

石油大学出版社

尹宏锦 编著

SHIYONG
YANSHIKE
ZUANXING

实用岩石
可钻性



137

实用岩石可钻性

尹宏锦 编著

2024/12

石油大学出版社

前 言

传统的岩石可钻性方法，视岩石为均质体，与钻遇地层的非均质情况不符，限制了其实用性。作者针对油气井深度大的特点，还原大段地层为非均质体的本来面貌，运用概率统计理论转化为宏观均质体，形成统计地层可钻性方法，为岩石可钻性的实用性开拓一个新领域。提出的实用三原理：宏观原理、等概原理、相关原理，在于科学地阐明统计地层可钻性的实用性，是这本名为《实用岩石可钻性》著作的中心内容。

本书共分八章。第一、二章介绍传统的岩石可钻性方法，分析其实用难点。它对以后各章起着承前启后和继往开来的作用。第三章介绍引入数理统计理论评价非均质地层宏观性质的方法，主要论点是把非均质地层分解成无数个点，每次抽取若干点进行试验和统计分析，以推断总体的宏观性质。这个新方法为以后四章的应用技术奠定了理论基础。第四至第七章分别介绍利用地层和钻头之间的等概关系选择钻头类型，并推导出钻速预测方程；地层可钻性预测技术及检测技术；地层可钻性各向异性的获取方法及其在井斜控制和井眼轨迹控制上的应用。第八章介绍各种应用课题的试验技术。为方便使用，还系统地介绍误差基本概念和回归分析方法，并附录常用的数理统计用表。

根据新方法的需要，引入了数理统计方法。但由于地层的复杂性和不均匀性，本书着重正态分布，尤其是变换后的正态分布的应用，把数据的巨大分散性纳入标准差的组成部分，并由此而产生地层可钻性的数量信息。一般参考书只讨论测量仪器或工具引起的标准差，很少讨论被测对象的波动性引起的标准差问题，但这类问题却为本书的主要内容。由于这两种标准差不能分别反

映到测量结果中，只能合并起来计算标准差，并称为地层可钻性的波动范围。

本书依据“可拓集合”理论立论。均质地层“集合”的微体只有一类 $\{X\}$ ，因此地层整体性质 a 就是微体性质 X ，集合未变；非均质地层“集合”的微体有无数个 $\{X_i\}$ ，按照集合理论，每个微体的集合不是整体地层的集合，因此不能得到整体性质 a ，必须用已测微体的平均值 $\bar{X}$ 集合，“拓”到整体集合中去，即 $E(\bar{X})=a$ ，这样便解决了求整体地层性质 a 的问题。

本书用作教材时，第一至第七章为课堂理论教学内容，第八章为实验教学内容。为大学本科生开选修课时，理论教学和实验教学共约40学时，比例为3:1；为硕士研究生开必选课时，以自学方式为主；为现场技术人员开培训班时，则需加强实验和计算练习。

实用岩石可钻性的素材，取自1976年以来的科学研究成果，而大量的现场测定和验证资料则取自1982~1985年期间在现场完成的科研项目的成果。除作者亲自参加全部研究工作，石油大学开发系钻井教研室阎懿华高级实验师完成了全部数据的测定和整理工作。此外，现场工程师和历届研究生、毕业生也参加了本课题的具体研究工作。作者向他们表示感谢。

由于时间仓促，作者水平所限，欠妥之处与错误在所难免，请读者指正。

作 者

1988年11月于石油大学

目 录

第一章 绪论	(1)
第一节 岩石可钻性概念及表示方法	(1)
第二节 传统方法	(8)
第二章 微钻头可钻性	(20)
第一节 微钻头可钻性的特点和表示方法	(20)
第二节 微钻头作用原理	(23)
第三节 试验装置	(26)
第四节 试验结果和试验精度	(30)
第三章 地层可钻性统计分析	(49)
第一节 地层可钻性的宏观性质	(49)
第二节 微可钻性的统计分析	(57)
第三节 地层可钻性统计分级法	(63)
第四节 地层可钻性总体性质推断	(67)
第四章 钻头选型	(78)
第一节 选择钻头方法	(78)
第二节 等概关系	(85)
第三节 地层数量信息应用	(89)
第四节 最可成本法	(92)
第五章 地层可钻性预测技术	(102)
第一节 地层压实理论及可钻性预测概念	(102)
第二节 地层可钻性随井深变化的经验式	(109)
第三节 预测地层可钻性	(124)
第四节 我国各油田地层可钻性随井深变化的经验式	(129)

