

水资源利用设计保证率的分类及计算方法综述

穆世强,唐建华,刘玮祎

(长江勘测规划设计研究有限责任公司 上海分公司,上海 200439)

摘要:虽然设计保证率对于水利水电工程设计人员来说,是一个基本概念,但从实际应用来看,仍然存在一些较普遍的认识误区;另外,随着研究对象的不断拓展,水资源利用设计保证率的内涵也在不断延伸,因此,有必要对其应用及研究现状进行梳理。介绍了水资源利用设计保证率的内涵;从应用行业、有无调节能力、设计时段、研究对象、制约因素等角度对其目前的分类进行了全面、细致的梳理。通过典型工程案例阐述水资源利用设计保证率的计算方法。最后针对实际应用过程中存在的问题,提出了相关建议。

关 键 词:水资源利用;设计保证率;分类与计算;综述

中图法分类号:TV213.9

文献标志码:A

DOI:10.16232/j.cnki.1001-4179.2015.S1.009

1 设计保证率的内涵

设计保证率本质是概率思维的衍生物,是基于目前的认识水平或者经济实力,在无法采取措施完全免除灾害或者满足需求的情况下,在当前付出和预期风险之间作出的选择。

水资源利用所面对的各种环境客体或者事件(包括干旱、咸水入侵、事故污染等)通常都极其复杂,很难准确预知其发生时间和影响程度,具有极大的偶然性和随机性。在此情况下,设计保证率便成为一种选择。设计保证率的选定是国家在一定时期中技术和经济政策的具体体现。保证率越高,当前付出的代价越大,承受的风险越小;保证率越低,当前付出的代价越小,但所需承受的风险势必越大。通常,各项任务的设计保证率都要在规划中根据其重要性、特点,结合国家或地区经济状况和有关工程的自然条件,通过技术经济论证最终选定。

2 设计保证率的分类

2.1 按行业分类

目前,水资源设计保证率研究涉及的行业主要有

农田灌溉、水力发电、城乡供水和航运等。

(1) 灌溉工程。灌溉设计保证率可根据水文气象、水土资源、作物组成、灌区规模、灌水方法及经济效益等因素确定,以旱作为主的灌溉工程设计保证率介于 50%~75% 之间,以水稻为主的则在 70%~95% 之间^[1]。

(2) 水电工程。水电工程的设计保证率是指水电站正常发电时段数与计算总时段数相比的百分率,时段长短可根据水库调节性能和设计需要,按年、月、旬、日分别选用。

水电站的设计保证率,具体论证时,应根据其所在电力系统的负荷特性、水电比重、河川径流特性、水库调节性能、水电站规模及其在电力系统中的作用,以及设计保证率以外时段出力降低程度和保证系统用电可能采取的措施等因素确定。根据电力系统中水电容量的比重,水电站设计保证率介于 80%~98% 之间^[2]。

(3) 城乡供水水源工程。按供水对象分为城市和村镇供水水源工程,另外,一些用水量大、供水保证程度要求较高的工业项目也会自行建设供水工程,如煤炭、钢铁、火电/核电工业及制浆造纸工业等。各类城乡供水服务对象设计规范提出的供水保证率见表 1。

表 1 城乡供水设计保证率统计

供水服务对象	规范名称	有关供水保证率的规定
城市用水	《城市给水工程规划规范(GB 50282 - 98)》	根据城市性质和规模确定,可采用 90% ~ 97%
村镇供水	《村镇供水工程技术规范(SL310 - 2004)》	干旱年枯水期设计取水量的保证率,严重缺水地区不低于 90%,其他地区不低于 95%
煤炭工业	《煤炭工业给水排水设计规范(GB50810 - 2012)》	设计枯水流量的年保证率宜采用 90% ~ 97%,在严重缺水地区,设计枯水流量的年保证率可适当降低
钢铁工业	《钢铁工业给水排水设计手册》	钢铁企业一般采用 95% ~ 97%,矿山可采用 90% ~ 95%
火力发电厂	《火力发电厂水工设计规范(DL/T 5339 - 2006)》	97%,在充分论证条件下,可适当提高或降低
核工业	《DLT 5409.3 - 2010 核电厂工程勘测技术规程第 3 部分:水文气象》	与核安全无关的设施供水标准为保证率 97%,与核安全有关供水则应保证反应堆在任何条件下均能连续 30 d 维持安全停堆所需水量
制浆造纸厂	《制浆造纸厂设计规范(QBJ 101 - 1988)》	用地表水作为供水水源时,其设计枯水流量的保证率一般采用 97%

