

流域梯级水电站联合优化调度 理论与实践

LIUYU TIJI SHUIDIANZHAN LIANHE YOUHUA DIAODU
LILUN YU SHIJIAN

徐刚 编著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

三峡大学重点学科建设项目资助

流域梯级水电站联合优化调度 理论与实践

徐刚 编著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

本书内容分为三个部分：第一部分基于水文预测理论，讨论了梯级水库径流预测的理论和方法；第二部分基于系统工程和最优化理论，阐述了梯级水电运行调度的理论和方法；第三部分基于信息化技术，研究了梯级水电联合优化运行的决策支持系统。

本书的实例均来源于与流域梯级电厂合作的实际生产项目，对于提高企业梯级运行调度管理水平具有一定实践借鉴作用。

可供水文水资源、水库运行调度等领域的教师、研究生及高年级大学生参考使用，也可用作相关领域的研究性教材。

图书在版编目（C I P）数据

流域梯级水电站联合优化调度理论与实践 / 徐刚编
著. — 北京：中国水利水电出版社，2013.8
ISBN 978-7-5170-1204-7

I. ①流… II. ①徐… III. ①梯级水电站—水力发电
站—生产调度 IV. ①F426.61

中国版本图书馆CIP数据核字(2013)第201019号

书 名	流域梯级水电站联合优化调度理论与实践
作 者	徐刚 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 (发行部)
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	三河市鑫金马印装有限公司
规 格	184mm×260mm 16开本 18印张 427千字
版 次	2013年8月第1版 2013年8月第1次印刷
印 数	0001—1500册
定 价	68.00元

凡购买我社图书，如有缺页、倒页、脱页的，本社发行部负责调换

版权所有·侵权必究

前言



为应对全球变暖趋势，实现低碳经济，我国在“十一五”期间提出了单位国内生产总值能耗降低 20% 左右、主要污染物排放总量减少 10% 的节能减排目标。这是贯彻落实科学发展观、构建社会主义和谐社会的重大举措；是建设资源节约型、环境友好型社会的必然选择；是推进经济结构调整，转变增长方式的必由之路。水电作为一种可再生的清洁能源，运行成本低，效益高，运行灵活，调峰简捷快速，为世界公认的理想能源，增发水电对实现节能减排目标具有重要意义。

目前我国已建在建流域梯级水电站数量众多，装机规模庞大，多数梯级水电站已实现梯级集中控制，具备梯级联合调度条件。为合理利用水资源，尽量增发水电替代火电，实现节能减排目标，要求流域梯级水电站作为统一电源点，由梯级调度中心根据梯级水库库容和入流情况统一调度。本书是根据我国水电梯级调度的特点和需求，结合编者在流域梯级调度实践及流域梯级调度决策支持系统开发方面的工作积累，并参阅了水文预报和水库调度方面的相关文献，才编写完成的。

本书内容共分 15 章。第 1~3 章由徐刚、邵朋昊编写，第 4、10 章由夏甜、赵小伟编写，第 5、6、9、14、15 章由徐刚编写，第 8 章由叶德旭、邵朋昊编写，第 11、12 章由徐刚、赵小伟编写，第 7、13 章由余冲编写。

本书在编写过程中，得到三峡大学、中国华电集团公司四川分公司、四川水力发电学会、四川大学等领导及行业专家的大力支持和帮助，在此谨向他们表示衷心的感谢。书中参考和引用了所列参考文献的某些内容，在此也并谨向这些文献的编著者们致以诚挚的谢意。