第六章	地层可钻性检测技术及钻速预测	(133)
第一节	钻速模式分析	(133)
第二节	ROLLOW钻速模型	(138)
第三节	等概钻速方程	(141)
第四节	检测地层可钻性级值	(153)
第五节	等概钻速方程的其它应用	(156)
第七章	地层可钻性各向异性	(164)
第一节	地层各向异性在钻井中的表现	(164)
第二节	地层各向异性试验	(166)
第三节	试验结果分析	(167)
第四节	地层可钻性变化规律及地层各向异性种类 ...	(172)
第五节	地层可钻性变化规律的应用	(177)
第六节	地层各向异性指数	(180)
第七节	广义地层可钻性及其各向异性	(181)
第八节	广义地层各向异性指数	(184)
第九节	广义各向异性指数 H'	(185)
第十节	钻井各向异性指数 h	(189)
第十一节	非线性位移	(191)
第八章	实验指示书	(196)
参考文献		(208)
附录	统计分析数表	(210)
后记		(218)

第一章 绪 论

第一节 岩石可钻性概念及表示方法

岩石可钻性的概念是在生产实践中形成的,用以说明破碎岩石的工具与岩石之间的关系。现代的岩石可钻性概念有以下几种提法:① 所谓岩石的可钻性,是指在一定技术条件下钻进岩石的难易程度①;② 可钻性可理解为钻井过程中岩石抗破碎强度(阻力)的程度,它表征岩石破碎的难易程度②;③ 岩石坚固性在钻孔方面的表现,称可钻性③。

上面几种提法都包含了三层意思:① 钻碎的对象;② 使用的工具;③ 钻碎的难易性。钻碎的对象是岩石。石油钻井中所遇到的对象绝大部分是沉积岩,一般称为地层,所以石油钻井界常用地层可钻性一词。使用的工具主要指旋转钻井(或冲击钻井)的钻头,属于机械法钻碎的范围。若辅以其它方法钻碎岩石,则应指出其特点,如水力可钻性等。因此,使用的工具实质上包含了方法、工具、技术条件等内容。至于钻碎的难易性,则表明钻头的钻碎岩石的综合结果,它常常是可钻性概念的核心,也是可钻性概念的定性表示方法。定性表示法常用的术语有易钻(好钻)、难钻或者软、硬,包含的范围较大。在生产实际中,常采用数量指标表示可钻性概念,如钻时(分/米)、钻速(米/时)等;并用数量的大小划分好钻、难钻或软、硬的可钻性范围,如钻速小于1米每小时为硬地层。在科学实验中,常常根据所用方法的观测结果

