

抽水蓄能电站水库防渗技术分析及其工程应用

李长江 张又林

(中国水电顾问集团中南勘测设计研究院 湖南 长沙 410014)

摘要 针对抽水蓄能电站渗漏水头高、库水位大幅度变动急剧、库底易产生垂直渗漏、防渗结构自身渗透稳定问题突出等特点,通过对钢筋混凝土面板、沥青混凝土面板、土料心墙、帷幕灌浆、防渗墙、复合土工膜及土料铺盖等各种防渗手段的优点和弊端进行综合比较分析,结合坝体、坝基、库周和局部通道具有的渗漏特性,提出了各自适用的防渗方案。

关键词 抽水蓄能电站 水库渗漏 防渗技术 沥青混凝土

中图分类号:TV223.4;TV743

文献标识码:B

文章编号:1006-7647(2007)S2-0115-05

抽水蓄能电站水库渗漏问题影响着电站的经济效益,大的渗透或渗漏也影响坝基、库岸边坡、地下洞室围岩、水道系统的稳定性和水库的水量平衡,还可能引起山体和已有建筑物的失稳和低凹地区的浸没,因而要求水库具有较好的防渗性能。

根据《抽水蓄能电站设计导则》^[1],在无天然径流补给的情况下,日调节水库每昼夜渗漏量不大于总库容的 0.05%,因此,一般需要做一定范围的防渗处理或全库盆封闭,从技术和经济两方面权衡得失,研究选用合理的防渗方案。

1 抽水蓄能电站水库渗漏特点分析

相对于常规水电站,抽水蓄能电站渗漏具有如下特点。

1.1 渗漏水头高

抽水蓄能电站位置常选在地形高差大之处,上下库之间的落差一般大于 300 m(其中水头大于 1000 m 的抽水蓄能电站全世界已超过 10 座),且上水库一般位于沟源洼地或山顶平台内,地形陡峭,库周常有垭口或单薄山脊,库外常有高陡的临空面。库周山体卸荷较严重且卸荷范围大,岩体风化较深,沟谷和单薄山脊垭口处常有较大断层、破碎带或裂隙密集带,透水性强,地下水位低^[1]。蓄水后,水库内外形成巨大的水位差,地下水渗流速度和渗透压力增大,使库盆、坝基、坝头等部位产生不同程度的渗漏,甚至可能向邻谷渗漏。由于水头高,库水渗漏造成的能量损失也较大。

1.2 库水位大幅度急剧变动

由于电网调峰调频的需要,抽水蓄能电站库水位变动频繁(有的电站最多日达 20 多次)。当电站机组满出力发电或满载抽水时,水位的骤降或骤升幅度相当大,变动速度快,水位变化率在 5 m/h 以上,甚至可达 10 m/h,日变幅 30~50 m 也常见。蓄水时消落带受淹,对库周岩土体产生浮托力,库水位骤降时在坝体上游坡或库周边坡产生很大的渗透水压力。库周岩土体或坝体难免存在细微裂隙,其中的渗透水压力周期性地变动。因此,处于消落带内的库岸和防渗材料时干时湿,承受着水库每天反复充水和放水产生的作用力,以及水流运动引起的冲蚀和风化作用力,对库水位变动范围内的岩土体或坝体结构边坡可能产生动水压力破坏,甚至造成库岸滑坡和土石坝上游坡失稳。

1.3 垂直渗漏

为了能在短距离内获得较高的水头差,抽水蓄能电站往往追求上下库进出水口间的距高比 L/H 较小,上下库之间的地下水往往有直接的水力联系。厂房一般深埋于山体内,如果采用首部式布置或中部式布置,则距上库的水平距离不远。由于庞大的地下洞室群布置了系统的排水设施,从而降低了周边的地下水位,使周边山体的地下水位大大低于上库水位,库水可通过库底岩层、组合裂隙、陡倾角裂隙等向下渗漏,形成一种垂直渗漏形式。一旦形成渗漏通道,则由于长期的水流溶蚀和冲刷作用,通道一般会越来越扩大,水量损耗越来越大,并可能产生

