

51-60

潜水员水下用电安全的基本问题

张国光 陆莲芳 谢长江 荆岩林

(交通部 石油部 海洋水下工程科学研究院, 上海 200231)

P756.1
TM86

摘要 水下用电安全是潜水员在施工作业中经常遇到的一个实际、且棘手的问题。本文概要分析了潜水员水下用电安全的技术范畴、遭受电击时的主要特征、水下电气设备的故障漏电流、防电击的基本方法、水中作业的安全距离,以及水中含盐量对用电安全的影响等与潜水员水下用电安全密切相关的若干基本问题。最后,笔者初步探讨了我国潜水员水下用电安全的标准规范体系,以及有关标准、法规制定的可行性与必要性。

关键词 潜水作业, 水下用电安全, 安全标准

潜水员

随着海洋水下工程的发展,尤其是大深度水下施工作业之需要,利用水下电动工具和设备,就愈加显示出其它动力源(如:风动、液压等)所难以比拟的优势。但是,水下用电安全又往往是潜水员在水下施工作业中经常遇到的一个实际、且棘手的问题。因此,要开发适合大深度水下施工作业所需的电动工具和设备,就必须切实解决好水下用电的安全问题。西方工业国家,如美国、英国及挪威的一些研究机构和组织,在本世纪70年代初就开始研究探讨水下用电安全问题,并取得了一些相应的研究成果^[1~5]。由于我国在海洋水下工程这一技术领域的起步较晚,水下电气设备的应用不多,以至于潜水人员、工程技术人员对水下安全用电问题缺乏相应的认识 and 了解。

鉴于此,本文分析讨论了潜水员水下用电安全的技术范畴、遭受电击时的主要特征、水下电气设备的故障漏电流、防电击的基本方法、水中作业的安全距离,以及水中含盐量对用电安全的影响等与潜水员水下用电安全密切相关的若干问题。最后,笔者结合国家标准《潜水员水下用电安全技术要求》的研究编制,初步探讨了我国潜水员水下用电安全的标准规范体系,以及有关标准、法规制定的可行性与必要性。希望拙文能有助于我国潜水员水下用电安全标准、规范的制订,促进我国海洋水下工程作业设备和工艺技术的发展。同时,亦希望能够抛砖引玉,得到国内同仁及有关专家的指正与赐教。

1 潜水员水下用电安全的技术范畴

从水下电气的应用领域来看,潜水作业期间影响潜水人员安全的电气设备或设施,主要是指潜水系统装备、作业设备工具和水下结构设施。其中,潜水系统装备包括:水面加压舱

(DCC)、潜水钟(SCC)、应急转运系统、设闸式潜水器、水下工作舱、电热潜水服、脐带,以及载人和无人遥控潜水器等;作业设备包括各种手提设备(手持电动工具和仪器设备)、海底设备的动力源、水下焊接与切割设备,以及水面配电系统等;水下结构设施,则是指长期在水下工作的大型船舶或水下结构物的外加电流阴极保护系统、海底油气生产控制装置和大功率电缆等。此外,还有各种由电气控制方式引爆的水下爆破器材和设备等。图1是水下电气的应用领域示意^[7,8,10,11]。