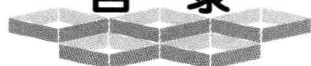
由于编者水平有限，书中难免有不足之处，恳请读者批评指正。

编者

2013 年 4 月

于宜昌

目 录



前言

第一篇 绪 论

第 1 章 流域和水系	3
1.1 流域	3
1.1.1 流域特征	3
1.1.2 流域水文分区	6
1.2 水系	7
1.2.1 水系特征	8
1.2.2 河流分级	11
第 2 章 流域梯级水电站群类型和特点	12
2.1 国内外水电发展概述	12
2.2 梯级水电站群的结构类型	14
2.3 梯级水电站(群)的特点	14
2.3.1 梯级水电系统的特性分析	15
2.3.2 梯级水电站间的联系	16
2.3.3 梯级水电站(群)调度的优化准则及发展趋势	18
第 3 章 流域梯级水库水文预测方法研究进展	21
3.1 概述	21
3.1.1 径流预测的概念及分类	21
3.1.2 径流预测的作用	21
3.2 中长期径流预测方法研究进展	21
3.2.1 传统中长期水文预测方法	21
3.2.2 现代中长期水文预测方法	23
3.3 短期径流预测方法研究进展	27
3.3.1 水文模型的概念及分类	27
3.3.2 国外短期径流预测方法的研究进展	28
3.3.3 国内短期径流预测方法的研究进展	30
第 4 章 流域梯级优化调度方法研究进展	34
4.1 流域梯级水电站常规调度概述与研究进展	34

4.1.1	流域梯级常规调度的概述	34
4.1.2	流域梯级水电站调度图的研究进展	35
4.1.3	流域梯级水电站常规调度函数的研究进展	37
4.2	水库优化调度方法的分类	38
4.3	水电站优化调度研究进展及现状	39
4.3.1	国外研究进展及现状	39
4.3.2	国内研究进展及现状	44
4.4	总结与展望	45
第5章	流域梯级水电站联合优化调度系统研究进展	47
5.1	国外梯级水库优化调度系统现状	47
5.1.1	佐治亚理工水电站水库调度与发电决策支持软件系统	47
5.1.2	美国田纳西流域机构(TVA)的水资源优化调度系统	48
5.1.3	加拿大大不列颠哥伦比亚水电公司的短期优化调度系统	49
5.1.4	国外其他国家的优化调度系统	49
5.2	国内梯级水库优化调度系统现状	50
第6章	流域梯级水电站联合优化运行模式	53
6.1	梯级水电站经济运行	53
6.1.1	中长期运行方式	55
6.1.2	短期运行方式	56
6.1.3	厂内运行方式	56
6.2	梯级水电站补偿效益分析	57
6.2.1	梯级水电站补偿调节概念	57
6.2.2	梯级水电站调度补偿调节计算	58

第二篇 流域梯级水库径流预测

第7章	中长期水文预测方法	63
7.1	中长期预测方法	63
7.2	预测因子挑选及统计计算方法	63
7.2.1	预测因子挑选	64
7.2.2	预测因子统计计算方法	64
7.3	回归分析预测技术	66
7.3.1	多元门限回归的基本原理及数学模型	66
7.3.2	多元门限回归的建模步骤及预测方法	66
7.4	时间序列预测技术	68
7.4.1	最近邻抽样回归的基本原理及数学模型	68
7.4.2	最近邻抽样回归的建模步骤及预测方法	69
7.5	人工神经网络预测技术	69

7.5.1	BP 网络的基本原理及数学模型	70
7.5.2	BP 网络的建模步骤及预测方法	70
7.5.3	应用实例	71
7.6	投影寻踪预测技术	72
7.6.1	投影寻踪的基本原理及数学模型	72
7.6.2	投影方向优化和岭函数拟合	73
7.6.3	投影寻踪回归模型的建模步骤及预测方法	74
7.6.4	应用实例	74
7.7	小波分析技术	75
7.7.1	小波分析的基本原理及数学模型	76
7.7.2	小波分析的建模步骤及预测方法	77
7.8	组合预测模型	77
7.8.1	灰色-周期外延组合模型	77
7.8.2	ANN-SVM 组合预测模型	78
第 8 章	短期水文预报方法	79
8.1	统计相关法	79
8.1.1	降雨径流相关图法	79
8.1.2	河段洪水预报方法	80
8.2	河道洪水演算	81
8.2.1	圣维南方程组	81
8.2.2	马斯京根法	82
8.2.3	特征河长法	83
8.3	新安江模型	83
8.3.1	蓄满产流机制	84
8.3.2	三水源新安江模型	84
8.3.3	三水源新安江模型参数一览	88
8.3.4	三水源新安江模型实例应用	89
8.4	水箱模型	93
8.4.1	水箱模型的模拟机制	93
8.4.2	串联水箱模型	94
8.4.3	水箱模型的应用实例	96
8.4.4	水箱模型的设置	99
8.5	萨克拉门托模型	100
8.5.1	土壤蓄水量模型块	100
8.5.2	流域蒸散发模型块	102
8.5.3	汇流模型块	102
8.5.4	SAC 模型的计算流程	102
8.6	SHE 模型	103

