

Design and Selection of Pumping Station Energy-Saving of South-to-North Water Transfer Project

Baoyun Qiu*, Xiaoli Feng, Jian Shen, Bei Pei, Xingli Yang

School of Energy and Power Engineering, Yangzhou University, Yangzhou, China, 225127

* Email: yzdxqby@sohu.com

Abstract: The East Route Project of South-to-North Water Transfer (ERP) consumes large amount of energy every year for large installed capacity and long run time. Based on the characteristics and requirements of ERP, reasonably selecting pump assemblies and power machines could save energy and operating cost. The pump system selecting requirements and setting principles of steps and heads of pumping stations were put forward. The factors influencing economic performances of pumping stations were analyzed. The design and selection methods of pumping stations were presented including installed capacity of one machine and unit quantity of one station, pump types, power spare coefficients of electric machines, types of axis, driving modes, forms of inlet and discharge passages and modes of adjusting operation duty. Under the premise of guaranteeing discharge, head and reliability, comprehensively considering characteristic heads, run time, equipment investments and operating cost of pumping stations, quantitative selection methods of the pump unit and its adjusting mode of operation duty were put forward based on optimal operation, and pump units and operation duty adjusting modes of typical pumping stations of ERP were selected.

Keywords: East Route Project of South-to-North Water Transfer (ERP); pump units of pumping stations; energy-saving of pumping stations ; design and selection; adjusting operation duty

南水北调工程泵站节能设计选型研究

仇宝云*, 冯晓莉, 申 剑, 裴 蓓, 杨兴丽

扬州大学能源与动力工程学院, 扬州, 中国, 225127

* Email: yzdxqby@sohu.com

摘 要: 南水北调东线工程装机容量大, 运行时间长, 能源消耗大。根据工程特点和要求, 合理选用水泵装置及配套动力机, 减少能源消耗, 节省运行费用。提出了水泵系统的选用要求与泵站梯级与扬程的设置原则, 分析了影响泵站经济性的因素, 给出了泵站机组容量与数量、泵型、电机功率备用系数、轴线形式、传动方式、进出水流道形式和工况调节方式的设计选用方法。在保证流量、扬程及可靠性使用要求的前提下, 综合考虑泵站特征扬程、运行时数、设备投资和运行费用等因素, 提出了基于优化运行的水泵机组及其工况调节方式定量选择方法, 并对南水北调东线典型泵站机组与工况调节方式进行了选择。

关键词: 南水北调东线工程; 泵站机组; 泵站节能; 设计选型; 工况调节

1 引言

南水北调东线工程在江苏省扬州境内长江取水, 沿京杭大运河及其平行河道送水北上至山东、河北和天

基金项目: 全国百篇优秀博士学位论文作者专项基金资助项目(2007B41); 江苏省六大人才高峰专项基金资助项目

Project Supported by Author Special Foundation of National Excellent Doctoral Dissertation of China (Grant No. 2007B41); Project Supported by Senior Expert Special Foundation in 6 Fields of Jiangsu Province of China

津, 解决生产和生活用水, 促进生态良性发展。工程从长江调水到黄河南岸规划设抽水泵站 30 处、13 个梯级, 总扬程 65 m, 设计总抽水能力 10 200 m³/s, 总装机容量 1 017.7 MW, 沿线经过洪泽湖、骆马湖、南四湖和东平湖等调蓄湖泊。

我国已开发出系列高性能的轴流泵水力模型及少数混流泵水力模型, 其水力性能达到国际先进水平。但许多泵站机组结构形式和功能不尽合理, 影响正常使

用；泵系统运行效率低，能源消耗大，运行费用高。不少学者分析了泵站运行效率低的原因，并提出了泵站技术改造的节能措施^[1~6]。

南水北调东线工程是国家大型重点工程，应根据工程特点和要求，在正确规划前提下，合理选用水泵装置及配套动力机的结构型式，节省运行、管理费用。

2 工程对泵系统的要求

南水北调东线工程水泵系统选用总体原则是，在满足抽水能力和启动、停机断流的前提下，应具有较高的安全可靠、运行效率和工况可调性，不污染水体。

工程投资量大，影响面广，供水可靠性直接影响受水区工农业生产和人民生活的用水。根据规划，泵站机组平均年运行时间 5 000~6 000 h，维护保养时间短。如果某一级泵站抽水流量不能保证，将影响其他梯级泵站乃至整个调水工程的正常运行。因此，机组结构型式选择应首先考虑可靠性，要求关键易磨易损部件故障少、寿命长，并具有较好的安装性和维修性。

