

ICS 编号
CCS 编号

团体标准

T/CHES XXX—20XX

水利水电工程钻孔微水试验规程

Code for drilling slug test in water resources and hydropower
projects

（报批稿）

请将你们发现的有关专利的内容和支持性文件随意见一并返回

20XX-XX-XX 发布

20XX-XX-XX 实施

中国水利学会 发布

前 言

本标准按照《工程建设标准编写规定》（建标〔2008〕182号）的规定起草。

本标准共分为6章和2个附录，主要技术内容包括总则、术语和符号、基本规定、仪器设备、现场试验、试验资料整编。

请注意本标准的某些内容可能涉及专利。本标准的发布机构不承担识别专利的责任。

本标准由中国水利学会归口。执行过程中如有意见或建议，请寄送中国水利学会（地址：北京市西城区白广路二条16号，邮编100053），以便今后修订时参考。

本标准主编单位：长江三峡勘测研究院有限公司（武汉）

本标准参编单位：黄河勘测规划设计研究院有限公司

河海大学

新疆水利水电勘测设计研究院有限公司

新疆兵团勘测设计院集团股份有限公司

中水北方勘测设计有限责任公司

长江科学院

三峡大学

中水珠江规划勘测设计有限公司

广东省水利电力勘测设计研究院有限公司

本标准主要起草人：李会中、郝文忠、罗飞、万伟锋、王锦国、李红星、王旺盛、李鸣威、郭飞、张浩然、胡相波、王国军、王兆云、于为、赵燕容、姬永尚、王传宝、曾峰、左清军、黄建龙、张海丰、张学东、许琦、李军、叶健。

本规程技术内容审查人：马毓淦。

目 次

1 总 则	(1)
2 术语和符号	(2)
2.1 术 语	(2)
2.2 符 号	(2)
3 基本规定	(4)
4 仪器设备	(5)
5 现场试验	(6)
5.1 现场准备	(6)
5.2 仪器设备安装	(6)
5.3 试验操作	(6)
6 试验资料整编	(8)
6.1 试验资料整理	(8)
6.2 渗透性参数计算	(8)
6.3 试验报告编制	(8)
附录A 微水试验记录表格	(9)
附录B 微水试验参数计算	(11)
标准用词说明	(28)
引用标准名录	(29)
条文说明	(30)

Contents

1	General provisions	(1)
2	Terms and symbols	(2)
2.1	Terms	(2)
2.2	Symbols	(2)
3	Basic requirements	(4)
4	Instrument and equipment	(5)
5	Site test	(6)
5.1	Site preparation	(6)
5.2	Instrument and equipment installation	(6)
5.3	Test operation	(6)
6	Test data compilation	(8)
6.1	Test data collection	(8)
6.2	Calculation of permeability parameters	(8)
6.3	Test report compilation	(8)
	Appendix A Slug Ttest record forms	(9)
	Appendix B Slug test parameter calculations	(11)
	Explanation of wording in this specification	(28)
	List of quoted standards	(29)
	Explanation of provisions	(30)

1 总 则

- 1.0.1 为统一水利水电工程钻孔微水试验方法、内容，规范试验程序，提高试验成果质量，制定本规程。
- 1.0.2 本标准适用于水利水电工程岩土体渗透性测试中的钻孔微水试验工作。
- 1.0.3 水利水电工程钻孔微水试验，除应符合本规程外，尚应符合国家现行有关标准的规定。

2 术语和符号

2.1 术语

2.1.1 微水试验 slug test

通过钻孔内瞬间微小水量的增加或减少而引起水位随时间的变化规律确定岩土体渗透性参数的一种原位试验。

2.1.2 振荡器 oscillator

激发钻孔内水头或水位产生瞬时变化的固体器件。

2.1.3 激发水头 excitation water head

通过振荡器、气压、注水或抽水等激发方式引起钻孔内水位瞬时变化的最大水头值。

2.1.4 弹性贮水系数 storativity coefficient

表示在面积为1个单位、厚度为含水层全厚度的含水层柱体中，当水头改变一个单位时弹性贮存或释放的水量。

2.1.5 无量纲贮水系数 dimensionless coefficient

表示在面积为1个单位、厚度为含水层全厚度的含水层柱体中，当水头改变一个单位时贮存或释放的水量，无量纲。

2.1.6 导水系数 transmissibility coefficient

表示当水力坡度等于1时，通过这个含水层厚度上的单宽流量，表征含水层全部厚度导水能力的参数。

2.1.7 渗透系数 permeability coefficient

表示当水力坡度为1时，地下水在介质中的渗透速度，表征含水层透水能力的参数。

2.1.8 完整井 fully penetrating well

贯穿整个含水层，在全部含水层厚度上都安装有过滤器，并能全面进水的井。

2.1.9 非完整井 partially penetrating well

没有贯穿整个含水层，只有孔底和含水层的部分厚度上能进水的井。

2.1.10 过滤器 screen assembly

设置于试验孔中进出水段部位，用于护壁、滤水和防止涌砂的装置。

2.1.11 过阻尼反应 overdamped well response

钻孔水位瞬时变化后以近似指数的方式恢复到初始静止水位的过程。

2.1.12 阻尼反应 damped well response

钻孔内水位瞬时变化后在静止水位附近振荡的现象。

2.2 符号

M——含水层厚度；

h——初始水位距潜水含水层底板距离；

K——渗透系数；

L_e ——有效静态水柱长度；

L_w ——初始水位距钻孔孔底距离；

r_c ——钻孔内水位升降段的套管半径；

r_w ——过滤器半径；

\hat{t} ——选取匹配点对应的标准曲线无量纲时间；

T——导水系数；

S——弹性贮水系数；

ω_t ——瞬时抽（注）水后，t时刻钻孔内水位变化值；

ω_0 ——瞬时抽（注）水后，初始时刻的钻孔内水位变化值；

ω' ——标准曲线中无量纲的水位变化量；

ω ——实测曲线中无量纲的水位变化量；

α ——无量纲贮水系数；

β ——无量纲惯性参数；
 ζ ——阻尼系数。

3 基本规定

- 3.0.1 钻孔微水试验宜用于地下水位以下的岩土体渗透系数测试。
- 3.0.2 钻孔微水试验前，应根据试验段的钻孔结构和水文地质条件，进行钻孔的微水试验设计，明确试段选择和要求、钻孔水头变化激发方式。
- 3.0.3 钻孔微水试验水头变化激发方式可分为振荡器式、气压式、注水式或抽水式，激发方式的选择应符合下列规定：
- 1 强透水性岩土体宜使用气压式。
 - 2 地下水位埋深较浅的中~微透水性岩土体宜使用振荡器式、注水式或抽水式。
 - 3 地下水位埋深较深的中~微透水性岩土体宜使用注水式。
- 3.0.4 试验孔宜采用清水造孔，孔壁不稳定采用泥浆等其他冲洗液造孔时应进行洗孔，并应符合现行行业标准《水利水电工程钻探规程》SL/T291的有关规定。
- 3.0.5 对垂直方向透水性变化较大的含水层，应分段进行试验。每个试段的长度宜大于0.5m。
- 3.0.6 对于非完整井，试验段应与过滤器设置的位置相对应。钻孔结构在垂向上可变径，试验段不应跨变径段。
- 3.0.7 试验激发水头宜根据岩土体渗透性、过滤器位置、计算模型的要求等确定，并应符合下列规定：
- 1 弱、微渗透性岩土体中宜控制在0.5m~1.0m。
 - 2 中、强渗透性岩土体中激发水头宜控制在1.0m~2.0m。
 - 3 试验过程中不应将水位降到钻孔试验段过滤器上端以下。
 - 4 水头测量精度宜控制在最大水位变化量的1%以内。
- 3.0.8 使用振荡器式、注水式或抽水式激发时，整个激发过程时间应控制在5s以内；使用气压式激发时，加压后压力稳定时间宜控制在5s~10s，压力释放过程应控制在5s以内。

4 仪器设备

- 4.0.1 试验仪器设备宜包括水头激发设备、过滤器、止水栓塞、传感器、数据采集器等。
- 4.0.2 水头激发设备配置应符合下列规定：
 - 1 注水式水头激发应配备量筒或水泵。
 - 2 抽水式水头激发应配备水泵。
 - 3 气压式水头激发设备应包括空气压缩机和孔口密闭转换接头。
 - 4 振荡器式水头激发设备应包括有实心或空心长圆柱振荡器、连接绳索或杆构件、导线轮及闭锁装置。
- 4.0.3 过滤器宜包括骨架过滤器、包网或缠丝过滤器，并应符合下列规定：
 - 1 过滤器长度应根据试验含水层厚度和试验段长度确定。
 - 2 过滤器选型与滤料规格等应符合现行行业标准《水利水电工程钻孔抽水试验规程》SL320的规定。
- 4.0.4 止水栓塞应符合下列规定：
 - 1 栓塞宜采用水压式或气压式。
 - 2 栓塞长度宜大于8倍钻孔直径。
 - 3 栓塞应止水可靠、操作方便。
- 4.0.5 传感器宜由压力传感器、温度传感器组成，并应符合下列规定：
 - 1 压力传感器量程范围宜为0m~10m水柱，量测精度应为毫米级。
 - 2 温度传感器测温范围为宜-55℃~125℃，量测精度应为0.5℃。
- 4.0.6 数据采集器应包括存储、传输和显示等模块。

5 现场试验

5.1 现场准备

- 5.1.1 试验前应进行钻孔清洗，并应达到水质清澈，孔壁应洁净。
- 5.1.2 试验前应检查仪器设备完备情况，并应对相关设备进行调试。
- 5.1.3 试验前应测量并记录试验钻孔及邻近孔（井）的位置、初始水位、初始大气压力、水温等基本信息。
- 5.1.4 根据试验类型应准备相应的微水试验记录表格。记录表格应符合本规程附录A的有关规定。

5.2 仪器设备安装

- 5.2.1 过滤器安装应符合下列规定：

1 过滤器安装应按试段设置的要求进行，完整井过滤器应包含整个含水层，非完整井过滤器应安装在试段位置，长度不宜小于含水层厚度的1/2，同时应记录过滤器规格与实际安装深度。

2 过滤器与孔壁之间应分批投入清洗干净的滤料，包括松散岩、砂土等，含水层滤料宜依据含水层的颗粒级配确定。

3 过滤器与孔壁间所填砾料应清洗干净、分批填入，每次填入高度不宜大于0.8m，套管靴内保留的高度不宜小于0.2m，填充的最终高度应高出过滤器工作部分的顶端0.5m。

5.2.2 试验段上端和下端止水栓塞应安设在岩石较完整的部位，当孔壁岩石较破碎或在土体中试验时，宜采用气压式或水压式栓塞，栓塞定位应准确。

- 5.2.3 振荡器式微水试验仪器设备安装应符合下列规定：

1 振荡器式水头激发设备直径宜为孔径的0.5~0.8倍。

2 振荡器宜为流线型器身，孔口应设置导线轮及闭锁装置。

3 压力传感器应紧贴孔壁设置。

- 5.2.4 气压式微水试验仪器设备安装应符合下列规定：

1 在井内套管上应安装密封井盖。

2 应检验密封井盖上压力表的读数是否稳定。

- 5.2.5 注水式微水试验仪器设备安装应符合下列规定：

1 宜采用漏斗形注水器，注水口应有快速启闭阀门控制。

2 压力传感器应紧贴孔壁设置。

- 5.2.6 抽水式微水试验仪器设备安装应符合下列规定：

1 在水泵和抽水管之间宜设置止回阀。

2 水泵进水口应位于振荡最低水位以下。

5.2.7 微水试验的压力传感器在试验期间应保持在钻孔振荡最低水位以下。

5.2.8 水泵、空气压缩机、振荡器及其控制系统安装应满足安全用电要求。

5.3 试验操作

- 5.3.1 振荡器式微水试验的试验操作步骤应符合下列规定：

1 试验前，应将振荡器固定于钻孔内水面以下，试验时应快速将振荡器从钻孔中提出。

2 试验时应观测压力传感器数据和地下水位历时曲线的变化情况，待水位恢复到初始水位，应快速将振荡器拉离水面，待水位再次恢复到初始水位，之后宜延时1min~2min结束试验。

