

# 水库水环境模拟预测与评价

叶守泽 夏 军 编 著  
郭生练 陈小红



中国水利水电出版社

# 水库水环境模拟预测与评价

叶守泽 夏 军 编著  
郭生练 陈小红

中国水利水电出版社

## 内 容 提 要

水库水环境问题的研究主要指的是水库水温变化规律, 水库水环境水体各种污染物的迁移、转化规律的研究。全书共分九章, 主要内容包括绪论, 水库水温, 水库水体中的各种污染物, 水库水环境的数学模型, 以及水库环境影响评价。

本书可供有关水文水资源、环境工程、水利水电工程等专业的科研工作者、工程技术人员及高等院校的教师、研究生和大学生阅读和参考。

### 图书在版编目 (CIP) 数据

水库水环境模拟预测与评价/叶守泽等编著. —北京: 中国水利水电出版社, 1997

ISBN 7-80124-443-5

I. 水… II. 叶… III. ①水库-水环境-预测②水库-水环境-评价  
IV. TV697.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (97) 第 08094 号

|              |  |
|--------------|--|
| 书 名          | 水库水环境模拟预测与评价                               |
| 作 者          | 叶守泽 夏 军 编著<br>郭生练 陈小红                      |
| 出版、发行<br>经 售 | 中国水利水电出版社 (北京市三里河路 6 号 100044)<br>全国各地新华书店 |
| 排 版          | 中国水利水电出版社微机排版中心                            |
| 印 刷          | 北京市朝阳区小红门印刷厂                               |
| 规 格          | 787×1092 毫米 16 开本 11.25 印张 258 千字          |
| 版 次          | 1998 年 5 月第一版 1998 年 5 月北京第一次印刷            |
| 印 数          | 0001—3240 册                                |
| 定 价          | 18.00 元                                    |

# 前 言

在河流上修坝筑库，无疑地会给防洪发电、灌溉、航运、供水、渔业等带来经济效益，但是，也可能给水库水环境造成不利的影晌，特别是水库水温、水质的变化，是影响水库水环境的主要内容。

作者近几年来获得了博士学科点专项科研基金和国家自然科学基金青年科学基金的资助，从事水库水环境的课题研究，并取得了一些研究成果。本书是作者在综合研究成果的基础上，吸取了有关方面的先进技术与方法编写而成的，重点在水库水温、污染物的模拟与预测，以及水库环境影响评价等方面进行了系统深入的论述和介绍。

全书共九章，按照作者各自研究的成果和心得分别执笔，叶守泽编写第一章、第九章，陈小红编写第二章、第七章，郭生练编写第三章、第四章，夏军编写第五章、第六章、第八章，叶守泽负责统稿。

本书由武汉水利电力大学雒文生教授审阅。雒教授对本稿进行了认真的审查，提出了很多宝贵的修改意见，作者在此深表感谢。

限于作者水平，书中错误和不妥之处在所难免，恳请读者批评指正。

作 者

1994年3月

# 目 录

|                            |     |
|----------------------------|-----|
| 前 言                        |     |
| 第一章 绪论                     | 1   |
| 第一节 水资源开发与环境的关系            | 1   |
| 第二节 水利水电工程对环境的影响           | 1   |
| 第三节 水库水环境研究内容              | 3   |
| 第二章 水库水温结构及其分布的模拟预测        | 4   |
| 第一节 水库水温分层判别预测的模式识别理论与方法   | 4   |
| 第二节 水库垂向一维水温分布预测           | 13  |
| 第三节 水库垂向一维水温分布的模式识别及随机模拟   | 19  |
| 参考文献                       | 30  |
| 第三章 水库有机污染物的模拟预测           | 32  |
| 第一节 有机污染物的种类及氧平衡           | 32  |
| 第二节 斯崔特—费尔普斯 BOD—DO 模型及修正式 | 34  |
| 第三节 水库 BOD—DO 模型           | 39  |
| 第四节 BOD—DO 模型的参数估计和应用实例    | 43  |
| 第五节 综合水质生态模型简介             | 46  |
| 参考文献                       | 50  |
| 第四章 水库湖泊富营养化的模拟预测          | 51  |
| 第一节 水库湖泊富营养化               | 51  |
| 第二节 氮磷元素与浮游植物              | 54  |
| 第三节 水库湖泊富营养化的模拟预测          | 56  |
| 第四节 其他富营养化模型和定性预测          | 63  |
| 第五节 水库湖泊富营养化控制技术及其对策       | 67  |
| 参考文献                       | 69  |
| 第五章 水库重金属及放射性核素迁移转化模拟预测    | 70  |
| 第一节 水库重金属的迁移模拟             | 70  |
| 第二节 水库放射性核素的迁移模拟           | 86  |
| 参考文献                       | 93  |
| 第六章 水库细菌及悬浮物的模拟与预测         | 95  |
| 第一节 水库细菌自净特征与系统模拟          | 95  |
| 第二节 水库大肠杆菌群预测应用实例          | 97  |
| 第三节 水库总悬浮物的系统模拟            | 98  |
| 参考文献                       | 102 |

|      |                         |     |
|------|-------------------------|-----|
| 第七章  | 水库二维水环境通用数学模型及其混合有限分析解法 | 103 |
| 第一节  | 水库水流运动的基本特性及基本模型选择      | 103 |
| 第二节  | 水库水流运动基本方程及其模型化         | 105 |
| 第三节  | 水库水环境二维通用数学模型           | 108 |
| 第四节  | 边界条件和初始条件               | 112 |
| 第五节  | 水环境数学模型方程的标准化           | 114 |
| 第六节  | 混合有限分析法的基本思想            | 116 |
| 第七节  | 恒定有源方程的解                | 117 |
| 第八节  | 非恒定有源二维方程的有限分析解及迭代计算方法  | 123 |
| 第九节  | 某水库水温水质分布研究             | 126 |
| 参考文献 | 参考文献                    | 134 |
| 第八章  | 水库水环境质量评价               | 135 |
| 第一节  | 库区污染源的调查与监测             | 135 |
| 第二节  | 水环境质量评价标准               | 137 |
| 第三节  | 库区环境质量指数评价方法            | 140 |
| 第四节  | 水库水环境质量多级灰关联评价方法        | 141 |
| 参考文献 | 参考文献                    | 150 |
| 第九章  | 水利水电工程环境影响评价            | 151 |
| 第一节  | 评价的目的和内容                | 151 |
| 第二节  | 环境因子识别和权重分析与确定          | 152 |
| 第三节  | 环境影响因子的预测               | 159 |
| 第四节  | 环境影响综合评价                | 161 |
| 参考文献 | 参考文献                    | 173 |