8.6.1 树冠截留和蒸散发	104
8.6.2 融雪	105
8.6.3 非饱和带水流	105
8.6.4 饱和带水流	105
8.6.5 坡面漫流及河道汇流	106
第9章 流域水文预报方案	107
9.1 流域河系预报体系	107
9.1.1 预报对象	107
9.1.2 技术路线及预报方法	108
9.1.3 预报河段划分	109
9.1.4 河系预报体系	110
9.2 流域河系预报作业模式	110
9.3 流域河系中长期预报作业流程	111
9.4 流域河系短期预报作业流程	113
9.4.1 方案编制和方案管理	113
9.4.2 预测模型参数率定	114
9.4.3 作业预报	116
 第三篇 流域梯级水电站运行调度	
第10章 流域梯级水电站常规调度	121
10.1 水库常规调度理论	121
10.1.1 水库常规调度的原理	121
10.1.2 水库常规调度图所反映的调度规则	121
10.1.3 水库调度函数所反映的调度规则	122
10.2 流域梯级水电站常规调度图的拟定及检验	123
10.2.1 常规调度图绘制	123
10.2.2 改进常规调度图的制作方法	126
10.2.3 常规调度图的优化模型与算法	130
10.2.4 梯级水库常规调度图的绘制思路	135
10.2.5 流域梯级水库改进常规调度图的编制实例	136
10.2.6 梯级水库常规调度图的检验	140
10.3 流域梯级水电站常规调度函数拟合的方法和步骤	141
10.3.1 梯级水库调度函数拟定关注的内容	141
10.3.2 梯级水库调度函数优化的编制步骤	143
第11章 流域梯级水电站中长期优化调度	145
11.1 流域梯级水电站中长期优化调度数学模型	145
11.1.1 优化准则与目标函数	145

11.1.2	约束条件	146
11.1.3	模型的输入与输出	147
11.1.4	各类目标函数的侧重点	147
11.2	流域梯级水库中长期优化调度方法	148
11.2.1	动态规划法求解原理方法	148
11.2.2	增量动态规划 (IDP) 法	151
11.2.3	离散微分动态规划 (DDDP) 法	153
11.2.4	动态规划逐次渐进 (DPSA) 法	155
11.2.5	大系统分解协调法	156
11.2.6	蚁群算法	160
11.3	流域梯级水电站中长期优化调度决策方法和流程	170
11.3.1	预报调度滚动决策方法	170
11.3.2	决策流程	170
第 12 章	流域梯级水电站短期优化调度	172
12.1	流域梯级水电站短期优化调度数学模型	172
12.1.1	优化准则与目标函数	172
12.1.2	模型的输入与输出	174
12.1.3	各类目标函数的侧重点	175
12.2	流域梯级水库短期优化调度方法	175
12.2.1	遗传算法	175
12.2.2	粒子群算法	178
12.2.3	人工神经网络算法	180
12.2.4	模拟退火算法	181
12.2.5	禁忌搜索算法	183
12.2.6	差分进化算法	186
12.2.7	逐步优化 (POA) 法	188
12.2.8	逐次优化梯级厂间负荷分配算法	197
12.3	流域梯级短期联合优化调度整体框架	198
12.3.1	梯级短期优化调度模型	199
12.3.2	求解算法模型	200
12.3.3	实例计算	200
12.4	梯级负荷分配模型及最优运行策略	203
12.4.1	梯级厂内负荷分配模型及求解方法	203
12.4.2	梯级厂内负荷分配最优运行方案	204
12.4.3	梯级厂内负荷分配最优运行实例计算	206
12.5	流域梯级水电站短期优化调度决策流程	208
12.5.1	流程	208
12.5.2	水库调度决策前沿问题研究	211