- 5.3.2 气压式微水试验的试验操作步骤应符合下列规定：

1 应关闭放气阀，打开充气阀，接通气压泵电源，向钻孔内充气。

2 应观测压力表读数和水位变动曲线，待压力表读数变化不大于±0.5%或水位波动值不大于1cm时，开放气阀。

3 应观测水位变动曲线，待水位恢复到初始水位后宜延时1min~2min结束试验。

- 5.3.3 注水式微水试验的试验操作步骤应符合下列规定：

1 应打开注水阀门迅速向钻孔中注水，当注水量等于设计注水量时，应关闭阀门停止注水，并应移除注水器。

2 应观测压力传感器数据和地下水位历时曲线的变化情况，待水位恢复到初始水位，之后宜延时1min~2min结束试验。

5.3.4 抽水式微水试验的试验操作步骤应符合下列规定：

1 试验前，应进行试抽，并应确定设计降深及抽水量。

2 当抽水量等于设计抽水量时，应停止抽水。

3 应观测压力传感器数据和地下水位历时曲线的变化情况，待水位恢复到初始水位，之后宜延时1min~2min结束试验。

6 试验资料整编

6.1 试验资料整理

- 6.1.1 试验现场记录、校对应及时，记录内容应完整、规范。记录格式应符合本规程附录A的规定，资料应准确无误，记录、校对应及时。
- 6.1.2 现场试验数据应分类整理，资料整理应真实、准确，并应符合现行行业标准《水利水电工程地质勘察资料整编规程》SL567的相关规定。

6.2 渗透性参数计算

- 6.2.1 渗透性参数计算应在资料整理的基础上进行。
- 6.2.2 渗透试验参数计算应符合本规程附录B的规定。
- 6.2.3 渗透性参数取值应根据不同方法计算成果并结合试验段地质条件综合分析确定。

6.3 试验报告编制

- 6.3.1 试验报告应包括文字说明和图表两部分。
- 6.3.2 文字说明宜包含下列内容：
 - 1 概述。
 - 2 试验地段的地质条件。
 - 3 试验钻孔结构和试验激发方法。
 - 4 试验过程与存在问题。
 - 5 试验成果分析与评价。
 - 6 结论与建议。
- 6.3.3 图表宜包括下列内容：
 - 1 试验场地平面图。
 - 2 试验钻孔结构图。
 - 3 水位时间关系曲线图。
 - 4 $\omega' \sim \lg t$ 无量纲的水位变化量与时间对数的实测曲线。
 - 5 基本数据和计算成果表。

附录 A 微水试验记录表格

A. 0.1 气压式微水试验数据记录表宜符合表A. 0. 1的规定。

表A. 0. 1 气压式微水试验数据记录表

孔号： 孔口高程： 孔位： 试段：
 试段埋深： 气压泵功率： 孔底与初始水位间距离（m）：
 含水层顶与初始水位间距离（m）： 探头底部距孔口距离（m）： 水温（℃）：

试段 编号	初始水 位埋深 (m)	采样频 率 (Hz)	钻孔内 压力 (MPa)	气压泵 压力 (MPa)	激发 水头 (m)	加压 时间 (s)	花管 半径 (m)	套管 半径 (m)	花管 长度 (m)	备注

记录： 校核： 时间： 年 月 日

A. 0.2 注水或抽水式微水试验数据记录表宜符合表A. 0. 2的规定。

表A. 0. 2 注水或抽水式微水试验数据记录表

孔号： 孔口高程： 孔位： 试段：
 试段埋深： 水泵功率： 孔底与初始水位间距离（m）：
 含水层顶与初始水位间距离（m）： 探头底部距孔口距离（m）： 水温（℃）：

试段 编号	初始水位 埋深 (m)	采样 频率 (Hz)	注水/抽 水流量 (mL/s)	激发 水头(m)	激发 时间 (s)	花管 半径(m)	套管 半径(m)	花管 长度(m)	备注

记录： 校核： 时间： 年 月 日

A. 0.3 振荡器式微水试验数据记录表宜符合表A. 0. 3的规定。

表A. 0. 3 振荡器式微水试验数据记录表

孔号： 孔口高程： 孔位： 试段： 试段埋深：
 孔底与初始水位间距离（m）： 含水层顶与初始水位间距离（m）：
 探头底部距孔口距离（m）： 水温（℃）：

试段 编号	初始水 位埋深	采样 频率	振荡器 体积	振荡器 质量	激发 水头	激发 时间	花管 半径	套管 半径	花管 长度	备注
----------	------------	----------	-----------	-----------	----------	----------	----------	----------	----------	----

	(m)	(Hz)	(m ³)	(kg)	(m)	(s)	(m)	(m)	(m)	

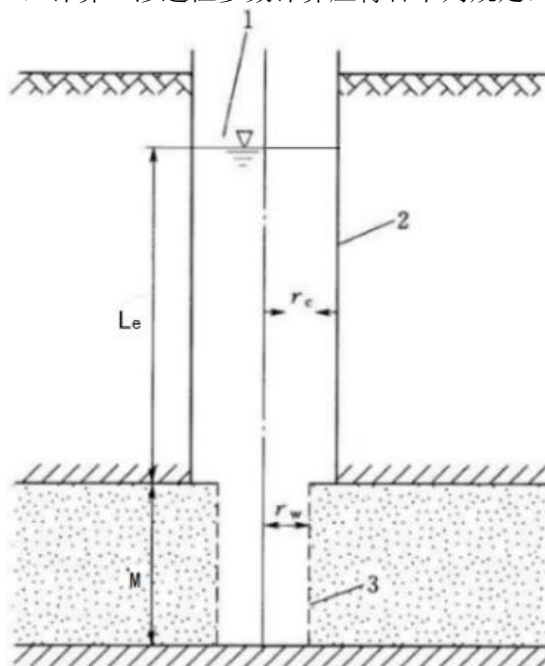
记录：

校核：

时间： 年 月 日

附录 B 微水试验参数计算

B.0.1 承压含水层或贮水系数较小、渗透性 K 不小于 10^{-4} cm/s的潜水含水层的渗透性参数，可采用 Kipp几何模型（图B.0.1-1）计算。渗透性参数计算应符合下列规定：



图B.0.1-1 Kipp几何模型

1 初始水位；2 套管；3 过滤器

- 1 应根据表B.0.1-1～表B.0.1-10的数据，在半对数纸上绘制 $w' \sim \lg \hat{t}$ 标准曲线（图B.0.1-2）。
- 2 应在与标准曲线相同模数的半对数纸上绘制同比例的 $w \sim \lg t$ 实测曲线。
- 3 拟合实测曲线与标准曲线。
- 4 对应标准曲线记录相应的 ζ 、 α 值，在标准曲线上选取任一匹配点，记录相应的 w' 、 \hat{t} 值；对应实测曲线记录时间 t 和水位变化值 w 。
- 5 弹性贮水系数应按下式计算：

$$S = r_c^2 / (2r_w^2 \alpha) \quad (\text{B.0.1-1})$$

式中： S ——弹性贮水系数；

r_c ——钻孔水位升降段的套管半径（m）；

r_w ——过滤器半径（m）；

α ——无量纲系数。

- 6 有效静态水柱长度应按下式计算，计算所得的有效水柱长度与由系统几何特性所得的有效长度应吻合，相差不应超过20%：

$$L_e = (t/\hat{t})^2 g \quad (\text{B.0.1-2})$$

式中： L_e ——有效静态水柱长度（m）；

t ——选取匹配点对应的实测曲线记录时间（s）；

\hat{t} ——选取匹配点对应的标准曲线无量纲时间；

g ——重力加速度（m/s²）。

- 7 无量纲惯性参数应按下式计算：

$$\beta = [\alpha \ln \beta) / 8\xi]^2 \quad (\text{B. 0. 1-3})$$

式中： β ——无量纲惯性参数；
 ξ ——阻尼系数。

8 导水系数和渗透系数应按下式计算：

$$T = [(\beta g) / L_e]^{1/2} r_w^2 S \quad (\text{B. 0. 1-4})$$

$$K = T / M \quad (\text{B. 0. 1-5})$$

式中： T ——导水系数 (m^2/s) ；
 K ——渗透系数 (m/s) ；
 M ——含水层厚度 (m) 。

表B. 0. 1-1 $\zeta = 0.1$; $\alpha = 9988.1$ 微水试验标准曲线数值

\hat{t}	w'	\hat{t}	w'
0. 0316228	-0. 9994880	3. 1622780	0. 7100277
0. 0363662	-0. 9993280	3. 6366190	0. 6204110
0. 0395285	-0. 9992086	3. 9528470	0. 4871206
0. 0426908	-0. 9990793	4. 2690750	0. 3138511
0. 0474342	-0. 9988666	4. 7434160	0. 0221868
0. 0537587	-0. 9985483	5. 3758720	-0. 3226809
0. 0632456	-0. 9979965	6. 3245550	-0. 5191564
0. 0711513	-0. 9974688	7. 1151250	-0. 3413663
0. 0790569	-0. 9968794	7. 9056940	0. 0000345
0. 0869626	-0. 9962284	8. 6962640	0. 2889492
0. 0948683	-0. 9955161	9. 4868330	0. 3712172
0. 1106797	-0. 9939077	11. 0679700	-0. 0175825
0. 1264911	-0. 9920552	12. 6491100	-0. 2697976
0. 1423025	-0. 9899599	14. 2302500	0. 0210926
0. 1581139	-0. 9876230	15. 8113900	0. 1919487
0. 1739253	-0. 9850456	17. 3925300	-0. 0245533
0. 1897367	-0. 9822293	18. 9736700	-0. 1392019
0. 2213594	-0. 9758851	22. 1359400	0. 0982621
0. 2529822	-0. 9686026	25. 2982200	-0. 0712917
0. 2846050	-0. 9603946	28. 4605000	0. 0497607
0. 3162278	-0. 9512748	31. 6227800	-0. 0362603
0. 3636619	-0. 9359183	36. 3661900	-0. 0099974
0. 3952847	-0. 9259452	39. 5284700	0. 0072009
0. 4269075	-0. 9084819	47. 4341600	0. 0058930
0. 4743416	-0. 8947298	53. 7587200	0. 0027371
0. 5375872	-0. 8632514	63. 2455500	-0. 0012546
0. 6324555	-0. 8135785	71. 1512500	0. 0002961
0. 7115125	-0. 7673017	79. 0569400	-0. 0000576
0. 7905694	-0. 7169702	86. 9626400	-0. 0002991
0. 8696264	-0. 6629659	94. 8683300	-0. 0001835
0. 9486833	-0. 6056883	110. 6797000	-0. 0001427
1. 1067970	-0. 4829810	126. 4911000	-0. 0001250
1. 2649110	-0. 3522848	142. 3025000	-0. 0001116
1. 4230250	-0. 2171309	158. 1139000	-0. 0001002
1. 5811390	-0. 0810520	173. 9253000	-0. 0000911
1. 7392530	0. 0597477	189. 7367000	-0. 0000835
1. 8973670	0. 1802728	221. 3594000	-0. 0000715
2. 2135940	0. 4066508	252. 9822000	-0. 0000626
2. 5298220	0. 5647406	284. 6050000	-0. 0000556
2. 8460500	0. 6811030		

