(4) 19-26

三峡梯级电站日运行容许控制*

The Feasible Control for the Day-operation of the Three-Gorge Cascade Hydropower Station

段虞荣 傅鹂
Duan Yurong Fu Li
(重庆大学系统工程及应用数学系,重庆,630044)

TV737
TP273

A 摘 要 提出了三峡梯级电站日运行容许控制问题,阐明了其重要性,探讨了此类问题的特点和解决途径。导出了连续模型的时滞 Euler 方程和广义端点条件,说明了其实际含义;解释了离散模型的合理性并给出了计算实施细节与软件,对数值结果进行了分析,针对有关问题提出了相应建议。

关键词 三峡梯级电站;电力系统;日运行容许控制;泛函极值;Euler 方程;广义端点条件;线性规划

中国图书资料分类法分类号 TP273

ABSTRACT The feasible control problem is presented for the day-operation of the Three-Gorge Cascade Hydropower Station. The significance of the problem is explained. Basic properties of the problem and the approaches to study it are discussed. Two methods are given for solving the problem, which are calculus of variation and linear programming. In the former, the Euler equation with time-lag and the generalized two-point boundary conditions are obtained and the corresponding practical implication is interpreted. In the latter, the rationality for the discrete model is explained and the computational details are given for the implement software. Some questions which should be paid much attention and the corresponding proposals are presented based on the numerical results and theoretical analysis.

KEYWORDS Three-Gorge Cascade Hydropower Station; power system; day-operation; functional extremum; Euler equation; generalized two-point boundary conditions; linear programming

0 引 言

即将兴建的三峡电站是我国最大的水利水电工程,它将与已建成的葛洲坝水电站一起构成三峡梯级电站,并与华中、华东及川东电网相连构成联合电力系统。

---

* 收文日期 1993-12-15
国家"七五"重点科技攻关资助项目

三峡梯级电站的调度必须满足发电、防洪与航运几方面的基本要求。这类电站运行的容许控制问题是指如何求出在系统固有特性限制下满足上述基本要求的调度方案（由流量或出力的时间函数或序列表示）。容许控制是优化运行即经济调度的前提。关于电力系统经济调度的课题，迄今国内外已有大量的成果，探讨了几乎所有可行的数学方法[1]~[5]。而电站的容许控制问题尚未引起足够重视。梯级电站，尤其象三峡这样巨大的梯级电站，属超巨型系统，这类系统本身结构复杂，时空变量耦合度高，在自然条件经常变化的外界扰动下，要同时满足发电、防洪与航运等多方面综合要求，使得容许控制的问题显得十分突出。事实上，理论分析和初步的数值仿真试验均表明，此类系统容许控制解的存在性是不能保证的，即在某些可能的情况下，容许控制不存在。所以梯级电站容许控制问题是一项值得专门研究的课题。本文结合三峡梯级电站这一实例给出了有关理论分析和数值试验结果，提出了相应的建议。

1 三峡梯级电站容许控制问题的数学描述

三峡梯级电站与三峡外电网（华中、华东及川东）相连构成联合电力系统，因此系统的基本特性包括梯级水利特性，梯级电力特性，火电厂特性和总电网出力平衡。除上述基本特性外，由发电、防洪及航运综合决定的约束条件包括出力、发电流量及水位（或库容）上、下限约束，日用水量约束以及水位波动约束。

容许控制问题虽然不考虑最优性，但与优化目标的选择有关。当梯级用水量给定，优化运行目标一般有两大类，即联网的火电厂煤耗最低（或费用最少）和梯级电站发电量最大。这两类目标的不同选择导致容许控制问题中是否包含火电厂特性和总电网出力平衡。作为初步探索，本文选择了较为简单的第二类目标，并假定出力上、下限可用流量上、下限近似代替，同时水位波动约束也暂不考虑。这样便得出三峡梯级电站日运行容许控制模型：

$$\begin{cases} \dot{x}_1(t) = a_1(t) - u_1(t) \\ \dot{x}_2(t) = a_2(t) - u_1(t-\tau) - u_2(t) \end{cases} \tag{1}$$

$$c_i \leqslant u_i(t) \leqslant d_i, \quad i = 1,2 \tag{2}$$

$$e_i \leqslant x_i(t) \leqslant f_i, \quad i = 1,2 \tag{3}$$

$$\int_0^T u_i(t)\mathrm{d}t = b_i, \quad i = 1,2 \tag{4}$$

其中 x_i、u_i 分别是第 i 级电站（$i = 1,2$）的库容和流量，a_i 是天然来流，T 是调度周期，τ 是三斗坪至葛洲坝（即梯级间）的流量时滞，$0 \leqslant \tau \leqslant T$。(1) 为系统状态方程并以库容 x_1，x_2 为状态变量，流量 u_1，u_2 为控制变量。(4) 表示全天用水量。容许控制问题就是求出 $\{u_1(t), u_2(t), 0 \leqslant t \leqslant T\}$ 使之满足容许控制条件 (1) ～ (4)。

