



(12)发明专利申请

(10)申请公布号 CN 111237208 A  
(43)申请公布日 2020.06.05

(21)申请号 202010036221.X

(22)申请日 2020.01.14

(71)申请人 扬州大学

地址 225009 江苏省扬州市大学南路88号

(72)发明人 龚懿 陈再扬 程吉林 张礼华  
蒋晓红 程浩淼

(74)专利代理机构 南京苏高专利商标事务所  
(普通合伙) 32204

代理人 柏尚春

(51)Int.Cl.

F04D 15/00(2006.01)

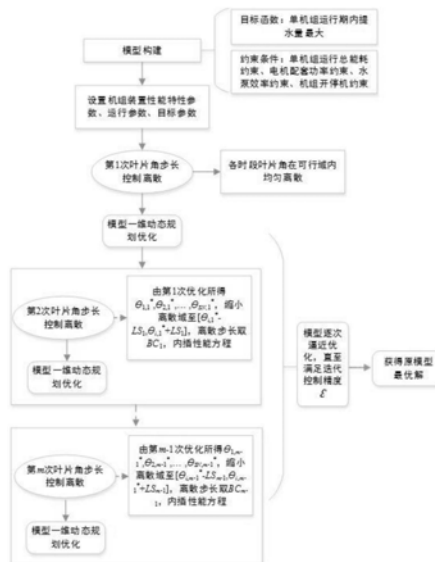
权利要求书3页 说明书5页 附图1页

(54)发明名称

一种泵站单机组优化运行时的叶片角步长调节控制方法

(57)摘要

本发明公开了一种泵站单机组优化运行时的叶片角步长调节控制方法,包括以下步骤:(1)以叶片可调泵站单机组一定运行期内提水量W最大为目标,建立目标函数;(2)设置目标函数求解的约束条件;(3)基于叶片角离散域逐次缩小均匀离散的叶片角步长调节控制方法,根据约束条件对目标函数求解。本发明以一定运行期内提水总量最大为目标,既适用于南水北调等跨区域调水泵站机组在一定调水期和运行总能耗内的最大调水任务需求,又适用于具有叶片可调功能的排涝泵站机组在给定时段内尽量提高排水量的实际需求;同时,本发明可克服传统方法的缺点,显著提升模型求解精度和效率。



1. 一种泵站单机组优化运行时的叶片角步长调节控制方法,其特征在于,包括以下步骤:

(1) 以叶片可调泵站单机组一定运行期内提水量 $W$ 最大为目标,建立目标函数;

(2) 设置目标函数求解所需约束参数的约束条件;

(3) 基于叶片角离散域逐次缩小均匀离散的叶片角步长调节控制方法,根据约束条件对目标函数求解,具体包括以下步骤:

(31) 取整数度的均匀离散步长,采用一维动态规划法求解模型,获得初次优化所得最大提水量 $W^1$ ,及各时段最优叶片安放角路径 $\theta^1_i, i=1, 2, \dots, SN$ ;

(32) 对获得的各时段最优叶片安放角路径 $\theta^1_i$ ,缩小叶片角离散域并取小于上一步中的离散步长,进一步均匀离散后代入原模型,采用一维动态规划法寻优,获得本次优化所得最大提水量 $W^m$ ,及各时段最优叶片安放角路径 $\theta^m_i, i=1, 2, \dots, SN$ ;

(33) 重复多次步骤(32)对目标函数逐次逼近,直到满足下式:

$$\left| \frac{W^m - W^{m-1}}{W^{m-1}} \right| \leq \varepsilon$$

式中, $m$ 为迭代次数, $\varepsilon$ 为给定的模型迭代控制精度, $SN$ 为机组运行期内划分的时段数。

2. 根据权利要求1所述的泵站单机组优化运行时的叶片角步长调节控制方法,其特征在于,步骤(1)中所述目标函数为:

$$W = \max \sum_{i=1}^{SN} \frac{3600 \cdot Q_i(\theta_i) \cdot \Delta T_i}{10000}$$