表B. 0. 1-2 $\zeta=0.2$; $\alpha=19976$ 微水试验标准曲线数值

\hat{t}	w'	\hat{t}	w'
0. 0316228	-0. 9994902	3. 1622780	0. 4939368
0. 0363662	-0. 9993263	3. 6366190	0. 4349301
0. 0395285	-0. 9992107	3. 9528470	0. 3465758
0. 0426908	-0. 9990815	4. 2690750	0. 2343067
0. 0474342	-0. 9988695	4. 7434160	0. 0516035
0. 0537587	-0. 9985520	5. 3758720	-0. 1543438
0. 0632456	-0. 9980024	6. 3245550	-0. 2671865
0. 0711513	-0. 9974810	7. 1151250	-0. 1818502
0. 0790569	-0. 9968908	7. 9056940	-0. 0260065
0. 0869626	-0. 9962437	8. 6962640	0. 0976436
0. 0948683	-0. 9955360	9. 4868330	0. 1324266
0. 1106797	-0. 9939399	11. 0679700	0. 0038717
0. 1264911	-0. 9921040	12. 6491100	-0. 0730436
0. 1423025	-0. 9900304	14. 2302500	-0. 0036238
0. 1581139	-0. 9877207	15. 8113900	0. 0343077
0. 1739253	-0. 9851770	17. 3925300	-0. 0023975
0. 1897367	-0. 9824014	18. 9736700	-0. 0205130
0. 2213594	-0. 9761622	22. 1359400	0. 0081874
0. 2529822	-0. 9690205	25. 2982200	-0. 0062591
0. 2846050	-0. 9609942	28. 4605000	0. 0014029
0. 3162278	-0. 9521021	31. 6227800	-0. 0023312
0. 3636619	-0. 9371834	36. 3661900	-0. 0010312
0. 3952847	-0. 9262139	39. 5284700	-0. 0007348
0. 4269075	-0. 9105352	42. 6907500	-0. 0008051
0. 4743416	-0. 8975464	47. 4341600	-0. 0006352
0. 5375872	-0. 8673412	53. 7587200	-0. 0005871
0. 6324555	-0. 8201831	63. 2455500	-0. 0005088
0. 7115125	-0. 7766091	71. 1512500	-0. 0004500
0. 7905694	-0. 7295735	79. 0569400	-0. 0004047
0. 8696264	-0. 6794859	86. 9626400	-0. 0003676
0. 9486833	-0. 6267637	94. 8683300	-0. 0003366
1. 1067970	-0. 5151022	110. 6797000	-0. 0002881
1. 2649110	-0. 3979593	126. 4911000	-0. 0002518
1. 4230250	-0. 2786373	142. 3025000	-0. 0002236
1. 5811390	-0. 1602887	158. 1139000	-0. 0002011
1. 7392530	-0. 0386037	173. 9253000	-0. 0001828
1. 8973670	0. 0620478	189. 7367000	-0. 0001675
2. 2135940	0. 2492937	221. 3594000	-0. 0001434
2. 5298220	0. 3742380	252. 9822000	-0. 0001254
2. 8460500	0. 4694111	284. 6050000	-0. 0001114

表B. 0. 1-3 $\zeta=0.5$; $\alpha=49940$ 微水试验标准曲线数值

\hat{t}	w'	\hat{t}	w'
0. 0316228	-0. 9994990	3. 6366190	0. 1012577
0. 0363662	-0. 9993397	3. 9528470	0. 0882034
0. 0395287	-0. 9992213	4. 2690750	0. 0676211
0. 0426908	-0. 9990932	4. 7434160	0. 0321753
0. 0474342	-0. 9988829	5. 3758720	-0. 0083375
0. 0537587	-0. 9985688	6. 3245550	-0. 0364754
0. 0632456	-0. 9975079	7. 1151250	-0. 0347609
0. 0711513	-0. 9969310	7. 9056940	-0. 0237358
0. 0790569	-0. 9969310	8. 6962640	-0. 0133871
0. 0869626	-0. 9962956	9. 4868330	-0. 0076810
0. 0948683	-0. 9956020	11. 0679700	-0. 0067373
0. 1106797	-0. 9940425	12. 6491100	-0. 0078797
0. 1264911	-0. 9922559	14. 2302500	-0. 0069282
0. 1423025	-0. 9902461	15. 8113900	-0. 0057706
0. 1581139	-0. 9880166	17. 3925300	-0. 0051544
0. 1739253	-0. 9855713	18. 9736700	-0. 0047403
0. 1897367	-0. 9829139	22. 1359400	-0. 0039915
0. 2213594	-0. 9769780	25. 2982200	-0. 0034473
0. 2529822	-0. 9702398	28. 4605000	-0. 0030330
0. 2846050	-0. 9627300	31. 6227800	-0. 0027070
0. 3162278	-0. 9544800	36. 3661900	-0. 0023307
0. 3636619	-0. 9407848	39. 5284700	-0. 0021328
0. 3952847	-0. 9321798	42. 6907500	-0. 0019664
0. 4743416	-0. 9053980	47. 4341600	-0. 0017590
0. 5375872	-0. 8786102	53. 7587200	-0. 0015426
0. 6324555	-0. 8380771	63. 2455500	-0. 0013021
0. 7115125	-0. 8014756	71. 1512500	-0. 0011523
0. 7905694	-0. 7627801	79. 0569400	-0. 0010334
0. 8696264	-0. 7224138	86. 9626400	-0. 0009366
0. 9486833	-0. 6807796	94. 8683300	-0. 0008565
1. 1067970	-0. 5952065	110. 6797000	-0. 0007313
1. 2649110	-0. 5088214	126. 4911000	-0. 0006380
1. 4230250	-0. 4239899	142. 3025000	-0. 0005658
1. 5811390	-0. 3426759	158. 1139000	-0. 0005083
1. 7392530	-0. 2592066	173. 9253000	-0. 0004614
1. 8973670	-0. 1964942	189. 7367000	-0. 0004198
2. 2135940	-0. 0784390	221. 3594000	-0. 0003613
2. 5298220	-0. 0048741	252. 9822000	-0. 0003157
2. 8460500	0. 0650168	284. 6050000	-0. 0002803
3. 1622780	0. 0949209		

表B. 0. 1-4 $\zeta=0.7$; $\alpha=69917$ 微水试验标准曲线数值

\hat{t}	w'	\hat{t}	w'
0. 0316228	-0. 9995070	3. 6366190	-0. 0335466
0. 0363662	-0. 9993420	3. 9528470	-0. 0251592
0. 0395287	-0. 9992401	4. 2690750	-0. 0219888
0. 0426908	-0. 9991031	4. 7434160	-0. 0224633
0. 0474342	-0. 9988941	5. 3758720	-0. 0259789
0. 0537587	-0. 9985822	6. 3245550	-0. 0284103
0. 0632456	-0. 9980437	7. 1151250	-0. 0267037
0. 0711513	-0. 9975307	7. 9056940	-0. 0234349
0. 0790569	-0. 9969310	8. 6962640	-0. 0201256
0. 0869626	-0. 9962956	9. 4868330	-0. 0174314
0. 0948683	-0. 9956020	11. 0679700	-0. 0138969
0. 1106797	-0. 9940425	12. 6491100	-0. 0117142
0. 1264911	-0. 9922559	14. 2302500	-0. 0101100
0. 1423025	-0. 9902461	15. 8113900	-0. 0088652
0. 1581139	-0. 9880166	17. 3925300	-0. 0078860
0. 1739253	-0. 9855713	18. 9736700	-0. 0071000
0. 1897367	-0. 9829139	22. 1359400	-0. 0059164
0. 2213594	-0. 9769780	25. 2982200	-0. 0050685
0. 2529822	-0. 9702398	28. 4605000	-0. 0044320
0. 2846050	-0. 9638311	31. 6227800	-0. 0039369
0. 3162278	-0. 9559768	36. 3661900	-0. 0033713
0. 3636619	-0. 9430270	39. 5284700	-0. 0030764
0. 3952847	-0. 9350272	42. 6907500	-0. 0028288
0. 5375872	-0. 8853626	47. 4341600	-0. 0025239
0. 6324555	-0. 8485776	53. 7587200	-0. 0022067
0. 7115125	-0. 8158209	63. 2455500	-0. 0018564
0. 7905694	-0. 7816147	71. 1512500	-0. 0016395
0. 8696264	-0. 7463554	79. 0569400	-0. 0014679
0. 9486833	-0. 7104052	86. 9626400	-0. 0013287
1. 1067970	-0. 6377118	94. 8683300	-0. 0012137
1. 2649110	-0. 5657711	110. 6797000	-0. 0010345
1. 4230250	-0. 4963320	126. 4911000	-0. 0009014
1. 5811390	-0. 4307045	142. 3025000	-0. 0007986
1. 7392530	-0. 3625714	158. 1139000	-0. 0007168
1. 8973670	-0. 3142473	173. 9253000	-0. 0006502
2. 2135940	-0. 2201264	189. 7367000	-0. 0005950
2. 5298220	-0. 1617035	221. 3594000	-0. 0005085
2. 8460500	-0. 0968489	252. 9822000	-0. 0004440
3. 1622780	-0. 0621304	284. 6050000	-0. 0003939

表B.0.1-5 $\zeta=1.0$; $\alpha=99881$ 微水试验标准曲线数值

\hat{t}	w'	\hat{t}	w'
0.0316228	-0.9995190	3.6366190	-0.1781301
0.0363662	-0.9993614	3.9528470	-0.1558584
0.0395287	-0.9992445	4.2690750	-0.1371938
0.0426908	-0.9991182	4.7434160	-0.1151268
0.0474342	-0.9989111	5.3758720	-0.0931193
0.0537587	-0.9986024	6.3245550	-0.0702290
0.0632456	-0.9980706	7.1151250	-0.0570098
0.0711513	-0.9975651	7.9056940	-0.0472406
0.0790569	-0.9970039	8.6962640	-0.0398682
0.0869626	-0.9963876	9.4868330	-0.0342002
0.0948683	-0.9957171	11.0679700	-0.0262392
0.1106797	-0.9942169	12.6491100	-0.0210572
0.1264911	-0.9925094	14.2302500	-0.0174922
0.1423025	-0.9906011	15.8113900	-0.0149222
0.1581139	-0.9884982	17.3925300	-0.0129959
0.1739253	-0.9862069	18.9736700	-0.0115044
0.1897367	-0.9837333	22.1359400	-0.0093529
0.2213594	-0.9781635	25.2982200	-0.0078791
0.2529822	-0.9721364	28.4605000	-0.0068071
0.2846050	-0.9653980	31.6227800	-0.0059923
0.3162278	-0.9580927	36.3661900	-0.0050806
0.3636619	-0.9461653	39.5284700	-0.0046129
0.3952847	-0.9389866	42.6907500	-0.0042241
0.4269075	-0.9247502	47.4341600	-0.0037499
0.5375872	-0.8944811	53.7587200	-0.0032618
0.6324555	-0.8624921	63.2455500	-0.0027289
0.7115125	-0.8345350	71.1512500	-0.0024018
0.7905694	-0.8058093	79.0569400	-0.0021447
0.8696264	-0.7766480	86.9626400	-0.0019373
0.9486833	-0.7473366	94.8683300	-0.0017675
1.1067970	-0.6891964	110.6797000	-0.0015015
1.2649110	-0.6328903	126.4911000	-0.0013057
1.4230250	-0.5794237	142.3025000	-0.0011529
1.5811390	-0.5294147	158.1139000	-0.0010355
1.7392530	-0.4759465	173.9253000	-0.0009383
1.8973670	-0.4408436	189.7367000	-0.0008579
2.2135940	-0.3675417	221.3594000	-0.0007323
2.5298220	-0.3213633	252.9822000	-0.0006387
2.8460500	-0.2602688	284.6050000	-0.0005663
3.1622780	-0.2219805		