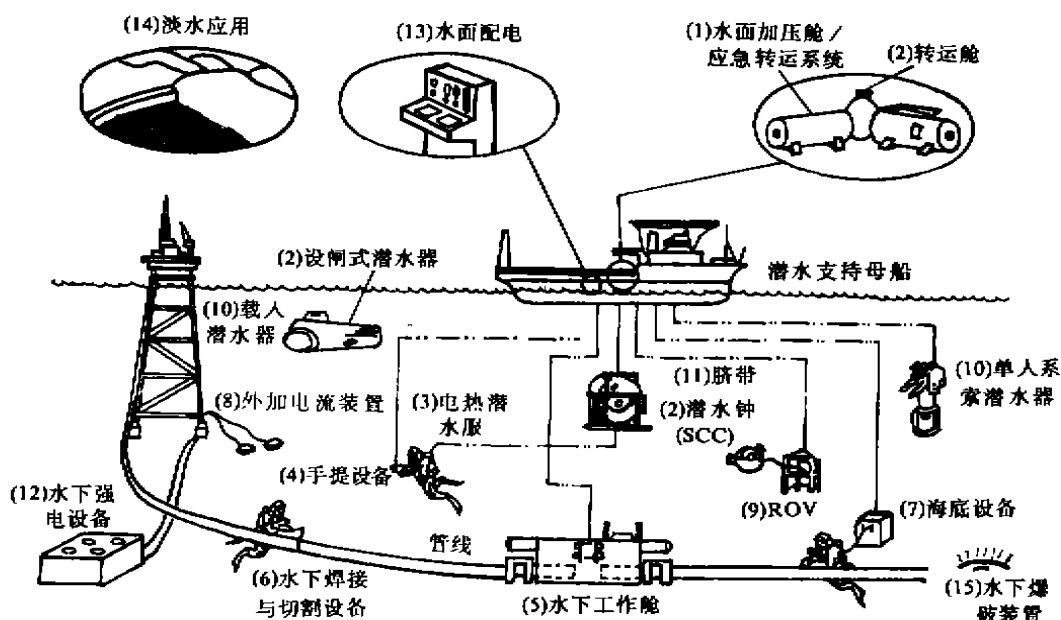


图 1 水下电气的应用领域示意

就其性质而言,潜水员水下用电安全涉及各种各样由使用水下电气所引起的电击,电气绝缘材料受热而分解出的有毒、易爆产物,以及受热表面、故障设备或开关装置产生的电弧、火花引燃引爆某些混合气体等对潜水员所造成的危害。

显而易见,潜水员水下用电安全的技术范畴应该包括所有与潜水员水下作业有关的各种水下电气设备,以及那些虽与水下作业无直接关系,但却可能对作业潜水员构成某种威胁及损害的水下电气设备或结构设施的用电安全问题。

2 潜水员遭受电击时的主要特征

在水下使用电气设备可能产生的各种危险中，最常见的就是电击（或曰：触电）。

大量研究表明,人体电击致死的直接原因可分为:(1)大电流通过心脏,导致心室纤维性颤动;(2)大电流通过肌体,发热产生深度烧伤;(3)电击后,呼吸器官或脑内呼吸中枢麻痹性休克。从生理医学的观点来看,把人体开始感觉“体内有电”时的电流值,称做“感觉电流阈值”;能够借助电流对肌肉的直接刺激而后脱离带电体的最大电流值,称“摆脱电流阈值”;导致心脏停止跳动、节律性收缩消失,以及脉搏消失的电流值,称“心室纤维性颤动

电流阈值”。人体受到电击时的这三种生理效应界限值如图 2 所示^[2-4,6,9]。

与陆上情况不同的是当人体浸没或部分浸没在水下时，由于水的旁路效应，电流通过人体的路径通常是不确定的，而且可能是任意路径。特别是当潜水员的潜水服电气绝缘不良时，更是如此。例如：当潜水员在水下时，电流可能会通过人的嘴流动，此时人的舌头首先感觉到电流的存在。据测试人的舌头能够觉察到低达 $45\mu\text{A}$ 的电流，是人体对电流通过最敏感的器

