南水北调宝应泵站新技术的应用

滕海波[1]，仇宝云[2]，汤正军[1]，曹美萍[1]
（1. 江苏省江都水利工程管理处，江苏 江都 225200；2. 扬州大学 能源与动力工程学院，江苏 扬州 225009）

摘　要：宝应泵站是南水北调东线工程第一个开工建设、建成，并通过试运行验收，发挥作用的泵站，要求设计年运行时间长、水泵无故障运行时间长，水泵不能对水质产生二次污染。泵站建设中，在水泵选型、流道优化及先进的施工工艺技术、水泵叶片调节机构配置、电机绝缘在线检测等方面采用了一系列新技术。水泵采用了日立公司研制的性能指标具有国际领先水平的Ns1250KSP全调节混流泵水力模型；引进了具有国际先进水平的中置式液压调节机构技术；4台机组中，2台套为全引进的全调节式混流泵，另外2台水泵由国内公司按日立公司图纸生产。应用结果表明，新技术效果明显，达到了泵站运行高效、环保和安全可靠的目的。通过对宝应泵站新技术的分析，研究新技术对提高泵站性能的作用，对其在南水北调工程和其他工程中推广应用有重大意义。

关键词：南水北调；宝应泵站；新技术；应用
中图分类号：TH311　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：1005－6254(2007)03－0021－06

Application of new techniques in Baoying Pumping Station for South-to-North Water Transfer Project

TENG Hai-bo[1], *QIU Bao-yun*[2], *TANG Zheng-jun*[1], *CAO Mei-ping*[1]
(1. Jiangdu Water Conservancy Works Bureau of Jiangsu Province, Jiangdu, Jiangsu 225200, China; 2. School of Energy and Power Engineering, Yangzhou University, Yangzhou, Jiangsu 225009, China)

Abstract: Baoying Pumping Station is the first pumping station of eastern route for South-to-North Water Transfer Project, which has been built, completed and come into use. It is requested that the designed and normal operation time should be long, and the pump can not cause water pollution. During the building of pumping station, new construction techniques were introduced, a series of new techniques were adopted about pump types selection, discharge passage optimization, pump blade adjusting mechanism and electromotor on-line insulation monitoring. The performance index Ns1250KSP type full adjusting mixed-flow pump hydraulic model made by Japan had reached international preceding level, the techniques of mid- hydraumatic adjusting mechanism had international advanced level. There were 4 pump units. Two units of full adjusting mixed-flow pump were introduced fully, the other were made by domestic company following the drawing for Japanese company. Application results showed that the effect of new techniques was obvious, and the objective that pump system operating in high efficiency, environmental protection, security and reliability had been attained.

Key words: South-to-North Water Transfer Project; Baoying pumping station; new techniques; application

收稿日期：2007－01－22
基金项目：国家自然科学基金项目(50179032)；江苏省水利动力工程重点实验室项目(KJS03086)；江苏省教育厅指导性计划项目(LK0310070)；江苏省青蓝工程学术带头人人才基金资助项目
作者简介：滕海波(1977－)，男，江苏淮阴人，工程师，工程硕士，主要从事大型泵站的技术管理的研究。
仇宝云(1962－)，男，江苏扬州人，教授，博士，博士生导师，主要从事大型水泵与泵站的研究。

万方数据

1 宝应泵站工程概况

南水北调宝应泵站位于扬州市宝应县汜水镇，作为南水北调东线一期工程的水源工程，其主要作用是与江都抽水站共同组成第一级抽水站，以满足南水北调规划确定的东线一期工程抽江水500 m^3/s北送的要求，并可结合抽排里下河地区涝水。

宝应泵站是南水北调东线工程第一座开工建设的泵站，泵站于2003年9月2日开工建设，2005年10月9日通过江苏省南水北调工程建设领导小组办公室组织的试运行验收，工程总投资1.4亿元。

宝应泵站一期工程设计流量100 m^3/s，工程由泵站、下游清污机桥、扬淮公路桥、灌溉涵洞及室内110/10 kV变电所和相应的管理设施组成。泵站选用3500HDQ－7.6型立式导叶式液压全调节混流泵，配TL－3400/48立式同步电动机4台套，水泵叶轮球面直径3 500 mm，设计扬程7.6 m，单泵设计流量33.4 m^3/s，配套电机功率3 400 kW，总装机容量13 600 kW。