第 13 章 流域梯级水电站厂内经济运行	214
13.1 流域梯级水电站厂内经济运行概述	214
13.2 流域梯级水电站厂内经济运行数学模型	214
13.2.1 总耗水量最小模型（以电定水）	214
13.2.2 总出力最大模型（以水定电）	215
13.3 流域梯级水电站厂内经济运行优化方法	216
13.3.1 负荷分配传统方法	216
13.3.2 负荷分配智能算法	217

第四篇 流域梯级水电站自动化系统

第 14 章 流域水情自动测报系统	221
14.1 流域水情自动测报系统建设目标和内容	221
14.1.1 建设内容	221
14.1.2 系统间通信	222
14.1.3 建设原则	222
14.2 水情自动测报系统总体结构	222
14.2.1 系统总体网络结构	222
14.2.2 遥测站网布设	222
14.3 水情信息采集和传输系统	224
14.3.1 遥测站系统功能	224
14.3.2 设备选型及主要技术指标	224
14.3.3 水情信息传输	229
14.3.4 遥测系统工作体制	231
14.3.5 遥测系统工作流程	232
14.4 中心站建设	233
14.4.1 中心站功能	233
14.4.2 信息采集和处理子系统	233
14.4.3 数据库管理子系统	234
14.4.4 信息查询子系统	235
14.4.5 洪水预报子系统	236
14.4.6 Web 浏览服务子系统	236
14.4.7 中心站网络设计	236
14.5 遥测站土建工程	237
14.5.1 水雨情测验设施建设标准	237
14.5.2 遥测站土建	238
第 15 章 流域梯级水电站优化调度决策支持系统	240
15.1 流域梯级水电站调度决策支持系统概述	240
15.1.1 数据采集、查询功能模块	240

15.1.2	梯级优化调度辅助决策	240
15.1.3	对于预调度的决策实施过程	241
15.1.4	基于梯级厂间负荷分配的优化决策实施过程	241
15.1.5	方案决策支持分析	241
15.2	系统总体结构和特点	242
15.2.1	系统构架设计原则	242
15.2.2	系统总体结构	242
15.2.3	系统接口	243
15.2.4	系统特点	244
15.3	系统技术要求和技术标准	246
15.3.1	系统技术要求	246
15.3.2	遵循的标准	246
15.3.3	性能指标	247
15.3.4	系统备份和恢复	247
15.4	系统调度决策时序和流程	247
15.5	系统采用的关键技术	253
15.5.1	Rich Internet Applications (RIA)	253
15.5.2	云计算	254
15.5.3	workflow 技术	254
15.5.4	统一数据库访问接口	255
15.6	系统的架构方法	255
15.7	系统的功能	257
15.7.1	系统管理平台	258
15.7.2	调度信息管理平台	259
15.7.3	径流情势分析与预测平台	260
15.7.4	梯级水电站优化调度平台	261
15.7.5	梯级水电站优化调度方案决策评估平台	263
参考文献		265

第一篇

绪论

第 1 章 流域 和 水系

河流是水文循环的一条重要路径。河流，即在天然河道中流动的水流，是地面径流和地下径流的汇集。供给河流地面径流和地下径流的集水区域称为流域。流域里大大小小的河流，构成脉络相通的系统，称为水系、河系或河网。