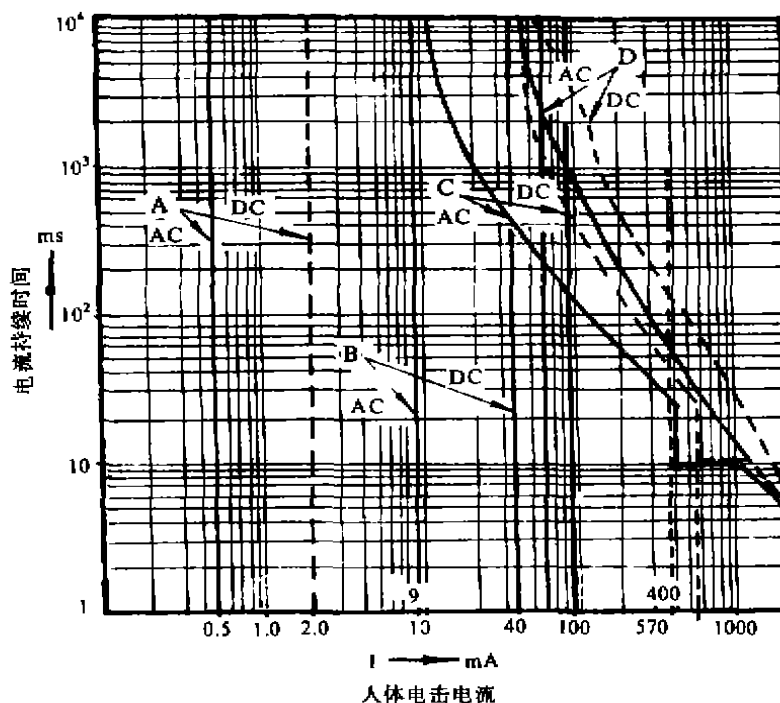


图 2 人体的电击生理效应曲线

A—感觉电流阈值；B—摆脱电流阈值；C—IEC 安全曲线、结合 Jacobsen 判据；D—心室纤维性颤动电流阈值器官。

当水中有电源存在时，就会产生一定强度的电场，迫使电流流过人体（图 3）。由于海水不是良导体（其体积电阻率约为铜的 1.4×10^7 倍），如果潜水员接触到了带电物体或电极，将削弱海水的分流作用，从而出现最危险的状况。同时，在水下环境中，人还处于一定的压力条件下，且不明确电流流经人体的路线（如：电流可能通过人脑中心），因此与干燥或半浸没情况相比较，水下条件最为不利。

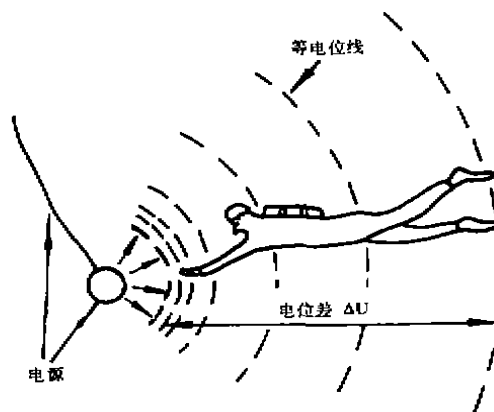


图 3 处于电场中的潜水员

3 水下电气设备的故障漏电电流

水下电气设备的电路接线是各不相同的。当水下电气设备绝缘失效（接地失效）时，故障漏电电流便进入水环境之中，从而可能对正在附近作业的潜水员构成生命威胁。在水中流过潜水员人体的电气设备故障漏电电流，可视水下电气设备的实际电路情况根据电学原理进行计算（图4）^[4,5]。

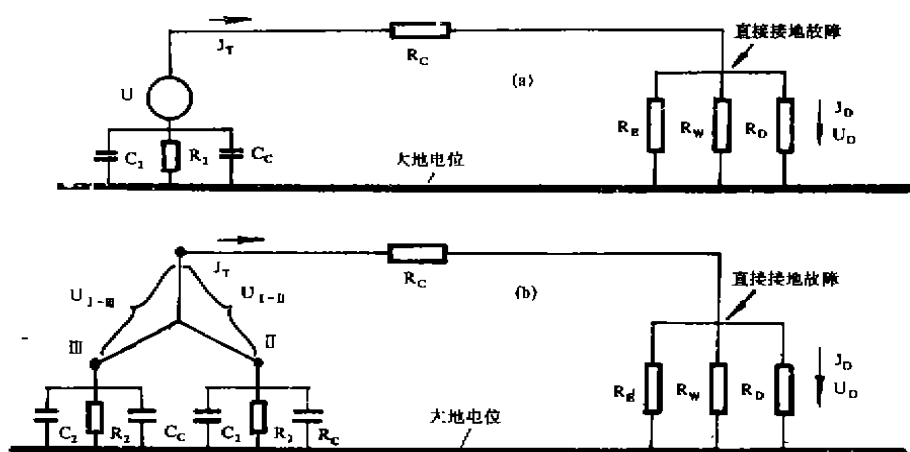


图4 水下电气设备的故障漏电电流技术简化等效电路示意

(a) 单相供电系统

(b) 三相供电系统

以单相绝缘供电系统为例。一般而言，如果供电电压为 U ，设备接地电阻 R_E 、海水电阻 R_W ，以及潜水员人体电阻 R_D 并的电阻为： $R_1 = (\frac{1}{R_E} + \frac{1}{R_W} + \frac{1}{R_D})^{-1}$ ，再与导线电阻 R_c 串联后的合成电阻为： $R = R_1 + R_c$ ；

