

ICS 27.140

P 59

备案号: J2348—2017

NB

中华人民共和国能源行业标准

P

NB / T 35094 — 2017

水电工程水温计算规范

Code for water temperature calculation of
hydropower projects

2017-03-28 发布

2017-08-01 实施

国家能源局 发布

中华人民共和国能源行业标准

水电工程水温计算规范

Code for water temperature calculation of hydropower projects

NB / T 35094 — 2017

主编部门：水电水利规划设计总院

批准部门：国 家 能 源 局

施行日期：2017 年 8 月 1 日

中国电力出版社

2017 北 京

国家能源局

公 告

2017 年 第 6 号

依据《国家能源局关于印发〈能源领域行业标准化管理办法（试行）〉及实施细则的通知》（国能局科技〔2009〕52 号）有关规定，经审查，国家能源局批准《页岩气 储层改造 第 2 部分：工厂化压裂作业技术规范》等 159 项行业标准，其中能源标准（NB）34 项、电力标准（DL）39 项，石油标准（SY）86 项，现予以发布。

附件：行业标准目录

国家能源局

2017 年 3 月 28 日

NB / T 35094 — 2017

附件：

行 业 标 准 目 录

序号	标准编号	标准名称	代替标准	采标号	批准日期	实施日期
...						
15	NB/T 35094 —2017	水电工程 水温计算规范			2017-03-28	2017-08-01
...						

前 言

根据《国家能源局关于下达 2014 年第一批能源领域行业标准制（修）订计划的通知》（国能科技〔2014〕298 号）的要求，规范编制组经广泛调查研究，认真总结实践经验，参考国内先进标准，并在广泛征求意见的基础上，制定本规范。

本规范的主要技术内容是：基本资料、水库水温计算、水库下游河流水温计算。

本规范由国家能源局负责管理，由水电水利规划设计总院提出并负责日常管理，由能源行业水电规划水库环保标准化技术委员会负责具体技术内容解释。执行过程中如有意见或建议，请寄送水电水利规划设计总院（地址：北京市西城区六铺炕北小街 2 号，邮编：100120）。

本规范主编单位：水电水利规划设计总院

中国电建集团中南勘测设计研究院有限公司

本规范参编单位：四川大学

中国电建集团贵阳勘测设计研究院有限公司

中国电建集团华东勘测设计研究院有限公司

中国电建集团昆明勘测设计研究院有限公司

本规范主要起草人员：顾洪宾 薛联芳 颜剑波 邓 云

邱进生 陆 波 张德见 楚凯锋

梁瑞峰 李 翔 脱友才 李克锋

崔 磊 陈栋为 黄 滨 徐天宝

谢恩泽 周 鹏 赵心畅 赵 坤

董 连 杨文正 李 璜

本规范主要审查人员：万文功 喻卫奇 陈国柱 黄川友

常剑波	李 敏	李 翀	李精华
金 弈	蒋 红	牛天祥	戴向荣
李 英	傅菁菁	雷少平	韦 兵
邓跃进	李仕胜		

目 次

1	总则	1
2	术语	2
3	基本资料	3
3.1	一般规定	3
3.2	工程资料	3
3.3	气象水文资料	4
3.4	河流水温资料	4
3.5	水库水温资料	4
3.6	基础资料分析	5
4	水库水温计算	6
4.1	一般规定	6
4.2	水库水温结构判别	6
4.3	库区水温计算	6
4.4	下泄水温计算	7
4.5	计算结果分析	7
5	水库下游河流水温计算	9
5.1	一般规定	9
5.2	河流水温计算	9
5.3	计算结果分析	9
附录 A	水库水温结构判别方法	10
附录 B	水库水温计算数值模型	12
附录 C	坝前垂向水温估算经验公式	21
附录 D	水库下泄水温计算方法	25

NB / T 35094 — 2017

附录 E 河流水温计算简化公式	30
本规范用词说明	32
引用标准名录	33
附：条文说明	35

Contents

1	General provisions	1
2	Terms	2
3	Basic data	3
3.1	General requirement	3
3.2	Engineering data	3
3.3	Meteorological and hydrological data	4
3.4	River water temperature data	4
3.5	Reservoir water temperature data	4
3.6	Basic data analysis	5
4	Water temperature calculation for reservoir	6
4.1	General requirement	6
4.2	Discrimination of reservoir water temperature structure	6
4.3	Water temperature calculation for reservoir area	6
4.4	Water temperature calculation of reservoir outflow	7
4.5	Result analysis	7
5	Water temperature calculation for river reach downstream the reservoir	9
5.1	General requirement	9
5.2	Water temperature calculation for river reach	9
5.3	Result analysis	9
Appendix A	Discrimination methods for reservoir water temperature structure	10
Appendix B	Numerical models for calculating water temperature of reservoir	12

NB / T 35094 — 2017

Appendix C	Empirical formulae for estimating vertical water temperature of reservoir near the dam	21
Appendix D	Methods for calculating water temperature of reservoir outflow	25
Appendix E	Simplified formulae for calculating water temperature of river	30
Explanation of wording in this code		32
List of normative standards		33
Addition: Explanation of provisions		35

1 总 则

1.0.1 为规范水电工程水温计算内容、方法和技术要求，制定本规范。

1.0.2 本规范适用于水电工程水库水温及下游河流水温计算。

1.0.3 应根据不同类型水库特征和生态保护要求，合理确定水温计算的范围、边界条件和方法，计算结果应能反映水电工程对水温的影响范围和程度。

1.0.4 水温计算内容应主要包括水库水温结构判别、库区水温计算、水库下泄水温计算和下游河流水温计算。

1.0.5 应广泛收集并合理选用基础资料。当基础资料缺乏时，应通过类比、插补延长、现场观测等途径补充。

1.0.6 应根据水电工程特性和水温控制目标，合理确定精度要求及水温计算方法。应选择代表性的水文周期作为计算工况，特殊情况下宜考虑与不利水温条件的组合工况。当水电工程影响区域不存在对水温有特殊需求的生态环境敏感目标时，水温计算分析可适当简化。

1.0.7 水电工程水温计算，除应符合本规范的规定外，尚应符合国家现行有关标准的规定。

2 术 语

2.0.1 水库水温结构 reservoir water temperature structure

水库水温的时空分布及其变化特征。根据垂向水温年内分布特征，可分为分层型、混合型和过渡型三种结构类型。

2.0.2 分层型水库 thermally stratified reservoir

全年中除冬季外的其他时段水温随深度的变化明显，存在表温层、温跃层和滞温层多层水温结构，或者滞温层分布不明显但有明显的温跃层的水库。

2.0.3 混合型水库 thermally mixed reservoir

全年水温随深度的变化较小，无明显的滞温层和温跃层的水库。

2.0.4 过渡型水库 thermally transitive reservoir

介于分层型和混合型之间，且年内部分时段存在水温分层现象的水库。

2.0.5 表温层 epilimnion

分布在水库库表，全年水温随气温变化而变化，且随水深变化较小的水层。

2.0.6 滞温层 hypolimnion

分布在水库库底，全年水温维持在很小的范围内变化，且随水深变化较小的水层。

2.0.7 温跃层 thermocline

介于表温层和滞温层之间，且水温垂向梯度明显，全年水温变化较大的水层。

2.0.8 水温延滞效应 hysteresis effect of water temperature change

水库调蓄导致下游河道水温与原天然水温过程相比延滞的现象。

3 基本资料

3.1 一般规定

3.1.1 应根据计算范围、计算工况、计算精度和计算方法等要求，充分收集水温计算所需基本资料，必要时补充现场观测。

3.1.2 应对收集的资料进行整编、分析，合理采用。计算所依据的资料系列应具有可靠性、一致性和代表性。

3.2 工程资料

3.2.1 应收集水电工程特性资料，并应符合下列规定：

1 应收集水库特征参数、调节性能、水位—库容曲线、水位—面积曲线等水库特性资料。

2 应收集大坝地理位置、大坝长度、坝顶高程、主要取（泄）水口尺寸及底板高程等枢纽建筑物基本情况资料。

3 当进行三维数值模型计算时，还应收集挡水与取（泄）水建筑物平面布置图和纵剖面图。

3.2.2 应收集水电工程运行调度资料，主要包括水库调度方案、主要取（泄）水口逐旬出库流量及逐旬坝前水位。

3.2.3 应收集水库淹没范围地形资料和下游河道地形资料。水库地形资料应主要包括水库淹没范围图和库区大断面资料，大断面间隔不应大于 5km，库区地形复杂段大断面间隔不应大于 2km，地形急剧变化段应适当加密大断面。当需要开展三维建模时，应收集水库模拟区域不小于 1:1000 的地形图。下游河道地形资料应主要包括代表性断面的大断面资料。