根据需要选择泵机组的调节功能。目前我国水泵水力模型效率已经达到或接近发达国家的先进水平，再有明显提高不大可能，实现泵站高效运行的主要措施就是优化调度和变工况经济运行，泵站应根据自身特点选用机组调节功能^[7~9]。

3 泵站梯级与扬程确定

泵站梯级数影响工程投资。泵站相距远，高差大，扬程高，梯级少，则泵站建设投资少，但泵站出水侧的河道堤岸需要相应加高，河道工程投资增加。相反，泵站距离近，扬程低、梯级多，可以减小河堤高度，但泵站数量增加，泵站建设和管理费用增加。因此，应在保证输水河道原有灌溉、排涝及通航等功能的基础上，以工程调水成本（包括泵站运行年动力费用、泵站年管理费用以及泵站、设备、河道工程投资年折旧费用）最低为原则，优化确定泵站梯级设置。

泵站梯级设置及地点确定还需考虑现有泵站、河道和水文地质、交通等情况。根据规划，南水北调东线工程设置 13 个梯级泵站，设泵站 30 处。

4 影响泵站机组设备经济性因素分析

影响泵站机组设备经济性的因素包括：泵站使用寿命期内土建费用、设备费用、运行费用、管理费用以及维护检修费用。

泵站设备费用主要包括水泵、电动机、传动机构和工况调节机构费用等。如 2800ZGQ-2.5 泵机组设备费用为：高速电机 50 万元/台；低速电机 150 万元/台；齿轮箱 100 万元/套，每套齿轮箱运行寿命为 10 年，电机与水泵使用寿命期内，需更换一次齿轮箱。变频装置费用为 1200 元/kW；叶片调节机构费用为 80 万元/套。

泵站运行费用与水泵系统效率特性、运行调度、工况调节功能及变工况优化运行等有关。

水泵系统效率 η_{xt} 为泵装置效率 η_z 、传动效率 η_{dt} 、电动机效率 η_{mot} 和变频装置效率 η_{bp} 四者的乘积，即

$$\eta_{xt} = \eta_z \cdot \eta_{dt} \cdot \eta_{mot} \cdot \eta_{bp} \quad (1)$$

泵站水泵系统年运行费用 F 为

$$\begin{aligned} F &= \int_{t_1}^{t_2} p \cdot \frac{\rho g Q H_z}{1000 \eta_{xt}} \cdot n \cdot dt \\ &= \int_{t_1}^{t_2} p \cdot \frac{\rho g Q_z H_z}{1000 \eta_{xt}} \cdot dt \end{aligned} \quad (2)$$

式中： Q 为单机流量， m^3/s ； H_z 为泵装置扬程， m ； Q_z 为泵站总抽水流量， m^3/s ； n 为泵站开机台数，台； p 为电价，元/（ $kW \cdot h$ ）； t_1 、 t_2 为时间积分下、上限， h ； t 为时间积分变量，与泵站年运行扬程时间密度分布有关， $dt=f(H_z)dH_z$ 。

对于梯级泵站系统，设水源水位 z_0 、调水目的地水位和流量分别为 z_1 、 Q_1 ，泵站系统有效功率 $P_{有效}$ 为

$$P_{有效} = \rho g Q_1 (z_1 - z_0) \quad (3)$$

梯级泵站系统总效率为

$$\eta_{xt} = \frac{P_{有效}}{P_{总}} = \frac{\rho g Q_1 (z_1 - z_0)}{\sum_{i=1}^m P_{Bi}} \quad (4)$$