表B. 0. 1-6 $\zeta=1.5$; $\alpha=149821$ 微水试验标准曲线数值

\hat{t}	w'	\hat{t}	w'
0.0316228	-0.9995363	3.6366190	-0.3398395
0.0363662	-0.9993806	3.9528470	-0.3113242
0.0395287	-0.9992652	4.2690750	-0.2857245
0.0426908	-0.9991407	4.7434160	-0.2520498
0.0474342	-0.9989368	5.3758720	-0.2144593
0.0537587	-0.9986336	6.3245550	-0.1702739
0.0632456	-0.9981127	7.1151250	-0.1419167
0.0711513	-0.9976193	7.9056940	-0.1193325
0.0790569	-0.9970732	8.6962640	-0.1012090
0.0869626	-0.9964754	9.4868330	-0.0865608
0.0948683	-0.9958272	11.0679700	-0.0648749
0.1106797	-0.9943835	12.6491100	-0.0501425
0.1264911	-0.9927509	14.2302500	-0.0398783
0.1423025	-0.9909379	15.8113900	-0.0325499
0.1581139	-0.9889526	17.3925300	-0.0271915
0.1739253	-0.9868033	18.9736700	-0.0231824
0.1897367	-0.9844978	22.1359400	-0.0177218
0.2213594	-0.9794484	25.2982200	-0.0142700
0.2529822	-0.9738631	28.4605000	-0.0119318
0.2846050	-0.9677964	31.6227800	-0.0102553
0.3162278	-0.9612998	36.3661900	-0.0084791
0.3636619	-0.9508522	39.5284700	-0.0076061
0.3952847	-0.9448418	42.6907500	-0.0068984
0.4269075	-0.9319204	47.4341600	-0.0060562
0.5375872	-0.9073899	53.7587200	-0.0052108
0.6324555	-0.8816423	63.2455500	-0.0043105
0.7115125	-0.8597084	71.1512500	-0.0037688
0.7905694	-0.8376400	79.0569400	-0.0033483
0.8696264	-0.8156531	86.9626400	-0.0030123
0.9486833	-0.7939129	94.8683300	-0.0027397
1.1067970	-0.7516347	110.6797000	-0.0023155
1.2649110	-0.7114323	126.4911000	-0.0020061
1.4230250	-0.6735824	142.3025000	-0.0017697
1.5811390	-0.6381472	158.1139000	-0.0015831
1.7392530	-0.6050646	173.9253000	-0.0014321
1.8973670	-0.5742069	189.7367000	-0.0013073
2.2135940	-0.5185081	221.3594000	-0.0011134
2.5298220	-0.4831462	252.9822000	-0.0009695
2.8460500	-0.4270546	284.6050000	-0.0008585

3.1622780	-0.3890578		
-----------	------------	--	--

表B. 0. 1-7 $\zeta=2.0$; $\alpha=199761$ 微水试验标准曲线数值

\hat{t}	w'	\hat{t}	w'
0.0316228	-0.9995504	3.1622780	-0.4954981
0.0363662	-0.9993964	3.9528470	-0.4198530
0.0395287	-0.9992824	4.2690750	-0.3936005
0.0426908	-0.9991596	4.7434160	-0.3578603
0.0474342	-0.9989589	5.3758720	-0.3161236
0.0537587	-0.9986610	6.3245550	-0.2640067
0.0632456	-0.9981509	7.1151250	-0.2283612
0.0711513	-0.9976692	7.9056940	-0.1984082
0.0790569	-0.9971377	8.6962640	-0.1731322
0.0869626	-0.9965578	9.4868330	-0.1517201
0.0948683	-0.9959308	11.0679700	-0.1179834
0.1106797	-0.9945412	12.6491100	-0.0932710
0.1264911	-0.9929793	14.2302500	-0.0749361
0.1423025	-0.9912556	15.8113900	-0.0611644
0.1581139	-0.9893797	17.3925300	-0.0506946
0.1739253	-0.9873613	18.9736700	-0.0426395
0.1897367	-0.9852094	22.1359400	-0.0314278
0.2213594	-0.9805395	25.2982200	-0.0243153
0.2529822	-0.9754347	28.4605000	-0.0195916
0.2846050	-0.9699542	31.6227800	-0.0163146
0.3162278	-0.9641512	36.3661900	-0.0130016
0.3636619	-0.9549461	39.5284700	-0.0114492
0.3952847	-0.9498965	42.6907500	-0.0102321
0.4269075	-0.9380387	47.4341600	-0.0088334
0.5375872	-0.9179758	53.7587200	-0.0074804
0.6324555	-0.8968434	63.2455500	-0.0060936
0.7115125	-0.8791796	71.1512500	-0.0052825
0.7905694	-0.8616598	79.0569400	-0.0046637
0.8696264	-0.8444851	86.9626400	-0.0041755
0.9486833	-0.8274940	94.8683300	-0.0037803
1.1067970	-0.7948821	110.6797000	-0.0031791
1.2649110	-0.7639855	126.4911000	-0.0027432
1.4230250	-0.7347865	142.3025000	-0.0024125
1.5811390	-0.7071872	158.1139000	-0.0021530
1.7392530	-0.6738222	173.9253000	-0.0019439
1.8973670	-0.6562890	189.7367000	-0.0017718
2.2135940	-0.6103452	221.3594000	-0.0014687
2.5298220	-0.5819047	252.9822000	-0.0013085
2.8460500	-0.5304684	284.6050000	-0.0011571

表B. 0. 1-8 $\zeta=3.0$; $\alpha=299642$ 微水试验标准曲线数值

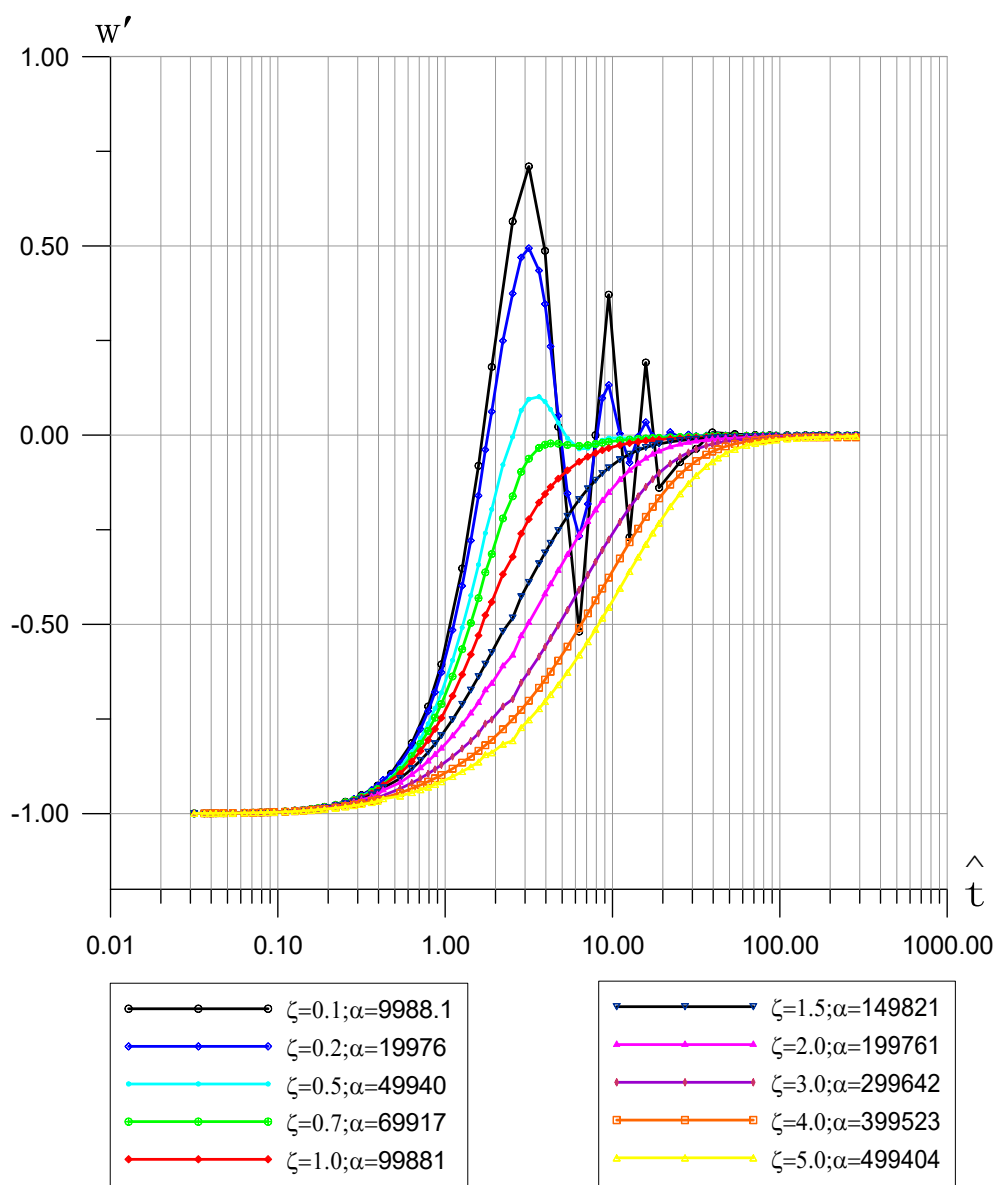
\hat{t}	w'	\hat{t}	w'
0.0316228	-0.9995713	3.1622780	-0.6252020
0.0363662	-0.9994208	3.6366190	-0.5849806
0.0395287	-0.9992801	3.9528470	-0.5599474
0.0426908	-0.9991903	4.2690750	-0.5362293
0.0474342	-0.9989957	4.7434160	-0.5029083
0.0537587	-0.9987081	5.3758720	-0.4623004
0.0632456	-0.9982186	6.3245550	-0.4085330
0.0711513	-0.9977595	7.1151250	-0.3693645
0.0790569	-0.9972559	7.9056940	-0.3345921
0.0869626	-0.9967096	8.6962640	-0.3036493
0.0948683	-0.9961227	9.4868330	-0.2760565
0.1106797	-0.9948334	11.0679700	-0.2293403
0.1264911	-0.9934017	12.6491100	-0.1918026
0.1423025	-0.9918402	14.2302500	-0.1614586
0.1581139	-0.9901608	15.8113900	-0.1367944
0.1739253	-0.9883746	17.3925300	-0.1166434
0.1897367	-0.9864919	18.9736700	-0.1000984
0.2213594	-0.9824744	22.1359400	-0.0751356
0.2529822	-0.9781767	25.2982200	-0.0578340
0.2846050	-0.9736570	28.4605000	-0.0456193
0.3162278	-0.9689648	31.6227800	-0.0368358
0.3636619	-0.9616917	36.3661900	-0.0278316
0.3952847	-0.9580948	39.5284700	-0.0236555
0.5375872	-0.9340335	42.6907500	-0.0204524
0.6324555	-0.9189910	47.4341600	-0.0169026
0.7115125	-0.9066885	53.7587200	-0.0136693
0.7905694	-0.8946509	63.2455500	-0.0106130
0.8696264	-0.8828959	71.1512500	-0.0089592
0.9486833	-0.8714239	79.0569400	-0.0077622
1.1067970	-0.8492890	86.9626400	-0.0068544
1.2649110	-0.8281398	94.8683300	-0.0061409
1.4230250	-0.8078648	110.6797000	-0.0050883
1.5811390	-0.7883699	126.4911000	-0.0043468
1.7392530	-0.7623399	142.3025000	-0.0037952
1.8973670	-0.7514388	158.1139000	-0.0033684
2.2135940	-0.7169161	173.9253000	-0.0030282
2.5298220	-0.6978197	189.7367000	-0.0027505
2.8460500	-0.6540089	221.3594000	-0.0023243