(4) 航运工程。不受潮汐影响和潮汐影响不明显的河段,设计最低通航水位可采用综合历时曲线法计算确定,其多年历时保证率应不小于 90%;也可采用保证率频率法计算确定,其年保证率应不小于 90%。潮汐影响明显的河段,设计最低通航水位应采用低潮累积频率为 90% 的潮位^[3]。

2.2 按有无调蓄设施分类

有些工程直接从水体取水,枯水期的供水保证率和天然来水一致,可称为一次供水保证率;而某些大型用水工程为了提高枯水期的供水保证程度,通过建造调蓄水库将丰水期的水蓄存在库内,枯水期利用水库存水补充水量,可称为二次供水保证率。

一次供水保证率实例有都江堰水利工程。都江堰水利工程位于四川省都江堰市城西 1 km 的岷江干流上,采用无坝引水方式,无调节丰枯水量的功能,引水量始终随岷江径流的变化而变化。

二次供水保证率实例有三峡工程。该工程正常蓄水位 175 m,防洪限制水位 145 m,枯期消落低水位 155 m,水库有防洪库容 221.5 亿 m³,兴利库容 165.0 亿 m³,有巨大的调蓄能力。通过水库调节,使下游荆江河段两岸地区防洪标准由不足 10 a 一遇提高到 100 a 一遇,电站设计保证率提高到 90% 以上;同时,因三峡水库的调节,宜昌下游枯水季最小流量可由目前的 3 000 m³/s 提高到 5 000 m³/s 以上,将大大改善长江中下游枯水季节航运条件^[4]。

2.3 按设计时段分类

保证率计算中,时段长度通常有年、月、旬和日,相应 有年保证率、月保证率、旬保证率和日保证率。灌溉工程、城乡供水工程、调蓄能力较大的水电站等多采用年保证率。径流式电站、航运用水和其他不进行径流调节的用水部门采用短历时保证率。

另外,在进行保证率分析计算时,水文系列本身的时段长度也会影响供水工程的保证程度,比如日平均值、旬平均值和月平均值。同一设计保证率下,水文系列本身的时段越短,保证程度越高。

2.4 按研究对象分类

水资源利用工程一般总体要求达到一定的保证率,而其中的取水工程自身设计水位也要满足一定的保证率。取水工程可分成自流引水管渠和提水工程两种。自流引水管渠要求在设计水位条件下引水流量不小于设计流量;提水工程则要求在设计水位条件下,进水口能够取水且淹没深度满足要求。

《灌溉与排水工程设计规范(GB50288 - 99)》规定“无坝引水渠首进水闸闸前设计水位应取河、湖历年灌溉期旬或月平均水位进行频率分析,选取相应于灌溉设计保证率的水位作为闸前设计水位,也可取河、湖多年灌溉期枯水位平均值作为闸前设计水位”。

文献[5]规定“江河取水构筑物设计枯水位的保证率应采用 90% ~ 99%”;“设计枯水位是固定式取水构筑物的取水头部及泵组安装标高的决定因素。江河取水构筑物设计枯水位保证率的上限 99% 高于设计枯水流量保证率上限 97%,主要考虑枯水量保证率仅影响取水水量的多少,而枯水位保证率则关系到水厂能否取到水,故其安全要求更高”。