3.3 气象水文资料

3.3.1 应收集水电工程区域代表性气象观测站多年平均的逐旬气温、相对湿度、风速、日照时数、云量等资料。当工程区域缺乏气象观测资料时，可采用相似地区的气象观测资料。

3.3.2 应收集计算河段干、支流的水文资料，主要包括逐旬流量及常遇洪水资料。当需要计算逐日水温过程时，应收集逐日流量资料。

3.4 河流水温资料

3.4.1 应收集计算河段干、支流逐旬水温观测资料。当需要计算逐日水温过程时，应收集逐日河流水温资料。

3.4.2 当缺乏入库断面河流水温观测资料时，可采用上、下游水温测站资料推求。当缺少水温观测资料时，可类比相似地区气温、河流水温资料，采用气温与水温相关法进行估算。

3.4.3 当需要对河流水温补充观测时，应符合下列规定：

1 应在干、支流入库控制断面，坝址，下游主要支流汇入口设置观测断面。

2 应观测河流每日 08 时的水温。对于高原融雪补给的河流，应观测 08 时、14 时、20 时的水温。

3.4.4 水温观测技术要求应按现行行业标准《环境影响评价技术导则 地面水环境》HJ/T 2.3 的相关规定执行。

3.5 水库水温资料

3.5.1 当需要进行水库水温类比分析、模型验证时，应收集类比水库或验证水库的入库水温、坝前垂向水温及下泄水温等资料。类比水库或验证水库应与开展水温计算的水库在自然地理条件、水库特性方面具有一定的相似性和可比性。

3.5.2 当需要对水库水温补充观测时，应符合下列规定：

- 1 应在坝前、库区、库尾和坝下设置水温观测断面。
- 2 应同步开展入库水温、坝前垂向水温及下泄水温观测。
- 3 宜进行一个完整水文年的入库水温和坝下水温观测，观测每日 08 时的水温。
- 4 应在升温期和降温期开展坝前垂向水温观测。对于水温延滞效应显著的水库，还应开展低温期、高温期等特殊时段的水温观测。

3.5.3 对于采取了分层取水措施的类比水库或验证水库，应收集分层取水措施实施期间的水温资料。

3.6 基础资料分析

- 3.6.1** 应检查所收集的基础资料是否充分、有效，当发现错误时，应予以修正并说明。
- 3.6.2** 当收集的水文资料系列长度不能满足计算要求时，可根据现行行业标准《水电水利工程水文计算规范》DL/T 5431 的有关规定进行插补延长。
- 3.6.3** 应根据收集的资料分析水电工程建设前河道的水温变化规律，主要包括水温季节变化规律和沿程变化规律，以及干流与支流水温差异。

4 水库水温计算

4.1 一般规定

4.1.1 应以水库水温结构类型判别为基础,根据基础资料和计算需求,选择经验公式或者数值模型开展水库水温计算。

4.1.2 应根据水库水温结构判别结果和生态环境敏感目标的分布情况确定水库水温计算范围。

4.1.3 应按丰、平、枯水年选择代表性的计算工况,特殊情况下还可选择低水温年工况。

4.2 水库水温结构判别

4.2.1 当有与计算水库自然地理条件、水库特性相近的水库水温实测资料时,宜采用类比法判别水库水温结构。

4.2.2 当缺乏相似水库水温实测资料时,可通过计算水库参数 α 、 β 值或密度弗劳德数判别水库总体水温结构。水库水温结构判别方法应符合本规范附录A的有关规定。

4.3 库区水温计算

4.3.1 采用数值模型计算河道型水库水温时,应符合下列规定:

1 分层型或过渡型水库水温宜采用立面二维数值模型计算,计算方法应符合本规范附录B中第B.1节的有关规定。

2 混合型水库水温宜采用纵向一维数值模型计算,计算方法应符合本规范附录B中第B.2节的有关规定。

3 分层型水库水温简化计算时,可采用垂向一维数值模型计算,计算方法应符合本规范附录B中第B.3节的有关规定。

4.3.2 采用数值模型计算湖泊型水库水温时，应符合下列规定：

1 分层型或过渡型水库水温宜采用垂向一维数值模型计算，计算方法应符合本规范附录 B 中第 B.3 节的有关规定。

2 混合型水库水温宜采用零维数值模型，计算方法应符合本规范附录 B 中第 B.4 节的有关规定。

4.3.3 对于横向、纵向及垂向水温分布差异均较大的水库或库段，且关注重点为温度场的三维空间分布时，其水温应采用三维数值模型计算。计算方法应符合本规范附录 B 中第 B.5 节的有关规定。

4.3.4 采用数值模型计算水库水温时，应根据验证水库的实测资料对模型中主要水动力和水温参数进行率定和验证。

4.3.5 对于存在封冻期的水库，采用数值模型计算水库水温时，应考虑冰与大气、冰与水体间的热通量以及冰盖厚度的变化。

4.3.6 对水库坝前垂向水温进行估算可采用经验公式法。当有类比水库的库表和库底水温资料时，宜采用指数函数法，应用指数函数法应符合本规范附录 C 第 C.1 节的有关规定；当缺乏类比水库的库表和库底水温资料时，宜采用余弦函数法，应用余弦函数法应符合本规范附录 C 中第 C.2 节的有关规定。

4.4 下泄水温计算

4.4.1 下泄水温宜采用数值模型与库区水温同步计算，计算方法应符合本规范附录 D 第 D.1 节的有关规定。

4.4.2 当水库坝前垂向水温是通过经验公式或类比法获得时，下泄水温可根据坝前垂向水温和流速分布情况，采用流速加权经验公式计算，计算方法应符合本规范附录 D 中第 D.2 节的有关规定。

4.5 计算结果分析

4.5.1 采用数值模型计算水库水温或下泄水温时，应结合水电工程运行调度及水库流场变化分析计算结果的合理性。

4.5.2 对于拟采取分层取水措施的水电工程，水库水温计算应进

行分层取水效果分析，并满足下列要求：

1 分析时段应选择水库分层明显、下游保护目标对水温影响敏感的时段。

2 水温延滞效应显著的水库应分低温期、高温期、升温期、降温期等特殊时段进行分析。

3 存在水温敏感对象时，应分析典型日水温变化。

4.5.3 分层取水效果分析内容应包括有、无措施对比分析，下泄水温与原河道水温对比分析。

5 水库下游河流水温计算

5.1 一般规定

5.1.1 应根据水电工程下游水文条件和对水温有特殊需求的生态环境敏感目标分布情况，确定水库下游河流水温计算范围。

5.1.2 当水库下游河流汇入的支流较多时，水温计算可对支流进行概化，相邻支流可合并概化为一条支流。

5.2 河流水温计算

5.2.1 河流水温计算宜采用纵向一维数值模型，计算方法应符合本规范附录 B 中第 B.2 节的有关规定；简单估算可采用简化公式，且应符合本规范附录 E 的有关规定。

5.2.2 计算支流来水汇入后的混合水温应符合本规范附录 E 的有关规定。

5.3 计算结果分析

5.3.1 应分析水电工程建设前、后下游河流水温沿程变化，分析水温影响范围、程度和延滞效应。

5.3.2 当水库下游存在对水温有特殊需求的生态环境敏感目标时，应重点分析水电工程下泄水温对其的影响，明确影响时段和程度。

附录 A 水库水温结构判别方法

A.1 参数 α - β 判别法

A.1.1 采用参数 α - β 判别法判别水库水温结构时, 应按下列公式计算 α 值和 β 值:

$$\alpha = W/V \quad (\text{A.1.1-1})$$

$$\beta = W_1/V \quad (\text{A.1.1-2})$$

式中: α 、 β ——判别参数;

W ——多年平均年径流量 (m^3);

W_1 ——一次洪水总量 (m^3);