2 变分法方案

在上述模型中加上目标函数即成为一连续型最优控制问题，求解此类问题的两个关键困难是状态上、下限约束和时滞的存在，因而通常不能使用经典的 Понтрягин 极大值原理[6][7]。我们直接采用变分法处理这一问题。

2.1　含时滞的 Euler 方程

经典的变分法并未讨论时滞因素，而本课题中则须面临如下含时滞的泛函极值问题：

$$\begin{cases} J[x] = \int_0^T F[x(t), \dot{x}(t), x(t-\tau), \dot{x}(t-\tau), t]\mathrm{d}t \\ x(t)|_{t\leqslant 0} \text{给定}, \quad (0 \leqslant \tau \leqslant T) \\ x(T) = g[x(T-\tau)] \end{cases} \tag{5}$$

其中 x 是向量。用变分法处理这一问题将得出与传统形式不同的 Euler 方程和端点条件。略去推导过程，在此给出对应于(5) 的 Euler 方程为：

$$\begin{cases} \frac{\partial F}{\partial x} - \frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}\frac{\partial F}{\partial \dot{x}} + \left[\frac{\partial F}{\partial x(t-\tau)} - \frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}\frac{\partial F}{\partial \dot{x}(t-\tau)}\right]_{t=t-\tau} = 0 \\ \frac{\partial F}{\partial x} - \frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}\frac{\partial F}{\partial \dot{x}} = 0, \quad (T-\tau \leqslant t \leqslant T) \end{cases} \tag{6}$$

相应的端点条件则成为如下的“广义”端点条件：

$$\begin{cases} x(t)|_{t\leqslant 0} \text{已知}, \\ x(T) = g[x(T-\tau)], \\ \left[\frac{\partial g}{\partial x(T-\tau)}\frac{\partial F}{\partial \dot{x}} + \frac{\partial F}{\partial \dot{x}(t-\tau)}\right]_{t=T} = 0 \end{cases} \tag{7}$$

注意(7) 中的最后一式，由于 x 为向量，故 $\frac{\partial g}{\partial x(T-\tau)}$ 是矩阵。由(6)、(7) 可知，时滞是使问题复杂化的一个关键因素。

2.2　用 Euler 方程求容许控制

令

$$\begin{cases} \alpha_1(t) = a_1(t) - d_1, \beta_1(t) = a_1(t) - c_1 \\ \alpha_2(t) = a_2(t) - a_1(t-\tau) - d_2, \beta_2(t) = a_2(t) + a_1(t-\tau) - c_2 \end{cases}$$

$$\begin{cases} y_1 = \int_0^T a_1(t)dt - b_1, \\ y_2 = \int_0^T [a_2(t)dt + a_1(t-\tau)]dt + x_1(-\tau) + x_2(0) - b_2 \end{cases}$$

则问题成为求 $x_i(t), i = 1,2$，满足：

$$\{\alpha_1(t) \leqslant \dot{x}_1(t) \leqslant \beta_1(t), \ \alpha_2(t) \leqslant \dot{x}_1(t-\tau) + \dot{x}_2(t) \leqslant \beta_2(t) \tag{8}$$

$$\begin{cases} e_1 \leqslant x_1(t) \leqslant f_1, \\ e_2 \leqslant x_2(t) \leqslant f_2 \end{cases} \tag{9}$$

$$\begin{cases} x_1(T) = y_1 \\ x_2(T) = -x_1(T-\tau) + y_2 \end{cases} \tag{10}$$