表B. 0. 1-9 $\zeta=4.0$; $\alpha=399523$ 微水试验标准曲线数值

\hat{t}	w'	\hat{t}	w'
0.0363662	-0.9994397	3.9528470	-0.6459305
0.0395287	-0.9993315	4.2690750	-0.6252068
0.0426908	-0.9992153	4.7434160	-0.5956538
0.0474342	-0.9990266	5.3758720	-0.5588830
0.0537587	-0.9987391	6.3245550	-0.5087715
0.0632456	-0.9982789	7.1151250	-0.4711058
0.0711513	-0.9978410	7.9056940	-0.4367299
0.0790569	-0.9973634	8.6962640	-0.4053004
0.0869626	-0.9968485	9.4868330	-0.3765203
0.0948683	-0.9962983	11.0679700	-0.3259029
0.1106797	-0.9951003	12.6491100	-0.2831426
0.1264911	-0.9937850	14.2302500	-0.2468765
0.1423025	-0.9923664	15.8113900	-0.2160073
0.1581139	-0.9908572	17.3925300	-0.1896467
0.1739253	-0.9892689	18.9736700	-0.1670685
0.1897367	-0.9876121	22.1359400	-0.1309732
0.2213594	-0.9841292	25.2982200	-0.1040662
0.2529822	-0.9804724	28.4605000	-0.0838062
0.2846050	-0.9766928	31.6227800	-0.0684017
0.3162278	-0.9728306	36.3661900	-0.0517069
0.3636619	-0.9669495	39.5284700	-0.0436080
0.3952847	-0.9630034	42.6907500	-0.0372390
0.5375872	-0.9453851	47.4341600	-0.0300442
0.6324555	-0.9339662	53.7587200	-0.0234323
0.7115125	-0.9246968	63.2455500	-0.0172775
0.7905694	-0.9156473	71.1512500	-0.0140791
0.8696264	-0.9068039	79.0569400	-0.0118652
0.9486833	-0.8981501	86.9626400	-0.0102580
1.1067970	-0.8813505	94.8683300	-0.0090427
1.2649110	-0.8651446	110.6797000	-0.0073280
1.4230250	-0.8494578	126.4911000	-0.0061726
1.5811390	-0.8342370	142.3025000	-0.0061726
1.7392530	-0.8194373	158.1139000	-0.0061726
1.8973670	-0.8050439	173.9253000	-0.0061726
2.2135940	-0.7773380	189.7367000	-0.0061726
2.5298220	-0.7509616	221.3594000	-0.0061726
2.8460500	-0.7257946	252.9822000	-0.0061726
3.1622780	-0.7016959	284.6050000	-0.0061726
3.6366190	-0.6675513		

表B. 0. 1-10 $\zeta=5$; $\alpha=499404$ 微水试验标准曲线数值

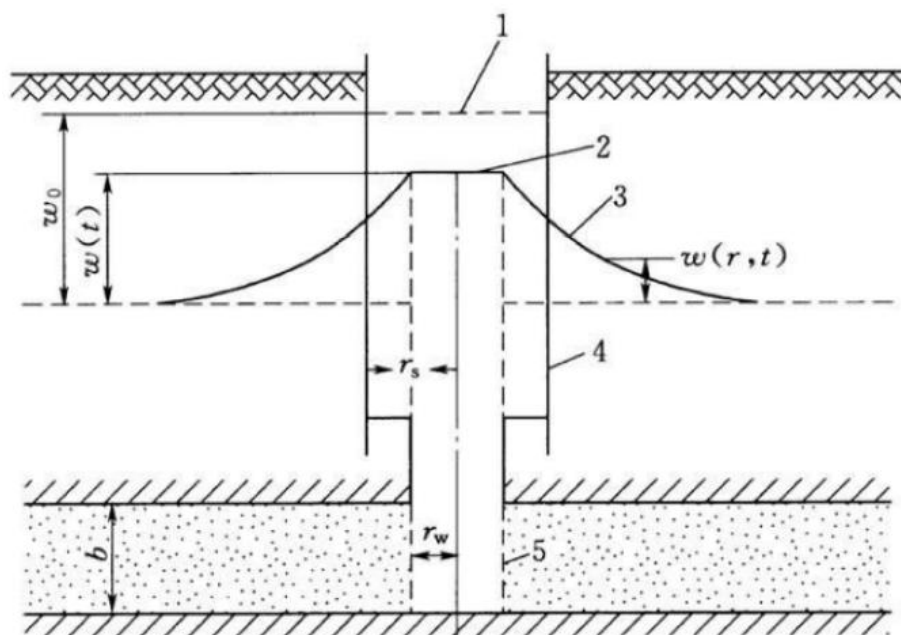
\hat{t}	w'	\hat{t}	w'
0. 0316228	-0. 9995993	3. 6366190	-0. 7227334
0. 0363662	-0. 9994555	3. 9528470	-0. 7039170
0. 0395287	-0. 9993500	4. 2690750	-0. 6857313
0. 0426908	-0. 9992370	4. 7434160	-0. 6595645
0. 0474342	-0. 9990540	5. 3758720	-0. 6266026
0. 0537587	-0. 9987858	6. 3245550	-0. 5809008
0. 0632456	-0. 9983344	7. 1151250	-0. 5458994
0. 0711513	-0. 9979164	7. 9056940	-0. 5134182
0. 0790569	-0. 9974631	8. 6962640	-0. 4832304
0. 0869626	-0. 9969772	9. 4868330	-0. 4551380
0. 0948683	-0. 9964608	11. 0679700	-0. 4045587
0. 1106797	-0. 9953459	12. 6491100	-0. 3604938
0. 1264911	-0. 9941348	14. 2302500	-0. 3219817
0. 1423025	-0. 9928421	15. 8113900	-0. 2882303
0. 1581139	-0. 9914807	17. 3925300	-0. 2585794
0. 1739253	-0. 9900617	18. 9736700	-0. 2324735
0. 1897367	-0. 9885951	22. 1359400	-0. 1890850
0. 2213594	-0. 9855521	25. 2982200	-0. 1550702
0. 2529822	-0. 9824077	28. 4605000	-0. 1282238
0. 2846050	-0. 9792032	31. 6227800	-0. 1069007
0. 3162278	-0. 9759688	36. 3661900	-0. 0826443
0. 3636619	-0. 9711069	39. 5284700	-0. 0703363
0. 3952847	-0. 9678791	42. 6907500	-0. 0603551
0. 4269075	-0. 9607577	47. 4341600	-0. 0487112
0. 5375872	-0. 9536742	53. 7587200	-0. 0376251
0. 6324555	-0. 9445502	63. 2455500	-0. 0269885
0. 7115125	-0. 9371475	71. 1512500	-0. 0213978
0. 7905694	-0. 9299074	79. 0569400	-0. 0175581
0. 8696264	-0. 9228118	86. 9626400	-0. 0148229
0. 9486833	-0. 9158457	94. 8683300	-0. 0128077
1. 1067970	-0. 9022552	110. 6797000	-0. 0100703
1. 2649110	-0. 8890648	126. 4911000	-0. 0083160
1. 4230250	-0. 8762274	142. 3025000	-0. 0070963
1. 5811390	-0. 8637098	158. 1139000	-0. 0061968
1. 7392530	-0. 8442461	173. 9253000	-0. 0055040
1. 8973670	-0. 8395387	189. 7367000	-0. 0049529
2. 2135940	-0. 8164029	221. 3594000	-0. 0041294
2. 5298220	-0. 8075058	252. 9822000	-0. 0035424
2. 8460500	-0. 7728430	284. 6050000	-0. 0031021
3. 1622780	-0. 7522230		



图B.0.1-2 无量纲 $W' \sim \lg t$ 关系曲线图

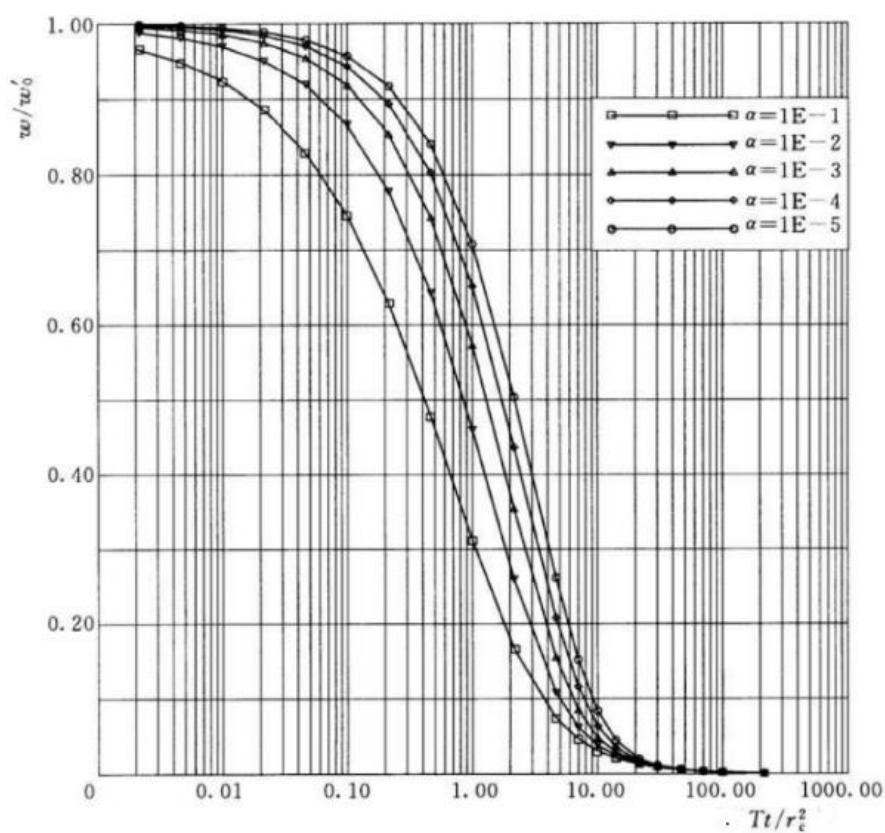
B.0.2 承压含水层、渗透系数 K 小于 10^{-4}cm/s 的完整井的渗透性参数，可采用Cooper几何模型（图B.0.2-1）计算。渗透性参数计算应符合下列规定：

- 1 应按表B.0.2的规定在半对数纸上做 $\omega / \omega'_0 - \lg (Tt / r_c^2)$ 标准曲线（图B.0.2-2）， $Tt / r_c^2 = \beta$ 取对数坐标。