《制浆造纸厂设计规范(QBJ 101 - 1988)》规定“取水构筑物的设计最枯水位采用 33 年一遇最枯水位,当缺乏资料时,可采用实际调查的历时最枯水位或规划的最低水位;如系水库取水,应采用计划运行最低水位”。

2.5 按制约因素分类

传统水资源利用考虑的制约因素主要为流量和水位。随着技术水平的提高和社会经济的发展,一些非

传统的水源地也逐渐得到利用,如上海市在长江口建造的青草沙水库等避咸蓄淡水库。另外,由于河湖开发利用程度越来越高,水污染事故发生频次越来越密集,以突发性水污染事故作为制约因素的取水保证程度逐渐得到重视,出现了一些新的研究成果。

(1) 以流量作为制约因素。当取水工程所处河段枯水期来水小于需水时,为提高供水保证率,通常修筑水库调节天然径流,使枯水期供水尽量得到满足,此时的制约因素为流量,需分析供水流量的保证率。

(2) 以水位作为制约因素。自流引水管渠要求在设计低水位条件下引水流量不小于设计流量,因此,设计低水位、设计流量和引水管渠规模密切相关。提水工程要求在设计水位条件下,进水口能够取水且淹没深度满足规定,因此,设计水位与提水工程进口安装高程密切相关。

(3) 以咸水入侵为制约因素。为了提高供水安全保障能力,上海市提出大力发展长江口水源地,使上海原水供应形成“两江并举、三足鼎立”的格局。在这样的规划背景下,上海市兴建了一系列长江口避咸蓄淡水库,如陈行水库、青草沙水库、东风西沙水库等。

从水量来看,长江口水源可以说是取之不尽,用之不竭;就水质来讲,长江口南支水质基本属于地表水Ⅱ类标准,满足水源地水质要求;但是长江河口属中等强度感潮河口,在枯水季节易受盐水入侵的影响,使局部河段的水体含氯度超标。因此,咸水入侵期间连续不

宜取水天数和避咸蓄淡水库规模密切相关,是制约长江口淡水资源开发利用的关键因素。

(4) 以突发性水污染事故作为制约因素。近年来,突发性水污染事件频发,对城市水安全提出了新的考验。如2004年3月沱江水污染事件、2005年11月松花江水污染事件、2007年5月太湖蓝藻爆发事件、2009年2月盐城市偷排污水事件、2013年1月上海金山区水污染事件、2014年5月靖江长江水源地水污染事件等,都在不同程度上给城市居民生活带来了较大影响(表2)。

一旦突发水污染事件会造成严重影响,取水口暂停使用,供水需另寻出路,因此,以避污蓄清为典型特征的城市应急水源地在应对城市短期内大规模严重缺水、重大水污染等突发事件时起着不可替代的作用,是城市水安全以及社会稳定发展的重要保障。应急水源地规模论证中一项非常重要的工作为应急供水期间供水天数的确定,而应急供水天数不仅和发生事故的严重程度相关,还和污染河段的污染物稀释降解能力、地方政府的应急处置能力相关。