# 第一章 绪 论

## 第一节 水资源开发与环境的关系

为了充分开发和利用自然界水资源，更好地为人类造福，达到兴利除害的目的，人们早已认识到必须兴建各种类型的水利工程。实践证明，水利工程对一个国家的国民经济建设具有重要的意义。但是，由于水利工程的兴建，特别是大中型水利水电工程，引起了河流水文、泥沙、地貌、生态等各个方面的变化，对环境产生各种影响，既有有利的影响方面，也有不利的方面。过去人们多注意水利工程对环境的有利影响方面，而常常忽视对环境的不利影响方面，日积月累，造成了不可估量的损失。

在河流上修坝筑库，水库蓄水带来防洪、发电、灌溉、航运、供水、渔业等综合效益，提高了人类控制河流系统的环境质量。然而，水库蓄水后，对于大坝上下游的物理、化学、生物特征的影响，已为国内外许多水库所证实，有的影响深远，形成潜在的长远后果。因此，水资源开发与环境有着密切关系，如果不弄清它们之间的关系性质、影响程度及其范围，盲目地开发水资源，就要受到自然界的“惩罚”。

## 第二节 水利水电工程对环境的影响

环境包括自然环境和社会环境两个部分。由于工程特性、区域条件、环境状况的不同，水利水电工程对环境的影响范围和程度也不相同。

自然环境又可以分为物理（水库淤积、下游河道冲淤、水库淹没、诱发地震、局地气候、水温、水质）、化学、生物（浮游生物、鱼类）等几个方面的影响。

水库蓄水后，改变了原来河道的水流特性。上游进入库区的水流速度减慢，水流挟沙能力降低，水流挟带的泥沙逐渐落淤在库区内，使有效库容减少，水库末端河床抬高，堵塞引水建筑物前缘，库区变动回水区末端航运可能受阻。

泥沙淤积之后，下泄水量挟带的泥沙减少，加上水流通过建筑物集中下泄，下游流速增大，使下游河道的冲刷作用增强，冲刷深度和部位将随着下泄量的大小、频率，水流挟沙程度，主流摆动范围和下游河床形态、地质地貌等条件不同而变化。

库水位的抬高，会给淹没区的土地、房屋、森林、城镇、交通线路、工矿企业以及文物古迹等造成淹没损失。库周地下水位上升，库区周边附近受到浸没影响，使耕地盐碱化，甚至可能形成部分沼泽地区，使原有工程建筑物的基础产生塌陷，加之库内风浪的冲刷引起滑坡和坍岸，将危及水库沿岸的居民和耕地。

水库蓄水改变水库区域原有地震活动的频度和强度，称为水库诱发地震。水库诱发地震对环境造成的影响是多方面的。震级大、烈度高的水库地震，会使坝体产生裂缝，重者导致大坝毁坏和附近城镇的破坏，垮坝洪水能造成突发性洪灾，地震还可能引起附近山崩、滑坡等次生灾害，其影响的后果是严重的。

水库蓄水对局地气候的影响主要表现为改变气温、湿度和降水量。一般来说，大型水库的影响比较明显，蒸发量比建库前陆地蒸发量显著加大，气温变化过程比较均衡，空气湿度加大，库中降雨量有所减少，雾日略有增加。

库内水流迟缓，库水更新期较长，水体受太阳辐射和对流混合以及热量传输作用，使水库具有特殊水温结构。对于那些水深不大、水流急、渗混强、相对容积小、调节性能差的中小型水库，库内水体水温垂向分布比较均匀，称为混合型。对于相对容积较大、水流较缓的大型水库，水温垂向分布大致分为三层，上层水温年内各个时期随气温和太阳辐射强弱而变化，称为表温层；中层水温随水深加大形成温度梯度的不连续性变化，称为温跃层；下层随着水深加大，库体热容量变化平稳，层内水温变幅不大，称为深水层。

水库所在流域内工农业和城镇居民的废弃物通过河道进入水库。虽然水库水流迟缓，更新期较长，能降低浑浊度，提高透明度，削减溶解矿物质，减少生化需氧量，起到一定的稀释净化作用，但是，对水质也会产生不利的影 响。例如，由于库内流速减小，生成物易于积聚，库内水温出现分层以后，使底层冷水层成了一种“死水”，因终年得不到光合作用而缺氧，变成厌氧微生物层。由于大坝使来水受阻，或是库湾死水区排水不畅，使水中携带的污染物沉积于底部，产生富集现象，富集后有可能再次悬浮、释放，造成二次污染。

水利水电工程对化学的影响主要是在水体交换过程中，水的化学成分由于库内流量、流速、水温的变化而发生变化。水体对污染物质的稀释和迁移能力与水流流速有关，流速越小，稀释迁移能力越小，而且使水体的复氧作用降低。在水温分层型的水体中，动荡的表温层实际上是营养生成层，而库底深水层是营养分解层，在这一层中进行着有机物的分解过程，从而影响库水中的化学过程。