① 见成都地质学院编《钻探工程》第一章,1974年。

② 见中南矿冶学院编《岩芯钻探学》第一章,1975年。

③ 见东北工学院爆破研究室1979年研究报告。

表达岩石可钻性这一概念，如用硬度的倒数表示可钻性的大小。

我国是世界上钻井技术发展历史悠久的国家。近代又采用了先进的钻井技术，岩石可钻性涉及的内容既广泛又久远。

据《华阳国志》记载，公元前250年，“……李冰……”就在四川“……穿广都盐井……”从事凿井取盐，开发地下矿藏。从那时起，开创了我国的钻井史。历两千余年而不衰。宋代《东坡志林》(1037~1101年)中有关于钻岩工具的记载，“用环刀，凿如碗大”，这是当时使用的一种钻头。明代《蜀中广记》一书中记载了改进的钻头“钎”，“大窍大钎主之，小窍小钎主之，钎一也。大钎则有钎头，扁径七寸，有轮锋利，……下尽全竹，乃截去大钎头，用钎销凿小窍”。这与现代顿钻所用钻头已相当接近，而且随着井身结构(当时称卓筒)而变换钻头尺寸。清《自流井记》一书(1865年)的记载有以下几个方面：① 钻头尺寸规范：“石白以下同大锉，曰鱼尾锉，长丈二尺，重二百斤，木柱以下用小锉，曰银锭锉，长九尺，重百斤”。② 钻头载荷：“凡凿及百丈以下者锉力愈重，不敢用大锉、惧竹箴断也”。③ 标准层位：“凡凿井须审地中之言，井锉初下为红岩，……凡井诸岩不备见，惟黄薑(今东岳庙石灰岩)，绿豆(今三迭系绿豆岩层)必有之”。④ 坚硬地层的可钻性：“间有遇绵岩者，凿最艰，绵岩一丈可凿一年”。⑤ 几类地层的可钻性：“凿井，日可尺余，或七、八寸，或四、五寸，或者数日不及寸”。这同现代用生产指标划分岩石软硬的方法是一致的。⑥ 钻完一口井的宏观可钻性：“凿及鹹水，谓之见功。常程可达四、五年。有数十年更数姓而见功者”。

从古代文献的记载中可以看出，可钻性概念是在生产实践中形成的。古代钻井技术经过长时期的发展，已经相当完备。钻井方法是属于现代钻井的顿钻方法，除动力设备及工具的类型、材料不同以外，工艺过程和技术内容却是一致的。即使钻井技术已从顿钻发展成为现代化的旋转钻，也还是这样。至于涉及

到钻碎岩石的综合性质(包括岩石, 钻具, 钻井方法及技术水平等因素)的可钻性概念, 尽管古籍上没有“可钻性”这个词汇, 然所指则与今类同。

本世纪初, 旋转钻井逐渐代替了顿钻。顿钻是冲击破碎岩石, 岩屑单独排除, 破岩的有效时间短、钻井效率低。旋转钻井是利用冲、压、切等多种力量破碎岩石, 且同时排除岩屑, 钻井效率大为提高。随着科学技术的进步, 出现了许多新的钻井设备和工具, 这时需要对岩石可钻性作出量的评价, 以适应日益增多的钻井工具的需要。人们起初想到的, 是借用现有的成果评价可钻性, 如用硬度和韧性衡量岩石可钻性^[1]。1926年哈利以切削单位体积岩石所需输入能量表示硬度, 提出了岩石的12种硬度分类^[1]。1927年吉斯和戴维斯探讨了岩石的“莫氏”硬度分类。B.F.太森在评论吉斯和戴维斯的文章中, 第一个提出了“可钻性”这个术语。加德纳的评论指出, 硬度、韧性和实际钻速之间没有一定的关系式, 并进一步指出: “测定钻速的唯一可靠的方法, 只能是实际钻孔实验^[1]”。

从此以后, “可钻性”便成为钻井界专用的一个术语, 以区别于其它性质。

五十年代以来, 石油行业相继出现了“可钻性”的数量表示法。

苏联史立涅尔教授提出了以平底压模在岩芯平面上压出第一次破碎坑时的单位载荷 p 表示之, 单位为牛顿每平方毫米。认为硬度 p 的倒数 $1/p$ 就是岩石可钻性^[2]。

1951年, 美国赫德(HEAD)提出了“地层可钻性分类数DCN”(Drillability Classification Number), 其数值是用微钻头以钻压1855牛(417磅)、转速110转/分在岩芯上钻一深为1.6毫米(1/16英寸)的孔所需时间(秒)表示。DCN值的范围从软灰岩的1.9秒到石英岩的555.7秒^[3]。