式中： i 表示第 i 梯级泵站系统； m 为梯级泵站级数； P_{Bi} 为第 i 梯级泵站系统站外变电所向泵站的输出功率， kW 。

目前大型泵站土建费用约为 41~42 万元/（ m^3/s ）。维护检修费用根据江苏省水利厅维修养护费用计划，如江都三站近几年平均年维修养护费用为 70 万元。

5 泵站机组设备选用

5.1 泵站机组设备设计选型原则

在满足技术和使用要求的前提下，泵站应选择可靠性好、运行效率高、维护管理方便的机组设备。

(1) 可靠性原则。选择的机组设备应满足可靠性要求。

(2) 经济性原则。选择合理的机组形式与工况调节方式，使得机组设备投资与运行、管理费用最低。

(3) 维护管理方便原则。机组具有较好的起停机特性，便于运行管理操作。

5.2 水泵型式与性能选择

5.2.1 机组容量与单站台数

泵站机组大小的确定涉及多方面因素。泵站设计流量一定，机组大小取决于机组台数。机组太大，台数过少，站房基础开挖深，运行保证率低。同时，机组过大，安装检修和运输困难，有些关键部件技术性能不过关，容易发生故障。相反，泵站装机台数过多，运行管理不便，站房太长，占地面积大，增加土建投资。综合考虑制造、安装、管理、技术条件成熟和造价等因素，选用叶轮直径 $D=2.2\sim 3.3$ m 左右，配套功率 $P=1.0\sim 3.0$ MW 左右，单站台数 4~8 台较为合适。考虑到本工程的重要性和机组年运行时间长特点，应考虑设置备用机组。

5.2.2 轴流泵与混流泵

轴流泵和混流泵特性有较大差异。轴流泵启动扬程高、功率大，约为设计工况的 2~3 倍，高扬程区 $Q\sim H$ 曲线存在“马鞍”形，运行易振动。用闸门或快速闸门断流时，如果启动、停机配合不好，容易造成闭阀运行、动力机过载，影响机组和泵站安全。而混流泵 $Q\sim P$ 曲线比较平缓，机组启动和停机断流比较容易，高效区宽于轴流泵。因此，同等情况下应优先选用混流式叶轮。

具体采用何种泵型及其工况调节方式，在定性分析的基础上，还需综合考虑泵站运行扬程变化、年运行时间、变工况优化运行费用、土建及设备投资等因素，通过定量计算分析确定。

5.3 水泵配套电机功率备用系数选择

电机功率备用系数常规选择方法，都以水泵功率大小作为选择电动机功率备用系数的唯一依据，功率备用系数在 1.05~2.0 之间，机组功率大的取小值、功率小的取大值。但是该方法未对其影响因素进行分析和研究，理论依据不足。

从设计制造、施工安装和运行条件等方面研究影响水泵运行轴功率特性及造成配套电机过载的主要因素（包括：原模型换算误差、水泵特性误差、管路特性误差、拦污清污设备、进流漩涡、电网压降、泵站扬程变化等）及其概率特征，建立基于可靠度的水泵配套电机功率备用系数理论^[10]。

5.4 机组轴线形式选择

机组轴线形式有立式、斜式和卧式三种，对比如表 1。立式机组站房高度大；斜式和卧式机组站房高度较小，但宽度增加。立式水泵来流由水平方向转为垂直方向，经过水泵再由垂直方向转为水平方向（平直管出流）或再斜向下转为水平出流（屈膝管出流），或转为斜向上再向下，最后水平出流（虹吸管出流），水流方向变化大；斜式水泵流道水流方向变化较小；卧式水泵采用平面 S 形流道、猫背式流道或做成贯流泵，水流方向变化小，特别是贯流泵，水流方向基本不变，流道转弯少，水力损失小，但进入孔、通风孔对流动阻力影响较大，设计时应予注意。

斜式和卧式机组因空间布置需要，采用体积小的高速同步电动机、齿轮箱间接传动，叶片调节机构设置困难，安装检修操作空间小，安装质量难以控制，结构受力条件差，电动机位置低，环境湿度大，对绝缘不利。特别是贯流泵，电动机对密封要求高，内壁结露很难解决，安装检修和运行维护困难。水泵导轴承荷载大，易偏磨，非金属轴承寿命短。

Table 1. Comparison of axis types of pump units
表 1 机组轴线形式对比

轴线形式	流道水力损失	工况可调性	导轴承荷载	安装检修	电动机环境
立式	较大	好	小	容易	好
斜式	较小	不好	较大	较难	较好
卧式	较小	不好	大	较难	较差
(贯流式)	最小	较差	大	困难	最差