不同的流域和水系特征迥异。流域特征涉及流域的气候条件、地理环境和几何形状，而流域的气候条件影响水系的形成、发育和水情，地理环境影响水系的形状。因此，流域特征在一定程度上决定了水系特征。

径流是重要的水文要素。流域是径流的发生之源，水系是径流的汇集输送之路，所以，流域特征和水系特征是影响径流形成和变化过程的重要因素，对流域特征及水系特征进行定性分析和定量计算，能为解决径流形成和汇流计算等问题提供基本依据。

1.1 流 域

河流某一断面以上的集水区域称为河流在该断面的流域。当不指明断面时，流域是对河口断面而言的。流域的边界为分水线，分水线是分水岭最高点的连线。降落在分水线两侧的降水分别注入两个流域。由于流域内的水流包括地面水和地下水，因此分水线也有地面分水线和地下分水线之分。当地面分水线与地下分水线在垂直投影面上完全重合时，此种流域称为闭合流域，否则称为非闭合流域，如图 1-1 所示。

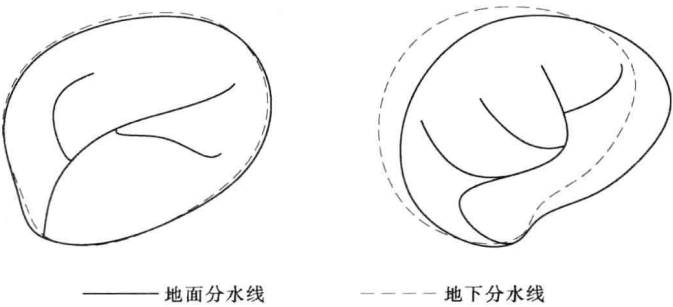


图 1-1 闭合流域（左）和非闭合流域（右）

闭合流域与周围区域不存在水力联系，而对于非闭合流域，流域地面范围内的降水，可能以地下径流的方式补充相邻流域的径流，流域内的径流，也可能并非全部由本流域范围内的降水形成。实际上，对于一般流域，除了喀斯特地区等特殊地质情况外，当地面、地下分水线不一致所引起的水量误差对所研究的问题无太大影响时，多按闭合流域考虑。

1.1.1 流域特征

流域特征主要指流域自然地理特征和流域几何特征。



1.1.1.1 流域自然地理特征

流域自然地理特征包括流域的地理位置、气候条件、下垫面条件等。

1. 流域地理位置

流域的地理位置用流域所处的经纬度来表示，它可以反映流域所处的气候带，说明流域距离海洋的远近，从而反映流域地区水文循环的强弱。地理位置不同，流域的水文特征也不同，例如我国的黄河流域和长江流域。

2. 气候条件

气候条件包括降水、蒸发、湿度、气温、气压、风速等要素，它们是河流形成和发展的主要影响因素，也是决定流域水文特征的重要因素。在分布式流域水文模型中，上述气候条件数据资料是准确预报流域径流量的基本资料。降水直接决定着流域径流量的大小；蒸发是重要的水循环环节，也是主要的水量消耗途径，对大时间尺度如月、年或多年的径流量大小有绝对的影响；湿度、气温、气压和风速等其他气候条件影响降水和蒸发的多少，从而对流域径流大小产生间接影响。

3. 下垫面条件

下垫面是指与大气层直接接触的地球表面，它包括地形地貌、地质构造、土壤和岩石性质、植被、湖泊、沼泽、河网等。“水往低处流”，地形地貌决定了径流流向和和水系的拓扑结构，也影响着径流流速和汇流时间；地质构造指断层、褶皱和节理等，土壤和岩石性质主要指土壤和岩石的水力特性，如透水性、含水性等，这些因素直接影响着水分下渗和地下水运动，并与土壤侵蚀有关，决定了流域径流的泥沙含量；植被对径流有很强的调节作用，密布的植被往往能削弱洪峰，使洪水过程平坦化，植被类型、覆盖率和生长状况等是植被对流域径流影响大小的鉴定指标；湖泊、沼泽和河网是性质不同的蓄水体，但它们对流域径流都有着一定的调节作用。