式中, $W$ 为叶片可调泵站单机组各时段的最大提水总量; $i$ 为时段编号, $i=1, 2, \dots, SN$ ;  $Q_i(\theta_i)$ 为第 $i$ 时段对应于叶片安放角 $\theta_i$ 的水泵流量; $\Delta T_i$ 为第 $i$ 时段的时段长。

3. 根据权利要求1所述的泵站单机组优化运行时的叶片角步长调节控制方法,其特征在于,步骤(2)中约束参数的约束条件包括:

(21) 叶片可调单机组运行总能耗 $E_m$ 约束:

$$\sum_{i=1}^{SN} \frac{\rho \cdot g \cdot Q_i(\theta_i) \cdot H_i \cdot \Delta T_i}{\eta_{z,i}(\theta_i) \cdot \eta_{int} \cdot \eta_{mot}} \leq E_m$$

(22) 电机配套功率约束:运行时机组实际功率不超过与水泵相联的电机配套功率:

$$\frac{\rho \cdot g \cdot Q_i(\theta_i) \cdot H_i}{\eta_{z,i}(\theta_i) \cdot \eta_{int} \cdot \eta_{mot}} \leq N_0$$

(23) 水泵效率约束:使水泵运行于高效区,应满足:

$$\eta_{z \min} \leq \eta_{z,i}(\theta_i) \leq \eta_{z \max}$$

(24) 机组开停机约束:

$$M \leq M_{\max}$$

式中, $\rho$ 为水的密度,取 $10^3 \text{kg/m}^3$ , $g$ 为重力加速度,取 $9.8 \text{m/s}^2$ , $\eta_{z,i}(\theta_i)$ 为第 $i$ 时段对应于叶片安放角 $\theta_i$ 的水泵效率, $H_i$ 为各时段时均扬程, $E_0$ 为机组给定运行总能耗, $\eta_{int}$ 为传动机构效率, $\eta_{mot}$ 为配套电机效率, $\eta_{z \min}$ 和 $\eta_{z \max}$ 为水泵效率约束, $N_0$ 为电机额定功率, $M$ 为水泵运行期内开停机次数, $M_{\max}$ 为运行期内机组允许开停机次数。

4. 根据权利要求1所述的叶片泵站单机组优化运行时的叶片角步长调节控制方法,其特征在于,步骤(31)具体包括以下步骤:

(311) 阶段 $i=1$ : 离散可行域下边界对应为最小叶片安放角 $\theta_{i,\min}$ , 上边界应为不超过机组电机配套功率 $N_0$ 要求下对应的最大叶片安放角 $\theta_{i,\max}$ , 分别代入对应水泵性能曲线方程, 计算对应 $Q_1(\theta_1)$ 及 $\eta_{z,1}(\theta_1)$ , 应同时满足约束条件, 分别得到每个离散 $\lambda_1$ 、最优 $\theta_1$ 及其对应的 $g_1(\lambda_1)$ ,

$$g_1(\lambda_1) = \max \frac{3600 \cdot Q_1(\theta_1) \cdot \Delta T_1}{10000}$$

式中, 状态变量 $\lambda_1$ 表示第1个时段水泵机组运行能耗, 其可在对应可行域内离散;  $g_1(\lambda_1)$ 为对应于第1个时段水泵机组运行能耗 $\lambda_1$ 时的泵站单机组最大提水量。

(312) 阶段 $i=2, 3, \dots, SN-1$ : 将各 $\theta_i$ 值分别代入水泵性能特性曲线方程, 求解对应的 $Q_i(\theta_i)$ 及 $\eta_{z,i}(\theta_i)$ ; 而后, 将求得的 $Q_i(\theta_i)$ 代入(a)中公式, 由状态转移方程式, 对每一个离散的 $\theta_i$ , 查找 $i-1$ 阶段 $g_{i-1}(\lambda_{i-1})$ 值, 应满足下式:

$$\frac{\rho \cdot g \cdot Q_i(\theta_i) \cdot H_i \cdot \Delta T_i}{\eta_{z,i}(\theta_i) \cdot \eta_{\text{int}} \cdot \eta_{\text{mot}}} + \lambda_{i-1} \leq \lambda_i$$