水库建成后，天然河流原有的生态平衡将遭到破坏，新的生物群落在自然环境的变化过程中，经过自然选择，重新形成和发展为一种新的生态平衡。对浮游植物而言，主要表现在藻类的增殖，过量增殖的藻类会导致水体的富营养化，使水质恶化，水体产生异臭和毒性，从而丧失水体的利用价值。但是，浮游植物大量繁殖时，引起水中透明度降低，从而又改变了水中光辐射条件，经历一段时间，使水库中的浮游植物稳定下来，达到新的藻类数量的动态平衡。浮游动物主要是轮虫类、枝角类和桡足类，它是水库水体中另一种生物资源，对藻类的繁殖有直接影响，而浮游动物的繁殖又与水库所处的地理位置、气候、水库水温和水位变化条件等有着密切关系，因而各地区水库对浮游动物的影响情况不完全相同。

水库蓄水对鱼类的影响有有利和不利的两个方面。库中水流速度减慢，水位抬高，喜流性鱼类由于水库环境条件的不适应将会逐渐减少，回游性鱼类（包括一些珍稀鱼类，例如中华鲟）由于“阻隔作用”难以进行回游，对鱼类资源造成很大危害，这些都是水库对鱼类的不利影响。另一方面，库内水流减缓，浮游生物增加，为一些适应于缓流和静水、摄食浮游生物 的鱼类（主要是鲢和鳙）提供了良好的摄食肥育场所。同时，由于水位抬升使水面大幅度增加，通过人工放养家鱼或引进一些能在水库中定居的经济鱼类，经过自行增殖，使静水性鱼类的种群得到繁殖，有利于渔业的发展。

毫无疑问，兴建水利水电工程会给国家带来很大的社会效益和经济效益。但是，也不能忽视它对社会环境的影响。社会环境除了有利的影响之外，不利的影响包括工农业环境



问题、移民安置问题、人群健康以及文物保护等方面的问题，也要给予高度重视和采取防范措施。

因此，在水利水电工程的可行性研究和规划设计阶段，必须对该工程可能造成的各个方面环境影响的程度有充分的了解，作出科学的、恰如其分的评价，为民主的、科学的决策提供依据。

水利水电工程环境影响评价的内容和程序包括：编制工程环境影响评价工作大纲；调查工程影响地区的环境状况并进行必要的测试工作；通过对建设地区和影响范围的环境因子的现状、重要性以及维护和恢复环境质量的可能性和代价的分析，确定环境评价的范围和识别工程影响的主要环境因子；利用已建工程对比或采用各种预测手段与方法，对已确定评价的环境因子（由于工程实施的结果可能产生的变化情况），进行预测和评价，并对不利影响提出减免和改善措施；根据各种环境因子预测结果，对此工程前的环境状况，结合国家颁发的各项环境质量标准，综合分析各项因子对环境的总体影响，评价工程对环境的综合影响程度，提出评价结论；最后，编制工程的环境影响报告书。

### 第三节 水库水环境研究内容

如上所述，由于水库蓄水，将会给水文、地质、气候、水质、生态等各种自然环境造成不同程度的影响，其中的水库水温、水质问题则是水库水环境的主要研究内容。

天然河流的水质受流域的气候和土壤地质条件的控制，一方面使一些化学元素大量富集，另一方面天然植物腐烂中产生的某些有毒物质，使水质受到污染。同时，工业废水和城市污水排入河流，引起河水不同程度的污染。但是，河水进入水库之后，由于水库蓄水使水体的物理、化学和生物等方面的特性发生了变化，其水体污染特性与河水有很大区别。水库水体污染属于水环境问题，水库水环境问题的研究主要指的是水库水温结构形成的机制，水库有机污染物的迁移、扩散，水库重金属及放射性核素的迁移、转化，以及水库细菌、悬浮物生存和输移等。

## 第二章 水库水温结构及其分布的模拟预测

水库水温的研究经历了从观测实验到经验分析再到数学模拟的过程。美国于 60 年代末提出水库温度变化的一维数学模型，随后日本建立了模拟分层水库的温度和浊度的数学模型，前苏联在现场实验研究方面做了大量工作，建立了水介质的热转移方程。国内自 50 年代开始水库水温观测，60 年代初开始水库水温研究，70 年代中期以来，预估水库水温的经验类比方法不断出现，近来水库水温模拟预测的数学模型已得到研究和应用。在水库水温结构判别方面，基于经验类比和成因分析，国内外目前提出的方法主要有：① $\alpha$  和  $\beta$  指数法。②水库宽深比判别法。③诺尔顿密度弗劳德数法。④热平衡因子法。

### 第一节 水库水温分层判别预测的模式识别理论与方法

#### 一、水库水温分层的一般机理和规律

由于水库规模（库容及水深）、库内水体交换的频繁程度、水库运行方式，以及水文地质、气象、地理位置等因素的差异，水库水温随水深呈不同性状的变化，一般可分为混合型、过渡型和分层型三种结构。

同一种水温结构的水库，其水温变化特性及影响水温分层的诸因素应具有相同或相近的规律。就分层型水库而言，其水温结构在一年内呈周期性循环变化。冬季，太阳辐射弱，气温较低，库表水温也低，入流水温与水库水温温差较小，水体内部对流掺混好，水温基本上呈等温分布。春季，气温逐渐升高，太阳辐射和大气辐射对水体表面的热输送增加，库表层水温升高，同时，这一时期入库河水水温高于水库水温，进入水库表层后，在横向和垂向对流掺混，使表面温水层厚度加大。在表温层以下，由于水体对太阳辐射的吸收、穿透以及水体内部的对流换热、热传导等作用，加之风的影响，在水体内形成冷却和加热的交替过程，使得库表水热逐渐向下层传播。但是，这种传播是一个过程，而且水深愈大，太阳辐射及表面温水层的影响就愈弱。因此，水体表面受热多、放热少，水温升高较快，从而造成表温层与深水层之间温差增大，形成温度梯度，出现明显的季节性变化激烈的温跃层。温跃层以下，水体受外界影响更小，水温变化亦更缓慢。但底温层水温受地温、入流、热传导及水体贮热累积效应等方面的影响而比冬季有所提高。夏季，随着太阳辐射的加强及气温的持续上升，水体表面温度也随之升高，水温分层现象加剧，整个水体呈现水温高度分层状态。秋季，水体表面水温又随着太阳辐射及气温的下降而冷却，水体密度逐渐增大，表面冷却了的水逐渐下沉，下层温水则上浮，冷热水发生对流掺混直至形成新的等温层，入库河流到与之密度相同的水层。进入冬季，水库水体不断地进行上下对流换热，最终再次形成等温分布。