电缆导线与地电位的电容 C_c 、变压器终端至地电容 C_2 ，两者并联合成电容 $C = C_c + C_2$ 的对应容抗为： $X_c = [2\pi f (C_c + C_2)]^{-1}$ ；

考虑电阻与电容的电流相位，则电路的总阻抗为：

$$Z_r = \sqrt{\left(R + \frac{R_c}{1 + \frac{R_c^2}{R_1^2}}\right)^2 + \left(\frac{X_c}{1 + \frac{X_c^2}{R_1^2}}\right)^2}$$

那么，水下电气设备的总故障漏电电流为： $J_r = \frac{U}{Z_r}$ ，则跨接在潜水员人体上的电压为 $U_D = J_r \cdot R_1$ ，通过潜水员人体的故障电流为

$$J_D = \frac{U_D}{R_D}$$

式中 R ——设备接地、海水、潜水员，以及电缆电阻的合成电阻 (Ω)； R_1 ——设备接地、海水、潜水员，以及电缆电阻的并联电阻 (Ω)； R_2 ——变压器终端至大地间的电阻 (Ω)； R_D ——潜水员人体电阻 (Ω)； R_c ——电缆导线电阻 (Ω)； R_E ——接地导线电阻 (Ω)； R_W ——设备

外壳至地电位（通过水）的电阻（ Ω ）； J_1 ——水下电气设备总故障漏电电流（A）； J_n ——通过潜水员人体的故障电流（A）； U ——电源电压（V）； U_b ——跨接在潜水员人体上的电压（V）； Z_T ——电路总阻抗（ Ω ）； C ——并联合成电容（F）； C_2 ——变压器终端至地电容（F）； C_c ——电缆导线与地电位的电容（F）； X_c ——并联合成电容的对应容抗（ Ω ）； f ——电源频率（Hz）。

4 水下作业防电击的基本方法

从理论上说，要防止水下作业的潜水员遭受电击危害，可以有三种不同的防护方法，或者说可以从三个方面来考虑。

首先，通过限制最大允许接触电压来防止对潜水员产生任何有害的影响。在此电压下，人体的前臂肌肉不会自觉地收缩，却能够借助电流对肌肉的直接刺激而摆脱带电体。从“安全”的角度来看，触电电压应足够小，一般认为设备的工作电压为 24VDC 或 6VAC 是比较安全的。

其次，限制触电的持续时间，以确保在该时间内不会对人体产生有害的影响。持续时间与通过人体的电流有关。如果触电持续时间为 20ms，人体允许的最大交流电流值达 500mA，此时允许的最大交流电压是 250V。

第三，保证潜水员尽可能远离水下有害电源。因为随着水下电场强度的增强，越接近带电体，电击的感觉亦随之增大。通常把未产生有感电流（又称“感觉电流阈值”）时的最大距离定为“危险距离（RD）”。只要潜水员距水下带电体的距离大于“危险距离”，那么潜水员就是安全的。

如果就水下电气设备本身而言，按其防电击保护的原理特征可划分为两大类：主动保护和被动保护。其中，常见的被动保护方法有：电气绝缘、可靠接地、防护屏蔽、固定隔离栅或穿着安全防护服。主动保护方法，目前比较流行的是：接地-漏电（又称：残余电流）回路断路装置（ELCBs）和线绝缘回路断路装置（LICBs）。在水下电气设备系统中，通常由一种或数种被动保护方法构成防电击的第一道防线，主动保护则在需要较高保护等级之处作为第二道安全防线^[3,7,8,10]。