较大的集中渗流,造成冲刷破坏,危及库岸内坡、外坡、坝体和地下厂房边墙等工程安全。

1.4 防渗结构的自身渗透稳定问题

由于有地下水,或由于防渗结构局部裂缝引起漏水等原因,防渗护面后的库岸或坝体的浸润线可能较高^[2]。在库水位骤降时,浸润线不会很快随之降低,此时防渗面受到的扬压力可能使防渗面抬起而损坏,进而使其原来所承担的渗透比降转移到周围的土体,带来渗透破坏区的扩展。因此,防渗结构必须设置完善可靠的排水系统,以降低浸润线,消除所受的扬压力,确保其自身安全。排水系统收集的渗漏水 and 地下水可以回收并补给水库。

另外,当表面防渗结构细微裂缝存水时,在冬季夜间严寒条件下裸露,可能会发生冻结,日间气温回升而又融化。这种反复融冻作用使裂缝逐步扩张,发生冻胀破坏,因此需要对防渗护面采取排水或表面保护措施。

2 水库防渗技术分析

2.1 坝体防渗

从工程经济性考虑,抽水蓄能电站上库大坝常建在较陡的沟谷地基上,坝基地质条件欠佳,而地下洞室和库盆的开挖常产生数百万立方米的石料。因此,为解决土石方挖填平衡问题,目前新建的水库多适用建土石坝,并核算在水位急剧变动作用下坝坡的稳定性。如果地形地质条件合适,也有采用混凝土重力坝或拱坝的,而且一般能适应水位的快速变化。而均质土坝即使在平均 1.1 m/d 的水位降速条件下也会发生坝体滑坡(如湖南流光岭水库、江西七一水库),难以适应水位的快速升降,除个别利用原有水库改建的混合式抽水蓄能电站外,一般不在抽水蓄能电站中采用。因此本文的坝体防渗分析就只针对普遍采用的土石坝。

水位变幅大的土石坝防渗主要采用钢筋混凝土面板、沥青混凝土面板或心墙等形式。钢筋混凝土面板属刚性结构,强度较高,但结构接缝多,很可能因坝体堆石不均匀沉降所产生的应力而使面板发生裂缝或接缝止水失效,而且其防渗性能不如沥青混凝土。但随着堆石坝施工技术的发展,使堆石沉陷量大大减小,改善了面板的依托基础。同时,通过采取多种改良手段(如增加聚丙烯纤维、钢纤维,添加复合外加剂、粉煤灰等),以增强混凝土抗裂性能,使这种防渗形式在国内新建抽水蓄能电站坝体防渗中得到较为普遍的使用,如广蓄双库、黑麋峰双库、白莲河上库、桐柏下库、泰安双库、琅琊山上库、十三陵上库等。

沥青混凝土面板有较好的塑性和柔性,适应变形的能力比较强,应变值可达 $2\% \sim 5\%$ ^[3]。在库水压力作用下,当作为支撑的堆石体发生不均匀沉陷时,该面板能很好地适应坝体变形,一般不会产生裂缝,还可以选择不同的沥青品种和调整沥青混合料的配比来适应不同气候条件、不同变形特性的工程。沥青混凝土渗透系数一般在 $1 \times 10^{-8} \text{ cm/s}$ 以下,其防渗性能优于钢筋混凝土,不存在渗透破坏问题。而且,沥青混凝土结构简单,施工速度快,不存在结构缝之类的薄弱环节,在自重和水压力作用下裂缝还有自行愈合的特性。对抽水蓄能电站沥青混凝土面板坝的测试结果表明,在 240 m 水头下仍不透水,已运行了 30 多年的面板仍具有良好的防渗性能。由于斜墙面板易于维护修补,其老化问题可通过设计解决,使得沥青混凝土斜墙面板的使用范围比心墙广得多,在欧洲抽水蓄能电站中广泛采用,我国也在天荒坪上库、张河湾上库、西龙池双库、宝泉上库、宜兴上库等工程中采用。值得注意的是,在面板与坝肩、河床的连接处需避免由于局部不均匀沉陷引起的张应变而产生裂缝和渗漏。