1962年, 洛罗(ROLLOW)^[4]用直径31.75毫米(1.25英寸)的

微钻头在岩芯上钻孔, 钻压889.7牛(200磅), 转速55转/分, 取钻深2.38毫米(3/32英寸)的钻孔时间, 并换成微钻速, 米/时(英尺/时)表示可钻性, 称为微钻头可钻性。通过微钻速预测现场钻速。微钻速的范围从1.2米/时(4英尺/时)到0.0006米/时(0.002英尺/时)。

1956年, 西蒙(SIMON)利用一个下砸试验器研究岩石破碎坑的形成, 并提出下列方程, 用来估计冲击钻钻速^[1]

$$V = 3.6576(P - P_i)/D^2 S \quad (1-1)$$

式中 V ——钻速, 米/时(英寸/分);

P ——破碎岩石的机械功, 焦耳(英寸·磅/分);

P_i ——初始破碎功, 焦耳(英寸·磅/分);

D ——井眼直径, 米(英寸);

S ——抗钻强度, 帕(磅/英寸²)。

式中常数换成英制单位时(括号中的单位)等于2.4。西蒙建议把(1-1)式中的 $1/S$ 叫做岩石的可钻性。抗钻强度 S 可以认为是一个具有90°夹角的凿刃钻头在冲击作用下形成破碎坑时, 其凿刃单位长度上的能量与破碎坑的横截面积之比。抗钻强度一词, 在以后的研究工作中曾多次被石油钻井界采用。

1959年, 萨麦顿(SOMERTON)用双牙轮微钻头在室内几种岩样上所做的试验, 结果得出以下钻速方程^[5]

$$V = CDN(W/D^2 S)^2 \quad (1-2)$$

式中 V ——钻速, 米/时(英寸/分);

D ——钻头直径, 米(英寸);

N ——钻头转速, 转/分;

W ——钻压, 牛(磅);

C ——常数;

S ——抗钻强度, 帕(磅/英寸²)。 S 的大小为岩样抗压强度的改造值。

1962年, 莫勒(MAURER)在推导井底完全干净条件下的钻

速公式时也引入了抗钻强度, 其钻速公式为^[6]

$$V = KNW^2/D^2S^2 \quad (1-3)$$

式中 V ——钻速, 米/时(英尺/时);

K ——常数;

S ——抗钻强度, 帕(磅/英寸²)。抗钻强度 S 是表示地层性质的一个常数。其余符号 N 、 W 、 D 的意义和单位同(1-2)式。

1978年, 孔宁汉(CUNNINGHAM)对全尺寸台架钻孔试验结果中的岩样抗压强度加以改造, 引入抗钻强度 S 后得如下钻速公式^[7]

$$V = NW^a/0.0147S^{0.579} \quad (1-4)$$

$$a = 0.178254 \ln S + 1.442102 \quad (1-5)$$

式中 V 、 N 的意义和单位与(1-2)式相同;

W ——钻压, 千牛/米(千磅/英寸);

a ——常数;

S ——抗钻强度, 兆帕(千磅/英寸²)。

以上引入关于抗钻强度的例子是为了将岩石可钻性纳入钻速方程中, 以备实际应用。

1965年, 富尔登(FULLERTON)提出了常能量钻井方程^[8]

$$V = KWN \quad (1-6)$$

式中 V 、 W 、 N 的意义和单位与(1-4)式相同;

K ——常数, 富尔登称之为“相对地层可钻性系数”或“视地层可钻性”。 K 值通常在 $(0.53 \sim 5.3) \times 10^{-5}$ (换算成英制单位为 $3 \times 10^{-5} \sim 30 \times 10^{-5}$)的范围内。