式中, 状态变量 $\lambda_i$ 为前 $i$ 个时段的水泵机组运行总能耗; 最终可获得满足要求的最优 $\theta_i$ 过程及其对应的 $g_i(\lambda_i)$ :

$$g_i(\lambda_i) = \max \left[ \frac{3600 \cdot Q_i(\theta_i) \cdot \Delta T_i}{10000} + g_{i-1}(\lambda_{i-1}) \right]$$

状态转移方程为:

$$\lambda_{i-1} = \lambda_i - \frac{\rho \cdot g \cdot Q_i(\theta_i) \cdot H_i \cdot \Delta T_i}{\eta_{z,i}(\theta_i) \cdot \eta_{\text{int}} \cdot \eta_{\text{mot}}}$$

式中,  $i=2, 3, \dots, SN-1$ ;

(313) 阶段 $SN$ : 采用步骤(312)所述方法, 最终获得目标函数最优值, 此为初次优化, 记为

$$W^1 = g_{SN}(\lambda_{SN})$$

对应的初次水泵最优叶片安放角为 $\theta^1_i$ ,  $i=1, 2, \dots, SN$ ; 水泵叶片安放角 $\theta_{SN}$ 同样按步骤(312)在对应可行域内整数度均匀离散, 其中:

$$g_{SN}(\lambda_{SN}) = \max \left[ \frac{3600 \cdot Q_{SN}(\theta_{SN}) \cdot \Delta T_{SN}}{10000} + g_{SN-1}(\lambda_{SN-1}) \right]$$

式中,  $\lambda_{SN}$ 状态变量为前 $SN$ 时段的水泵机组运行总能耗;

状态转移方程为:

$$\lambda_{SN-1} = \lambda_{SN} - \frac{\rho \cdot g \cdot Q_i(\theta_i) \cdot H_i \cdot \Delta T_i}{\eta_{z,i}(\theta_i) \cdot \eta_{\text{int}} \cdot \eta_{\text{mot}}}$$

5. 根据权利要求1所述的叶片泵站单机组优化运行时的叶片角步长调节控制方法, 其特征在于, 步骤(1)中所述 $m \leq 5$ , 离散步长 $BC \leq 0.1^\circ$ , 当 $m=5$ 或离散步长 $BC$ 为 $0.1^\circ$ 时, 求解结束。

6. 根据权利要求1所述的泵站单机组优化运行时的叶片角步长调节控制方法,其特征  
在于,所述步骤(3)之后还包括以下步骤:将求解得到结果代回计算,检验约束参数是否满  
足步骤(2)设定的约束条件。

## 一种泵站单机组优化运行时的叶片角步长调节控制方法

### 技术领域

[0001] 本发明涉及一种泵站单机组优化运行方法,尤其涉及一种泵站单机组优化运行时的叶片角步长调节控制方法

### 背景技术

[0002] 跨流域调水工程的建设和运行在缓解水资源时空分布不均,促进经济社会及其他领域发展等方面发挥显著作用。其中,调水泵站(群)作为整个调水系统的关键性工程,具有机组数量多、单机流量大、工况可调节(调节水泵叶片安放角或转速)、年运行时间长、运行能耗高等特点。按照泵站(群)能耗最小或提水量准则,合理分配泵站(群)运行过程中各机组、各时段的能耗或流量分配,实现系统优化运行目标,具有十分重要的理论和应用价值。现有的优化方法将每个时段叶片安放角的离散步长直接设置为较小的值,既大大增加各叶片角度下 $H\sim Q$ 和 $\eta_z\sim Q$ 性能曲线拟合工作量,又因为离散数较多,大大增加迭代求解工作量,模型计算时间延长,降低了求解效率。

### 发明内容

[0003] 发明目的:本发明旨在提供一种求解效率高、精度高的泵站单机组优化运行时的叶片角步长调节控制方法,。

[0004] 技术方案:本发明的泵站单机组优化运行时的叶片角步长调节控制方法,包括以下步骤:

[0005] (1) 以叶片可调泵站单机组一定运行期内提水量 $W$ 最大为目标,建立目标函数;

[0006] (2) 设置目标函数求解的约束条件;