V ——正常蓄水位库容 (m^3)。

A.1.2 采用本规范公式 (A.1.1-1)、公式 (A.1.1-2) 分别计算 α 、 β 值后, 应按下列方法判别水库水温结构:

1 对于 $\alpha \leq 10$ 的水库, 水温结构为分层型。对于分层型水库, 如果遇到 $\beta > 1$ 的洪水, 将出现临时混合现象; 但如果 $\beta < 0.5$ 时, 洪水对水库水温结构没有影响。

2 对于 $\alpha \geq 20$ 的水库, 水温结构为混合型。

3 对于 $10 < \alpha < 20$ 的水库, 水温结构为过渡型。

A.2 Norton 密度弗劳德数判别法

A.2.1 采用 Norton 密度弗劳德数判别法判别水库水温结构时, 应按下列公式计算密度弗劳德数 (Fr) 值:

$$Fr = \frac{1}{(\varepsilon g)^{1/2}} \frac{LQ}{HV} \quad (\text{A.2.1})$$

式中: Fr ——密度弗劳德数;

L ——水库长度 (m);

Q ——入库流量 (m^3/s);

ε ——参数, 可取 1×10^{-6} ;

g ——重力加速度 (m/s^2);

H ——平均水深 (m);

V ——蓄水体体积 (m^3)。

A.2.2 采用本规范公式 (A.2.1) 计算 Fr 值后, 应按下列方法判别水库水温结构:

- 1 对于 $Fr \leq 0.1$ 的水库, 水温结构为分层型。
- 2 对于 $Fr \geq 1$ 的水库, 水温结构为混合型。
- 3 对于 $0.1 < Fr < 1$ 的水库, 水温结构为过渡型。

附录 B 水库水温计算数值模型

B.1 立面二维数值模型

B.1.1 立面二维数值模型应包括水动力学和水温方程组，水动力学方程包括连续方程和动量方程。水动力学方程采用鲍辛涅斯克假定，在密度变化不大的浮力流中，只在重力项中计入浮力影响。立面二维数值模型应按下列公式计算：

$$\frac{\partial(Bu)}{\partial x} + \frac{\partial(Bw)}{\partial z} = qB \quad (\text{B.1.1-1})$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial(Bu)}{\partial t} + u \frac{\partial(Bu)}{\partial x} + w \frac{\partial(Bu)}{\partial z} = & -\frac{B}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left(D_x B \frac{\partial u}{\partial x} \right) \\ & + \frac{\partial}{\partial z} \left(D_z B \frac{\partial u}{\partial z} \right) + qBu_b \end{aligned} \quad (\text{B.1.1-2})$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial(Bw)}{\partial t} + u \frac{\partial(Bw)}{\partial x} + w \frac{\partial(Bw)}{\partial z} \\ = -\frac{B}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + \beta B \Delta T g + \frac{\partial}{\partial x} \left(D_x B \frac{\partial w}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(D_z B \frac{\partial w}{\partial z} \right) \end{aligned} \quad (\text{B.1.1-3})$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial(BT)}{\partial t} + u \frac{\partial(BT)}{\partial x} + w \frac{\partial(BT)}{\partial z} \\ = \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{BD_x}{\sigma_T} \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{BD_z}{\sigma_T} \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \frac{1}{\rho c_p} \frac{\partial(B\phi_z)}{\partial z} + qBT_b \end{aligned} \quad (\text{B.1.1-4})$$

式中：\$u\$、\$w\$——\$x\$、\$z\$ 方向的流速分量（m/s）；

\$q\$——单位体积净旁侧入流流量（s⁻¹）；

\$T_b\$——旁侧入流的温度（℃）；

- u_b ——旁侧入流的 x 向流速 (m/s);
 φ_z ——穿过高程 z 的平面的太阳辐射功率 (W/m^2);
 B ——河宽 (m);
 p ——压强 (Pa);
 ρ ——水体密度 (kg/m^3);
 ΔT ——当地温度与参考温度的差值 ($^{\circ}\text{C}$);
 D_x 、 D_z —— x 、 z 方向的涡黏系数 (m^2/s);
 σ_T ——温度普朗特数, 可取 0.9;
 c_p ——水的比热容, 可取 $4200\text{J}/(\text{kg} \cdot ^{\circ}\text{C})$;
 g ——重力加速度 (m/s^2);
 T ——水温 ($^{\circ}\text{C}$);
 β ——热膨胀系数 ($^{\circ}\text{C}^{-1}$)。

B.1.2 计算水面温度时, 应计入水气热交换的影响。水气热交换通量宜采用下列公式计算:

$$\varphi = \varphi_{\text{sn}} + \varphi_{\text{an}} - \varphi_{\text{br}} - \varphi_{\text{e}} - \varphi_{\text{c}} \quad (\text{B.1.2-1})$$

$$\varphi_{\text{sn}} = \varphi_{\text{s}} (1 - \gamma) \quad (\text{B.1.2-2})$$

$$\varphi_z = (1 - \beta_1) \varphi_{\text{sn}} e^{-\eta h} \quad (\text{B.1.2-3})$$

$$\varphi_{\text{an}} = (1 - \gamma_{\text{a}}) \sigma \varepsilon_{\text{a}} (273.15 + T_{\text{a}})^4 \quad (\text{B.1.2-4})$$

$$\varphi_{\text{br}} = \sigma \varepsilon_{\text{w}} (273.15 + T_{\text{s}})^4 \quad (\text{B.1.2-5})$$

$$\varphi_{\text{e}} = f(u_{\text{w}})(e_{\text{s}} - e_{\text{a}}) \quad (\text{B.1.2-6})$$

$$\varphi_{\text{c}} = 0.626 f(u_{\text{w}})(T_{\text{s}} - T_{\text{a}}) \quad (\text{B.1.2-7})$$

$$\varepsilon_{\text{a}} = 1 - 0.261 \exp(-7.77 \times 10^{-4} T_{\text{a}}^2) (1 + KC^2) \quad (\text{B.1.2-8})$$

$$f(u_{\text{w}}) = \sqrt{22.0 + 12.5 u_{\text{w}}^2 + 2.0 \times (\Delta T_{\text{aw}})} \quad (\text{B.1.2-9})$$

$$e_{\text{s}} = 6.11 \times 10^{\frac{7.5 T_{\text{s}}}{T_{\text{s}} + 237.3}} \quad (\text{B.1.2-10})$$

$$e_a = 6.11 \times RH \times 10^{\frac{7.5T_a}{T_a + 237.3}} \quad (\text{B.1.2-11})$$

- 式中： φ ——水气热交换的总净热通量 (W/m^2)；
 φ_{sn} ——净吸收的太阳短波辐射功率 (W/m^2)；
 φ_{an} ——净吸收的大气长波辐射功率 (W/m^2)；
 φ_{br} ——水体长波返回辐射功率 (W/m^2)；
 φ_e ——水面蒸发热损失通量 (W/m^2)；
 φ_c ——热传导通量 (W/m^2)；
 φ_s ——到达地面的太阳短波总辐射功率 (W/m^2)；
 γ ——太阳短波辐射的水面反射率；
 β_1 ——太阳短波辐射的表面吸收系数；
 η ——太阳短波辐射的水中衰减系数 (m^{-1})；
 h ——水深 (m)；
 T_a ——气温 ($^{\circ}\text{C}$)；
 γ_a ——大气长波辐射的水面反射率；
 σ ——Stefan-Boltzmann 常数，取 $5.67 \times 10^{-8} [\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)]$ ；
 T_s ——水体表面温度 ($^{\circ}\text{C}$)；
 ε_w ——水体的长波发射率，取值为 0.965；
 ε_a ——大气的长波发射率；
 K ——与云层高度有关的参数，推荐取值为 0.17；
 C ——云层覆盖率；
 $f(u_w)$ ——风函数，反映了自由对流和强迫对流对蒸发的影响
 $[\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{hPa})]$ ；
 u_w ——近地面风速 (m/s)；
 ΔT_{aw} ——水、气温差 ($^{\circ}\text{C}$)；
 e_s ——相应于水面温度 T_s 的紧靠水面的空气饱和蒸发压力 (hPa)；
 e_a ——水面上空气的蒸发压力 (hPa)；
 RH ——相对湿度 (%)。