水位变幅较小的某些抽水蓄能电站副坝也可采用土料心墙或斜墙、土工膜斜墙或心墙等防渗形式,或作为改建抽水蓄能电站原有大坝的补充防渗手段。日本的神流川抽水蓄能电站(装机容量为 2700 MW)将上库采石场原拟弃掉的全风化岩石作为心墙混合料,美国的巴斯康蒂抽水蓄能电站上库大坝高 140 m ,采用了心墙堆石坝^[2];水位消落深度达 $22 \sim 26 \text{ m}$ 的中国的惠州抽水蓄能电站 5 座副坝也为黏土心墙堆石坝^[4]。低坝还可用自凝灰浆防渗墙、泥浆槽防渗墙、高压旋喷灌浆、帷幕灌浆等,效果也较好,尚需在工程实践中进一步研究推广。需要双层防渗时,薄面板(聚氯乙烯薄膜、薄钢板)特别适合坝体双层防渗衬砌的内部止水隔层,可以把薄面板放在混凝土或沥青面板下的排水层下面,或用塑料薄膜加强黏土斜墙,或在黏土心墙的上游面加设土工膜,以进一步防止渗水进入大坝填料内。

2.2 坝基防渗

2.1.1 岩石地基防渗

当岩石地基由于风化或地质构造影响而使透水性较大时,地基内的部分渗流可能串入坝体,不但使坝体浸润线升高,还可能使坝体受到冲刷,因此一般应做坝基防渗帷幕灌浆,以固结破碎岩石,封堵渗漏通道。经验表明,帷幕灌浆在制止非岩溶地区漏水方面效果显著。帷幕底部应深入到相对不透水层,两端延伸至水库正常蓄水位与蓄水前地下水位或相对不透水层相交处,或与库周防渗帷幕相接。帷幕

灌浆的方向宜与岩体主导裂隙方向正交,采用倾斜式帷幕或垂直帷幕。

然而在岩溶地区,帷幕灌浆不一定能成功。土耳其 Kalecik 大坝高 77 m,右岸岩层夹有灰岩,有岩溶和断层发育,为此修建了 60 m 深、200 m 长的灌浆帷幕。蓄水后,下游观测到新的泉眼,于是分 3 个阶段采取了修补措施,包括对主帷幕进行补充灌浆,以充填裂缝和岩溶洞穴,增加勘探孔并加深帷幕等^[5]。处理后,坝下涌泉眼的流量虽然减小了,但随着时间的推移,推移渗漏通道转移并扩张,渗漏问题依然没有解决。

在帷幕灌浆不成功的情况下,可以采用在基岩中建造混凝土防渗墙的手段。例如美国的丰塔内莱坝(Fontaell)位于砂岩地基上,曾进行大范围的水泥灌浆,由于渗漏重复出现而未成功。后来采用液压铣开槽机,在砂岩中挖槽最深达 55 m,造墙 7.5 万 m² 之后再也没有出现任何与渗漏有关的问题。而且,这种防渗墙的单价也仅相当于 3 排孔帷幕灌浆造价的 2/3,在同样花费的条件下其防渗效力是帷幕灌浆的 10~100 倍^[6]。