1977年, 艾伦(ALEN)的文章^[9]对常能量方程加以改造, 以应用于硬地层中。即

$$V = KW^{1.2}N^{0.5} \quad (1-7)$$

应用时视可钻性 K 还要进行压差校正。即

$$\lg K_2 = 0.01434(P_1 - P_2) + \lg K_1 \quad (1-8)$$

式中 K_2 ——静液柱压力为 P_2 时的视可钻性;
 K_1 ——静液柱压力为 P_1 时的视可钻性;
 P_1 、 P_2 ——液柱压力, 千帕。

1964年, 宾汉(BINGHAM)在研究地层可钻性时采用以下钻速公式^[10]

$$V = KW^dN \quad (1-9)$$

式中符号同前。除钻压 W 和转速 N 的指数不同外, (1-9)式同(1-7)式是同一类型, 但宾汉采用千磅每英尺表示地层的可钻性。这是因为宾汉采用 V/N 、 W/D 的坐标做图, 而以斜直线的截距(千磅/英尺)表示钻速关系式的缘故, 截距便是地层的特性。由于实际应用的需要, 地层可钻性尚有许多表示方法。如, 抗压强度, 纵波速度, 地震波速, d 指数, 地质时代, 压痕指数, 实际钻速指标, 杨氏钻速方程的地层可钻性系数等几十种。这说明了地层的复杂性和地层可钻性的综合性。下面将主要的表示方法按时间次序列于表1-1。

从表示方法可以归纳出地层可钻性研究和发展趋势。

首先使用了现成的硬度表示地层性质, 逐渐孕育着“可钻性”的概念, 并提出“地层可钻性”术语, 直接刻划地层性质。经过从定性到定量的发展, 开展了可钻性的测定方法的研究以取得数量的指标。测试方法首先取自其它的部门, 如各种硬度, 强度等。随着实际应用的需要, 测试方法也在不断改变, 使之同钻井实际结合更紧密。如史氏硬度^[2]模拟单齿压入, 捣碎法 f 值^[4]模拟冲击, 微钻头模拟实钻, 甚至用全尺寸台架试验, 直至井下实际试验等。定量表示从物理力学性质直到实际中直接应用的各种常数、系数。这种变化趋势同钻井技术的发展有直接关系。旋转钻井初期, 主要以吸收成熟技术为主, 到了科学化钻井时期(大约从五十年代开始), 则以直接反映钻井实际情况为主, 研究可钻性的测定与应用的方法。七十年代出现了应用现代化工具电子计算机的局面, 可钻性的研究工作有直接将地层性质纳入钻速

表1-1 可钻性一览表

序号	年 份	国 别	提 出 人	方法名或表示法
1	1822	德	МОН	矿物硬度标
2	1906	美	SHORE	回跳硬度计
3	1907	俄	ПРОТОДЬЯКОНОВ	普氏系数 f
4	1922	日	本 多	刚度
5	1930	苏联	СУХАРОВ	凿眼速度, 毫米/分
6	1939	苏联	ЭПШТЕЙН	极限强度
7	1950	苏联	ШРЕЙНЕР	压模硬度, 公斤/毫米 ²
8	1952	苏联	ПРОТОДЬЯКОНОВ	捣碎法, $f=20n/l$
9	1952	美	HEAD	可钻性分类数, 秒
10	1954	中	地质部	生产定额
11	1956	美	GOODRICH	J 值, 毫米/分
12	1956	美	SIMON	抗钻强度, S
13	1959	美	HARTMAN	英尺/分
14	1959	美	SOMERTON	抗钻强度, S
15	1961	美	ROLLOW	微钻速, 英尺/时
16	1961	美	PAONE	钻速公式
17	1962	美	MAURER	抗钻强度, S
18	1964	美	BINGHAM	工作线截距, 千磅/英尺
19	1965	美	FULLERTON	常能量方程, 视可钻性系数
20	1968	美	MORRIS	压痕指标 P/E , 英寸/磅
21	1969	美	PAONE	冲击钻井钻速式
22	1969	美	WHITE	可钻性指数, 100分钟/英尺
23	1975	德	格尔德库纳特	厘米/分
24	1978	美	CUNNINGHAM	抗钻强度, S
25	1979	中	东北工学院	凿碎比功, 公斤·米/厘米 ³

方程的趋势, 这一时期出现了抗钻强度等与可钻性有关的新概念。直到目前, 这一趋势尚在向前发展。从研究的观点考察, 可将岩石可钻性研究分为两种方法: 一是传统方法, 这种方法假设地层或研究对象是均质的; 另外一种是采用数理统计方法或其它