[0007] (3) 基于叶片角离散域逐次缩小均匀离散的叶片角步长调节控制方法,根据约束条件对目标函数求解,具体包括以下步骤:

[0008] (31) 取整数度的均匀离散步长,采用一维动态规划法求解模型,获得初次优化所得最大提水量 $W^1$ ,及各时段最优叶片安放角路径 $\theta^1_i, i=1, 2, \dots, SN$ ;

[0009] (32) 对获得的各时段最优叶片安放角路径 $\theta^1_i$ ,缩小叶片角离散域并取小于上一步中的离散步长,进一步均匀离散后代入原模型,采用一维动态规划法寻优,获得本次优化所得最大提水量 $W^m$ ,及各时段最优叶片安放角路径 $\theta^m_i, i=1, 2, \dots, SN$ ;

[0010] (33) 重复多次步骤(32)对目标函数逐次逼近,直到满足下式:

$$[0011] \quad \left| \frac{W^m - W^{m-1}}{W^{m-1}} \right| \leq \varepsilon$$

[0012] 式中, $m$ 为迭代次数, $\varepsilon$ 为给定的模型迭代控制精度, $SN$ 为机组运行期内划分的时段数。

[0013] 有益效果:与现有技术相比,本发明具有如下显著优点:

[0014] (1) 对于模型目标函数,以一定运行期内提水总量最大为目标,既适用于南水北调等跨流域调水泵站机组在一定调水期和运行总能耗内的最大调水任务需求,又适用于具有

叶片可调功能的排涝泵站机组在给定时段内尽量提高排水量的实际需求。

[0015] (2) 对于模型约束条件,考虑到机组安全运行要求,设置了各时段机组运行的配套功率约束;考虑到水泵高效运行,尽可能降低运行能耗,设置了水泵效率约束;考虑到机组运行寿命,设置了机组运行期内满足不宜频繁开停机要求的开停机次数约束。由此可实现机组安全、稳定、高效运行下的提水总量最大化。

[0016] (3) 对于模型求解方法,包括两个层面:各时段叶片安放角缩小离散域及离散步长,和原模型一维动态规划求解。两个层面结合起来逐次逼近,直至满足迭代控制精度要求后,将模型求解获得的各时段最优叶片安放角及对应的机组最大提水总量,作为模型最终优化成果,供泵站管理单位借鉴和参考。采用在前次优化求解获得的叶片角优化路径基础上,直接在该优化叶片角附近缩小离散域及离散步长,而后逐次动态规划优化逼近,可克服传统方法的缺点,显著提升模型求解精度和效率。

## 附图说明

[0017] 图1为本发明的流程示意图。

## 具体实施方式

[0018] 下面结合附图对本发明的技术方案作进一步说明。

[0019] 如图1所示,本发明的步骤包括:

[0020] 1、模型构建:

[0021] (1) 以叶片可调泵站单机组一定运行期内提水量最大为目标,建立如下目标函数:

$$[0022] \quad W = \max \sum_{i=1}^{SN} \frac{3600 \cdot Q_i(\theta_i) \cdot \Delta T_i}{10000}$$

[0023] 式中,W为叶片可调泵站单机组各时段的最大提水总量(万 $m^3$ );SN为机组运行期内划分的时段数;i为时段编号( $i=1,2,\dots,SN$ ); $Q_i(\theta_i)$ 为第i时段对应于叶片安放角 $\theta_i$ 的水泵流量( $m^3/s$ ); $\Delta T_i$ 为第i时段的时段长(h)。

[0024] (2) 设置约束条件

[0025] 包括叶片可调泵站单机组运行总能耗约束,叶片安放角可行离散域约束,电机配套功率约束,机组开停机约束、水泵效率约束等。

[0026] (21) 叶片可调泵站单机组运行总能耗 $E_m$ 约束:

$$[0027] \quad \sum_{i=1}^{SN} \frac{\rho \cdot g \cdot Q_i(\theta_i) \cdot H_i \cdot \Delta T_i}{\eta_{z,i}(\theta_i) \cdot \eta_{int} \cdot \eta_{mot}} \leq E_m$$