2.2.2 覆盖层地基防渗

2.2.2.1 各种防渗墙

垂直防渗技术目前在覆盖层地基处理中已普遍使用,其厚度一般为 0.6~1.2 m,墙段之间结合紧密,可以较为彻底地截断渗透水流,几乎达到完全止水,能适应各种松散地基复杂的地质条件,且施工进度较快,便于机械化施工。在墙体材料方面,有普通混凝土、钢筋混凝土、塑性混凝土、黏土混凝土、自凝灰浆和固化灰浆等。造墙、造孔机具多种多样,对几乎各种地层都能找到适宜的手段和材料,建造各种厚度和深度的防渗墙^[6]。

在松散透水地基中使用较普遍的是混凝土防渗墙,其施工进度快,费用也低于帷幕灌浆,能适应各种松散透水地基的复杂水文地质与工程地质条件。但也存在一些缺点:其每平方米单价比黏土防渗墙单价高 1 倍左右,工艺繁琐,墙体弹性模量比周围土体高出几百倍,抗裂性能较差,与地基变形不相适应,接缝质量不易安全保证。即使 80 cm 厚的低弹性模量混凝土防渗墙,使用数年后也易发生损坏,形成贯穿性裂缝或贯穿洞。一旦损坏后,须放空水库进行加固处理,带来的发电损失较大。

2.2.2.2 基底截渗槽

截渗槽是明挖至基岩或不透水层,与经缩小断面后的土石坝的心墙相连接,以截断表部大的渗流^[6]。在抽水蓄能电站中,截渗槽一般不单独使用,而需在其下面加做灌浆帷幕或防渗墙。

2.2.2.3 上游铺盖

在抽水蓄能电站中,坝基覆盖层如采用上游铺盖,一般需与库盆铺盖相连接。铺盖由不透水的黏性土经碾压而成,重点部位还可铺设一层土工薄膜(布),以增强其防渗性能。铺盖与坝体防渗墙相连,并向上游延伸一定距离,以延长水的渗流途径,减少水力比降,达到减少渗流量的目的。但单独采用这种措施防渗效果较差,当用于透水性很大、厚薄悬殊的地基时,将会引起不均匀沉陷,产生落水洞,使铺盖遭受破坏。所以一般只能用在覆盖层较薄、透水性较小且均匀的地基上,而且需要的铺土厚度较大^[6]。

2.3 库盆防渗

库周单薄分水岭、垭口、库底或库周的透水岩层处,地下水位常常低于水库正常蓄水位,渗漏问题成为水库勘测研究的主要内容。根据新发布的抽水蓄能电站设计标准,库盆岩体透水率不大于 1 Lu 时是可以满足要求的,或者库盆内有部分弱透水性下限的岩体(3 Lu),当其渗漏量不大于库容的 0.05% 时也满足要求。因此,仅从水库渗漏量分析其防渗要求以 1~3 Lu 为宜^[1],但需以水库渗漏不影响到地下厂房或库岸内、外坡稳定为前提。如果库周地下水位低,地层透水率不满足要求的话,那么应该采取全封闭的表面防渗或垂直防渗措施。

采用全库盆防渗时,沥青混凝土面板和钢筋混凝土面板应用得很普遍。虽然二者的单位防渗面积造价基本接近,但混凝土防渗面板坡比较陡(1:1.3~1:1.5),而沥青混凝土面板受沥青材料热稳定性和施工限制,坡比必须较缓(1:1.7~1:2.0),使得投资较大,并减少有效库容。值得注意的是,对软岩、软弱夹层、构造破碎带、岩溶洞穴以及变形特性有差异的地层,需在铺设面板之前对基底进行适当加固处理,以避免产生衬砌开裂、面板塌坑等现象,影响防渗效果。

如果库岸地形较陡,必须对岸坡采取开挖回填等措施才能做钢筋混凝土护面,而且需要插筋锚固,分缝止水工程量较大。在这种情况下使用钢筋混凝土面板不仅工艺复杂,而且造价较高,存在边坡稳定问题。