无论春夏秋冬，混合型水库水温总是大致处于等温分布状态，只是每一季节的温度值不同而已。设想存在一个水库，其水深较小（例如小于 5m），来水及泄水量较大，调节能

力差；或某一水库，其水深较大，来泄水都较小，但处于终年太阳辐射较弱、气温较低、年际温差较小，地温与库表水温相近的地理位置。对于前者，太阳辐射、入流及库表水热极易达到库底层，由于来水泄水量大，加之风的作用，整个水库内水体的对流混合和热传输很快完成。因此，库表库底不会形成大的温差。对后一种情况，由于库表水体吸放热终年变化不大，表层水温升降也不大，库表层和下层也没有大的温差出现，温跃层不会形成。这种水库属于混合型水库。

过渡型水库介于混合型和分层型之间，其水温状况随水文、气象等条件改变有时为等温分布，有时出现水温分层。

## 二、水库水温分层的模式判别思想

从水库水温分层的一般规律可看出，影响水温分层的因素非常复杂。目前国内外常用的四种水温分层判别方法（库水替换次数的  $\alpha$  和  $\beta$  指标判别法、水库宽深比判别法、诺尔顿密度弗劳德数判别法、热平衡因子法）实际上是一种公式加经验的方法，有时也得不到准确合理的判别结果。问题的根源在于：①现行判别方法试图从物理成因出发对水温分层进行解析表达，却对分层物理机制的描述不准确。②现有实验资料及其他先验知识有限，人们难以得到水温分层特性与一些内在因素的定量关系。鉴于此，这里提出水温分层的模式判别思想，既研究水温分层的物理机制，考虑各主要因素对水温分层的影响，又要得到一种合理、实用有效的分层判别预测方法。

将水库水温结构的三种类型当作三个模式，显然每一模式类都包含有一些水温分层特性相同或相近的水库，从而可将分属于各模式类的水库的水温分层特性看成一个模式样本集。实际上，由实测垂向水温分布或其它途径，我们已经知道一些已建成水库的水温模式属于哪一类（分层型、混合型或过渡型）。这样，只要分别从每一模式类中恰当地选取各水库水温分布特性的诸影响因素作为样本元素，由此组成样本集（称为训练模式样本集），通过一定的方法对分属于不同模式的性质不同的模式样本进行信息提炼和整理（称为“学习”过程），找出不同模式类的各自规律，在样本数量充分的前提下，就可将这一规律作为水库水温分层类型的总体规律。

## 三、模式类的线性判别函数及线性分类

### （一）判别函数分类的基本概念

模式识别系统的主要作用是判别各模式的所属类别，判别函数是其基本工具。视模式的可分性，判别函数可以是线性的或非线性的。

模式的可分性是指用某种判别函数对模式进行类别划分的可行性。

若任何判别函数都不能对模式进行类别划分，则称这些模式是不可分类的，否则是类别可分的。若模式类别可用某一线性判别函数来划分，则称这些模式是线性可分的。若模式类别不能用线性判别函数划分，但可用某一非线性判别函数来划分，则称这些模式是非线性可分的。

若记训练模式样本集为  $\{X\} = (\bar{x}_1, \bar{x}_2, \dots, \bar{x}_i, \dots, \bar{x}_n)$ ,  $\bar{x}_i = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{in})$ ；记  $M$  类线性可分模式集为  $\Omega = \{\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_M\}$ 。则存在直线方程

$$d(\bar{x}) = a_1x_1 + a_2x_2 + \dots + a_nx_n + a_{n+1} = A_0^T \bar{x} + a_{n+1} \quad (2-1)$$

作为模式类别划分的依据。其中  $A_0 = (a_1 a_2 \dots a_n)^T$  称为权向量； $d(\bar{x})$  称为判别函数。

式 (2-1) 也可写成

$$d(\bar{x}) = A^T \bar{x}$$

式中,  $\bar{x} = (x_1 x_2 \cdots x_n 1)^T$  称为增广模式向量,  $A = (a_1 a_2 \cdots a_n a_{n+1})^T$  称为增广权向量。

模式判别函数通过训练模式的迭代和学习算法而产生。属于不同模式类的样本, 具有不同的判别函数值, 以此将各种特性的样本划归相应的类别, 即达到了分类的目的。

### (二) 模式划分方式的确定

对于二类 ( $M=2$ ) 模式情况, 显然只需一个判别函数

$$d(\bar{x}) = \begin{cases} > 0 & \text{则 } \bar{x} \in \omega_1 \\ \leq 0 & \text{则 } \bar{x} \in \omega_2 \end{cases}$$

即可达到分类的目的。对于  $M$  类 ( $M \geq 3$ ) 模式, 则存在下述三种划分方式 (见图 2-1)。

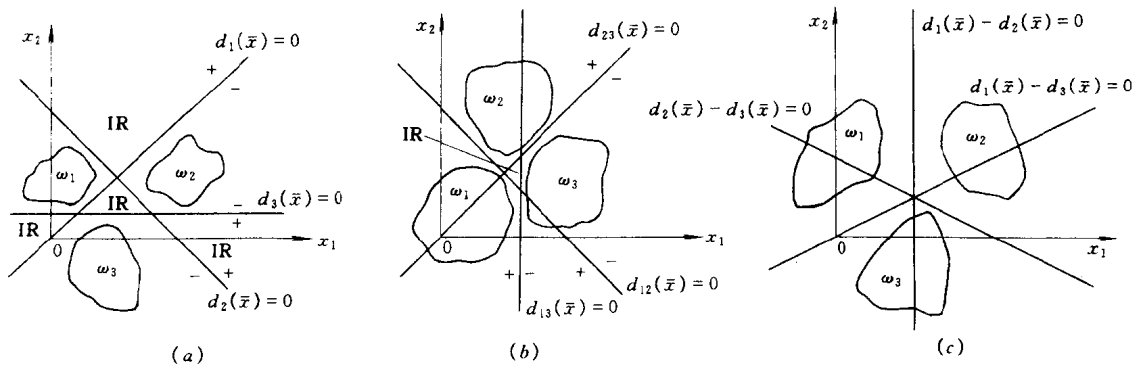


图 2-1 多类情况分类方式示意图

(a)  $\omega_i/\bar{\omega}_i$  两分法; (b) 含 IR 的  $\omega_i/\omega_j$  两分法; (c) 不含 IR 的  $\omega_i/\omega_j$  两分法