图B. 0. 2-1 Cooper几何模型

- 1 注水后即刻钻孔中水位；2 t时刻钻孔中水位；
3 t时刻含水层中的水头；4 套管；5 过滤器



图B. 0. 2-2 $w / w_0' - \lg (Tt / r_c^2)$ 标准曲线

2 求出 ω / ω_0 的比值，应在与标准曲线相同模的半对数坐标绘出 $\omega / \omega_0 - t$ 实测曲线。

3 将实测曲线和标准曲线进行拟合，应选择任一个匹配点，使得此点在标准曲线上，记录该点对应实测曲线的时间 t 。

4 试验段岩土体渗透性参数应按下列公式计算：

$$T = \frac{\beta r_c^2}{t} \quad (\text{B. 0. 2-1})$$

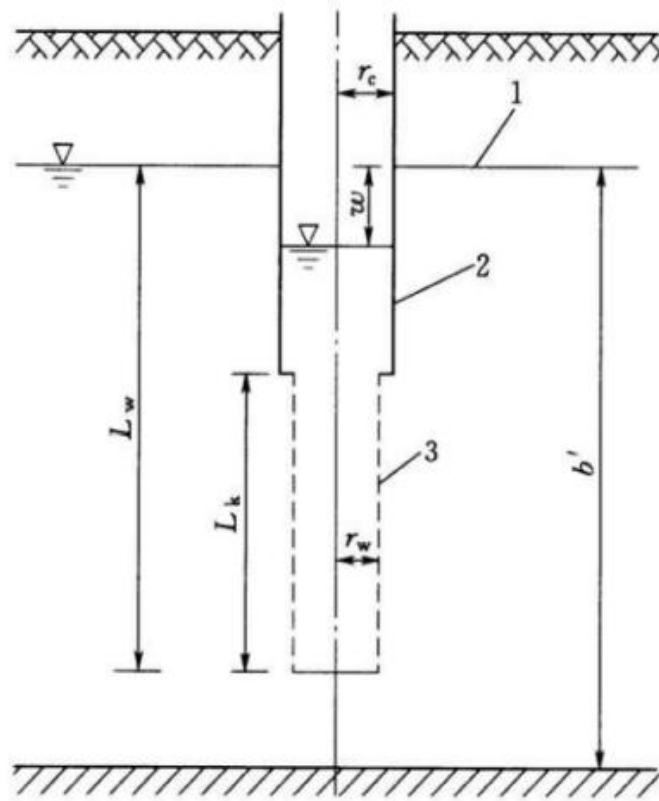
$$K = T / M \quad (\text{B. 0. 2-2})$$

$$S = \frac{\alpha r_c^2}{r_w^2} \quad (\text{B. 0. 2-3})$$

表B. 0. 2 $\omega / \omega_0' - \lg (Tt / r_c^2)$ 对应 α 关系

T_t / r_c^2	ω / ω_0'				
	$\alpha=1.0 \times 10^{-1}$	$\alpha=1.0 \times 10^{-2}$	$\alpha=1.0 \times 10^{-3}$	$\alpha=1.0 \times 10^{-4}$	$\alpha=1.0 \times 10^{-5}$
0. 00100	0. 997100	0. 992000	0. 996900	0. 998500	0. 999200
0. 00215	0. 965800	0. 987600	0. 994900	0. 997400	0. 998500
0. 00464	0. 949000	0. 980700	0. 991400	0. 995400	0. 997000
0. 01000	0. 923800	0. 969300	0. 985300	0. 991500	0. 994200
0. 02150	0. 886000	0. 950500	0. 974400	0. 984100	0. 988800
0. 04640	0. 829300	0. 918700	0. 954500	0. 970100	0. 978100
0. 10000	0. 746000	0. 865500	0. 918300	0. 943400	0. 957200
0. 21500	0. 628900	0. 778200	0. 853800	0. 893500	0. 916700
0. 46400	0. 478200	0. 643600	0. 743600	0. 803100	0. 841000
1. 00000	0. 311700	0. 459800	0. 572900	0. 652000	0. 708000
2. 15000	0. 166500	0. 259700	0. 354300	0. 436400	0. 503800
4. 64000	0. 074150	0. 108600	0. 155400	0. 208200	0. 262000
7. 00000	0. 046250	0. 062040	0. 085190	0. 116100	0. 152100
10. 00000	0. 030650	0. 037800	0. 048210	0. 063550	0. 083780
14. 00000	0. 020920	0. 022414	0. 028440	0. 034920	0. 044260
21. 50000	0. 012970	0. 014140	0. 015450	0. 017230	0. 019990
30. 00000	0. 009070	0. 009615	0. 010160	0. 010830	0. 011690
46. 40000	0. 005711	0. 005919	0. 006111	0. 006319	0. 006554
70. 00000	0. 003722	0. 003809	0. 003884	0. 003962	0. 004046
100. 00000	0. 002577	0. 002618	0. 002653	0. 002688	0. 002725
215. 00000	0. 001179	0. 001187	0. 001194	0. 001201	0. 001208

B. 0. 3 潜水含水层中完整井或非完整井微水试验参数宜采用Bouwer and Rice几何模型（图B. 0. 3-1）计算。渗透性参数计算应符合下列规定：



图B.0.3-1 Bouwer and Rice几何模型

1 初始水位；2 套管；3 过滤器

- 1) 应在半对数坐标纸上绘出 $\lg w \sim t$ 曲线。
- 2) 应用一条直线拟合该曲线的直线部分，并应延长该直线至 $t=0$ 。
- 3) $\ln \frac{R_e}{r_w}$ 可按下列规定计算：

1) 当 $h \neq L_w$ 且 $\ln[(h - L_w) / r_w] < 6$ 时，可按下式计算：

$$\ln \frac{R_e}{r_w} = \left\{ \frac{1.1}{\ln(L_w / r_w)} + \frac{A + B \ln[(h - L_w) / r_w]}{M / r_w} \right\}^{-1} \quad (\text{B.0.3-1})$$

式中： R_e ——影响半径(m)；
 L_w ——初始水位距钻孔孔底距离(m)；
 h ——初始水位距潜水含水层底板距离(m)；
 A 、 B ——无量纲参数（图B.0.3-2）。

2) 当 $h \neq L_w$ 且 $\ln[(h - L_w) / r_w] \geq 6$ 时，可按下式计算：

$$\ln \frac{R_e}{r_w} = \left[\frac{1.1}{\ln(L_w / r_w)} + \frac{A + 6B}{M / r_w} \right]^{-1} \quad (\text{B.0.3-2})$$

3) 当 $h = L_w$ 时，可按下式计算：

$$\ln \frac{R_e}{r_w} = \left[\frac{1.1}{\ln(L_w / r_w)} + \frac{C}{M / r_w} \right]^{-1} \quad (\text{B.0.3-3})$$

式中： C ——无量纲参数(图B.0.3-2)。

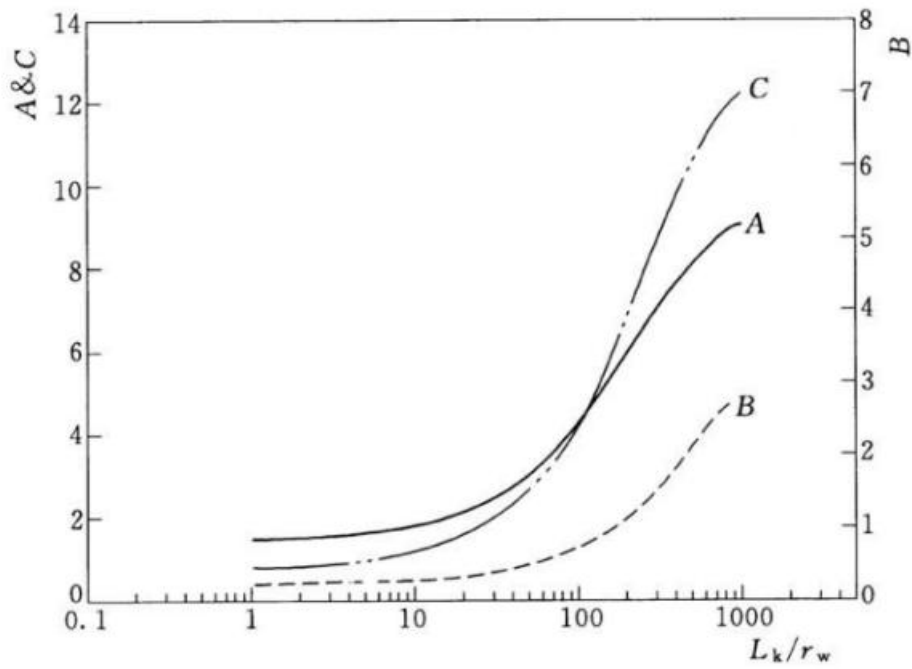
4) 在直线上找一点, 记下 w_0 、 w_t 的值, 含水层的水文地质参数应按下列公式计算:

$$K = \frac{r_c^2 \ln(R_e / r_w)}{2M} \frac{1}{t} \ln \frac{w_0}{w_t} \quad (\text{B. 0. 3-4})$$

$$T = \frac{hr_c^2 \ln(R_e / r_w)}{2M} \frac{1}{t} \ln \frac{w_0}{w_t} \quad (\text{B. 0. 3-4})$$

式中: w_0 ——瞬时抽(注)水后, 即刻的钻孔中水位(m);

w_t ——瞬时抽(注)水后, t 时刻的钻孔中水位(m)。



图B. 0. 3-2 无量纲参数A、B、C与 L_k/r_w 关系

标准用词说明

- 1 为便于在执行本标准条文时区别对待，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”。
 - 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 本标准中指明应按其他有关标准、规范执行的写法为“应符合……的规定”或“应按……执行”。

引用标准名录

《水利水电工程钻探规程》 SL/T 291

《水利水电工程钻孔抽水试验规程》 SL320

《水利水电工程地质勘察资料整编规程》 SL567

中国水利学会团体标准

水利水电工程钻孔微水试验规程

T/CHES XXX—20XX

条文说明

制 定 说 明

T/CHES XXX—XXXX《水利水电工程钻孔微水试验规程》，经中国水利学会××××年××月××日以第××号公告批准发布。

本标准在制定过程中，编制组根据新阶段水利高质量发展对水利技术标准的要求，进行了广泛调查和深入研究，总结了我国水利领域的钻孔微水试验的实践经验，参考了相关规范内容，对本标准进行了制定。

为便于广大设计、施工、科研、管理等单位有关人员在使用本标准时能正确理解和执行条文规定，《水利水电工程钻孔微水试验规程》编制组按照章、节、条的顺序编制了本标准的条文说明，对条文规定的目的、依据以及执行中需要注意的有关事项进行了说明。但是，本条文说明不具标准正文同等的法律效力，仅供使用者作为理解和把握标准规定的参考。

目 次

1	总则	(34)
3	基本规定	(36)
4	仪器设备	(37)
5	现场试验	(39)
	5.1 现场准备	(39)
	5.2 仪器设备安装	(39)
	5.3 试验操作	(39)
6	试验资料整编	(41)
	6.2 渗透性参数计算	(41)

Contents

1	General provisions.....	(34)
3	Basic requirements.....	(36)
4	Instrument and equipment.....	(37)
5	Site test.....	(39)
5.1	Site preparation.....	(39)
5.2	Instrument and equipment installation.....	(39)
5.3	Test operation.....	(39)
6	Test data compilation.....	(41)
6.2	Calculation of permeability parameters.....	(41)

1 总 则

1.0.1 微水试验始于20世纪50年代，由Hvorslev首次提出了并对土体的渗透系数进行现场测定，同时构建了相应的数学模型用于求解。经过半个多世纪的发展，微水试验成为研究岩体渗透性的重要野外试验技术和方法之一，国外有专著论述微水试验的设计、实施和数据解释、分析。国内虽有研究，但一直缓慢，直到近年来随着计算机技术和自动监测技术的快速发展，用于数据采集的压力传感技术和信号处理技术已较为成熟，可以满足微水试验采样频率、数据精度以及采集自动化的要求，南水北调、滇中引水、引江补汉等多个工程开展微水试验进行渗透系数测定，微水试验与其他试验成果对比见表1、表2。

表1 滇中引水工程微水试验与注水试验成果对比表

序号	试段位置 (m)	常水头注水试验 $K(m/s)$	微水试验 $K(m/s)$
1	130-135	7.25×10^{-5}	1.98×10^{-6}
2	135-143	6.64×10^{-5}	1.83×10^{-6}
3	143-161	6.92×10^{-5}	2.20×10^{-5}
4	161-173	4.40×10^{-5}	1.50×10^{-5}
5	173-182	1.02×10^{-5}	5.23×10^{-6}
6	182-196	7.17×10^{-6}	5.89×10^{-5}
7	196-220	1.58×10^{-6}	8.29×10^{-6}

表2 滇中引水工程微水试验与压水试验成果对比表

序号	压水试验		微水试验渗透系数 (m/d)	
	试验段 (m)	渗透系数 (m/d)	Kipp模型	CBP模型
1	109.20-126.50	2.02×10^{-2}	2.22×10^{-2}	1.62×10^{-2}
2	126.50-176.90	7.19×10^{-2}		
3	190.80-210.60	2.10×10^{-2}	2.33×10^{-2}	1.91×10^{-2}
4	210.60-343.80	1.06×10^{-3}		

通过对比分析可知，无论是常水头注水试验结果还是压水试验结果，与对应微水试验结果在渗透量级上基本一致，微水试验结果普遍略低于注水试验或压水试验成果，分析原因尺度效应（影响范围）的影响，即微水试验是岩土体小范围渗透参数，压水试验在压力作用下将裂隙反复冲洗，反应的是一定范围内裂隙岩体渗透系数。

为了分析不同类型试验之间的差异，黄河勘测规划设计研究院有限公司建立了微水试验模型平台，开展了不同类型的微水试验、抽水试验和注水试验，通过对比不同试验方法求参结果分析了微水试验的可靠性，具体结果见表3。

表3 不同试验成果对比表

试验方法	渗透系数 (m/d)	
	区间	试验值
抽水试验	15.99~17.23	16.71
注水试验	13.5~15.70	14.75
微水试验	9.13~10.24	9.54

由表3可以看出，K值大小有如下关系，抽水试验>注水试验>微水试验，对应的试验平均值分别为16.71m/d、14.75m/d、9.54m/d。抽水试验和注水试验计算结果分别是微水试验的1.55倍和1.75倍。

目前国内开展了大量的微水试验研究，并在部分水利水电工程勘察中开展了应用，但缺乏统一的试验要求及技术标。本标准是在总结国内水利水电微水试验工作经验和美国相关微水试验标准的基础上制定，旨在统一水利水电工程钻孔微水试验工作程序、工作内容，明确技术要求和方法，提高成果质量，填补水利行业微水试验技术标准的空白。