[0028] (22) 电机配套功率约束:运行时机组实际功率不超过与水泵相联的电机配套功率:

$$[0029] \quad \frac{\rho \cdot g \cdot Q_i(\theta_i) \cdot H_i}{\eta_{z,i}(\theta_i) \cdot \eta_{int} \cdot \eta_{mot}} \leq N_0$$

[0030] (23) 水泵效率约束:使水泵运行于高效区,应满足:

$$[0031] \quad \eta_{z, \min} \leq \eta_{z,i}(\theta_i) \leq \eta_{z, \max}$$

[0032] (24) 机组开停机约束:

[0033]  $M \leq M_{\max}$

[0034] 式中,  $\rho$ 为水的密度,取 $10^3 \text{kg/m}^3$ ,  $g$ 为重力加速度,取 $9.8 \text{m/s}^2$ ,  $\eta_{z,i}(\theta_i)$ 为第 $i$ 时段对应于叶片安放角 $\theta_i$ 的水泵效率,  $H_i$ 为各时段时均扬程,  $E_0$ 为机组给定运行总能耗,  $\eta_{z \min}$ 和 $\eta_{z \max}$ 为水泵效率约束,  $\eta_{\text{int}}$ 为传动机构效率,  $\eta_{\text{mot}}$ 为配套电机效率,  $N_0$ 为电机额定功率,  $M$ 为水泵运行期内开停机次数,  $M_{\max}$ 为运行期内机组允许开停机次数。

[0035] 2、模型求解

[0036] (1) 数据准备, 具体包括:

[0037] (11) 水泵机组参数: 对于给定型号的泵装置, 对应模型试验报告上各整数度叶片安放角下的装置模型试验参数已知, 即若干个典型叶片安放角性能特性方程可由下表计算获得。另外, 设定水泵效率约束 $\eta_{z \min}$ 和 $\eta_{z \max}$ , 传动机构效率 $\eta_{\text{int}}$ , 配套电机效率 $\eta_{\text{mot}}$ , 电机额定功率 $N_0$ 。

[0038] 表1水泵性能特性曲线方程

序号	叶片安放角	扬程~流量关系方程 ( $H-Q$ 关系)	水泵效率~流量关系方程 ( $\eta-Q$ 关系)
1	$\theta_1$	$H=a_{11}Q^2+b_{11}Q+c_{11}$	$\eta=a_{12}Q^3+b_{12}Q^2+c_{12}Q+d_{12}$
2	$\theta_2$	$H=a_{21}Q^2+b_{21}Q+c_{21}$	$\eta=a_{22}Q^3+b_{22}Q^2+c_{22}Q+d_{22}$
...	...	...	...
$j$	$\theta_j$	$H=a_{j1}Q^2+b_{j1}Q+c_{j1}$	$\eta=a_{j2}Q^3+b_{j2}Q^2+c_{j2}Q+d_{j2}$

[0040] (12) 时间参数: 机组运行总时长 $T$ , 运行期划分的时段数 $SN$ , 每一时段对应的时段长度 $\Delta T_i$  (应满足 $\sum_{i=1}^{SN} \Delta T_i = T$ )。

[0041] (13) 运行参数: 机组给定运行总能耗 $E_0$ , 运行期内各时段水泵运行扬程 $H_i$ , 运行期内允许开停机次数 $M_{\max}$ 。

[0042] (2) 基于叶片安放角离散域逐次缩小均匀离散的一维动态规划逐次逼近优化方法

[0043] 参照逐次逼近和动态规划求解原理, 具体过程包括:

[0044] (21) 原模型以一定运行期内水泵提水总量最大为目标, 以时段 $i$ 为阶段变量, 各时段水泵叶片安放角 $\theta_i$ , 为决策变量, 前 $i$ 个阶段水泵总能耗为状态变量 $\lambda$ 的阶段可分的一维动态规划模型, 可采用一维动态规划法求解。

[0045] 进一步地, 参照一维动态规划求解原理, 得对应递推方程为:

[0046] (211) 阶段 $i=1$ :

[0047] 
$$g_1(\lambda) = \max \frac{3600 \cdot Q_1(\theta_1) \cdot \Delta T_1}{10000}$$