#### 1. $\omega_i/\bar{\omega}_i$ 两分法

此法即用线性判别函数将属于  $\omega_i$  类的模式与其余不属于  $\omega_i$  类 ( $\bar{\omega}_i$ ) 的模式分开, 判别函数为

$$d_i(\bar{x}) = A_i^T \bar{x} = \begin{cases} > 0 & \text{则 } \bar{x} \in \omega_i \\ \leq 0 & \text{则 } \bar{x} \in \bar{\omega}_i \end{cases} \quad i = 1, 2, \dots, M \quad (2-2)$$

这种分法的模式空间存在不属于  $\{\omega_i, i=1, 2, \dots, M\}$  中任何一类的不确定区域 (IR), 为了排除这种不确定区, 并将其余  $M-1$  类模式分别划分出来, 共需要  $M$  个判别函数。最简单的三类问题如图 2-1 (a) 所示。

#### 2. 含不确定区域 IR 的 $\omega_i/\omega_j$ 两分法

此法即一个判别函数只将两个类别划分开, 判别函数为

$$d_{ij}(\bar{x}) = A_{ij}^T \bar{x} = \begin{cases} > 0 \quad \forall j \neq i & \text{则 } \bar{x} \in \omega_i \\ \leq 0 \quad \forall j \neq i & \text{则 } \bar{x} \in \omega_j \end{cases} \quad i, j = 1, 2, \dots, M \quad (2-3)$$

一个判别函数只能划分出两个类别而不能将其余类别分开, 要将其余  $M-2$  个类别区分开必须再增加  $M-2$  个判别函数。若将  $M$  个模式类一一划分出来, 则需要  $(M-1) + (M-2) + \cdots + 1 = \frac{M(M-1)}{2}$  个判别函数, 如图 2-1 (b) 所示。

#### 3. 不含 IR 的 $\omega_i/\omega_j$ 两分法

此法为方式“2.”的特例。将方式“2.”中的判别函数  $d_{ij}(\bar{x})$  分解为

$$d_{ij}(\bar{x}) = d_i(\bar{x}) - d_j(\bar{x}) = (A_i - A_j)^T \bar{x}$$

这样，消除了 IR 的存在。  $\forall j \neq i, d_{ij}(\bar{x}) > 0$ ，即  $d_i(\bar{x}) > d_j(\bar{x})$  ( $i, j=1, 2, \dots, M$ ) 时， $\bar{x} \in \omega_i$ ，则判别函数为

$$\begin{cases} d_k(\bar{x}) = A_k^T \bar{x} & k = 1, 2, \dots, M \\ d_i(\bar{x}) = \max\{d_k(\bar{x})\} & \text{则 } \bar{x} \in \omega_i \end{cases} \quad (2-4)$$

由式 (2-4) 将  $M$  类模式一一划分出来需要  $M$  个判别函数，如图 2-1 (c) 所示。

从上可以看出， $\omega_i/\bar{\omega}_i$  两分法是将  $M$  类模式划分问题分解成  $M$  个一种类别的模式与其余  $M-1$  种类别的模式的两类划分问题，而  $\omega_i/\omega_j$  两分法是将一种模式类与另一种模式类分开，每次只涉及两种类别。显然  $M-1$  类模式比一个模式类更为分散。因此，用一条线性判别函数将一个模式类与另  $M-1$  类模式划分开来要比仅将某两种模式类别划分开更困难一些，即可分性更小一些。 $\omega_i/\omega_j$  两分法的缺点是需要  $\frac{M(M-1)}{2}$  个判别函数，而  $\omega_i/\bar{\omega}_i$  法只需  $M$  个。不含 IR 的  $\omega_i/\omega_j$  两分法的特点是把  $M$  类情况分成  $M-1$  个两类问题，且  $\omega_i$  类的判别界面全部与  $\omega_j$  类 ( $\forall j \neq i$ ) 的判别界面相邻，该法集中了前述两种分类法的优点。因此，在水温结构判别中可采用不含 IR 的  $\omega_i/\omega_j$  两分法进行模式分类。

### (三) 模式的线性可分性

线性判别函数的二分能力的度量是指它们能将一给定的模式样本集分割成两类的各种可能方式的总数。

记模式样本个数为  $N$ ，维数为  $k$ ，假定模式样本是随机分布的集合，则按照不含 IR 的  $\omega_i/\omega_j$  两分法，模式的线性二分法总数为

$$D(N, k) = \begin{cases} 2 \sum_{j=0}^k C_{N-1}^j & N-1 > k \\ 2^N & N-1 \leq k \end{cases} \quad (2-5)$$

即  $N$  个分布良好的模式样本最多有  $2^N$  种二分法，其中  $D(N, k)$  个为线性可实现。由此，线性可实现的二分法概率  $P_{N,k}$  为

$$P_{N,k} = \frac{D(N, k)}{2^N} = \begin{cases} 2^{1-N} \sum_{j=0}^k C_{N-1}^j & N > k+1 \\ 1 & N \leq k+1 \end{cases} \quad (2-6)$$

若取  $N = \lambda(k+1)$ ，则有

$$P_{\lambda(k+1), k} = \begin{cases} 2^{1-\lambda(k+1)} \sum_{j=0}^k C_{\lambda(k+1)-1}^j & \lambda > 1 \\ 1 & \lambda \leq 1 \end{cases} \quad (2-7)$$