5 潜水员水下作业的安全距离

潜水员距水中带电体的“危险距离”，通常又称之为“水下最小安全距离”。理论上，只要潜水员相对水中带电体的距离能保持在危险距离（最小安全距离）以外，就无需再限制水下设备电源的上限电压值。

研究试验表明，影响水下安全距离的因素有：（1）人体的生理特征；（2）人体的电学特征；（3）潜水员的身长及与带电体的相对方位；（4）潜水员的着装；（5）跨接电压值（水中带电体与地线间的电压）；（6）电极的形状；（7）带电体与水直接接触部分的表面积。在不同的电极情况下，水下安全距离的计算表达式不尽相同。

5.1 球或盘状电极（或带电体）的安全距离

球或盘状电极的安全距离可用下式表示:

$$RD = 0.5 (\sqrt{L^2 + 577 K_s K \sqrt{F} \cdot V_0 / R_t} - L) - 0.28 \sqrt{F}$$

式中 RD ——潜水员水下作业的安全距离 (m); L ——潜水员身长 (m); K ——人体触电后的生理阈值 (感觉阈值或摆脱阈值); K_s ——带电体 (电极) 的形状系数 (球形为 1, 盘形为 1.5); F ——带电体 (电极) 的外表面积 (m²); V_0 ——水中的电极与地之间的电压 (V), $V_0 = I_{ec} \cdot R_0$; I_{ec} ——电极额定电流 (A); R_0 ——潜水员等效电阻 (Ω).

5.2 细长电极的安全距离

最常见的细长电极是一种外加电流阴极保护装置的水下棒状阴极。此时的安全距离为:

$$RD = \alpha - t/2$$

其中计算距离 α , 可由下列一组方程式导出:

$$e^m = \frac{n_1 n_2}{n_3 n_4}$$

$$m = (0.009 R_t \cdot \ln \frac{2L}{t}) / (K \cdot V_0)$$

$$n_1 = \sqrt{\beta} + \frac{L}{2}$$

$$n_2 = \sqrt{\beta + 4.6\alpha + 5.3} - \frac{L}{2}$$

$$n_3 = n_1 - L$$

$$n_4 = n_2 + L$$

$$\beta = (\frac{L}{2})^2 + \alpha^2$$

式中 α ——计算距离 (m); β ——计算系数; L ——电极长度 (m); t ——电极厚度 (m)。

5.3 断路电缆 (电偶极场) 的安全距离

一条电缆或一只电接头产生断路, 水将成为断路的通路, 从而形成“电偶极场”。此时的安全距离为:

$$RD = \alpha - D/2000$$

式中 $\beta = (2\alpha + 2.3) / [\alpha(\alpha + 2.3)]^2 = 8000 R_t / (V_0 \cdot d \cdot A \cdot K \cdot P)$; d ——终端直径 (mm); A ——两终端中心距 (mm); P ——电源相制系数 (单相 1, 三相 1.5); D ——电缆或接头的直径 (mm)。

5.4 水中焊枪焊接 (或切割) 的安全距离

水中焊枪焊接 (或切割) 作业时, 如果焊枪突然断弧, 但焊接 (或切割) 电路却没有自动切断, 那么此时的安全距离为:

$$RD = 50 (\sqrt{5.3 + 1.1 K \cdot V_k \cdot D_t / R_t} - 2.3)$$

式中 V_k ——开路电压 (V); D_t ——焊条直径 (mm)。

5.5 水下安全距离的近似计算方法

显然, 前面所介绍的几种计算方法涉及的因素较多, 实际应用时较为复杂, 使用不便。在实际工程中, 若根据近海工程潜水承包商协会 (AODC, 现改名为: 国际水下工程承包商协会,

IAUEC) 所推荐的一种近似方法计算, 即: 由设备故障电流对人体安全电流的比值计算水下安全距离, 同样可以满足需要^[5,10,12]。

对于海水环境, 潜水员水下安全距离为:

$$RD = [1 + \frac{10^{-4} \cdot I_0}{I_b}]^{1/2} - 1$$

对于淡水环境, 潜水员水下安全距离为:

$$RD = [1 + \frac{I_0}{40I_b}]^{1/2} - 1$$

式中 I_0 ——设备故障电流 (A) I_b ——人体安全电流 (A)。

如果水下电气设备是由直流电源供电, 而且电压不超过 30V, 则此时的安全距离为零, 无需隔离遮栏和/或设安全标志。

6 水中含盐量对用电安全的影响

从英国、挪威、美国等国家的情况来看, 水下工程技术的发展主要得益于北美墨西哥湾和欧洲北海海底油气资源的大规模开发。因此, 这些国家所进行的水下用电安全课题的研究也是以此为依托展开的。