B.1.3 水体与河床的热交换通量宜采用下式计算：

$$\varphi_{bw} = -K_{bw} (T_w - T_{bed}) \quad (\text{B.1.3})$$

式中： φ_{bw} ——水体与河床之间的热交换通量 (W/m^2)；

K_{bw} ——水体与河床的热交换系数 [$\text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$]；

T_w 、 T_{bed} ——河底水温 and 河床温度 ($^\circ\text{C}$)， T_{bed} 可采取年平均气温估算。

B.1.4 涡黏系数可按下列要求计算：

1 纵向涡黏系数可取为常数。

2 垂向涡黏系数不宜采用简单的常数，宜采用双方程或单方程的紊流模式计算公式，如浮力修正的 $k-\varepsilon$ 紊流模式、混合长度紊流模式等。

B.1.5 模型计算中应结合类似水库的水温验证，对紊流模式的适用性进行验证或分析。对于有较高精度要求的水库水温预测，宜采用 $k-\varepsilon$ 双方程紊流模式。

B.2 纵向一维数值模型

B.2.1 纵向一维数值模型应采用下列公式计算：

$$\frac{\partial A_x}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} - q_l = 0 \quad (\text{B.2.1-1})$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial Q\bar{u}}{\partial x} + gA \left(\frac{\partial z}{\partial x} + S_f \right) = 0 \quad (\text{B.2.1-2})$$

$$\frac{\partial (A_x T)}{\partial t} + \frac{\partial (QT)}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left(A_x D_L \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{B_0 \varphi}{\rho c_p} + q_l T_b \quad (\text{B.2.1-3})$$

式中： A_x ——过水断面面积 (m^2)；

Q ——流量 (m^3/s)；

q_l ——单位长度的旁侧入流量 (m^2/s)；

\bar{u} ——断面平均流速 (m/s) ;

S_f ——摩阻坡降;

B_0 ——水面宽度 (m) ;

φ ——水气热交换的总净热通量 (W/m^2);

D_L ——纵向综合扩散系数 (m^2/s);

T_b ——旁侧入流温度 ($^{\circ}\text{C}$)。

B.2.2 水气热交换通量应按本规范第 B.1.2 条的规定计算。

B.2.3 纵向综合扩散系数 (D_L) 应采用下列公式计算:

$$D_L = \frac{0.011\bar{u}^2 B^2}{hu^*} \quad (\text{B.2.3-1})$$

$$u^* = \sqrt{gRI} \quad (\text{B.2.3-2})$$

式中: \bar{u} ——断面平均流速 (m/s) ;

B ——河宽 (m);

h ——平均水深 (m) ;

u^* ——摩阻流速 (m/s) ;

R ——水力半径 (m) ;

I ——水力坡降。

B.3 垂向一维数值模型

B.3.1 垂向一维数值模型应包括热量平衡方程和质量平衡方程, 并按下列公式计算:

$$\begin{aligned} \frac{\partial T}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{TQ_v}{A} \right) = & \frac{1}{A} \frac{\partial}{\partial z} \left(AD_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) \\ & + \frac{B}{A} (u_i T_i - u_o T) + \frac{1}{\rho A c_p} \frac{\partial (A \varphi_z)}{\partial z} \end{aligned} \quad (\text{B.3.1-1})$$

$$\frac{\partial Q_v}{\partial z} = (u_i - u_o) B \quad (\text{B.3.1-2})$$

$$\frac{dV}{dt} = Q_i - Q_o + Q_E \quad (\text{B.3.1-3})$$

式中： T ——单元层温度 (°C)；

Q_v ——通过单元层上边界的垂向流量 (m³/s)；

A ——单元层水平面面积 (m²)；

D_z ——垂向综合扩散系数 (m²/s)；

u_i 、 u_o ——各单元层的入流、出流流速 (m/s)；

Q_i 、 Q_o ——入库流量、出库流量 (m³/s)；

Q_E ——蒸发降雨的等效流量 (m³/s)；

T_i ——入流水温 (°C)；

B ——河宽 (m)；

V ——水库蓄水量 (m³)。

B.3.2 水气热交换通量应按本规范第 B.1.2 条的规定计算。

B.3.3 水库入流流速和出流流速宜按下列公式计算：

$$u_i = \bar{u}_i \quad (\text{B.3.3-1})$$

$$u_o = \bar{u}_o \left(\cos \frac{\pi z_1}{\delta} + 1 \right) \quad (\text{B.3.3-2})$$

$$\delta = 1.35 \times \left(\frac{QL}{A_m} \frac{1}{\sqrt{g \frac{\Delta \rho}{\rho_0}}} \right)^{2/3} \quad (\text{B.3.3-3})$$

式中： \bar{u}_i 、 \bar{u}_o ——入流、出流流动区的平均出流流速 (m/s)；

z_1 ——距出流中心线的距离 (m)；

δ ——流动区域的半厚度 (m)；

Q ——流量 (m³/s)；

L ——入流或出流中心高程对应的水库回水长度 (m)；

A_m ——入流或出流中心高程对应的单元层平面面积 (m^2);

$\Delta\rho$ ——入流或出流中心高程处水体密度与其上下边界的密度差 (kg/m^3);

ρ_0 ——入流或出流中心高程处的密度 (kg/m^3)。

B.3.4 考虑风混合因素时, 应采用下列公式计算风混合层厚度:

$$\sigma_t = \frac{\int_{A_s} C u_w \tau \, dA}{A \Delta h \Delta \rho g \frac{h}{2}} \quad (B.3.4-1)$$

$$\tau = \rho_a C_d u_w^2 \quad (B.3.4-2)$$

式中: σ_t ——风混合影响的判别参数;

A_s ——水库表面面积 (m^2);

C ——动能转化为势能的有效系数;

u_w ——近地面风速 (m/s);

τ ——风引起的水面剪切应力 (N/m^2);

ρ_a ——空气密度 (kg/m^3);

C_d ——风拖曳系数;

$\Delta\rho$ ——混合层与下一单元层水体的密度差 (kg/m^3);

Δh ——混合层厚度增量 (m);

h ——混合层厚度 (m)。

注: 当 $\sigma_t < 1$, 即风引起的紊动动能不足以卷吸下层水体时, 没有垂向对流; 当 $\sigma_t \geq 1$ 时, Δh 厚的下层水体被卷入混合层, 混合层厚度增加 Δh , 混合层内水体温度混合均匀。风混合影响判断将继续至 $\sigma_t < 1$ 为止。

B.3.5 每完成一个时间步的水温计算后, 应检查垂向水温分层结构是否稳定。当上层水体密度大于下层水体密度时, 水温结构处于不稳定状态, 此时上层水体与下层水体逐层向下掺混, 直至达

到稳定结构。

B.4 零维数值模型

B.4.1 采用零维数值模型计算水库水温时，应按下式计算：

$$\frac{d(VT)}{dt} = Q_i T_i - Q_o T + \frac{\varphi A_s}{\rho c_p} \quad (\text{B.4.1})$$

式中： T ——库区水体温度（℃）；

V ——水库蓄水量（ m^3 ）；

Q_i ——入库流量（ m^3/s ）；

Q_o ——出库流量（ m^3/s ）；

T_i ——入库水温（℃）；

φ ——水气热交换的总净热通量（ W/m^2 ），应按本规范附录 B.1.2 条的规定计算；

A_s ——水库表面面积（ m^2 ）。

B.5 三维数值模型

B.5.1 三维数值模型应包括水动力学和水温方程组，水动力学方程包括连续方程和动量方程。水动力学方程采用鲍辛涅斯克假定，在密度变化不大的浮力流中，只在重力项中计入浮力影响。三维数值模型应按下列公式计算：