1.0.2 微水试验是一种简便获取水文地质参数的野外试验方法，其实质是通过瞬时改变孔中的水位，使之快速上升或者下降一定高度，随后观测水位随时间的变化关系，进而计算渗透系数等水文地质参数。微水试验作为原位岩土体渗透性的一种试验方法，具有操作简便、试验周期短及对含水层扰动较低等优点，可与注水试验、压水试验和抽水试验互为补充，适用于水利水电工程地质勘察中孔内岩土层渗透性的测定工作。

3 基本规定

3.0.1 微水试验原理是通过一定激发手段（如振荡器、气压泵、瞬时抽水或注水等）使井孔内水位发生瞬时变化，通过观测和记录钻孔水位随时间的动态变化数据，并与相应理论数学模型的标准曲线拟合，进而计算试验孔附近的水文地质参数，其理论基础仍然是达西定律，将钻孔内的水体及其相邻含水层一定范围内的水体视为一个系统，因此微水试验适用于地下水位以下的岩土体。理论上，只要试验操作精度和试验仪器的灵敏度足够，微水试验可以适用于任何地层的水文地质参数测试，但受制于边界条件和试验进度，通过研究表明，微水试验方法适用于含水层渗透系数 $1.0 \times 10^{-6} \text{cm/s} \sim 2.6 \times 10^{-1} \text{cm/s}$ 的岩土层，尤以阻尼系数 ζ 介于0.2到5.0之间的系统最为合适。

3.0.3 激发水头的方式主要有振荡器式、气压式、注水或抽水式等，具体如下：

振荡器式是通过沉入或者从孔内水位以下提出一定体积的重物，是实际工作中较为常用的一种激发方式，其沉入过程（升水头过程）类似于注水式微水试验，待其水位恢复后，提出过程（降水头过程）类似于提水式微水试验，所不同的是，由于重物（或称振荡器）的体积是一定的，其激发的水头上升或者下降的幅度也是一定的，只能通过更换不同体积的重物（或称振荡器）来改变激发强度。这种激发方式的优点是不需要用水、用电，可以很容易地实现水位瞬间上升、水位瞬间下降的两种类型的微水试验，并且可以将两种类型的试验进行对比分析，以相互验证试验结果。缺点：由于振荡器体积有限，在渗透系数较大的地层水头激发高度不够，只能代表周边小范围岩土体的渗透性。

气压式微水试验是通过对钻孔孔口进行密封，通过气泵向孔内加压，利用气压使孔内地下水位下降一定幅度，然后打开孔口排气阀门瞬间释放孔内压力，观测水位恢复过程曲线求取水文地质参数的一种微水试验。由于靠气压改变孔内水位，这种方法激发的水位变化值有限，一般在数厘米到数十厘米不等。优点：当正确使用本方法时，相对于其他激发方式而言，可以得到最高质量的数据，而且可测量其他激发方式不能测试的极高K值的地层。缺点：需要较多设备激发水头，而且对设备的密封要求较高。在低渗透性地层中，加压阶段耗时通常为激发测试耗时的2倍，而且需要进行渗漏测试。

注水式微水试验是快速向井、孔内注入一定体积的水，以达到使孔内的地下水位瞬间上升的目的，然后观测地下水位的恢复曲线，激发的强度基本可根据实际情况由人为注入的水量大小控制。激发方式优点：能够使用少的试验仪器快速地激发水头。缺点：容易产生水花飞溅，不能得到较高质量的试验数据。

抽水式微水试验是通过抽水设备从孔内在极短时间内抽取出一定体积的水，以达到孔内水位快速下降的目的，也称为快速抽水试验法。这种方法的激发强度主要靠抽水设备功率大小和抽水时间长短来确定。该激发方式优点：能够使用较少的试验仪器快速地激发水头，而且能得到较高质量的试验数据。缺点：当地下水位埋深较大时，无法有效地从钻孔中抽取一定量的水来激发试验。

3.0.4 钻进松散、掉块、裂隙地层或胶结较差的地层时，宜选用不用性能的优质泥浆、植物胶或聚丙烯酰胺作冲洗液；钻进片岩、千枚岩、页岩、黏土岩等遇水膨胀地层时，宜选用钙处理泥浆或不分散低固相泥浆；钻进可溶性盐类地层时，应选用与该地层可溶性盐类相应的饱和盐水泥浆；钻进高压含水层或极易坍塌的岩层时，应选用密度大、失水量少的泥浆。

3.0.7 试验激发水头一般按岩土体渗透性强弱控制在0.5m~2.0m，各类渗透性介质中在满足激发时间的前提下尽量采用较大的激发水头。微水试验计算模型是根据瞬时水头变化模型计算，试验时间一般控制在1min左右，水头过低激发水位很快就恢复，水头过高，水位恢复时间过长，不符合参数计算模型，根据试验模型和工程经验，弱微透水性岩土体水位恢复较慢，激发水头一般控制在0.5m~1.0m可以满足要求，中、强透水性岩土体，水位恢复快，激发水头越高越好，但中、强透水性岩土体需求激发能量大，选择1.0~1.5m较为合适。渗透性等级分类标准参照《水利水电工程地质勘察规范（GB50487）-2008》附录F岩土体渗透性分级。微水试验过程中如果将水位降到钻孔试验段过滤器上端以下，含水层中就会出现非饱和带，不满足该方法的设定条件。

4 仪器设备

4.0.1 通过在钻孔中激发水头变化，实时测量水头随时间的变化过程，利用地下水动力学原理，计算得到含水层的渗透系数。微水试验测试系统的主要特点包括下列内容：

(1) 注水式微水试验通过向钻孔中瞬时注入一定体积的水来开展试验，注水操作可采用量筒和水泵进行，在条件适宜的情况下宜采用量筒进行。使用量筒可以通过控制注水量来调节钻孔中激发水头的高度。

(2) 测试数据记录主机取样频率宜达到 1Hz、2Hz、5Hz、10Hz，以满足低渗透性地层 (1.0×10^{-6} cm/s) 和高渗透性地层 (2.6×10^{-1} cm/s) 的测量需要。

(3) 实现现场测试、现场处理数据、相应软件计算得到渗透系数。将获取测试数据的软件（数据采集软件）安装在笔记本电脑上，可在现场完成测试、记录和处理数据。

(4) 传感器系统除了压力传感器外，可集成温度传感器，实现一机多用的目的，电缆线宜采用耐拉电缆。

(5) 充足的后备电源在不方便取得 AC220V 的情况下仍能完成试验。

(6) 仪器体积小、重量轻（15kg），便于携带。测试仪器可以存于手提箱。

(7) 在一个采样周期内传感器高精度测量钻孔内水位变化、水温等参数，水位测量精度至少为毫米级。

(8) 测量数据可通过 U 盘读写和删除。

4.0.2 主要对水头激发设备的规格进行了规定。

3 气压激发系统主要由气泵、各种转接口、压力表及钻孔口密封装置等组成。在正常情况下气泵选择的基本要求是气泵压力在 6kg~8kg，储气量尽量的大。转接口根据测量要求以及进出气管道的相关参数设置，压力表根据现场试验所需压力的大小选择。

4 振荡式水头激发设备宜采用长圆柱体，直径宜为钻孔直径的 0.5~0.8 倍，钻孔直径大于 200mm 时可小于 0.5 倍，长度应依据设计激发水头高度、激发设备重量等进行换算，并留存适当余量。振荡式水头激发设备顶部结构应有连接绳索或杆的构件，激发设备采用实心柱体时，材质比重应大于 1，其结构宜符合图 1 的规定。激发设备采用空心柱体时，注满水或其他重物后的综合重力应大于浮力，其结构宜符合图 2 的规定。

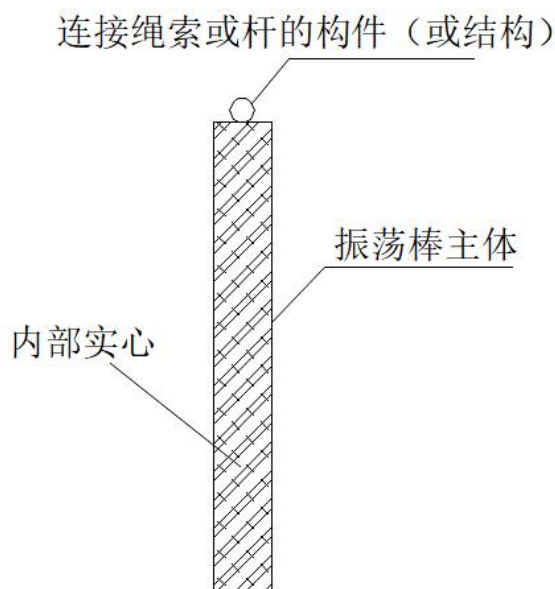


图1 实心振荡式水头激发设备结构示意图

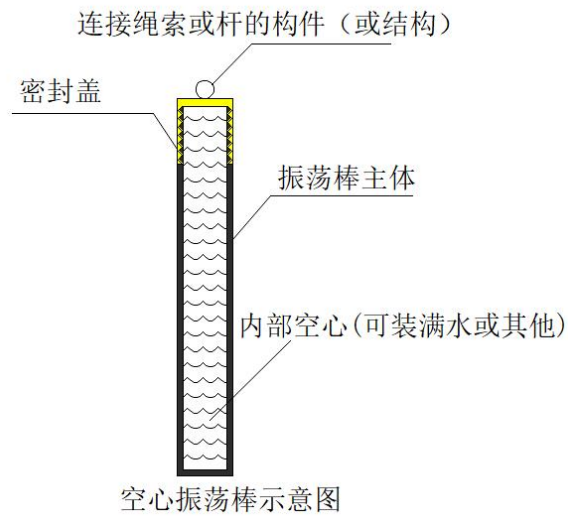


图2 空心震荡式水头激发设备结构示意图

4.0.3 传感器系统采用了高性能的硅压阻式压力充油芯体作压力敏感核心，接入专用集成电路将传感器毫伏信号转换成标准电压、电流或频率信号，并可以直接与计算机接口卡、控制仪表、智能仪表或 PLC 等相连，是扩散硅精密机械加工、温度补偿、模拟信号处理技术的结晶。主体工艺材料先进，密封固化与外部完全隔离，能满足防潮、防水、防爆、防腐、防尘等恶劣工况要求。

5 现场试验

5.1 现场准备

- 5.1.1 为减少岩粉堵塞，影响试验成果精度，进行微水试验前应对试验钻孔进行洗孔，反复冲洗至满足规程要求。钻进时严禁使用泥浆、植物胶等护壁材料。
- 5.1.2 本条规定了应根据现场条件与试验内容对试验仪器进行检查与调试，确保设备运行正常，防止试验数据失真，影响试验工作的顺利进行。
- 5.1.3 本条规定了试验前应记录的场地初始信息，并分类整理，必要时可进行多次量测以保证数据的精确性。记录格式应满足本规程第 6.1 节的规定。
- 5.1.4 对于振荡器式、注水式或抽水式微水试验，试验前应根据钻孔直径计算相关水头激发装置规格并进行测试，测试结果宜满足本规程第 3.0.7 和 3.0.8 条的规定。
- 5.1.5 为满足本规程第 3.0.7 和 3.0.8 条试验激发水头和过程时间的要求，试验前应根据钻孔直径对振荡器式、注水式或抽水式微水试验的设备尺寸及抽水能力进行计算，并进行现场测试，以保证试验成果的有效性。
- 5.1.6 本条规定了微水试验的记录表格形式，要求数据记录完整详细，避免遗漏。