采用相同叶轮，斜式和卧式水泵因流道转弯少、水力损失小，装置效率较立式 1~2% 左右，但设置叶片调节机构会增大水力损失。

与斜式和卧式机组相比，采用同步电动机直联传动的立式机组安装基础和结构受力条件好。虽然电动机体积较大，电动机造价和土建投资稍高，但可以省去减速机构，便于设置调节机构。电动机位置高，通

风散热条件好,水泵周围操作空间大。站房结构与机组结构设计合理、配套,机组运行维护、工况调节和安装检修方便,具有较好的可靠性、经济性、安装性、维修性和环保性。立式机组节省的机组维修费用、灵活的工况调节节省的运行费用及因设备完好率的提高而产生的经济效益和社会效益远远超过增加的工程投资。因此,本工程应优先考虑选择立式直联机组方案。

5.5 机组传动方式选择

直接传动的传动效率为 100%。电机轴和水泵轴直接用联轴器相连,承载能力大,运行稳定性好,安装维护方便,可靠性高。但由于水泵转速低,电机直径大,机组重量重,要求行车起吊重量大,电机设备费用高。

齿轮传动的理论传动效率约为 96%~98%。水泵和电机通过齿轮连接,电机体积减小、重量轻、造价低,站房起吊重量小,但增加了机组轴线长度,轴系安装维护麻烦,安装技术要求较高,可能的故障点增多,可靠性下降。并且增加了齿轮箱的设备投资,而且在泵站使用寿命期内,齿轮箱需更换一次。考虑到一台高速小电机加两台齿轮箱,与一台低速大电机相比,单台机组造价高于直联方式。

5.6 泵站进、出水流道及断流方式选择

大型泵站有三种断流方式。混流泵不易过载,为节省工程量,减小出水流道水力损失,适应出水池水位变化,宜采用平直管出水流道、快速闸门断流。轴流泵小流量时功率很大,在机组起动和停机时,若快速闸门启闭配合不好,电机易过载,因此,最好采用虹吸出水流道、真空破坏阀断流,保证起动和停机可靠。贯流泵宜采用平直管出水流道、快速闸门加小拍门断流方式。

5.7 机组工况调节方式选择

在满足泵站机组起停机特性、安装维护性、可靠性、调节流量等要求的基础上,机组工况调节方式的选择需要从泵站使用寿命期内变工况优化运行费用和设备投资两个方面,进行定量综合经济分析比较确定。

6 基于优化运行的机组方案定量选择

6.1 选型方法

在保证流量、扬程及可靠性等使用要求的前提下,根据泵站特征扬程,分析年运行扬程时间分布规律,计算泵站多种机组方案、设置不同工况调节方式实施变工况优化运行的水泵系统年运行费用,考虑泵机组设备费用,以泵站使用寿命期内总费用最少为目标,比较选择出最优的水泵机组及其工况调节方式。

6.2 泵装置工况调节方式与传动方式选择

对南水北调东线已建的蔺家坝泵站和淮阴三站,考虑水泵及流道形式不变,对采用不同传动方式及工况调节方式(实现优化运行)计算分析。各种方案总费用如表 2~3。

Table 2. Cost comparison of different adjusting modes of Linjiaba pumping station

表 2 蔺家坝泵站不同工况调节方式年总费用比较(总费用:万元)

直联传动、半调节	直联传动、变频变速	直联传动、变角	齿轮传动、半调节	齿轮传动、变角
16220.004	13369.024*	16236.508	17072.758	17099.110

Table 3. Cost comparison of different adjusting modes of Huaiyin 3rd pumping station

表 3 淮阴三站不同工况调节方式年总费用比较(总费用:万元)

半调节	变频变速(n_c 时变频器参与运行)	变频变速(n_c 时变频器退出运行)	变角调节
33249.330	30474.652	30087.486*	33534.452

结果表明,两座泵站的最佳工况调节方式均为变频变速调节,这是由于这两座泵站扬程较低、扬程相对变幅较大。淮阴三站实际采用的工况调节方式与确定的最优调节方式一致,而蔺家坝站实际采用的是齿轮箱减速变角调节方式,该调节方式年均所需费用较最优的变频变速调节方式多 186.5 万元。

6.3 待建泵站泵机组选择

南水北调东线待建的金湖站,要求同时具有调水和排涝功能,设计排涝扬程较调水扬程低 1.9 m,两者相差较大,泵站年调水运行时间长达 5000 h 以上,需要选择合适泵机组及其工况调节方式,以保证泵站在调水工况实现变工况优化高效运行,在排涝工况安全稳定运行。