如图1，宝应泵站采用堤身式布置，肘形进水流道，虹吸式出水流道加真空破坏阀断流。泵站由站身和驼峰段两部分组成。站身是泵站的主体，宽22.1 m，长33.4 m，内部自下而上为进水流道层、水泵层、联轴器层和电机层。

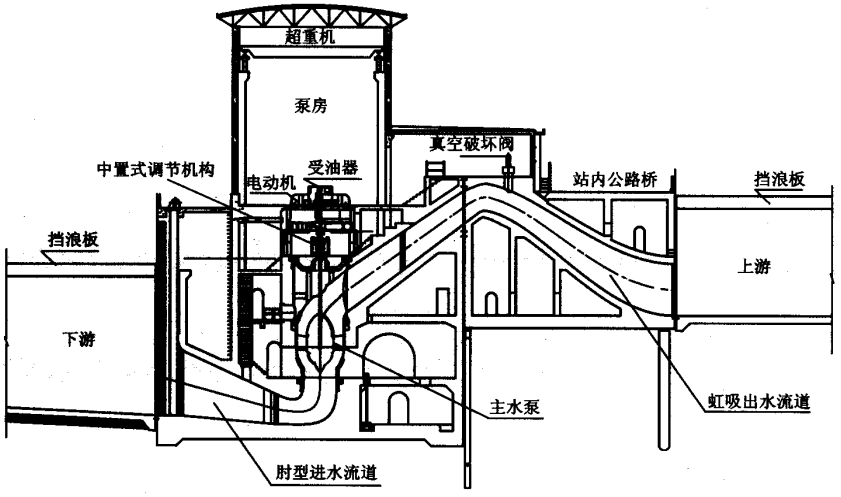

图1 宝应泵站站房剖面

宝应泵站作为南水北调首个开工建设的泵站，非常重视新技术的应用与研究。对宝应泵站新技术的应用进行研究分析，有利于新技术的改进和推广应用。

2 宝应泵站新技术应用情况

宝应泵站主水泵流量大（目前国内最大的全调节导叶式混流泵），设计年运行时间长（不少于5 000 h，要求水泵无故障运行时间长（大于18 000 h），技术要求高，可用率不低于99.5%，叶片调节力大（最大调节力达70 t），要求水泵不能对水质产生二次污染。

为了将宝应泵站建成国际一流、国内领先的泵站，水泵采用了日本日立公司研制的性能指标具有国际领先水平的全调节混流泵水力模型；引进具有国际先进水平的中置式液压调节机构技术。其中2台水泵的叶轮、导轴承、中置式接力器、受油器、油压装置、叶片控制柜直接进口日立公司的产品。在引进日立公司技术的同时，派我方技术人员到日立公司进行技术培训，并请日立公司技术专家来华对国内的技术人员进行技术培训指导，对引进技术进行消化、吸收和转化，另2台水泵采用日立公司的先进技术，由国内锡泵公司制造。

2.1 先进水力模型的选用

宝应泵站的年运行时间长、运行成本大，泵站的运行效率是影响泵站运行成本的关键因素。在叶片角度一定时，混流泵高效区宽于轴流泵，并具有良好的功率特性，在其他条件相同的情况下，应优先选用混流泵[1]。因此，宝应泵站选用了全调节立式导叶

万方数据

式混流泵，采用日本日立公司研制的具有国际领先水平的Ns1250KSP混流泵水力模型。所选混流泵装置模型水力性能指标均高于文献[2]中南水北调低扬程泵装置模型水力性能的建议考核指标。宝应泵站在初步设计阶段要求水力模型最高效率在85%左右，而日立公司提供的水力模型最高效率达到了88%[3]。国内外相关水力模型性能比较如表1。与国内外优秀的水力模型相比，Ns1250KSP模型具有流量大，效率高，高效范围广的优点；与国内相近比转速的最优秀模型相比，流量大8.5%～10%，高效区效率平均高2%左右，因此，Ns1250KSP模型代表了当今国际混流泵水力模型的领先水平，该水力模型在世界范围内已广泛应用在大型水泵上。

表1　宝应泵站水泵水力模型性能选型比较

模　型	Ns1250KSP	国内模型Ⅰ	国内模型Ⅱ
流量/(m^3/s)	0.477	0.412	0.406
扬程/m	11.4	10.0	6.85
转速/(r/min)	1 450	1 450	1 450
叶轮直径/mm	300	300	300
效率/%	87.6	85.5	85.4
比转速 n_s	588	573	796