下垫面条件是人类活动对流域改造日趋严重的社会背景下的必然产物，不同的下垫面条件对流域径流的影响也不同，例如森林和农作物、自然地面与硬化地面等。

因此，下垫面条件是流域的重要特征，是影响流域径流的重要因素。在集总式流域水文模型中，通过引入不透水面积比以体现下垫面对流域径流的影响；而在分布式流域水文模型中，植被类型、土壤类型和土地利用类型已成为计算流域径流过程不可或缺的下垫面数据。

1.1.1.2 流域几何特征

1. 流域面积 F

流域分水线包围区域的平面投影面积即流域面积，记为 F ，以 km^2 计。在山丘地区，分水线一般是山峰岭脊的连线。在适当比例尺的地形图上勾绘出流域分水线，可量出流域面积。勾绘分水线一般是在较大比例尺上进行。勾绘方法如图 1-2 所示。

流域面积是流域的重要特征之一，其大小直接影响河流和水量大小及径流的形成过程。自然条件相似的两个或多个地区，一般是流域面积越大的地区，该地区河流的水量也越丰富，对径流的调节作用也越大，洪水过程较为平缓，枯水流量相对较大；面积越小，流量也越小，如遇短历时暴雨常容易形成陡涨陡落的洪水过程，枯水流量也较小。

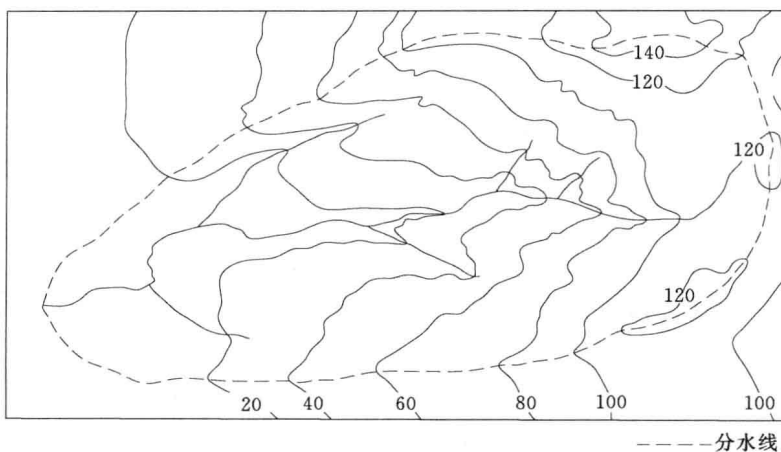


图 1-2 分水线的勾绘

2. 流域长度 L_B 和流域平均宽度 B

流域长度就是流域轴长。以流域出口为中心向河源方向做一组不同半径的同心圆，每个圆与流域分水线相交形成割线，各割线中点的连线长度即为流域的长度，以 km 计。流域面积与流域长度之比称为流域平均宽度，以 km 计。表达式为：

$$B = \frac{F}{L_B} \quad (1-1)$$

流域越长，水的流程就越长，径流不易集中，洪峰流量较小。反之，径流越容易集中，洪水峰量越大。

3. 流域形状系数 χ

流域平均宽度与流域长度之比称为流域形状系数。表达式为：

$$\chi = \frac{B}{L_B} \quad (1-2)$$

流域形状系数大时，流域近似呈方形，水量集中较快；流域形状系数小时，流域外形狭长，水量集中较慢，例如后面要提到的扇状水系和羽状水系。所以流域形状系数在一定程度上以定量的方式反映了流域的形状。