根据可行性分析,泵站需要选择扬程适应性较宽的泵型,并按排涝工况选择配套电机。筛选出 3 种可

行泵型，进行应用不同工况调节方式优化运行计算分析，结果如表 4~6。

Table 4. Cost comparison of different adjusting modes of pump type I
表 4 泵站工况调节方案总费用比较 (泵型 I)

工况调节方案	总费用 F/万元
方案一 (额定转速、设计角度)	39997.650
方案二 (变频变速调节)	37585.240
方案三 (全调节、双速电机)	37014.425
方案四 (半调节、双速电机)	36718.872*
方案五 (变频变速调节、双速电机)	36795.718

注：配套电机功率 2200 kW。

Table 5. Cost comparison of different adjusting modes of pump type II
表 5 泵站工况调节方案总费用比较 (泵型 II)

电机配套功率 N/kW	工况调节方案	总费用 F/万元
2700	方案一 (设计角度、额定转速)	36210.870
	方案二 (变角调节)	36555.293
	方案三 (变频变速调节)	37213.172
1600	方案四 (设计角度、额定转速)	35737.802
	方案五 (变角调节)	36079.879
	方案六 (变频变速调节)	36350.156
1800	方案七 (设计角度、额定转速)	35795.322*
	方案八 (变角调节)	36140.986
	方案九 (变频变速调节)	36549.465

Table 6. Cost comparison of different adjusting modes of pump type III
表 6 泵站工况调节方案总费用比较 (泵型 III)

电机配套功率 N/kW	工况调节方案	总费用 F/万元
1800	方案一 (-2°、额定转速)	35822.009
	方案二 (变角调节)	35583.191
	方案三 (-2°、变频变速调节)	36497.221
	方案四 (-4°、额定转速)	35182.903*
	方案五 (-4°、变频变速调节)	36039.693
2550	方案六 (-2°、额定转速)	36079.752
	方案七 (变角调节)	35905.351
	方案八 (-2° 变频变速调节)	37377.330
	方案九 (-4°、额定转速)	35505.092
	方案十 (-4° 变频变速调节)	36856.081

对于泵型 I，方案四 (半调节、双速电机) 总费用最少。

对于泵型 II，方案四 (半调节，电机配套功率 1600 kW) 总费用最低。但是，为了防止在排涝工况时电机过载，方案四需要停机调小叶片角度，操作过程较为繁琐且耗费较大。而方案七在排涝工况时电机功率能够满足要求，且调水工况时泵站总费用较低。

对于泵型 III，方案四 (水泵在 -4°、额定转速运行，电机配套功率 1800kW) 总费用最少。

泵型 III 最优工况调节方案总费用分别较泵型 I 和泵型 II 最优工况调节方案节约费用 5.89% 和 1.72%。因此，从经济性看，金湖站采用泵型 III，配套电机功率 1800 kW 时，并在叶片角 -4°、额定转速运行时，泵站总费用最省。而且在排涝时，泵装置效率达 75% 左右。

考虑到提高泵站抽水流量的可调性，减小排涝时的机组起动功率，泵站可以设置叶片全调节功能。泵站设置叶片调节机构后，进出水流道的长度将增加，导致泵装置效率降低约 0.2%~0.5%，泵站运行费用将略有增加，但仍小于变频变速调节方式总费用。变频变速调节方式的可靠性、起停机特性和操作性优于变角调节方式。

因此，金湖站宜选用泵型 III，直联传动、变角调节方式，配套电机功率 1800 kW。叶片调节机构宜设置在灯泡体内、电机外侧。

7 结论

南水北调东线工程是国家重点工程，投资大，影响面广，泵站年运行时间长，运行费用大，上下梯级泵站相互影响。为提高供水保证率，节省运行维修费用，要求泵机组具有较好的可靠耐久性、经济适用性和安装维修性，并保证不污染水质和环境。经过研究分析，得到如下结论：

(1) 梯级泵站在规划时，梯级数、上下梯级间的间距及各级扬程应当适当，并结合现有实际情况综合确定，以保证泵站与河道工程投资及运行费用最省。

(2) 选用叶轮直径 $D = 2.2 \sim 3.3$ m，配套功率 $P = 1.0 \sim 3.0$ MW 左右，单站台数 4~8 台机组较为合适，并设备用机组。