如图 2-2， $\lambda=2$  时， $P_{2(k+1), k} = \frac{1}{2}$ 。在  $\lambda < 2$  的范围内，模式样本数目  $N \leq 2(k+1)$ ，样本维数越大，随着  $\lambda$  值减小，二分的概率增加越快。可以粗略地说，在  $\lambda < 2$  的范围内，若  $k$  较大，对  $N$  个模式样本进行线性分类的可能性基本上可得到保证。在  $\lambda > 2$  的范围内， $N > 2(k+1)$ ， $k$  越大则  $N$  越大，二分法能完成的概率越小。因此，将  $\lambda=2$  时的模式样本个数定义为二分能力  $C_k$ ，即

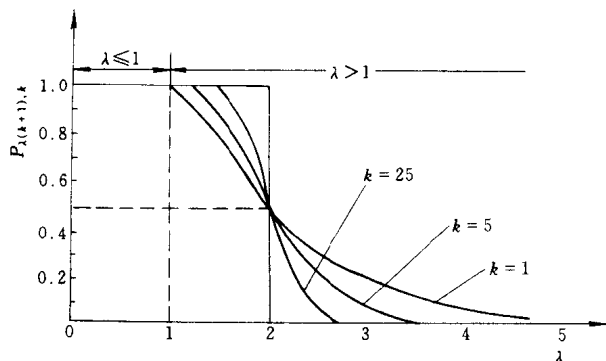


图 2-2  $P_{\lambda(k+1),k}$  与  $\lambda$  关系曲线

### (一) 由感知器算法推求模式判别函数

设有  $M$  种水库水温分层模式类别  $\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_M$ , 采用不含 IR 的  $\omega_i/\omega_j$  两分法, 则应存在  $M$  个判别函数  $\{d_i, i=1, 2, \dots, M\}$ . 若水温分层影响因子 (表达具有某种水温分层特性的水库) 组成的模式样本  $\bar{x} \in \omega_i$ , 则  $\forall j \neq i, d_i > d_j, i, j=1, 2, \dots, M$ .

#### 1. 赏罚概念

赏罚过程贯穿于感知器算法的始终, 是感知器算法的一个主要内容, 其基本概念是对正确分类的模式则“赏” (这里用“不罚”), 即权向量  $A$  不变. 对错误分类的模式则“罚”, 即权向量  $A$  加上一个正比于模式样本  $\bar{x}$  的分量. 用全部模式样本训练过一轮后, 只要有一个样本是判别错误的, 则需进行第二轮迭代, 继续这一赏罚过程, 直至全部分类正确.

#### 2. 模式判别函数

对  $M$  种水温分层模式类别, 设在训练过程中的第  $k$  次迭代时, 一个属于  $\omega_i$  类的水库水温分层模式样本  $\bar{x}$  被送入分类器, 其  $M$  个水温分层判别函数为

$$d_{j(k)} = A_{j(k)} \bar{x}, \quad j = 1, 2, \dots, M \quad (2-9)$$

在迭代过程中按赏罚概念对权向量进行修正:

(1) 若  $d_{i(k)} > d_{j(k)}, j=1, 2, \dots, M, j \neq i$  的条件成立, 则权向量不变, 即

$$A_{j(k+1)} = A_{j(k)} \quad j = 1, 2, \dots, M \quad (2-10)$$

(2) 若其中第  $l$  个权向量使  $d_{i(k)} \leq d_{l(k)}$ , 则相应的权向量应调整为

$$A_{i(k+1)} = A_{i(k)} + C\bar{x} \quad (2-11)$$

$$A_{l(k+1)} = A_{l(k)} - C\bar{x} \quad (2-12)$$

因此, 感知器迭代算法为

$$\begin{cases} A_{j(k+1)} = A_{j(k)} & \text{若 } d_{i(k)} > d_{j(k)} \quad j = 1, 2, \dots, M \\ A_{i(k+1)} = A_{i(k)} + C\bar{x} & \text{若 } d_{i(k)} \leq d_{l(k)} \quad j \neq i, j \neq l \\ A_{l(k+1)} = A_{l(k)} - C\bar{x} & \text{若 } d_{i(k)} \leq d_{l(k)} \end{cases} \quad (2-13)$$

式中,  $C$  为一正常数, 称为惩罚因子. 只要确定权向量初值  $A_{i(1)}, i=1, 2, \dots, M$  和惩罚因子  $C$ , 即可由全部训练模式样本进行迭代计算, 训练过一轮后, 只要有一个样本是判别错误的, 就需进行第二轮迭代, 即用全部模式再训练一次, 建立新的  $A$ , 如此不断反复, 直到

$$C_k = 2(k+1) \quad (2-8)$$

当  $N$  超过  $C_k$  时, 线性二分法能完成的概率迅速下降, 模式可分性迅速降低.

### 四、模式判别函数的感知器算法

感知器算法是指通过对训练模式样本集的“学习”得到判别函数的系数解, 从而产生线性可分的模式判别函数. 其优点是不需要对各类别中模式的统计性质作任何假设, 属于确定性方法.

用全部模式进行训练都能获得正确分类的结果时,迭代方才结束,最终得到权向量  $A$ ,代入式(2-9)即得模式判别函数。

## (二) 感知器算法的收敛性

设  $\hat{A}_i$  ( $i=1, 2, \dots, M$ ) 为权向量的解,则它具有以下性质:

$$\hat{A}_i^T \bar{x} > \hat{A}_j^T \bar{x} \quad \text{若 } \bar{x} \in \omega_i, \forall j \neq i, j = 1, 2, \dots, M \quad (2-14)$$

按照感知器算法,若模式样本分类正确则权向量不变,故只需研究分类错误的情况。由式(2-11)和式(2-12),设至全部样本分类正确时的整个迭代过程中,权向量  $A_i$  共经过  $k$  次“加  $C\bar{x}$ ”和“减  $C\bar{x}$ ”修改,从而得到  $\hat{A}_i$ 。为方便计,取  $C=1$ 。写出迭代过程:

$$A_{i(k+1)} = A_{i(1)} + \sum_{\bar{x}_p \in \omega_i} \bar{x}_p - \sum_{\bar{x}_q \in \omega_i} \bar{x}_q \quad q \neq p \quad (2-15)$$