2.2　国外两套全调节式混流泵的引进

宝应泵站共装有4台机组，其中2台水泵的叶轮、导轴承、中置式接力器、受油器、油压装置、叶片控制柜直接进口日立公司的产品。同时，引进了水泵生产技术，按照同样图纸由国内锡泵公司成功制造另外2台主水泵，叶片操作机构和接力器采用日立公司的成熟先进技术，关键零件如球接头、叶片轴承、密封、配压阀、伺服电机等直接从日立公司进口。

日立公司生产的2台水泵具有加工精确，工艺先进，过流部件形状保证率高等优点，先进的加工技术与优秀的加工质量保证了宝应泵站水泵与模型几何相似和关键部件的制造质量，为宝应泵站水泵机组高效运行提供了保证。

国内锡泵公司注重技术引进后的消化吸收，在水泵主要部件加工上采用一系列先进的工艺。叶片及叶轮外壳采用耐腐蚀及抗汽蚀性能良好的不锈钢材料。叶轮材料采用ZG0Cr18Ni9(相当于日本JIS标准SCS13)不锈钢单片整体铸造；在水泵叶片制造中应用现代集成制造技术，改变水泵行业在关键零件上(叶轮)的传统加工方法——铸造成形＋表面打磨，实际采用现代集成制造技术——三维CAD实体建模＋精密铸造成形＋五轴联动数控铣床精密曲面加工CAM，实现CAD/CAM一体化，确保大泵叶片型面与模型叶片几何相似，与设计型面相吻合，具有良好的表面加工质量，从而保证大泵性能，提高水泵效率；轮毂体采用ZG270－500整体铸造，数控机床加工；泵轴轴颈部位采用堆焊3Cr13不锈钢硬质合金，以提高轴颈部位的表面硬度并保证表面硬度的均匀性，提高其耐磨性，从而提高泵轴的使用寿命。

2.3　进、出水流道的优化水力设计

宝应泵站的水泵进、出水流道模型与水泵模型同时引进，并由扬州大学采用计算流体动力学(CFD)方法，进行流动数值模拟分析和优化，适当增加原肘形进水流道的高宽比；对原虹吸式出水流道适当压缩，改善水流流态，减小流道水力损失，同时做模型对比试验。在模型试验中观察到优化前、后的进出水流道内流态与三维数值计算的结果基本一致。优化后在设计工况和非设计工况下的水力损失比优化前明显减小，有效提高了泵装置效率。优化前后的水力损失如表2[4]。

表2　宝应泵站原型进水流道优化前后的水力损失

方案	水力损失/m		
	最小流量(25.0 m^3/s)	设计流量(33.4 m^3/s)	最大流量(41.8 m^3/s)
原方案	0.235	0.401	0.605
优化方案	0.172	0.296	0.451

宝应泵站采用的肘形进水流道，经过优化设计后，水力损失明显减小，在设计流量下两者相差0.105 m。出水流道优化方案下降段的线型为四次曲线，线型变化符合水流转向、扩散的基本规律，而原方案出水流道下降段的线型为直线，线型变化僵硬，具体数据见表3[4]。

表3　宝应泵站原型出水流道优化前后的水力损失

方案	水力损失/m		
	最小流量(25.0 m^3/s)	设计流量(33.4 m^3/s)	最大流量(41.8 m^3/s)
原方案	0.186	0.335	0.526
优化方案	0.158	0.276	0.428

从表3看出，优化方案的虹吸式出水流道水力损失小于原方案，设计流量时的水力损失小0.059 m。

2.4　采用先进的流道施工技术与工艺

宝应泵站的进、出水流道经扬州大学优化改进后，流道线型合理，水力损失小。但是，施工中采用先进的技术与工艺，对保证流道的形状和施工质量，非常关键。

在宝应泵站水流道砼浇筑中采用了防裂新技术，收到了较好效果[4]。具体做法是：针对泵站联轴器层

万方数据

及站身出水流道层大体积混凝土的抗裂性能开展了系统研究,通过优化配比,在配置C25水工混凝土时,掺入体积掺量为0.08%的聚丙烯腈微细纤维(0.95 kg/m^3 纤维混凝土),不仅显著改善了混凝土的一系列物理力学性能,而且提高了大体积混凝土的抗裂性能和耐久性。掺入聚丙烯腈纤维后,混凝土的抗碳化能力提高了10倍多,耐磨度提高了32.5%,满足了宝应泵站工程混凝土结构的综合要求。