库盆岩体透水率较高而地形较缓时,采用铺盖土料、土工膜、水泥土或沥青混凝土等方法比较经济,尤其适用于强透水层较深而不便采取垂直防渗措施时。这种水平防渗形式施工简单,能减小渗流坡降,防渗效果显著。对抽水蓄能电站而言,铺盖减少了死库容,有利于水库充水、放空及库盆护面工程的检查和维修。

许多抽水蓄能电站选址在山顶或城郊、旅游区,常因土料匮乏或环保要求而不能取土,需采用代替土料的铺盖物。目前生产的复合土工膜纵横向抗拉强度已达到 15 kN/m 以上,渗透系数为 $10^{-11} \sim 10^{-12}$ cm/s,抗渗强度达 0.6 MPa 以上,具有防渗性能好、延伸性强、造价低、施工便捷、使用寿命长等优点,能适应库底堆碴沉陷量大且变形不均匀的现实情况。而且,采用复合土工膜,厚度大幅度减小,施工进度可以大大加快,可避免取土而引起土地资源和植被的破坏,而造价比土料铺盖要节约 50%。泰安抽水蓄能电站上库底采用土工膜铺盖,蓄水后观测的渗流量和渗压数据表明其防渗效果很好,其造价约为传统的钢筋混凝土面板水平防渗层的 30%~40%。与采用钢筋混凝土面板方案相比,节省直接投资约 3 200 万元,如与沥青混凝土防渗相比,节约投资约 10 350 万元^[7]。

2.4 局部通道防渗

当库周天然封闭条件较好时,只需封闭局部渗漏通道,以尽量减少降渗范围。抽水蓄能电站库周难免有贯穿性的裂隙密集带、胶结差的断层破碎带、倾向库外的软弱结构面或透水岩层(如砂砾岩),有的甚至建在岩溶发育区(如琅琊山 PSPS),往往形成通向库盆外的主要渗漏通道。容易疏忽的一种情况是,某种渗漏通道虽然延伸不远,不直接贯通到库盆外,但它们与库盆周边的基岩裂缝、透水岩体相连通,起一种渗漏桥梁作用。另外,局部渗漏通道中的渗流会降低结构面软弱物质的抗剪强度,对裂隙或断层中充填物产生冲刷或管涌,影响岸坡的稳定性。因此,应全力封堵,可视具体情况分别采用如下几种措施:

a. 对规模较大、有多量软弱充填物的渗漏通道,首选灌浆堵漏方法,对严重破碎带需沿断层加深加密帷幕灌浆孔,而且必须使钻孔与渗漏通道相遇,并讲究合理的施工工艺。渗漏通道的地表出露处深挖 0.5~1.0 m 后铺设塑性混凝土或沥青混凝土盖层,以免水流冲刷。

b. 对库周浅部普遍发育且多为张开的裂隙密集带,采用表面防渗形式比较简单、经济、可普遍铺筑 0.5 m 左右的混凝土或钢筋混凝土盖层,也可垂直坡面方向作倾斜钻孔灌浆,使钻孔尽量多地穿过裂隙,并有利于帷幕稳定。

c. 对直接或间接连通到库外的平缓裂隙岩层或透水岩层,采用垂直帷幕灌浆防渗手段能减少防渗面积。

d. 库盆如果发育岩溶的,由于岩溶通道的动态变化,混凝土面板防渗形式不太可靠。如采用防渗

帷幕,对防渗帷幕线上的空腔溶洞应先灌注水泥砂浆和高流态混凝土,再灌水泥浆;有充填泥的溶洞应采用高压水泥浆进行挤压充填处理;库盆地表溶洞发育区还应采取水平黏土铺填的辅助防渗措施^[8];对建筑物基础下的溶洞应先掏挖置换混凝土。

3 工程应用

3.1 工程概况

江苏省某抽水蓄能电站装机容量 1 500 MW,发电最大水头 290 m,上下库进水口水平距离 1 700 m, L/H 约为 0.17。上水库周围 3 面为高低不同的山脊,一面为冲沟,修筑 1 座主坝和 2 座副坝,主坝最大坝高为 161 m。