其中(10) 可作为端点条件。余下的问题是将(8) 和(9) 用泛函来表示。记

$$\varphi(\alpha,\beta,y) = \frac{1}{2}[\max\{0, \alpha - y, y - \beta\}]^2$$

令

$$\begin{cases} \phi_i = \varphi[e_i, f_i, x_i(t)], (i = 1,2) \\ \phi_3 = \varphi[\alpha_1(t), \beta_1(t), \dot{x}_1(t)], \\ \phi_4 = \varphi[\alpha_2(t), \beta_2(t), \dot{x}_1(t-\tau) + \dot{x}_2(t)] \end{cases} \tag{11}$$

$$F = \sum_{i=1}^{4} \phi_i \tag{12}$$

则 $F = F[x_1(t), x_2(t), \dot{x}_1(t), \dot{x}_2(t), \dot{x}_1(t-\tau)]$，于是问题(8) ～ (10) 成为

$$\begin{cases} \min J[x] = \int_0^T F[x_1(t), x_2(t), \dot{x}_1(t), \dot{x}_2(t), \dot{x}_1(t-\tau)]\mathrm{d}t \\ x_1(T) = \gamma_1, x_2(T) = \gamma_2 - x_1(T-\tau) \end{cases}$$

由(11) 及(12) 得

$$\begin{cases} \dfrac{\partial F}{\partial x_1} = \dfrac{\partial \phi_1}{\partial x_1}, \quad \dfrac{\partial F}{\partial \dot{x}_1} = \dfrac{\partial \phi_3}{\partial \dot{x}_1}, \quad \dfrac{\partial F}{\partial x_1(t-\tau)} = 0, \quad \dfrac{\partial F}{\partial \dot{x}_1(t-\tau)} = \dfrac{\partial \phi_4}{\partial \dot{x}(t-\tau)}, \\ \dfrac{\partial F}{\partial x_2} = \dfrac{\partial \phi_2}{\partial x_2}, \quad \dfrac{\partial F}{\partial \dot{x}_2} = \dfrac{\partial \phi_4}{\partial \dot{x}_2}, \quad \dfrac{\partial F}{\partial x_2(t-\tau)} = 0, \quad \dfrac{\partial F}{\partial \dot{x}_2(t-\tau)} = 0 \end{cases}$$

将上式代入含时滞的 Euler 方程得：

$$\begin{cases} \dfrac{\partial \phi_1}{\partial x_1} - \dfrac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}\dfrac{\partial \phi_3}{\partial \dot{x}_1} - \left[\dfrac{\partial \phi_4}{\partial \dot{x}_1(t-\tau)}\right]\bigg|_{t=t+\tau} = 0 \\ \dfrac{\partial \phi_2}{\partial x_2} - \dfrac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}\dfrac{\partial \phi_4}{\partial \dot{x}_2} = 0, \qquad (0 \leqslant t < T-\tau) \end{cases} \tag{11}$$

$$\begin{cases} \dfrac{\partial \phi_1}{\partial x_1} - \dfrac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}\dfrac{\partial \phi_3}{\partial \dot{x}_1} = 0 \\ \dfrac{\partial \phi_2}{\partial x_2} - \dfrac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}\dfrac{\partial \phi_4}{\partial \dot{x}_2} = 0 \end{cases} \qquad (T-\tau \leqslant t < T) \tag{12}$$

易求出 Euler 方程广义端点条件中的

$$\frac{\partial g}{\partial x(T-\tau)} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ -1 & 0 \end{bmatrix} \tag{13}$$

代入(7) 得

$$\begin{cases} \dfrac{\partial \phi_4}{\partial \dot{x}(t-\tau)}\bigg|_{t=T} = 0 \\ \dfrac{\partial \phi_3}{\partial \dot{x}_1}\bigg|_{t=T} = 0 \end{cases} \tag{14}$$

再加上

$$x_1(t), x_2(t)|_{t\leqslant 0} \text{ 已知}, x_1(T) = \gamma_1, x_2(T) = -x_1(T-\tau) + \gamma_2 \tag{15}$$

即为完备的端点条件。

2.3 解的存在性

关于容许控制的存在与否是我们关心的首要问题。2.2 的结果将容许控制的存在性转化为一类微分方程定解问题之解的存在性。由于两点边值问题解的存在不能保证，并且对于一个给定问题尚无一个简明的判据确定其解是否存在，因此可以推论，容许控制问题解的存在性更难保证，相应地也更难找到简明的存在性判据或判定算法，因为方程(11) ～ (15) 显然比通常的两点边值问题复杂得多。