联系我国的具体情况, 近海油气资源的勘探开发仅仅是近年来的事, 实际的水下工程作业量有很大一部分是在内陆水域的江河湖泊和水库中进行的。这些与西方工业国家的情况有一定差别。因此, 就目前我国实际情况来说, 研究淡水与海水的电学特征差异, 对水下用电安全问题就有着非常现实的意义。

研究表明, 水的含盐量主要通过改变水的体积电阻率、水的阻抗来影响水下用电的安全性。水的体积电阻率变化与含盐量、污染物、温度及压力 (即: 水深) 有关。随着离子数量 (含盐量) 的增加、温度的升高和压力的增大, 溶液的体积电阻率都会降低。一般海水 (盐度为 35) 的体积电阻率 $\rho_w = 0.25 (\Omega \cdot m)$ 、淡水的体积电阻率 $\rho_w = 100 (\Omega \cdot m)$ 。而金属导体, 如铜的体积电阻率 $\rho_{Cu} = 0.175 \times 10^{-7} (\Omega \cdot m)$ 。

由于海水中的含盐量, 海水与淡水的电阻抗也存在较大的差异。水的阻抗与电极的尺度 (半径)、两电极之间的距离、电流的频率, 以及水体积的尺度、体积电阻率和直流电阻等有关。一般来说, 水体积的交流电阻比直流电阻为高, 如果直流电阻为: R_w , 则频率为 f 的交流电阻为: $R_s = r_s \cdot R_w$ ($r_s \geq 1$)。当电流向水表面密集时, 水的内部自感是减少的, 如果电流内部的自感是: L_s , 则交流自感为: $X_s = l_s \cdot L_w$ ($l_s \leq 1$)。同时, 考虑到等效电路中的电容 C_w (可根据电路形式的静电情况计算) 大小, 水的阻抗 (Z_w) 可以理解成图 5 所示的情况。用下式表示为:

$$Z_w = \frac{(R_s + j \cdot X_s) \cdot (-j \cdot X_c)}{R_s + j \cdot (X_c - X_s)}$$

式中 Z_w ——水体的阻抗 (Ω); R_s ——频率为 f 的交流电阻 (Ω), 即: $R_s = r_s \cdot R_w = \frac{\rho_w}{2\pi r} \cdot$

$(1 + \frac{1}{500} \cdot \frac{l_r}{a} \cdot \frac{\sqrt{f}}{\rho_w})$; X_s ——频率为 f 的交流感抗 (Ω), 即: $X_s = \omega \cdot l_s \cdot L_w = \frac{1}{1000\pi} \cdot \frac{l}{a} \cdot$

$\sqrt{\rho_w} \cdot \sqrt{f}$; X_c ——频率为 f 的交流容抗 (Ω), 即: $X_c = (\omega \cdot C_w)^{-1} = 2.24 \times 10^8 \cdot \frac{R_w}{\rho_w f}$; a ——水圆柱体的体积半径 (m); r ——电极半径 (m); l ——两电极之间的距离 (m); ρ_w ——体积电阻率 (Ω); ρ_{wf} ——频率 f 下的体积电阻率 (Ω); R_w ——直流电阻 (Ω); ω ——角频率 (f)。