3.2 防渗设计基础资料

上水库区地貌为低山,山脊整体较单薄,库周地表分水岭高程高于设计正常蓄水位 9 m 以上段约占 80%,主坝右坝头和库周南岸垭口段分水岭单薄,存在两处低于正常蓄水位的垭口。地层主要为志留系上统砂岩,层厚为 0.5~3 m,部分地段岩层倾向库外,岩体完整性差,风化强烈,断层及节理裂隙密集发育,易形成库水外渗的通路通道,并可能沿断层发生渗透变形。地下分水岭水位低于正常蓄水位,最低处低于正常蓄水位约 150 m,相对不透水层顶板低于正常蓄水位 20~135 m。综合考虑以上渗漏问题,对上水库宜实施库盆全面防渗处理。

坝址地形欠整齐,岩性以中厚-巨厚层岩屑石英砂岩为主,有多条断层通过,坝基岩体完整性差,呈镶嵌碎裂结构,风化强烈,如采用重力坝,则坝基存在严重的不均匀沉降问题,开挖将非常深。但坝址附近有数量足够和质量符合要求的土石坝材料,如修建面板堆石坝,则不仅能克服地形地质条件缺陷,还能充分利用上、下水库开挖料作为筑坝材料,减少弃渣,工程投资和环保条件均较优。

3.3 防渗方案比较与选择

在可行性研究阶段对垂直防渗和表面防渗的多种方案进行了深入研究和经济技术比较。

垂直防渗拟定了两种形式:库周帷幕灌浆方案、库周钢筋混凝土面板+库底帷幕方案。表面防渗方案包括了 3 种形式:全库盆钢筋混凝土面板、库周钢筋混凝土面板+库底黏土土工膜组合、库周沥青混凝土+库底黏土土工膜组合。经比较,表面防渗方案的工程量较小,估算渗水量是垂直防渗方案的 20%~25%,防渗可靠性较高,对地下厂房的围岩稳定和防渗排水有利,工程投资较省。因此,选定了全库盆表面防渗方案。

结合坝体与库岸防渗结构的统一,将大坝和库

周表面防渗方案分为钢筋混凝土面板和沥青混凝土面板两大类,并分别比较了研究范围和基本条件一致、研究深度相同的多个方案。经计算,钢筋混凝土方案的平均总渗水量占调节库容的比重为0.018%,沥青混凝土方案的平均总渗水量占调节库容的比重为0.011%。但是,沥青混凝土方案的坝体填筑量多200万 m^3 ,经土石方平衡计算,需开挖的库底高程低5m;由于其施工工艺复杂,目前国内尚缺乏专业施工队伍,对气象条件有严格要求,当地年施工天数仅约170d,对施工程序安排、施工进度均有不利影响。而钢筋混凝土面板在国内已有成熟的施工经验,对岩层倾向库外的岸坡防护较为稳妥可靠,施工进度易于安排,工程投资平均节省4%以上,因此选定了大坝和库岸钢筋混凝土面板方案。

库底防渗结构分为6个方案:土工膜、沥青混凝土面板、黏土、高低土工膜、部分土工膜+黏土、黏土+全土工膜组合。其中“黏土+全土工膜组合”方案综合了黏土方案和土工膜方案的优点,避免了其缺点。下水库冲积土开挖量能满足上水库填筑土量要求,无需另外征用农田取土,渗水量最小,比其余方案渗水量最大者低约48%;工期比其余方案最短者长3个月,但不是关键线路;土工膜上部设置的黏土层可保护土工膜免受下层尖角物体的刺破,导引滞留的水流以汇集到管道排出,下部设置的黏土层可以作为土工膜的支持层,保护土工膜。虽然该方案的投资比其余方案投资最省者多0.8%,但考虑到其防渗效果的优越性、可靠性,结合考虑当地黏土储量,故选定该组合方案。