[0048] 式中, 状态变量 $\lambda_1$ 表示第1个时段水泵机组运行能耗, 其可在对应可行域内离散:  $\lambda_1 = 0, E_1, E_2, \dots, E_m$ 。  $g_1(\lambda_1)$ 为对应于第1个时段水泵机组运行能耗 $\lambda_1$ 时的泵站单机组最大提水量。对每个离散的 $\lambda_1$ , 决策变量 $\theta_1$ 可参考表1所列已有模型试验数据的给定叶片安放角, 离散可行域下边界对应为最小叶片安放角 $\theta_{i, \min}$ , 上边界应为不超过机组电机配套功率 $N_0$ 要求下对应的最大叶片安放角 $\theta_{i, \max}$ , 且离散步长 $BC$ 可取整数度均匀步长, 如 $-4^\circ, -2^\circ, 0^\circ, +2^\circ, +4^\circ$ 等, 分别代入表1对应水泵性能曲线方程, 计算对应 $Q_1(\theta_1)$ 及 $\eta_{z,1}(\theta_1)$ , 应同时满足约束条件, 由此可分别得到每个离散 $\lambda_1$ 值时, 最优 $\theta_1$ 及其对应的 $g_1(\lambda_1)$ 。

[0049] (212) 阶段  $i=2,3,\dots,SN-1$ :

$$[0050] \quad g_i(\lambda_i) = \max \left[ \frac{3600 \cdot Q_i(\theta_i) \cdot \Delta T_i}{10000} + g_{i-1}(\lambda_{i-1}) \right]$$

[0051] 式中, 状态变量  $\lambda_i$  为前  $i$  个时段的水泵机组运行总能耗, 同样分别进行离散:  $\lambda_i = 0, E_1, E_2, \dots, E_m$ 。  $g_i(\lambda_i)$  为对应于前  $i$  个时段水泵机组运行总能耗  $\lambda_i$  时的泵站单机组最大提水总量。对每个离散的  $\lambda_i$ , 决策变量  $\theta_{i,1}$  离散同上, 并应满足:  $\eta_{z, \min} \leq \eta_{z,i}(\theta_i) \leq \eta_{z, \max}$ 。

[0052] 此时, 根据一维动态规划求解步骤, 得状态转移方程为:

$$[0053] \quad \lambda_{i-1} = \lambda_i - \frac{\rho \cdot g \cdot Q_i(\theta_i) \cdot H_i \cdot \Delta T_i}{\eta_{z,i}(\theta_i) \cdot \eta_{int} \cdot \eta_{mot}}$$

[0054] 式中,  $i=2,3,\dots,SN-1$ 。

[0055] 将按以上方法整数度均匀离散的各  $\theta_i$  值分别代入表1, 求解对应的  $Q_i(\theta_i)$  及  $\eta_{z,i}(\theta_i)$ ; 而后, 将求得的  $Q_i(\theta_i)$  代入  $g_i(\lambda_i)$ , 根据状态转移方程式对每一个离散的  $\theta_i$ , 查找  $i-1$  阶段  $g_{i-1}(\lambda_{i-1})$  值, 应满足:

$$[0056] \quad \frac{\rho \cdot g \cdot Q_i(\theta_i) \cdot H_i \cdot \Delta T_i}{\eta_{z,i}(\theta_i) \cdot \eta_{int} \cdot \eta_{mot}} + \lambda_{i-1} \leq \lambda_i$$

[0057] 由此获得  $\frac{3600 \cdot Q_i(\theta_i) \cdot \Delta T_i}{10000} + g_{i-1}(\lambda_{i-1})$ , 完成以上所有离散的  $\theta_i$  寻优后, 最终可获得

满足  $\max \left[ \frac{3600 \cdot Q_i(\theta_i) \cdot \Delta T_i}{10000} + g_{i-1}(\lambda_{i-1}) \right]$  要求的最优  $\theta_i$  过程及其对应的  $g_i(\lambda_i)$ 。

[0058] (213) 阶段  $SN$ :

$$[0059] \quad g_{SN}(\lambda_{SN}) = \max \left[ \frac{3600 \cdot Q_{SN}(\theta_{SN}) \cdot \Delta T_{SN}}{10000} + g_{SN-1}(\lambda_{SN-1}) \right]$$