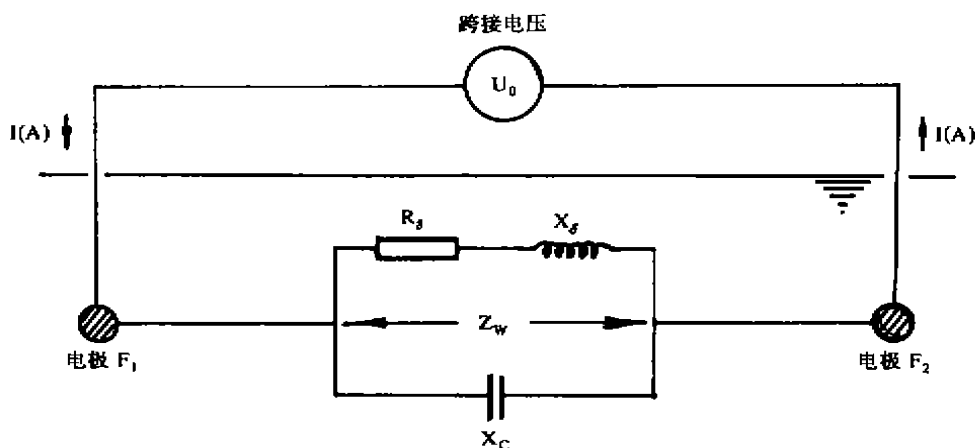


图5 水阻抗的等效电路

可见, 淡水的阻抗远远大于海水的阻抗 (设定: $a \gg 1$, $1 \gg r$, $a \gg r$)。由于其导电性的差异, 潜水员在淡水中的电击危害更大。因此, 对于淡水中使用的电气设备, 需要保证更大的安全工作距离, 以及足够可靠的接地装置^[4,10]。

7 水下用电安全标准规范体系

毋庸置疑, “水下用电安全”标准规范体系是指所有与潜水员水下用电安全有关的标准, 因彼此间存在客观的内在联系, 而构成相互依存、相互补充、相互制约的一个有机的整体。它是对水下用电安全技术水平及标准化程度的综合反映。图6给出了潜水员水下用电安全标准规范体系纲要示意。

潜水员水下用电安全标准、规范, 大致可分为: 技术规范、操作规程和产品标准三个层面。所有各类标准和规范的核心, 都是从不同的侧面来确保潜水员的人身安全。

若从标准规范的基本属性来看, 技术规范是基础标准, 也是水下用电安全的总体技术要求, 属宏观自然规范的范畴。它应包括与潜水员水下作业有关的各种潜水系统装备、装具, 水下用电的作业设备, 以及虽与水下作业无直接关系, 但却可能会对潜水员构成某种危害的各类水下结构设施在用电安全方面的一般规定。主要适用于水下电气系统的安全设计、制造和选用。

安全防护产品标准亦属于自然规范 (微观) 的范畴。具体来说, 就是那些与潜水员水下用电安全有关的各类实用防电击安全装置及材料的技术要求、参数、尺寸及试验方法等内容

的具体规定。主要用于水下用电安全装置的设计和制造。

操作规程是方法标准,属行为规范。从管理的角度来看,就是制订、颁布与水下用电安全有关的作业程序、方法和规定。在内容上,操作规程应该包括潜水员水下作业用电安全的基本操作程序和要求。主要适用于潜水作业中对水下电气的正确安装、调试和使用^[7,8,10,11]。