方法将地层或研究对象看成是非均质的。传统方法比较成熟，其它方法则尚处于发展阶段。传统方法虽然各有不同，但格式趋于统一。一般包括取样测定，分级，应用于选取工具及管理生产等。

第二节 传统方法

传统方法大致分为取样、测试、数据处理、试验结果分级、分级应用等几个步骤。

1. 取样、测试、数据处理

取样：石油钻井所遇到的地层以沉积岩为主，典型的岩性有泥岩、砂岩、石灰岩、白云岩、岩盐、石膏、页岩、砾岩，有的油田还遇到花岗岩等火成岩。在取样时，多以岩性为准，取全不同岩性的岩样。例如，1951年赫德(HEAD)在测定地层可钻性分类数(DCN值)时，共取了十五种岩样，以代表石油钻井中常见的地层。根据岩性取样具有一定的代表性，这仍是石油钻井常用的方法。

测试：由于测定可钻性方法不同，对岩样加工的要求也不同。测定史氏硬度，则要求岩样直径不小于80毫米，两端面平行，端面需要磨光，湿度也要求按一定条件保持^[2]。如做微钻头试验，则只需要岩样表面平整即可满足试验要求。

数据处理：将每块岩样的测定结果，去掉可疑数据后取平均值即为该岩样的可钻性指标。按传统方法的特点，每块岩样就代表取样的那个地层。

2. 传统分级法

地层可钻性用于钻头选型、设计钻头、制定钻井参数、编制生产定额等方面的实际工作时，通常需要对测定结果分级或分类，以便按级别进行工作。分级就是将地层可钻性的数值由小到大排列，并划分成几个区间，每个区间包含首数和尾数(末数)。

例如史氏硬度的分级中的第一个区间(≤ 10), 首数小于10, 尾数是10; 第二个区间的首数是10, 尾数是25, 等等, 每个区间称为“级”。为方便实际应用, 常常将级按顺序称为一级、二级、…等。有时需要比级更为广泛的分类, 如史氏硬度的一至四级合并称为软地层类, 五至八级合并称为中硬地层类, 九至十二级合并称为硬地层类^[11]。

传统分级法在划分数据序列的区间时, 通常遵循实用原则和数学原则。

实用原则 首先是试验的取样范围应尽可能广泛, 应包括该行业内所有可能遇到的地层。这样的试验结果, 便从小到大包括了全部地层的数据, 分级时才不致漏掉常见的地层级别, 做到地层与级别相对应。其次是每个区间的范围, 即每级所占有地层的可钻性范围, 应同实际钻头种类或相应工具适宜的地层范围相对应。例如, 石灰岩地层以使用 J55R 型钻头为适宜, 则石灰岩地层宜划为某级, 设为六级, 以同该型钻头相对应。由此可以得到可钻性为六级的地层同 J55R 型钻头相对应。我国生产的牙轮钻头类型现有七个系列: JR、R、ZR、Z、ZY、Y、JY、以与地层相对应; 地层可钻性至少应分成七个以上的等级, 才便于实际的钻头选型工作。

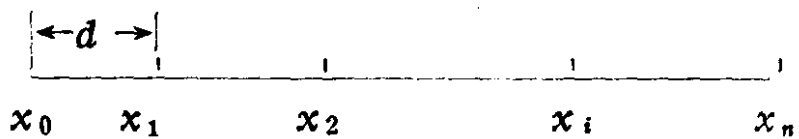
此外尚应考虑钻井方式的不同, 比如顿钻, 旋转钻, 转盘钻, 涡轮钻等等; 考虑钻头种类的不同, 比如刮刀钻头, 牙轮钻头, PDC 钻头, 金刚石钻头等等。还应考虑钻井技术类型, 如喷射钻井, 平衡钻井等等。地质采矿部门则更为复杂些, 因为那里有镶刀钻、研钢砂钻、金刚石钻、潜孔钻、冲击钻、牙轮钻、火钻等多种不同的钻孔设备, 需要择优选定。