3 设计保证率分析计算方法综述

3.1 灌溉工程

(1) 无径流调节设施的灌溉取水工程。无调节设施的灌溉取水工程的设计保证率要通盘考虑水文气

表2 典型水污染事故造成的停水天数统计

事故名称	发生时间	影响供水 天数/d	事件简介
沱江水污染事件	2004年2~3月	26	四川化工股份有限公司废水污染沱江,内江市二水厂于3月2日停止供水,并从3月6日起,采用第二水源供水。随着污染状态的解除,内江市最终在3月28日恢复用沱江水供应生活饮用水 ^[6]
松花江水污染事件	2005年11月	4	2005年11月13日13:36,中石油吉林化学工业公司双苯厂发生爆炸,约100 t化学品泄漏进入松花江。哈尔滨市从11月23日23:00起停止供水。最终,经过采取应急净化措施后,于27日晚恢复供水 ^[7]
太湖蓝藻爆发事件	2007年5月	10	2007年5月,太湖大规模蓝藻爆发,22日,小湾里水厂停止供水;28日,贡湖水厂水源地水质严重恶化停止供水。此后,经水利部、太湖局、江苏省人民政府与无锡市人民政府等多方努力,最终于6月1日晚恢复正常供水 ^[8]
盐城市偷排污水事件	2009年2月	3~5	2009年2月20日07:20,盐城市越河、城西水厂蟒蛇河取水口上游约11 km处的盐城市标新化工有限公司偷排污水,致使两水厂原水受酚类化合物污染。同日,盐城市政府采取紧急停水措施。事发后,环保部、水利部、国防总、江苏省、盐城市有关各方迅速启动应急预案,采取了多种手段,最终于22日08:00使城西水厂取水口水质达标,开始进入试生产状态;23日02:00恢复供水,24日19:50污染水体经新洋港闸全部下泄入黄海,新洋港闸沿线6家地表水水厂25日恢复正常供水 ^[9]
上海金山区水污染事件	2013年1月	3	2013年1月10日19:40许,一艘散装化学品船在金山朱泾镇掘石港进行装载过程中,部分化学品泄入河道。1月11日,松江泖港自来水厂及其河东分厂暂时停水。经上海市和松江区有关部门全力处置,松江泖港自来水厂于1月14日00:00,恢复正常供水 ^[10]
靖江长江水源地水污染事件	2014年5月	2	2014年5月9日靖江官方发布消息,因长江水源地出现水质异常,全市暂停供水。5月11日,经靖江市应急指挥部研究决定,从10:50起,恢复正常供水 ^[11]

象、水土资源、作物组成、灌区规模、灌水方法及经济效益等因素,根据拟定的设计保证率,通过田间水量平衡计算确定设计灌溉制度,然后计算灌水率,最终确定灌溉设计流量。

根据《灌溉与排水工程设计规范(GB50288-99)》,万亩以上灌区应采用时历年法确定历年各种主要作物的灌溉制度,根据灌溉定额的频率分析选出2~3个符合设计保证率的年份,以其中灌水分配过程不利的1a为典型年,以该年的灌溉制度作为设计灌溉制度;时历年系列不宜少于30a。灌区的降水、土壤、水文地质条件有较大差异时,应分区确定灌溉制度。万亩及万亩以下灌区确定灌溉设计保证率时,可根据降水的频率分析选出2~3个符合设计保证率的年份,拟定其灌溉制度,以其中灌水分配过程不利的一年为典型年,以该年的灌溉制度作为设计灌溉制度。

无坝引水渠首进水闸设计流量应取历年灌溉期最大灌溉流量进行频率分析,选取相应于灌溉设计保证率的流量作为进水闸设计流量,也可取设计代表年的最大灌溉流量作为进水闸设计流量。

(2) 有径流调节设施的灌溉工程。有径流调节设施的灌溉工程,有关设计保证率的工作包括:① 确定取水设施规模,这与无径流调节设施的灌溉工程类似;② 通过水库径流调节计算确定正常蓄水位。

根据《灌溉与排水工程设计规范(GB50288-99)》,灌溉供水水库调节计算方法应符合下列规定,当灌区设计水平年的需水量大于设计保证率的年来水量时,应根据多年来水过程和需水过程采用时历年法逐月或旬进行多年水量平衡计算,时历系列不宜少于30a。当灌区设计水平年的需水量小于或等于设计保证率的年来水量时,可根据多年来水过程和需水过程,采用长系列法或典型年法逐月或旬进行年水量平衡计算。小型水库宜采用典型年法进行年调节计算。

灌溉供水水库的正常蓄水位应按各项用水设计保证率确定,以满足整个灌区需水量及供水过程的要求为基本目标,经水量平衡计算确定;当灌区需水量与水源来水量不平衡时,经技术经济比较后,可适当改变灌区灌溉面积或水库兴利库容。