在混凝土添加掺入剂的基础上,对宝应泵站流道结构混凝土中的温度和应力状态随时间、空间的变化规律进行仿真计算,给出了典型剖点和剖面的温度应力过程线和等值线图。根据计算结果,综合分析肘型进水流道混凝土结构裂缝出现的可能性,判断可能出现的开裂时间和部位,然后优选防裂措施。施工中的主要做法是,在施工期特别是早期加强了混凝土表面的保温工作,在结构尺寸比较大的部位用砌石代替部分混凝土,由于砌石不放热,且在混凝土刚浇筑时还可以吸收周围的混凝土水化热,因此可以明显降低混凝土的最高温度,进而减小混凝土温差和收缩性,减小混凝土开裂的可能性。

此外,宝应泵站肘形进水流道和虹吸式出水流道平直段部分的模板均采用外表面喷塑的大型竹胶板贴面,内部木结构支撑。出水流道驼峰段的异型部位模板采用在加工场按1:1放样,按3~4 m分段制作,采用木结构龙骨。为了确保流道内表面圆滑和具有足够的强度,用5 cm宽的薄木条分3~5层纵横交错贴订,成型后涂刮腻子并进行打磨,最后进行喷塑处理。经这样处理,在拆模后,流道砼表面光洁顺滑,降低了流道的表面粗糙度,减小了流道的水头损失。

2.5 大型水泵液压调节关键技术的引进

文献[5]分析了宝应泵站采用液压全调节的可行性,提出了采用中置式环境型叶片调节机构方案。该项目为水利部"948"项目。宝应泵站机组为叶轮角度全调节机组,油压接力器采用的是日立公司具有国际先进技术水平的中置式油压结构;活塞式接力器设置在水泵轴与电机轴联轴器之间,结构安装、维护方便,最大的特点是水泵叶轮和泵轴内没有压力油,使水泵从结构上解决了国内采用的下置式油压结构因叶轮内压力油泄漏而污染水质的问题,为南水北调工程提供了符合环保要求的水泵。该技术为国内首创。叶片调节机构受油器引进日立公司具有国际先进水平的成熟技术,结构紧凑可靠,调节力大,调节平稳可靠,控制精确,保证了水泵运行的可靠性。

叶轮内的叶片操作机构(球接头)及叶片转动轴承采用无油润滑轴承,排除了叶轮内的润滑油泄漏污染水质的可能。球接头及叶片转动轴承的结构、材料和制造工艺在水泵技术中未有先例,为首创技术。叶片密封采用新型的"V"型密封技术,"V"型开口向外,在外部水压的作用下,使"V"型开口张大,两边紧贴密封面,防止外部的水进入叶轮室内,起到了良好的密封作用。而国内传统的"λ"型密封主要是防止转轮腔内的油泄漏,因此当叶轮内无油,外部水压大于叶轮内部压力时,"λ"型密封已不适用。"V"型密封解决了"λ"型密封封油不封水的问题,在国内大型全调泵技术中也是首次使用。

2.6 先进的电机绝缘在线检测技术

该项目是水利部"948"项目。宝应泵站引进了加拿大IRIS公司生产的"电机在线局部放电监测仪"及相应的软件,该设备技术具有国际领先水平,可以改善目前我国电机绝缘监测状况,极大地提高电机绝缘监测的自动化水平,提高了电机运行的可靠性,实现电机现场状况的遥测和预警,在我国泵站具有广泛的市场和推广前景。

传统上,通常采取周期性做交流耐压试验的方法,了解电机的绝缘情况,一般1~3年一次。这种周期人工绝缘监测存着诸多不足,例如:需要停机测试,会影响正常的运行工作;检测周期较长,不利于及时发现缺陷;每次这种试验本身都是对电动机绝缘的一次冲击和损伤,降低了电机的使用寿命。而应用先进的绝缘在线监测技术,能够及时发现绕组绝缘下降或破坏情况,从而保证电机的正常安全运行。

电机绝缘性能主要反映在电机的局部放电特性上。局部放电脉冲具有如下特性:

(1)上升时间极快的小电流脉冲,即:超窄脉宽的脉冲;

(2)在放电原点处,脉冲的上升时间大约只有1~5 ns;

(3)局部放电脉冲的频率f大约在50~250 MHz之间。因此,监测局部放电信号必须在高频段监测,至少在50~250 MHz,具体见图2;图3是局部放电脉冲和噪声脉冲频率的分布图。

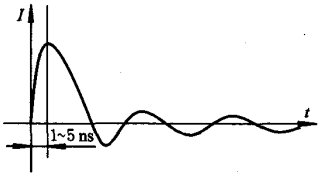

图2 电机局部放电特性

万方数据

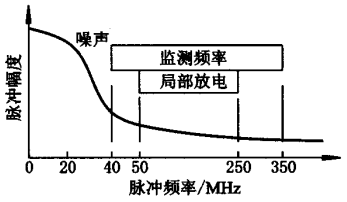

图3　电机局部放电脉冲和噪声脉冲分布

由图3可以看出，噪声脉冲的频率通常小于20 MHz，在高频谱范围内监测局部放电信号可以获得较高的信噪比（信噪比 = 局部放电信号/噪声信号）。如果噪声信号不能被仪器自动分离，则监测的结果将难以应用；如果噪声信号能够被仪器自动分离，则监测结果可以应用。

IRIS公司设计和生产的耦合器和局部放电仪成功地分离了噪声信号和局部放电信号，母线耦合器是80 pF的环氧云母电容器，简称EMC。PDTrac™局部放电监测仪将母线耦合器的低压端及湿度传感器通过电缆接入PDTrac，从PDTrac的以太网接口通过一个网络集线器（Hub）直接连接到控制室的主机上，在控制室的主机上安装了IRIS电力工程公司的PDPro及PDView软件，安装成功后，在软件上进行了各种参数的设置；用笔记本电脑通过PDTrac面板上的RS232口分别与4台PDTrac相连，通过IRIS电力工程公司的相应软件设置4台PDTrac的IP地址。

PDTrac™局部放电监测仪是通过PDTrac来采集并存储数据的，PDTrac最长可以存储两年的数据。通过安装在控制室主机的软件可以连接PDTrac仪器并下载PDTrac内存储的最新或历史数据，通过软件还可以得到电机每相的放电值Q_m（放电值Q_m——局部放电脉冲幅度在每秒10个脉冲处的峰值）、放电量NQN（放电量NQN——局部放电脉冲活动的总数）及每相的局部放电图。

宝应泵站的“PDTrac™局部放电监测仪”可以提供2维局部放电脉冲幅值分析图，还可提供2个综合性数据：放电值Q_m，放电量NQN。可以通过测量得到的局部放电图及Q_m值和NQN值与IRIS公司的数据库中的数值进行比较，从而查找出电机当前的局部放电指标，反映出电机的绝缘特性。

3　宝应泵站新技术应用效果

宝应泵站在设计、施工中采用的一系列新技术、新工艺、新方法，为其在2005年的试运行和2006年的正式运行中提供了主要的技术保障，取得了较好的应用效果。

3.1　模型泵装置效率

根据2003年12月宝应泵站模型装置验收试验，模型装置最高效率达到81.4%。而我国已建的许多大型泵站的模型装置试验，模型装置最高效率一般在72%～76%之间，例如刘老涧泵站75%，泰州引江河泵站74%，太浦河泵站72%[6]。宝应泵站泵装置效率比国内已建大型泵站有了很大的提高，达到了当今国际先进水平。

3.2　原型泵装置效率

表4是在泵站试运行时进行效率测定时的相关数据，在装置扬程为5.58～6.37 m时，泵装置效率达81.0%～83.8%，比较理想，与在日立公司进行的模型装置试验效率基本吻合，远远高于我国泵站设计规范中混流泵站装置效率不宜低于70%的要求。

表4　宝应泵站2005年10月试运行验收测试数据

测次	观测时间		水位/m		装置扬程/m	运行机组	电机总功率/kW	站流量/(m^3/s)	平均装置效率η/%	能源单耗/[kW·h/(kt·m)]
	日	时	前池	出水池						
1	8	8:00	1.25	6.83	5.58	2#～3#	4 925	75.0	83.4	3.266
2	8	9:00	0.65	6.92	6.27	1#～3#	8 320	110.0	81.3	3.351
3	8	15:00	0.50	6.87	6.37	1#～4#	10 183	132.0	81.0	3.363
4	9	8:00	1.10	6.87	5.77	1#	2 607	38.6	83.8	3.251