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = q \quad (\text{B.5.1-1})$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial(u^2)}{\partial x} + \frac{\partial(uv)}{\partial y} + \frac{\partial(uw)}{\partial z} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} \\ &= \frac{\partial}{\partial x} \left(D_x \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(D_y \frac{\partial u}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(D_z \frac{\partial u}{\partial z} \right) \\ &+ 2\theta v \sin \phi - 2\theta w \cos \phi \end{aligned} \quad (\text{B.5.1-2})$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial(uv)}{\partial x} + \frac{\partial(v^2)}{\partial y} + \frac{\partial(vw)}{\partial z} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} \quad (\text{B.5.1-3})$$

$$= \frac{\partial}{\partial x} \left(D_x \frac{\partial v}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(D_y \frac{\partial v}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(D_z \frac{\partial v}{\partial z} \right) - 2\theta u \sin \phi$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + \frac{\partial(uw)}{\partial x} + \frac{\partial(vw)}{\partial y} + \frac{\partial(w^2)}{\partial z} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} \quad (\text{B.5.1-4})$$

$$= \beta \Delta T g + \frac{\partial}{\partial x} \left(D_x \frac{\partial w}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(D_y \frac{\partial w}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(D_z \frac{\partial w}{\partial z} \right) + 2\theta u \cos \phi$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \frac{\partial(uT)}{\partial x} + \frac{\partial(vT)}{\partial y} + \frac{\partial(wT)}{\partial z} \quad (\text{B.5.1-5})$$

$$= \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{D_x}{\sigma_T} \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{D_y}{\sigma_T} \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{D_z}{\sigma_T} \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \frac{1}{\rho c_p} \frac{\partial \phi_z}{\partial z}$$

式中：\$u\$、\$v\$、\$w\$——\$x\$、\$y\$、\$z\$ 方向上的流速分量（m/s）；

\$D_x\$、\$D_y\$、\$D_z\$——\$x\$、\$y\$、\$z\$ 方向上的紊动涡黏系数（m²/s）；

\$\theta\$——地球自转角速度（rad/s）；

\$\phi\$——当地纬度（°）。

B.5.2 水气热交换通量应按本规范第 B.1.2 条的规定计算。

B.5.3 水体与河床热交换通量应按本规范第 B.1.3 条的规定计算。

B.5.4 涡黏系数计算应满足下列要求：

1 纵向涡黏系数可取常数或采用 Smagorinsky 经验公式求得。

2 垂向涡黏系数宜采用 \$k\$-\$\epsilon\$ 紊流模式或混合长度等紊流模式求得。

B.5.5 模型计算中应结合类似水库的水温验证，对紊流模式的适用性进行验证或分析。对于有较高精度要求的水库水温预测，宜采用 \$k\$-\$\epsilon\$ 双方程紊流模式。

附录 C 坝前垂向水温估算经验公式

C.1 指数函数法

C.1.1 应用指数函数法时,应采用下列公式估算水库坝前垂向水温:

$$T(y, \tau) = [T_0(\tau) - T_b(\tau)] e^{(-y/x)^n} + T_b(\tau) \quad (\text{C.1.1-1})$$

$$n = \frac{15}{\tau^2} + \frac{\tau^2}{35} \quad (\text{C.1.1-2})$$

$$x = \frac{40}{\tau} + \frac{\tau^2}{2.37 \times (1 + 0.1\tau)} \quad (\text{C.1.1-3})$$

式中: $T(y, \tau)$ ——水深 y 处的 τ 月平均水温 ($^{\circ}\text{C}$);

$T_0(\tau)$ ——水库表面月平均水温 ($^{\circ}\text{C}$);

$T_b(\tau)$ ——水库底部月平均水温 ($^{\circ}\text{C}$)。

C.1.2 本规范第 C.1.1 条中 $T_0(\tau)$ 的估算可选取与拟建水库地理位置相近的已建水库,根据实测各月气温、库表水温建立两者之间的相关关系,然后由拟建水库实测气温推算出水库表层水温。

C.1.3 本规范第 C.1.1 条中 $T_b(\tau)$ 可根据水库水温结构按照下列规定估算:

1 对于分层型水库,库底水温全年稳定少变,可视为常数,采用类比相关法推算。具体可用气候条件、库容和水深相近的同类型已建水库资料建立以水深为参数的气温和库底水温的相关关系,即可用设计水库地区的气温和设计水库的水深资料计算设计水库的库底水温。

2 对于过渡型和混合型，且位于北纬 $23^{\circ} \sim 44^{\circ}$ 地区的水库，可按下列式计算：

$$T_b(\tau) = T'_b(\tau) - K'(\tau)N \quad (\text{C.1.3})$$

式中： $T'_b(\tau)$ ——参数；

$K'(\tau)$ ——参数；

N ——水库所在纬度 ($^{\circ}$)。

3 $T'_b(\tau)$ 、 $K'(\tau)$ 可按表 C.1.3 的规定取值。

表 C.1.3 $T'_b(\tau)$ 、 $K'(\tau)$ 取值表

月份	1~3	4~5			6~8			9		
库底水深 (m)	—	20	40	60	20	40	60	20	40	60
$T'_b(\tau)$	24.0	30.4	25.6	23.6	35.4	29.9	22.9	37.3	30.0	23.6
$K'(\tau)$	0.49	0.49	0.48	0.48	0.47	0.42	0.43	0.44	0.43	0.44
月份	10			11			12			
库底水深 (m)	20	40	60	20	40	60	—			
$T'_b(\tau)$	33.1	28.0	23.6	37.4	30.9	24.1	31.5			
$K'(\tau)$	0.45	0.43	0.44	0.61	0.52	0.44	0.64			

C.2 余弦函数法

C.2.1 应用余弦函数法时，应采用下列式估算水库坝前垂向水温：

$$T(y, \tau) = T(y) + A(y) \cos \omega [\tau - \tau_0 - \varepsilon(y)] \quad (\text{C.2.1})$$

式中： $T(y, \tau)$ ——水深 y 处在时间为 τ 时的温度 ($^{\circ}\text{C}$)；

y ——水深 (m)；

τ ——月份；

τ_0 ——初始相位 (月)，纬度高于 30° 的地区取 6.5，
纬度低于或等于 30° 的地区取 6.7；

- ω ——温度变化的圆频率, ω 取 $2\pi/12$ (1/月);
 $T(y)$ ——水深 y 处的年平均温度 ($^{\circ}\text{C}$);
 $A(y)$ ——水深 y 处的温度年变幅 ($^{\circ}\text{C}$);
 $\varepsilon(y)$ ——水深 y 处水温年周期变化过程与气温年变化过程的相位差 (月)。

C.2.2 应根据水库特性, 按下列规定计算本规范第 C.2.1 条中的 $T(y)$ 值:

1 对于水库坝前正常水深 $H_n \geq y_0$ 的多年调节水库, 应采用下式计算:

$$T(y) = \begin{cases} (7.77 + 0.75T_a)e^{-0.015y} & y < y_0 \\ (7.77 + 0.75T_a)e^{-0.015y_0} & y \geq y_0 \end{cases} \quad (\text{C.2.2-1})$$

式中: T_a ——坝址多年年平均气温 ($^{\circ}\text{C}$);

y_0 ——多年调节水库的变化温度层深度 (m), 可取 50m~60m。

2 对于 $H_n \geq y_0$ 的非多年调节水库, 应采用下式计算:

$$T(y) = (7.77 + 0.75T_a)e^{-0.01y} \quad (\text{C.2.2-2})$$

3 对于 $H_n < y_0$ 的水库, 应采用下式计算:

$$T(y) = (7.77 + 0.75T_a)e^{-0.005y} \quad (\text{C.2.2-3})$$

C.2.3 应根据水库特性, 按下列规定计算本规范第 C.2.1 条中的 $A(y)$ 值:

1 对于 $H_n \geq y_0$ 的多年调节水库, 应采用下列公式计算:

$$A(y) = \begin{cases} (0.778A'_a + 2.94)e^{-0.055y} & y < y_0 \\ (0.778A'_a + 2.94)e^{-0.055y_0} & y \geq y_0 \end{cases} \quad (\text{C.2.3-1})$$

$$A'_a = \begin{cases} T_{a7} + \Delta a & T_{am} < 10 \\ A_a & T_{am} \geq 10 \end{cases} \quad (\text{C.2.3-2})$$

式中: A'_a ——修正的气温年变幅 ($^{\circ}\text{C}$);

A_a ——坝址多年平均气温年变幅 (°C);

T_{a7} —— 7 月份多年平均气温 (°C);

T_{am} ——年平均气温 (°C);

Δa ——太阳辐射所引起的温度增项 (°C)。

- 2 对于 $H_n \geq y_0$ 的非多年调节水库, 应采用下式计算:

$$A(y) = (0.778A'_a + 2.94)e^{-0.025y} \quad (C.2.3-3)$$

- 3 对于 $H_n < y_0$ 的水库, 应采用下式计算:

$$A(y) = (0.778A'_a + 2.94)e^{-0.012y} \quad (C.2.3-4)$$

C.2.4 应根据水库特性, 按下列规定计算本规范第 C.2.1 条中的 $\varepsilon(y)$ 值:

- 1 对于 $H_n \geq y_0$ 的多年调节水库, 应采用下式计算:

$$\varepsilon(y) = \begin{cases} 0.53 + 0.059y & y < y_0 \\ 0.53 + 0.059y_0 & y \geq y_0 \end{cases} \quad (C.2.4-1)$$

- 2 对于 $H_n \geq y_0$ 的非多年调节水库, 应采用下式计算:

$$\varepsilon(y) = 0.53 + 0.030y \quad (C.2.4-2)$$

- 3 对于 $H_n < y_0$ 的水库, 应采用下式计算:

$$\varepsilon(y) = 0.53 + 0.008y \quad (C.2.4-3)$$

附录 D 水库下泄水温计算方法

D.1 流速加权数值模型法

D.1.1 采用垂向一维模型计算水库下泄水温时,应以坝前垂向各单元层的出流流量为权重,按下式计算水库下泄水温:

$$T_o = \frac{\int_{-\delta}^{+\delta} u_o B_z T dz}{Q_o} \quad (\text{D.1.1})$$

式中: T 、 T_o ——坝前水温、出流水温 (°C);
 δ ——出流流动区域的半厚度 (m);
 u_o ——各层的出流流速 (m/s);
 B_z ——相应于高程 z 的河宽 (m);
 Q_o ——总下泄流量 (m³/s)。

D.1.2 采用立面二维模型计算水库下泄水温时,应将出水口断面对应各层的水温进行流量加权,按下式计算水库下泄水温:

$$T_o = \frac{\sum_{j=J_1}^{j=J_2} u_{N,j} B_{N,j} T_{N,j} \Delta z_{N,j}}{Q_o} \quad (\text{D.1.2})$$

式中: N ——出水口断面编号;
 J_1 、 J_2 ——出水口上、下缘高程对应的编号;
 u ——垂直于出水口断面方向的流速分量 (m/s);
 B ——河宽 (m);
 T 、 T_o ——坝前水温、下泄水温 (°C)。

D.1.3 采用三维模型计算水库下泄水温时,应将出水口对应的各

单元的水温进行流量加权平均，按下式计算水库下泄水温：

$$T_o = \frac{\int_{A_o} u_1 T dA}{Q_o} \quad (\text{D.1.3})$$

式中： A_o ——出水口对应的计算面；

u_1 ——出水口计算单元的法向流速（m/s）；

T ——出水口计算单元对应水温（℃）。

D.1.4 如三维模型采用源汇的方式模拟水库出流，可采用计算得到的对应源汇空间位置的库区水体温度作为水库下泄水温。

D.2 流速加权经验公式

D.2.1 采用流速加权经验公式估算下泄水温时，应符合下列程序 and 规定：

1 通过观测或采用数值模型、经验公式计算获取坝前垂向水温分布，当水温的垂向分布数据较少而不能满足计算要求时，应分段进行线性插值计算，通常以 1m 为间隔。

2 根据电站运行对进水口区域流场的影响情况，确定取水口中心线高程上、下一一定范围作为取水带，并计算取水带上、下边界范围。

3 计算最大流速及高程位置。

4 计算取水带内各层流速分布。

5 计算取水带内各层流量占总流量的百分比，加权计算水库下泄水温。

D.2.2 当取水带不受库表或库底边界约束时，取水带范围应采用下式计算：

$$Z = [v_o^2 A_o^2 / (\Delta\rho' / \rho_o) g]^{\frac{1}{5}} \quad (\text{D.2.2})$$

式中： Z ——从引水口中心线高程到取水带上、下界的垂直距离（m）；

v_0 ——流经引水口的平均流速 (m/s);

A_0 ——引水口面积 (m²);

$\Delta\rho'$ ——引水口中心线高程与取水带上、下界之间的流体密度差 (kg/m³);

ρ_0 ——引水口中心位置的流体密度 (kg/m³);

g ——重力加速度 (m/s²)。

D.2.3 当取水带上界或下界受水面或库容约束时,应采用水面或库底高程作为取水带边界。可采用 $v_0 / \sqrt{(\Delta\rho' / \rho_0)gZ} - Z^2 / A_0$ 判断边界受约束情况,当计算值大于 0 时,表明边界受到约束。

D.2.4 计算最大流速的位置及其数值,应符合下列程序和规定:

1 应先确定最大流速的位置:当取水带对称于引水口中心线时,最大流速出现在引水口中心线高程位置;当取水带下边界在垂直范围内小于上边界时,最大流速出现在引水口中心线高程以下;当取水带上边界在垂直范围内小于下边界时,最大流速出现在引水口中心线高程以上。

2 应采用下列公式计算取水带最大流速的位置:

$$Y_1 = H \left[\sin \left(1.57 \frac{Z_1}{H} \right) \right]^2 \quad (\text{D.2.4-1})$$

$$H = Z_1 + Z_2 \quad (\text{D.2.4-2})$$

式中: Y_1 ——从最大流速处的高程到取水带下边界的垂直距离 (m);

Z_1 ——从引水口中心线高程到取水带下边界的垂直距离 (m);

Z_2 ——从引水口中心线高程到取水带上边界的垂直距离 (m);

H ——取水带厚度 (m)。

3 最大流速应采用下列公式计算:

$$v_{\max} = Q_0 / K \quad (\text{D.2.4-3})$$

$$K = \int_0^{Y_1} b \frac{v_1}{v_{\max}} dy + \int_0^{Y_2} b \frac{v_2}{v_{\max}} dy \quad (\text{D.2.4-4})$$

式中： v_{\max} ——取水带内最大流速（m/s）；
 Q_0 ——总下泄流量（m³/s）；
 v_1 ——取水带下边界流速（m/s）；
 v_2 ——取水带上边界流速（m/s）；
 Y_2 ——从最大流速处的高程到取水带上边界的垂直距离（m）；
 y ——从最大流速位置到流速 v 处的垂直距离（m）；
 b ——在所研究断面上的高程 y 处的水库宽度（m）。

D.2.5 计算取水带内流速分布，应符合下列程序 and 规定：

1 以最大流速处的高程为基准，应采用下列公式分别计算对称于基准高程的上、下两部分流速分布：

$$\frac{v}{v_{\max}} = \left(1 - \frac{y \Delta \rho}{Y \Delta \rho_m} \right)^2 \quad (\text{D.2.5-1})$$

$$\rho = 1 - \frac{(T - 3.9863)^2}{508929.2} \cdot \frac{T + 288.9414}{T + 68.12963} \quad (\text{D.2.5-2})$$

式中： v ——取水带内 y 处的流速（m/s）；
 v_{\max} ——取水带内的最大流速（m/s）；
 y ——取水带内流速 v 对应的位置（m）；
 Y ——取水带内最大流速对应的位置（m）；
 $\Delta \rho$ ——从最大流速位置到流速 v 之间的流体密度差（kg/m³）；
 $\Delta \rho_m$ ——从最大流速位置到取水带边界之间的流体密度差（kg/m³）；
 ρ ——水的密度（kg/m³）；
 T ——水温（℃）。

2 当取水带受边界约束时，界面与最大流速高程间的流速分布应采用下式计算：

$$\frac{v}{v_{\max}} = 1 - \left(\frac{y \Delta \rho}{Y \Delta \rho_m} \right)^2 \quad (\text{D.2.5-3})$$

D.2.6 计算出坝前垂向水温 and 流速分布后, 应根据各层流量和水温平均值采用下列公式计算下泄水温:

$$T_o = \sum R_j \bar{T}_j \quad (\text{D.2.6-1})$$

$$R_j = \bar{v}_j b_j / Q_o \quad (\text{D.2.6-2})$$

$$\bar{v}_j = (v_i + v_{i+1}) / 2 \quad (\text{D.2.6-3})$$

$$\bar{T}_j = (T_i + T_{i+1}) / 2 \quad (\text{D.2.6-4})$$

式中: T_o ——下泄水温 ($^{\circ}\text{C}$);

R_j ——取水带内第 j 层的出流水温权重;

\bar{T}_j ——取水带内第 j 层的平均水温 ($^{\circ}\text{C}$);