5.2 仪器设备安装

- 5.2.1 本条规定了钻孔过滤器的安装要求，应根据地层特征选择相应的过滤器类型。
- 5.2.2 止水栓塞的安设位置应准确，对于不同岩体介质应依据钻孔资料确定相对完整的试验段位置。目前国内常用的止水栓塞类型主要有顶压式、气压式和水压式等，顶压式栓塞优点是使用简便，缺点是栓塞长度较短，孔壁岩体较破碎时止水效果差，而气压式和水压式栓塞与孔壁结合紧密，止水效果良好，本规程建议采用。
- 5.2.3 气压式的微水试验要求密封性好，若有漏气产生，可能对试验产生一定的影响，从而影响试验结果的准确性。若压力表的读数不稳定，则必须重新进行设备安装与检测。
- 5.2.4 为减少水的阻力与冲击振荡影响，振荡器式微水试验仪器制作应符合本条规定。一般情况下钻孔直径较小，为了避免相互干扰，压力传感器的布置应尽量贴近管壁，必要时采用有效的保护装置布设。
- 5.2.5 本条规定是为了满足短时间内向钻孔内注水，并形成有效激发水头的要求，而对于压力传感器的要求同 5.2.4 条。
- 5.2.6 抽水式微水试验在关闭水泵的同时，管内回水易导致试验水位发生不均匀振荡，影响试验结果，因此本规程建议在水泵处设置必要的止回措施。
- 5.2.7 为保证压力传感器的正常工作以及减少扰动影响，试验准备阶段应计算最低振荡水位，并设置压力传感器始终位于最低振荡水位以下不小于 1m 的位置。

5.3 试验操作

- 5.3.1 本条强调了振荡器式微水试验水头激发高度、激发时间以及设备操作的要求，以及结束试验的标准。
- 5.3.2 本条强调了气压式微水试验水头激发高度以及气压表读数稳定的要求，以及结束试验的标准。
- 5.3.3 本条强调了注水式微水试验水头激发高度、激发时间以及设备操作的要求，以及结束试验的标准。
- 5.3.4 本条强调了抽水式微水试验水头激发高度、激发时间以及设备操作的要求，以及结束试验的标准。
- 5.3.5 监测实测曲线与图3～图5所示近似一致可认定完成一次微水试验。

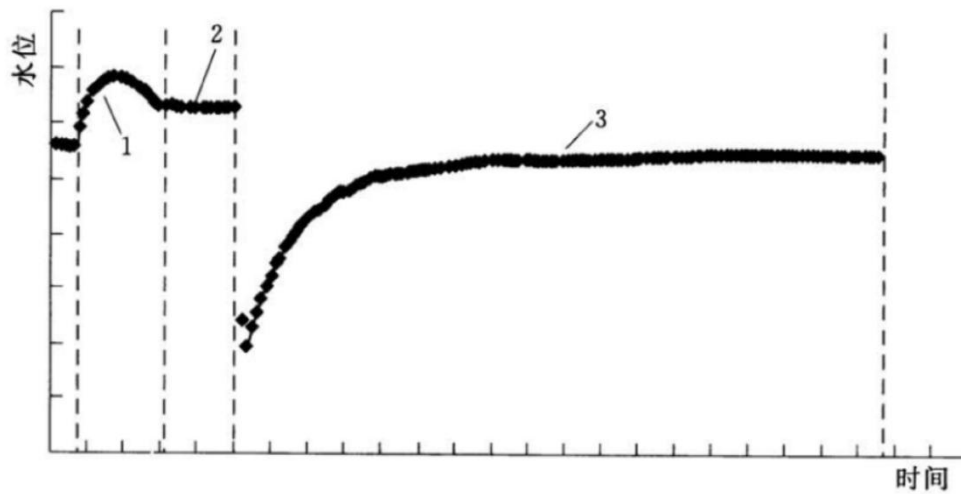


图3 气压式微水试验实测曲线
1-加压段水位；2-近似稳定段水位；3-震荡段水位

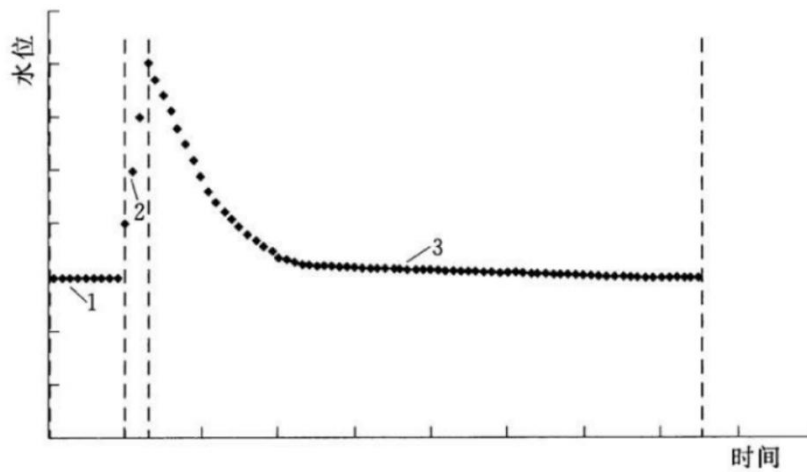


图4 注水（放入振荡器）式微水试验实测曲线
1-初始水位；2-瞬时注水或放入震荡器时水位；3-震荡段水位

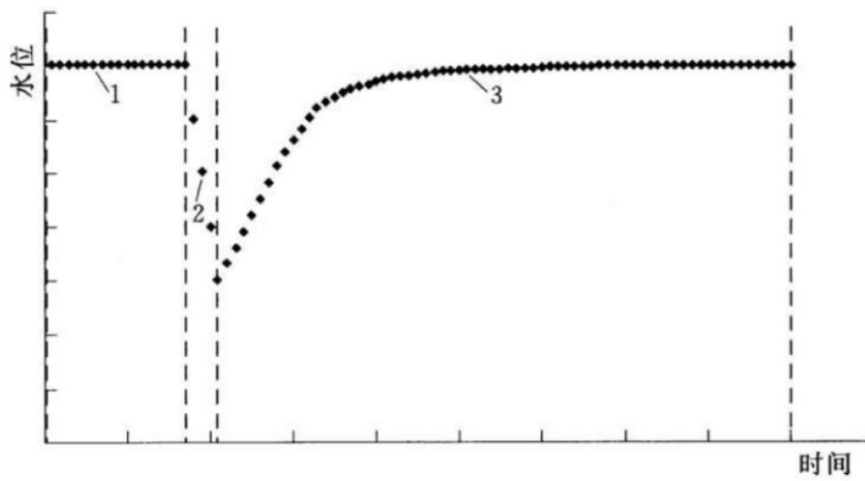


图5 抽水（提出振荡器）式微水试验实测曲线
1-初始水位；2-瞬时注水或提出震荡器时水位；3-震荡段水位

6 试验资料整编

6.2 渗透性参数计算

6.2.1 基本原理

(1) 假设:

- a) 承压含水层等厚, 含水层顶、底板隔水;
- b) 含水层均质、各向同性;
- c) 柱坐标系的原点取为含水层顶面与井孔轴线的交点;
- d) 试验井为完整井;
- e) 井孔100%有效, 即表面因素 f 及其无量纲形式 σ 均为0。

(2) 振荡器式微水试验过程中, 假设:

- a) 通过同一井断面的平均速度近似不变;
- b) 水头的摩擦损耗忽略不计;
- c) 整个含水层系统的水流为均匀流;
- d) 井孔中水流由径向流变为垂直流时, 速度变化所引起的动量变化忽略不计。

(3) 柱坐标系下含水层中水流运动方程

水流运动方程见式(1):

$$\frac{S}{T} \frac{dh}{dt} = \frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left(r \frac{dh}{dr} \right) \dots\dots\dots (1)$$

初始条件为 $t = 0$ 时, $h = h_0$;

边界条件是 $r \rightarrow \infty$, $h \rightarrow h_0$ 。

考虑表面因子的花管边界条件方程见式(2)

$$h_s = \left(h - f \frac{\partial h}{\partial r} \right) \bigg|_{r=r_s} \dots\dots\dots (2)$$

式中:

f —— 表面因子;

h_s —— 钻孔内套管与花管交界处的水头。

根据水量平衡原理, 由振荡引起的井筒内流量变化等于井壁周边含水层的径向流量见式(3):

$$\pi r_c^2 \frac{dw}{dt} = 2\pi r_s T \frac{dh}{dr} \bigg|_{r=r_s} \dots\dots\dots (3)$$

对应的初始条件为: $t = 0$, $w = w_0$ 。

根据能量守恒原理, Bird等得到, 见式(4):

$$\frac{d}{dt} \int_{-b}^0 \pi r_s^2 \rho v dz = (-\rho v_2^2 + p_1 - p_2 - \rho g b) \pi r_s^2 \dots\dots\dots (4)$$

动量的积分项由该区间的质量守恒方程确定见式(A. 4):

$$\frac{dM}{dt} = 0 = \left[-\rho v_2 + \frac{2\rho b q}{r_s} \right] \pi r_s^2 \dots\dots\dots (5)$$

式中:

M —— 该区域的总体质量,

q —— 花管中单位面积上的流量。

该区域内的从 z 到 $z + \Delta z$ 微分单元体质量平衡微分方程, 式(6):

$$\frac{dm}{dt} = 0 = \left[\rho v_z - \rho v_{z+\Delta z} + \frac{\rho 2 \Delta z q}{r_s} \right] \pi r_s^2 \dots\dots\dots (6)$$

Δz 趋近于零时, 得到 $v(z)$ 的微分方程, 式(7):

$$\frac{dv}{dz} = \frac{2q}{r_s} \dots\dots\dots (7)$$

积分并代入边界条件, 式(8):

$$z = -b, \quad v = 0 \dots\dots\dots (8)$$

得到式(9):

$$v(z) = \left(\frac{2q}{r_s} \right) (b + z) \dots\dots\dots (9)$$

联立(4)、(5)和(9)得到, 式(10):

$$\frac{d(\rho v_z b / 2)}{dt} = -\rho v_z^2 + p_1 - p_2 - \rho g b \dots\dots\dots (10)$$

以井水位变化量 w 表达的井水运动微分方程式(11):

$$\frac{d^2 w}{dt^2} + \left(\frac{g}{L_e} \right) w = \frac{(h_s - h_0)}{L_e} g \dots\dots\dots (11)$$

式中:

M ——初始含水层厚度。

对应:

$$t = 0, w = w_0 \dots\dots\dots (12)$$

$$dw/dt = w_0^* \dots\dots\dots (13)$$

$$h_s = L = h_0 \dots\dots\dots (14)$$

Kipp引入无量纲的参变量, 将上述方程转换为无量纲形式, 结合式(1)、式(2)和式(3)用拉普拉斯变换解方程。最后用拉普拉斯逆变换法则转换方程的解。

无量纲的水位变化量:

$$w' = -w/w_0 \dots\dots\dots (15)$$

无量纲时间:

$$t' = (tT)/(r_s^2 S) \dots\dots\dots (16)$$

和

$$\hat{t} = t'/\beta^{1/2} \dots\dots\dots (17)$$

无量纲贮水系数:

$$\alpha = (r_c^2)/(2r_s^2 S) \dots\dots\dots (18)$$

无量纲惯性系数:

$$\beta = (L_e/g)(T/(r_s^2 S))^2 \dots\dots\dots (19)$$

无量纲表面因子:

$$\sigma = f/r_s \dots\dots\dots (20)$$

无量纲频率系数:

$$\omega = \frac{\left[-\alpha^2 \left(\sigma + \frac{1}{4} \ln \beta \right)^2 + 4\beta \right]^{1/2}}{2\beta} \dots\dots\dots (21)$$

无量纲衰减系数:

$$\gamma = \frac{\alpha\left(\sigma + \frac{1}{4}\ln\beta\right)}{2\beta} \dots\dots\dots (22)$$

无量纲阻尼系数:

$$\zeta = \frac{\alpha\left(\sigma + \frac{1}{4}\ln\beta\right)}{2\beta^{\frac{1}{2}}} \dots\dots\dots (23)$$

无量纲阻尼系数 ζ 小于1时, 系统欠阻尼; ζ 大于1时, 系统是过阻尼反应。 ζ 等于1时, 系统为临界阻尼, 此时惯性效应最为重要。

ζ 大于5时, 惯性的影响可忽略, 宜采用狭义微水试验的基本原理进行参数计算。

ζ 小于0.2时, van der Kamp的近似解是有效的。

介于欠阻尼和过阻尼反应的区域, 在使用本方法进行测试时, 适用Kipp的解法, 这时 ζ 介于0.2~5.0之间。