(3) 优先选用立式机组，直联传动。竖井式贯流泵机组结构简单，便于安装检修和运行维护，对于扬程 4.5 m 以下的泵站可以考虑采用。

(4) 由于混流泵功率曲线比较平缓, 机组起动和停机断流比较容易, 高效区宽, 同等情况下应优先采用混流式叶轮, 并采用平直管出水流道、快速闸门断流; 如果采用轴流式叶轮, 应采用虹吸出水流道、真空破坏阀断流方式。

(5) 南水北调东线工程梯级泵站扬程大都在10 m 以下, 水泵配套电机应采用较大的功率备用系数, 扬程越低, 功率备用系数越大。

(6) 在保证流量、扬程及可靠性使用要求的前提下, 应根据泵站特征扬程及运行时数, 计算比较泵站选用多种可行方案时设置不同工况调节方式实施变工况优化运行的设备与运行总费用, 定量优化选择水泵机组及其工况调节方式。

References (参考文献)

- [1] Guo Yanjie, Lin Changzeng. Energy-saving Technological Transformation of Low Head Pumping Station[J]. *China rural water and hydropower*, 2000(7), P50-52 (Ch).
郭延杰, 蔺长增. 低扬程泵站节能技术改造[J]. 中国农村水利水电, 2000(7), P50-52.
- [2] Lei Hu, Lei Liangru. Discussion of the Modification Problems of the Electromechanical Equipment of the Pumping Stations[J]. *Jiangxi Hydraulic Science and Technology*, 2007,33(3), P176-177 (Ch).
雷虎, 雷良如. 泵站机电设备更新改造若干问题的探讨[J]. 江西水利科技, 2007, 33(3), P176-177.
- [3] Chen Jian. Key problems of Main Water Pump Renewing and Reforming of Pumping Stations[J]. *China Water Resources*, 2007(1), P62-63 (Ch).
陈坚. 泵站主水泵更新改造应把握的关键[J]. 中国水利, 2007(1), P62-63.
- [4] Rong Zhifu. Energy-saving Measurements of Middle and Small-sized Axial-flow Pumping Station[J]. *Drainage and Irrigation Machinery*, 2004, 22(1), P49-50 (Ch).
戎志福. 中小型轴流泵站的节能措施[J]. 排灌机械, 2004, 22(1), P49-50.
- [5] Lingireddy S, Wood D J. Improved operation of water distribution systems using variable-speed pumps[J]. *Journal of Energy Engineering*, 1998, 24(3), P90-103.
- [6] Moreno M A, Carrión P A, Planells P, et al. Measurement and Improvement of the Energy Efficiency at Pumping Stations[J]. *Biosystems Engineering*, 2007, 98, P479-486.
- [7] Qiu Baoyun, Feng Xiaoli, Yuan Shouqi. Study on Comprehensive Economical Operation of Large Pump Station by Adjusting Rotational Speed and Blade Angle[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2005, 36(10), P58-61 (Ch).
仇宝云, 冯晓莉, 袁寿其. 大型泵站变速-变角综合经济运行研究[J]. 农业机械学报, 2005, 36(10), P58-61.
- [8] Qiu Baoyun, Feng Xiaoli, Yuan Shouqi et al. Study on economical operation of large pump station by adjusting operation duty. *8th Asian International Fluid Machinery Conference*. October 12-15, 2005: 856~870 • Yichang, China
- [9] Qiu Baoyun, Feng Xiaoli, Yuan Shouqi et al. Selection of Adjusting Operation Modes of Pump Units for Large Step Pump Stations of the East Route Project of South to North Water Transfer[J]. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2006, 25(3), P121-124, 129(Ch).
仇宝云, 冯晓莉, 袁寿其, 等. 南水北调东线工程梯级泵站机组变工况方式选择[J]. 水力发电学报, 2006, 25(3), P121-124, 129.
- [10] Qiu Baoyun. Theories and Key Techniques of Large and Middle-Sized Pump Assemblies[M]. Beijing: China Water Power Press, 2005, 60-71
仇宝云. 大中型水泵装置理论与关键技术[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2005, 60-71