数学原则 假定对石油钻井的所有地层都取样测定微钻头可钻性, 而且数目很多, 足以形成一系列可钻性数据。而且当取样无穷多时, 构成一个连续的实数数轴段。将这段数据划分成若干区间后, 去掉所有的数据, 只留下每个区间的首数和尾数, 若将

两区间的公共点，即前一级的尾数和后一级的首数合并成一个数，便形成一个分级的数列。若这个数列是不规则排列的，使用起来就不方便。为此，在划分区间时，通常按某个数学规则进行。传统分级方法中常用的有三种数学规则，即等差级数、等比级数和混合级数划分法。

(1) 等差级数分级法

将所测微钻头可钻性数据(理想化为一段实数轴) x ，按等差级数分为若干区间，每个区间为一级。分级结果可用下图表示。



按等差级数定义，首项 $a = x_0$ ，末项 $= x_n$ ，项数 $= n + 1$ ，公差 $= d$ ，则有

$$d = x_{i+1} - x_i \quad i = 0, 1, \dots, n-1 \tag{1-10}$$

d 在实用中可称为级差。以级差 d 为1, 10, 100，列出分级表，如表1-2。

表1-2 首数 $a = 0$ ， $d = 1, 10, 100$ 的分级表

级差 d	一 级	二 级	...	十 级
$d=1$	0~1	1~2	...	9~10
$d=10$	0~10	10~20	...	90~100
$d=100$	0~100	100~200	...	900~1000

从实用原则要求，级差 d 的大小则应使每级同实际工具种类或实际需要值相对应，从简单、易记、便于推算、好用的角度来比较。这几种分级都符合要求，而尤以 $d = 1$ 最为合用，因为差的尾数和分级名称(一级、二级、……)完全一致。

等差级数分级法最适合于被测对象是均质的情况。因为这时测量结果的精度在各个级别内都只与仪器精度①有关。例如，测

① 后面还要讨论仪器精度。

量值同精度的关系为 $1 \pm 0.2, 2 \pm 0.2, 3 \pm 0.2, \dots, 10 \pm 0.2$ 时, 则以 $d=1$ 的分级方法最好。这又是选择 d 的大小的一个原则, 即 d 的大小至少应大于测量值的精度(这里的精度一般用绝对标准误差表示)。

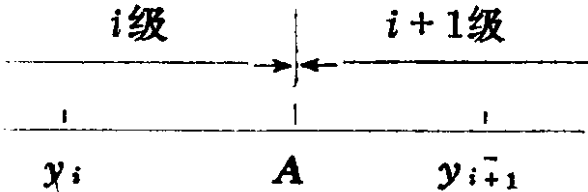
(2) 等比级数分级法

将所测全部结果(比如钻时)划分成 $y_1, y_2, \dots, y_i, \dots$ 个区间值后存在下列关系

$$r = \frac{y_{i+1}}{y_i} \quad i = 1, 2, \dots \tag{1-11}$$

式中 r 为后级同前级之比, 称为公比; y_i 为第 i 级的代表值。

分级结果可用下图表示



A点表示前后两级交叉的公共点。这种分级方法符合等比级数规则。设第1个公共点为1, 公比 $r=2$, 则按等比级数分级的结果如下:

$A = 1, 2, 4, 8, 16, 32, 64, 128, 256, 512, \dots$ 。事实上, 公比 r 值可以由测定误差计算出来^[12], 即

$$r = \frac{1 + KV}{1 - KV} \tag{1-12}$$

式中 $V = \sigma/y$ 为相对标准误差, K 为置信系数。当 $K = 2.22, V = 0.15$ 时, $r = 2$ 。

(3) 混合分级法

这种方法主要是调整等比或等差分级方法与实用原则不相协调时, 局部改变等差或等比规则。例如ROLLOW A.G.的图表中关于微钻头可钻性的十五种排列就是这样的。从4.0到1.0的公差为0.5一档, 从1.0到0.1的公差为0.2一档, 从0.1到0.02的公差