而挖掘更多的水电能源、减少火电发电量;同时,可以增强水电系统的供电能力及质量,保证电网调峰、调频、调相以及事故备用等任务的安全实施,提高电网运行管理的安全性。因此,开展水电站群优化调度研究是实现水电系统调度管理效益最大化的必要手段,是保证电力系统安全、稳定、经济、环保运行的首要任务,也是我国实现对国际社会“2020年非化石能源占一次能源消费比重达15%”减排承诺和治理雾霾气候的必由之路,对促进国民经济发展、改善能源消费结构等具有非常重要的意义和实用价值<sup>[12-14]</sup>。

### 1.3 面临关键科学技术问题

随着我国水电系统规模的逐步增加以及西南大型水电基地的陆续竣工和投产,形成了多个特大干流梯级水电站群,这些水电系统具有电站级数多、装机规模大、发电水头高等特点。对于这类大规模水电系统优化调度问题,将面临很多亟待解决的调度困难和关键问题,包括多层次水电吸纳问题、多层次调峰问题、高水头多振动区问题、大规模水电系统可计算求解问题以及优化求解效率问题等。本书研究内容主要涉及以下3个方面。

#### 1.3.1 大规模梯级水电系统优化调度可建模问题

随着我国西南地区乌江、澜沧江、红水河、金沙江等特大干流梯级水电站群的出现,这类大规模水电系统优化调度方法研究变得尤为重要。这类梯级水电站群突出的显著特点是电站级数非常多,比如,乌江流域规划11座电站,已建9座;澜沧江规划15级电站,已建6座;红水河规划10级电站,已建9座;金沙江中下游规划12级电站,已建6座。水电站群电站级数越多意味着梯级水电站之间的水力和电力联系变得愈加复杂,增加了问题的约束条件数目,对于部分求解方法而言,其计算量随电站及约束数目会呈指数增长,进一步加剧了水电系统优化问题求解难度。如何保证系统求解已成为大规模水电系统面临的核心问题之一。以往常用的非线性规划、动态规划等经典方法,在求解大规模水电系统优化问题时,存在无法避免的缺陷,建模求解非常困难。比如,非线性规划方法难以对模型约束或目标函数简化,即使采用一些线性化方法简化也易于使问题偏离实际;动态规划方法受求解规模限制,大规模问题易导致维数灾问题,造成求解困难甚至因内存不足而无法计算。为了使在有限时间内求解大规模水电站群优化调度问题成为可能,并同时保证优化结果的质量,需要探索新的合理有效的求解算法。20世纪90年代计算机技术的发展,为粒子群算法、遗传算法、模拟退火方法、混沌算法等启发式智能算法的兴起提供了有利条件。这些智能算法在求解优化问题时,并不依赖于问题本身的性质和特点,在一定条件下证明可收敛到全局最优,且具有鲁棒性强、收敛速度快、寻优机制简单等优点,在求解优化问题中被广泛应用。但是,单一的智能算法在应用时仍然存在一定的缺陷,如粒子群算法存在早熟收敛、容易陷入局部最优、停滞等,遗传算法求解容易早熟且局部搜索能力差等。因此,根据不同智能算法的优缺点,通过多种智能算法之间的相互结合,改进单一算法的缺陷,是大规模水电系统优化问题新的求解途径。

### 1.3.2 大规模梯级水电系统优化调度求解效率问题

水电站群优化调度问题具有高维数、非线性、非凸、多阶段、强约束等特点,求解过程非常困难。动态规划方法是求解水电站群优化调度问题的最经典算法。但是,在求解大规模水电系统优化调度问题时,该方法将面临严重的“维数灾”问题,呈指数增长的计算量将导致计算时间大幅度增加,降低求解效率甚至影响算法的实用性。为了缓解“维数灾”问题,衍生出了多种经典的改进动态规划方法,常用的有离散微分动态规划、逐步优化、逐次逼近动态规划等方法。尽管这些改进方法在一定程度上减缓了“维数灾”问题,然而随着水电系统规模的急剧扩大,仅仅依靠这类改进方法很难达到求解质量和计算效率的均衡要求,比如对于确定性模型,离散微分动态规划仅适用于求解最多5座水电站的长期优化调度问题,当电站数量增多时很难在可接受时间内完成计算;而对于随机模型,求解最多2座水电站的联合优化调度问题就需要消耗大量的计算时间。因此,如何在保证结果质量的前提下,进一步提高算法求解效率,是适应水电快速发展必须解决的实质性问题。对于特大流域水电系统,由于电站分布的自然空间属性和问题的多阶段性,可以天然地利用并行计算技术求解。基于多核处理器的多核并行技术以其并行实现容易、运行环境稳定、成本低廉等独特的优势被广泛应用于实际工程。对于水电系统而言,寻求优化调度问题、求解算法与并行技术之间的切入点,设计合适粗细粒度的并行优化方式将是一种提高系统求解效率的可行途径。

### 1.3.3 响应极端干旱气候的梯级水电系统调度规则问题

水电站群调度规则一直是水电站群优化调度领域的研究热点,是指导水电站群调度的常用技术手段。随着我国西南地区大规模梯级水电站群的陆续投产和竣工,制定科学、合理的调度规则已成为目前亟待解决的关键问题。这类大规模水电系统装机规模大,在整个电力系统中比重较大,尤其是对于西南富水电电网省份,如乌江梯级水电系统装机1122万kW,占贵州电网总装机(2015年规划4500万kW)的25%;澜沧江梯级水电系统规划装机2528万kW,占云南电网总装机(2015年规划7950万kW)的32%;大渡河梯级水电系统规划装机2637万kW,占四川电网总装机(2015年规划8930万kW)的30%。这些大型水电系统的首要任务是向电力系统供应稳定的能源,充分发挥水电在调峰、调频等任务中的优势,保证电力系统安全稳定运行。但是,近年来随着我国西南地区极端干旱气候频繁出现,部分电站甚至出现河流干涸导致无法发电,直接导致电力系统水电发电量大幅减少,甚至影响“节能减排”“西电东送”等国家重要经济发展战略。极端干旱气候的出现不仅造成水电系统无法提供稳定的保证出力,而且出力破坏深度尤其剧烈,给水电担任电网调峰、调频等任务造成很大影响,严重威胁电力系统安全和稳定运行。因此,为了更好地发挥水电能源在电力系统中的优势,如何制定能够适应极端干旱气候影响的调度规则是需要特别关注的问题,特别是如何兼顾水电系统出力保证率和出力破坏深度,是需要深入研究的内容。