3.2 水电工程

水电工程设计保证率主要体现在确定保证出力上,而保证出力是水电站装机容量的决定因素之一。

根据《水利工程水利计算规范(SL104-95)》,对于年调节水电站,应根据长系列径流调节计算成果,统计分析各水文年供水期平均出力,以设计保证率的供水期平均出力为电站保证出力;对于多年调节水电站,应根据长系列径流调节计算成果,先计算各供水段的

平均出力,然后按年统计,以设计保证率的年平均出力为电站保证出力;对于无调节和日调节水电站,应分析日平均出力历时曲线,以设计保证率的日平均出力为电站保证出力。

3.3 城乡供水水源工程

城乡生活和生产需水相对于灌溉用水来说,比较稳定,受气候条件的影响较小,年内、年际变化幅度较小。因此,城乡供水的保证率主要取决于水源可利用水量的保证率。

3.3.1 无调节设施取水工程

无调节设施取水工程是典型的以供定需的水资源利用工程,河道天然径流有多少可利用量,供水范围就限定多大。因此,此类工程的设计保证率主要用来计算设计保证率下的天然径流可利用水资源量,然后确定取水设施的规模和特征水位。

3.3.2 有调节设施的水源工程

(1) 水量型缺水工程。当供水范围较大,枯水流量难以满足供水需求时,通常建设调节水库蓄丰补枯,有关设计保证率的工作是通过径流调节计算确定水库的正常蓄水位。

(2) 避咸蓄淡工程。当取水水源地位于沿海地区的内河水系或者入海河口时,通常建设避咸蓄淡水水库来保障原水供应。此类水库的主要制约因素为盐水入侵,从理论上讲,供水保证率应按实测的取水口处含氯度资料进行统计分析,以连续不宜取水天数的保证率来作为供水保证率。根据规范要求,计算供水保证率的实测资料系列一般应在30a以上。目前咸水入侵监测资料普遍较短,不满足规范要求,难以通过连续不宜取水天数实测资料来推求供水保证率。根据分析,河口地区盐水入侵的时间和范围与上游径流量直接相关,因此,目前多采用系列较长的枯季径流量统计频率作为供水保证率。

如上海市在长江口河口利用天然沙洲修建的避咸蓄淡水水库——青草沙水库,采用长江大通站枯季径流量(11月至次年4月)统计频率作为供水保证率。根据分析,1978~1979年枯水期为典型特枯年份,相应频率约为97.5%,为此将该年型作为计算水库及取水泵站规模的设计典型年。

据此,华东师范大学河口海岸学国家重点实验室采用三维盐度场数学模型对1978~1979年枯水期青草沙水库最长连续不宜取水天数进行了专题研究。结果表明,在设计枯水期径流条件下,该水库最长连续不宜取水时间为68d。中层和底层盐度和每日取水时间与表层基本一致,最长连续不宜取水时间也为68d。

综合以上分析,按遭遇 1978~1979 年枯水期典型特枯年进行设计,其最长连续不宜取水天数为 68 d^[12]。

(3) 应急水源地工程。应急水源地工程蓄水容积和应急供水天数密切相关。根据近 10 a 来全国各省市水污染事件不完全统计,在对受污染水源地采取积极应对措施的情况下,备用水源应急供水天数一般介于几小时至 26 d 之间,主要分布在 3~7 d。

目前,应急水源工程的应急供水天数计算方法主要以下 3 种:① 参考相邻区域类似工程研究成果;② 对历史资料进行统计分析,然后进行技术经济比较;③ 利用风险评估理论研究。主要过程为污染源调查、风险源识别、事故概率估算,拟定若干典型事故情景,然后通过水质模型计算应急供水天数。前两种方法较简单,第 3 种方法举例如下。

常州的主要城市水源地有两处,其中,长江引水工程魏村取水泵站为魏村、湖塘等 4 个水厂提供原水,总取水能力为 100 万 m³/d;第一水厂取水泵站位于下游的长江利港段,取水规模为 40 万 m³/d。两取水口相距仅 15 km,互补性较弱。若长江魏村段发生重大水污染事故,很可能波及下游利港取水口,导致整个常州城市供水中断^[13]。