4. 平均高程和平均坡度

将流域地形图划分为 100 个以上的正方格，依次定出每个方格交叉点上的高程以及等高线正交方向的坡度，取其平均值即为流域的平均高程和平均坡度，如图 1-3 所示。

平均坡度是坡地漫流过程的影响因素，根据曼宁公式，坡面流速可以计算为：

$$u = S^{\frac{1}{2}} h^{\frac{2}{3}} / n \quad (1-3)$$

式中： u 为坡面流速； S 为坡度； h 为水深； n 为糙率系数。

从式 (1-3) 可以看出，地表坡度直接控制坡面流速。

5. 面积高程曲线

流域在某一高程处的水平截面面积与该高程的关系曲线称为面积高程曲线。一般用相对值作图，即用水平截面面积 f 与流域面积 F 的比值作为横坐标，而用该高程减去出口

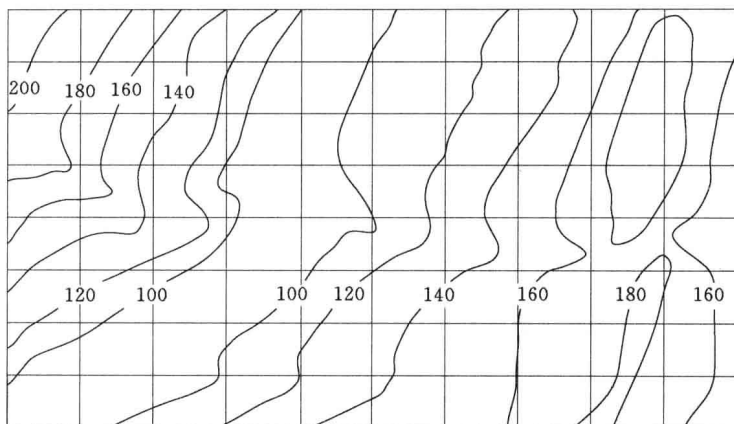


图 1-3 网格法计算流域平均高程和平均坡度示意图

断面处高程 (Δh) 对流域高程差 ΔH 的比值作为纵坐标。面积高程曲线在流域尺度上反映了流域地形的起伏情况, 如图 1-4 所示。

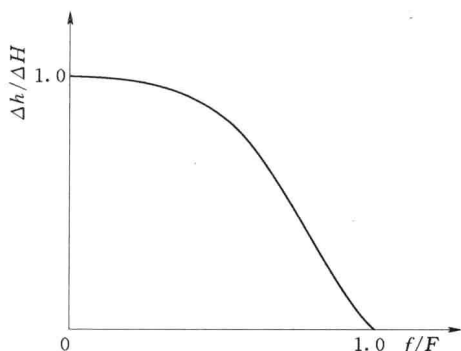


图 1-4 面积高程曲线

1.1.2 流域水文分区

1.1.2.1 水文分区的概念及目的

水文分区是根据水文现象的相似性与差异性, 按照一定的分区原则和标准, 将全国陆地划分为若干个具有不同水文特征的区域。

水文分区不仅是水文站网规划、布设与调整的基础, 也是认识水文规律、解决水文资料移用问题和为水资源开发提供依据的重要手段。为了提高水文站网的整体功能, 保证水文信息内插精度, 节约站网投资和优化站网结构, 需要深入研究水文分区问题。

1.1.2.2 水文分区的原则

水文分区的划分原则大致可归纳为:

(1) 综合分析原则。综合分析引起水文现象相似和差异的多方面因素, 如各种动态的水文要素、下垫面因素和气候因素等。

(2) 求大同存小异原则。以一种或几种水文特征值为指标, 把水文特性和自然地理条件相似的地段连结起来, 而把相异地段分开。但是相似性只能大体上表现出来, 在相当辽阔的水文地区内, 各部分的自然条件不可能完全一样, 因而区域内部的水文情况仍有一定差异。

(3) 主导因素原则。寻求和筛选制约区域分异的主导因素, 作为确定区界的主要依据。

(4) 水系完整性原则。因为水资源的开发和利用, 以及水文资料的移用, 大多数情况都以整个水系为对象, 所以在分区中也应尽量考虑水系完整性这一原则。