[0060] 式中, 状态变量  $\lambda_{SN}$  为前  $SN$  时段的水泵机组运行总能耗:  $\lambda_{SN} = E_m$ ; 决策变量 (水泵叶片安放角  $\theta_{SN}$ ) 同样按以上方法在对应可行域内整数度均匀离散。

[0061] 状态转移方程:

$$[0062] \quad \lambda_{SN-1} = \lambda_{SN} - \frac{\rho \cdot g \cdot Q_i(\theta_i) \cdot H_i \cdot \Delta T_i}{\eta_{z,i}(\theta_i) \cdot \eta_{int} \cdot \eta_{mot}}$$

[0063] 采用步骤 (212) 所述方法, 最终获得目标函数最优值, 此为初次优化, 故记为  $W^1 = g_{SN}(\lambda_{SN})$ , 以及对应的水泵最优叶片安放角过程  $\theta_i^1 (i=1,2,\dots,SN)$ 。

[0064] (22) 由步骤 (21) 优化求解得到的最优叶片安放角过程  $\theta_i^1 (i=1,2,\dots,SN)$ , 实际是通过表1水泵装置性能特性曲线给出的若干个典型整数度叶片安放角之间寻优确定。为了尽量充分利用给定能耗总量, 同时尽可能使提水量最大化, 考虑到叶片可调节组的无级调节特点, 为此, 针对步骤 (1) 所得各时段最优水泵叶片安放角过程  $\theta_i^1 (i=1,2,\dots,SN)$ , 进一步离散后采用一维动态规划发寻优。具体为:

[0065] 优化获得的各时段最优叶片安放角  $\theta_i^1 (i=1,2,\dots,SN)$  为基础, 分别对各时段叶片安放角进一步离散。离散域可为  $[\theta_i^1 - LS_1, \theta_i^1 + LS_1]$ ,  $LS_1$  可取为  $2^\circ$ , 离散步长  $BC$  可取  $1^\circ$ , 同样

参考步骤(1),采用一维动态规划法求解,获得各时段最优叶片安放角 $\theta_i^2$  ( $i=1,2,\dots,SN$ ),以及对应的机组运行期内最小提水耗电费用 $W^2$ 。

[0066] (23)以步骤(22)获得的各时段最优叶片安放角 $\theta_i^2$  ( $i=1,2,\dots,SN$ )为基础,分别对各时段叶片安放角进一步离散。离散域可为 $[\theta_i^1-LS_2, \theta_i^1+LS_2]$ ,  $LS_2$ 可取为 $1^\circ$ ,离散步长BC可取 $0.5^\circ$ ,同时,新离散的叶片安放角对应的 $H\sim Q$ 和 $\eta_z\sim Q$ 性能特性曲线方程,应根据已有方程,根据叶片角度大小内插确定;若前一次优化求解后获得的某个或某几个时段叶片安放角已位于可行离散域的上(下)边界处,则本次逼近时,该时段(或该几个时段)叶片安放角无需进一步离散,仅离散其他时段叶片安放角,从而进一步减少模型求解工作量。由此,同样采用一维动态规划法求解,获得各时段最优叶片安放角 $\theta_i^3$  ( $i=1,2,\dots,SN$ ),以及对应的机组运行期内最小提水耗电费用 $W^3$ 。

[0067] (24)由此重复以上步骤(21)~(23),通过决策变量缩小离散域LS及离散步长BC后的逐次逼近优化方法(如逐次逼近时离散步长BC可分别取 $1^\circ$ 、 $0.5^\circ$ 、 $0.2^\circ$ 、 $0.1^\circ$ 等),直到

$\left| \frac{W^m - W^{m-1}}{W^{m-1}} \right| \leq \varepsilon$ ,则可以认为满足迭代控制精度 $\varepsilon$ 要求;同时,检验满足该控制精度要求下,