典型事故假定为:① 魏村取水口上游 500 m 发生溢油事故,溢油源强取 20 t/h,主要考虑落潮时的溢油风险影响;② 江边污水处理厂尾水事故排放,源强取 COD 排放量 116 000 kg/d、NH₃-N 排放量 8 000 kg/d、TP 排放量 2 200 kg/d、苯胺排放量 111.5 kg/d;③ 滨江化工区甲苯类有机化学药品事故排放,事故地点为滨江化工区取水口,源强取 20 t/h。

3 种极端事故的水环境影响预测结果表明,由于长江流量大、流速快,水体纳污能力较强,净污速度较快,水污染事故影响取水时间可控制在 3 d 以内。

3.4 航运工程

直接影响航运保证程度的水文条件主要是水位,设计过程中通常根据控制断面水位流量关系,将水位保证率转换为流量保证率。

(1) 航运枢纽工程。航运枢纽工程主要指拦河坝工程,其目的是调节天然径流过程,使库区河道枯水期水位满足通航设计保证率的要求。

(2) 航道治理工程。航道治理工程有关设计保证率的工作主要是计算天然河道对应于设计保证率的通航低水位,然后利用通航低水位、船舶吃水深度计算航道设计底高程,进而计算航道疏浚深度、疏浚土方量。

3.5 综合利用工程

在协调综合利用水库各用水部门的关系时,应在分析研究各项用水对供水地点、高程、过程和供水保证率等要求的基础上,编制几组综合用水量方案,并分别进行各典型年份的水量供需平衡计算,研究各部门的可供水量与工程规模及库容分配方案的关系。

当各用水部门设计保证率以不同方式表示时,宜先进行换算,统一以年保证率表示。

4 结语

(1) 随着河湖开发利用程度的提高,河湖水文特征发生了明显变化,设计保证率计算时应注意水文资料的一致性。

(2) 城乡供水保证程度要求较高,计算设计保证率时,水文系列的时段应尽量短一些,以日均值为宜。

(3) 目前各行各业提出的设计保证率均较高,且大部分要求年保证率,这种情况下,必然对水资源禀赋要求较高。从实际运行来看,有的并没有达到设计保证率的要求。建议对后评价制度进行探索,在充分评价分析的基础上,对现有规范提出的设计保证率进行复核、修正。

参考文献:

- [1] GB50288-99 灌溉与排水工程设计规范[S].
- [2] DL/T5015-1996 水利水电工程动能设计规范[S].
- [3] GB50139-2004 内河通航标准[S].
- [4] 水利部长江水利委员会.三峡水库优化调度方案研究报告[R].武汉:水利部长江水利委员会,2009.
- [5] GB50013-2006 室外给水设计规范[S].
- [6] 孙莉,朱鸿斌,张成云,等.一起工业废水污染沱江水源水事故的调查[J].环境与健康杂志,2005,22(3):193.
- [7] 张晓健.松花江和北江水污染事件中的城市供水应急处理技术[J].给水排水,2006,32(6):6-7.
- [8] 杨铭威,石亚东,孙志,等.太湖蓝藻爆发引发无锡供水危机的思考[J].水利经济,2009,27(3):36.
- [9] 陈红卫,朱榛国.盐城突发性污染事件的水利应急处置与反思[J].人民长江,2009,40(17):89-91.
- [10] 余梦,邹娟.松江泖港水厂今晨恢复供水[N].东方早报,2013-01-14(5).
- [11] 林榕,钟若漪.官方发布:长江水源水质异常全靖江市停水[N].人民网,2014-05-09.
- [12] 上海勘测设计研究院,上海市水利工程设计研究院.青草沙水库及取输水泵站工程可行性研究报告[R].上海:上海勘测设计研究院,2007.
- [13] 杨宇栋,李正兆.水质型缺水城市应急供水系统的建设[J].供水技术,2009,3(3):60-61.

(编辑:常汉生)