3 线性规划方案

3.1 离散模型

在电站调度问题中，因实际调度过程本身是以时段为单位的，具备固有的离散特性，所以采用以时段为时间单位的离散模型足以反映真实过程，于是我们可以给出三峡梯级电站日运行容许控制的离散模型如下：

$$
\begin{aligned}
&\begin{cases} x_{1,k} = x_{1,k-1} + \theta(a_{1,k} - u_{1,k}) \\ x_{2,k} = x_{2,k-1} + \theta(a_{2,k} + u_{1,k-l} - u_{2,k}) \end{cases} \\
&\begin{cases} c_1 \leqslant u_{1,k} \leqslant d_1 \\ c_2 \leqslant u_{2,k} \leqslant d_2 \end{cases} \\
&\begin{cases} e_1 \leqslant x_{1,k} \leqslant f_1 \\ e_2 \leqslant x_{2,k} \leqslant f_2 \end{cases} \\
&\begin{cases} \theta \sum_{k=1}^{n} u_{1,k} = b_1 \\ \theta \sum_{k=1}^{n} u_{2,k} = b_2 \end{cases}
\end{aligned}
\tag{16}
$$

其中 $x_{i,k}$ 是第 i 级电站第 k 时段的库容；$u_{i,k}$，$a_{i,k}$ 是相应的流量和天然来流；θ 是常数，其值取决于 库容流量及时段的单位；l 表示时滞；n 是全日时段数。各式的含义与第 2 节中的连续模型类似，此处不再赘述。

3.2 线性离散系统容许解的存在性与求解

通过对第 2 节中的连续模型的分析，我们已知道，容许控制解的存在性不能保证且无简明的存在性判据或判定算法。对于离散模型我们有相应的结论。离散问题的容许解可以一般地由线性不等式组表示：

$$a \leqslant Ax \leqslant b \tag{17}$$

由于不等式组有不相容的情况，所以离散系统容许解的存在同样是不能保证的，并且在一般情形要找出一个简明的存在性判别法也是极困难的。因此本文采用线性规划方法来处理离散模型，从而能够保证在求解过程中若无解则被判别出来，有解则被求出来。以下讨论用此方案求解(16)。

3.3 几点实际假定

以下几点假定对所采用的计算方案并非本质上必须，也不影响本文的结论(见 3.5)。

1) 首级电站(三峡) 库容充分大，日调度对其影响可忽略，故只限制首级全日用水量而不限制其库容上、下限；

2) 末级电站(葛洲坝) 的库容上、下限给定后，因首级用水量一定，故可不再限定其用水量；

3) 时滞 $l = 2$ h；时段数 $n = 24$.

此外在计算中还假定(一日内) 天然来流为 0.

3.4 线性规划模型

在上述假定下容许控制模型成为

$$
\begin{cases} x_{1,k} = x_{1,k-1} + \theta(a_{1,k} - u_{1,k}) \\ x_{2,k} = x_{2,k-1} + \theta(a_{2,k} + u_{1,k-l} - u_{2,k}) \end{cases}
$$

$$\begin{cases} c_1 \leqslant u_{1,k} \leqslant d_1 \\ c_2 \leqslant u_{2,k} \leqslant d_2 \end{cases}$$

$$e_2 \leqslant x_{2,k} \leqslant f_2$$

$$\sum_{k=1}^{n} u_{1,k} = b_1/\theta$$

其中各量的单位为：库容：$10^3\,m^3$；流量：$10^3\,m^3/s$，时间：h. $\theta = 0.864/n$，将库容$\{x_{1,k}, x_{2,k}\}$用流量$\{u_{1,k}, u_{2,k}\}$表示并令：

$$\begin{cases} u_{1,k} = v_{1,k} + c_1 \\ u_{2,k} = v_{2,k} + c_2 \end{cases}$$

则问题成为求$\{v_{1,k}, v_{2,k}\}$满足

$$c_3(k) \leqslant \sum_{i=1}^{n-k-1} v_{1,i} - \sum_{i=1}^{n-k-1} v_{2,i} \leqslant d_3(k) \quad (k = 1 \sim n) \tag{18}$$

$$\sum_{k=1}^{n} v_{1,k} = b_1/\theta - nc_1 \tag{19}$$

$$\begin{cases} 0 \leqslant v_{1,k} \leqslant \hat{d}_{1,k} \\ 0 \leqslant v_{2,k} \leqslant \hat{d}_{2,k} \end{cases} \tag{20}$$

其中

$$\begin{cases} c_3(k) = c_3 - (n-k-1)c_1 + (n-k+1)c_2 \\ d_3(k) = d_3 - (n-k-1)c_1 + (n-k+1)c_2 \end{cases}$$