\bar{v}_j ——取水带内第 j 层的平均流速 (m/s);

b_j ——取水带内第 j 层的库宽 (m);

Q_o ——总下泄流量 (m^3/s);

v_i 、 v_{i+1} ——第 i 层上、下界的流速 (m/s);

T_i 、 T_{i+1} ——第 i 层上、下界的水温 ($^{\circ}\text{C}$)。

附录 E 河流水温计算简化公式

E.0.1 假定河段气象条件不变，河道断面形状及水力特性沿程变化不大的情况下，对热交换项进行线性化处理后，河流沿程水温可按下列简化公式计算：

$$T_w = T_0 + (T_E - T_0) \left\{ 1 - \exp \left[\frac{[109 + Lf(u_w)\rho(0.00061p_a + b)]BX}{-86400\rho c_p Q} \right] \right\} \quad (\text{E.0.1-1})$$

$$L = 597.31 - 0.5631T_w \quad (\text{E.0.1-2})$$

$$f(u_w) = 0.22 \times 10^{-3} \times (1 + 0.31u_w^2)^{0.5} \quad (\text{E.0.1-3})$$

式中： T_w ——河道水温（℃）；

T_E ——平衡水温（℃）；

T_0 ——初始断面水温（℃）；

L ——汽化潜热；

$f(u_w)$ ——风速函数；

ρ ——水的密度（ kg/m^3 ）；

p_a ——大气压（Pa）；

b ——常数，当温度为 $0^\circ\text{C} \sim 10^\circ\text{C}$ 时 $b=0.52$ ，当温度为 $10^\circ\text{C} \sim 30^\circ\text{C}$ 时 $b=1.13$ ；

B ——河宽（m）；

X ——影响距离（m）；

c_p ——水的比热容 [$\text{J}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$]；

Q ——河道流量（ m^3/s ）；

u_w ——近地面风速（m/s）。

E.0.2 支流来水汇入后的干流混合水温应采用下式计算：

$$T_h = \frac{QT + \sum_{i=1}^n Q_i T_i}{Q + \sum_{i=1}^n Q_i} \quad (\text{E.0.2})$$

式中： T_h ——混合水温（℃）；

T_i 、 T ——支流、干流水温（℃）；

Q_i 、 Q ——支流、干流流量（m³/s）。

本规范用词说明

1 为便于在执行本规范条文时区别对待，对要求严格程度不同的用词说明如下：

1) 表示很严格，非这样做不可的用词：

正面词采用“必须”，反面词采用“严禁”；

2) 表示严格，在正常情况下均应这样做的用词：

正面词采用“应”，反面词采用“不应”或“不得”；

3) 表示允许稍有选择，在条件许可时首先应这样做的用词：

正面词采用“宜”，反面词采用“不宜”；

4) 表示有选择，在一定条件下可以这样做的用词，采用“可”。

2 条文中指明应按其他有关标准执行的写法为：“应符合……的规定”或“应按……执行”。

引用标准名录

《水电水利工程水文计算规范》DL/T 5431

《环境影响评价技术导则 地面水环境》HJ/T 2.3

中华人民共和国能源行业标准

水电工程水温计算规范

NB / T 35094 — 2017

条 文 说 明

制 定 说 明

《水电工程水温计算规范》NB/T 35094—2017，经国家能源局2017年3月28日以第6号公告批准发布。

本规范制定过程中，编制组进行了广泛的调查研究，总结了水电工程水温计算方面的实践经验，吸收了近年来水电工程水温计算研究方面所取得的科技成果，并向有关单位征求了意见。

为便于广大设计、科研、学校等单位有关人员在使用本规范时能正确理解和执行条文规定，《水电工程水温计算规范》编制组按章、节、条顺序编制了本规范的条文说明，对条文规定的目的、依据以及执行中需注意的有关事项进行了说明。但是，本条文说明不具备与规范正文同等的法律效力，仅供使用者作为理解和把握规范规定的参考。

目 次

1 总则.....38

3 基本资料.....40

 3.1 一般规定.....40

 3.3 气象水文资料.....40

 3.4 河流水温资料.....41

 3.5 水库水温资料.....41

 3.6 基础资料分析.....41

4 水库水温计算.....42

 4.1 一般规定.....42

 4.2 水库水温结构判别.....42

 4.3 库区水温计算.....45

 4.4 下泄水温计算.....45

 4.5 计算结果分析.....45

5 水库下游河流水温计算.....46

 5.2 河流水温计算.....46

1 总 则

1.0.1 水温是影响水生生物，特别是鱼类生长、繁殖的重要环境因子。水温通过影响水体中各种物质的物理、化学性质，从而间接对水质和水生生态产生影响。低温水灌溉可能对灌区农作物产生不利影响，但同时低温水也是一种重要的冷水资源，如养殖冷水性鱼类、用作空调冷却用水等。水电工程水温计算是水电工程及其环境保护措施设计中经常开展的一项重要工作。目前，水电工程的水温计算在现行的水电行业规范中虽有零散的规定，但尚未形成系统，关键的计算条件、内容和技术要求尚未作出规定。因此，为适应水电工程设计和环境保护的需要，规范水电工程水温计算条件、内容和技术要求，编制本规范显得尤为必要。

1.0.4 水库水温结构判别是开展水库水温计算的基础，一般根据水温结构可以初步分析水温影响的程度。根据水电工程对水温的影响范围，可分为库区水温计算和下游河流水温计算，两者之间又通过水库下泄水温计算联系起来。本条规定参考了现行规范的相关规定：《水电水利工程水文计算规范》DL/T 5431—2009 第 7.2.1 条规定“水温分析计算的内容应包括设计依据站水温统计、设计河段水温推算和建库后水库水温时空分布”；第 7.2.6 条规定“水库水温分析计算内容包括库温分布类型判别和水温垂向分布估算”。《水利水电工程水文计算规范》SL 278—2002 第 6.3.1 条规定“水温分析计算应包括天然河道水温特征值统计和建库后水库水温分布分析”；第 6.3.4 条规定“水库水温分析计算应包括水库水温结构判别和库表水温、库底水温、水库垂向水温分布的估算等”。现行水温计算相关规范中均未规定水库下泄水温和下游河流水温计算的内容，本规范中对此将进一步完善。

1.0.5 水电工程水温计算涉及的基础资料较多，收集的基础资料因来源不同、精度不同，可靠性也可能不一样，因此需要仔细甄别，合理选用。

1.0.6 水温计算方法总体上分为类比法、经验公式法、数值模型等三大类。一般的类比法、经验公式法计算误差相对较大，数值模型计算误差相对较小。因此，应根据水电工程特性和水温控制目标，合理确定精度要求及水温计算方法。代表性的水文周期不仅仅指水文学上的丰、平、枯典型年，也包括生态学意义上的生命周期。对水温有特殊需求的生态环境敏感目标一般包括鱼类、灌溉取水口等。

3 基本资料

3.1 一般规定

3.1.1 水温计算所需要的基本资料以现有资料为主，如水温计算所需要的气象、水文资料可从当地气象、水文站获取。水电工程可行性研究阶段勘测设计一般进行了库区河段大断面测量。一般建成的大、中型水电站均有运行调度及水温观测资料。本条规定参考了《水电水利工程水文计算规范》DL/T 5431—2009 第 3.0.3 条的规定“水文计算应重视基础资料。深入调查研究，收集、整理、复核基本资料及有关信息，并分析水文特性及人类活动对水文要素的影响”，第 3.0.4 条的规定“工程位置和临近河段缺乏实测水文资料时，应根据设计要求及早设立水文测站或增加测验项目”，以及第 7.2.5 条的规定“水温资料短缺时应进行观测”。

不同的计算范围（库区或下游河道）、计算工况（如丰、平、枯代表年，有无分层取水等）、计算方法（类比法、经验公式法、数值模型）、计算精度（计算结果要求到逐月还是逐旬等）对基础资料的要求不一样。因此，应根据计算范围、计算工况、计算方法和计算精度等要求，充分收集水温计算所需的基本资料。

3.1.2 本条规定参考了《水电水利工程水文计算规范》DL/T 5431—2009 第 3.0.5 条的规定“水文计算依据的资料系列应具有可靠性、一致性和代表性”。