对式(2-15)两边同乘  $\hat{A}_i$  得

$$A_{i(k+1)}^T \hat{A}_i = A_{i(1)}^T \hat{A}_i + \sum_{\bar{x}_p \in \omega_i} \bar{x}_p^T \hat{A}_i - \sum_{\bar{x}_q \in \omega_i} \bar{x}_q^T \hat{A}_i \quad q \neq p \quad (2-16)$$

在整个模式样本集中,所有不属于  $\omega_i$  类的模式样本的第  $i$  类判别函数的最大值记为  $T_1$ ,即  $T_1 = \max \{ \bar{x}_q^T \hat{A}_i \}$ , 记  $T_2 = \bar{x}_p^T \hat{A}_i$ , 由式(2-16)有

$$A_{i(k+1)}^T \hat{A}_i \geq A_{i(1)}^T \hat{A}_i + (T_2 - T_1)k \quad (2-17)$$

由柯西—许瓦兹不等式有

$$[A_{i(k+1)}^T \hat{A}_i]^2 \leq \|A_{i(k+1)}\|^2 \cdot \|\hat{A}_i\|^2 \quad (2-18)$$

将式(2-17)代入得

$$\|A_{i(k+1)}\|^2 \geq \frac{[A_{i(1)}^T \hat{A}_i + (T_2 - T_1)k]^2}{\|\hat{A}_i\|^2} \quad (2-19)$$

由式(2-11)和式(2-12)有

$$A_{i(l)} = A_{i(l-1)} - \bar{x}_{q(u)} \quad l, j = 2, 3, \dots, k+1, l \neq j$$

$$A_{i(j)} = A_{i(j-1)} + \bar{x}_{p(u)} \quad u = 1, 2, \dots, k$$

$$\|A_{i(l)}\|^2 = \|A_{i(l-1)}\|^2 - 2A_{i(l-1)}^T \bar{x}_{q(u)} + \|\bar{x}_{q(u)}\|^2 \quad (2-20)$$

$$\|A_{i(j)}\|^2 = \|A_{i(j-1)}\|^2 + 2A_{i(j-1)}^T \bar{x}_{p(u)} + \|\bar{x}_{p(u)}\|^2 \quad (2-21)$$

记  $R = \max \{ \|\bar{x}_{q(u)}\|^2 \}$ ,  $S = \max \{ \|\bar{x}_{p(u)}\|^2 \}$ ,  $D = A_{i(l-1)}^T \bar{x}_{q(u)}$ ,  $Q = A_{i(j-1)}^T \bar{x}_{p(u)}$ , 将  $k$  次迭代算式相加得

$$\|A_{i(k+1)}\|^2 \leq \|A_{i(1)}\|^2 + 2k(Q - D) + k(R + S) \quad (2-22)$$

比较式(2-19)和式(2-22)知,权向量最大校正次数  $k_m$  为有限值,条件是模式类线性可分,即线性判别函数  $d_i = A_i^T \bar{x}$  存在。 $k_m$  由下式决定:

$$\frac{[A_{i(1)}^T \hat{A}_i + (T_2 - T_1)k_m]^2}{\|\hat{A}_i\|^2} = \|A_{i(1)}\|^2 + 2k_m(Q - D) + k_m(R + S) \quad (2-23)$$

感知器算法收敛于  $k_m$  次迭代运算之内。

## 五、水库水温分层判别预测函数

这里以湖北省部分水库为样本,研究水库水温分层判别函数的推求及应用。

### (一) 训练模式样本的确定

模式判别函数实际上是对训练模式样本的规律性的提炼和总结。训练模式样本选取的合理性从根本上决定了判别函数的有效性。因此,为了推求一种准确适用的水库水温分层

判别函数，必须选择能反映水温分层模式总体的本质特征的水库作为训练模式样本，它包含两层含义。其一是从样本集这一宏观上说，样本必须具有代表性，具体地说，水温分层模式训练样本集应包含实际存在的各种水温结构类型的水库，且样本数量应满足一定要求。其二是微观上就每一个样本的元素构成而言，样本元素必须能准确表达样本的根本特性。水库水温分层模式样本元素应由那些对水温分层特性影响较大的、决定水温分层变化的因子组成。

水库水温分层特性的主要影响因素有如下几点。

- (1) 水库几何特征。包括库容、水深、面积、平均宽度、底坡等。
- (2) 水文水力因素。如入库出库水量、水体流态、平均流速等。
- (3) 地质地貌因素。高山峡谷型水库受风的干扰小，平原河谷型水库受风的干扰大。同时，库底质、糙率、地形等对水温分层特性都有一定影响。
- (4) 气象因素。如太阳辐射、气温、风速风向、降水、蒸发等。
- (5) 地理位置。水库所处地理纬度决定了太阳高度角的大小、昼夜和四季的长短、太阳辐射强度及水体热量收支情况的变化等。同时，地理位置不同，地温也不一样。

应该说，要得到一种完善的水库水温分层判别函数，训练模式样本元素必须包括上述所有各影响因子。但是受资料的限制，且考虑到湖北省境内各地区纬度、气象条件等差异不大，同时也为了减小计算量，作为一种理论和方法研究，仅取水库平均水深  $H$ 、总库容  $V$  及多年平均径流量  $Y$  与总库容之比值  $Y/V$  等三个因子作为训练模式样本元素。即对第  $i$  ( $i=1, 2, \dots, N$ ) 个水库样本有

$$\bar{x}_i = (x_{i1} \quad x_{i2} \quad x_{i3}) = \left( \frac{Y_i}{V_i} \quad V_i \quad H_i \right) \quad (2-24)$$