而

$$\begin{cases} c_3 = (e_2 - x_{2,0})/\theta - u_{1,-1} - u_{1,0} \\ d_3 = (f_2 - x_{2,0})/\theta - u_{1,-1} - u_{1,0} \end{cases}$$

$$\hat{d}_1 = d_1 - c_1, \qquad \hat{d}_2 = d_2 - c_2$$

(18) ～ (20) 含 $2n = 2 \times 24 = 48$ 个变量，$4n = 96$ 个不等式约束（非负约束不计算在内）和一个等式约束。

3.5　数值仿真结果及有关说明

对总共 12 种输入数据进行试算，结果仅有其中两种存在容许解，其余均为无解。此结果显示梯级电站的容许控制比经济调度问题矛盾更突出，应当充分重视。输入数据和运算结果见附录数值结果表。所使用的输入数据是根据拟建的三峡梯级电站的概况并参照其它梯级电站估计得到的，其理由是：三峡电站尚未建成，某些真实数据无法得到；另一方面，真实数据本身必将包含大量不确定因素，如天然来流，初始库容，前日调度值序列以及负荷水平等，这些在真实过程中每日均可能发生变化，因此对于一个用于实时调度的计算软件来说，使用估计的输入数据仍然能够从仿真的角度提供实际过程的信息。还应说明的是，我们所采用的模型经过简化忽略了出力上、下限，水位波动限制等。若加上这些约束，容许控制的矛盾将更加突出，因为约束增加显然使容许集变得更小。

本软件在 PC 机上执行时间，有容许解时小于 8 s，无解时一般为 12 s 左右，最长时间为 15 s，与调度时间单位 1 h＝3600 s 相比，能够满足实时调度要求。

4　结语

从以上各节的理论分析和初步的数值仿真结果来看，三峡梯级电站运行的容许控制问

题是值得重视的，作为实时调度的软件系统应当充分考虑到这一方面。以下是有关建议。

1）大规模数值仿真的必要性

既然梯级电站的容许控制在理论上不能保证存在，也尚无简明的判别法．因此深入研究这一课题最有效的途径是进行大量数值仿真．针对发电、防洪、航运的各类具体要求，对汛期和非汛期的不同情况，各种负荷水平，优化目标及各种初始状态下进行充分的数值实验，对结果加以详尽的分析研究，从而更加全面地掌握整个系统的特性。

2）容许控制不存在时的考虑

容许控制不存在不过是系统运行中可能面临的一种状况，只是在实时软件中必须有相应的对策，以便在真实运行过程中发生这种情况时，能够有效地处理。系统的基本特性、初始状态，调度期间的天然条件以及前日调度值序列均是无法改变的，因此当容许解不存在时只能修改其它方面的要求，如发电、航运等。这需要针对各种具体情况进行全面周密研究，预先排列出各因素项的优先顺序，使损失减少到最低限度，这本身也是一项较为庞大的系统工程，需要做大量的工作。

参 考 文 献

1　段虞荣等．用罚函数法解梯级水电站有功功率最优分配问题．数学的实践与认识，1981，(2)：1～11

2　李朝安．发电厂及电力系统经济运行．乌鲁木齐：新疆人民出版社，1985：367～395

3　A M Susson et al. Some Applications of Optimization Techniques to Power Systems Problems. Proc. of the IEEE, 1974, 62(6): 237～248