3.3　安全运行与抽水成本

在2005年10月宝应泵站的试运行验收中，主机泵运行平稳，水泵电机噪音、振动均在标准范围内，各种电量、非电量参数均正常，符合技术规范要求；泵站辅机系统运行正常。最终，宝应泵站顺利通过由江苏省南水北调工程建设领导小组办公室组织的试运行验收。

在2006年7月的排涝运行中，宝应泵站连续运行11天，共820台时，所有运行机组均运行安全、可靠，没有发生一次故障或事故停机。

从宝应泵站试运行和正式运行可以看出，在机组选型、流道设计和施工中所采用的新技术、新工艺效果非常显著。在2006年7月的排涝运行中，单泵最大流量超过40 m^3/s，全站最大流量达162 m^3/s，

万方数据

累计抽排涝水 $1.093\ 3\times10^{8}\ m^{3}$，共耗用有功电量 $1.957\ 560\times10^{6}\ kW\cdot h$，花费电费855 943.11元，能源单耗为3.251～3.363 kW·h/(kt·m)，远低于原水利电力部《泵站技术规范》(管理分册)规定的5 kW·h/(kt·m)的指标，同时也低于目前国内大型泵站的能源单耗。

3.4 泵站管理

宝应泵站采用的新设备、新技术给泵站管理也带来极大的方便。

采用的“电机在线局部放电监测仪”与计算机监控系统方便对接，数据传递精度高，实现对电机运行绝缘监测的遥测、遥控和无人值守。在不停机的情况下确定电机的绝缘特性，给出电机维修的优先级，预测电机可能出现故障的时间。先进的专家分析软件系统能让非专业人员熟练地诊断潜在的问题并制定有效的维护和运行策略。

宝应泵站采用的自动化控制与视频系统，提高了泵站管理的安全性与便利性，泵站采用的新技术对提高管理水平起到了重要作用。

4 结 论

宝应泵站于2005年9月预试运行，10月试运行验收，12月1日接受了国务院南水北调建设委员会专家委员会的现场开机检查，2006年7月正式投入排涝运行。

宝应泵站在以下方面采用了新技术：

(1)选用先进高效的水泵水力模型，对原进、出水流道进行优化设计，减小水力损失，提高了模型泵装置效率。

(2)2台水泵直接从国外引进，另2台由国内厂家消化吸收国外先进技术生产，采用先进的流道施工工艺，保证了原型水泵装置的制造、施工质量和精度。

(3)采用先进的中置式接力器和叶片无油密封油压式叶片全调节机构，保证了泵站不会对水质产生污染。

(4)采用先进的电机绝缘在线监测技术，便于及时了解电机绝缘状况，提高了可靠性。

应用结果表明，宝应泵站新技术的应用保证了泵站安全、高效运行。随着我国南水北调工程建设高潮的到来和我国泵站工程的发展，推广应用泵站建设中的新技术、新工艺，必将产生更大的经济效益和社会效益，推动我国机电排灌事业的发展。

参考文献(References)

[1] 仇宝云，袁寿其，冯旭松，等. 南水北调东线工程梯级泵站的几个问题[J]. 灌溉排水学报，2003，22(2)：69－73.

[2] 刘 超. 南水北调低扬程水泵装置水力性能考核指标探讨[J]. 排灌机械，2003，21(6)：2－5.

[3] 邓东升，刘 军，朱红耕. 混流泵模型及装置特性比较与分析[J]. 南水北调与水利科技，2006，4(5)：10－13.

[4] 刘 军，邓东升，马志华，等. 宝应泵站流道优化计算与模型试验研究[J]. 南水北调与水利科技，2005，3(2)：22－25.

[5] 魏 军，卜 舸，马志华，等. 南水北调工程宝应泵站叶片调节方式的选择[J]. 排灌机械，2006，24(4)：14－17.

[6] 邓东升，陆永泉. 南水北调东线工程水工混凝土抗拉强度的长期性研究[J]. 南水北调与水利科技，2005，3(1)：14－16.

(责任编辑 张文涛)

万方数据