湖北省部分水库的  $H$ 、 $V$  和  $Y$  值如表 2-1 所示。

表 2-1 湖北省部分水库水温分层特征值

| 水库名称 | 总库容 $V$<br>(亿 $m^3$ ) | 平均水深 $H$<br>(m) | 多年平均年径流量 $Y$<br>(亿 $m^3$ ) | $\frac{Y}{V}$ | 水温垂直<br>结构类型 |
|------|-----------------------|-----------------|----------------------------|---------------|--------------|
| 三河口  | 1.600                 | 21.50           | 0.940                      | 0.588         | 分 层          |
| 大同   | 2.695                 | 17.48           | 1.429                      | 0.530         | 分 层          |
| 花山   | 1.725                 | 17.25           | 0.536                      | 0.311         | 分 层          |
| 王英   | 6.360                 | 19.27           | 2.100                      | 0.330         | 分 层          |
| 青山   | 4.280                 | 20.88           | 3.721                      | 0.869         | 分 层          |
| 漳河   | 20.350                | 18.38           | 8.91                       | 0.438         | 分 层          |
| 温峡口  | 5.490                 | 16.00           | 2.05                       | 0.373         | 分 层          |
| 吴山   | 1.888                 | 13.88           | 0.302                      | 0.160         | 分 层          |
| 天河口  | 1.168                 | 18.99           | 0.240                      | 0.205         | 分 层          |
| 丹江口  | 208.90                | 24.69           | 379.0                      | 1.809         | 分 层          |
| 道观河  | 1.07                  | 13.53           | 0.54                       | 0.505         | 过 渡          |
| 金沙河  | 1.787                 | 10.00           | 0.59                       | 0.330         | 过 渡          |
| 尾斗山  | 1.105                 | 10.00           | 0.41                       | 0.371         | 过 渡          |
| 明山   | 1.69                  | 13.02           | 0.95                       | 0.562         | 过 渡          |
| 花园   | 1.044                 | 16.14           | 0.629                      | 0.602         | 过 渡          |
| 龙坪   | 1.420                 | 14.73           | 0.850                      | 0.598         | 过 渡          |



续表 2-1

| 水库名称 | 总库容 $V$<br>(亿 $m^3$ ) | 平均水深 $H$<br>(m) | 多年平均年径流量 $Y$<br>(亿 $m^3$ ) | $\frac{Y}{V}$ | 水温垂直<br>结构类型 |
|------|-----------------------|-----------------|----------------------------|---------------|--------------|
| 郑家河  | 1.930                 | 10.20           | 0.80                       | 0.414         | 过渡           |
| 梅店   | 1.763                 | 11.02           | 0.762                      | 0.412         | 过渡           |
| 石桥   | 0.1715                | 7.31            | 0.092                      | 0.536         | 过渡           |
| 白洋河  | 0.2403                | 9.21            | 0.1394                     | 0.580         | 混合           |
| 清水河  | 0.330                 | 5.88            | 0.589                      | 1.785         | 混合           |
| 黄沙   | 0.1805                | 10.03           | 0.172                      | 0.953         | 混合           |
| 香山   | 0.2545                | 8.60            | 0.232                      | 0.912         | 混合           |
| 蔡贤   | 0.470                 | 10.68           | 0.3871                     | 0.824         | 混合           |
| 刘店   | 0.170                 | 4.10            | 0.123                      | 0.724         | 混合           |
| 雨林山  | 0.1555                | 4.64            | 0.084                      | 0.54          | 混合           |
| 乐山坡  | 0.154                 | 4.60            | 0.078                      | 0.506         | 混合           |
| 龙垱   | 0.142                 | 4.15            | 0.0955                     | 0.672         | 混合           |
| 陈坡   | 0.165                 | 3.77            | 0.150                      | 0.909         | 混合           |

## (二) 水温分层判别函数

记水库水温垂直结构的三种类型：分层型、过渡型和混合型分别为模式类  $\omega_1$ 、 $\omega_2$  和  $\omega_3$ 。以表 2-1 的水库组成训练模式样本集，由感知器算法推求水温分层判别函数。

权向量初值  $A_{i(1)}$  ( $i=1, 2, \dots, M$ ) 和赏罚因子  $C$  的选取没有固定的规律，一般可视迭代计算情况任意选定。这里取  $A_{1(1)}=A_{2(1)}=A_{3(1)}=0$ ,  $C=1$ ，将各训练模式样本依次一一送入分类器，按式 (2-13) 进行迭代计算，当所有训练模式样本都分类正确时，得到三个模式判别函数的权向量分别为

$$A_1 = (-182.49 \quad 1.5563 \quad -2424.66 \quad -497)^T$$

$$A_2 = (-177.979 \quad -132.2145 \quad -2439.86 \quad -75)^T$$

$$A_3 = (115.137 \quad -443.0245 \quad -2457.01 \quad 106)^T$$

相应的三个水温分层判别函数为

$$d_1 = -182.49\left(\frac{Y}{V}\right) + 1.5563V - 2424.66H - 497 \quad (2-25)$$

$$d_2 = -177.979\left(\frac{Y}{V}\right) - 132.2145V - 2439.86H - 75 \quad (2-26)$$

$$d_3 = 115.137\left(\frac{Y}{V}\right) - 443.0245V - 2457.01H + 106 \quad (2-27)$$

## (三) 水库水温分层的判别及预测

根据分类器原理，当某一样本  $\bar{x}_l$  ( $l=1, 2, \dots$ ) 被送入分类器后，得到  $d_i > d_j$ ,  $\forall j \neq i$ ;  $i, j=1, 2, \dots, M$  时，则  $\bar{x}_l \in \omega_i$ 。当  $\bar{x}_l$  为训练模式样本时，即为模式分类的还原检验。当  $\bar{x}_l$  为非训练模式样本时，由判别函数可判别那些类别未知的样本的所属类别。

由水库水温分层判别函数式 (2-25) ~ 式 (2-27) 进行水温分层模式分类还原检验，并对类别未知的非训练水库水温分层模式样本进行类属判别。结果如表 2-2 所示，其中还原检验样本为从表 2-1 所列三类水库水温分层模式（分层、过渡、混合）中分别任意抽取的训练模式样本。