4　H H Happ. Optimal Power Dispatch-A Comprehensive Survey. IEEE TRANS., 1977: 48～71

5　M E El-Hawary. Optimal Economic Operation of Electrical Power Systems. IEEE Proc. 1981: 156～163

6　M Noton. Modern Control Engineering. Pergamon Press, Oxford, 1972: 54～68

7　刘豹．现代控制理论．北京：机械工业出版社，1983，14～37

8　K Ogata. State Space Analysis of Control Systems. Prentice-Hall, 1967: 25～46

9　K G Singh et al. Systems: Decomposition. Optimisation and Control. Pergamon Press, Oxford, 1978, 329～380

10　[美]塞奇，怀特著．汪寿基等译．最优系统控制．北京：水利电力出版社，1985：83～121

附录　数值结果表

表 1　输入数据

序号	c_1	d_1	c_2	d_2	e_1	f_1	e_2	f_2	b_1	x_{10}	x_{20}	$u_{1,-1}$	u_{10}
1	0.1	2.0	0.1	1.0	20	600	1.0	10	0.05	100	5.0	1.0	1.0
2	0.05	2.5	0.1	1.0	20	600	1.0	10	0.05	100	5.0	1.0	1.0
3	0.1	2.0	0.05	1.5	20	600	1.0	10	0.05	100	5.0	1.0	1.0
4	0.1	2.0	0.1	1.0	20	600	0.5	15	0.05	100	5.0	1.0	1.0
5	0.1	2.0	0.1	1.0	20	600	1.0	10	0.1	100	5.0	1.0	1.0
6	0.1	2.0	0.1	1.0	20	600	1.0	10	0.05	100	5.0	1.0	1.0
7	0.1	2.0	0.1	1.0	20	600	1.0	10	0.05	100	10.0	1.0	1.0
8	0.1	2.0	0.1	1.0	20	600	1.0	10	0.05	100	1.0	1.0	1.0
9	0.1	2.0	0.1	1.0	20	600	0.1	10	0.05	100	9.0	1.0	1.0
10	0.1	2.0	0.1	1.0	20	600	1.0	10	0.05	100	3.0	1.0	1.0
11	0.1	2.0	0.1	1.0	20	600	1.0	10	0.05	100	5.0	2.0	2.0
12	0.1	2.0	0.1	1.0	20	600	1.0	10	0.05	100	5.0	5.0	5.0

表 2 第一组容许解(对应输入序号 2)

时段	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
u_1	0.234	0.050	0.050	0.050	0.050	0.050	0.050	0.050	0.050	0.050	0.050	0.050
u_2	0.100	0.100	0.100	0.100	0.100	0.100	0.100	0.100	0.100	0.100	0.100	0.100
x_1	99.99	99.98	99.98	99.98	99.98	99.97	99.97	99.96	99.96	99.95	99.95	99.95
x_2	5.030	0.065	5.069	5.066	5.062	5.063	5.066	5.056	5.059	5.040	5.030	5.030
P_1	144.2	30.20	30.20	30.20	30.20	30.20	30.20	30.20	30.20	30.20	30.20	30.20
P_2	27.42	27.42	27.42	27.42	27.42	27.42	27.42	27.42	27.42	27.42	27.42	27.42
时段	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
u_1	0.050	0.050	0.050	0.050	0.050	0.050	0.050	0.050	0.050	0.050	0.050	0.050
u_2	0.100	0.100	0.100	0.100	0.100	0.100	0.100	0.100	0.100	0.100	0.100	0.100
x_1	99.95	99.94	99.94	99.94	99.94	99.93	99.93	99.93	99.92	99.92	99.92	99.92
x_2	5.050	5.030	5.033	5.032	5.031	5.055	5.011	5.033	5.021	5.010	5.031	5.021
P_1	30.20	30.20	30.20	30.20	30.20	30.20	30.20	30.20	30.20	30.20	30.20	30.20
P_2	27.42	27.42	27.42	27.42	27.42	27.42	27.42	27.42	27.42	27.42	27.42	27.42

表 3 第二组容许解(对应输入序号 5)

时段	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
u_1	0.487	0.100	0.100	0.100	0.100	0.100	0.100	0.100	0.100	0.100	0.100	0.100
u_2	0.100	0.100	0.100	0.100	0.100	0.100	0.100	0.100	0.100	0.100	0.100	0.100
x_1	99.98	99.98	99.97	99.97	99.96	99.96	99.96	99.96	99.95	99.94	99.94	99.94
x_2	5.032	0.064	5.032	5.064	5.031	5.032	5.064	5.031	5.023	5.034	5.061	5.066
P_1	286.8	61.20	61.20	61.20	61.20	61.20	61.20	61.20	61.20	61.20	61.20	61.20
P_2	27.42	27.42	27.42	27.42	27.42	27.42	27.42	27.42	27.42	27.42	27.42	27.42
时段	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
u_1	0.100	0.100	0.100	0.100	0.100	0.100	0.100	0.100	0.100	0.100	0.100	0.100
u_2	0.100	0.100	0.100	0.100	0.100	0.100	0.100	0.100	0.100	0.100	0.100	0.100
x_1	99.93	99.93	99.92	99.91	99.91	99.91	99.90	99.90	99.89	99.89	99.88	99.88
x_2	5.032	5.034	5.035	5.048	5.061	5.052	5.063	5.064	5.068	5.078	5.081	5.078
P_1	61.20	61.20	61.20	61.20	61.20	61.20	61.20	61.20	61.20	61.20	61.20	61.20
P_2	27.42	27.42	27.42	27.42	27.42	27.42	27.42	27.42	27.42	27.42	27.42	27.42

注：P：MW；u：$10^{5}m^3/s$，x：$10^{5}m^3$ 为各量的单位

（*：以上“表 1”至“表 3”取自本文研究项目的科研报告）