根据我国的实际情况,从时间序列上来看,应该首先制订、颁布总的水下用电安全技术

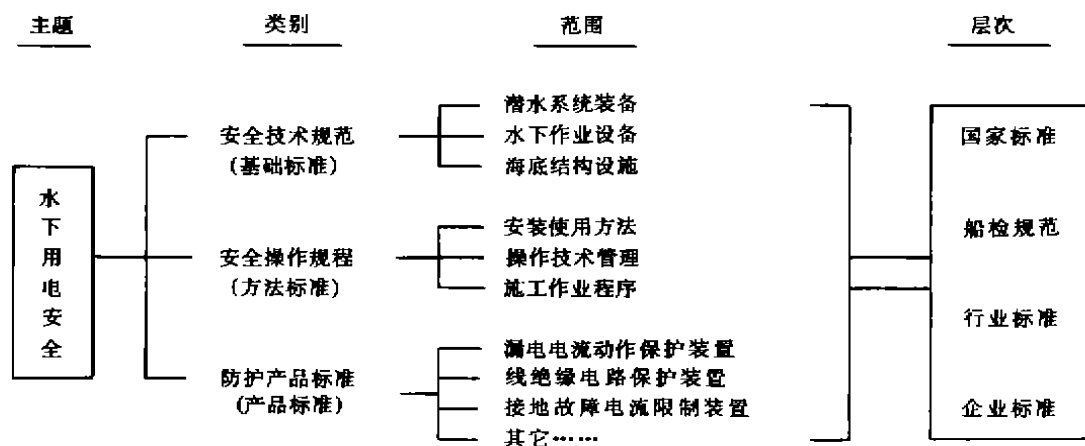


图6 潜水员水下用电安全标准规范体系纲要示意

规范和操作规程,如:《潜水员水下用电安全技术规范》、《潜水员水下用电安全操作规程》等,以从总体和宏观上对国内潜水及水下工程的用电安全进行指导。再根据水下用电安全技术管理的实际需要,陆续制订、颁布一些有关的具体技术标准、要求和管理工作程序,以及相应的安全产品标准等。

8 结 语

前面我们讨论了与潜水员水下用电安全有关的一系列基本问题,并初步探讨了我国潜水员水下用电安全标准规范体系的确定,及有关标准、规范制定的可行性与必要性。

显而易见,水下用电安全是潜水员在施工作业中经常遇到的一个非常实际且棘手的重要问题。其难度在于,它不仅仅是一个单纯的技术问题,同时还与潜水作业的管理有着不可分割的密切联系。因此,为了确保潜水员在水下施工作业中的用电安全,除了制订必要的用电安全标准,还必须有一系列相应的、科学的潜水作业管理规程和条例来配合。相信随着科学技术水平的不断发展,人们必然会进一步加深对水下用电安全的认识。届时,潜水员水下用电安全将不会再成为一个棘手的问题。

参考文献

- 1 张国光等. 国外水下用电安全的技术管理及标准规范述评. 上海: 海洋水下工程科学研究所, 1994. 8
- 2 Searle Jr W F et al. Underwater electrical safety practices. National Academy of Sciences, Washington, D. C., 1976

- 3 Mole G. Underwater electrical safety—some guidance on protection against shock. CIRIA Underwater Engineering Group, Report UR 14, 1979
- 4 Norwegian Underwater Institute. Electricity in water — Safety of divers, Part 1: Fundamental principles. Report, 1980, 5-80
- 5 Det Norske Veritas. Electricity in water—Safety of divers, Part 2: Practical Applications Report, 1980, 80-0233
- 6 Green H L, Ross J and Kurn P. Danger levels of short (1 ms to 25 ms) electrical shocks from 50 Hz supply, Divetech' 81, Workshop C, London, 1981, 4, 7
- 7 Moulton R J. A review of underwater electrical safety project supported by the Department of Energy. Divetech'81, Workshop C, London, 1981, 4, 10
- 8 Bradford M. A code of safe practice for electrical equipment underwater. Divetech'81, Workshop C, London, 1981, 4, 10
- 9 Effect of current passing through the human body. IEC Report, Publication 1984, 479
- 10 AODC. The code of practice for the safe use of electricity underwater, London 1985
- 11 Crawford W L. The code of practice for the safe use of electricity underwater, IUSD, 1985, 7 (6), 13~15
- 12 Product Supplier Directory 1993, AODC—The History of an industry. IUSD, 1993, 19

ON DIVER'S SAFE USE OF ELECTRICITY UNDERWATER

Zhang Guoguang, Lu Lianfang, Xie Changjiang and Jing Yanlin

Chinese Underwater Tech. Inst., Shanghai 200231

Abstract The diver's safe use of electricity is a practical yet complicated problem in diving operation. In this paper several basic categories closely linked to diver's safe use of electricity underwater are probed, including the technical category of diver's safe use of electricity underwater, the basic characteristics both physiological and electrical when incurring an electrical shock, the fault current of electrical equipments and installations underwater, the major methods of shock protection, the safe distance of operations underwater, and the effect of salt content of the water on electricity safety. Chinese standard and code system for diver's safe use of electricity underwater are briefly described, and their feasibility and necessity are discussed.

Key Words diving operation safety; use of electricity underwater