3.4 防渗方案设计

主、副坝钢筋混凝土面板采用等厚0.4m,死水位以上垫层区粒径小于5mm的含量控制在35%左右,渗透系数控制在 $1 \times 10^{-2} \sim 1 \times 10^{-3} \text{ cm/s}$ 之间;库岸钢筋混凝土面板采用等厚0.3m,岸坡开挖坡比1:1.4,面板下铺0.8m厚碎石垫层,库底开挖区与回

填区均采用黏土+土工膜组合防渗方案,防渗体从上至下依次为碎石护面层、4.5m黏土层、1mm厚土工膜、500 g/m^2 土工织物、0.5m厚黏土、0.5m厚第1层反滤层、0.5m厚第2层反滤层、1m厚过渡层。

通过渗流场有限元分析,在正常使用情况下即使水位骤降,由于面板发挥作用,对坝体渗流的影响轻微,坝体渗流量很小,满足防渗要求。

4 结 语

抽水蓄能电站水库防渗形式应以各自的水文地质条件和工程地质条件为基础,分析渗漏特征、库周岸坡和工程建筑物的渗透稳定性,并对各种可能的措施从防渗效果、施工工艺、投资费用、可靠性、易修复性等方面进行综合比较,选择经济合理的最佳手段。

参考文献:

[1] DL/T5208—2005,抽水蓄能电站设计导则[S].
[2] 陆佑楣,潘家铮.抽水蓄能电站[M].北京:水利电力出版社,1992:308-311.
[3] 蒋长元,蒋颂涛,等.沥青混凝土防渗墙[M].北京:水利电力出版社,1992:7-73.
[4] 丁耿龙,叶合欣.惠州抽水蓄能电站水库渗漏条件分析[J].水利水电科技进展,2006,26(1):50-53.
[5] TURKMEN S. Treatment of the seepage problems at the Kalecik Dam(Turkey) [J]. Engineering Geology, 2003(3/4):159-169.
[6] 张景秀.坝基防渗与灌浆技术[M].北京:水利水电出版社,2002:26-54.
[7] 李岳军,周建平,何世海,等.抽水蓄能电站水库土工膜防渗技术的研究和应用[J].水力发电,2006,32(3):67-70.
[8] 张克,郝荣国,吴奎.琅琊山抽水蓄能电站工程关键技术问题[C]//抽水蓄能电站工程建设论文集.北京:中国电力出版社,2006:128-129.

(收稿日期:2006-09-05 编辑:高建群)

(上接第29页)

[3] 邓聚龙.灰色理论基础[M].武汉:华中科技大学出版社,2000(2):282-300.
[4] 姚晏斌,高金华.灰色模型GM(1,2)在机场旅客吞吐量预测中的应用[J].中国民航飞行学院学报,2006,17(4):12-16.
[5] 左书华,李久发,万新宁,等.长江河口年平均流量的灰色拓扑预测与趋势分析[J].水力发电,2005,31(12):19-21.
[6] 应铭,李九发,万新宁,等.长江大通站输沙量时间序列

分析研究[J].长江流域资源与环境,2005,14(1):83-87.
[7] 沈焕庭,潘定安.长江河口最大混浊带[M].北京:海洋出版社,2001:15-17.
[8] 王秀英,曹文洪,覃莉.灰色系统GM(1,1)模型在河流泥沙变化中的应用[J].水土保持学报,1999,5(6):110-115.
[9] 刘绿柳,金爱善,卞建民.带权GM(0,h)模型在地下水开采-地面沉降研究中的应用[J].世界地质,2000,19(1):57-60.
[10] 郝永红,等.山西神头泉流量的灰色预测模型研究[J].水利学报,2004(2):111-115.

(收稿日期:2007-02-12 编辑:高建群)