水泵运行期内开停机次数M是否满足 $M \leq M_{\max}$ ,由此将获得的 $W^m$ 作为单机组叶片全调节优化运行最大提水总量,对应的叶片安放角 $\theta_i^m$  ( $i=1,2,\dots,SN$ )为各时段最优叶片安放角组合。考虑到减少优化求解工作量,优化次数最多控制为 $m=5$ ,或叶片角离散步长BC取到 $0.1^\circ$ ,也可认为达到优化效果,求解结束。

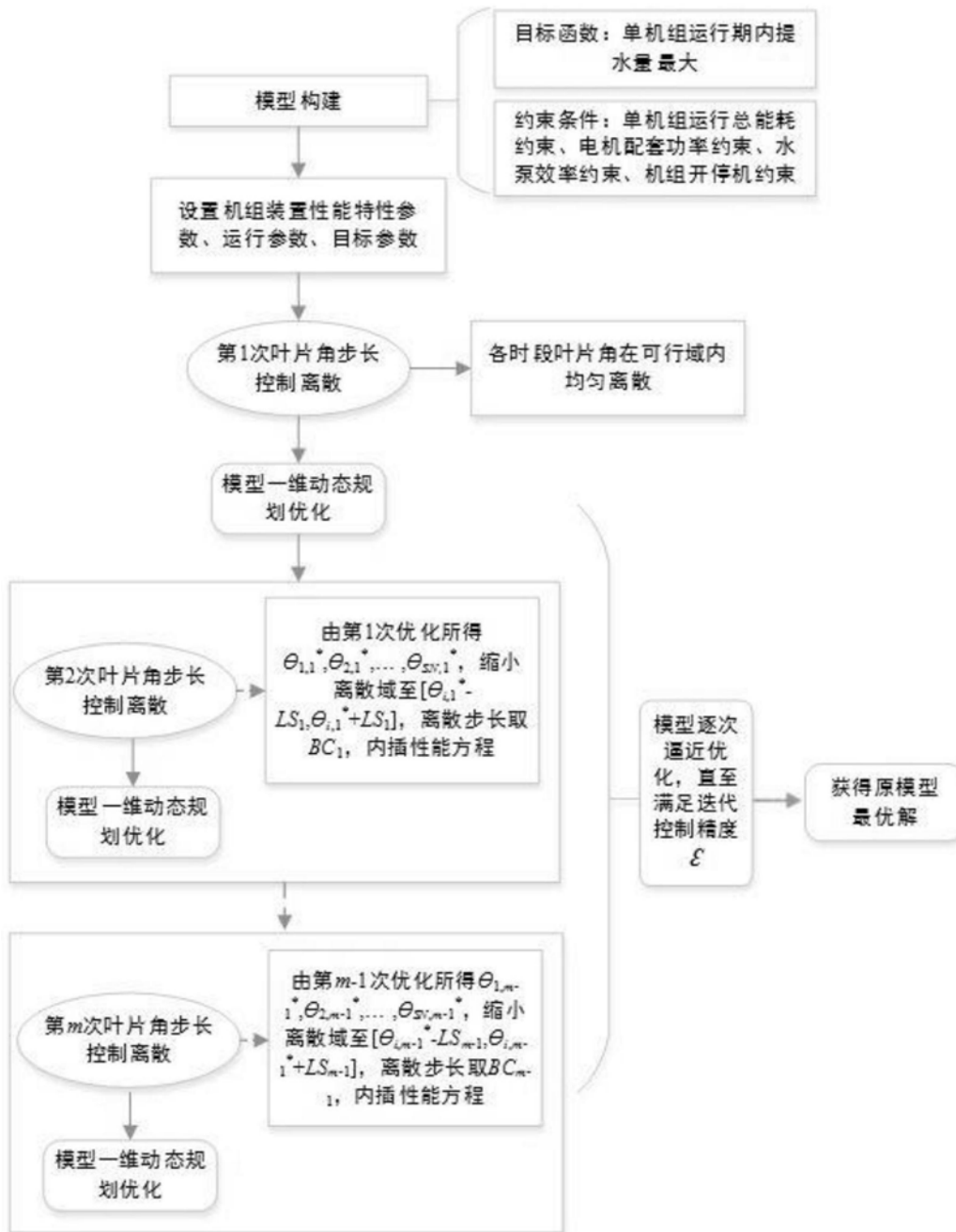


图1