3.3 气象水文资料

3.3.1 气象条件短时间内的变化波动较大，需要一定的时间长度才能体现一般性的规律。因此，对水电工程水温计算，一般收集

多年平均的逐旬的气象特征资料即可满足计算要求。此外，如工程区域缺乏气象观测资料，可采用相似地区的气象观测资料代替。相似地区主要是指位于同一气候区、海拔条件相近的地区。

3.3.2 支流一般考虑设有水文测站的支流。水文资料一般收集计算时段内逐旬的特征资料即可满足计算要求。

3.4 河流水温资料

3.4.1 计算河段干、支流天然河道水温一般作为计算的边界条件，或作为气温水温相关法分析的基础资料。

3.4.2 入库断面水温是水库水温计算重要的边界条件，直接采用附近水文站水温资料，可能有一些误差。因此，本规范建议在有水温观测资料的情况下，采用上、下游水文站水温观测资料推求。

3.5 水库水温资料

3.5.1 本条规定了收集类比或验证水库水温资料的要求。入库水温一般作为计算的边界条件，坝前水温和下泄水温一般用于计算方法验证或者水温类比研究。

3.6 基础资料分析

3.6.2 现行行业标准《水电水利工程水文计算规范》DL/T 5431—2009 第 6.3 节对径流资料插补延长的方法进行了规定。

3.6.3 对于收集到的天然河道水温资料，应充分分析天然河道水温变化规律，分析结果对后续水温计算可起到辅助说明的作用。

4 水库水温计算

4.1 一般规定

4.1.1 水库水温计算以水温结构判别为基础，选择经验公式或数值模型方法进行水库水温的计算。经验公式对资料的要求相对较低，水温计算精度也相对较低。数值模型对资料的要求相对较高，计算精度也相对较高。

4.1.2 计算目的不同，计算范围也不同。例如，大坝温度荷载设计主要关注大坝上、下游水体的垂向水温分布；下泄水温对鱼类产卵繁殖或农田灌溉的影响评估，则主要关注下泄水温的沿程分布；分层取水效果评价则主要关注坝前垂向水温和下泄水温的关系。计算目的不同，计算工况也不一样。例如，进行大坝温度荷载设计主要关注温度变化最不利情况下的水电站运行工况，鱼类保护则主要关注对鱼类产卵繁殖敏感的水电站运行工况。

4.2 水库水温结构判别

4.2.1~4.2.2 水库水温结构判别目前应用较为成熟的有参数 α - β 判别法（也称“库水交换次数判别法”）、Norton 密度弗劳德数法等经验判别方法和类比分析法。一般的，如有相似条件比较好的水库水温资料，采用类比分析判别水温结构比较准确。

现行行业标准《水电水利工程水文计算规范》DL/T 5431—2009、《水利水电工程水文计算规范》SL 278—2002 中对水库水温结构的判别推荐参数 α - β 判别法和类比分析法。表 4-1 是本规范编制组根据国内不同类型水库水温实测资料对参数 α - β 判别法的验证情况。由表 4-1 可见，参数 α - β 判别法用于判别分层型水

库的水温结构准确度较高，而 Norton 密度弗劳德数法用于判别过渡型、混合型水库的水温结构准确度较高。受样本数量的限制，表 4-1 中的统计结果仅供本规范使用者参考。

表 4-1 国内不同类型水库水温结构判别结果验证

序号	水库名称	调节类型	实际水温结构	参数 α - β 判别法		密度弗劳德数法	
				α 值	判别结果符合性	Fr 值	判别结果符合性
1	东江水库	多年调节	分层型	0.57	√	0.01	√
2	新丰江水库	多年调节	分层型	0.61	√	0.03	√
3	新安江水库	多年调节	分层型	0.64	√	0.03	√
4	响洪甸水库	多年调节	分层型	0.81	√	0.01	√
5	龙羊峡水库	多年调节	分层型	0.82	√	0.01	√
6	滩坑水库	多年调节	分层型	1.07	√	0.02	√
7	湖南镇水库	多年调节	分层型	1.66	√	0.05	√
8	丰满水库	不完全多年调节	分层型	1.72	√	0.13	×
9	三板溪水库	多年调节	分层型	1.83	√	0.04	√
10	桓仁水库	年调节	分层型	2.03	√	0.07	√
11	丹江口水库	年调节	过渡型	2.06	×	0.17	√
12	水布垭水库	多年调节	分层型	2.19	√	0.04	√
13	天生桥一级水库	不完全多年调节	分层型	2.30	√	0.06	√
14	糯扎渡水库	多年调节	分层型	2.51	√	0.08	√
15	小湾水库	不完全多年调节	分层型	2.64	√	0.06	√
16	光照水库	多年调节	分层型	2.59	√	0.02	√
17	皂市水库	年调节	分层型	2.61	√	0.06	√
18	江垭水库	年调节	分层型	2.64	√	0.05	√
19	龙滩水库	年调节	分层型	3.13	√	0.16	×
20	上犹江水库	年调节型	分层型	4.13	√	0.13	×

续表 4-1

序号	水库名称	调节类型	实际水温结构	参数 α - β 判别法		密度弗劳德数法	
				α 值	判别结果符合性	Fr 值	判别结果符合性
21	大黑汀水库	年调节型	分层型	4.30	√	0.12	×
22	柘溪水库	不完全年调节	分层型	6.63	√	0.49	×
23	安康水库	不完全年调节	分层型	7.20	√	0.29	×
24	乌江渡水库	季调节	分层型	7.36	√	0.13	×
25	安砂水库	季调节	分层型	7.88	√	0.12	×
26	二滩水库	季调节	分层型	9.79	√	0.23	×
27	凤滩水库	不完全年调节	过渡型	11.17	√	0.38	√
28	董箐水库	日调节	过渡型	14.23	√	0.14	√
29	官厅水库	多年调节	过渡型	1.13	×	0.10	√
30	五强溪水库	季调节	混合型	17.96	×	1.80	√
31	富春江水库	日调节	混合型	68.27	√	7.39	√
32	凌津滩水库	日调价	混合型	430.72	√	29.82	√

注：“√”表示判别结果与实测情况符合性较好，“×”表示判别结果与实测情况符合性较差。

此外，应用参数 α - β 判别法判别水库水温结构时，对于 α 值在 10 左右的水库，应注意分析水库在不同特征水位下的 α 值，判别结果应根据水库常用工况综合分析确定。以五强溪水库为例，采用不同特征水位对应的库容计算的 α 值及判别结果见表 4-2。

表 4-2 五强溪水库不同特征水位 α 值及水温结构判别结果

水位 (m)	90 (死水位)	98 (防洪汛限水位)	108 (正常蓄水位)	114 (校核洪水位)
库容 (亿 m ³)	10.37	16.98	30.58	42.28

续表 4-2

水位 (m)	90 (死水位)	98 (防洪汛 限水位)	108 (正常蓄 水位)	114 (校核洪 水位)
多年平均径流量 (亿 m ³)	549.3	549.3	549.3	549.3
α 值	52.97	32.35	17.96	12.99
判别结果	混合型	混合型	过渡型	过渡型

4.3 库区水温计算

4.3.3 一般情况下，采用一维数值模型或二维数值模型计算结果可满足水电工程设计和生态保护的要求。本条规定了需采用三维数值模型计算的特殊情况。

4.4 下泄水温计算

4.4.1 库区水温采用垂向一维、立面二维或三维数值模型计算时，由于数值模型计算水温的同时会对水库流场进行模拟，因此下泄水温可采用模拟计算的坝前垂向水温分布和流速分布结果，采用流速加权的方法计算；当出库水温采用源汇等简化方法模拟时，可提取取水口处的水温作为下泄水温。

4.5 计算结果分析

4.5.1 由于温度场的分布和流速场的分布密切相关的，因此采用数值模型计算水库水温或下泄水温时，应结合水电工程运行调度及水库流场变化分析计算结果的合理性，即从流场分布的合理性分析温度场分布的合理性。

5 水库下游河流水温计算

5.2 河流水温计算

5.2.1 由于纵向一维数值模型计算河流水温时，对水气热交换及温度的纵向扩散考虑比较全面，因此一般情况下推荐采用纵向一维数值模型。简化公式法忽略了河道地形的变化和区间汇流影响，而且对部分非线性变化的热交换通量进行了线性化处理，因此适用于河流水温的简单估算。
